

С. М. Левицький, канд. техн. наук, доц.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРОМ ПОПЕРЕЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ

*Розглянуто спосіб побудови математичної моделі пристрою керування трансформатором поперечного регулювання для системи поздовжньо-поперечного регулювання напруги з використанням елементів нечітких множин.*

### Постановка проблеми

Існуючі пристрої автоматичного керування трансформаторами для поперечного регулювання напруги з електромеханічним перемиканням регульованих відгалужень (РПН) працюють у відповідності до законів керування, які потребують удосконалення. Розроблені закони керування в цілому задовольняють усталені режими роботи електричних систем, оскільки націлені на мінімізацію втрат потужності [1]. Однак динамічні показники таких систем недостатні, оскільки переслідують мету або підвищення якості регулювання, що призводить до прискореного зносу пристроїв РПН внаслідок проведення додаткових перемикань, або ж націлені на забезпечення довговічності тих же пристроїв РПН, що негативно відбивається на якості регулювання [2]. Тому існує *проблема* розробки законів регулювання та математичних моделей пристроїв для автоматичного керування трансформаторами з урахуванням динамічних показників якості систем.

### Аналіз останніх досліджень

В електроенергетичних системах застосовуються мікропроцесорні пристрої для автоматичного контролю та керування функціонуванням трансформаторів та автотрансформаторів з поздовжньо-поперечним регулюванням [3]. В подібних пристроях для формування сигналу керування і його узгодження з системою диспетчерського управління верхнього рівня використовується імітаційне моделювання, тривалість обробки результатів якого позначається на динамічних показниках системи, погіршуючи їх. Внаслідок того, що замкнена електрична мережа з трансформаторними зв'язками як об'єкт керування описується системою нелінійних диференціальних рівнянь, то застосування принципів нечіткого керування дозволяє уникнути громіздких пошуків розв'язку рівнянь, а похибка прийнятого рішення є прийнятною [4].

### Постановка задачі

Таким чином, постає *задача* побудови математичної моделі пристрою керування трансформаторами поперечного регулювання напруги зі застосуванням елементів нечітких множин, що дозволить реалізувати автоматичний регулятор на контролері з підтримкою команд *Fuzzy Logic* та покращити якість регулювання напруги в системах електропостачання з оглядом на надійність пристроїв РПН.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно розробити структуру моделі отримання нечіткого висновку про проведення перемикання пристроєм РПН трансформатора поперечного регулювання, визначити вхідні змінні та їх можливий діапазон зміни, обґрунтувати функції належності та сформулювати правила прийняття висновку в умовах нечітких множин.

### Матеріали дослідження

Під час роботи трансформатора поперечного регулювання в замкненій електричній системі з трансформаторними зв'язками по стороні високої та низької напруг (рис. 1) зміна коефіцієнта трансформації останнього буде спричиняти зміну перетоків потужності між трансформаторними підстанціями 1 та 2 [5]. Такі системи мають місце в живильних електричних мережах, також відоме їх застосування в розподільних мережах [6]. Введення поперечної вольтдобавки в контур системи буде викликати відхилення напруги на виводах підстанцій та, відповідно, вводах споживачів. От-

же, в якості вхідних величин  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  для математичної моделі пристрою керування виділимо параметри, за якими можна судити про якість поперечного регулювання напруги, а саме: навантаження підстанції 1, навантаження підстанції 2, сумарне навантаження електричної системи, напруга на вводах споживачів та похідна обвідної реактивної потужності, яка передається від підстанції 1 до підстанції 2. Остання величина в якості вхідної вибрана з метою забезпечення умови економії ресурсу перемикачів пристрою РПН трансформатора поперечного регулювання (ТПР). Вихідною величиною  $Y = (d_1, d_2, \dots, d_m)$  є коефіцієнт трансформації ТПР, що приймає значення в межах  $[-0,05; +0,05]$ .

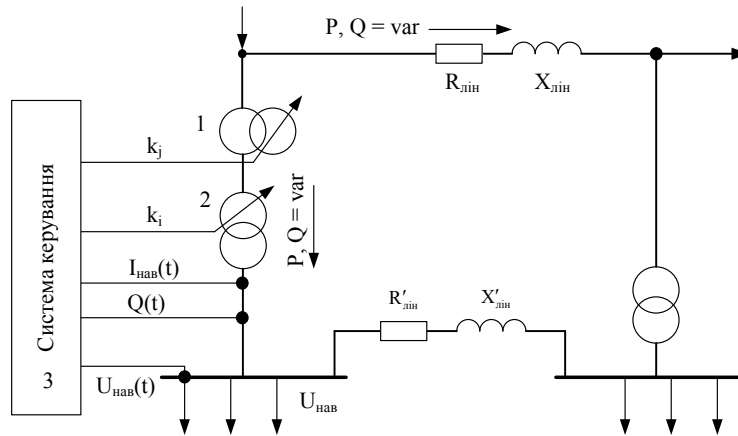


Рис. 1. Структурна схема фрагменту електричної системи з трансформатором поперечного регулювання та силовим трансформатором з РПН: 1 — трансформатор поперечного регулювання (ТПР); 2 — силовий трансформатор з РПН; 3 — система керування

Математична модель нечіткого логічного висновку про проведення чергового перемикачів пристроєм РПН ТПР матиме структуру, зображену на рис. 2.

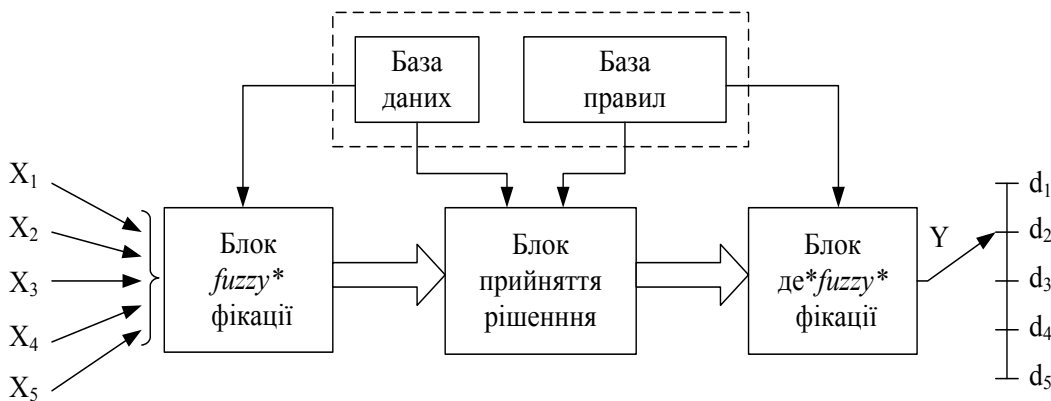


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі пристрою керування ТПР з нечітким висновком про проведення перемикачів

Визначимо діапазон зміни вхідних і вихідних величин та проведемо їх лінгвістичну оцінку, згідно з термінами, що занесені до табл. 1.

Таблиця 1

**Характеристика вхідних та вихідних величин математичної моделі нечіткого висновку про проведення чергового перемикачів ТПР**

Параметри	Назва	Діапазон значень	Терми
$X_1$	Відносне значення навантаження підстанції 1	$(0,2 \dots 1,2)I_{ном}$	Дуже мале (ДМ), мале (М), середнє (С), велике (В), дуже велике (ДВ)
$X_2$	Відносне значення навантаження підстанції 2	$(0,2 \dots 1,2)I_{ном}$	Дуже мале (ДМ), мале (М), середнє (С), велике (В), дуже велике (ДВ)
$X_3$	Відносне значення сумарного навантаження	$(0,1 \dots 2,4)I_{ном}$	Мале (М), середнє (С), високе (В)

Параметри	Назва	Діапазон значень	Терми
$X_4$	Відносне значення напруги на вводах споживачів	$(0,9\dots 1,1)U_{ном}$	Дуже мале (ДМ), мале (М), середнє (С), велике (В), дуже велике (ДВ)
$X_5$	Похідна огинаючої реактивної потужності між підстанціями 1 та 2	$-2\dots +2$	Швидко знижується (ДН), повільно знижується (Н), не змінюється (0), повільно зростає (В), швидко зростає (ДВ)
$Y$	Коефіцієнт трансформації ТПП	$(-0,05\dots +0,05)$	Зменшити вольтодобавку вдвічі ( $d_1$ ), зменшити вольтодобавку ( $d_2$ ), зняти вольтодобавку ( $d_3$ ), збільшити вольтодобавку ( $d_4$ ), збільшити вольтодобавку вдвічі ( $d_5$ )

Наступним кроком створення нечіткої математичної моделі є *fuzzy*-фікація вхідних величин  $X$  згідно з термами, і отримання нечіткої множини  $\tilde{X}$ . Для цього використаємо функцію належності Гаусса (1), що відповідає нормальному закону розподілу належності вхідної величини до вибраних термів згідно з центральною граничною теоремою [7]:

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right), \quad (1)$$

де  $b$  — координата максимуму;  $c$  — коефіцієнт концентрації.

Параметри функції належності вхідних величин наведені в табл. 2.

Таблиця 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	0,2	0,093	$X_4$	ДМ	0,9	0,152
	М	0,422			М	0,95	
	С	0,685			С	1,0	
	В	0,939			В	1,05	
	ДВ	1,2			ДВ	1,1	
$X_2$	ДМ	0,2	0,093	$X_5$	ДН	-2	0,31
	М	0,422			Н	-1	
	С	0,685			0	0	
	В	0,939			В	1	
	ДВ	1,2			ДВ	2	
$X_3$	М	0,1	0,39	$Y$	-5 %	-0,05	0,02
	С	1,25			-2,5 %	-0,025	
	В	2,4			0 %	0	
					+2,5 %	0,025	
					+5 %	0,05	

Для функціонування математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформувати експертну базу знань нечітких правил, яка містить лінгвістичні правила залежності  $Y=f(X)$ . Базу знань можна подати у вигляді [8]

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

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

База знань нечітких правил подана у вигляді табл. 3.

База знань нечітких правил

Входи					Вихід $Y$
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	
ДМ М С	С В ДВ	М С С	В С М	ДН ДН ДН	$d_1$
ДМ М С В	М С В ДВ	М С С В	ДВ В М ДМ	Н Н Н Н	$d_2$
М С В	М С В	М С В	В С М	0 0 0	$d_3$
М С В ДВ	ДМ М С В	М С С В	ДВ В М ДМ	В В В В	$d_4$
С В ДВ	ДМ М С	М С С	В С М	ДВ ДВ ДВ	$d_5$

Для отримання результатів моделювання складемо на основі експертної бази знань і термів функції належності базу нечітких логічних рівнянь, при цьому будемо використовувати операції « $\vee$ » ( $I$  — min) та « $\wedge$ » (АБО — max). Нечітке рівняння для виходів  $Y$  подамо у вигляді системи (3).

$$\begin{aligned}
 \mu^{d^1}(d) &= \left[ \mu^{\text{ДМ}}(X_1) \cdot \mu^{\text{С}}(X_2) \cdot \mu^{\text{М}}(X_3) \cdot \mu^{\text{В}}(X_4) \cdot \mu^{\text{ДН}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{М}}(X_1) \cdot \mu^{\text{В}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{С}}(X_4) \cdot \mu^{\text{ДН}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{С}}(X_1) \cdot \mu^{\text{ДВ}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{М}}(X_4) \cdot \mu^{\text{ДН}}(X_5) \right]; \\
 \mu^{d^2}(d) &= \left[ \mu^{\text{ДМ}}(X_1) \cdot \mu^{\text{М}}(X_2) \cdot \mu^{\text{М}}(X_3) \cdot \mu^{\text{ДВ}}(X_4) \cdot \mu^{\text{Н}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{М}}(X_1) \cdot \mu^{\text{С}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{В}}(X_4) \cdot \mu^{\text{Н}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{С}}(X_1) \cdot \mu^{\text{В}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{М}}(X_4) \cdot \mu^{\text{Н}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{В}}(X_1) \cdot \mu^{\text{ДВ}}(X_2) \cdot \mu^{\text{В}}(X_3) \cdot \mu^{\text{ДМ}}(X_4) \cdot \mu^{\text{Н}}(X_5) \right]; \\
 \mu^{d^3}(d) &= \left[ \mu^{\text{М}}(X_1) \cdot \mu^{\text{М}}(X_2) \cdot \mu^{\text{М}}(X_3) \cdot \mu^{\text{В}}(X_4) \cdot \mu^0(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{С}}(X_1) \cdot \mu^{\text{С}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{С}}(X_4) \cdot \mu^0(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{В}}(X_1) \cdot \mu^{\text{В}}(X_2) \cdot \mu^{\text{В}}(X_3) \cdot \mu^{\text{М}}(X_4) \cdot \mu^0(X_5) \right]; \\
 \mu^{d^4}(d) &= \left[ \mu^{\text{М}}(X_1) \cdot \mu^{\text{ДМ}}(X_2) \cdot \mu^{\text{М}}(X_3) \cdot \mu^{\text{ДВ}}(X_4) \cdot \mu^{\text{В}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{С}}(X_1) \cdot \mu^{\text{М}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{В}}(X_4) \cdot \mu^{\text{В}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{В}}(X_1) \cdot \mu^{\text{С}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{М}}(X_4) \cdot \mu^{\text{В}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{ДВ}}(X_1) \cdot \mu^{\text{В}}(X_2) \cdot \mu^{\text{В}}(X_3) \cdot \mu^{\text{ДМ}}(X_4) \cdot \mu^{\text{В}}(X_5) \right]; \\
 \mu^{d^5}(d) &= \left[ \mu^{\text{С}}(X_1) \cdot \mu^{\text{ДМ}}(X_2) \cdot \mu^{\text{М}}(X_3) \cdot \mu^{\text{В}}(X_4) \cdot \mu^{\text{ДВ}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{В}}(X_1) \cdot \mu^{\text{М}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{С}}(X_4) \cdot \mu^{\text{ДВ}}(X_5) \right] \vee \\
 &\vee \left[ \mu^{\text{ДВ}}(X_1) \cdot \mu^{\text{С}}(X_2) \cdot \mu^{\text{С}}(X_3) \cdot \mu^{\text{М}}(X_4) \cdot \mu^{\text{ДВ}}(X_5) \right].
 \end{aligned} \tag{3}$$

Слід зазначити, що в рівняння не входять вагові коефіцієнти правил, так як для грубої настройки вони приймаються рівними одиниці. Маючи виміряні вхідні величини  $X$ , використовуючи розроблену модель (3), знаходимо нечітку множину  $\tilde{Y}$ , з якої після операції де\*fuzzy\*фікації, за методом центра ваги отримуємо значення коефіцієнта трансформації ТПР, на який слід провести чергове перемикання пристроєм РПН. Використовуючи розроблену математичну модель, можна на базі контролера, що володіє інструкціями для апаратної підтримки Fuzzy Logic (наприклад Motorola M68HC12 [9]), реалізувати автоматичний регулятор для керування трансформаторами поперечного регулювання.

Математична модель пристрою керування трансформатором поперечного регулювання на підставі знайденого розв'язку системи рівнянь (3) матиме вигляд

$$u_x(t) = k_1 \left[ \sqrt{(Q_{зад} - Q(t))^2 - k_2 (P(t) - P_{зад})^2} \right]; \tag{4}$$

$$k_j = \begin{cases} \frac{U_{j+1}}{U_{ВН}}, \text{ якщо } \begin{cases} u_x(t) < u_{нз.х}; \\ u_x(t - \tau) < u_{нз.х}; \end{cases} & \frac{U_{j-1}}{U_{ВН}}, \text{ якщо } \begin{cases} u_x(t) > u_{вз.х}; \\ u_x(t - \tau) > u_{вз.х}; \end{cases} \\ \frac{U_j}{U_{ВН}}, \text{ якщо } u_{нз.х} \leq u(t) \leq u_{вз.х}; & \Delta u_x = u_{вз.х} - u_{нз.х} = fuzzy(X_1; X_5), \end{cases}$$

де  $u_x(t)$  — напруга на виході ТПР (поперечна складова напруги на обмотці ВН основного трансформатора);  $U_j$  — ЕРС, що індукується в живильній обмотці ТПР на  $j$ -му відгалуженні,  $k_j$  — коефіцієнт трансформації на  $j$ -му відгалуженні ТПР,  $Q_{зад}$  — задане значення реактивної потужності, що визначає стійкий режим мережі з мінімальними відхиленнями напруги у вузлах електропостачання;  $k_1$  — коефіцієнт, що враховує чутливість пристрою автоматичного керування положенням РПН ТПР;  $k_2$  — коефіцієнт, що визначає вагу активної потужності в формуванні регулюючого впливу за допомогою ТПР;  $u_{вз.х}$ ,  $u_{нз.х}$  — верхня та нижня границі зони нечутливості  $\Delta u_x$ , що задається, виходячи з розв'язку системи нечітких рівнянь (3).

Моделювання розробленої системи рівнянь (3) з використанням компонент теорії нечітких множин здійснено в середовищі Matlab. Результати моделювання наведені на рис. 3, 4.

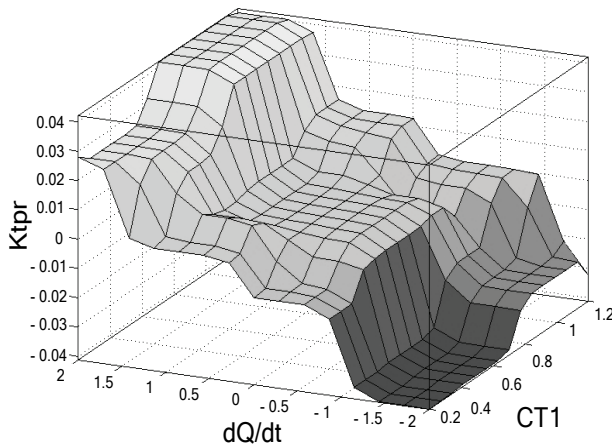


Рис. 3. Залежність коефіцієнта трансформації ТПР  $Ktrpr$  від похідної обвідної реактивної потужності  $dQ/dt$  та навантаження підстанції 1 СТ1

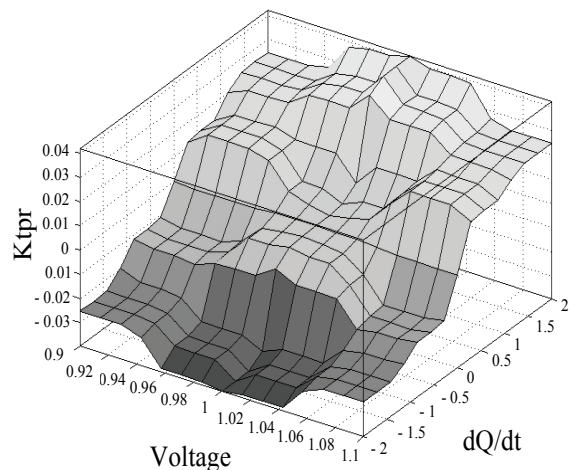


Рис. 4. Залежність коефіцієнта трансформації ТПР  $Ktrpr$  від напруги на вводах споживачів Voltage та похідної обвідної реактивної потужності  $dQ/dt$

## Висновки

В статті розроблено математичну модель пристрою керування трансформатором поперечного регулювання напруги з використанням елементів теорії нечітких множин, що дозволяє реалізувати пристрій керування на базі контролера з підтримкою *Fuzzy Logic* та збільшити надійність систем керування трансформаторами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П. Д. Оптимальное управление потоками мощности и напряжением в неоднородных электрических сетях : монография / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 188 с. — ISBN 966-641-083-4.
2. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.
3. Лежнюк П. Д. Регулювання напруги в електричних системах : навч. посіб. / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар. — 2-е вид. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. — 171 с.
4. Чистяков Георгий Николаевич. Применение нечеткой логики при оптимизации компенсации реактивных нагрузок / Г. Н. Чистяков, Р. Ю. Беляев // Электрика. — 2006. — № 12. — С. 20 — 24.
5. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) / В. Г. Холмский — М. : Высшая школа, 1975. — 280 с.
6. Информационный лист. Установка на коммутационных аппаратах автоматического секционирования в сети 6–20 кВ универсальных устройств релейной защиты и автоматики / ред. В. Н. Шварцберг. — Рига : ЛатНИИИТИ. — 1983. — № 83—291. — Серия 44.29.37. — 3 с.
7. Тутубалин Валерий Николаевич. Теория вероятностей и случайных процессов : учеб. пособие / В. И. Тутубалин. — М. : Изд-во МГУ, 1992. — 400 с. — ISBN 5-211-02264-5.
8. Штовба Сергей Дмитриевич. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М. : Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с. — ISBN 5-93517-329-X.
9. M68HC12 Microcontrollers. Advance iformation. — Motorola Inc., 2003. — 432 p. — 68HC(9)12D60 — Rev. 4.0.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 11.02.11  
Рекомендована до друку 24.03.11

**Левицький Сергій Михайлович** — доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця