
**НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ,
ГЕНЕТИЧНІ АЛГОРИТМИ
І ФАЗЗИ-ЛОГІКА В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ**

**NEURAL NETWORKS, GENETIC
ALGORITHMS AND FUZZY LOGIC
IN ELECTROMECHANICS**

УДК 621.314.214

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВПЛИВУ ТРАНСФОРМАТОРА НИЖНЬОГО РІВНЯ В ЗАДАЧІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТРАНСФОРМАТОРА З ПРИСТРОЄМ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

В. В. Грабко, І. В. Бальзан

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: vgrabko@gmail.com, igor.balzan@gmail.com

З використанням математичного апарату теорії нечітких множин розроблено математичну модель, використання якої дозволяє визначити величину впливу кожного трансформатора нижнього рівня у дворівневій системі регулювання напруги. За сумарним впливом трансформаторів нижнього рівня, що характеризує відхилення напруги споживачів за допустимі межі, регулятор здійснює перемикання відгалуження трансформатора з пристроєм регулювання під навантаженням районної підстанції, внаслідок чого якість напруги споживачів електроенергії підвищується.

Ключові слова: силовий трансформатор, коефіцієнт впливу, регулювання напруги, нечітка логіка.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЛИЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА НИЖНЕГО УРОВНЯ В ЗАДАЧЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ТРАНСФОРМАТОРА С УСТРОЙСТВОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

В. В. Грабко, И. В. Бальзан

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: vgrabko@gmail.com, igor.balzan@gmail.com

С использованием математического аппарата теории нечетких множеств разработана математическая модель, использование которой позволяет определить величину влияния каждого трансформатора нижнего уровня в двухуровневой системе регулирования напряжения. По суммарному воздействию трансформаторов нижнего уровня, которое характеризует отклонение напряжения потребителей за допустимые пределы, регулятор осуществляет переключение ответвления трансформатора с устройством регулирования под нагрузкой районной подстанции, вследствие чего качество напряжения потребителей электроэнергии повышается.

Ключевые слова: силовый трансформатор, коэффициент влияния, регулирование напряжения, нечеткая логика.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В задачі регулювання напруги за допомогою силових трансформаторів з пристроями регулювання під навантаженням (РПН) основною вимогою є підвищення якості електропостачання споживачів. У роботі [1] пропонується підхід, який передбачає поєднання в єдину систему регулювання напруги трансформатора з пристроєм РПН районної підстанції та трансформаторів кінцевих підстанцій. При цьому передбачається вимірювання напруги на шинах кінцевих підстанцій та передача цієї інформації по каналах зв'язку в регулятор районної підстанції. Перемикання відгалуження пристрою РПН районної підстанції здійснюється за умови, коли більшість трансформаторів кінцевих підстанцій буде інформувати про необхідність підвищення (зниження) напруги.

Закон регулювання напруги для запропонованої системи має вигляд (1), де K_m – коефіцієнт трансформації трансформатора з пристроєм РПН; $u(t)$ – регульовальна дія, яка формується регулятором; $u_{n,z}$, $u_{v,z}$ – нижня й верхня границі його зони нечутливості, які задаються з умов надійності; U_y – уставка регулятора, яка відповідає номінальній напрузі U_{nom} на шинах підстанції; $U(t)$ – поточне значення цієї напруги; I_{min} – струм, що знімається з шин підстанції в режимі мінімуму навантаження; $I(t)$ – поточне значення цього струму; $U_{n,n}$ – напруга на шинах низької сторони трансформатора; U_i – напруга, що індукується в обмотці високої напруги трансформатора при підключенні i -го відгалуження; K_1 – коефіцієнт передачі блоку, що формує регульовальну дію, яка характеризує чутливість регулятора; K_2 – коефіцієнт, який визначає нахил характеристики зустрічного регулювання; τ_z – час затримки сигналу;

$\frac{dU_{og}}{dt}$ – похідна огинаючої контрольованої напруги; K_j – коефіцієнт впливу j -го трансформатора кінцевої підстанції; n – кількість трансформаторів кінцевих

підстанцій; K_p – пороговий коефіцієнт, що задає мінімальну кількість (суму вагових коефіцієнтів) трансформаторів, за сигналами яких дозволяється перемикання; m_{nj} , m_{vj} – коефіцієнти, які характеризують вихід за допустиму зону напруги живлення j -го трансформатора кінцевих підстанцій в сторону її зменшення або збільшення відповідно:

$$u(t) = K_1((U(t) - U_y) - K_2(I(t) - I_{min}));$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{n,n}}, & \text{якщо} \begin{cases} u(t) \leq u_{n,z}; \\ u(t - \tau_z) \leq u_{n,z}; \\ \frac{dU_{og}}{dt} \leq \left(\frac{dU_{og}}{dt}\right)_{\min}; \\ \sum_{j=1}^n K_j m_{n,j} > K_p; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{n,n}}, & \text{при } u_{n,z} < u(t) < u_{v,z}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{n,n}}, & \text{якщо} \begin{cases} u(t) \geq u_{v,z}; \\ u(t - \tau_z) \geq u_{v,z}; \\ \frac{dU_{og}}{dt} \geq \left(\frac{dU_{og}}{dt}\right)_{\min}; \\ \sum_{j=1}^n K_j m_{v,j} > K_p. \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

При цьому сигнали, що надходять з кінцевих підстанцій та характеризують рівень напруги на трансформаторах, описуються математичними виразами (2), в

яких $u_{II}(t)$ – поточне значення напруги на шинах трансформатора; $U_{IIн}$ – номінальна напруга на шинах трансформатора:

$$m_i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } u_{II}(t) > 0,95U_{IIн}; \\ 1, & \text{якщо } u_{II}(t) \leq 0,95U_{IIн}; \end{cases} \quad (2)$$

$$m_a = \begin{cases} 0, & \text{якщо } u_{II}(t) < 1,05U_{IIн}; \\ 1, & \text{якщо } u_{II}(t) \geq 1,05U_{IIн}. \end{cases}$$

Слід зазначити, що існує певна складність у визначенні K_j із (1) коефіцієнта впливу j -го трансформатора кінцевої підстанції. На даний коефіцієнт впливає велика кількість факторів. Тому виникає задача врахування факторів на точність визначення коефіцієнта впливу, що, в свою чергу, дозволить підвищити точність у прийнятті рішення про перемикання відгалуження трансформатора районної підстанції.

Метою роботи є розробка математичної моделі, за допомогою якої можна визначити ваговий коефіцієнт впливу трансформатора кінцевої підстанції у дворівневій системі регулювання напруги.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Припустимо, що на точність визначення коефіцієнта впливу трансформатора кінцевої підстанції впливають потужність трансформатора, завантаження трансформатора та його важливість.

Побудуємо математичну модель, що основана на методах нечіткої логіки [2], яка дозволила б визначити ваговий коефіцієнт впливу, що визначається диспетчерським персоналом.

На першому етапі побудови моделі потрібно визначити можливий діапазон зміни контрольованих параметрів, які впливають на визначення вагового коефіцієнта впливу трансформатора кінцевої підстанції, і проаналізувати їх. Вихідним показником моделі буде значення вагового коефіцієнта впливу.

З урахуванням зазначених зауважень вхідні параметри моделі та їх лінгвістична оцінка наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вхідні параметри моделі

Параметри	Назва	Діапазон зміни	Терми
x_1	Потужність трансформатора	0 кВА ... 250 кВА	низька (L), середня (M), висока (H)
x_2	Завантаження трансформатора	0 % ... 100 %	дуже низька (VL), низька(L), середня(M), висока (H), дуже висока (VH)
x_3	Важливість	0 % ... 100 %	низький(L), середній(M), високий (H)

Згідно з [2], задача полягає в тому, щоб кожному сполученню значень параметрів поставити у відповідність одне зі значень коефіцієнта впливу $d_j (j = \overline{1,7})$.

Верхню границю діапазону значень вагового коефіцієнта впливу потрібно визначити за виразом:

$$K_p = \frac{1}{n}, \quad (3)$$

де n – кількість трансформаторів кінцевих підстанцій. Для прикладу, знайдемо коефіцієнт впливу для чоти-

рьох трансформаторів кінцевих підстанцій. У цьому випадку діапазон зміни значень вагового коефіцієнту впливу буде знаходитись у межах від 0 до 0,25.

У відповідності з теорією нечітких множин [2] необхідно визначити рівні зміни вихідного показника. Ваговий коефіцієнт впливу будемо визначати на таких рівнях (термах): d_1 – дуже високий, d_2 – високий, d_3 – вище середнього, d_4 – середній, d_5 – нижче середнього, d_6 – низький, d_7 – дуже низький.

Наведені рівні $d_1...d_7$ будемо вважати характеристиками коефіцієнта впливу, а вихідним параметром розробленої моделі буде зміна коефіцієнта впливу, з використанням якого здійснюється коригування керуваної дії регулятора районної підстанції.

Структура моделі визначення коефіцієнта впливу зображена на рис. 1 у вигляді дерева логічного висновку (це граф, структура якого відображає класифікацію чинників $\{x_1...x_n\}$, які впливають на прогнозований чинник $\{d\}$), що відповідає співвідношенню

$$d = f(x_1, x_2, x_3). \quad (4)$$

Подальшим кроком моделювання є складання експертної бази знань.

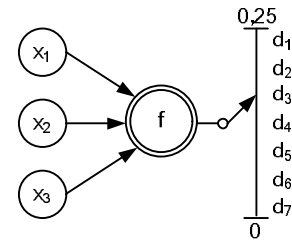


Рисунок 1 – Дерево логічного висновку

Користуючись введеними термами і знаннями експертів, надамо співвідношення (4) у вигляді нечіткої бази знань, що показана в табл. 2.

Таблиця 2 – Нечітка база знань

x_1	x_2	x_3	d	
H	VH	H	d_1	
H	H	H		
H	VH	M		
H	H	M		
M	VH	H	d_2	
H	M	H		
H	M	M		
H	VH	L		
M	H	H	d_3	
M	VH	M		
M	VH	L		
L	VH	H		
L	H	H		
L	VH	M		
H	VL	H		d_4
H	VL	M		
H	M	L		
H	L	L		
M	L	H		
M	H	M		
M	M	M		
M	H	L		
L	M	H		
L	H	M		
L	VH	L		

Продовження таблиці 2

x ₁	x ₂	x ₃	d
H	VL	L	d ₅
M	VL	H	
M	L	M	
M	M	L	
L	M	M	
L	H	L	
M	VL	M	d ₆
M	L	L	
L	L	H	
L	L	M	
L	M	L	
M	VL	L	d ₇
L	VL	H	
L	VL	M	
L	L	L	
L	VL	L	

Для лінгвістичної оцінки вхідних чинників x₁-x₃ використовуємо нечіткі терми. Представимо терми у вигляді нечітких множин, використовуючи модель функцій належності (ФН) [2]:

$$\mu^T(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (5)$$

де c і σ – параметри ФН: c – координата максимуму функції; σ – коефіцієнт концентрації-розтягування.

На основі бази знань і ФН термів, використовуючи операції • (І – min) і ∨ (АБО – max), складаємо нечіткі логічні рівняння, що описують цю модель. Ці логічні рівняння мають вигляд

$$\begin{aligned} \mu^{d1}(d) = & [(\mu^H(x_1) \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^H(x_3))]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d2}(d) = & [(\mu^H(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^H(x_3))]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d3}(d) = & [(\mu^H(x_1) \cdot \mu^L(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^L(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^M(x_3))]; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d4}(d) = & [(\mu^H(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^H(x_1) \cdot \mu^L(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^L(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^{VH}(x_2) \cdot \mu^L(x_3))]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d5}(d) = & [(\mu^H(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^L(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^L(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^L(x_3))]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d6}(d) = & [(\mu^M(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^M(x_1) \cdot \mu^L(x_2) \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^L(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^L(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^L(x_3))]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d7}(d) = & [(\mu^M(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^L(x_3)) \vee \\ & \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^H(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \\ & \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^M(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^L(x_2) \cdot \\ & \cdot \mu^L(x_3)) \vee (\mu^L(x_1) \cdot \mu^{VL}(x_2) \cdot \mu^L(x_3))]. \end{aligned} \quad (12)$$

Зауважимо, що ваги правил не зазначено, оскільки під час грубого налагодження їх значення дорівнюють одиницям.

Тепер, фіксуємо конкретні вхідні параметри моделі та застосовуючи запропоновану модель, для визначення чіткого значення вагового коефіцієнта впливу трансформатора кінцевої підстанції необхідно застосовувати один із відомих методів дефазифікації [2], наприклад, метод «центра ваги».

Зазначимо, що на значення вихідного результату можуть впливати якість правил у нечіткій базі знань, форми ФН, метод дефазифікації та способи виконання нечітко-логічних операцій. Крім того, доцільно параметри моделі оптимізувати, наприклад, шляхом застосування генетичного алгоритму.

Дослідження показують, що різні чинники по-різному впливають на результат вимірювання.

Результат математичного моделювання із застосуванням компонентів теорії нечітких множин з визначення коефіцієнта впливу зображено на рис. 2. Моделювання здійснювалось у середовищі Matlab [3].

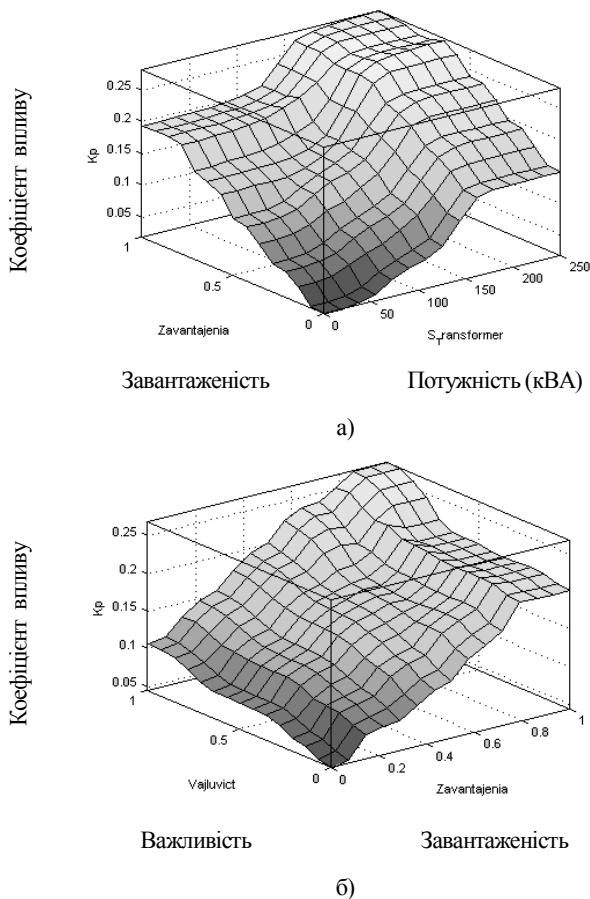


Рисунок 2 – Залежності коефіцієнта впливу від:
 а) рівня завантаження трансформатора та його потужності; б) важливості трансформатора та рівня його завантаження

Реалізуючи запропоновану математичну модель, наприклад, на базі Fuzzy контролера, логічно ввести в серійний регулятор напруги силового масляного трансформатора з пристроєм РПН блок для знаходження вагового коефіцієнта впливу, що дозволить підвищити якість напруги кінцевих споживачів електроенергії за умови регулювання напруги силовим трансформатором з пристроєм РПН районної підстанції та підвищити надійність роботи пристрою РПН за рахунок зменшення кількості перемикачів відгалужень силового трансформатора.

ВИСНОВКИ. З використанням математичного апарату теорії нечітких множин розроблено математичну модель, за допомогою якої можна визначити ваговий коефіцієнт впливу трансформаторів нижнього рівня на умову перемикачів відгалуження силового трансформатора з пристроєм РПН районної підстанції у дворівневій системі регулювання напруги й таким чином покращити якість електропостачання споживачів електроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грабко В.В., Балзан І.В. Регулювання напруги в електричних мережах у задачах надійності електропостачання та енергозбереження // Технічна електродинаміка. Науково-прикладний журнал. – К.: Національна академія наук України, 2012. – № 3. – С. 39–40. – ISSN 1607-7970, E-ISSN 2218-1903.
2. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.
3. Леоненко А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БВХ-Петербург, 2003. – 736 с.

THE DETERMINATION OF THE INFLUENCING FACTOR OF THE TRANSFORMER OF THE LOW LEVEL IN THE TASK OF VOLTAGE REGULATION BY TRANSFORMER WITH UNDER LOAD CONTROL DEVICE

V. Grabko, I. Balzan

Vinnitsia National Technical University

Khmelnyske shose, 95, 21021, Vinnitsia, 21021, Ukraine. E-mail: vgrabko@gmail.com, igor.balzan@gmail.com

With the use of the mathematical apparatus of fuzzy set theory there had been developed the mathematical model, the use of which allows to determine the influence value of every transformer on the low level in the two level system for voltage regulation. Following the total influence of transformers of the low level, which characterizes the consumer voltage deviation beyond the permissible limits, the regulator switches the transformer connectors with the device for under voltage regulation of the regional substation which results in the improvement of the consumer voltage quality.

Key words: power transformer, index of influence, voltage control, fuzzy logic.

REFERENCES

1. Grabko V.V., Balzan I.V. Voltage regulation in electric nets in the tasks of electric energy supply and energy savings // Technical Electrodynamics. Scientific and applied journal. – K.: NASU, 2012. – № 3. – PP. 39–40. ISSN 1607-7970, E-ISSN 2218-1903. [in Ukrainian]
2. Rotshtein A.P. *Intelligent technologies of identification: fuzzy sets, genetic algorithms, neuron networks.* – Vinnitsia: UNIVERSUM-Vinnitsia, 1999. – 320 p. [in Russian]
3. Leonenko A.V. *Fuzzy simulation in MATLAB and fuzzyTECH environment.* – SPb.: BVKh-Peterburg, 2003. – 736 p. [in Russian]

Стаття надійшла 13.07.2012.

Рекомендовано до друку
 д.т.н., проф. Клепиковим В.Б.