

О.П. Іванов, А.І. Гуда, О.І. Саблін, В.І. Шинкаренко

КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*Анотація. Раніш розроблена конструктивно-продукційна модель ділянки електропостачання тяги постійного струму та її збагачення інформацією значень атрибутки складових елементів. У цій роботі засобами конструктивно-продукційного моделювання та нечіткої логіки на основі експертних даних формується система керування розподілом енергії рекуперації. Розроблена конструктивно-продукційна модель дозволяє формувати текстовий файл у форматі *ftl*, який є входним у системі *fuzzyTech*. Система *fuzzyTech* дає можливість засобами нечіткого виводу, враховуючи стан електрообладнання ділянки електропостачання та поїздної ситуації, визначити раціональний розподіл енергії рекуперації керуючи станом перемикачів на підстанціях живлення постійного струму. Цей підхід продемонстровано на прикладі сформованої схеми лінійної ділянки електропостачання з трьома підстанціями та двома потягами. Ключові слова: конструктивно-продукційне моделювання, тяга постійного струму, формальні граматики, конструктор, нечітка логіка, програмне забезпечення, інформаційні технології.*

Вступ. Дана робота є продовженням робіт [1, 2] і направлена на ефективне використання енергії рекуперації електротранспорту в системі електричної тяги постійного струму, що дозволяє зменшити споживання енергії на перевезення за різними оцінками на 10...40 % [3].

Для реалізації керування енергією рекуперації із застосуванням нечіткої логіки використано моделі *fuzzyTech* [4].

Розглядаючи подальші кроки в розробці системи керування розподілом енергії рекуперації, варто зазначити, що нечітка логіка є перспективним інструментом для формалізації знань експертів [5]. Системи нечіткої логіки оперують нечіткими множинами та лінгвістичними змінними, що дозволяє описувати складні залежності у вигляді інтуїтивно зрозумілих нечітких правил типу "ЯКЩО (умова) ТО (дія)" [6]. Умови та дії в таких правилах формуються з використанням термів лінгвістичних змінних, таких як "високий", "середній" або "низький" для характеристики значень певних атрибутів.

Для практичної реалізації нечіткої моделі використано програмне забезпечення *fuzzyTech*. *FuzzyTech* є потужним середовищем для розробки та симуляції систем керування на основі нечіткої логіки, що надає широкі можливості для автоматизації процесу створення нечітких контролерів.

З метою інтеграції результатів конструктивного моделювання з fuzzyTech, було розроблено програму на мові програмування python, що автоматизовано перетворює дані про атрибути елементів конструктивної схеми та експертні оцінки у формат моделі в текстовому файлі «.ftl», що є вхідним для програми fuzzyTech.

Пов'язані роботи. У попередній статті [1] представлена конструктивно-продукційна модель ділянки системи електропостачання тяги постійного струму.

Як приклад, сформована схема двоколіїної ділянки з трьома підстанціями та двома потягами як на рис. 1.

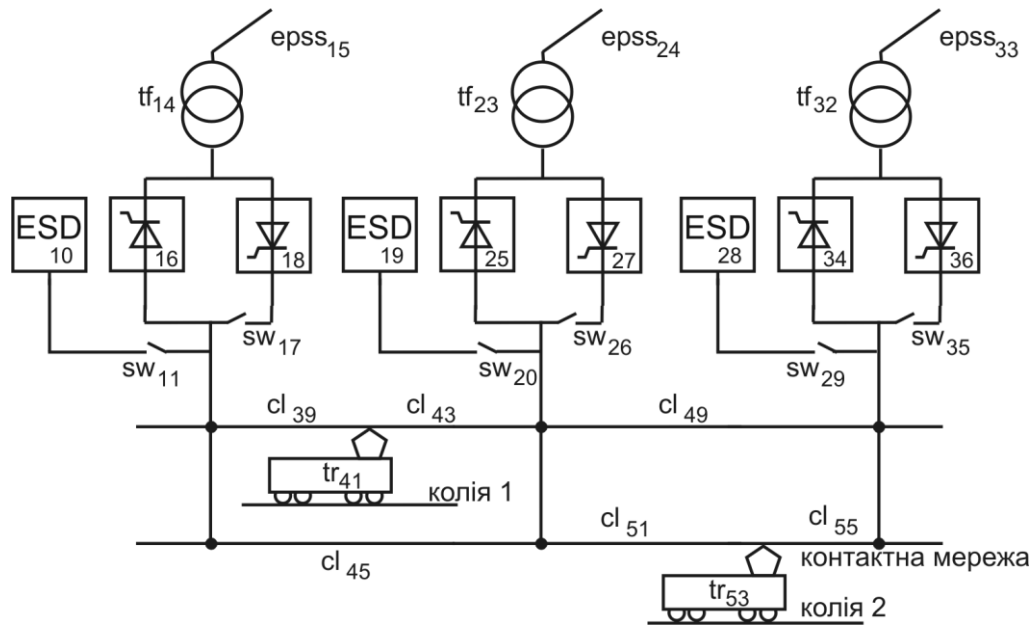


Рисунок 1 – Структурна схема ділянки електропостачання

Одночасно сформована сентенційна форма:

$$l = ((esd_{10} \cdot sw_{11} \times (cr_{16} : (sw_{17} \cdot aci_{18}))) \cdot tf_{14} \cdot epss_{15})) \cdot (cl_{39} \cdot tr_{41} \cdot cl_{43}) : (cl_{45}) \cdot$$

$$(((esd_{19} \cdot sw_{20} \times (cr_{25} : (sw_{26} \cdot aci_{27}))) \cdot tf_{23} \cdot epss_{24})) \times (cl_{49} : (cl_{51} \cdot tr_{53} \cdot cl_{55} \cdot$$

$$((esd_{28} \cdot sw_{29} \times (cr_{34} : (sw_{35} \cdot aci_{36}))) \cdot tf_{32} \cdot epss_{33}))))). \quad (1)$$

Позначки до рис. 1 та сентенційної форми l (термінали алфавіту T_1 конструктору C_{ZE} [1]) з відповідною атрибутикою:

– $_{U_{ES}} epss$ – зовнішня система електропостачання з атрибутом U_{ES} – рівень вхідної напруги первинної мережі;

– $_{\eta, k, U_{in}, U_{out}} tf$ – понижуючий трансформатор з атрибутами η – к.к.д., k – коефіцієнт трансформації, U_{in} , U_{out} – вхідна та вихідна напруга;

– $_{\eta, U_{in}, U_{out}} cr$ – випрямляч з відповідними атрибутами;

– $_{\eta, U_{in}, U_{out}} aci$ – інвертор;

– $_{\eta, W, W_{\max}, V} esd$ – накопичувач електроенергії з атрибутами: W – поточний рівень заряду накопичувача, $W_{\max}$ – максимальна енергетична ємність, V – швидкість енергообміну (заряду/розряду), η – коефіцієнт ефективності зберігання енергії;

– $_{\rho, L, \bar{X}, n} cl$ – тягова мережа з атрибутами: L – довжина ділянки, ρ – питомий опір мережі, $\bar{X}$ – вектор розмірності n , визначає положення перемичок на багатокільовних ділянках;

– $_{v, l, P} tr$ – електрорухомий склад з атрибутами v – режим руху, l – положення на міжпідстанційній зоні, P – потужність яка споживається або виділяється;

– $_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} rn$ – регулятор напруги випрямляча, $\bar{U}$ – вектор розмірності n , кожен елемент якого u_i – регульовані рівні вихідної напруги;

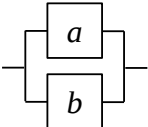
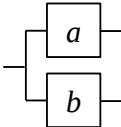
– $_{pp, pt, tpt} sw$ – перемикач, pp – постійне положення перемикача, pt – тимчасове положення на час tpt .

Крім зазначених вище атрибутів, всі термінали мають ідентифікуючий атрибут id , який позначається індексом терміналу або не терміналу і дозволяє однозначно визначити конкретне обладнання системи електропостачання, а також атрибут приналежності конкретній підстанції ps .

Відношення зв'язування у сентенційній формі l задають послідовне і паралельне з'єднання елементів електричного кола (табл. 1)

Таблиця 1

Відповідність позначок відношень та структурних схем

Відношення	$a \cdot b$	$a : b$	$a \times b$
Структурна схема			

Як розвиток дослідження [1] розроблено конструктор-збагачувач [2], який дозволяє наситити інформацією сформовану породжуючим конструктором модель ділянки електропостачання постійного струму для подальшого аналізу: імітування інформації про стан електроустаткування та поїзної ситуації з відповідними експертними висновками щодо використання енергії рекуперації.

1. Постановка задачі. Для подальшого розвитку моделей [1, 2] маємо розробити трансформуючий конструктор, який перетворить модель (1), у мережу з нечіткою логікою (fuzzy logic net, FLN) для керування розподілом енергії рекуперації. При цьому трансформуючий конструктор використовує інформацію щодо параметрів стану електрообладнання і поїзної ситуації (як, наприклад, у табл. 2 і 3 статті [2]) та експертну інформацію щодо нечітких даних.

2. Конструктор перетворювач схеми моделі електропостачання, атрибутивно збагаченої у модель FLN. Визначимо спеціалізацію конструктора перетворювача:

$$C_{ZE} \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_{ZE} \rangle [1] \text{ та модифікації його } \tilde{C}_{ZE} \langle \tilde{M}_{ZE}, \tilde{\Sigma}_{ZE}, \tilde{\Lambda}_{ZE} \rangle, \quad (2)$$

де $\tilde{\Lambda}_{ZE} = \Lambda_{ZE} \cup \Lambda_1 \cup \Lambda_2$, $\Lambda_1 = \{M_{ZE} \supset T_1 \cup N_1, \Sigma_{ZE} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}, \Xi = \{^2, :^2, \times^2\}$, $\Phi = \{:=^1, =^2, +^2, \times^1, >^2, \cdot^2, \uparrow^n, \leftrightarrow^n, \downarrow^n\}$, $\Theta = \{\Rightarrow, |\Rightarrow, ||\Rightarrow\}\}$, множини: Ξ – відношень (і відповідних операцій) зв'язування елементів конструкцій, Φ – операцій над атрибутами, Θ – операцій виведення, T_1, N_1 – терміналів та нетерміналів, $\tilde{\Lambda}_{ZE}$ – інформаційне забезпечення конструювання (ІЗК).

ІЗК Λ_2 містить визначення, доповнення та обмеження, які уточнюють алфавіт, атрибути носія, відношення підстановки, задають особливості виконання операцій підстановки та виведення.

Правила підстановки складаються з s_r – набору альтернативних відношень підстановки які призначені для розбору сентенціальної форми l (1) ($s_{r,1}$) та формування FLN ($s_{r,2}$), а також з g_r – набору операцій над атрибутами які виконуються до операції підстановки ($g_{r,1}$) та після неї ($g_{r,2}$):
 $\psi_r : \langle s_r = \langle s_{r,1}, s_{r,2} \rangle, g_r = \langle g_{r,1}, g_{r,2} \rangle \rangle \in \Psi$.

Відношення підстановки $\eta \rightarrow$ має атрибут доступності: якщо $\eta = true$ – відношення доступне для використання, в іншому випадку – ні.

Термінальним алфавітом T_1 є множина елементів FLN та системи тягового енергопостачання, споживання та перетворення електроенергії в мережі постійного струму залізниць, трамвайних та тролейбусних ліній та метрополітенів з їх суттєвими для цього завдання властивостями – атрибутами. Елементи будемо позначати малими латинськими символами, наприклад, x термінал a з атрибутом x , $x \dashv a$ – атрибут x терміналу a .

Операції над атрибутами: $:=(a, b)$ – присвоєння значення b змінній a ; $+(a, b, c)$ – присвоєння суми значень b і c змінній a ; $>(a, b, c)$ – присвоєння a значення $true$ якщо $b > c$ і $false$ в іншому випадку; $=(a, b, c)$ – аналогічно попередньому перевірка на рівність; $\times(a, b)$ – перетворення з числового формату b у текстовий (цифрами) a ; $\cdot(a, b, c)$ – конкатенація строк; $\uparrow(a, b, \dots)$, $\leftrightarrow(a, b, \dots)$ – визначення нечітких характеристик входів у блоках FLN та правил нечіткого виведення відповідно.

Конкретизація конструктивно-продукційної структури полягає у розширенні аксіоматики множиною конкретних правил продукцій та визначені конкретних множин терміналів та нетерміналів:

$$\tilde{C}_{ZE} \langle \tilde{M}_{ZE}, \tilde{\Sigma}_{ZE}, \tilde{\Lambda}_{ZE} \rangle_K \mapsto \tilde{C}_{ZEK} \langle \tilde{M}_{ZE}, \tilde{\Sigma}_{ZE}, \Lambda_3 \rangle, \quad (3)$$

де $\Lambda_3 = \tilde{\Lambda}_{ZE} \cup \Lambda_4$.

ІЗК Λ_4 містить наступні доповнення.

Нетермінальний алфавіт N_1 складається із допоміжних елементів $N_1 = \{\sigma, \alpha, \beta, \delta, \lambda\}$. Початкові нетермінали – σ для розбору форми l (1) та δ – для формування FLN.

ІЗК Λ_4 містить наступні правила продукцій.

Перше правило містить відношення, що надає можливість експерту отримати екранну форму з зображенням схеми та можливістю введення експертних даних:

$$\psi_1 = \langle s_{1,1} = \langle \sigma \rightarrow \alpha \rangle, s_{1,2} = \langle \delta \rightarrow \lambda \rangle, g_{1,1} = \varepsilon, g_{1,2} = \langle \uparrow (Sc), :=(i,1), :=(m,1) \rangle \rangle, \quad (4)$$

При розборі форми l друге правило призначено для пропуску з'єднуючих символів:

$$\psi_2 = \left\langle \begin{array}{l} s_{2,1} = \langle \alpha \rightarrow (\alpha \mid \alpha \rightarrow) \alpha \mid \alpha \rightarrow \cdot \alpha \mid \alpha \rightarrow : \alpha, \mid \alpha \rightarrow \times \alpha, \mid \rangle \\ s_{2,2} = \varepsilon, g_{2,1} = \varepsilon, g_{2,2} = \varepsilon \end{array} \right\rangle, \quad (5)$$

Правила $\psi_3 \dots \psi_8$ призначені для збору інформації щодо стану конкретного електричного обладнання залізничної ділянки та поїздної ситуації ($\otimes$ – позначення будь якої операції зв'язування у сентенціальній формі l):

$$\psi_3 = \left\langle \begin{array}{l} s_{3,1} = \langle \alpha \rightarrow esd_i \otimes \alpha \rangle, s_{3,1} = \langle \lambda \rightarrow B_{1,i} \lambda \rangle, g_{3,1} = \varepsilon, \\ g_{3,2} = \left\langle \begin{array}{l} \times(x, i), \cdot(x, "esd", x), \cdot(id \downarrow in_1 \downarrow B_{1,i}, x, "eta"), \\ \cdot(id \downarrow in_2 \downarrow B_{1,i}, x, "V"), \cdot(id \downarrow in_3 \downarrow B_{1,i}, x, "W"), \\ \cdot(id \downarrow in_4 \downarrow B_{1,i}, x, "W \max"), = (id \downarrow out \downarrow B_{1,i}, x), \\ = (id \downarrow B_{1,i}, x), \uparrow ({}_{in_1} B_{1,i}, {}_{in_2} B_{1,i}, {}_{in_{12}} B_{1,i}, {}_{in_3} B_{1,4}), \\ \leftrightarrow ({}_{rule} B_{1,i}), + (i, i, 1) \end{array} \right\rangle \end{array} \right\rangle, \quad (6)$$

де id – ідентифікатор відповідного елементу, або його атрибуту, in, out – входи і виходи відповідного блоку FLN.

Після відповідної інтерпретації, у результаті реалізації конструктора буде сформовано текстовий файл для його використання програмним додатком нечіткої логіки fuzzyTech.

Фрагменти текстового файлу сформовані саме за правилом ψ_3 відображають нечіткі характеристики вхідних змінних (наприклад):

```
LVAR {
    NAME          = esd10V;
    LVRANGE       = MIN(0.0), MAX(1.0);
    TERM {
        TERMNAME  = term1;
```

```
POINTS    = (0.0, 0.0), (0.0, 1.0), (0.25, 0.0); }
TERM {
  TERMNAME = term2;
  POINTS    = (0.0, 0.0), (0.25, 1.0), (0.5, 0.0); }
TERM {
  TERMNAME = term3;
  POINTS    = (0.25, 0.0), (0.5, 1.0), (0.75, 0.0); }
TERM {
  TERMNAME = term4;
  POINTS    = (0.5, 0.0), (0.75, 1.0), (1.0, 0.0); }
TERM {
  TERMNAME = term5;
  POINTS    = (0.75, 0.0), (1.0, 1.0), (1.0, 0.0); }},
```

та правила нечіткого виводу (наприклад):

```
RULES { IF    esd10eta = term5
        AND esd10V = term2
        AND esd10W = term2
        AND esd10Wmax = term2
  THEN  esd10 = medium  WITH 1.000;
  IF    esd10eta = term4
        AND esd10V = term2
        AND esd10W = term2
        AND esd10Wmax = term2
  THEN  esd10 = medium  WITH 1.000;
  IF    esd10eta = term4
        AND esd10W = term2
        AND esd10Wmax = term2
  THEN  esd10 = low     WITH 1.000; } /* RULES */
```

При цьому у моделі fuzzyTech буде відображено блок першого слою на кшталт рис. 2 з характеристиками нечітких входів як на рис. 3.

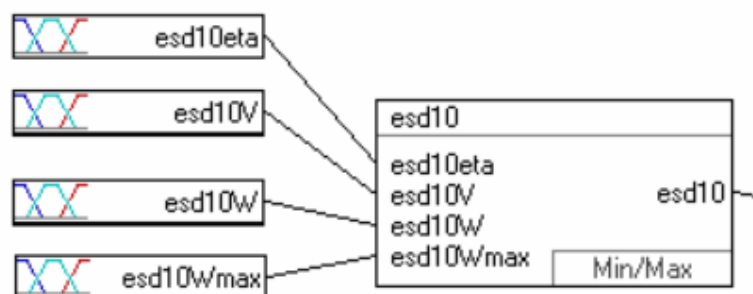


Рисунок 2 – Блок першого слою FLN

Правила $\psi_4 \dots \psi_7$ аналогічні ψ_3 і забезпечують формування блоків першого слою FLN відповідних елементам $epss$, tf , cr , sw та aci .

Перевірка закінчення розбору сентенціальної форми l для формування першого слою FLN, ініціалізація останнього блоку другого слою і єдиного блоку третього слою:

$$\psi_9 = \left\langle \begin{array}{l} s_{9,1} = \langle \alpha_{\eta_1} \rightarrow \beta \rangle, \quad s_{9,2} = \langle \lambda \rightarrow B_{2,N} \lambda, \lambda \rightarrow B_{3,1} \lambda \rangle, \\ g_{9,1} = \langle = (b, k, 1), > (\eta_1, i, N), \& (\eta_1, \eta_1, b) \rangle, \\ g_{9,2} = \langle := (k, 2), := (i, 1), := (j, 1), := (m, 1), := (ps, 1), := (p, 1) := (q, 1) \rangle \end{array} \right\rangle \quad (7)$$

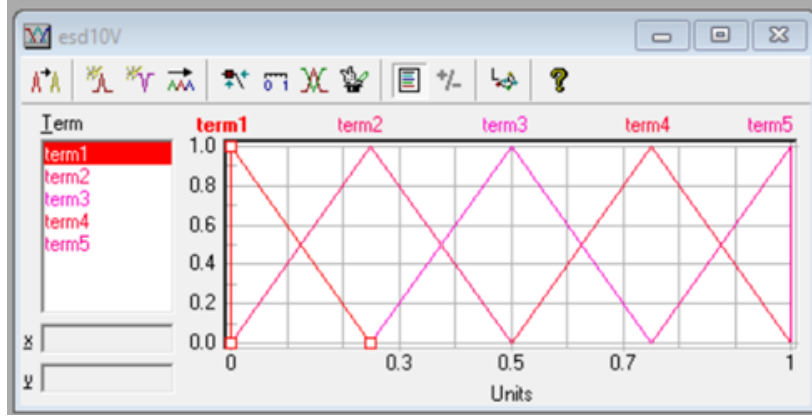


Рисунок 3 – Приклад змінної з п'ятьма термами

Правила $\psi_{10} \dots \psi_{21}$ призначені для формування блоків другого і третього слою FLN з урахуванням електрообладнання *esd*, *epss*, *tf*, *cr* та *aci*. Правило ψ_{10} призначене для формування входів у блоках другого слою, пов'язаних з накопичувачами (*esd*) і формування самого блоку (при необхідності), а ψ_{11} – для переходу на новий блок:

$$\psi_{10} = \left\langle \begin{array}{l} s_{10,1} = \langle \beta_{\eta_2} \rightarrow esd_i \cdot \beta \rangle, s_{10,2} = \langle \lambda_{\eta_3} \rightarrow B_{2,j} \lambda \rangle, \\ g_{10,1} = \langle = (\eta_2, ps \downarrow esd_i, ps), = (b, m, 1), \& (\eta_3, \eta_2, b) \rangle, \\ g_{10,2} = \langle \times (x, i), \cdot (id \downarrow in_m \downarrow B_{2,j}, "esd", x), \times (x, ps), \cdot (x, "ps", x), \\ := (id \downarrow out \downarrow B_{2,j}, x), := (id \downarrow B_{2,j}, x), := (id \downarrow in \downarrow B_{3,1}, x), \uparrow (in_m B_{2,j}), \\ \leftrightarrow (rule B_{2,i}), + (i, i, 1), + (m, m, 1) \rangle \end{array} \right\rangle, \quad (8)$$

$$\psi_{11} = \left\langle \begin{array}{l} s_{11,1} = \langle \beta_{\eta_2} \rightarrow esd_i \cdot \beta \rangle, s_{11,2} = \varepsilon, \\ g_{11,1} = \langle \neq (\eta_2, ps \downarrow esd_i, ps) \rangle, g_{11,2} = \langle := (m, 1), + (ps, 1, ps), \rangle \end{array} \right\rangle. \quad (9)$$

Правила $\psi_{12} \dots \psi_{21}$ аналогічні правилам ψ_{10} , ψ_{11} . Правила для перемикачів додатково формують виходи блоку третього слою FLN:

$$\psi_{22} = \left\langle \begin{aligned} s_{22,1} &= \langle \beta_{\eta_2} \rightarrow sw_i \cdot \beta \rangle, s_{88,2} = \langle \lambda_{\eta_3} \rightarrow B_{2,j} \lambda \rangle, \\ g_{22,1} &= \langle =(\eta_2, ps \downarrow sw_i, ps), = (b, m, 1), \& (\eta_3, \eta_2, b) \rangle, \\ g_{22,2} &= \langle \times(x, i), \cdot(y, "sw", x), := (id \downarrow in_m \downarrow B_{2,j}, "y"), \\ &\cdot(y, "pt", y), := (id \downarrow out_p \downarrow B_{3,1}, x), := (p, 1, p), \\ &\times(x, ps), \cdot(x, "ps", x), := (id \downarrow out \downarrow B_{2,j}, x), := (id \downarrow B_{2,j}, x), \\ &:= (id \downarrow in \downarrow B_{3,1}, x), \uparrow \downarrow (in_m B_{2,j}), \\ &\leftrightarrow (rule B_{2,i}), + (i, i, 1), + (m, m, 1), := (id \downarrow B_{2,j}, "output") \rangle \end{aligned} \right\rangle, \quad (10)$$

Правило ψ_{23} аналогічне правилу ψ_{11} .

Поїздна ситуація враховується у останньому блоці другого слою:

$$\psi_{24} = \left\langle \begin{aligned} s_{24,1} &= \langle \beta_{\eta_2} \rightarrow cl_i \cdot \beta \rangle, s_{24,2} = \varepsilon, g_{24,1} = \eta, \\ g_{24,2} &= \langle \times(x, i), (id \downarrow in_q \downarrow B_{2,N}, "cl", x), \\ &:= (id \downarrow out \downarrow B_{2,N}, "tr"), := (id \downarrow B_{2,N}, "tr"), \uparrow \downarrow (in_q B_{2,j}), \\ &\leftrightarrow (rule B_{2,i}), + (i, i, 1), + (q, q, 1) \rangle \end{aligned} \right\rangle, \quad (11)$$

Правило ψ_{25} аналогічне правилу ψ_{24} для tr . Наступне правило призначено для пропуску з'єднуючих символів при формуванні другого і третього слоїв FLN:

$$\psi_{26} = \left\langle \begin{aligned} s_{26,1} &= \langle \beta \rightarrow (\beta \mid \beta \rightarrow) \beta \mid \beta \rightarrow \cdot \beta \mid \beta \rightarrow: \beta, \mid \beta \rightarrow \times \beta, \mid \rangle \\ s_{26,2} &= \varepsilon, g_{26,1} = \varepsilon, g_{26,2} = \varepsilon \end{aligned} \right\rangle. \quad (12)$$

І останнє правило призначене для формування правил нечіткого виводу у блоці третього слою:

$$\psi_{27} = \left\langle \begin{aligned} s_{27,1} &= \langle \beta_{\eta_4} \rightarrow \varepsilon \rangle, s_{27,2} = \varepsilon, \\ g_{26,1} &= \langle (\eta_4, i, N) \rangle, g_{26,2} = \langle \leftrightarrow (rule B_{3,1}) \rangle \end{aligned} \right\rangle. \quad (13)$$

3. Модель FLN. Функціонування FLN забезпечується засобами fuzzyTech. Схема на рис. 4 показує повну структуру нечіткої системи, включаючи вхідні інтерфейси, блоки правил, додаткові проміжні змінні та вихідні інтерфейси. Лінії з'єднання символізують потік даних. Структура системи визначає потік нечіткої логіки від вхідних змінних до вихідних через багаторівневий механізм висновку.

На першому етапі фазифікація у вхідних інтерфейсах перетворює аналогові дані у нечіткі значення. Потім ці значення передаються до первинних блоків правил, де здійснюється базові нечіткі висновки відповідно до лінгвістичних правил по кожному пристрою електрообладнання.

Наступний рівень включає проміжні блоки правил, які отримують вихідні дані з первинних блоків та обробляють їх у складніші взаємозалежні лінгвістичні висновки. Ці проміжні висновки можуть діяти як внутрішні змінні, що впливають на більш деталізовані блоки правил на наступному рівні.

На фінальному етапі вихідні значення з проміжних блоків надходять у остаточний блок правил, де вони об'єднуються та структуруються у завершений нечіткий висновок. Дефазифікація перетворює отримані лінгвістичні змінні у аналогові значення, які можуть бути використані для керування системою прийняття рішень.

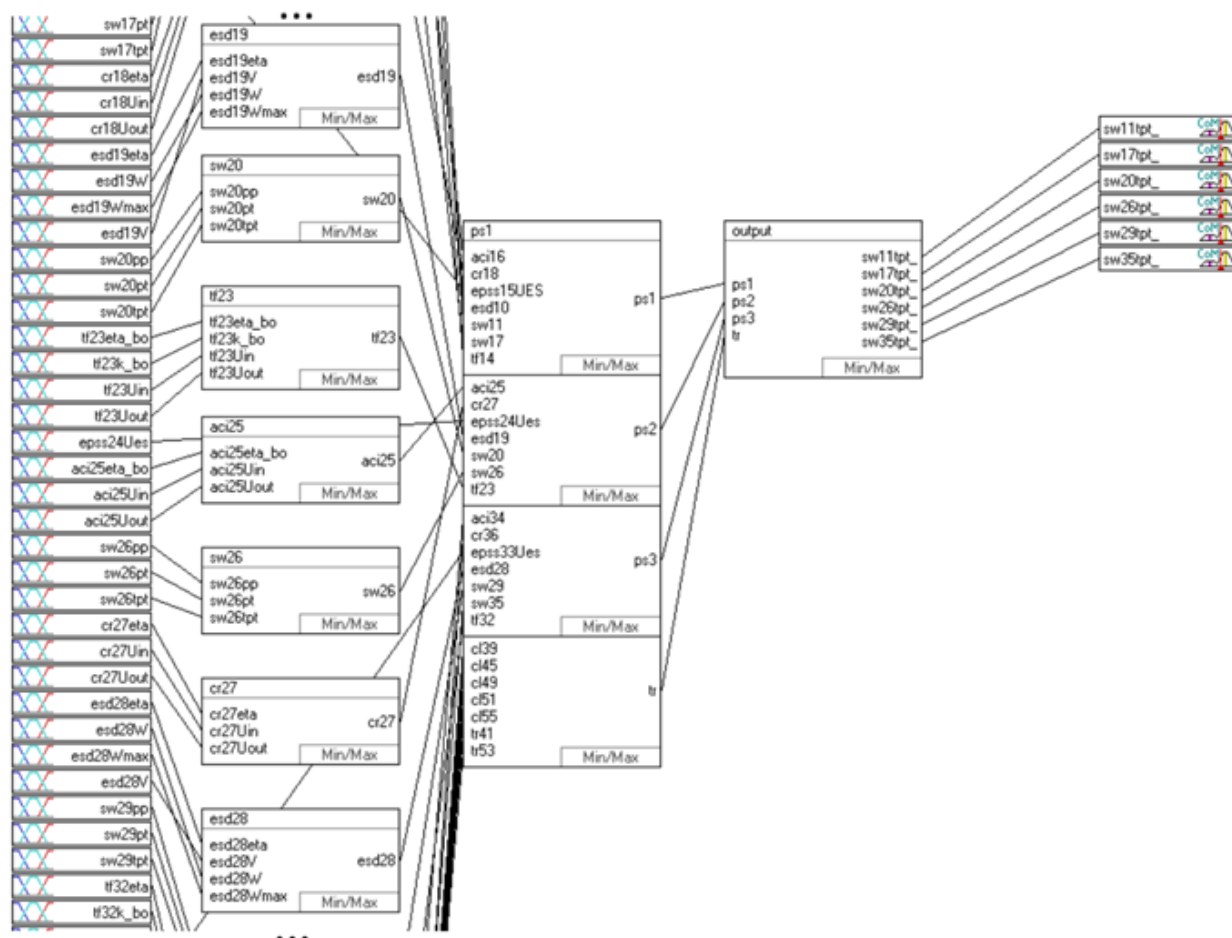


Рисунок 4 – Частина структури багаторівневої моделі FLN

Таким чином, багаторівнева модель дозволяє системі проводити складний аналіз даних, враховуючи поступову деталізацію висновку через кілька рівнів нечітких правил.

Цим показано як у теорії конструктивно-продукційного моделювання зміна інтерпретації кардинально змінює функціональність системи.

Надалі можуть бути застосовані процедури автоматичного навчання нечіткої логіки за наявності експериментальних даних, зокрема використання адаптивних нечітких нейронних мереж (ANFIS) та генетичних алгоритмів для автоматичної генерації оптимальних нечітких правил. ANFIS аналізують дані та самостійно будують нечіткі правила на їх основі [7].

Використання експертних оцінок для побудови початкової нечіткої моделі є одним з підходів до розробки систем нечіткого виводу, який може бути в подальшому вдосконалений за допомогою методів машинного навчання, таких як ANFIS, які використовують експертні дані як початкові знання для навчання.

5. Обговорення результатів. Результатом роботи є створена нечітка модель керування розподілом енергії рекуперації у форматі файлу «.ftl», придатного для використання в програмному забезпеченні fuzzyTech. Ця модель заснована на експертних знаннях, представлених у вигляді таблиці і структурної схеми, вона описує залежності між станом обладнання та поїзною ситуацією та керуючими діями щодо розподілу енергії рекуперації.

Для ефективного навчання нечітких моделей, особливо з використанням таких методів, як ANFIS, чим більший та різноманітніший набір даних, що охоплює різні стани системи та експертні рішення, тим кращою буде якість навченої моделі. Експертні знання, навіть у відносно невеликому обсязі, можуть служити цінною основою для ініціалізації нечіткої моделі та подальшого її вдосконалення.

Висновки. Рациональне використання енергії рекуперації на підставі використання моделей на сучасних принципах дозволяє значно заощаджувати енергоресурси.

Ця стаття демонструє як експертні знання, представлені у табличній формі, трансформуються у дієву систему керування розподілом енергії рекуперації на основі багатоступеневої нечіткої моделі, розробленої з використанням fuzzyTech та, з елементами автоматичного навчання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шинкаренко В. І. Конструктивно-продукційне моделювання системи електропостачання тяги постійного струму / В.І. Шинкаренко, А.І. Гуда, О.І. Саблін, О.П. Іванов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2024. – Випуск 6 (155). – С. 145-158. DOI : 10.34185/1562-9945-6-155-2024-14
2. Гуда А.І. Атрибутивне насичення конструктивно-продукційної моделі ділянки системи електропостачання тяги постійного струму / А.І. Гуда, О.П. Іванов, В.І. Шинкаренко, О.І. Саблін // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2025. – Випуск 3 (158). – С. 96-109. DOI 10.34185/1562-9945-3-158-2025-10
3. Sablin O. Rational distribution of excess regenerative energy in electric transport systems on the basis of fuzzy logic application / O. Sablin, V. Kuznetsov, V. Shinkarenko, A. Ivanov // The archives of transport, 42(2), 2017, 7-17. DOI: 10.5604/01.3001.0010.0527
4. Офіційний сайт продукту fuzzyTECH. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.bssit.com/products_details.php?product_id=150.
5. Şen, M.; Özcan, M.; Eker, Y.R. Fuzzy Logic-Based Energy Management System for Regenerative Braking of Electric Vehicles with Hybrid Energy Storage System. Appl. Sci. 2024, 14, 3077. <https://doi.org/10.3390/app14073077>.
6. Ismail H. Altaş. Fuzzy logic control in energy systems: with design examples in Matlab/Simulink. 2nd ed, London: The Institution of Engineering and Technology, 2024, 254p.
7. Salleh, M.N.M.; Talpur, N.; Hussain, K. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System: Overview, Strengths, Limitations, and Solutions. In Data Mining and Big Data; Tan, Y., Takagi, H., Shi, Y., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 527–535. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61845-6_52.

REFERENCES

1. Shynkarenko V. I. Konstruktyvno-produktsiine modeliuvannya systemy elektropostachання тяги постійного струму / V.I. Shynkarenko, A.I. Huda, O.I. Sablin, O.P. Ivanov // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. – 2024. – Vypusk 6 (155). – S. 145-158. [in Ukrainian] DOI : 10.34185/1562-9945-6-155-2024-14
2. Huda A.I. Атрибутивне насичення конструктивно-продукційної моделі ділянки системи електропостачання тяги постійного струму / A.I. Huda, O.P. Ivanov, V.I. Shynkarenko, O.I. Sablin, // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. – 2025. – Vypusk 3 (158). – S. 96-109. [in Ukrainian] DOI 10.34185/1562-9945-3-158-2025-10.
3. Sablin O. Rational distribution of excess regenerative energy in electric transport systems on the basis of fuzzy logic application / O. Sablin, V. Kuznetsov, V. Shinkarenko, A. Ivanov // The archives of transport, 42(2), 2017, 7-17. DOI: 10.5604/01.3001.0010.0527
4. Official fuzzyTECH product website. [Electronic resource] – Access mode: https://www.bssit.com/products_details.php?product_id=150.
5. Şen, M.; Özcan, M.; Eker, Y.R. Fuzzy Logic-Based Energy Management System for Regenerative Braking of Electric Vehicles with Hybrid Energy Storage System. Appl. Sci. 2024, 14, 3077. <https://doi.org/10.3390/app14073077>.
6. Ismail H. Altaş. Fuzzy logic control in energy systems: with design examples in Matlab/Simulink. 2nd ed, London: The Institution of Engineering and Technology, 2024, 254p.
7. Salleh, M.N.M.; Talpur, N.; Hussain, K. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System: Overview, Strengths, Limitations, and Solutions. In *Data Mining and Big Data*; Tan, Y., Takagi, H., Shi, Y., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 527–535. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61845-6_52.

Received 20.05.2025.
Accepted 23.05.2025.

Constructive-synthesizing modeling of recovery energy distribution based on fuzzy logic

This article is the last of three that collectively explore solutions to the problem of regenerative energy distribution for its rational use. The solution is achieved through constructive-production modeling.

Previously, a general constructive-production model of a direct current traction power supply section was developed and enriched with information on the attribute values of its constituent elements. In this work, based on expert data, a system for managing the distribution of regenerative energy is formed using constructive-production modeling and fuzzy logic. The developed model allows the formation of a text file in FTL format, which is used in the fuzzyTECH system. FuzzyTECH, in turn, implements fuzzy inference mechanisms, considering the state of electrical equipment and the current situation on the power supply section, to efficiently distribute regenerative energy by controlling switches at direct current power supply substations. This approach is illustrated using a schematic of a linear power supply section with three substations and two trains.

The developed models open new opportunities for improving energy efficiency, particularly in railway and urban public electric transport. The primary tasks of the system include identifying the existing traction substation equipment and assessing its technical characteristics, as well as optimizing the use of regenerative energy. Moreover, the proposed approach can be useful for solving issues related to the design of traction power supply systems, enhancing their reliability, and reducing energy losses.

Additionally, the implementation of fuzzy logic methods and constructive-production modeling not only improves the management of regenerative energy distribution but also creates a universal approach that can be adapted to other types of electric transport. The proposed system has the potential for integration with intelligent networks and modern energy-saving technologies, opening new perspectives for the development of efficient transportation solutions.

Keywords: constructive-synthesizing modeling, direct current traction, formal grammars, constructor, fuzzy logic, software, information technologies.

Іванов Олександр Петрович – кандидат технічних наук, доцент Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій.

Гуда Антон Ігорович – доктор технічних наук, професор Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій.

Саблін Олег Ігорович – доктор технічних наук, професор Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій.

Шинкаренко Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій.

Ivanov Oleksandr – candidate of technical sciences, associate professor, SEI DIIT Ukrainian State University of Science and Technology.

Guda Anton – doctor of engineering's sciences, professor SEI DMI Ukrainian State University of Science and Technology.

Sablin Oleg – doctor of engineering's sciences, professor SEI DIIT Ukrainian State University of Science and Technology.

Shynkarenko Viktor – doctor of engineering's sciences, professor SEI DIIT Ukrainian State University of Science and Technology.