

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

АТРИБУТИВНЕ НАСИЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДІЛЯНКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Анотація. Раніш розроблена загальна конструктивно-продукційна модель ділянки електропостачання тяги постійного струму збагачується інформацією значень атрибуту складових елементів. У залежності від того яким чином інтерпретується модель засобами алгоритмічного конструктора формуються різні конструктивні системи. Одна з них призначена для випадкового визначення значень атрибуту електроустаткування та поїзної ситуації з множини потенційно можливих з метою формування різних варіантів за якими приймає рішення експерт щодо використання енергії рекуперації. На основі експертних даних у подальшому буде формуватись система керування за нечіткою логікою. Друга – для збору інформації щодо стану електрообладнання та поїзної ситуації з реальних об'єктів для керування розподілом електроенергії у автоматичному режимі. Цей підхід продемонстровано на прикладі сформованої схеми лінійної ділянки електропостачання з трьома підстанціями.

Ключові слова: конструктивно-продукційне моделювання, тяга постійного струму, формальні граматики, конструктор, програмне забезпечення, інформаційні технології.

Вступ. Дана робота виконана у конструктивній парадигмі сприйняття світу людиною і відповідного підходу до програмування (основи якої закладені у [1, 2]).

Основні положення конструктивної парадигми [3]:

- світ сприймається як сукупність конструкцій і конструктивних процесів;
- конструкції складаються з деяких елементів і інших конструкцій;
- конструктивний процес складається з елементарних дій (дискретних або неперервних, детермінованих або стохастичних і т.і.) та інших процесів;
- елементи, конструкції, проміжні форми конструювання пов'язані між собою деякими відношеннями зв'язування;
- елементи конструкцій, проміжні форми конструювання, конструкції, відношення та операції – кожен має свій набір атрибутів;
- при формуванні конструкцій використовується тріада: відношення → операція → відношення.

Щодо останнього положення:

– у алгебрі, наприклад цілих чисел з заданою операцією додавання, запис «5+7» сприймається як відношення: треба скласти 5 і 7, в результаті операції складання отримаємо результат 12. Тобто за відношенням виконується операція в результаті якої зникає інформація про початкові складові;

– у конструктивній парадигмі, наприклад при виробництві авто дверцята слід причепити до корпусу. Маємо тріаду: відношення (слід причепити) → операція (причеплення) → відношення (причеплено). У результаті операції залишаються всі аргументи (елементи) з новим відношенням.

Дана робота є продовженням роботи [4] і направлена на використання можливостей часткового відновлення витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації, що дозволяє зменшити споживання енергії на перевезення за різними оцінками на 10...40 % [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Щодо конструктивного підходу (інструментарію). За метою використання конструктори поділяють на [3]:

– породжуючі, які заданими правилами виконують формування конструкцій (однієї або декількох) або конструктивних процесів;

– трансформуючі, які за однією конструкцією (її моделлю) формують іншу. Наприклад, програму у кодах процесору у конструктивний процес її виконання;

– аналізуючі, які виконують аналіз конструкцій. Наприклад, перевіряти чи може конструкція бути сформована за наявними правилами (наприклад, у трансляторах);

– оптимізуючі/адаптуючі, які здатні змінювати структуру конструкції (складові, їх порядок та зв'язки);

– алгоритмічні – в поєднанні з іншими конструкторами створюють конструктивну систему: модель елементів, проміжних форм і можливих операцій над ними поєднується з моделлю внутрішнього виконавця, який вмє виконувати всі операції.

У даній роботі запропонований новий вид конструктору – збагачувач, який дозволяє наситити інформацією сформовану породжуючим конструктором конструкцію для подальшого аналізу або використання.

Щодо задачі енергоефективності (прикладної задачі). Згідно з останніми дослідженнями, впровадження сучасних систем регенеративного гальмування значно підвищує ефективність роботи електричних залізничних транспортних систем [6].

Відновлення та зберігання значної частини енергії, втраченої під час гальмування, набувають особливої важливості. Розвиток технологій зберігання енергії, таких як батареї та суперконденсатори, дозволяє ефективніше використовувати регенеративну енергію, що в свою чергу покращує екологічну стійкість залізничного транспорту [7].

Рекуперативна енергія є суттєвою для підвищення енергоефективності, екологічності та безпеки високошвидкісних залізниць. Інноваційні підходи до управління енергією дозволяють значно зменшити витрати на електроенергію та знизити викиди

парникових газів, роблячи залізничний транспорт більш екологічно чистим та енергоефективним [8, 9].

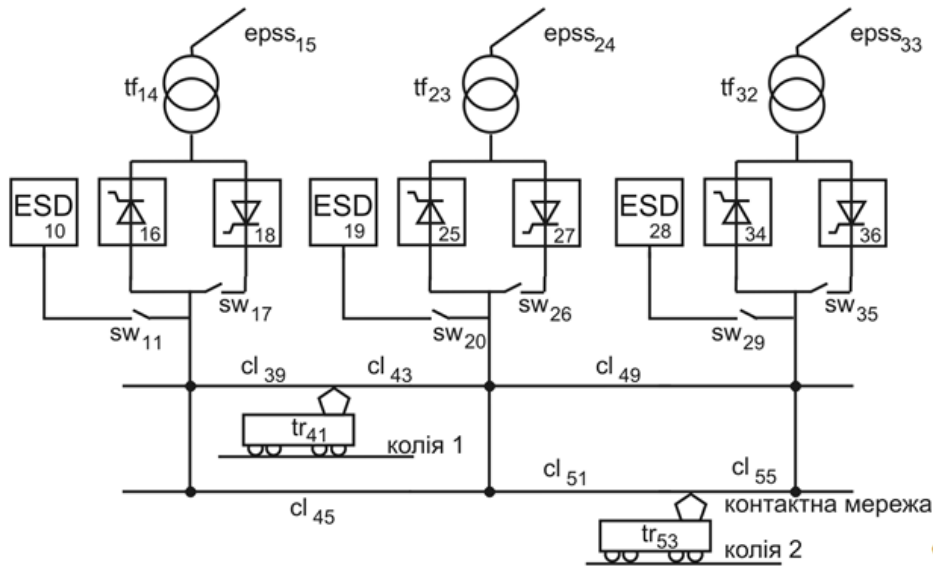


Рисунок 1 – Структурна схема ділянки електропостачання

1. Викладення основного матеріалу

1. Постановка задачі. У попередній роботі [4] представлена конструктивно-продукційна модель ділянки системи електропостачання тяги постійного струму.

Як приклад, сформована схема двоколіїної ділянки з двома потягами як на рис. 1. 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} [4]) 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;


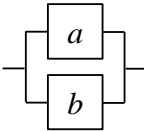
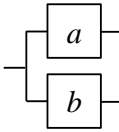
- ${}_{\rho, L, \bar{X}, n} cl$ - тягова мережа з атрибутами: L – довжина ділянки, ρ – питомий опір мережі, \bar{X} - вектор розмірності n , визначає положення перемичок на багатокільнійних ділянках;
- ${}_{v, l, P} tr$ електрорухомий склад з атрибутами v – режим руху, l – положення на міжпідстанційній 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.

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			

У даному дослідженні поставлена задача розробки конструктивних систем двох призначень: імітування інформації щодо стану електроустаткування та поїзної ситуації та відповідних експертних висновків щодо використання енергії рекуперації; автоматизованої системи керування розподілом потоків енергії рекуперації.

2. Спеціалізація конструктору атрибутивного насичення моделі ділянки електропостачання. Визначимо спеціалізацію конструктору – моделі (структурної схеми) системи тягового електропостачання:

$$C_{ZE} \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_{ZE} \rangle [4] \text{ та модифікації його } \tilde{C}_{ZE} \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_{ZE} \rangle, \quad (2)$$

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

Модифікований конструктор \tilde{C}_{ZE} вирізняється від C_{ZE} множиною операцій над атрибутами $\Phi = \{:=^1, +^2, >^2, \uparrow^n, \downarrow^n, \downarrow^n\}$.

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

Правилами підстановки мають вигляд $\psi_r : \langle s_r, g_r = \langle g_{1,r}, g_{2,r} \rangle \rangle \in \Psi$, де s_r – набір альтернативних відношень підстановки, g_r – набір операцій над атрибутами які виконуються до операції підстановки ($g_{1,r}$) та після неї ($g_{2,r}$).

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 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, $_x a$ 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; $\uparrow(a,b,...)$, $\downarrow(a,b,...)$, $\updownarrow(a,b,...)$ введення виведення значень атрибутів відповідно.

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

$$\tilde{C}_{ZE} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3, Z \rangle_K \mapsto \tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle, \quad (3)$$

де $\Lambda_3 = \Lambda_{ZE} \cup \Lambda_4$.

ІЗК Λ_4 містить наступні доповнення.

Нетермінальний алфавіт N_1 складається із допоміжних елементів $N_1 = \{\sigma, \alpha, \beta, \gamma\}$. Початковий нетермінал – σ .

ІЗК Λ_4 містить п правила продукції.

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

$$\psi_1 = \langle s_1 = \langle \sigma \rightarrow \alpha \rangle, g_{1,1} = \varepsilon, g_{1,2} = \langle \uparrow(Sc), :=(i,1), :=(m,1) \rangle \rangle, \quad (4)$$

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

$$\psi_2 = \left\langle \left\langle s_2 = \langle \alpha \rightarrow (\alpha | \alpha \rightarrow) \alpha | \alpha \rightarrow \cdot \alpha | \alpha \rightarrow : \alpha, | \alpha \rightarrow \times \alpha, | \rangle \right\rangle, g_{2,1} = \varepsilon, g_{2,2} = \varepsilon \right\rangle, \quad (5)$$

Правила $\psi_3 \dots \psi_{10}$ призначені для збору інформації щодо стану конкретного електричного обладнання дільниці та поїзної ситуації (\otimes – позначення будь якої операції зв’язування у сентенціальній формі l):

$$\psi_3 = \left\langle s_3 = \langle \alpha \rightarrow epss_i \otimes \alpha \rangle, g_{3,2} = \varepsilon, g_{3,2} = \langle \Downarrow (U_{ES} \Downarrow epss_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (6)$$

$$\psi_4 = \left\langle s_4 = \langle \alpha \rightarrow tf_i \otimes \alpha \rangle, g_{4,1} = \varepsilon, g_{4,2} = \langle \Downarrow (\eta \Downarrow tf_i, k \Downarrow tf_i, U_{in} \Downarrow tf_i, U_{out} \Downarrow tf_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (7)$$

$$\psi_5 = \left\langle s_5 = \langle \alpha \rightarrow cr_i \otimes \alpha \rangle, g_{5,1} = \varepsilon, g_{5,2} = \langle \Downarrow (\eta \Downarrow cr_i, U_{in} \Downarrow cr_i, U_{out} \Downarrow cr_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (8)$$

$$\psi_6 = \left\langle s_6 = \langle \alpha \rightarrow aci_i \otimes \alpha \rangle, g_{6,1} = \varepsilon, g_{6,2} = \langle \Downarrow (\eta \Downarrow aci_i, U_{in} \Downarrow aci_i, U_{out} \Downarrow aci_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (9)$$

$$\psi_7 = \left\langle s_7 = \langle \alpha \rightarrow esd_i \otimes \alpha \rangle, g_{7,1} = \varepsilon, g_{7,2} = \langle \Downarrow (\eta \Downarrow esd_i, W \Downarrow esd_i, W_{max} \Downarrow esd_i, V \Downarrow esd_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (10)$$

$$\psi_8 = \left\langle s_8 = \langle \alpha \rightarrow cl_i \otimes \alpha \rangle, g_{8,1} = \varepsilon, g_{8,2} = \langle \Downarrow (\rho \Downarrow cl_i, L \Downarrow cl_i, \bar{X} \Downarrow cl_i, n \Downarrow cl_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (11)$$

$$\psi_9 = \left\langle s_9 = \langle \alpha \rightarrow tr_i \otimes \alpha \rangle, g_{9,1} = \varepsilon, g_{9,2} = \langle \Downarrow (v \Downarrow tr_i, l \Downarrow tr_i, P \Downarrow tr_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (12)$$

$$\psi_{10} = \left\langle s_{10} = \langle \alpha \rightarrow rn_i \otimes \alpha \rangle, g_{10,1} = \varepsilon, g_{10,2} = \langle \Downarrow (\eta \Downarrow rn_i, U_{in} \Downarrow rn_i, U_{out} \Downarrow rn_i, \bar{U} \Downarrow rn_i, n \Downarrow rn_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (13)$$

$$\psi_{11} = \left\langle s_{11} = \langle \alpha \rightarrow sw_i \otimes \alpha \rangle, g_{11,1} = \varepsilon, g_{11,2} = \langle \Downarrow (pp \Downarrow sw_i, pt \Downarrow sw_i, tpt \Downarrow sw_i), + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (14)$$

Перевірка закінчення розбору сентенціальної форми l для визначення значень атрибутів:

$$\psi_{12} = \left\langle s_{12} = \langle \alpha \rightarrow \eta_i \rightarrow \beta \rangle, g_{12,2} = \langle := (k, 2), := (i, 1) \rangle, g_{12,1} = \langle = (b, k, 1), > (\eta_1, i, N), \& (\eta_1, \eta_1, b) \rangle \right\rangle, \quad (15)$$

Правила $\psi_{13} \dots \psi_{15}$ призначені для визначення керуючих дій для раціонального використання енергії рекуперації:

$$\psi_{13} = \left\langle s_{13} = \left\langle \beta \rightarrow epss_i \cdot \beta \mid \beta \rightarrow tf_i \cdot \beta \mid \beta \rightarrow cr_i \cdot \beta \mid \beta \rightarrow aci_i \cdot \beta \mid \beta \rightarrow esd_i \cdot \beta, \mid \beta \rightarrow cl_i \cdot \beta, \mid \beta \rightarrow tr_i \cdot \beta, \mid \beta \rightarrow cl_i \cdot \beta, \mid \beta \rightarrow rn_i \cdot \beta \right\rangle, g_{13,1} = \varepsilon, g_{13,2} = \langle + (i, i, 1) \rangle \right\rangle, \quad (16)$$

$$\psi_{14} = \left\langle \begin{array}{l} s_{14} = \langle \beta \rightarrow (\beta | \beta \rightarrow) \beta | \beta \rightarrow \cdot \beta | \beta \rightarrow: \beta, | \beta \rightarrow \times \beta, | \rangle \\ g_{14,1} = \varepsilon, g_{14,2} = \varepsilon \end{array} \right\rangle, \quad (17)$$

$$\psi_{15} = \left\langle \begin{array}{l} s_{15} = \langle \beta \rightarrow sw_i \otimes \beta \rangle, g_{15,1} = \varepsilon, \\ g_{15,2} = \langle \downarrow (pp \dashv sw_i, pt \dashv sw_i, tpt \dashv sw_i), +(i, i, 1), +(m, m, 1) \rangle \end{array} \right\rangle, \quad (18)$$

Перевірка закінчення розбору сентенціальної форми l для отримання запропонованих експертом рішень:

$$\psi_{16} = \left\langle \begin{array}{l} s_{16} = \langle \beta_{\eta_2} \rightarrow \gamma \rangle g_{16,1} = \langle = (b, k, 1), > (\eta_2, i, N), \& (\eta_2, \eta_2, b) \rangle, \\ g_{16,2} = \langle := (k, 1), := (i, 1) \rangle \end{array} \right\rangle, \quad (19)$$

Формування циклу збору інформації та керуючих дій:

$$\psi_{17} = \left\langle \begin{array}{l} s_{17} = \langle \gamma_{\eta_3} \rightarrow \alpha \rangle g_{17,1} = \langle > (\eta_3, m, M) \rangle, g_{17,2} = \varepsilon \end{array} \right\rangle, \quad (20)$$

3. Визначення алгоритмічних конструкторів. Алгоритмічний конструктор [2]:

$$C_A = \langle M_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle, \quad (21)$$

вирізняється від інших тим, що носій M_A включає алгоритми та множини їх вхідних та вихідних даних – $M_A \supset \{A_i |_{X_i}^{Y_i}\} \cup (\bigcup_{A_i^o \in V_A} (X(A_i) \cup Y(A_i)))$, де $A |_X^Y$ – деякий алгоритм (ідентифікований як A) з набором вхідних (X) та вихідних (Y) даних. M_A обов'язково включає базові алгоритми A_1^0 та A_2^0 які реалізують операції Σ_A та деякі сконструйовані алгоритми $A_i |_{X_i}^{Y_i}$.

Визначимо два алгоритмічні конструктори $C_{A,1} = \langle M_{A,1}, \Sigma_A, \Lambda_{A,1} \rangle$ та

$$C_{A,2} = \langle M_{A,2}, \Sigma_A, \Lambda_{A,2} \rangle.$$

ІЗК $\Lambda_{A,1}$ включає аксіоматику узагальненого алгоритмічного [1, 2] конструктора та визначає семантику алгоритмів з $M_{A,1}$:

– $A_1^0 |_{A_i, A_j}^{A_i \cdot A_j}$ – композиція алгоритмів, послідовне виконання алгоритму A_j після алгоритму A_i ;

– $A_2^0 |_Z^{A_i}$ – умовне виконання: алгоритм A_i виконується якщо умова Z true;

– $A_3 |_{l_h, l_q}^{f_i}$ – реалізує операцію підстановки: згідно відношення підстановки $l_h \rightarrow l_q$ у поточній сентенціальній формі f_i виконує заміну l_h на l_q ;

– $A_4 |_{f_i, \Psi}^{f_j}$, $A_5 |_{\sigma, \Psi}^{\bar{\Omega}}$ – алгоритми які реалізують операції часткового та повного виводу, тут f_i, f_j – форми, σ – аксіома, Ψ – множина правил підстановки; $\bar{\Omega}$ – множина сформованих конструкцій;

а також алгоритми що реалізують операції над атрибутами:

- $A_6 \left|_b^a\right.$ – присвоєння;
- $A_7 \left|_{b,c}^a\right.$ – визначення суми чисел;
- $A_8 \left|_{b,c}^a\right.$ – порівняння на більше;
- $A_9 \left|_{a,b\dots}^{\text{зображення на екранній формі}}\right.$ – реалізація операції « \uparrow »: формується і виводиться екранна форма з зображенням електричної схеми і полями для вводу/виводу значень атрибутів;
- $A_{10} \left|_{a,b\dots}^{a,b\dots\text{у бази даних}}\right.$ – реалізація операції « \updownarrow »: випадковим чином визначаються і виводяться на екранну форму та у базу даних значення атрибутів;
- $A_{11} \left|_{a,b\dots}^{a,b\dots\text{у бази даних}}\right.$ реалізація операції « \downarrow »: визначені експертом керування зберігаються у бази даних.

Другий алгоритмічний конструктор $C_{A,2} = \langle M_{A,2}, \Sigma_A, \Lambda_{A,2} \rangle$ призначений для дистанційного збору інформації щодо стану електроустаткування та поїзної ситуації ділянки електропостачання постійного струму та автоматизованого керування розподілом енергії рекуперації. Він вирізняється від першого лише деякими алгоритмами, а саме:

- $A_9 \left|_{a,b\dots}\right.$ – пустий алгоритм;
- $A_{10} \left|_{a,b\dots}^{a,b\dots}\right.$ – реалізація операції « \updownarrow »: отримання вимірних значень показників роботи електроустаткування та поїзної ситуації;
- $A_{11} \left|_{a,b\dots}^{a,b\dots}\right.$ реалізація операції « \downarrow »: передача визначеного керування на засоби керування.

4. Системи конструювання – інтерпретація конструктору

$\tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle$. У результаті інтерпретації конструктору отримуємо систему конструювання яка поєднує модель засобів конструювання і внутрішнього виконавця у вигляді алгоритмічного конструктора.

Перша конструктивна система здатна формалізувати знання експерта щодо розподілу енергії рекуперації на деякій ділянці енергозабезпечення:

$$\langle \tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle, C_{A,1} = \langle M_{A,1}, \Sigma_A, \Lambda_{A,1} \rangle \rangle_I \mapsto \tilde{C}_{ZEKI,1} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_5 \rangle, \quad (22)$$

де $\Lambda_5 = \Lambda_3 \cup \Lambda_{A,1} \cup \Lambda_6$, у свою чергу ІЗК Λ_6 встановлює відповідність операціям (у якості їх атрибутів) алгоритмів алгоритмічного конструктора:

$$\Lambda_6 = \{(A_3 \mid_{l_h, l_q}^{f_i} \leftarrow \Rightarrow), (A_4 \mid_{f_i, \Psi}^{f_j} \leftarrow \Rightarrow),$$

$$(A_5 \mid_{\sigma, \Psi}^{\bar{\Omega}} \leftarrow \Rightarrow), (A_6 \mid_b^a \leftarrow :=),$$

$$(A_6 \mid_b^a \leftarrow :=), (A_7 \mid_{b,c}^a \leftarrow +),$$

$$(A_8 \mid_{b,c}^a \leftarrow >),$$

$$(A_8 \mid_{b,c}^a \leftarrow >),$$

$$A_9 \mid_{a,b...}^{\text{зображення на екранній формі}} \leftarrow \uparrow),$$

$$(A_{10} \mid_{a,b...}^{a,b... \text{ бази даних}} \leftarrow \updownarrow),$$

$$(A_{11} \mid_{a,b...}^{a,b... \text{ бази даних}} \leftarrow \downarrow)\}.$$
(23)

Приклад реалізації цієї конструктивної системи наведено у таблицях 2 і 3.

Таблиця 2

Інформація для прийняття рішення (приклад)

esd_{10}				sw_{11}			tf_{14}				$epss_{15}$
η , в.о.	W , МДж	W_{max} , МДж	V , МДж/с	pp	pt	tpt , с	η , в.о.	k , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	U_{ES} , кВ
0,88	12	30	0,07	off	on	120	0,89	1,5	6	3,0	3,3
0,87	10	30	0,13	off	on	150	0,9	10	35	3,5	3,3
0,86	28	30	—	off			0,92	30	110	3,8	3,3
aci_{16}			sw_{17}			cr_{18}			esd_{19}		
η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	pp	pt	tpt , с	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	η , в.о.	W , МДж	W_{max} , МДж
0,89	2,8	3,8	off	on	20	0,89	2,95	2,8	0,88	47	50
0,89	3,9	3,9	off	on	50	0,89	3,5	3,9	0,86	20	50
0,88	3,6	3,7	off			0,89	3,8	3,6	0,89	40	50
esd_{19}	sw_{20}			tf_{23}				$epss_{24}$	aci_{25}		
V , МДж/с	pp	pt	tpt , с	η , в.о.	k , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	U_{ES} , кВ	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ
	off			0,89	1,5	110	3,5	3,3	0,88	3,6	3,5
0,16	off	on	180	0,9	10	35	3,5	3,3	0,87	3,8	3,7
0,33	off	on	30	0,92	30	110	3,7	3,4	0,85	3,9	3,8
sw_{26}			cr_{27}			esd_{28}				sw_{29}	
pp	pt	tpt , с	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	η , в.о.	W , МДж	W_{max} , МДж	V , МДж/с	pp	pt

		с	в.о.	кВ	, кВ	в.о.	МДж	МДж	/с		
on			0,89	3,4	3,3	0,8	5	30	0,16	off	on
on			0,87	3,4	3,2	0,88	25	30	50	off	
on	off	190	0,9	3,3	3,3	0,87	10	30	0,67	off	on
sw_{29}	tf_{32}				$epss_{33}$	aci_{34}			sw_{35}		
tpt , с	η , в.о.	k , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	U_{ES} , кВ	η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	PP	pt	tpt , с
150	0,89	32	110	3,4	3,4	0,88	3,8	3,9	on	off	50
	0,89	66	220	3,5	3,3	0,89	3,9	4,0	on	off	90
30	0,88	11	35	3,3	3,2	0,9	3,6	3,7	on		
cr_{36}			cl_{39}					tr_{41}			cl_{45}
η , в.о.	U_{in} , кВ	U_{out} , кВ	ρ , Ом/км	L , км	n	x_1 , км	x_2 , км	ν	l , км	P , МВт	ρ , Ом/км
0,9	3,4	3,3	0,057	15	2	6	8	рекуп.	8	2,5	0,057
0,88	3,5	3,4	0,057	18	2	4	10	тяга	10	0,8	0,057
0,89	3,3	3,2	0,057	14	2	8	6	тяга	6	1,5	0,057
cl_{45}				cl_{49}					cl_{51}		
L , км	n	x_1 , км	x_2 , км	ρ , Ом/км	L , км	n	x_1 , км	x_2 , км	ρ , Ом/км	L , км	n
15	off	4	8	0,059	17	2	4	8	0,057	15	1
18	off	4	8	0,06	19	1	2		0,057	15	1
14	off	4	8	0,057	15	1	2		0,057	15	1
cl_{51}			tr_{53}			cl_{55}					
x_1 , км	x_2 , км		ν	l , км	P , МВт	ρ , Ом/км	L , км	n	x_1 , км	x_2 , км	
1			тяга	10	1,7	0,058	15	1	2		
2			рек.	2	0,8	0,058	15	1	2		
2			рек.	4	1,1	0,059	12	2	4	6	

Рекомендації експерта (приклад)

№ п/п	sw_{11}			sw_{17}			sw_{20}		
	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c
1	off	on	120	off	on	20	off		
2	off	on	150	off	on	50	off	on	180
3	off			off			off	on	30
	sw_{26}			sw_{29}			sw_{35}		
	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c	pp	pt	tpt, c
1	on			off	on	150	on	off	50
2	on			off			on	off	90
3	on	off	190	off	on	30	on		

Друга конструктивна система моделює реальну систему розподілу енергії рекуперації на деякій ділянці енергозабезпечення:

$$\langle \tilde{C}_{ZEK} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3 \rangle, C_{A,2} = \langle M_{A,1}, \Sigma_A, \Lambda_{A,2} \rangle \rangle_I \mapsto \tilde{C}_{ZEK,1} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_7 \rangle, \quad (22)$$

де $\Lambda_7 = \Lambda_3 \cup \Lambda_{A,2} \cup \Lambda_6$.

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

5. Обговорення результатів. У попередній статті [4] представлена модель яка дозволяє формувати множину потенційно можливих схем ділянок системи електропостачання. Ця стаття є її продовженням. Тут представлені конструкторі які дозволяють:

- наповнити моделі представлені у [4] значеннями атрибутики і рішеннями експерта щодо розподілу енергії рекуперації;
- керувати станом електроустаткування у реальній системі електропостачання ділянки електропостачання постійного струму для ефективного розподілу енергії рекуперації.

Залишається питання яким чином формується саме керування. Ця задача на основі керування з нечіткою логікою буде розглянута у наступній статті.

Висновки. Одним із основних напрямків розвитку економіки України є енергозбереження, що пов'язано зі складною ситуацією на ринку енергоносіїв.

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

Представлені результати розширюють можливості конструктивно-продукційного моделювання у частині інформаційного наповнення атрибутики електроустаткування з метою подальшої автоматизації керування розподілом енергії рекуперації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shynkarenko V.I. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure / V.I. Shynkarenko, V. M. Ilman // *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(3), 2014, 655-662. DOI: 10.1007/s10559-014-9655-z
2. Shynkarenko V.I. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures / V.I. Shynkarenko, V.M. Ilman, V.V. Skalozub // *Cybernetics and Systems Analysis*, 45(3), 2009, 329-339. DOI : 10.1007/s10559-009-9118-0
3. Shynkarenko, V. Constructive-Synthesizing Modelling of Multifractals Based on Multi-constructors / V. Shynkarenko, R. Chyhir // 14th International Scientific and Practical Programming Conference, UkrPROG 2024, CEUR Workshop Proceedings. Vol.3806, pp. 75–88.
4. 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
5. 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
6. Khodaparastan M., Mohamed A.A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 20(8), 2019, 2831–2847. DOI: 10.1109/TITS.2018.2886809
7. Chen J., Hu H., Ge Y., Wang K., Huang W., He Z. An Energy storage system for recycling regenerative braking energy in high-speed railway. *IEEE Trans. Power Deliv.* 36(1), 2021, 320–330. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980018
8. Deng W. et al. Back-to-back hybrid energy storage system of electric railway and its control method considering regenerative braking energy recovery and power quality improvement // *Proceedings of the CSEE*, –. 39(10), 2019, 2914-2924. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123263.
9. Hu H., Liu Y., Li Y. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Rail. Eng. Science* 32, 2024, 1–19,. DOI: 10.1007/s40534-023-00320-6

REFERENCES

1. Shynkarenko V.I. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure / V.I. Shynkarenko, V. M. Ilman // *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(3), 2014, 655-662. DOI: 10.1007/s10559-014-9655-z
2. Shynkarenko V.I. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures / V.I. Shynkarenko, V.M. Ilman, V.V. Skalozub // *Cybernetics and Systems Analysis*, 45(3), 2009, 329-339. DOI : 10.1007/s10559-009-9118-0
3. Shynkarenko, V. Constructive-Synthesizing Modelling of Multifractals Based on Multi-constructors / V.Shynkarenko, R.Chyhir // 14th International Scientific and Practical Programming Conference, UkrPROG 2024, CEUR Workshop Proceedings. Vol. 3806, pp. 75–88.

4. Shynkarenko V. I. Konstruktyvno-produktsiine modeliuвання systemy elektropostachania tiahы postiinoho strumu / 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
5. 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
6. Khodaparastan M., Mohamed A.A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 20(8), 2019, 2831–2847. DOI: 10.1109/TITS.2018.2886809
7. Chen J., Hu H., Ge Y., Wang K., Huang W., He Z. An Energy storage system for recycling regenerative braking energy in high-speed railway. IEEE Trans. Power Deliv. 36(1), 2021, 320–330. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.2980018
8. Deng W. et al. Back-to-back hybrid energy storage system of electric railway and its control method considering regenerative braking energy recovery and power quality improvement //Proceedings of the CSEE, –. 39(10), 2019, 2914-2924. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123263.
9. Hu H., Liu Y., Li Y. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. Rail. Eng. Science 32, 2024, 1–19,. DOI: 10.1007/s40534-023-00320-6

Received 03.04.2025.
Accepted 07.04.2025.

Attribute saturation of the constructive-synthesizing model of the DC traction power supply system section

This article is one of three that collectively explore the solution to the problem of recuperative energy distribution for its rational use. The solution is achieved through constructive-production modeling, and the fundamental principles of this approach are outlined.

Building on the previous article, a general constructive-synthesizing model for the DC traction power supply section was introduced. This model tackles several challenges, including reducing electricity consumption in both railway and urban public electric transport systems. Its core objectives involve identifying the availability and specifications of traction substation equipment and optimizing the use of recuperation energy. Furthermore, it can address other issues related to the design of traction power supply systems. An illustrative example of a linear power supply section layout with three substations is also presented.

In the current article, additional attribute data of the constituent elements enriches the previously developed general constructive-production model of the DC traction power supply section. By interpreting the model through algorithmic constructor tools, various constructive systems can be formed. One such system is designed to randomly determine the attributes of electrical equipment and train scenarios from a set of potentially possible options. These alternatives are then evaluated by experts to inform decisions regarding the use of recuperation energy. Future development will focus on creating a fuzzy logic-based control system using this expert data. Another system is aimed at collecting real-world data on the state of electri-

cal equipment and train scenarios to enable automated energy distribution management. The approach is exemplified by a developed scheme of a linear power supply section featuring three substations.

The next article will show how the system for managing recuperation energy distribution using fuzzy logic is constructed.

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

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

Іванов Олександр Петрович – кандидат технічних наук, доцент 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.

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

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

Ivanov Oleksandr candidate of technical sciences, associate 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.

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