

КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Анотація. Розроблена загальна конструктивно-продукційна модель ділянки електропостачання тяги постійного струму. Модель може використовуватись для рішення низки задач, пов'язаних зі зменшенням електроспоживання як на залізничному так і міському громадському електротранспорті. Розроблена модель орієнтована на визначення наявності і номенклатури обладнання тягових підстанцій та раціонального використання енергії рекуперації. Однак може бути застосована і для вирішення інших задач, пов'язаних з конструкціями системи тягового електропостачання. Наведено приклад сформованої схеми лінійної ділянки електропостачання з трьома підстанціями.

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

Вступ. Вимоги сучасності щодо економічності та екологічності транспортних систем вимагають від країн розширювати свої залізничні системи, водночас використовуючи сучасні методи і технології енергозбереження. Основними технологіями енергозбереження в системах електричної тяги на сьогодні є впровадження енергоефективних режимів руху транспортних засобів і оптимізація типу розмірного ряду потужностей рухомого складу і тягових підстанцій, упровадження відновлювальних джерел, багатофункціональних перетворювачів і пристроїв зберігання електричної енергії в системи електропостачання та ін. При цьому одним з важливих резервів зниження енергоємності і покращення екологічних показників транспорту з електричною тягою є використання можливостей часткового відновлення витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації, що дозволяє зменшити споживання енергії на перевезення за різними оцінками на 10...40 % [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поява сучасних залізничних технологій забезпечує рекуперативну гальмівну систему, яка може відновлювати значну частину енергії від роботи гальм. Управління рекуперативною енергією стає ключем до покращення роботи залізниць. Завдяки інтеграції графіка руху поїздів та системи зберігання енергії управління енергією може бути більш гнучким та ефективним, що призведе до покращення енергозберігаючої роботи [2].

Згідно з останніми дослідженнями, впровадження сучасних систем регенеративного гальмування значно підвищує ефективність роботи електричних залізничних транспортних систем [3]. 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 [4].

Зміна графіка руху дозволяє краще синхронізувати споживання та зберігання енергії, що значно підвищує ефективність роботи залізничних систем. Такий підхід також допомагає зменшити пікове електроспоживання, що знижує загальні витрати на електроенергію [3, 5].

Розробка системи зберігання енергії для рекуперативного гальмування високошвидкісних залізничних систем є важливим кроком до підвищення енергоефективності та зниження витрат на електроенергію. Використання таких систем дозволяє зберігати відновлену енергію для подальшого використання під час руху поїздів [6, 7].

Рекуперативна енергія є критичною для підвищення енергоефективності та екологічної стійкості високошвидкісних залізничних систем. 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].

Новий метод розподілу та повторного використання енергії рекуперативного гальмування в електропоїздах передбачає використання сучасного обладнання. Запропонована система інтегрує перетворювачі енергії, тягову мережу, електропоїзди та пристрої зберігання енергії на основі використання механізмів гнучкого розподілу для ефективного зберігання та використання кінетичної та потенційної енергії поїздів. Цей підхід підвищує енергоефективність та забезпечує стійке рішення для повторного використання гальмівної енергії поїздів [10].

1. Викладення основного матеріалу

1. Постановка задачі. На основі викладеного виникає задача розробки загальної моделі ділянки електропостачання постійного струму засобами конструктивно-продукційного моделювання, яка в свою чергу базується на засадах формальних граматики. Модель має передбачати можливість енергозбереження за рахунок раціонального використання енергії рекуперації.

2. Основні положення конструктивно-продукційного моделювання. Наведемо основні поняття конструктивно-продукційного моделювання.

Узагальненим конструктором у парадигмі конструктивно-продукційного моделювання є трійка [11]:

$$C_G = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle, \quad (1)$$

де M – неоднорідний розширюваний носій, Σ – сигнатура операцій та відношень, яка включає операції зв'язування, підстановки та виведення, операції над атрибутами та відносини підстановки, Λ – множина тверджень, що складає інформаційне забезпечення конструювання (ІЗК). Загальні положення Λ викладені у [11].

Призначення конструкційно-продукційного моделювання (КПМ) полягає у формуванні множин потенційно можливих конструкцій та/або конструктивних процесів за допомогою операцій зв'язування, підстановки, виведення та інших, що задаються правилами у Λ .

У даній роботі конструкціями є структурні схеми системи тягового електропостачання постійного струму.

Для формування конструкцій необхідно виконувати низку уточнюючих перетворень узагальненого конструктора [11]:

– спеціалізація визначає предметну область: семантичну природу носія, скінчену множину операцій та їх семантику, атрибутику операцій, порядок їх виконання та обмеження на правила підстановки;

– інтерпретація полягає у зв'язуванні операцій сигнатури з алгоритмами виконання деякого алгоритмічного конструктора [12]. При інтерпретації виконується зв'язування інформаційної моделі засобів формування конструкцій та моделі виконавця, утворюючи конструктивну систему здатну автономно формувати конструкції;

– конкретизація полягає у розширенні аксіоматики множиною правил продукції, завданні конкретних множин нетермінальних та термінальних символів з їх атрибутами та, за необхідності, значень атрибутів;

– реалізація полягає у формуванні конструкції з елементів носія шляхом виконання алгоритмів, пов'язаних з операціями сигнатури. Реалізація можлива тільки для попередньо спеціалізованого, інтерпретованого та конкретизованого конструктора [11].

Відповідно до Λ узагальненого конструктора [11] формою ${}_w l$ з атрибутом w називається набір терміналів та нетерміналів, що поєднуються операціями зв'язування. Конструкцією називається форма, що містить лише термінали [11]. Терміналами є елементи для формування конструкцій, а нетермінали – поміжні абстрактні елементи, необхідні для завдання правил підстановки.

Правила підстановки мають вигляд $\psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$, де s_r – набір відносини підстановки, g_r – набір операцій над атрибутами. Відношення підстановки – двомісне відношення з атрибутами. ${}_{w_i} l_i \rightarrow {}_{w_j} l_j$ [11]. Для форми

${}_{w_l} l_l = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_h} l_h, \dots, {}_{w_k} l_k)$ та доступного відношення підстановки

${}_{w_h} l_h \rightarrow {}_{w_q} l_q$ такого, що ${}_{w_h} l_h \prec {}_{w_l} l_l$ (${}_{w_h} l_h$ є частиною ${}_{w_l} l_l$), результатом

тримісної операції підстановки ${}_{w_p} \Rightarrow ({}_{w_h} l_h, {}_{w_q} l_q, {}_{w_l} l_l)$ буде форма

${}_{w_l}^* l_l = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_q} l_q, \dots, {}_{w_k} l_k)$ [11], де \oplus – будь-яка операція зв'язування з

Σ .

Операція часткового виводу полягає у:

– виборі одного з доступних правил підстановки $\psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$, з відносинами підстановки s_r та виконання на його основі операції підстановки;

– виконання операцій над атрибутами g_r .

Форми, що отримуються в результаті операцій часткового виводу, починаючи з початкового нетерміналу, є сентенціальними.

Операція повного виводу (або просто виводу) полягає у послідовному виконанні операції часткового виводу, починаючи з початкового нетерміналу, і закінчуючи остаточною формуванням множини конструкцій, інколи єдиної.

3. Конструктивно-продукційна модель ділянки електропостачання. Визначимо спеціалізацію конструктору – моделі (структурної схеми) системи тягового електропостачання:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle_s \mapsto C_{ZE} \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_{ZE} \rangle, \quad (2)$$

де $\Lambda_{ZE} = \Lambda \cup \Lambda_1 \cup \Lambda_2$, $\Lambda_1 = \{M_{ZE} \supset T_1 \cup N_1, \Sigma_{ZE} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}, \Xi = \{^2, :^2, \times^2\}, \Phi = \{:=^1, +^2\}, \Theta = \{\Rightarrow, |\Rightarrow, ||\Rightarrow\}\}$, множини: Ξ – відносин (і відповідних операцій) зв'язування елементів конструкцій, Φ – операцій над атрибутами, Θ – операцій виведення, T_1, N_1 – терміналів та нетерміналів.

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


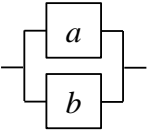
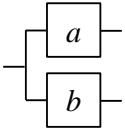
Термінальним алфавітом T_1 є множина елементів системи тягового енергопостачання, споживання та перетворення електроенергії в мережі постійного струму залізниць, трамвайних та тролейбусних ліній та метрополітенів з їх суттєвими для цього завдання властивостями – атрибутами. Елементи будемо позначати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

Нетермінальний алфавіт $N_1 = \{\phi_i\}$ складається з багатьох допоміжних символів з атрибутами, що позначаються грецькими літерами.

Відношення та операції зв'язування Ξ 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 загальному випадку відношення табл. 1 не мають властивостей асоціативності і комутативності, тому для однозначного визначення порядку виконання операцій зв'язування будуть застосовуватися дужки. У тих окремих випадках, де виконується асоціативність дужки, можуть бути опущені.

Операції над атрибутами: $:=(a,b)$ – присвоєння значення b змінній a ; $+(a,b,c)$ – присвоєння суми значень b і c змінній a .

Інтерпретація КПМ полягає у розширенні аксіоматики: $\forall \circ \in \Sigma_{ZE}$ задається $(A \stackrel{Y}{\leftarrow} \circ)$, тобто операції \circ присвоюється значення атрибуту як $A \stackrel{Y}{\leftarrow}$ – алгоритму деякого алгоритмічного конструктора C_A [12], в такий спосіб операції з сигнатури Σ пов'язуються з алгоритмами їх виконання

$$\begin{aligned} \langle C_{ZE} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_{ZE} \rangle, C_A = \langle M_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle \rangle \quad I \mapsto \\ I \mapsto C_{ZEI} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3, Z \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

де $M_A \supset \bigcup_{A_i^0 \in V_A} (X(A_i^0) \cup Y(A_i^0))$ – носій алгоритмічної структури, Σ_A – множина операцій зв'язування алгоритмів (у [12] визначено операції композиції та умовного виконання), Λ_A – ІЗК алгоритмічного конструктора (типова аксіоматика наведена в [12]), $V_A = \{A_i^0 \stackrel{Y_i}{\leftarrow} X_i\}$ – множина утворюючих алгоритмів алгоритмічного конструктора (множина елементарних алгоритмів, що реалізуються деяким виконавцем) $V_A \subset M_A$; X_i, Y_i – множина вхідних та вихідних даних алгоритму $A_i^0 \stackrel{Y_i}{\leftarrow} X_i$, відповідно. $\Lambda_3 = \Lambda_{ZE} \cup \Lambda_A$.

При інтерпретації виконується зв'язування інформаційної моделі способу побудови конструкцій та моделі виконавця.

Реалізація КПМ C_{ZEI} – схема ділянки системи електропостачання, тому термінали – елементи системи електропостачання зі своїми технічними характеристиками.

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

$$\begin{aligned} C_{ZEI} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_3, Z \rangle \quad K \mapsto \\ K \mapsto C_{ZEIC} = \langle M_{ZE}, \Sigma_{ZE}, \Lambda_4, Z \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\Lambda_4 = \Lambda_3 \cup \Lambda_5$.

ІЗК Λ_5 містить наступні доповнення.

Термінали алфавіту T_1 :

– $_{U_{ES}} epss$ - зовнішня система електропостачання з атрибутом U_{ES} - рівень вхідної напруги системи тягового електропостачання;

– $\eta, k, U_{in}, U_{out} tr$ – 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 електрична ємність, V – максимальна швидкість (час) заряду/розряду);

– $\rho, L, \bar{X}, n cl$ – 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 – розташування 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;

– sw – перемикач.

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.

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

ІЗК Λ_5 містить такі правила продукції.

Перше правило містить відношення, що зв'язує ділянку тягової мережі з двома підстанціями живлення:

$$\psi_1 = \left\langle \begin{array}{l} s_1 = \langle \sigma \rightarrow \alpha \cdot \beta \cdot \nu \rangle, \\ g_1 = \left\langle \begin{array}{l} = (index \downarrow \alpha = i), +(i, i, 1), \\ = (index \downarrow \beta = i), +(i, i, 1), \\ = (index \downarrow \nu = i), +(i, i, 1), \end{array} \right\rangle \end{array} \right\rangle, \quad (5)$$

Правило ψ_2 дозволяє рекурсивно доповнити модель наступною (сусідньою) ділянкою (ітеративно кількома ділянками):

$$\psi_2 = \langle s_2 = \langle \nu \rightarrow \alpha \times (\beta \cdot \nu) \rangle, g_2 = \langle \dots \rangle \rangle. \quad (6)$$

Позначка « \dots » у g_2 і у подальшому означає формування відповідних індексів id , як у g_1 .

Правило Ψ_3 призначене для завершення рекурсії.

$$\Psi_3 = \langle s_3 = \langle v \rightarrow \alpha \rangle, g_3 = \langle \dots \rangle \rangle. \quad (7)$$

Наступне правило дозволяє моделювати колійне розгалуження з відповідною тяговою мережею та підстанціями (без підстанції в місці розгалуження):

$$\Psi_4 = \langle s_4 = \langle v \rightarrow (\beta \cdot v) \times (\beta \cdot v) \rangle, g_4 = \langle \dots \rangle \rangle \quad (8)$$

або з підстанцією:

$$\Psi_5 = \langle s_5 = \langle v \rightarrow \alpha \cdot (\beta \cdot v) \times (\beta \cdot v) \rangle, g_5 = \langle \dots \rangle \rangle. \quad (9)$$

Ψ_6 - допоміжне правило для обладнання тягової підстанції

$$\Psi_6 = \langle s_6 = \langle \alpha \rightarrow (\delta \times \gamma) \rangle, g_6 = \langle \dots \rangle \rangle. \quad (10)$$

Правило s_7 призначене для включення накопичувача енергії з перемикачем у модель тягової підстанції, Ψ_8 – альтернатива правилу Ψ_7 : підстанція накопичувачем не обладнана:

$$\Psi_7 = \langle s_7 = \langle \delta \rightarrow_{\eta, W, W_{\max}} esd \cdot sw \rangle, g_7 = \langle \dots \rangle \rangle; \quad (11)$$

$$\Psi_8 = \langle s_8 = \langle \delta \rightarrow \varepsilon \rangle, g_8 = \langle \rangle \rangle. \quad (12)$$

Символ ε – порожньо, означає відсутність елемента на структурній схемі.

Правило Ψ_9 дозволяє включити в схему тягової підстанції живлення від зовнішньої енергосистеми та понижуючий трансформатор:

$$\Psi_9 = \langle s_9 = \langle \gamma \rightarrow (\theta : \lambda) \cdot_{\eta, U_{in}, U_{out}} tr \cdot_{U_{ES}} epss \rangle, g_9 = \langle \dots \rangle \rangle. \quad (13)$$

Два альтернативні правила Ψ_{10} і Ψ_{11} дозволяють включити в структурну схему випрямляч з регулятором напруги (Ψ_{10}) або без останнього (Ψ_{11}):

$$\Psi_{10} = \langle s_{10} = \langle \theta \rightarrow_{\eta, U_{in}, U_{out}} cr \rangle, g_{10} = \langle \dots \rangle \rangle; \quad (14)$$

$$\Psi_{11} = \langle s_{11} = \langle \theta \rightarrow_{\eta, U_{in}, U_{out}} cr \cdot_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} rn \rangle, g_{11} = \langle \dots \rangle \rangle. \quad (15)$$

Альтернативні правила Ψ_{12} та Ψ_{13} дозволяють включити в структурну схему інвертор з перемикачем (Ψ_{12}) або без них обох (Ψ_{13}):

$$\Psi_{12} = \langle s_{12} = \langle \lambda \rightarrow br \cdot_{\eta, U_{in}, U_{out}} aci \rangle, g_{12} = \langle \dots \rangle \rangle; \quad (16)$$

$$\Psi_{13} = \langle s_{13} = \langle \lambda \rightarrow \varepsilon \rangle, g_{13} = \langle \rangle \rangle. \quad (17)$$

Правило, що дозволяє моделювати електроживлення багатоколійних ділянок

$$\Psi_{14} = \langle s_{14} = \langle \beta \rightarrow \beta : \beta \rangle, g_{14} = \langle \dots \rangle \rangle \quad (18)$$

та з можливими перемичками на ділянці

$$\Psi_{15} = \langle s_{15} = \langle \beta \rightarrow \beta \cdot \beta \rangle, g_{15} = \langle \dots \rangle \rangle. \quad (19)$$

Правило Ψ_{15} дозволяє замінити нетермінал β на ділянку тягової мережі без потяга:

$$\Psi_{16} = \langle s_{16} = \langle \beta \rightarrow_{\eta, \rho, L, \bar{x}, n} cl \cdot \beta \rangle, g_{16} = \langle \dots \rangle \rangle \quad (20)$$

та з потягом у системі

$$\Psi_{17} = \langle s_{17} = \langle \beta \rightarrow_{v, l, P} tr \cdot \beta \rangle, g_{17} = \langle \dots \rangle \rangle; \quad (21)$$

Вивід завершується правилом Ψ_{18} яке позбавляє останнього не терміналу у сентенціальній формі, перетворюючи її на конструкцію:

$$\Psi_{18} = \langle s_{18} = \langle \beta \rightarrow \varepsilon \rangle, g_{18} = \langle \rangle \rangle. \quad (22)$$

4. Приклад моделі лінійної ділянки електропостачання з трьома тяговими підстанціями. В результаті операції часткового виведення ($\sigma \mid\Rightarrow l_1$), з вибором правила підстановки s_1 буде сформована сентенційна форма $l_1 = \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot \alpha_3$ і відповідна їй структурна схема, представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Структурне представлення сентенційної форми l_1

Продовжуючи підстановку $l_1 \mid\Rightarrow l_2 \mid\Rightarrow l_3$, із застосуванням правила s_2 , послідовно отримаємо сентенційні форми $l_2 = \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot \nu_6))$ та $l_3 = \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot \alpha_7))$ та структурну схему, із залагодженими заготовками двох ділянок тягової мережі (β) та трьох тягових підстанцій (α) (рис. 2).

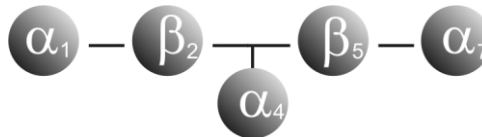


Рисунок 2 – Структурне представлення сентенційної форми l_3

Трохи відхилимось від послідовного викладення прикладу і продемонструємо яким чином можна моделювати розгалужену мережу електрифікованих ділянок колії.

Застосування правила s_4 до форми l_2 і двічі s_3 за операцією часткового виводу $l_2 \mid\Rightarrow l_3^* \mid\Rightarrow l_4^* \mid\Rightarrow l_5^*$ де $l_3^* = \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot (\beta_7 \cdot \nu_8) \times (\beta_9 \cdot \nu_{10})))$, $l_4^* = \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot (\beta_7 \cdot \alpha_{11}) \times (\beta_9 \cdot \nu_{10})))$, $l_5^* = \alpha_1 \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot (\beta_7 \cdot \alpha_{11}) \times (\beta_9 \cdot \alpha_{12})))$, дозволяє сформуванню структурну схему, в якій закладено одне розгалуження колії (з контактною мережею), що живиться окремими тяговими підстанціями (рис. 3). Рекурсивне застосування правил s_4 (або s_5) та s_3 дозволяє моделювати будь яку розгалужену мережу електропостачання.

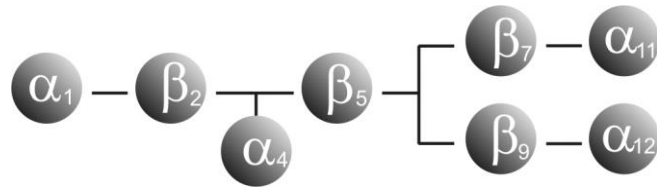


Рисунок 3 – Структурне представлення сентенційної форми l_5^*

Повернемося до нашого прикладу лінійної ділянки мережі електропостачання.

Продовжуючи підстановки $(l_3 \Rightarrow l_4)$ за правилом s_6 отримаємо $l_4 = (\delta_8 \times \gamma_9) \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot \alpha_7))$ і структурну схему з основами конфігурації електрообладнання однією з тягових підстанцій (рис. 4).

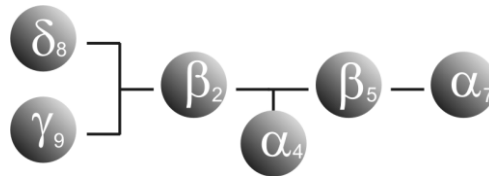


Рисунок 4 – Структурне представлення сентенційної форми l_4

Подальша підстановка $l_4 \Rightarrow l_5$ за правилом s_7 дозволяє отримати $l_5 = (esd_{10} \cdot sw_{11} \times \gamma_9) \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot \alpha_7))$ з додаванням до структурної схеми на рис. 4 накопичувачі електроенергії на відповідній тяговій підстанції (рис. 5).

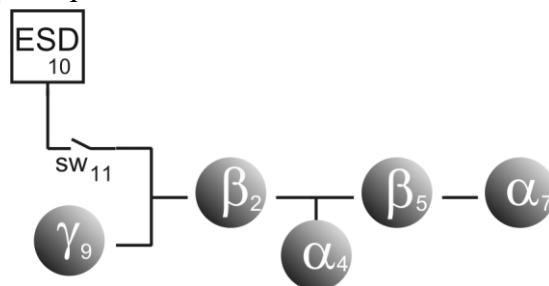


Рисунок 5 – Структурне представлення сентенційної форми l_5

Застосування правила s_9 під час встановлення $l_5 \Rightarrow l_6$ дозволяє отримати $l_6 = (esd_{10} \cdot sw_{11} \times (\theta_{12} : \lambda_{13}) \cdot tr_{14} \cdot epss_{15}) \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot \alpha_7))$. Структурна схема на рис. 5 доповнена обладнанням для передачі надлишкової енергії рекуперації у зовнішню мережу живлення від відповідної тягової підстанції (рис. 6).

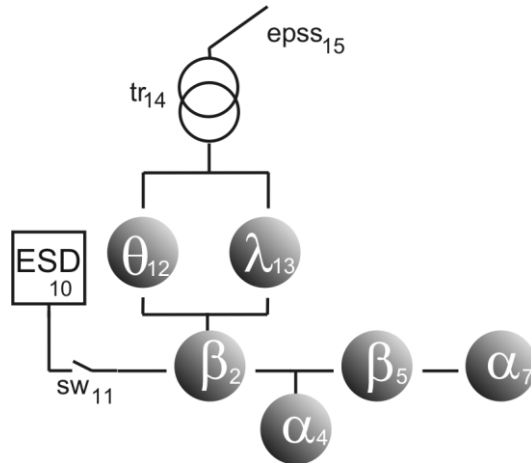


Рисунок 6 – Структурне представлення сентенційної форми l_6

Послідовне застосування правил s_{10} та s_{12} при підстановках $l_6 \Rightarrow l_7 \Rightarrow l_8$ дозволяють отримати $l_7 = (esd_{10} \cdot sw_{11} \times (cr_{16} : \lambda_{13}) \cdot tr_{14} \cdot epss_{15}) \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot \alpha_7))$, $l_8 = (esd_{10} \cdot sw_{11} \times (cr_{16} : sw_{17} \cdot aci_{18}) \cdot tr_{14} \cdot epss_{15}) \cdot \beta_2 \cdot (\alpha_4 \times (\beta_5 \cdot \alpha_7))$. За структурною схемою рис. 7 завершена комплектація обладнання відповідної підстанції інвертором та регулятором напруги. Структурну схему цієї тягової підстанції повністю сформовано (рис. 7).

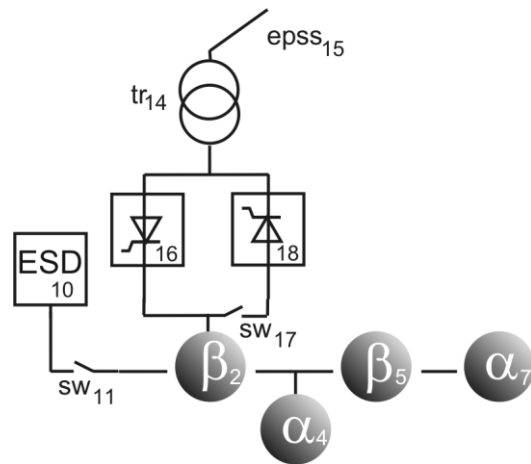


Рисунок 7 – Структурне представлення сентенційної форми l_8

Наступна послідовність підстановок $l_8 \Rightarrow l_9 \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{18}$, із подвійним застосуванням правил $s_6, s_7, s_9, s_{10}, s_{13}$, дозволяє отримати $l_{18} = ((esd_{10} \cdot sw_{11} \times (cr_{16} : (sw_{17} \cdot aci_{18}))) \cdot tr_{14} \cdot epss_{15}) \cdot \beta_2 \cdot (((esd_{19} \cdot sw_{20} \times (cr_{25} : (sw_{26} \cdot aci_{27}))) \cdot tr_{23} \cdot epss_{24})) \times (\beta_5 \cdot (((esd_{28} \cdot sw_{29} \times (cr_{34} : (sw_{35} \cdot aci_{36}))) \cdot tr_{32} \cdot epss_{33}))))$. В результаті операцій часткового виведення повністю сформовано структурну схему всіх тягових підстанцій системи електропостачання (рис. 8).

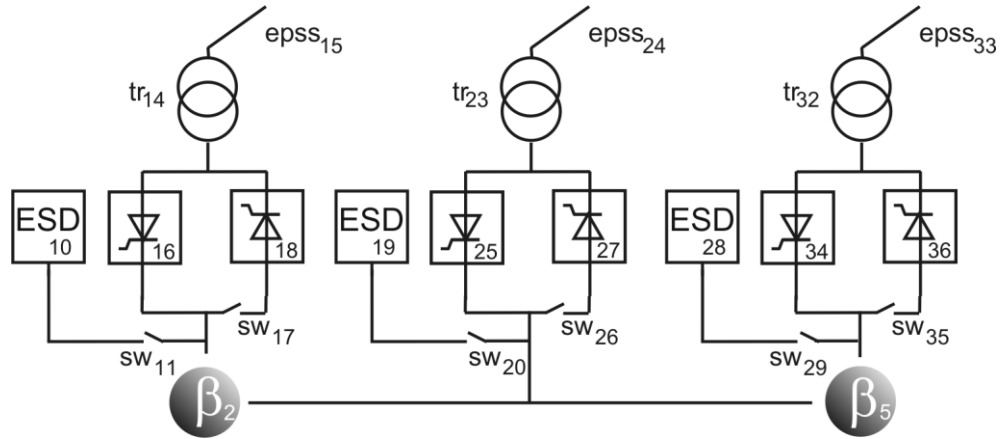


Рисунок 8 – Структурне представлення сентенційної форми l_{18}

Заміна нетерміналів β_2 та β_5 у проміжній формі l_{18} послідовно за правилами $s_{14}, s_{16}, s_{16}, s_{17}, s_{16}, s_{18}$ та $s_{14}, s_{16}, s_{18}, s_{16}, s_{17}, s_{16}, s_{18}$ відповідно, (тобто $\beta_2 \mid \Rightarrow \beta_{37} : \beta_{38} \mid \Rightarrow cl_{39} \cdot \beta_{40} : \beta_{38} \mid \Rightarrow cl_{39} \cdot tr_{41} \cdot \beta_{42} : \beta_{38} \mid \Rightarrow (cl_{39} \cdot tr_{41} \cdot cl_{43} \cdot \beta_{44}) : \beta_{38} \mid \Rightarrow (cl_{39} \cdot tr_{41} \cdot cl_{43}) : \beta_{38} \mid \Rightarrow (cl_{39} \cdot tr_{41} \cdot cl_{43}) : (cl_{45} \cdot \beta_{46}) \mid \Rightarrow (cl_{39} \cdot tr_{41} \cdot cl_{43}) : (cl_{45})$ та $\beta_5 \mid \Rightarrow \beta_{47} : \beta_{48} \mid \Rightarrow cl_{49} \cdot \beta_{50} : \beta_{48} \mid \Rightarrow cl_{49} : \beta_{48} \mid \Rightarrow cl_{49} : (cl_{51} \beta_{52}) \mid \Rightarrow cl_{49} : (cl_{51} \cdot tr_{53} \cdot \beta_{54}) \mid \Rightarrow cl_{49} : (cl_{51} \cdot tr_{53} \cdot cl_{55} \cdot \beta_{56}) \mid \Rightarrow cl_{49} : (cl_{51} \cdot tr_{53} \cdot cl_{55})$) формує варіант двоколіїної ділянки з двома потягами як на структурній схемі рис. 9.

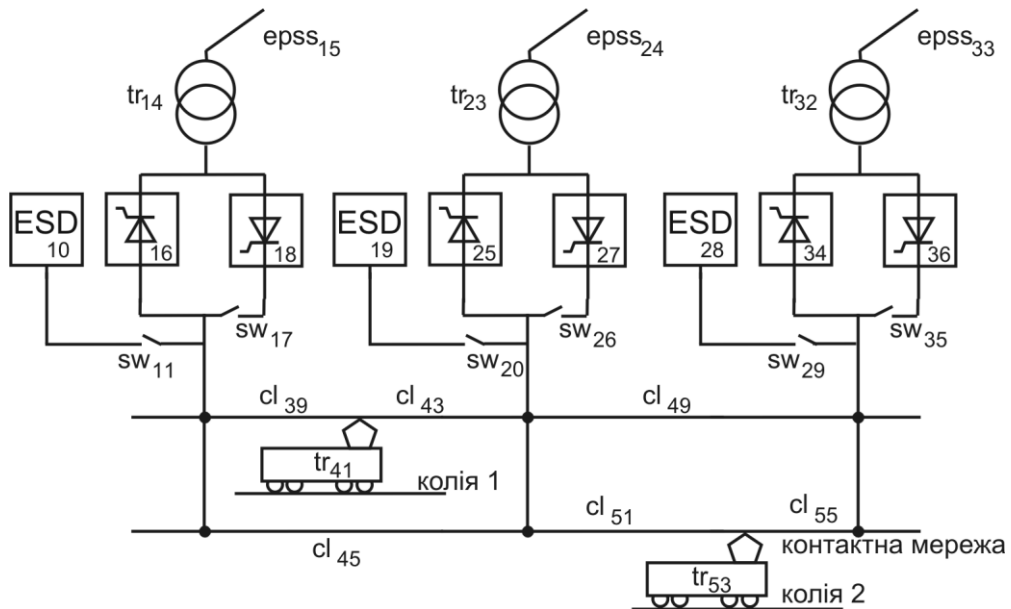


Рисунок 9 – Структурна схема ділянки електропостачання

Сформована структурна схема ділянки споживання енергії рекуперації моделює структуру задіяних тягових підстанцій з максимальною комплектацією та деяку поїзну ситуацію.

Атрибутика елементів схеми формується пристроями вимірювання та передачі інформації та експертними висновками.

2. Обговорення результатів

1. Наведена узагальнена модель дозволяє формувати множину потенційно можливих схем ділянок системи електропостачання, які можуть слугувати основою для подальшого конструктивного моделювання: режимів тягового електропостачання та стану електромережі, варіантів розташування обладнання і поїзної ситуації, визначення на цих моделях експертних висновків щодо використання енергії рекуперації, формування нейрон-фазі або нейронної мережі прийняття рішень, керуючого на їх основі конструктора.

2. Розроблена модель може бути корисною при рішенні низки задач, а саме:

–підвищення енергоефективності системи електричної тяги і, як наслідок, зниження викидів парникових газів у зовнішнє середовище;

–вибору раціональної структури системи електропостачання (розміщення та номенклатури обладнання);

–максимальне використання потенціалу рекуперації енергії та підвищення ресурсу (строку служби) обладнання на основі раціонального керування обладнанням.

3. Вивід схеми може бути як у автоматичному режимі (внутрішнім виконавцем конструктора), так і в керованому (спільно внутрішнім і зовнішнім виконавцями). В останньому випадку можуть бути сформовані схеми електропостачання близькі до реальних з варіативністю обладнання, енергетичної та поїзної ситуації.

3. Висновки

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

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

Розроблений метод моделювання заснований на можливостях КППМ у новій предметній галузі. Термінальний алфавіт семантично наповнений образами електрообладнання, тягової мережі та споживачами електроенергії, що мають відповідну атрибутику.

Виконано конкретизацію КППМ, яка дозволяє врахувати значну кількість можливостей та особливостей сучасного обладнання систем тягового електропостачання, ділянок тягової мережі та поїзної ситуації. Наведений окремий випадок формування структурної схеми демонструє можливості КППМ стосовно низки задач.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. 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
2. Kampeerawat W. A strategy for utilization of regenerative energy in urban railway system by application of smart train scheduling and wayside energy storage system / W.Kampeerawat, T. Koseki // Energy Procedia, 138, 2017, 795–800. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.070.

3. 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
 4. 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
 5. Chen J., Ge Y., Wang K., Hu H., He Z. Integrated Regenerative Braking Energy Utilization System for Multi-Substations in Electrified Railways, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 70(1), 2023, 298-310, DOI: 10.1109/TIE.2022.3146563
 6. Yu Y., Mi Z., Guo X., Niu X., Zheng X. and Sun C., Control design and implementation of a spiral spring energy storage system connected to a grid via PMSG, in CSEE Journal of Power and Energy Systems, 4(3), 2018, 339-351. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2016.00860
 7. Yan N., Li X., Ma S., Zhao H., Zhang B., "Capacity Configuration of Energy Storage Systems for Echelon Utilization Based on Accelerated Life Test in Microgrids", CSEE Journal of Power and Energy Systems, 9(3), 2023, 1139-1150,. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2020.01670
 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
 10. Lu J., Zhu C. & Li X. Research on the Recovery and Reuse Method of Train Regenerative Braking Energy Based on the Decommissioned Equipment of EMU Trains. J. Electr. Eng. Technol. 18, 2023, 3941–3949. DOI:10.1007/s42835-023-01433-y
 11. 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
- 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

Received 30.09.2024.

Accepted 05.10.2024.

Constructive-synthesizing modeling of the direct current traction power supply system

A general constructive-synthesizing model of the DC traction power supply section has been developed. The model can be used to solve a number of problems related to reducing electricity consumption in both railway and urban public electric transport. The developed model is focused on determining the availability and nomenclature of traction substation equipment and rational use of recuperation energy. However, it can also be applied to solve other problems related to the designs of the traction power supply system. An example of the formed scheme of a linear power supply section with three substations is given.

The presented generalized model allows to form a set of potentially possible schemes of sections of the power supply system, which can serve as the basis for further constructive modeling: traction power supply modes and the state of the power grid, equipment location options and train situation, determination of expert conclusions on the use of recuperation energy on these models, formation of a neuro-fuzzy or neural network of decision-making and, based on them control constructor.

The developed modeling method is based on the capabilities of the constructive-synthesizing modeling in a new subject area. The terminal alphabet is semantically filled with images of electrical equipment, traction network and electricity consumers with appropriate attributes.

The constructive-synthesizing modeling specification has been performed, which allows taking into account a significant number of capabilities and features of modern equipment of traction power supply systems, traction network sections and train situation. The given individual case of forming a structural diagram demonstrates the capabilities of the constructive-synthesizing modeling in relation to a number of tasks.

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

Шинкаренко Віктор Іванович – доктор технічних наук, професор 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.

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

Shynkarenko Viktor – doctor of engineering's sciences, 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.

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