

## УДК 621.333.4.024-0.47.58/.048.72

В. И. ШИНКАРЕНКО<sup>1\*</sup>, О. И. САБЛИН<sup>2\*</sup>, А. П. ИВАНОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>2\*</sup>Каф. «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, эл. почта olegsss@i.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

<sup>3\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта iv\_inbox.ru, ORCID 0000-0003-1259-6377

## КОНСТРУКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель.** Научная работа посвящена разработке средств и методов формирования множества реальных и потенциальных структурных схем зон рекуперации с различными поездными ситуациями для дальнейшего обучения нейро-нечетких сетей на основе экспертных решений и формирования рационального управления. **Методика.** Для моделирования структурной схемы системы тягового электроснабжения, режимов тягового электропотребления и поездной ситуации в зоне распределения энергии рекуперации применена методология математико-алгоритмического конструктивизма. Данный подход предусматривает разработку конструктивно-продукционных структур (КПС) с преобразованиями специализации, интерпретации, конкретизации и реализации. Разработка КПС предусматривает определение расширяемого носителя, сигнатуры отношений и операций и конструктивной аксиоматики. Наиболее сложной и существенной частью аксиоматики является множество формируемых правил подстановки, определяющих процесс вывода соответствующих конструкций. **Результаты.** Разработана специализированная и конкретизированная КПС, которая позволяет учесть все возможности и особенности современного оборудования систем тягового электроснабжения, участков тяговой сети и поездной ситуации. Ее особенность: семантическое наполнение терминального алфавита образами электрооборудования, тяговой сети и потребителей электроэнергии, обладающими соответствующей атрибутикой. Приведенный частный случай формирования структурной схемы демонстрирует возможности КПС применительно к данной задаче. **Научная новизна.** Авторами предложен новый подход к решению задачи рационального использования энергии рекуперации, который заключается в применении методов и средств искусственных нейронных сетей, экспертных систем и нечеткой логики и математико-алгоритмического конструктивизма. В данной работе представлены методы конструктивно-продукционного моделирования структуры зоны распределения энергии рекуперации в системе тяги постоянного тока. **Практическая значимость.** Решение задачи рационального использования энергии рекуперации позволяет значительно экономить энергоресурсы, способствовать техническому переоснащению железнодорожного транспорта Украины путем внедрения современных средств и возможностей. Разработанные модели могут применяться для решения и других задач энергосбережения в различных системах электрического транспорта.

**Ключевые слова:** рекуперация; энергосбережение; конструктивно-продукционная структура; структурная схема; модель; тяговая подстанция

### Введение

Техническое переоснащение железнодорожного транспорта Украины предполагает внедрение современных средств и возможностей. Одна из таких задач заключается в энергосбережении путем рационального использования энергии рекуперации в системах тяги постоянного тока на основе интеллектуального

управления качеством электроэнергии [3, 5, 7], оптимизации распределения энергии рекуперации [18].

Решение задачи предполагает при отсутствии на участке тягового энергоснабжения поездов встречного или попутного следования, способных полностью потребить выделенную энергию рекуперации, аккумулировать ее в современных накопителях [4] или передать в пи-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

тающую зовнішню мережу. Такі можливості, як правило, на даний момент відсутні в Україні. Дослідження доцільності їх використання на різних ділянках енергопостачання є суттєвою задачею енергозбереження.

При відсутності строгої математичної моделі для рішення задачі раціонального використання енергії рекуперації пропонується застосування нейро-нечітких моделей [1, 2, 16], які включають в себе штучні нейронні мережі, експертні системи та нечітку логіку [6, 11, 12, 22]. Такі моделі отримали широке поширення в багатьох практичних задачах розпізнавання та управління [8, 9, 10, 13, 17, 21], в тому числі в електротехнічних системах [14, 15].

В нашому випадку, перешкодою для такого моделювання (і ще в більшій мірі для побудови строгої математичної моделі) є значне різноманітність потенціальних можливостей обладнання ділянок тягового енергопостачання. Для моделювання широкого спектра існуючого та потенціального обладнання ділянок рекуперації пропонується використовувати апарат математико-алгоритмічного конструювання (МАК) [19].

Це дасть можливість на основі експертних рішень для смодельованих методами МАК структурних схем різної комплектації електрообладнання та поїздної ситуації навчити нейрофази мережі для управління системою енергопостачання з метою раціонального використання енергії рекуперації.

В подальшому можливо отримати об'єднуючі управління.

### Цель

Дана робота представляє одну з важливих частин запропонованого методу управління системою тягового електропостачання та споживання з метою раціонального використання енергії рекуперації, а саме: розробка засобів та методів формування множини реальних та потенціальних структурних схем зон рекуперації з різними поїздної ситуаціями для подальшого навчання нейрофази мережі (на основі експертних рішень) та формування раціонального управління.

Основою для розробки відповідних методів є теоретичні положення МАК та конструктивно-продукційної структури.

### Методика

Обобщенной конструктивно-продукционной структурой (ОКПС) называется тройка [19]:

$$C_G = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle,$$

де  $M$  – неоднорідний носій структури;  $\Sigma$  – сигнатура, що складається з множин операцій зв'язування, підстановки та виводу, операцій над атрибутами та відношення підстановки;  $\Lambda$  – конструктивна аксіоматика. Аксіоматика  $\Lambda$  повністю представлена в [19].

Назначення конструкційно-продукційної структури (КПС) складається в формуванні множин конструкцій з допомогою операцій зв'язування, підстановки, виводу та ін. операцій, задаваних правилами аксіоматики.

В даній роботі під конструкціями розуміються структурні схеми системи тягового електропостачання в зоні розподілу енергії рекуперації з відповідними поїздної ситуаціями.

Для формування конструкцій необхідно виконувати ряд уточнюючих перетворень ОКПС [19]:

- спеціалізація визначає предметну область: семантичну природу носія, кінцеве множин операцій та їх семантику, атрибутику операцій, порядок їх виконання та обмеження на правила підстановки;

- інтерпретація заключається в зв'язуванні операцій сигнатури з алгоритмами виконання певної алгоритмічної структури [20]. При інтерпретації виконується зв'язування інформаційної моделі способу побудови конструкцій та моделі виконавця;

- конкретизація КПС заключається в розширенні аксіоматики множиною правил продукцій, заданні конкретних множин нетермінальних та термінальних символів з їх атрибутами та, при необхідності, значень атрибутів;

- реалізація КПС заключається в формуванні конструкції з елементів носія КПС шляхом виконання алгоритмів, зв'язаних з операціями сигнатури. Реалізація можлива

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

только для предварительно специализированной, интерпретированной и конкретизированной КПС [19].

Приведем основные понятия конструктивно-производственных структур.

Согласно аксиоматике ОКПС формой  ${}_w l$  с атрибутом  $w$  называется набор терминалов и нетерминалов, объединяемых операциями связывания. Конструкцией называется форма, содержащая только терминалы [19].

Правила подстановки имеют вид  $\psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$ , где  $s_r$  – отношения подстановки;  $g_r$  – набор операций над атрибутами. Отношение подстановки – двуместное отношение с атрибутами  ${}_{w_i} l_i \rightarrow {}_{w_j} l_j$  [19]. Для формы  ${}_{w_l} l_l = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_h} l_h, \dots, {}_{w_k} l_k)$  и доступного отношения подстановки  ${}_{w_h} l_h \rightarrow {}_{w_q} l_q$  такого, что  ${}_{w_h} l_h < {}_{w_l} l_l$  ( ${}_{w_h} l_h$  является частью  ${}_{w_l} l_l$ ), результатом трехместной операции подстановки  ${}_{w_p} \Rightarrow ({}_{w_h} l_h, {}_{w_q} l_q, {}_{w_l} l_l)$  будет форма  ${}_{w_l} l_l^* = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_q} l_q, \dots, {}_{w_k} l_k)$  [19], где  $\oplus$  – любая операция связывания из  $\Sigma$ .

Операция частичного вывода заключается в:

– выборе одного из доступных правил подстановки  $\psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$ , с отношениями подстановки  $s_r$  и выполнении на его основе операций подстановки;

– выполнении операций над атрибутами  $g_r$ .

Формы, получаемые в результате операций частичного вывода, начиная с начального нетерминала, являются сентенциальными.

Операция полного вывода (или просто вывода) заключается в последовательном выполнении операции частичного вывода, начиная с начального нетерминала и заканчивая конструкцией.

### Результаты

Выполнено моделирование зоны распределения энергии рекуперации, которая может включать один или несколько смежных участков тяговой сети с подстанциями: оборудованных или нет накопителем электроэнергии, возможностью передачи электроэнергии во внешние (поставляющие) сети.

*Специализированная конструктивно-производственная модель зоны рекуперации.* Определим специализацию ОКПС – конструктор модели (структурной схемы) системы тягового электроснабжения и электрической тяги в зоне распределения энергии рекуперации:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \xrightarrow{S} C_{ZR} \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_{ZR} \rangle,$$

где  $\Lambda_{ZR} = \Lambda \cup \Lambda_1 \cup \Lambda_2$ ,  $\Lambda_1 = \{M_{ZR} \supset T_1 \cup N_1$ ,

$\Sigma_{ZR} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}$ ,  $\Xi = \{, ;, \times\}$ ,  $\Phi = \emptyset$ ,

$\Theta = \{\Rightarrow, \mid \Rightarrow, \parallel \Rightarrow\}$ , множества:  $\Xi$  – отношений (и соответствующих операций) связывания элементов конструкций,  $\Phi$  – операций над атрибутами,  $\Theta$  – операций вывода,  $T_1, N_1$  – терминалов и нетерминалов.

Частичная аксиоматика  $\Lambda_2$  содержит следующие определения, дополнения и ограничения, которые уточняют алфавит, атрибуты носителя, отношения подстановки, задают особенности выполнения операций подстановки и вывода.

Терминальным алфавитом  $T_1$  является множество элементов системы тягового энергоснабжения, потребления и преобразования электроэнергии в сети постоянного тока железных дорог, трамвайных и троллейбусных линий и метрополитенов с их существенными для данной задачи свойствами – атрибутами. Элементы будем обозначать малыми латинскими символами, например,  $x_a$  – терминал  $a$  с атрибутом  $x$ ;  $x_a \dashv a$  – атрибут  $x$  терминала  $a$ .

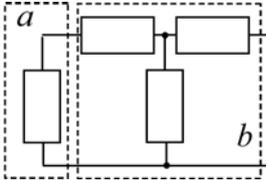
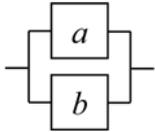
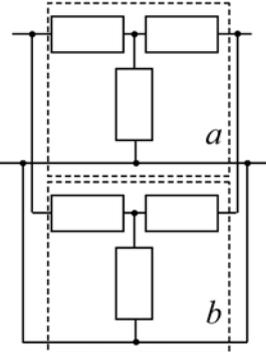
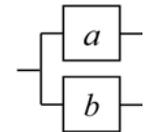
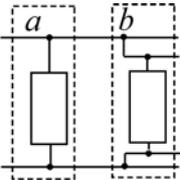
Нетерминальный алфавит  $N_1 = \{\alpha_i\}$  состоит из множества вспомогательных символов с атрибутами, обозначаемых греческими буквами.

Отношения и операции связывания из  $\Xi$  задают последовательное и параллельное соединение элементов электрической цепи (табл. 1).

В общем случае операции не обладают свойствами ассоциативности и коммутативности, то есть  $(a \oplus b) \oplus c \neq a \oplus (b \oplus c)$ , где  $a, b, c \in N_1 \cup T_1$ , а  $\oplus$  – любое отношение связывания из  $\Xi$ . Поэтому для однозначного определения порядка выполнения операций связывания будут применяться скобки. В тех частных случаях, где выполняется ассоциативность, скобки могут быть опущены.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Таблица 1  
Table 1

Операция	Структурная схема	Электрическая схема
$a \cdot b$		
$a : b$		
$a \times b$		

*Модель исполнителя конструирования.* Интерпретация КПС на основании алгоритмической структуры заключается в расширении аксиоматики:  $\forall \circ \in \Sigma$  задается  $(A|_X^Y \dashv \circ)$ , то есть операции  $\circ$  присваивается значение атрибута в виде  $A|_X^Y$  – алгоритма некоторой базовой алгоритмической структуры  $C_A$  [20], таким образом операции из сигнатуры  $\Sigma$  связываются с алгоритмами выполнения

$$\langle C_{ZR} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_{ZR} \rangle, C_A = \langle M_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle \rangle_I \mapsto I \mapsto C_{ZRI} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_3, Z \rangle,$$

где  $M_A \supset \bigcup_{A_i^0 \in V_A} (X(A_i^0) \cup Y(A_i^0))$  – носитель алгоритмической структуры,  $\Sigma_A$  – множество операций связывания алгоритмов (в [20] определены операции композиции и условного выполнения),  $\Lambda_A$  – аксиоматика алгоритмической структуры (типичная аксиоматика приведена

в [20]),  $V_A = \{A_i^0 |_{X_i}^Y\}$  – множество образующих алгоритмов базовой алгоритмической структуры (множество элементарных алгоритмов, реализуемых некоторым исполнителем),  $V_A \subset M_A$ ;  $X_i, Y_i$  – множество определений и значений алгоритма  $A_i^0 |_{X_i}^Y$ ,  $\Lambda_3 = \Lambda_{ZR} \cup \Lambda_4$ ,  $\Lambda_4 = \{(A_i |_{X_i}^Y \dashv \otimes_i) : \forall \otimes_i \in \Sigma, A_i |_{X_i}^Y \in \Omega(C_A)\}$ ,  $i = 1..i_{end}$ ,  $i_{end}$  – количество операций в  $\Sigma$ ,  $\Omega(C_A)$  – множество алгоритмов, конструируемых в  $C_A$ .

При интерпретации выполняется связывание информационной модели способа построения конструкций и модели исполнителя.

Терминалы могут интерпретироваться двояко. Если реализация КПС  $C_{ZR}$  – реальная зона распределения энергии рекуперации, то терминалы – элементы системы электроснабжения с их техническими характеристиками, а если реализация КПС  $C_{ZR}$  – модель зоны распределения энергии рекуперации, то терминалы – условные обозначения соответствующих элементов системы.

*Конкретизация конструктивно-производственной модели.* Конкретизация конструктивно-производственной структуры заключается в расширении аксиоматики множеством конкретных правил продукции и задании конкретных множеств терминалов и нетерминалов:

$$C_{ZRI} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_3, Z \rangle_{K \mapsto} \\ K \mapsto C_{ZRIC} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_5, Z \rangle,$$

где  $\Lambda_5 = \Lambda_3 \cup \Lambda_6$ .

Частичная аксиоматика  $\Lambda_6$  содержит следующие дополнения.

Терминалы алфавита  $T_1$ :  $U_{ES} a$  – внешняя система электроснабжения с атрибутом  $U_{ES}$  – уровень входного напряжения системы тягового электроснабжения;  $\eta, U_{in}, U_{out} b$  – понижающий трансформатор с атрибутами  $\eta$  – к.п.д.,  $U_{in}, U_{out}$  – входное и выходное напряжение;  $\eta, U_{in}, U_{out} c$  – выпрямитель с соответствующими атрибутами;  $\eta, U_{in}, U_{out} d$  – инвертор;  $\eta, W, W_{max} e$  – накопитель электроэнергии с атрибутами:

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$W, W_{\max}$  – накопленая и максимальная электрическая емкость;  ${}_{\eta, \rho, L, \bar{X}, n} f$  – тяговая сеть с атрибутами:  $L$  – длина участка;  $\rho$  – удельное сопротивление сети;  $\bar{X}$  – вектор размерности  $n$ ;  ${}_{v, l, P} t$  – электроподвижной состав с атрибутами:  $v$  – режим движения;  $l$  – положение на межподстанционной зоне;  $P$  – потребляемая/выделяемая мощность;  ${}_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} h$  – регулятор напряжения выпрямителя;  $\bar{U}$  – вектор размерности  $n$ , каждый элемент которого  $u_i$  – регулируемые уровни выходного напряжения;  $x$  – переключатель.

Кроме указанных выше атрибутов, все терминалы имеют идентифицирующий атрибут  $id$ , который позволяет однозначно определить конкретное оборудование системы электропитания.

Нетерминальный алфавит  $N_1$  состоит из вспомогательных элементов  $N_1 = \{\sigma, \alpha, \beta, \delta, \gamma, \theta, \lambda\}$ . Начальный нетерминал –  $\sigma$ .

Аксиоматика  $\Lambda_6$  содержит следующие правила продукций.

Первое правило содержит отношение, связывающее участок тяговой сети, для которой принимается решение об управлении энергией рекуперации с двумя питающими подстанциями:

$$s_1 = \langle \sigma \rightarrow \alpha \cdot \beta \cdot \alpha \rangle.$$

Правило  $s_2$  позволяет дополнить модель следующим (соседним) участком (итеративно несколькими участками):

$$s_2 = \langle \alpha \rightarrow \alpha \times (\beta \cdot \alpha) \rangle.$$

Следующее правило позволяет моделировать путевое разветвление с соответствующей тяговой сетью и подстанциями:

$$s_3 = \langle \alpha \rightarrow (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha) \rangle.$$

$s_4$  – вспомогательное правило для оборудования тяговой подстанции

$$s_4 = \langle \alpha \rightarrow \delta \times \gamma \rangle.$$

Правило  $s_5$  предназначено для включения накопителя энергии с переключателем в модель

тяговой подстанции,  $s_6$  – альтернатива правилу  $s_5$ : подстанция накопителем не оборудована:

$$s_5 = \langle \delta \rightarrow {}_{\eta, W, W_{\max}} e \cdot x \rangle;$$

$$s_6 = \langle \delta \rightarrow \varepsilon \rangle.$$

Символ  $\varepsilon$  – пусто, обозначает отсутствие соединения на структурной и электрической схемах.

Правила  $s_7$  и  $s_8$  позволяют включить в схему тяговой подстанции питание от внешней энергосистемы и понижающий трансформатор:

$$s_7 = \langle \gamma \rightarrow {}_{U_{ES}} a \cdot {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} b \cdot (\theta : \lambda) \rangle;$$

$$s_8 = \langle \gamma \rightarrow (\theta : \lambda) \cdot {}_{U_{ES}} a \cdot {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} b \rangle.$$

Два альтернативных правила  $s_9$  и  $s_{10}$  позволяют включить в структурную схему выпрямитель с регулятором напряжения ( $s_9$ ) или без последнего ( $s_{10}$ ):

$$s_9 = \langle \theta \rightarrow {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} c \rangle;$$

$$s_{10} = \langle \theta \rightarrow {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} c \cdot {}_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} h \rangle.$$

Альтернативные правила  $s_{11}$  и  $s_{12}$  позволяют включить в структурную схему инвертор с переключателем ( $s_{11}$ ) или без обоих ( $s_{12}$ ):

$$s_{11} = \langle \lambda \rightarrow {}_{\eta, U_{in}, U_{out}} d \cdot x \rangle;$$

$$s_{12} = \langle \lambda \rightarrow \varepsilon \rangle.$$

Правило, позволяющее моделировать электропитание многопутных участков

$$s_{13} = \langle \beta \rightarrow \beta : \beta \rangle$$

и с возможными перемычками на участке

$$s_{14} = \langle \beta \rightarrow \beta \cdot \beta \rangle.$$

Правило  $s_{15}$  позволяет заменить нетерминал  $\beta$  на участок тяговой сети, а  $s_{16}$  и  $s_{17}$  – на участок тяговой сети с электроподвижным составом:

$$s_{15} = \langle \beta \rightarrow {}_{\eta, \rho, L, \bar{X}, n} f \rangle;$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$s_{16} = \langle \beta \rightarrow_{v,l,P,t} \cdot \eta,\rho,L,\bar{x},n f \rangle;$$

$$s_{17} = \langle \beta \rightarrow_{\eta,\rho,L,\bar{x},n} f \cdot v,l,P,t \rangle.$$

Реализация конкретной модели зоны рекуперации. В результате вывода на основании правил подстановки с учетом аксиоматики специализированной КПС  $C_{ZR}$  может быть реализовано бесконечное количество моделей зон рекуперации, включая модели всех существующих и проектируемых.

Продемонстрируем вывод модели (в виде структурной схемы) одной из таких зон рекуперации.

В результате операции частичного вывода ( $\sigma \models l_1$ ), с выбором правила подстановки  $s_1$  будет сформирована сентенциальная форма  $l_1 = \alpha \cdot \beta \cdot \alpha$ , и соответствующая ей структурная схем, представленная на рис. 1.

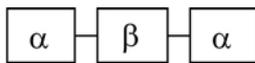


Рис. 1. Структурное представление сентенциальной формы  $l_1$

Fig. 1. Structural representation of sentential form  $l_1$

Продолжая подстановку  $l_1 \models l_2$ , с применением правила  $s_2$ , получим сентенциальную форму  $l_2 = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot \alpha))$  и структурную схему, с заложенными заготовками двух участков тяговой сети и трех тяговых подстанций (рис. 2).

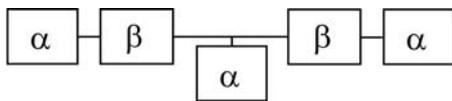


Рис. 2. Структурное представление сентенциальной формы  $l_2$

Fig. 2. Structural representation of sentential form  $l_2$

Применение правила  $s_3$  при подстановке  $l_2 \models l_3$  позволяет получить  $l_3 = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$  и структурную схему, в которой заложено разветвление пути (с контактной сетью), питаемое отдельными тяговыми подстанциями (рис. 3).

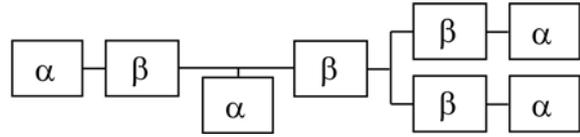


Рис. 3. Структурное представление сентенциальной формы  $l_3$

Fig. 3. Structural representation of sentential form  $l_3$

Продолжая подстановки ( $l_3 \models l_4$ ) по правилу  $s_4$ , получим  $l_4 = (\delta \times \gamma) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$  и структурную схему с основами конфигурации электрооборудования на одной из тяговых подстанций (рис. 4).

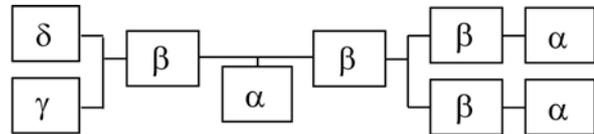


Рис. 4. Структурное представление сентенциальной формы  $l_4$

Fig. 4. Structural representation of sentential form  $l_4$

Дальнейшая подстановка  $l_4 \models l_5$  по правилу  $s_5$  позволяет получить  $l_5 = ((e \cdot x) \times \gamma) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$  с добавлением в структурную схему на рис. 4 накопителя электроэнергии на соответствующей тяговой подстанции (рис. 5).

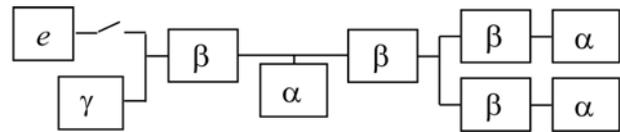


Рис. 5. Структурное представление сентенциальной формы  $l_5$

Fig. 5. Structural representation of sentential form  $l_5$

Применение правила  $s_7$  при подстановке  $l_5 \models l_6$  позволяет получить  $l_6 = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot (\theta : \lambda)) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$ . Структурна схема на рис. 5 дополнена оборудованием для передачи избыточной энергии рекуперации во внешнюю питающую сеть от соответствующей тяговой подстанции (рис. 6).

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

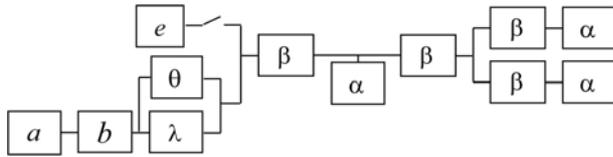


Рис. 6. Структурное представление сентенциальной формы  $l_6$

Fig. 6. Structural representation of sentential form  $l_6$

Последовательное применение правил  $s_{10}$  и  $s_{11}$  при подстановках  $l_6 \Rightarrow l_7 \Rightarrow l_8$  позволяют получить  $l_8 = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$ . По структурной схеме (рис. 6) завершена комплектация оборудования соответствующей подстанции инвертором и регулятором напряжения. Структурная схема этой тяговой подстанции полностью сформирована (рис. 7).

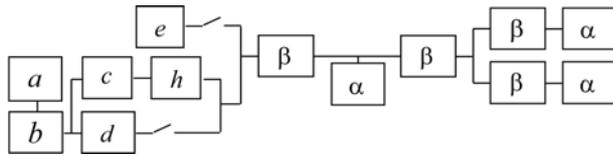


Рис. 7. Структурное представление сентенциальной формы  $l_8$

Fig. 7. Structural representation of sentential form  $l_8$

Следующая последовательность подстановок  $l_8 \Rightarrow l_9 \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{23}$ , с применением правил  $s_4, s_6, s_7, s_8, s_{11}, s_4, s_6, s_8, s_9, s_{10}, s_4, s_6, s_8, s_9, s_{11}$  позволяет получить  $l_{23} = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot \beta \cdot ((a \cdot b \cdot c) \times \beta \cdot (\beta \cdot (c : (d \cdot x) \cdot b \cdot a)) \times (\beta \cdot c \cdot b \cdot a))$ . В результате операций частичного вывода полностью сформирована структурная схема всех тяговых подстанций зоны потребления энергии рекуперации (рис. 8).

Заканчивается вывод подстановками  $l_{23} \Rightarrow l_{24} \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{30}$ , с применением правил  $s_{13}, s_{13}, s_{15}, s_{14}, s_{17}, s_{15}, s_{15}, s_{15}, s_{16}, s_{15}$ , получая при этом  $l_{30} = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot (f : (f \cdot t \cdot f)) \cdot ((a \cdot b \cdot c) \times (f : f) \cdot (t \cdot f \cdot (c : (d \cdot x) \cdot b \cdot a)) \times (f \cdot c \cdot b \cdot a))$  и структурную схему на рис. 9.

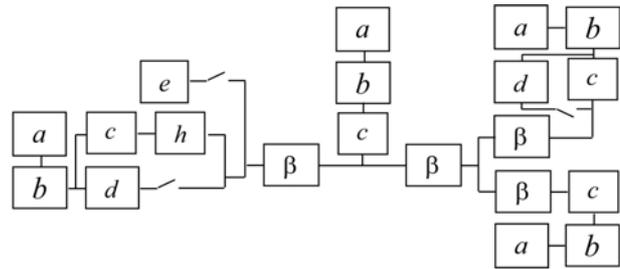


Рис. 8. Структурное представление сентенциальной формы  $l_{23}$

Fig. 8. Structural representation of sentential form  $l_{23}$

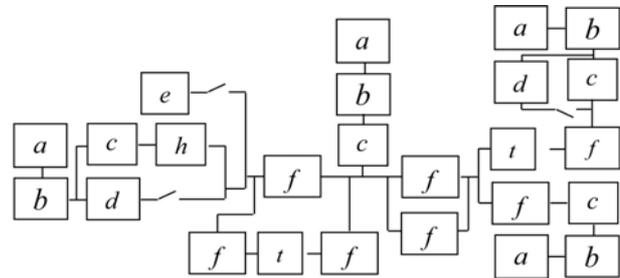


Рис. 9. Структурная схема зоны потребления энергии рекуперации (конструкция  $l_{30}$ )

Fig. 9 Block diagram of consumption zone of recovering energy (design  $l_{30}$ )

Сформированная структурная схема участка потребления энергии рекуперации моделирует структуру задействованных тяговых подстанций и поездную ситуацию.

Атрибутика элементов схемы формируется устройствами измерения и передачи информации и экспертными заключениями.

**Научная новизна и практическая значимость**

Предложен новый подход к решению задачи рационального использования энергии рекуперации, который заключается в применении методов и средств искусственных нейронных сетей, экспертных систем и нечеткой логики и математико-алгоритмического конструктивизма.

В данной работе представлены методы конструктивно-продукционного моделирования структуры зоны распределения энергии рекуперации в системе тяги постоянного тока.

Выполнена конкретизация КПС, которая позволяет учесть все возможности и особенности современного оборудования систем тягового

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

електроснабження, участків тягової мережі і поїздної ситуації.

**Выводы**

Одним из основных направлений развития экономики Украины является энергосбережение, что связано со сложной ситуацией на рынке энергоносителей.

Задача рационального (и даже просто) использования энергии рекуперации позволяет значительно экономить энергоресурсы.

Разработанный метод моделирования основан на возможностях КПС в новой предметной области. Терминальный алфавит семантически наполнен образами электрооборудования, тяговой сети и потребителями электроэнергии, обладающими соответствующей атрибутикой.

Приведенный частный случай формирования структурной схемы демонстрирует возможности КПС применительно к данной задаче.

В рамках выбранного направления исследований разрабатываются необходимые инструментальные программные средства для формирования структурных схем зон потребления энергии рекуперации, получения экспертных решений по управлению и формированию нейроразрешений сетей принятия решений.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Гибридные нейро-фаззи модели и мульти-агентные технологии в сложных системах : монография / Е. В. Бодянский, В. Е. Кучеренко, Е. И. Кучеренко [и др.] ; под ред. Е. В. Бодянского. – Днепропетровск : Системные технологии, 2008. – 403 с.
2. Горбачев, С. В. Нейро-нечеткие методы в интеллектуальных системах обработки и анализа многомерной информации / С. В. Горбачев, В. И. Сырякин. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2014. – 441 с.
3. Закарюкин, В. П. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. В. Черепанов. – Иркутск : ИрГТУ, 2015. – 218 с.
4. Крюков, А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных накопителями энергии / А. В. Крюков, А. В. Черепанов // Естеств. и инж. науки – развитию регионов Сибири : тез. XIII (XXXV) Всерос. науч.-техн. конф. (21.04–25.04.2014) / Братский гос. ун-т. – Братск, 2014. – С. 4.
5. Моделирование взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації електроенергії розосередженою системою тягового електропостачання / О. І. Саблін, В. Г. Кузнєцов, О. І. Бондар, В. В. Артемчук // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 46–53.
6. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский ; пер. с польск. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.
7. Саблін, О. І. Аналіз якості рекуперируемой електроенергії в системі електричного транспорту / О. І. Саблін // Вісн. НТУ «ХП». – Харків, 2013. – № 38 (1011). – С. 187–190.
8. A Multi-Swarm Optimizer Based Fuzzy Modeling Approach for Dynamic Systems Processing / B. Niu, Y. Zhu, X. He, H. Shen // Neurocomputing. – 2008. – Vol. 71. – Iss. 7–9. – P. 1436–1448. doi: 10.1016/j.neucom.2007.05.010.
9. Bodyanskiy, Ye. Hybrid Adaptive Wavelet-Neuro-Fuzzy System for Chaotic Time Series Identification / Ye. Bodyanskiy, O. Vynokurova // Information Sciences. – 2013. – Vol. 220. – P. 170–179. doi: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
10. Bodyanskiy, Ye. Modified Probabilistic Neuro-Fuzzy Network for Text Documents Processing / Ye. Bodyanskiy, I. Pliss, V. Volkova // Intern. J. of Computing. – 2012. – Vol. 11. – Iss. 4. – P. 391–396.
11. Computational Intelligence. A Methodological Introduction / R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn [et al.]. – London : Springer Verlag, 2013. – 490 p.
12. Du, K.-L. Neural Networks and Statistical Learning / K.-L. Du, M. N. S. Swamy. – London : Springer Verlag, 2014. – 824 p. doi: 10.1007/978-1-4471-5571-3
13. Jang, J.-S. R. Neuro-Fuzzy and Soft Computing – Computational Approach to Learning and Machine Intelligence / J.-S. R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. – New Dehli : PHI Learning, 2010. – 614 p.
14. Jenő Paul, P. Neuro-Fuzzy Based Constant Frequency-Unified Power Quality Conditioner / P. Jenő Paul, T. Ruban Deva Prakash // Intern. J. of System Signal Control and Engineering Application. – 2011. – Vol. 4. – Iss. 1. – P. 10–17. doi: 10.3923/ijssceapp.2011.10.17.
15. Kori, A. K. Neuro Fuzzy System Based Condition Monitoring of Power Transformer / A. K. Kori, A. K. Sharma, A. K. S. Bhadoriya // Intern. J. of Computer Science. – 2012. – Vol. 9. – Iss. 2, № 1. – P. 495–499.
16. Kosko, B. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intel-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- ligence / B. Kosko. – NJ, Prentice Hall, 1992, 449 p.
17. Mukherjee, V. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System / V. Mukherjee, S. P. Ghoshal // *Electric Power Systems Research*. – 2007. – Vol. 77. – Iss. 12. – P. 1689–1698. doi: 10.1016/j.epsr.2006.12.004.
  18. Nasri, A. Timetable Optimization for Maximum Usage of Regenerative Energy of Braking in Electrical Railway Systems / A. Nasri, M. Fekri Moghadam, H. Mokhtari // *Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (14.06–16.06.2010)*. – Pisa, Italy, 2010. – P. 1218–1221. doi: 10.1109/SPEED-AM.2010.5542099.
  19. 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*. – 2014. – Vol. 50. – Iss. 5. – P. 655–662. doi: 10.1007/s10559-014-9655-z.
  20. 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*. – 2009. – Vol. 45. – Iss. 3. – P. 329–339. doi: 10.1007/s10559-009-9118-0.
  21. Sood, A. Crossroads in Classification: Comparison and Analysis of Fuzzy and Neuro-Fuzzy Techniques / A. Sood, S. Aggarwal // *Intern. J. of Computer Applications*. – 2011. – Vol. 24, № 2. – P. 13–17. doi: 10.5120/2924-3866.
  22. *Springer Handbook of Computational Intelligence* / Eds. J. Kacprzyk, W. Pedrycz. – Berlin–Heidelberg : Springer-Verlag, 2015. – 1634 p. doi: 10.1007/978-3-662-43505-2.

В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>1\*</sup>, О. І. САБЛІН<sup>2\*</sup>, О. П. ІВАНОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>2\*</sup>Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 37, ел. пошта olegsss@i.ua ORCID 0000-0001-6784-648X

<sup>3\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта iv\_@inbox.ru, ORCID 0000-0003-1259-6377

## КОНСТРУКТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОНИ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Мета.** Наукова робота присвячена розробці методів та засобів формування множини реальних і потенційних структурних схем зон рекуперації з різними поїзними ситуаціями для подальшого навчання нейронечітких мереж на основі експертних рішень для формування раціонального управління. **Методика.** Для моделювання структурної схеми системи тягового електропостачання, режимів тягового електроспоживання та поїзної ситуації у зоні розподілу енергії рекуперації застосована методологія математико-алгоритмічного конструктивізму. Даний підхід передбачає розробку конструктивно-продукційних структур (КПС) з перетвореннями спеціалізації, інтерпретації, конкретизації та реалізації. Розробка КПС передбачає визначення розширюваного носія, сигнатури відносин і операцій та конструктивної аксіоматики. Найбільш складною та істотною частиною аксіоматики є множина сформованих правил підстановки, що визначають процес виведення відповідних конструкцій. **Результати.** Розроблено спеціалізовану і конкретизовану КПС, яка дозволяє врахувати всі можливості та особливості сучасного обладнання систем тягового електропостачання, ділянок тягової мережі й поїзної ситуації. Її особливість: семантичне наповнення термінального алфавіту образами електрообладнання, тягової мережі та споживачів електроенергії, що володіють відповідною атрибутикою. Наведений окремий випадок формування структурної схеми демонструє можливості КПС стосовно даної задачі. **Наукова новизна.** Авторами запропоновано новий підхід до вирішення задачі раціонального використання енергії рекуперації, який полягає в застосуванні методів та засобів штучних нейронних мереж, експертних систем нечіткої логіки й математико-алгоритмічного конструктивізму. У даній роботі представлені методи конструктивно-продукційного моделювання структури зони розподілу енергії рекуперації у системі тяги постійного струму. **Практична значимість.** Рішення задачі раціонального використання енергії рекуперації дозволяє значно економити енергоресурси, сприяти технічному переоснащенню залізничного транс-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

порту України шляхом впровадження сучасних засобів і можливостей. Розроблені моделі можуть застосовуватися для вирішення й інших задач енергозбереження в різних системах електричного транспорту.

*Ключові слова:* рекуперация; енергозбереження; конструктивно-продукційна структура; структурна схема; модель; тягова підстанція

V. I. SHYNKARENKO<sup>1\*</sup>, O. I. SABLIN<sup>2\*</sup>, O. P. IVANOV<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>2\*</sup>Dep. «Electricity Supply of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail olegsss@i.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

<sup>3\*</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail iv\_inbox.ru, ORCID 0000-0003-1259-6377

## CONSTRUCTIVE MODELLING FOR ZONE OF RECOVERY ENERGY DISTRIBUTION OF DC TRACTION

**Purpose.** The article is aimed to develop the means and methods of forming a plurality of real and potential structural diagrams for zones of energy recovery and different locations of trains for further training neuro-fuzzy networks on the basis of expert solutions and also for the formation of good control. **Methodology.** Methodology of mathematical and algorithmic constructivism for modeling the structural diagrams of the electric supply system and modes of traction power consumption and the train's locations in zones of energy recovery was applied. This approach involves the development of constructive-synthesizing structures (CSS) with transformation by specialization, interpretation, specification and implementation. Development CSS provides an extensible definition media, relations and the signature of operations and constructive axiomatic. The most complex and essential part of the axioms is the set formed by the substitution rules defining the process of withdrawal of the corresponding structures. **Findings.** A specialized and specified CSS, which allows considering all the possibilities and features, that supply power traction systems with modern equipment, stations and trains location was designed. Its feature: the semantic content of the terminal alphabet images of electrical traction network and power consumers with relevant attributes. A special case of the formation of the structural diagram shows the possibilities CSS in relation to this problem. **Originality.** A new approach to solving the problem of rational use of energy recovery, which consists in application of the methods and means of artificial neural networks, expert systems, fuzzy logic and mathematical and algorithmic constructivism. This paper presents the methods of constructive simulation of a production-distribution of energy recovery zone structure in the system of the DC traction. **Practical value.** The tasks decision of the rational use of energy recovery can significantly save energy, contribute to the technical re-equipment of a railway transportation of Ukraine through the introduction of modern means and capabilities. The developed model can be used to solve other energy-saving tasks in different systems of electric transport.

*Keywords:* energy recovery; energy conservation; constructive-synthesizing structures; structural diagrams; model; traction substation

### REFERENCES

1. Bodyanskiy Ye. V., Kucherenko V. Ye., Kucherenko Ye. I., Mikhalev A. I., Filatov V. A. *Gibridnyye neuro-fazzi modeli i multiagentnyye tekhnologii v slozhnykh sistemakh* [Hybrid neuro-fuzzy models and multi-agent technologies in complex systems]. Dnipropetrovsk, Sistemnyye tekhnologii Publ., 2008. 403 p.
2. Gorbachev S.V., Syryamkin V.I. *Neyro-nechetkiye metody v intellektualnykh sistemakh obrabotki i analiza mnogomernoy informatsii* [Neuro-fuzzy techniques in intelligent systems of processing and analysis of multi-dimensional information]. Tomsk, Izdatelstvo Tomskogo universiteta Publ., 2014. 441 p.
3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. *Intellektualnyye tekhnologii upravleniya kachestvom elektroenergii* [Intelligent technologies of electric power quality control]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2015. 218 p.
4. Kryukov A.V. Cherepanov A.V. *Modelirovaniye sistem tyagovogo elektrosnabzheniya, osnashchennykh nakopitelyami energii* [Modelling of the systems of traction power supply, equipped with energy storages]. *Tezisy XIII (XXXV) Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Yestestvennyye i inzhenernyye nauki –*

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- razvitiyu regionov Sibiri (21.04-25.04.2014)»* [Abstracts of XIII (XXXV) All-Russian Scientific and Practical Conf. «Natural sciences and engineering – development of Siberia»]. Bratsk, 2014, p. 4.
5. Sablin O.I., Kuznietsov V.H., Bondar O.I., Artemchuk V.V. Modeliuvannia vzaiemodii elektrorukhomoho skladu v rezhymi rekuperatsii elektroenerhii rozoseredzhenoiu systemoiu tiahovoho elektropostachannia [Modeling the interaction of electric motive power in the recovery mode of electric energy dispersed by the traction power supply system]. *Elektryfikatsiia transportu – Transport Electrification*, 2014, vol. 7, pp. 46-53.
  6. Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 452 p.
  7. Sablin O.I. Analiz kachestva rekuperiruyemoy elektroenerhii v sisteme elektricheskogo transporta [Analysis of the quality of electric energy recoverable in the system of electric transport]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»* [Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute»], 2013, vol. 38 (1011), pp. 187-190.
  8. Niu B., Zhu Y., He X., Shen H. A Multi-Swarm Optimizer Based Fuzzy Modeling Approach for Dynamic Systems Processing. *Neuro-computing*, 2008, vol. 71, issues 7-9, pp. 1436-1448. doi: 10.1016/j.neucom.2007.05.010.
  9. Bodyanskiy Ye., Vynokurova O. Hybrid Adaptive Wavelet-Neuro-Fuzzy System for Chaotic Time Series Identification. *Information Sciences*, 2013, vol. 220, pp. 170-179. doi: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
  10. Bodyanskiy Ye., Pliss I, Volkova V. Modified Probabilistic Neuro-Fuzzy Network for Text Documents Proc. *International Journal of Computing*, 2012, vol. 11, issue 4, pp. 391-396.
  11. Kruse R., Borgelt C., Klawonn F., Moeves C., Steinbrecher M., Held P. *Computational Intelligence. A Methodological Introduction*. London, Springer Verlag Publ., 2013. 490 p.
  12. Du K.-L., Swamy M.N.S. *Neural Networks and Statistical Learning*. Springer Verlag Publ., 2014. 824 p. doi: 10.1007/978-1-4471-5571-3.
  13. Jang J.-S.R., Sun C.-T., Mizutani E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing – Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. New Dehli, PHI Learning Publ., 2010. 614 p.
  14. Jeno Paul P., Ruban Deva Prakash T. Neuro-Fuzzy Based Constant Frequency-Unified Power Quality Conditioner. *International Journal of System Signal Control and Engineering Application*, 2011, vol. 4, issue 1, pp.10-17. doi: 10.3923/ijssceapp.2011.10.17.
  15. Kori A.K., Sharma A.K., Bhadoriya A.K.S. Neuro Fuzzy System Based Condition Monitoring of Power Transformer. *International Journal of Computer Science*, 2012, vol. 9, issue 2, no. 1, pp. 495-499.
  16. Kosko B. *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*. NJ, Prentice Hall Publ., 1992. 449 p.
  17. Mukherjee V., Ghoshal S.P. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System. *Electric Power Systems Research*, 2007, vol. 77, issue 12, pp. 1689-1698. doi: 10.1016/j.epsr.2006.12.004.
  18. Nasri A., Fekri Moghadam M., Mokhtari H. Timetable Optimization for Maximum Usage of Regenerative Energy of Braking in Electrical Railway Systems. *Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (14.06.-16.06.2010)*. Pisa, 2010, pp. 1218-1221.
  19. Shynkarenko V.I., Ilman V.M. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, vol. 50, issue 5, pp. 655–662. doi: 10.1007/s10559-014-9655-z.
  20. Shynkarenko V.I., Ilman V.M., Skalozub V.V. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2009, vol. 45, issue 3, pp. 329-339. doi: 10.1007/s10559-009-9118-0.
  21. Sood A., Aggarwal S. Crossroads in Classification: Comparison and Analysis of Fuzzy and Neuro-Fuzzy Techniques. *International Journal of Computer Applications*, 2011, vol. 24, no. 2, pp.13-17. doi: 10.5120/2924-3866.
  22. Касprzyk J., Pedrycz W. *Springer Handbook of Computational Intelligence*. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2015, 1634 p. doi: 10.1007/978-3-662-43505-2.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Украина); д.физ.-мат.н., проф. В. Е. Белозеровым (Украина)

Поступила в редколлегию: 06.07.2016

Принята к печати: 11.10.2016