

# РАЗВИТИЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГИЕЙ НА ТРАНСПОРТЕ С ПОМОЩЬЮ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОГО ПОДХОДА

**Безродный А.А.,**

*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
bezrodnyaa@yandex.ru*

**Резчиков А.Ф., Степановская И.А.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
rw4cy@mail.ru, irstepan2016@yandex.ru*

*Аннотация. Статья посвящена разработке прорывной технологии проектирования крупномасштабных киберфизических систем в формате нейронной сети с расширением стандартных средств их на основе онтологической модели причинно-следственных связей. Рассматриваются модели структур и алгоритмов управления, составляющие аппарат математического обеспечения искусственного интеллекта на примере задач совместного развития систем транспорта, обеспечения энергией и связи.*

*Ключевые слова: кибер-физические крупномасштабные системы междисциплинарной природы, причинно-следственные связи, нейронные сети, взаимосвязь сетей обеспечения энергией, транспорта и связи.*

## **Введение**

В функционировании объектов окружающего мира, их экономике (др.-греч. οἶκος - хозяйство и νόμος - правило) важную играют так называемые передаточные отрасли - транспорт, снабжение энергией и топливом, связь и т.п. - обеспечивающие взаимодействие между компонентами путем преобразования потоков ресурсов, что, собственно, и дает «сумме элементов» новое качество.

Исторически можно выделить следующие типы представлений:

- сложные системы, неподдающиеся интуитивному описанию и требующие научного подхода;
- социально-экономические системы, учитывающие развитие в реальных (рыночных) условиях;
- человеко-машинные системы со взаимодействием человек-компьютер.

В последнее время развитие получили кибер-физические системы (КФС), где речь идет об управлении посредством современных информационных технологий с учетом природы объектов. Ввиду общности семантики используемых определений (Κοβερνητικὴ - искусство кормчего, φύσις - природа, σύνστημα – целое, составленное из частей) КФС можно считать новым типом представления сложных систем, отличающимся глубокой интеграцией вычислительных мощностей и физических свойств и управляющих, и управляемых компонент. Они применяются для обработки больших объемов разнородных данных из распределенных источников, декомпозиции сложных задач до приемлемого для лиц, принимающих решения (ЛПР), уровня, альтернативных и возобновляемых источников энергии (АВИЭ), микроминиатюризации, автоматизации, работ по искусственному интеллекту (ИИ).

В области ИИ выделяется математическое обеспечение (модели и алгоритмы) Artificial intelligence (AI) для анализа поведения систем и синтеза наилучших вариантов структур и управления (AR Up-to-Down, «нисходящий ИИ») и изучение статистических ретроспективных данных (AR Down-to-Up, «восходящий ИИ») с получением новых закономерностей при меньшем внимании к природе объектов. Для достижения наилучшего результата целесообразно взаимосвязанное использование обоих направлений, некоторые аспекты которого и рассматриваются в работе.

В качестве предметной области выбраны системы обеспечения энергией на транспорте (СОЭТ), как современная стадия развития нефтепродуктообеспечения (НПО), что далее распространяется на совместное развитие систем транспорта, энергетики, связи (ТЭС) и, при потоковом описании, может быть применено и в иных сетях обслуживания и системах в целом.

## **1. Краткое описание моделей объектов исследования, постановка задачи**

При взаимодействии системы и среды происходит обмен потоками (последовательность элементов и событий, упорядоченная по не убыванию времени сетью их движения [1]) заданных видов (Таблица 1).

Таблица 1. Основные виды потоков взаимодействия в сложных системах

Семантика определений	Описание	Основание и примеры декомпозиции
Информация (И) от лат. <i>Information</i> – разъяснение – формализованные, структурированные, полезные сведения о системе и среде	Образы системы и среды в принятых формах, снижающие неопределенность	- модель объекта для управления; - степень подтверждения гипотезы; - мера необходимого разнообразия вариантов; - воздействие, изменяющее вероятность выбора, - основание выбора, мера упорядоченности и т.п.
Материальные ресурсы (М), от <i>materia</i> — вещество	Предмет преобразования	Первичные (сырье) и вторичные (переработка) ресурсы, узлы и детали машин, готовые изделия
Финансы (Ф), от <i>financia</i> – доход: отношения объектов по обмену ресурсами	Взаимодействие в социально-экономических системах	Мера новой стоимости, общественно необходимого времени для создания, распределения, обмена и потребления, накопления (сокровищ), глубины преобразования потоков
Энергия (Э) от греч. <i>Energeia</i> : действие, мера взаимодействия	Средство обеспечения работы объектов-преобразователей	1. Формы: механическая, внутренняя, электромагнитная (ЭМ), химическая и т.п. 2. Носители: ЭМ волны, ток, вода, топливо, АВИЭ. 3. Распределение: сети электро-, водо-, газо- и пароснабжения, НПО, АВИЭ

Потоки взаимодействия в реальных системах, как правило, не являются простейшими (стационарными во времени, ординарными по появлению и прохождению элементов, однородными по характеристикам, без последствия).

Самым общим образом система описывается кортежем  $\{K, D\}$ , где  $D = \{G, G\}$ ,  $G$  – графы структур моделей объекта и системы управления (СУ),  $K$  – множество показателей эффективности (качества),  $G$  – цели, воздействия, ограничения среды и системы, условия и факторы функционирования и развития.

Переход от содержательного описания к формализованному представлению крупномасштабных систем междисциплинарной природы вслед за Р. Акоффом, К. Ишикавой и К. Грейнджем целесообразен посредством причинно-следственного (каузального) подхода, универсального в связи со всеобщностью развития во времени [2].

Наиболее общая (генеральная) Причинно-следственная (ПС-) связь задачи совершенствования состоит в достижении требуемых  $K^*$  посредством управления [2, 3]:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Причина: } K & & \text{Следствие: } K^* \\
 \rangle & A(H, P, X, C, U, F, Pr) & \langle \\
 \text{Условие 1: } G, w, S & & \text{Условие 2: } G^*, w^*, \Gamma(X, U)
 \end{array} \quad (1)$$

Здесь используются следующие условные обозначения, отражающий формализм подхода:

- $C, A$  и  $F$  – функции, алгоритмы и задачи управления на периодах  $H$ ;
- $X$  – средства управления с заданными отношениями  $U$ ;
- $S$  – стадии жизненного цикла (идея, разработка, апробация, внедрение, коррекция, развитие);
- $W$  – ресурсы (материалы, оборудование, энергия, данные, люди, финансы);
- $G = \{G_{uv}\}$  ( $u=1..U, v=1..V$ ) – требования и ограничения дружественной и конкурентной сред;
- \* – компоненты после взаимодействия (в том числе и будущего целевого состояния);
- условия – факторы развития до (1) и после (2) взаимодействия, сведенные в группы;
- структура декомпозируется до уровня, достаточного ЛППР для оперативного принятия обоснованных решений и эффективного (в заданном смысле) управления;
- $P_{pr}$  – процедуры управления ( $pr=1..PR$ , 1 – непрерывное и 2- дискретное слежение, 3 – квази-программное и 4 - с накоплением данных).

Виды потоков (табл. 1) и ресурсов  $W$ , фактически, определяют группы передаточных отраслей.

## 2. Функциональная и каузальная модели управления: совместное применение

Управление моделируется [4] выполнением функций  $C$  ( $C_i, i=1..I$ ) при реализации процессов  $P$  ( $P_j, j=1..J$ ) на периодах ( $h_k, k=1..K$ ) средствами  $X$  ( $X_{pq}, p=1..P, q=1..Q$ ). Задача решается путем построения общей полной модели структуры ( $\Omega$ -синтез), свертки по функциям и периодам управления и

производственным процессам (С-, Н- и Р-синтез), отсеечения нецелесообразных, бессмысленных и не автоматизируемых вариантов, выбора наилучшего из них в данных условиях (рис.1).

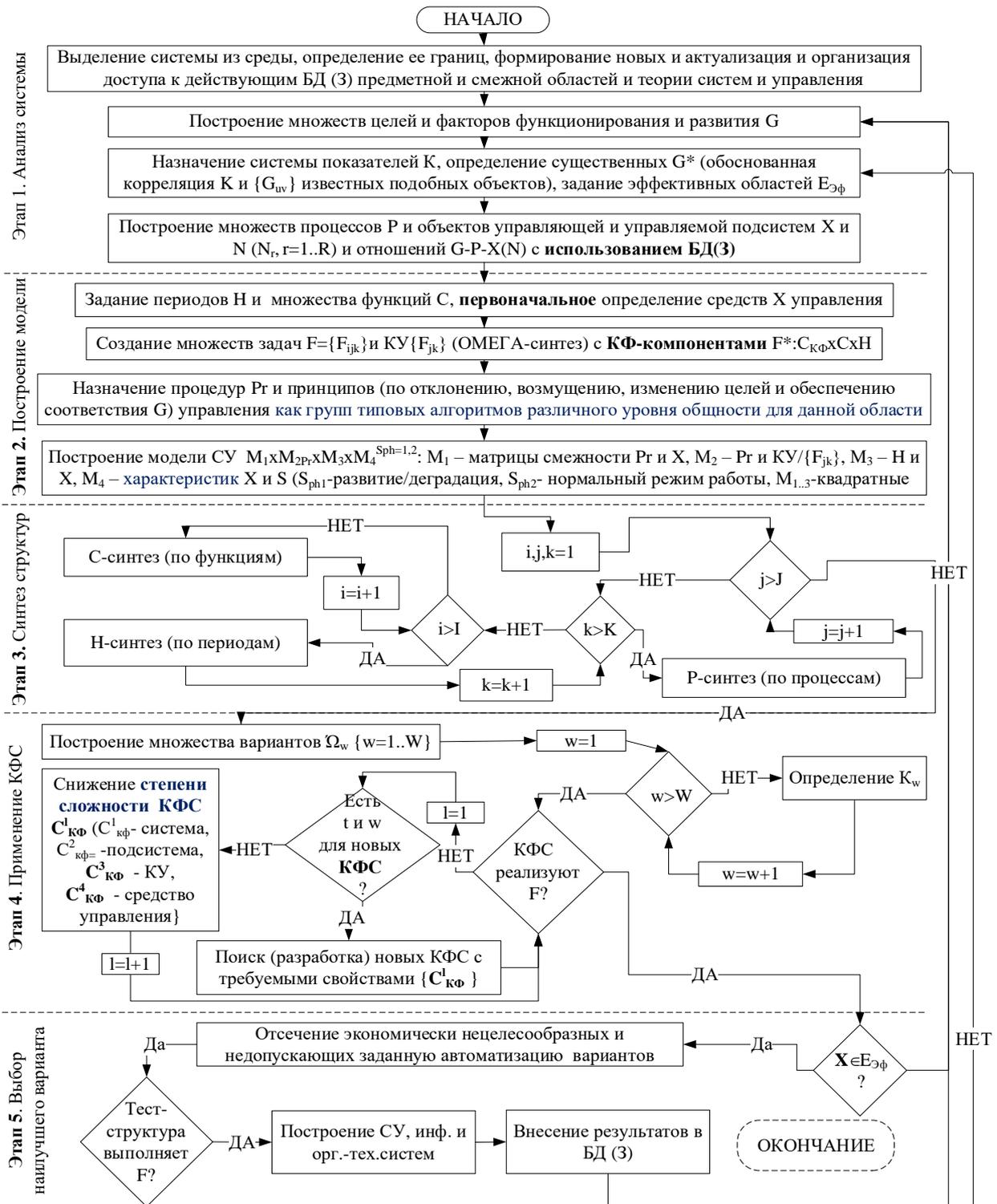


Рис. 1. Информационно-логическая схема совершенствования кибер-физических систем

Структура СУ задается декартовым произведением  $F: C \times P \times H$ , чьи элементы соответствуют числу  $X_{pq}$  для решения элементарных задач  $F_{ijk}: C_i \times P_j \times H_k$  в контурах управления (КУ)  $F_{jk}: C_{1..5} \times P_j \times H_k$  [3].

Для полноты и адекватности должны быть [2,4] применены модели структур СУ и принятия решений, а также информационной и организационно-технической подсистем и неактивной при данном рассмотрении инфра-системы. Последняя представляется как совокупность объектов-преобразователей потоков видов A<sub>ef</sub> (преобразование в элемент другого вида по табл.1, e,f ∈ {И,М,Ф,Э

потоков},  $A_0$  (преобразование без изменения качества, перенос, транспорт), Б (изменение характеристик) и В (хранение элементов).

Ввиду некоторой условности выделения активных и инфра-систем (управляющих и управляемых) целесообразно распространить данное (потокное) представление на все упомянутые виды подсистем, которым ставятся в соответствие графы  $\Gamma_{1..4}, \Gamma(X, U)$ , где  $X$  - объекты-преобразователи,  $U$  - отношения (разрешенные и существующие) доминирования и следования, противоречия выносятся на следующий уровень СУ.

При моделировании КФС рассматриваются задачи управления управлением  $F': C_{кф} \times CP \times H / G_{кф}$ , где  $C$  и  $C_{кф}$  - функции управления исходной и кибер-физической системами,  $G_{кф}$  - факторы развития последних, когда выбирается набор функций из  $C^* = C \cup C_{кф}$ , обеспечивающий выполнение  $P_j$  на  $H_k$ , наилучшее по К по уровням иерархии со снижением сложности КУ, описываемой параметром  $l=1..L$   $C^1_{кф}$  ( $C^1_{кф}$ - система,  $C^2_{кф}$  - подсистема,  $C^3_{кф}$  - КУ,  $C^4_{кф}$  - средство управления).

В зависимости от степени развития и доступности компонент КФС, а также наличия соответствующего математического обеспечения, их применение приводит к снижению сложности управления при более высокой надежности и безопасности функционирования (автоматизация).

Отношения между элементами модели задаются с использованием теоретически доказанных, апробированных и интуитивно понятных ПС- связей [2, 3] в иерархии элементарные звенья (модели операций), комплексы (процессы) и покрытия (система). Размерность снижается с помощью матрицы смежности, где  $f_{xy}$  - функции зависимостей между, о (малое) - слабая зависимость («о» малое):

$$\begin{matrix}
 & \mathbf{G} & \mathbf{C} & \mathbf{W} & \mathbf{S} \\
 \mathbf{C} & C \sim G & \equiv & C \sim FCW(W) & C \sim FCG(G) \\
 \mathbf{P} & P \sim FPG(G) & P \sim FPC(C) & P \sim FPW(W) & P \sim \Sigma S \\
 \mathbf{H} & H \sim FHG(G) & H \sim C & H \sim W & H \sim S \\
 \mathbf{X} & X \sim FXG(G) & X \sim C & X \sim W & X \sim FXS(W) \\
 \mathbf{G} & \equiv & G = o(C) & G = o(W) & G = o(S) \\
 \mathbf{W} & W \sim G & W \sim C & \equiv & W \sim FWS(G) \\
 \mathbf{N} & N \sim G & N \sim C & N \sim W & N \sim S \\
 \mathbf{S} & S \sim G & S \sim C & S \sim W & \equiv
 \end{matrix} \quad (2)$$

При согласовании функционального и каузального представление задается соответствие:

- элементарных задач  $F_{ijkpq}$  и звеньев ПС-связей  $RC_{ph \rightarrow ph+1}$

$$F_{ijkpq}: C_i \times P_j \times H_k: X_{pq} \equiv RC_{ph \rightarrow ph+1}(C, G, S, W) \quad (3)$$

где  $ph_{ph}$  - этап процесса (фаза, стадия развития) системы ( $ph=1..Ph$ );

- процессов и ПС-комплексов

$$P_j: S_{ph1} \xrightarrow{F_{ijkpq}} S_{ph2} \dots \xrightarrow{F_{ijkpq}} S_{phPh} \equiv \langle RC_{A \rightarrow B}, U_{RC} \rangle, |RC|, |U_{RC}|, j = 1..J \quad (4)$$

где  $RC_{A \rightarrow B}$  - множество элементарных звеньев между начальными и конечными состояниями ( $A$  и  $B$ ),  $URC$  - множества связей,  $|RC|$  и  $|U_{RC}|$  - матрицы инцидентий и смежности.

Порядок обработки ресурсов  $w$  и смена состояний  $S$  задаются  $\Gamma_5(X_5, U_5)$  покрытия комплексами ПС-связей модели, подразумеваемая алгоритмический характер решений [3]:

$$\Gamma, \Gamma_{1..4} \rightarrow \Gamma_5(X_5, U_5): \langle RC_{A \rightarrow B}, U_{RC} \rangle, |RC|, |U_{RC}|, OA, j = 1..J \quad (5)$$

где  $OA_{oa} \in \{OA_{oa}\}$  ( $oa=1..OA$ , 1 - начало, 2 - этап, 3 - условный переход).

Совместное применение классического и причинно-следственного подходов позволяет снизить число моделей систем ( $\Gamma, \Gamma_{1..4} \rightarrow \Gamma_5$ ), необходимых для надлежащего моделирования и развития.

В целом, в контексте тематики статьи, построение структур систем по функциональной модели  $F: C \times P \times H$  можно считать первым (скорее «человеко-», а  $F': C_{кф} \times CP \times H / G_{кф}$  - вторым (скорее «машинным») этапами оптимизации, что применимо для «любых» систем из-за отсутствия ограничений на виды компонент и операций.

### 3. Нейронные сети, их использование в моделях структур систем управления

Нейронные сети (НС) имитируют работу головного мозга как множества связанных элементарных ячеек, согласованно выполняющих простейшие операции. Правила обработки задаются ЛПР СУ, при многократном использовании НС «обучается», возможно выявление новых закономерностей (рис. 2).

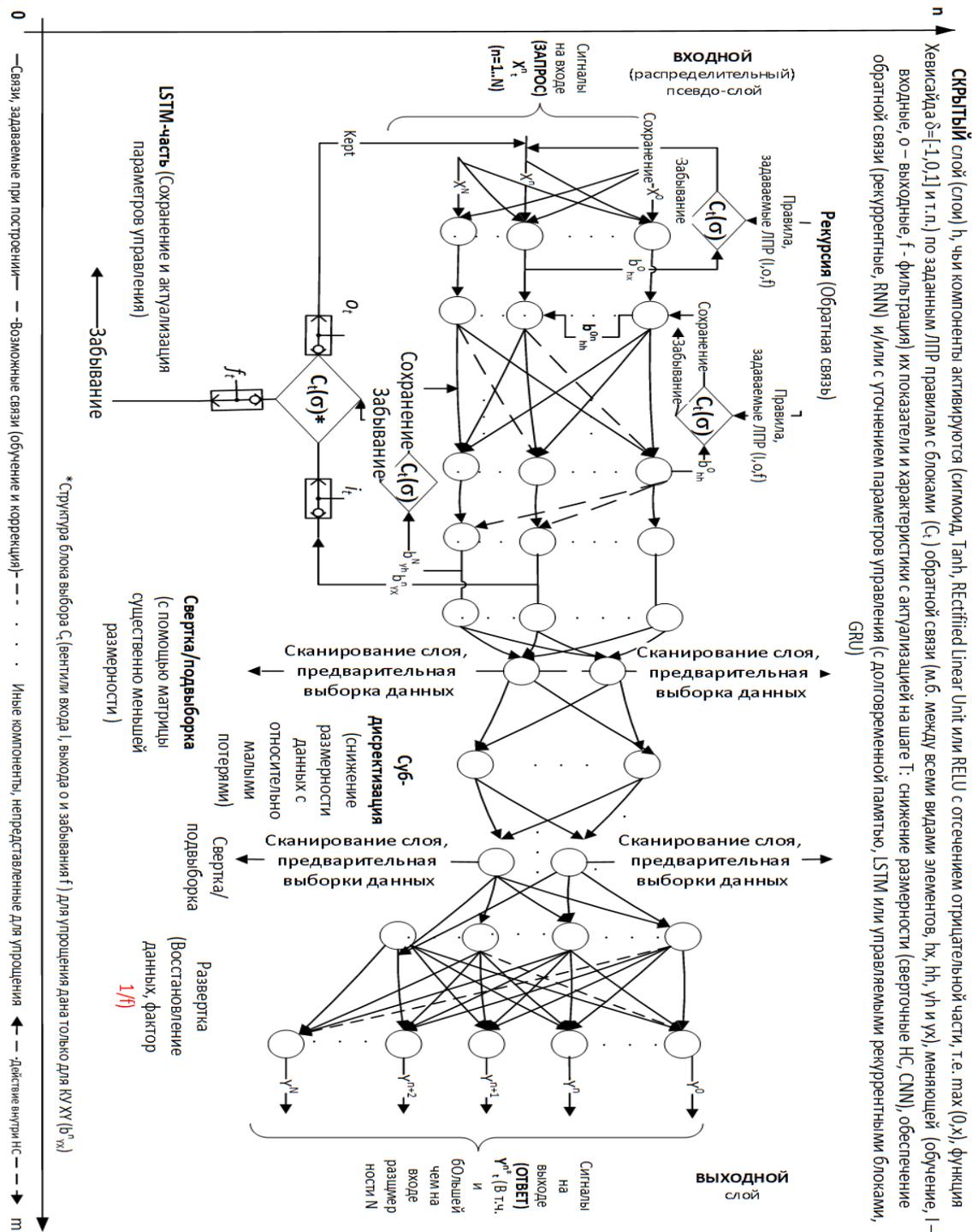


Рис. 2. Общая модель структуры нейросетей с автоматизированной обратной связью

Анализ рис. 1 и 2 подтверждает выдвинутый авторами статей [2, 5] и других работ тезис о схожести структуры и состава моделей ПС-связей и НС. Об этом свидетельствуют следующие их особенности.

- Элементарные ячейки ПС-связей должного уровня декомпозиции, достаточного для принятия решений по эффективному управлению операторами ЛПР и экспертными системами (узлы и связи участка НС), объединяются в комплексы (слои и блоки НС) и покрытия универсума системы (полная модель структуры).

- Алгоритмическое принятие решений по коррекции по мере получения новых сведений соответствует обучению НС.
- Взаимосвязанной совокупности ранее созданных моделей БД (З) предметной и смежной областей, а также теории и практики управления, формирующих наиболее общие причинно-следственные связи (модели эталонных процессов) соответствуют разнообразные нейронные сети. Среди них выделяются следующие:
  - рекуррентные сети (recurrent, RNN) модели обратной связи),
  - сверточные сети (convolutional, CNN) сети, понижающие размерность задачи,
  - сети долговременной памяти (Long Short-time memory, LSTM), допускающие выбор альтернатив из имеющихся вариантов в зависимости от условий,
  - варианты управляемых рекуррентных блоков (Gated recurrent unit, GRU, разновидность LSTM).

Это позволяет использовать развитый математический аппарат нейронных сетей для моделирования функционирования и эволюционного развития КФС с помощью причинно-следственных моделей, который, в свою очередь, является достаточно общим подходом для исследования, управления и совершенствования сложных систем, состоящих из компонент различной природы.

По аналогии возможно применение и иных методов теории оптимизации и управления сложными системами, включая градиентный спуск/подъём, «взвешивание», приоритизация (Principal component analysis), направленного перебора (Directed brute force), множества Парето, критических комбинаций событий, дерева решений и т.п. Такие инструменты анализа могут рассматриваться как расширение

#### 4. Современные задачи и методы должного обеспечения энергией транспорта

В качестве предметной области в данной работе рассматриваются СОЭТ, от которых зависит состояние и развитие государства и общества в целом. Ряд современных задач, ранее кратко рассмотренный в [5], может быть представлен следующим образом (рис. 3). Их актуальность следует из всеобщности управления, автоматизации и эволюционной парадигмы как макро-подходов.

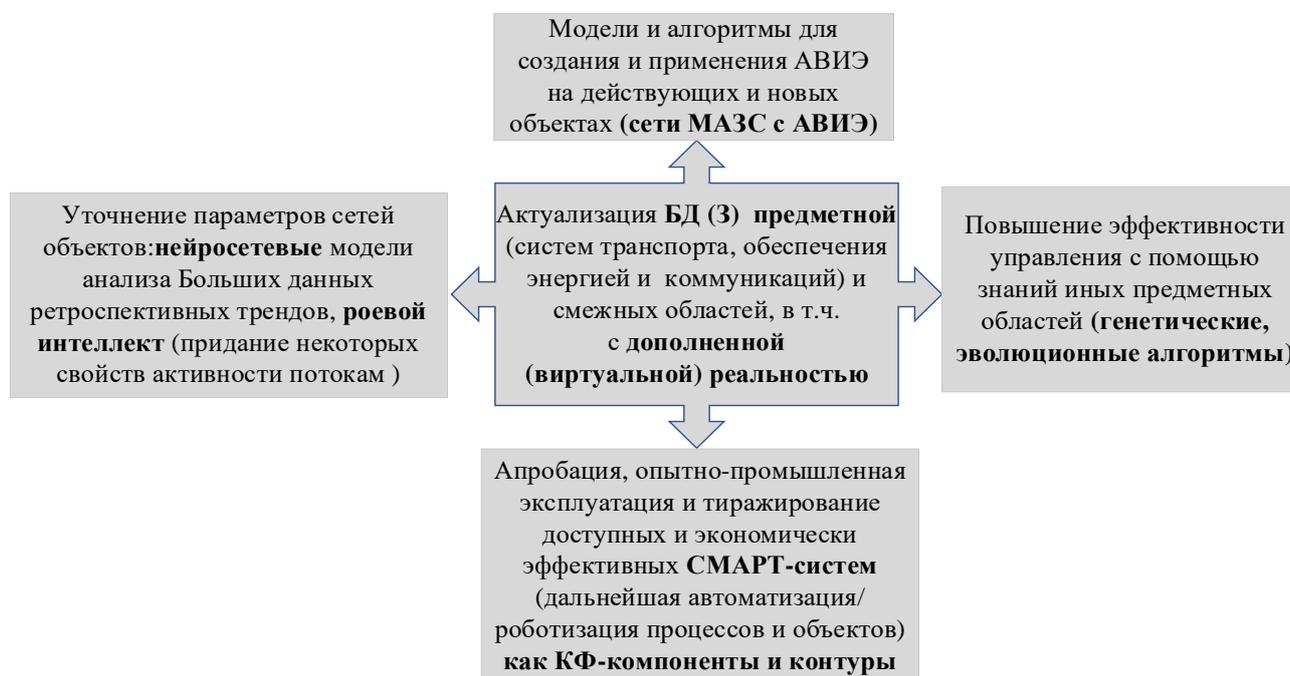


Рис. 3. Основные современные задачи и модели ИИ для систем обеспечения энергией на транспорте

В рамках используемого системного причинно-следственного подхода, наиболее общие ПС-связи как основа для целеустремленного построения объектов содержательно описываются следующим образом:

- необходимость обработки больших разнородных распределённых данных (гео-информационные системы) по потребителям (G1), поставщикам (G2), конкурентам (G3) и общему макро-

экономическому окружению (G4) как первому и естественному уровню декомпозиции ранее выделенных дружественной, конкурентной и нейтральной частей среды;

- совместный технический и фундаментальный анализы (тренды показателей и структура и состава);
- обработка информации с использованием ИИ Down-to-Up (восходящего) и получение новых закономерностей, статистически более обоснованных, но с меньшим вниманием к природе объектов
- создание виртуальных образов для повышения качества систем поддержки принятия решений;
- микроминиатюризация компонент, их встраивание в физические объекты (КФ-компоненты);
- развитие АВИАЭ, требующих эффективных СУ в условиях факторов ГАВИЭ и G1.4 на УДС;
- разнородность и рост числа транспортных средств и потребителей в целом Veh/dev;
- организационная иерархия (объект, сеть, предприятие), сети размещения на УДС, программно-целевые структуры СУ;
- любая система считается информационной (т.к. нуждается в управлении) и строится «под цель»;
- современные сложные системы требуют адаптивности, в целом достигаемой совместным развитием (построением и совершенствованием) управляющих и управляемых систем;
- с развитием технологий построение систем с необходимостью требует древовидных алгоритмов [7].

Используемые показатели, модели структур и алгоритм развития и управления инвариантны относительно предметных областей [2, 3, 4]. Процессы и объекты энергетики, транспорта и связи в целом сложны, что дает потенциальную возможность их совместного построения и совершенствования основные шаги соответствующего обобщенного алгоритма для ТЕС-систем представлены на рис. 4.

На рис. 4 считается (принятый формализм, ПС-связи следующего уровня общности), что:

- модели совершенствования структур содержатся в БД (З) предметных областей, существующих (с организацией доступа) или формируемых для ТЕС;
- в соответствии с «Методологией рационального построения сетей АЗС» [3, 11]), точки обслуживания и обеспечения целесообразно располагать в местах максимальной плотности потоков в условиях факторов функционирования и развития системы на УДС {G<sub>1.4</sub>} с нахождением особой точки (точек),  $r^*$  зависимостей  $K(r)$ , определяемой как наилучшее решение из возможных;
- SS – источник снабжения (Sources of Supply) - T – парковки, гаражи и сервисные станции; E – генерация традиционных видов энергии и АВИАЭ-компонент; C – генерация и хранение данных;
- DS – доставка компонент (Deliverance of Suppling products) - T – первичная/вторичная логистика и модель структуры УДС; E – распределение энергии; C – проводные/ беспроводные каналы с агрегированием и обработкой данных);
- MS – точки обеспечения и обслуживания (T – сети НПО, АВИАЭ, СОЭТ, E – точки заряда энергией, C – передача данных); VS – транспортные средства и устройства (зависит от типа системы, T, E или C).

Ряд стран сегодня реализуют программы совместного развития транспорта и СОЭТ:

- государственная программа развития газомоторного топлива РФ, начатая в 1983 г в СССР и системно продолженная в 2015 году [6] с ежегодным ростом основных показателей на 10% и более
- совместное создание объектов генерации и распределения электроэнергии и парка электромобилей в Беларуси государственным оператором [7] с 2013 г с ожидаемым энерго-переходом (достижением их доли 10% в общем парке транспортных средств) к 2030 г и т. п.
- на железнодорожном транспорте исторически параллельно также развиваются системы связи и обеспечения энергией

Для получения наибольшего долгосрочного эффекта целесообразно совместное проектирование, построение и развитие систем транспорта, обеспечения энергией и связи уже на начальных этапах.

## 5. Обсуждение результатов

Рассматриваемый подход, совершенствуемый в процессе применения, в течение ряда лет использовался в НПО (наиболее полные ссылки даны в [3]).

В данной работе с учетом описанных теоретических положений представлены следующие новые результаты:

- обоснована возможность создания водородно-транспортных систем на основе существующих газораспределительных сетей природного газа, нефтехимических производств как источниках водорода и сетей АГНКС, отпускающих смесь CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> для обслуживания потребителей [8];
- созданы модели и алгоритмы совместного проектирования и развития сетей много-топливных заправочных станций и терминалов вторичной логистики (нефтебаз), чье применение рационально

снижает численность объектов и стоимость их создания и содержания (тестовый пример 12,5 %) [9];

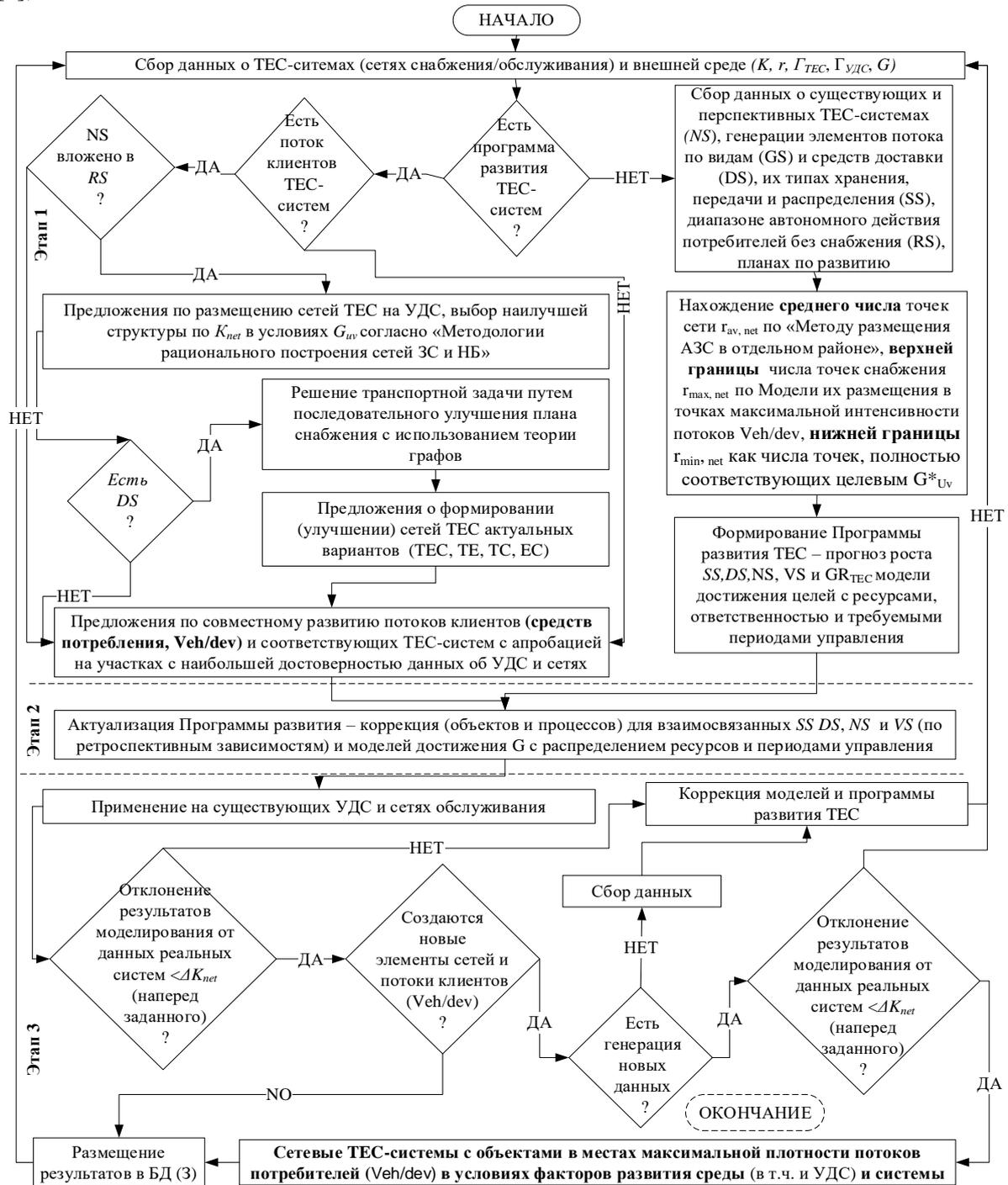


Рис. 4. Информационно-логическая схема построения сетей обеспечения и обслуживания как КФС

- разработаны обобщенные схемы моделирования СОЭТ с помощью генетических алгоритмов или GA (Genetic Algorithms) [10], прогнозирующих поведение логистики с помощью НС различных видов, даже начальное применение которых позволяет повысить эффективность моделирования на 5-10%, и сделать вывод о перспективности использования таких категорий смежных отраслей знания (биология), как скрещивание, отбор, мутация и т.п. для развития сложных систем, вообще говоря из нее вышедших.

Фактически, можно считать, что КФС представляют собой современную парадигму рассмотрения сложных систем, математическое обеспечение которых формируется с использованием системного причинно-следственного подхода, а практическое применения – с помощью автоматических компонент (КФ-систем в узком смысле).

Их практическое применение в НПО (и СОЭТ) и, далее, ТЕС является актуальным вследствие важности данной предметной области, а с учетом потокового описания взаимодействия между любыми системами и (внешней средой) и внутри них делает его еще более универсальным.

В связи с вышеизложенным имеется возможность распространения «Методологии рационального совершенствования сетей АЗС» на случай ТЕС и, в целом, управления сложными системами при их потоковом описании (рис. 5).



Рис. 5. Развитие методологии рационального построения сетей ЗС на случай кибер-физических систем транспорта, энергии и связи при их совместном применении

Нейро-сетевые компоненты (и иные модели ИИ) будут служить как средством моделирования, так и обработки больших объемов данных и формирования новых закономерностей «снизу» (индуктивно), верных как минимум ретроспективно, так и тестовыми системами для развития математического обеспечения «сверху» (дедуктивно) и его верификатором и валидатором, имеющем, к тому же развитые среды моделирования (MatLab и т.п.).

Краткие результаты по указанным задачам (проектам), находящимся на различных стадиях решения, в общем сведены в работе [11]. Представленные положения далее планируется развивать путем участия в указанных программах и формирования микромоделей их практического применения, создания систем поддержки принятия решений в данной предметной области и т.п. в ИПУ РАН, РГУНГ им. И.М. Губкина, БГУ и т.п.

## 6. Заключение

1. Кибер-физические модели отражают современное представление о сложных системах, что определяет актуальность их применения для решения задач эффективного управления крупномасштабными междисциплинарными объектами.

2. Совместное использование классических (теоретико-множественных) и каузальных моделей структур систем, а также нейронных сетей и иных моделей искусственного интеллекта позволяет повысить качество исследования, управления и развития систем, особенно с учетом высокого уровня современных вычислительных средств и прикладного программного обеспечения.

3. В силу общности определений, состава, моделей и алгоритмов, целесообразно применения системного причинно-следственного подхода для совместного развития сетей транспорта, связи и

энергетики как кибер-физических систем, что подтверждается примерами успешной апробации на реальных объектах с последовательным уточнением результатов по мере поступления новых сведений.

4. Указанные результаты могут быть полезны и в иных сетях обслуживания и обеспечения и в целом для моделирования и оптимизации структур систем и управления при их потоковом описании.

5. Задачи и их решения для нефтепродуктообеспечения, снабжения энергией транспорта и т.п. как кибер-физических систем на постоянной основе будут развиваться авторами и далее.

## Литература

1. Дрю, Дональд Р. Теория транспортных потоков и управление ими. – Пер. с англ. Е.Г. Коваленко и Г.Д. Шермана; Под ред. чл.-корр. АН СССР Н. П. Бусленко. – Москва: Транспорт, 1972. – 424 с.
2. Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Причинно-следственные комплексы как модели процессов в сложных системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 7. – С. 2-8.
3. Безродный А.А. Системный причинно-следственный подход к управлению предприятиями НПО. – Saarbrücken. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 328 с.
4. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
5. Ван Цзинь, Безродный А.А. Методы искусственного интеллекта систем нефтепродуктообеспечения. Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: VII Региональная научно-техническая конференция. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023 С. 101-102.
6. <https://minenergo.gov.ru/node/323>.
7. <https://bisr.gov.by/en/my-v-smi/experts-importance-supporting-electric-transportbelarus>.
8. Bezrodniy A.A., Rezchikov A.F. Hydrogen Supply Net Control for Transport Branch of Economy, 2021 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/MLSD52249.2021.9600232.
9. Ван Цзинь, Безродный А.А. Обобщенные алгоритмы совместного построения и совершенствования систем нефтебаз и заправочных станций // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2022. – № 1 (306). – С. 60-74.
10. Жуици Хуан, Безродный А.А. Формирование оптимальной структуры системы управления человеко-машинной системой с использованием генетических алгоритмов // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА’2024). Материалы IV Международной научно-практической конференции. Минск, 25-26 апреля 2024г. – Научное электронное издание. – Минск: БГУ. – 2024. С. 203-207.
11. Безродный А.А. Технологии проектирования информационных систем: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности “Прикладная информатика”. – Минск: РИВШ, 2024. – 415 с.