СЕКЦИЯ 1: ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ, ВКЛЮЧАЯ ТНК, ГОСХОЛДИНГИ И ГОСКОРПОРАЦИИ

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУР СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТА ВОДОРОДНЫМ ТОПЛИВОМ

Безродный А.А.

Белорусский государственный университет, Беларусь, г. Минск, ул. Ак. Курчатова, д. 5

bezrodnyaa@yandex.ru,

Богомолов А.С.

Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, г. Саратов, ул.Рабочая, д.24

alexbogomolov@ya.ru,

Дранко О.И., Степановская И.А., Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65

olegdranko@gmail.com, irstepan2016@yandex.ru, rw4cy@mail.ru, tsvirkun@ipu.rssi.ru

Аннотация:Проблемы развития альтернативных и возобновляемых источников энергии актуальны из-за постоянного роста потребности в энергоресурсах, относительно низкой эффективности использования традиционных топлив и существенной политизации вопросов топливно-энергетического комплекса. По сравнению с используемыми сегодня авто-бензинами, дизельным топливом и сжиженными углеводородными газами, а также природным газом, био-топливными смесями и электроэнергией водород лучше по эффективности и минимальному уровню загрязнения окружающей среды. Однако он наименее проработан в части реализации, взаимовыгодной для всех участников процессов производства, распределения и потребления водородного топлива - производителей, сетей заправочных станций, потребителей и государства – не говоря уже о высокой опасности и потерях при хранении. В этой связи необходима научно-обоснованная схема построения водородно-транспортной системы, аспекты которой и рассматриваются в работе.

Ключевые слова: водородное топливо, сложная человеко-машинная система, управление.

Введение

Водород является, пожалуй, самым лучшим изо всех известных источников энергии - наибольшее распространение в природе, КПД энергетических установок 80-90 %, выхлопные газы при его использовании как топлива состоят из паров воды, возможность аккумулирования энергии, получаемой из других альтернативных и возобновляемых источников - хотя на практике у него есть ряд существенных недостатков:

- сложность и высокая энергоемкость производства, в настоящее время преимущественно (до 90 %) ведущегося на крупных предприятиях с не всегда положительным энерго-балансом;
- при конверсии метана с водяным паром (риформинге) как наиболее часто используемом способе получения водорода эмиссия CO_2 находится том же уровне, что и при сжигании природного газа;
- при хранении в сжатом виде потери составляют ~1,5 % в сутки, в гидридах металлов достигнутая энерго-плотность меньше 40 кг/м3 (для пробега в 300 км на баке 50 л. требуется 140 кг /м3), сжиженный и охлажденный H_2 апробируются;
- для распределения водорода необходимы специализированные объекты и транспортные средства, сетей водородных заправочных станций (ЗС) нет или они ограничены и т.п.

Исходя из результатов работ в области нефтепродуктообеспечения [1,2,3] и водородной энергетики [4,5,6], наиболее общие теоретически и практически доказанные причинно-следственные связи (ПСС) в отношении водородной транспортной системы (ВТС) выражаются следующим образом:

- т.к. альтернативные и возобновляемые источники энергии (АВИЭ) развиваются многие десятилетия (первый автомобиль Г.Форда был на этаноле, а Р. Дизель демонстрировал свой

двигатель на рапсовом масле) и системы обеспечения ископаемым топливом сохраняются, водородные ЗС (ВЗС) первоначально целесообразно рассматривать как подсистемы сетей АЗС;

- для перехода водородных транспортных средств (ТС) из стадии апробации (t_1) в опытно-промышленную эксплуатацию (ОПЭ, t_2) и экономически обоснованного внедрения ВТС в среднесрочной перспективе с учетом декарбонизации [4,5] целесообразно развитие сетей ВЗС;
- сегодня производится т.н. «серый» водород (риформинг метана), с XIX века известны «коричневый» (пропускание водяного пара над раскаленным коксом) и «черный» (пиролиз нафты), однако полноценной заменой существующих моторных топлив (МТ) может стать даже не «голубой» («серый» с улавливанием выбросов CO_2) или «желтый» (электролиз с использованием энергии АЭС), а «зеленый» (производство с использованием ВИЭ) или «бирюзовый» (пиролиз CH_4), себестоимость которого высока (прогноз снижения к 2050 гг);
- в отсутствии развитой ВТС ЗС на первых порах могут создаваться рядом с объектами нефтехимического производства (НХК), тогда как совместная перекачка CH_4 и H_2 как известный способ может потребовать модернизации магистральных газопроводов (МГПП).

Указанные факторы и условия функционирования и рассматриваются в работе для создания обобщённой информационно-логической схемы развития ВТС в средне- и долгосрочной перспективе.

1 Содержательное описание проблемы использования водорода как топлива

Так называемая «климатическая повестка дня» - требования по существенному снижению воздействия на окружающую среду - может считаться сегодня основной для ТЭК [5].

Темпы роста рынка производства водорода как моторного топлива при гос. поддержке сегодня оцениваются в 2,5-4 %/год [4,5]. Наиболее перспективны водный транспорт, авиация, ЖД и авто-перевозки, обеспечивающие большие постоянные объемы потребления, что в целом совпадает с применением природного газа особенно в сжиженном виде. Еще одним важным применением может являться накопление энергии из возобновляемых источников - приливные, солнечные и ветро-электростанции и т.п. – получение которой носит, как правило, слабо-прогнозируемый или цикличный характер. Наконец, крупные энергоемкие отрасли – металлургий, нефтехимия и т.п. – также могут быть уже сегодня технологически (в модели) переведены на данный вид энергоресурсов. При этом он обладает более высокой теплотой сгорания (120-142 МДж/кг), однако менее плотен (жидкость 71 кг/м^3, газ 0,09 кг/м^3) при значительной более низкой температуре фазового перехода жидкость-газ (-253 °С) и с большей опасностью (взрывоопасные концентрации 4-77 %), чем природный газ, у которого указанные показатели 50-56 МДж/кг, 415 и 0,72 кг/м3, -162°С и 4,4-17 % соответственно.

Водородные транспортные средства в связи с высокой численностью ТС на ЖМТ и развитостью инфраструктуры их производства и содержания при эволюционном развитии целесообразно создавать «гибридными» (работающими на топливных смесях - 70 % жидких моторных топлив или ЖМТ, 20 % водорода и 10 % био-компонент), что обеспечит более плавный переход от существующей к перспективной ВТС при опережающем снижении выброса CO_2 (со 160 г/км для ДВС до 45 г/км).

Структура и состав сетей водородных ЗС (ВЗС) зависят от способа хранения и применения H_2 в ТС – в топливных ячейках, под давлением или генерируемые бортовыми электролизерами – и должны ориентироваться на упомянутую гибридную схему с максимальным использованием действующей инфраструктуры. С учетом схожести ряда характеристик водорода и природного газа возможно применение сети АГНКС, например развиваемых в РФ.

Известны (готовятся) следующие масштабные проекты в области водородной энергетики:

- в Нидерландах (NorthH_2) - использование высвобождающихся мощностей хранения газа с консервацией энергии ветро-электростанций – подготовка технико-экономического обоснования;
- в Великобритании (H2H Saltend) – производство голубого водорода с поставкой на ТЭЦ и сталелитейный комбинат – принятие решения в 2023 г.;
- в Саудовской Аравии (NEOM) – энергоснабжение инновационного города с данным названием только за счет ВИЭ (солнце, ветер, зеленый водород) – реализация к 2025 г.;
- в Австралии – производство коричневого водорода и его транспортировка в Японию танкерами в сжиженном виде – пилотный проект и т.п.

В РФ существует дорожная карта по развитию водородной энергетики в 2020-35 гг. с запуском пилотных проектов в 2024 г., включая производство «голубого» водорода и экспорт 10-й % смеси с

метаном по существующим МГПП, производство «желтого» водорода на Кольской АЭС, строительство ЖД-состава на водородном топливе и аккумулирование ветровой энергии Сахалина.

2 Постановка задачи

Общая задача совершенствования сложных человеко-машинных систем (СЧМС) согласно [7] представляется в виде $\{K, D\}$, где $D = \{Г, G\}$ – описание объекта, $\Gamma\{X, U\}$ – граф структуры, K – показатель эффективности, X – средства управления и U – разрешенные отношения между ними, G – цели, требования, воздействия и ограничения (факторы) среды и системы.

Наиболее общая ПСС задачи достижения экстремального (максимального) значения показателя эффективности путем построения структур и выбора управляющих воздействий, наилучших (оптимальных) в данных условиях, представлена на рис. 1, где

- G_{uv} $(u = 1...U,\ v = 1...V)$ – факторы , G_{1v} – подсистемы среды «Потребители», G_{2v} – «Конкуренты», G_{3v} – «Поставщики» (с учетом вышестоящих, целеполагающих и родительских систем) и G_{4v} – «Макроэкономическое окружение»;
- C_i $(i \in 1...I,\ I = 4)$ – функции управления; C_1 – сбор, обработка и отображение данных, C_2 – идентификация ситуации, подготовка к принятию решений, C_3 – принятие решений, C_4 – исполнение решений, контроль/коррекция задаются построением контуров управления (КУ);
- P_j $(j \in 1...J)$ – процессы: P_1 – прием (поставка) МТ, P_2 – хранение МТ, операционная деятельность и формирование условий для генерации обоснованных решений в нештатных ситуациях, P_3 – отпуск МТ, P_4 – учет и отчетность, P_5 – техническое содержание, P_6 – подготовка персонала, P_7 – обеспечение безопасности, P_8 – обеспечение энергией, P_9 – транспорт, P_{10} – информационное обеспечение, P_{11} – целеустремленное функционирование, P_{12} – материально-техническое снабжение, P_{13} – прогнозирование и анализ, P_{14} – принятие решений, P_{15} – управление;
- H_k $(k \in 1...K,\ K = 5)$ – периоды непрерывного слежения (H_1), квази-непрерывного слежения (H_2), тактического (H_3), оперативного (H_4) и стратегического управления (H_5);
- X_{pq} $(p \in 1...P,\ P = 2;\ q \in 1..Q,\ Q = 5)$ – средства управления: организационные (X_{11} – руководитель, X_{12} – заместитель руководителя, X_{13} – начальник подразделения, X_{14} – специалист, X_{15} – работник) и технические (X_{21} – сервер, X_{22} – рабочая станция, X_{23} – компоненты ввода-вывод и АСУ ТП);
- W_{pr} $(pr \in \overline{1..Pr})$ – ресурсы: W_1 – персонал, W_2 – оборудование, W_3 – энергия, W_4 – материалы, W_5 – финансы, W_6 – информация;
- I_{ta} $(ta \in 1..Ta)$ – частные задачи.

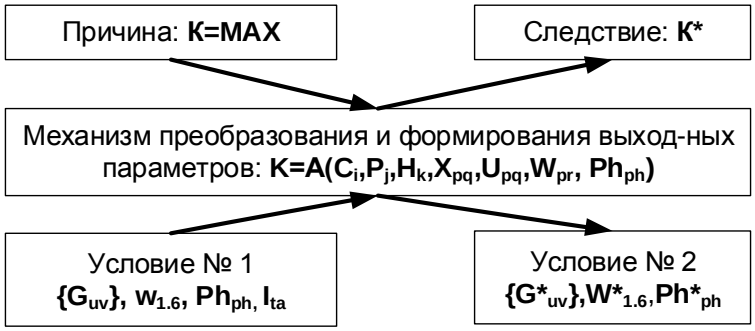

Рис. 1. Графическое представление причинно-следственной связи задачи совершенствования СЧМС

Причинно-следственное представление процесса приема (поставки) водорода дано на рис. 2, где:

- S_{ph} – состояние ($ph=1..PH$, 1 – идея, 2 – прогноз, 3 – модель, 4 – внедрение, 5 – штатный режим, 6 – происшествие , 7 – обслуживание, 8 – развитие, 9 – ликвидация, 10 – утилизация;
- компоненты вида А предшествуют (→), вида В следуют (←) за ядром;
- «полужирными» стрелками отображены процессы межуровневой и межсистемной координации;
- взаимодействие реализуется через элементы входа-выхода, по времени - слева направо;
- при последовательном уточнении решений формальное окончание отсутствует;
- следующей в цепочке считается связь с большим номером и тем же индексом или его отсутствием;

– специализированной считается система, целиком предназначенная для данного процесса;
– ядра звеньев причинно-следственных связей содержат механизмы взаимодействия в виде функций и алгоритмов с особенностями для видов объектов и подсистем;
– на каждом уровне все компоненты ячеек ПСС уникальны, обозначения опущены для упрощения;
– первичная логистика – доставка от производства до объекта распределения, вторичная – до ЗС.
– в качестве основы для построения структура причинно-следственного взаимодействия применена типичная схема поставки МТ от НПЗ через распределительные нефтебазы (НБ) на ЗС.

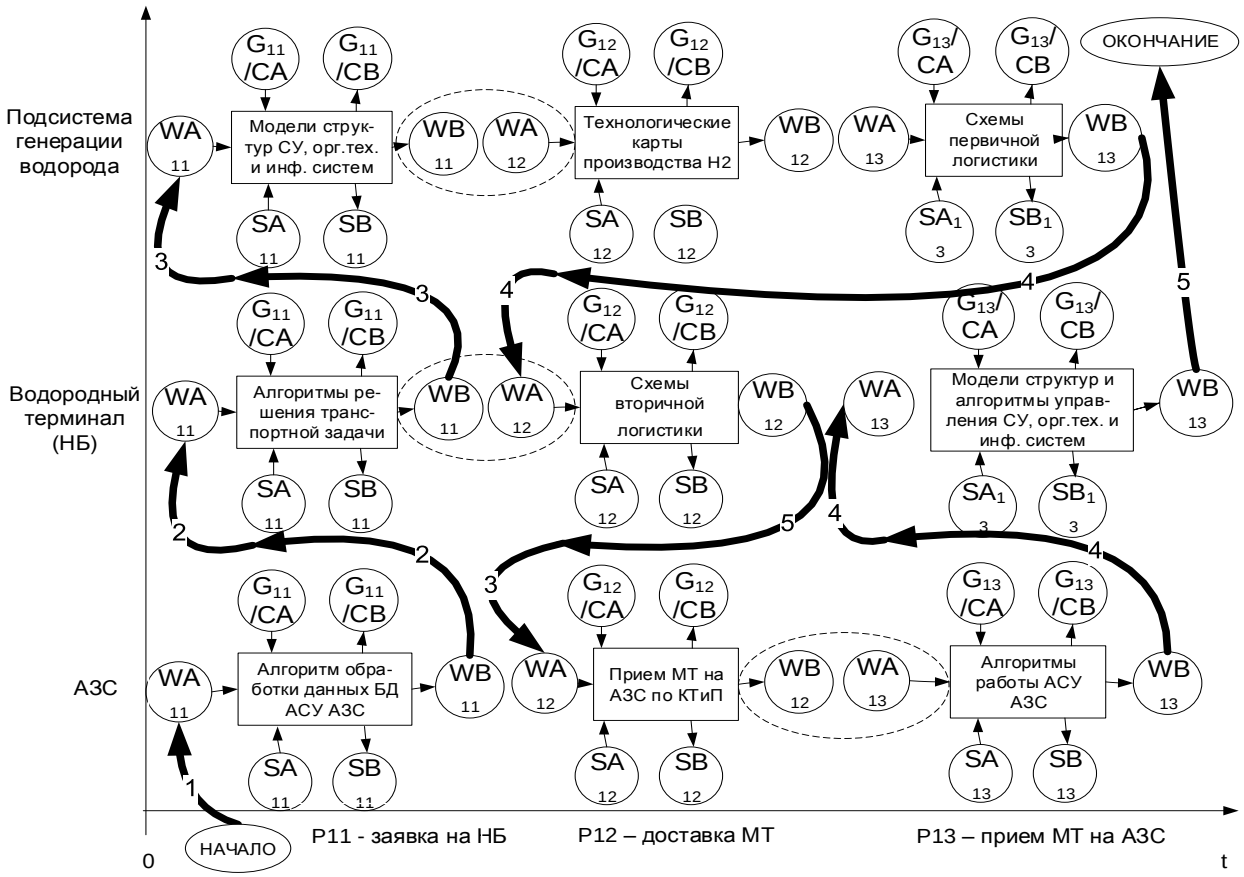

Рис. 2. Причинно-следственная структура процесса «Доставка МТ АЦ на АЗС»

Исходя из рис. 2 и структуры используемых показателей эффективности [2], *К* записывается как:

$$К(X_{pq}, U_{pq}) = \sum_{s=1}^{S_{НПО}} \left(\sum_{hi=1}^{HI_s} \left(\sum_{r=1}^{n_{hi}} \frac{R_{rhis}(X_{pq},U_{pq}) - П_{rhis}(X_{pq},U_{pq})}{C_{rhis}(X_{pq},U_{pq})} \right) \right) \rightarrow MAX, \qquad (1)$$

где

– R_{rhis}, C_{rhis} и $П_{rhis}$ – результаты, издержки и потери объекта r ($r = 1 \ldots n_{hi}$) уровня hi подсистемы s;
– U_{pq} – отношения средств управления X_{pq} ($p = 1...P$, $q = 1...Q$).

Показатель эффективности (1) представляет собой соотношение результатов, издержек и потерь от нереализованных вариантов развития. В отличие от нефтепродуктообеспечения (НПО) две последние компоненты будут существенно выше в связи с ОПЭ АВИЭ и получение эффекта возможно лишь в средне- или долгосрочной перспективе. Исходя из высокой сложности (неопределенности [6]) задачи и многообразии решений даже по сравнению со схожими системами НПО речь идет о поиске вариантов, наилучших в заданном смысле (по заданным критериям), а не строго оптимальных, в условиях, соответствующих современному и прогнозируемому перспективному уровню развития.

3 Системный анализ

Цели сетей ВЗС задаются вышестоящими системами и зависят от G_{uv} [3], кратко представленных в табл.1, где отрасль – система распределения МТ, ВТ – водородное топливо, ПБ, ОТ и ОС – Промышленная Безопасность, Охрана Труда и Окружающей среды.

Таблица 1. Краткое описание факторов сетей водородных ЗС

Наименование	Значение	Описание
Подсистема внешней среды «Потребители» (целевая система), G_{1v}		
Требования к ТС, G_{12}	$G_{11} \in \{G_{АТС}\}$	$G_{АТС}$ – запас хода, время заправки, затраты и т.п.
Сеть ВЗС, G_{12}	$G_{12}(t_1) \in \{G_{сеть\ АЗС}\}$, $G_{12}(t_2) \in \{G_{сеть}(X,U\}$	Наличие сети ЗС (на этапе t_1 м.б. частью сети АЗС
Безопасность, G_{13}	$G_{13} \geq G_{13,ТС}, G_{13} \in \{G_{H2}\}$	G_{13} – взырово-безопасность, G_{H2} -спец. для H_2
Подсистема среды «Конкуренты» (аналогичная система), G_{2v}		
Показатели сравнения с АВИЭ и ЖМТ, $\{G_{21}\}$	$G_{21} \in \{G_{МТ}\}$, $G_{21} \geq G_{АВИЭ}$	Конкуренция с существующими ($G_{МТ}$) и перспективными ($G_{АВИЭ}$) топливами
Цена поставки МТ, G_{21}	$G_{21}(G_{22\text{-}28}) \leq G_{21конк} \leq C_{НПО} + R_{норма}$	C_{H2} – издержки, $R_{норма}$ – признаваемая норма прибыли, П – потери
Качество, G_{22}	$G_{22} \geq G_{22конк} \Rightarrow max$	Превышение уровня конкурентов
Объем поставки, G_{23}	$G_{23} \geq G_{23конк} + G_{33}(\Delta t)$	Соответствие спросу с учетом МТ в пути $G_{33}(\Delta t)$
Разнообразие поставки, G_{24}	$G_{24} \geq G_{24конк}$	Компримированный (Р ~700 атм) и смесевой H_2, топливные ячейки, из бортовых электролизеров
Скорость поставки, G_{25}	$G_{25} \Rightarrow min < G_{27конк}$	Надлежащая логистика H_2
Число рекламаций, G_{26}	$G_{26} \Rightarrow min, G_{26}(G_{1.3}) \leq G_{26}$	Неудовлетворенность потребителей сетью ЗС
Гибкость условий поставки, G_{27}	$\lVert G_{27} + \Delta G_{27} \rVert \Rightarrow max$	Учет изменчивости среды с учетом временного запаздывания $G_{27}(\Delta t)$
Иные ограничения, G_{28}	$G_{28} \in \{G_{адм}\}$	$G_{адм}$ – факторы иных уровней и оснований
Сравнение с другими сетями ВЗС, G_{29}	$G_{29} \geq G_{29,\ конк}$ для каждого показателя	Сеть ВЗС по состоянию, услугам, размещению и т.п. д.б. не хуже
Подсистема среды «Поставщики» (предшествующая в цепи причинно-следственных связей), G_{3v}		
Многообразие вариантов производства H_2, G_{31}	$G_{31} \in \{G_{31}\}_{sector,}$ $\lVert G_{31} \rVert \rightarrow max$	Риформинг метана и нефти (40 % и 38 %), паровая конверсия кокса 18 %,электролиз 4%
Качество взаимодействия в системе G_{32}	$G_{12,критич}(G_{32}) \rightarrow min$, $G_{12}(G_{32}) \rightarrow G_{32,\ отрасли}$	Согласованность и взаимо-увязанность реализации, логистики и производства
Эффективность инфра-структуры распределения, G_{33}	$G_{33} \in \{G_{33}\}_{АВИЭ}$, $\lVert G_{33} \rVert \rightarrow max, t \sim t_{страт}$	$\{G_{23}\}_{АВИЭ}$ – факторы отрасли, $t_{страт}$ – периоды (стратегические), N_{rhi} – объект r уровня hi, транспорт - МНПП, ЖДЦ, АЦ, танкеры
Параметры плана развития, G_{34}	$G_{31} \in G_{311} \cup G_{312} \cup G_{313}$	Элементы плана развития: модели 341, ресурсы 342, показатели 343
Объем резервуарного парка и мощность производства, G_{35}	$G_{35} = \sum_{r=1}^{R} V_r \Rightarrow \max_{t \in [1..T]}$	Необходимая избыточность для компенсации слабо-прогнозируемых изменений потребления и роста отрасли в целом
Подсистема среды «Макроэкономическое окружение», G_{4v}		
Соответствие стандартам отрасли, G_{41}	$G_{11} \in \{G_{КТиП}\}$ и $G_{12} \geq G_{41} \in \{G_{КТиП}\}_{отр.}$при условии G_{43}	Корпоративные требования и правила должны быть не хуже, чем требования отрасли (МТ и АВИЭ) и государства
Требования ПБОТ, ОС, G_{42}	$G_{1\text{–}3,2} \in \{G_{42,\ ПБОТОС}\}$	Показатели принадлежат разрешенным областям факторов ПБ, ОТ и ОС
Государственная поддержка, G_{43}	$G_{43} \in \{G_{43,\ гос.упр.}\}$	$G_{43,\ гос.упр.}$- программы развития сети ВЗС и ВТС государства и крупных компаний
Иные требования, G_{44}	$G_{1\text{–}3,4} \in \{G_{44,\ МЭО}\}$	Требования законодательства, обычаи делового оборота и т. п.

Исследуемая система состоит из объектов различной природы, реализующих производственные и сервисные процессы. Причинно-следственные связи между целями системы, реализуемыми процессами и управляющими и управляемыми объектами [7, 8] для ВТС строятся с учетом следующих основных особенностей:

- при сохранении доминирования подсистемы «Потребители» вплоть до завершения стратегического развития ($t_{страт}$ можно оценить в отсутствии прорывных открытий как 2035-50-е гг через окупаемость инвестиций в электромобили и газомоторное топливо в РФ как промежуточные этапы) существенное влияние (а на локальных участках и доминирование) оказывают «Поставщики» (водорода и технологий) и макро-экономическое окружение (необходимое государственное регулирование)

- конкурентами являются не столько аналогичные сети, сколько виды источников энергии (классические, иные АВИЭ) – ЖМТ, природный газ, био-топливо, эл.энергия - с преимуществом первых в связи с широким распространением и последних из-за использования во всех случаях;
- процессы в сетях водородных заправочных станций (ВЗС) также включают в себя стадии производства, распределения и даже потребления из-за недостатка парка водородных ТС;
- промежуточные точки (водородные терминалы) могут быть исключены.

На первом уровне декомпозиции краткая характеристика объектов описывается следующим образом[3], где И, М, Ф, Э – элементы информационных, материальных, финансовых и энерго-потоков:

– N^{α} (функциональные признаки): $N_{1-100}{}^{\alpha}$ – АЗС (В) и НБ (В), пункты оказания услуг; $N_{101-200}{}^{\alpha}$ – резервуары (в т.ч. криогенные), насосно-компрессорное оборудование, топливные элементы с устройствами регенерации и т.п.; $N_{201-300}{}^{\alpha}$ – транспорт (ЖДЦ, АЦ, МПП, танкеры и т.п. – как специализированные, для H_2 в жидком и газообразном виде, так и для транспортировки метана и аммиака, а также с использованием топливных элементов и т.п.); $N_{301-500}{}^{\alpha}$ – оборудование производства (электролиза, риформинга, пиролиза, био-разложения и т.п.) и распределения (раздаточные колонки, трубопроводы, запорная арматура) и АСУ (SCADA, MES, ERP); $N_{501-600}{}^{\alpha}$ – здания, сооружения, территория; $N_{601-700}{}^{\alpha}$ – компоненты учета и документооборота;

– N^{β} (качественные признаки): A_0: $N_{A01-40}{}^{\beta}$ – транспорт (М), АСУ (И), объекты обеспечения и обслуживания (И, М, Ф, Э); A_{ef} ($e, f \in$ {И, М, Ф, Э}): $N_{Aef\,41-100}{}^{\beta}$ – оборудование ЗС, НБ и объектов производства H_2 (И, М, Ф); Б: $N_{Б1-100}{}^{\beta}$ – оборудование НТУ (М); В: $N_{B1-100}{}^{\beta}$ – склады МТ (М), устройства хранения данных (И) и денежных средств (Ф);

– N^{γ} (пространственные признаки): $N_{1-100}{}^{\gamma} \Rightarrow$ системы производства, доставки, приема, хранения и реализации МТ $\Rightarrow$ обеспечение и обслуживание $\Rightarrow$ системы управления;

– N^{δ} (цикличность): $N_{1-16}{}^{\delta}$ – транзакция, смена, день недели, месяц, сезон, стадии жизненного цикла.

Данные объекты участвуют в реализации производственных процессов, классифицируемых как:

– P^{α} (функциональные признаки): $P_{1-4}{}^{\alpha}$ – производство, логистика прием, хранение и реализация МТ; $P_{5-6}{}^{\alpha}$ – информационное и мат.-тех. обеспечение; $P_{7-9}{}^{\alpha}$ – тех. и транспортное обслуживание, подготовка персонала; $P_{10-100}{}^{\alpha}$ – анализ, принятие решений и управление;

– P^{β} (качественные признаки): $P_{1-100}{}^{\beta}$ – виды МТ (давление, форма выдачи) и НТУ; $P_{101-110}{}^{\beta}$ – виды оплаты; $P_{111-110}{}^{\beta}$ – данные различных форм;

– P^{γ} (пространственные признаки): $P_{1-10}{}^{\gamma}$ – процессы, реализуемые на объектах (территория, здания и сооружения, оборудование, АСУ и т. п.);

– P^{η} (взаимодействие со средой): $P_{1-1000}{}^{\eta}$ – следование факторам среды и системы (табл. 1);

– P^{ε} (режим работы): $P_{1-10}{}^{\varepsilon}$ – транзакция, смена, неделя, месяц, год; $P_{11-16}{}^{\varepsilon}$ – идея, создание, штатный режим, происшествия, изменения, ликвидация (стадии жизненного циклы или ЖЦ).

Отношения между целями, процессами и объектами на рис. 3 даны в соответствии с принципами целесообразности и иерархичности структур и решений сложных систем [7], где учтено, что:

- по достижению $t_{страт}$ приоритет процессов поставки и реализации топлив (№№ 1 и 3) изменяется;
- автоматизация играет важную роль в современном управлении (ИТО-обеспечение как процесс);
- N_n (n =1..N) – объекты неактивной инфра-системы, нуждающейся в управлении.

При определении границ к системе присоединяются управляемые объекты, участвующие в достижении целей. Так как на текущем этапе более 90% водорода производится в местах потребления и период построения системы носит стратегический характер, вплоть до окончания ОПЭ сетей ВЗС целесообразно включение в их состав контуров производства водорода и его хранения (табл. 2). Граница управляющей и управляемой систем проходит по компонентам инфра-системы, нуждающейся в управлении, исходя из опытного характера рассматриваемых объектов, она должна находиться на более высоких уровнях иерархии, чем для НПО. Предельные положения границ между управляющими и управляемыми системами даны в табл. 3.

[3] *Численные значения индексов отражают порядок величин и уточняются при решении частной задачи*

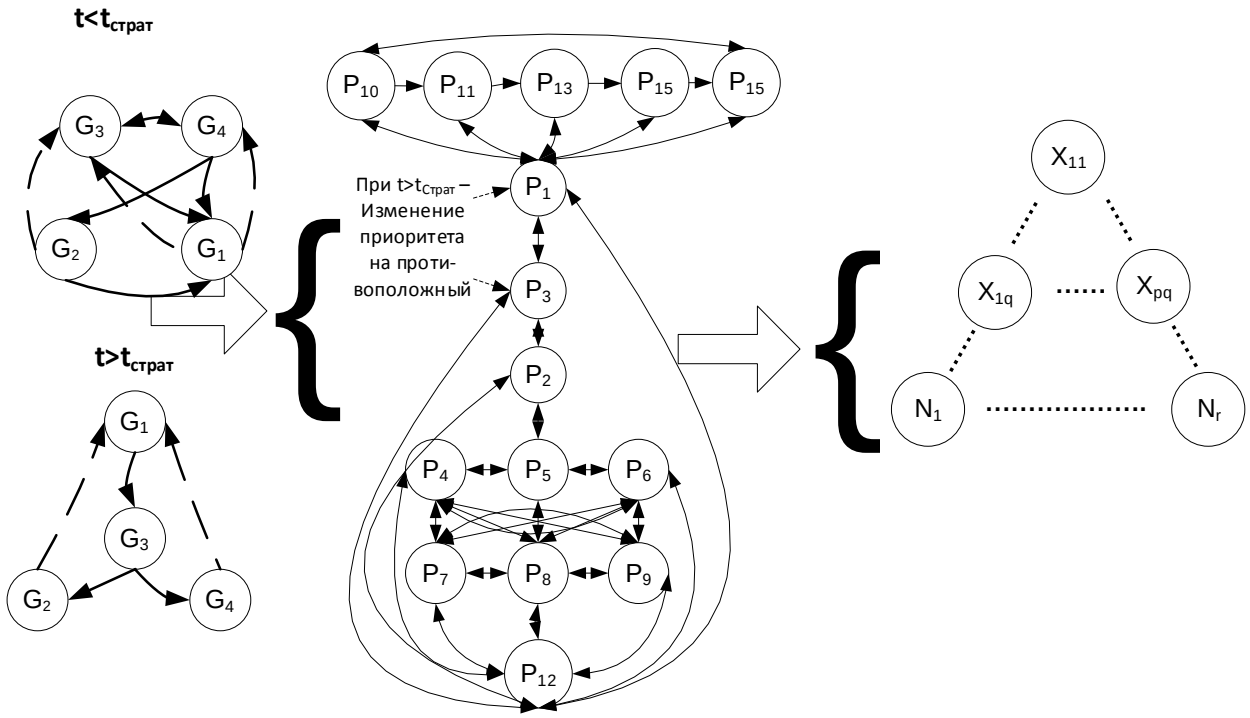

Рис. 3. Отношения целей ВТС, процессов и объектов в сетях ЗС

Таблица 2. Границы системы сети водородных заправочных станций

Виды подсистем	Организационные средства управления	Технические средства управления
Управление	Мастер ЗС/установки	Сервер и POS, АСУ (MES-система)
Производство водорода как МТ	Персонал установок по производству водорода	Установки по газовой конверсии CH_4, разложение биомассы или электролизу
Реализация водорода как МТ	Операторы и заправщики водородных ЗС	Контроллеры управления топливо-(водородо-) раздаточных колонок

Таблица 3. Положения границ управляемой и управляющей подсистем в сетях ЗС

Положение Границы	Средство управления	
	Организационные	Технические
Верхнее	Заместитель руководителя	Сервер информационной системы
Нижнее	Помощник оператора	Контроллер оборудования

Структура системы управления (СУ) задается графом $\Gamma_1(X_1, U_1)$, где вершинам X_1 ставятся в соответствие организационные ($p = 1$) и технические ($p = 2$) средства управления X_{pq}, ребрам U_1 – отношения между ними. Элементарная задача управления задается котрежем $F_{ijkpq} \subseteq X_{pq} \times C_i \times P_j \times H_k$ и обозначает выполнение функций управления C_i ($I=1..5$, функция C_5 – контроль и обеспечение безопасности в связи со спецификой выделяется явно) в периоды H_k ($k = 1...K$) для процессов P_j ($j = 1...J$) средствами X_{pq}. Ее образу соответствует число средств управления $X_{k*} \in \{X_{k*}\}$ ($k^* = 1...(P + Q) \times I \times J \times K$), которое участвует в решении задачи, тогда как контуру $FC_{pqjk} = \{F_{pq1jk}...F_{pq5jk}\}$ соответствует последовательность выполнения функций C_i для процесса P_j средствами X_{pq} на периодах h_k. Пример структуры СУ типичной сети ЗС для $P_{1,3}$ в виде матриц инциденций, соответствующих структуре F_{ijk} приведен в [9].

Общая задача состоит в том, чтобы путем последовательного перевода системы из одного состояния в другое вплоть до целевого G_{uv} добиться наилучшего К в данных условиях.

Структура системы принятия решений (граф $\Gamma_2(X_2, U_2)$ – при реализации P_j показана на рис. 4, где вершинам X_2 ставятся в соответствие виды d ($d = 1...D$) актов принятия решений A^d_{jk} j-го процесса k-го интервала: принятие решений лицом, принимающим решение (ЛПР) при недостаточности данных ($d = 1$); применение ранее созданных моделей ($d = 2$); обучение и использование результатов ($d = 3$).

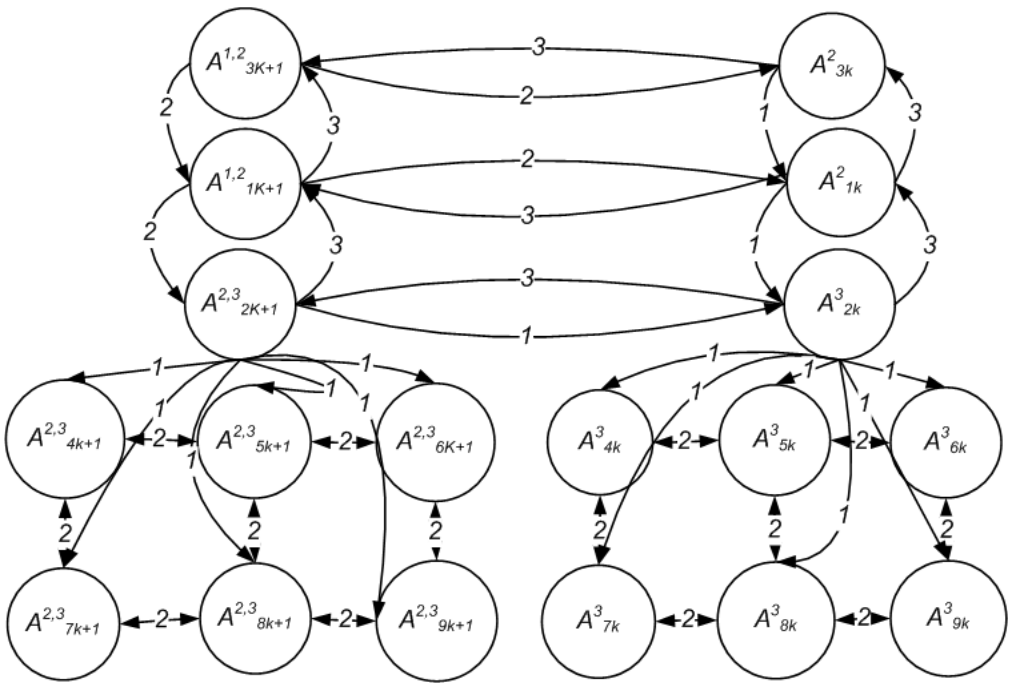

Рис. 4. Граф структуры системы принятия решений в сетях ЗС

При этом ребра U_2 определяют отношения актов {U_2^1 – безусловное исполнение, U_2^2 – условное исполнение, U_2^3 – информирование}; акты для P_1 (прием/поставка МТ) вплоть до успешного завершения ОПЭ приоритетны по отношению к P_3 (разработка) с возвращением к доминированию реализации МТ при эксплуатации (рис. 3), обеспечение и обслуживание ($P_{4–9}$) вторичны по отношению к $P_{1–3}$, P_{10-15} доминируют в целом; стратегические решения доминируют над оперативными с естественно меньшей детализацией; акты связаны обратной связью (ОС) $U_2^{1,2} \Leftrightarrow U_2^3 \vee P_{1–3}$ с решением $U_2^2 \Leftrightarrow U_2^2 \vee P_{4–9}$, тривиальная ОС для $P_{4–9}$ U_2^3 не показана.

Модель структуры информационной системы задается графом $\Gamma_3(X_3, U_3)$, где вершинам X_3 ставятся в соответствие виды *md* (*md* = 1...*MD*) массивов данных M_q уровня *q*: структурированные данные в электронном виде и БД предметной области (*md* = 1); структурированные данные в бумажной форме и архив (*md* = 2); неструктурированные данные (*md* = 3). Ребра U_3 определяют отношения, способы передачи и формы хранения данных {1 – электронная, 2 – бумажная и 3 – устная}. На рис. 5 считается, что между массивами идет двухсторонний обмен данными, на нижнем и верхнем уровнях доминируют устная и электронная формы, взаимодействие между всеми уровнями.

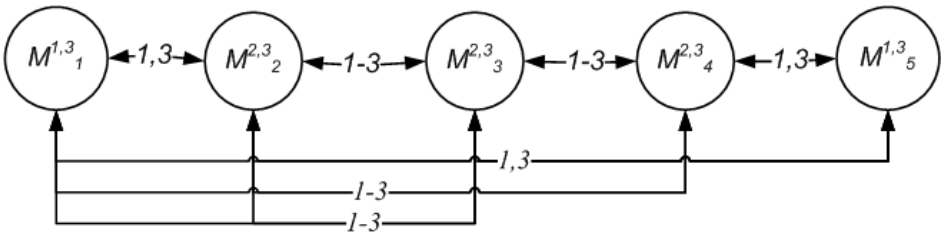

Рис. 5. Структура информационной системы сетей ЗС

Модель структуры организационно-технической системы представлена на рис. 6 в виде графа $\Gamma_4(X_4, U_4)$, где вершинам X_4 ставятся в соответствие средства управления X_{pq}, ребрам U_4 – отношения и предполагается, что элементарные структуры организационно-технических систем (для решения F_{ijkpq}) иерархически упорядочены, широко используется АСУ и по мере усложнения задач растет роль подготовленного ЛПР, в связи с чем преимущественно используемые виды структур смещаются право.

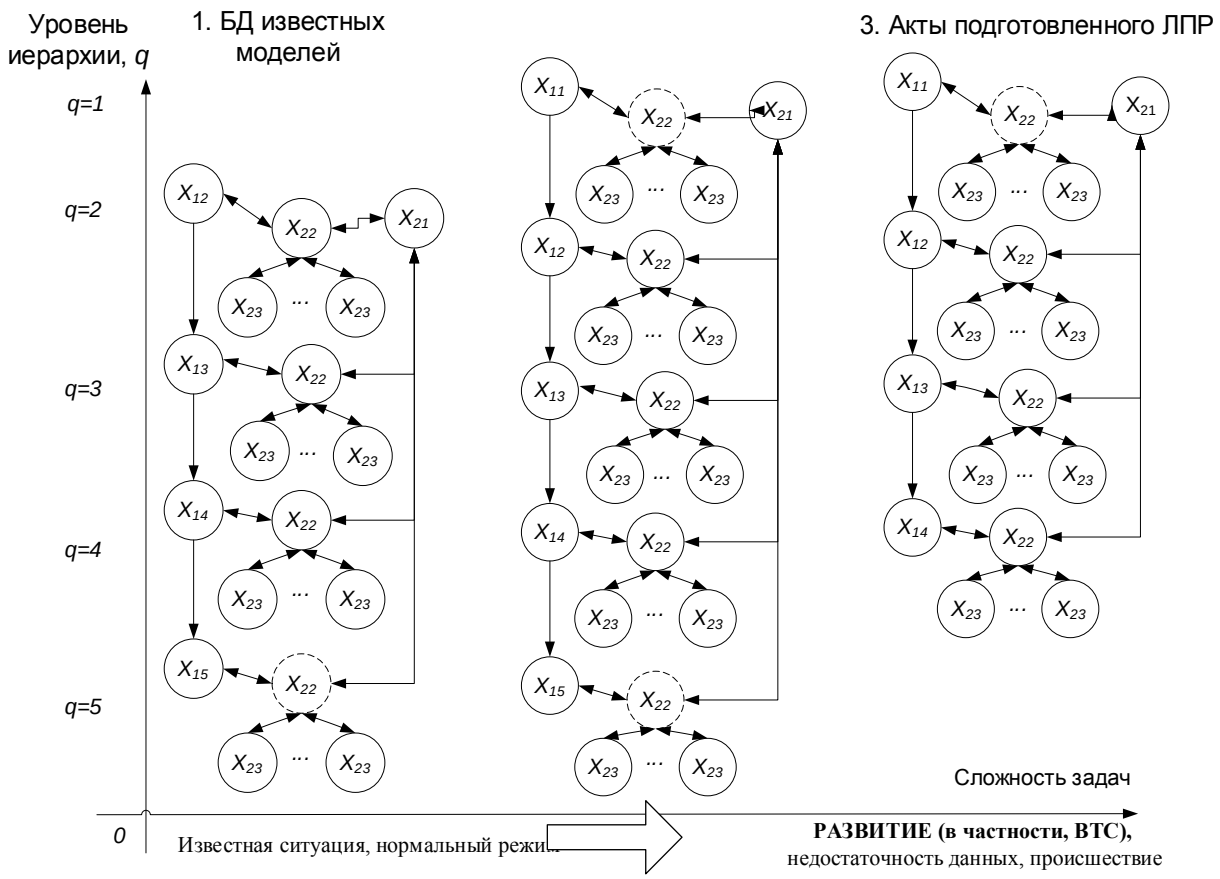

Рис. 6. Графы структур организационно-технических систем сетей АЗС

Инфра-система моделируется в виде совокупности объектов-преобразователей И-, М-, Ф- и Э-потоков, нуждающихся в управлении. Моделью структуры является граф Г(X, U), где X – объекты N_n вида A_0, A_{ef}, Б и В, U – отношения, определяемые процессами P_j предметной области.

4 Информационно-логическая схема построения сетей водородных ЗС

ВТС как СЧМС в настоящее время находится на стадии развития, что подразумевает:

- использование вновь привлекаемых ресурсов с их резервом при сложности достижения цели;
- программно-целевые структуры организационно-технических систем и систем управления;
- принятие решений скорее подготовленными ЛПР, так как базы знаний только формируются;
- широкое развитие автоматизации, что является общим для современных сложных систем.

Схема построения сетей водородных ЗС в рамках сделанных ранее предположений в целом совпадает с ранее разработанными аналогичными алгоритмами для НПО [2,3] – как размещения объектов в местах максимальной плотности потока ТС с учетом факторов развития, так и модели структуры системы управления[7,8,9] – и должно учитывать указанные выше особенности:

- первоначально развитие возле объектов производства водорода, что по мере появления новых далее, по мере развития технологий транспорта и хранения и их реализации аналогично сетям АЗС;
- допускаемое отсутствие промежуточных (распределительных) складов хранения;
- проведения синтеза оптимальных структур преимущественно по процессам [3,7].

При решении задач проводится синтез структур систем как объединение большего числа функций управления в меньшем числе средств управления. Фактически, функции и производственные операции агрегируются вдоль процессов, периодов и контуров управления (P-, H- и C-синтезы, соответственно) с первоначальным построением распределенной модели структуры СУ (Ω-синтез) вплоть до физических ограничений средств управлении с сохранением требуемых надежности и безопасности функционирования и иных значимых критериев. Построение структур и выбор управляющих воздействий, дающих минимальное отклонение от заданного K или целевой области в пространстве параметров, проводится направленным перебором по агрегированным показателям, что обосновано из-за последовательного снижения размерности задач при синтезе с отсечением решений,

не имеющих физический смысл, заданную степень автоматизации и экономическую целесообразность. Данный метод был реализован в [2,3], где рассматривались функциональные подсистемы НПО. Обозначив системы ВТС γ, можно выделить основные особенностях синтеза данных систем.

Средства X_{pq} на основании принципов управления - по отклонению *О* системы от цели, возмущению со стороны среды *В* и по изменению цели *Ц* - реализуют процедуры $Pr_{pr} \in \{Pr\}$(pr = 1...4: Pr_1 – непрерывное слежение, Pr_2 – дискретное слежение, Pr_3 – квази-программное управление, Pr_4 – управление с накоплением информации). В M_1 (принципы управления) представлены простейшие контуры СУ (в связи со сложностью многомерного представления), структурированные по процедурам *Pr* (для краткости для Pr_4, «0» – отсутствие взаимодействия). Считается, что чем выше уровень организационных средств, тем меньше их взаимодействие с инфра-системой (IS) и X_{pq} при больших q.

$$M1 \begin{pmatrix} & X_{12} & X_{13} & X_{14}/X_{14}^{\gamma} & X_{15}/X_{15}^{\gamma} & X_{21} & X_{22}/X_{22}^{\gamma} & X_{23}/X_{23}^{\gamma} & IS \\ X_{11}^{CV} & \text{ОВЦ} & \text{Ц} & 0 & 0 & \text{Ц} & \text{Ц} & 0 & 0 \\ X_{12}^{CV} & 0 & \text{ОВЦ} & \text{Ц} & 0 & \text{Ц} & \text{Ц} & 0 & 0 \\ X_{13}^{CV/\alpha} & 0 & 0 & \text{ОВЦ} & \text{ОВ} & \text{ОВЦ} & \text{ОВ} & \text{ОВ} & \text{ОВ} \\ X_{14}^{CV/\alpha} & 0 & 0 & 0 & \text{ОВЦ} & 0 & \text{ОВЦ} & \text{ОВЦ} & 0 \\ X_{15}^{CV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{21}^{CV} & 0 & 0 & \text{ОВ} & \text{ОВ} & 0 & \text{ОВЦ} & 0 & 0 \\ X_{22}^{CV} & 0 & 0 & \text{ОВ} & \text{ОВ} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{23}^{CV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{Pr_4}$$

В матрице M_2 (выполнения процедур в контурах управления) отсутствие IS как управляющего элемента и объекта управления X_{11} тривиально, столбец средств управления γ отражает управляющее взаимодействие технических средств подсистем обеспечения и обслуживания.

$$M2 \begin{pmatrix} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15}/X_{15}^{\gamma} & X_{21} & X_{22} & X_{23} & IS \\ X_{11}^{CV} & Pr_{3,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{3,4} & 0 & 0 \\ X_{12}^{CV} & 0 & Pr_{2,3,4} & 0 & 0 & 0 & Pr_{2,3,4} & 0 & 0 \\ X_{13}^{CV} & 0 & 0 & Pr_{2,3,4} & Pr_2 & 0 & Pr_{2,3} & 0 & 0 \\ X_{14}^{CV} & 0 & 0 & 0 & Pr_{2,3,4} & 0 & Pr_{2,3} & Pr_{2,3} & Pr_{2,3} \\ X_{15}^{CV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{1,2} & Pr_{1,2} & Pr_{1,2} \\ X_{21}^{CV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_3 & 0 & 0 \\ X_{22}^{CV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_{1,2,3} & Pr_{1,2} \\ X_{23}^{CV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Pr_4 & 0 & Pr_1 \end{pmatrix}$$

Соответствие периодов управления h_k средствам задается матрицей M_3, где учтено, что:

- полное участие X_{pq} в управлении – 1, неучастие – 0, иные величины пропорциональны времени;
- «модель участия» – равномерное использование X_{11} ресурсов для всех процессов, работа X_{12} с двумя процессами, участие $X_{13,14}$ в межконтурной координации, расходование X_{15} и $X_{21–23}$ всех ресурсов на указанных периодах управления (временных интервалах).

Управление на h_k осуществляется средствами X_{pq}, с относительной стоимостью, представленной в M_4, где фаза S_{ph}=1 – создание, S_{ph}=2 – нормальный режим функционирования

$$
\text{M3}\begin{pmatrix}
 & h_1 & h_2 & h_3 & h_4 & h_5 \\
X_{11} & 0{,}0 & 0{,}1/n & 0{,}2/n & 0{,}3/n & 0{,}4/n \\
X_{12} & 0{,}05 & 0{,}2 & 0{,}3 & 0{,}3 & 0{,}15 \\
X_{13} & 0{,}1 & 0{,}2 & 0{,}25 & 0{,}35 & 0{,}1 \\
X_{14} & 0{,}25 & 0{,}25 & 0{,}3 & 0{,}15 & 0{,}05 \\
X_{15} & 0{,}4 & 0{,}3 & 0{,}2 & 0{,}1 & 0{,}0 \\
X_{21} & 0{,}1 & 0{,}2 & 0{,}3 & 0{,}3 & 0{,}1 \\
X_{22} & 0{,}3 & 0{,}3 & 0{,}3 & 0{,}1 & 0{,}1 \\
X_{23} & 0{,}5 & 0{,}5 & 0{,}0 & 0{,}0 & 0{,}0
\end{pmatrix}
\qquad
M4\begin{pmatrix}
 & S_{ph=1} \\
X_{11}^{\text{СУ}} & - \\
X_{12}^{\text{СУ}} & - \\
X_{13}^{\text{СУ}} & - \\
X_{14}^{\text{СУ}} & - \\
X_{15}^{\text{СУ}} & - \\
X_{21}^{\text{СУ}} & 0{,}5 \\
X_{22}^{\text{СУ}} & 0{,}2 \\
X_{23}^{\text{СУ}} & 0{,}2
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix}
 & S_{ph=2} \\
X_{11}^{\text{СУ}} & 1 \\
X_{12}^{\text{СУ}} & 0{,}75 \\
X_{13}^{\text{СУ}} & 0{,}5 \\
X_{14}^{\text{СУ}} & 0{,}2 \\
X_{15}^{\text{СУ}} & 0{,}1 \\
X_{21}^{\text{СУ}} & 0{,}01 \\
X_{22}^{\text{СУ}} & 0{,}01 \\
X_{23}^{\text{СУ}} & 0{,}01
\end{pmatrix}
.
$$

В результате формируется структура СУ как совокупность контуров управления. Все матрицы, кроме M_1, квадратные, в связи с чем возможно использование их произведения $M_1 x M_{2Pr} x M_3 x M_4^{Sph=1,2}$.

5 Выбор наилучшего варианта

Можно выделить следующие естественные виды структур систем обеспечения моторными топливами – специализированные ВЗС, части подсистем поставки (НХК) и подсистемы АЗС. Схема синтеза структуры представлена на рис. 7, где, ВУ – внешняя управляющая подсистема, функции $C_{2\text{-}4}$ выполняются по порядку нумерации, МАЗС – многотопливная АЗС. На этапе Ω-синтеза происходит формирование КУ и структуры СУ в соответствии с принятым функциональным делением ТЭК. На этапе Р-синтеза происходит формализация процессов и снижение численности средств управления низших уровней, что вызывает необходимость дублирования КУ и требует межконтурной координации. На этапе Н-синтеза целесообразен перевод части контуров на внешнее управление с контролем состояния на соответствие G_{uv} [9]. Критерии сравнения даны в табл. 5.

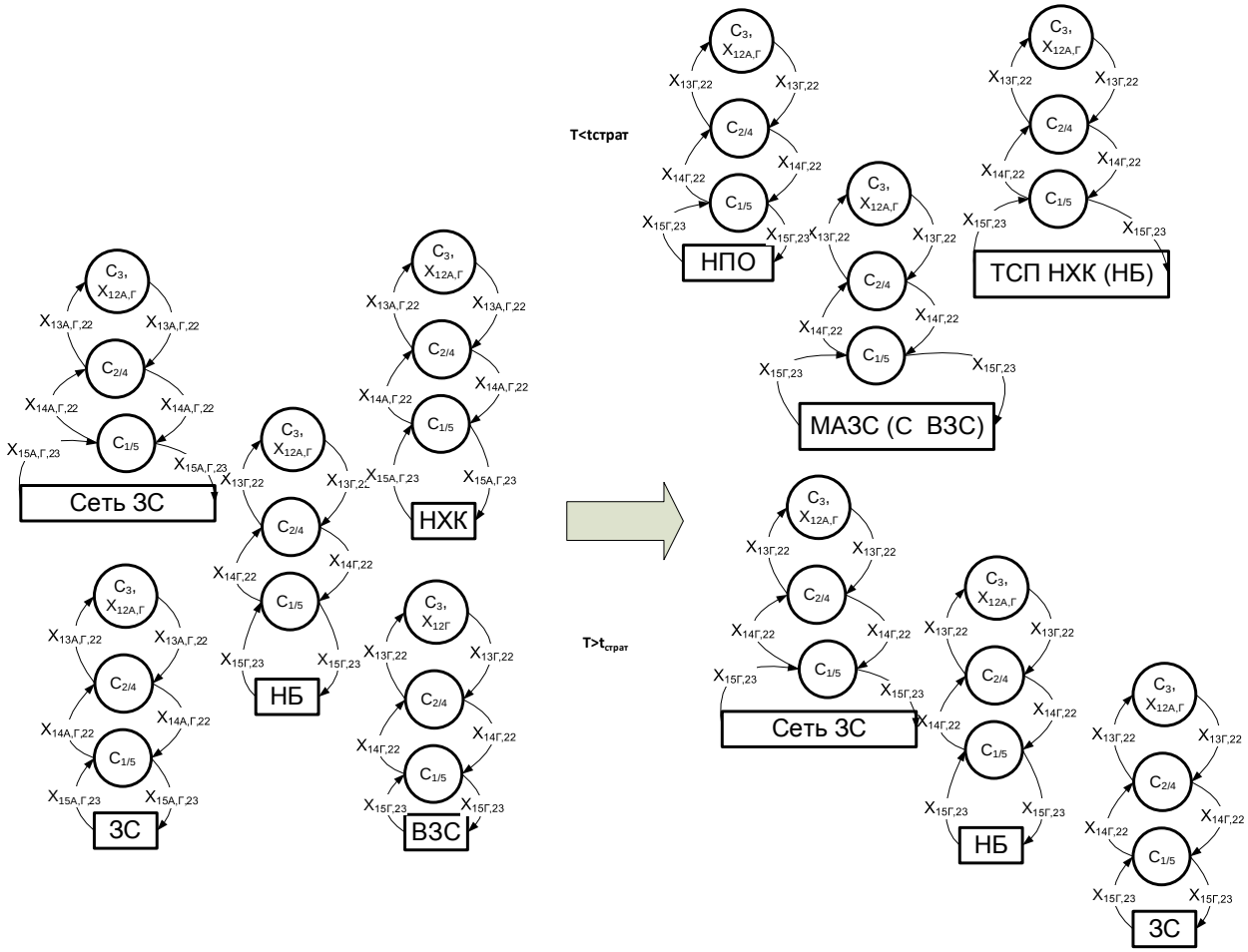

Рис. 6. Информационно-логическая схема синтеза структуры ВТС

Таблица4. Определение эффективности вариантов модели развития ВТС

Показатель	Вариант 1 (ВЗС)	Вариант 2 (части НХК)	Вариант 3 (подсистемы АЗС)
Общее описание	МТ поставляется из внешней среды	Сеть ЗС являются частью производства	Задачи реализуются системами сети ЗС
Мощность задач управления	$X^1_{pq}: F^1_{ijk} \subset C^1_i P^1_j H^1_k$	$X^2_{pq}: F^2_{ijk} \subset C^2_i P^2_j H^2_k$	$X^3_{pq}: F^3_{ijk} \subset C^3_i P^3_j H^3_k$
	$\lVert F^1_{ijk} \rVert > \lVert F^2_{ijk} \rVert > \lVert F^3_{ijk} \rVert$, так как увеличивается число функций системы		
Стоимость управления	$\lVert \mathrm{cost}(X^2_{ijk}) \rVert \geq \lVert \mathrm{cost}(X^1_{ijk}) \rVert > \lVert \mathrm{cost}(X^3_{ijk}) \rVert$ из-за включения в систему подсистем производства и важности координации «’», $\exists\, F^{3\prime}_{ijk} \subset F^3_{ijk}$ и $X^{3\prime}_{pq} \subset X^3_{pq}$		
Надежность, τ	$\tau^2 \geq \tau^3 \geq \tau^1$, при интеграции с производственной системой надежность (качество) д.б. наилучшей (из-за максимальной близости СУ и ОУ), что сохраняется вплоть до устойчивого равновесия на рынке, S_{Ph}=2		
Безопасность, *s*	$S^2 \geq s^1 \geq s^3$, при дистанцировании ЗС от НХК безопасность не повышается ввиду естественного не улучшения компетенции X_{1q}, особенно важной при работе с данным опасным веществом в различных агрегатных состояниях		

В связи с отсутствием явного преимущества вариантов целесообразно разделения критериев на:

- на стадии S_{Ph}=1 (создание системы) – производственные;
- на стадии S_{Ph}=2 (эксплуатация системы) – коммерческие.

Для S_{ph}=1 преимуществом обладают структуры варианта 2 (связанные с производством), в т.ч. с учетом варианта 3 как части действующей сети АЗС, для S_{Ph}=2 – уже независимые (слабосвязанные с нефтехимическими комплексами, только в рамках договоров поставок) сети, т.е. вариант 1.

6 Обсуждение результатов

Ранее разработанные модели структур и алгоритмы управления систем НПО в работе были распространены на случай альтернативных и возобновляемых источников энергии на примере водорода. Полученные результаты могут быть использованы и для природного газа, в смеси с которым водород, в том числе, и может и транспортироваться. Исходя из результатов синтеза структур, одним из вариантов развития может стать, в соответствии с принципом совместного построения управляющей и управляемой систем, взаимоувязанное производство водородных транспортных средств и создание сети ВЗС с заблаговременным увеличением мощности энергопотребления объектов, что и реализуется сегодня, например, в Беларуси для электромобилей и в РФ с газомоторным топливом. Виды структур сетей водородных ЗС в процессе развития претерпевают изменения, ранее характерные для НПО – формирование сетей распределения возле центров производства и хранения с последующим созданием системы снабжения водородом в виде отдельно существующих сетей при росте их надёжности и безопасности за счет появления новых технологий и развития рынка водорода, в том числе см учетом эффекта масштаба.

Заключение

1. Альтернативные и возобновляемые источники энергии актуальны для большинства энергетических и транспортных компаний, науки, общества и государств, длительное время находятся в стадии научно-исследовательских работ и опытно-промышленной эксплуатации и уже сегодня составляют конкуренцию традиционным (ископаемым) источникам энергии.
2. Основная сложность – широкое распространение «традиционных» транспортных средств, развитость инфраструктуры их производства и обслуживания и необходимость возврата инвестиций - делает развитие в отсутствии прорывных открытий эволюционным, требующим эффективного управления.
3. Био-топливо и газ сегодня - промежуточный этап между ископаемыми моторными топливами и электромобилями (в т.ч. на водороде), при этом целесообразны совместные решения (гибридные электромобили, транспортировка и реализация смеси CH4 и H2, совместная разработка транспортных средств и структур объектов производства и обслуживания и т.п.).
4. Для повышения обоснованности выводов необходима дальнейшая практическая апробация подобных систем, однако успешное применение в сфере нефтепродуктообеспечения говорит о возможности использования полученных ранее моделей и алгоритмов как минимум на этапе постановки и начала (первой итерации) решения задачи с дальнейшим уточнением про мере развития.

5. Перспективная структура систем обеспечения энерго-ресурсами на транспорте (исключая ограничения по месту расположения) может включать в себя сеть достаточно больших зданий (S - сотни м2) с коммуникациями, гибкой внутренней структурой для размещения требуемого в данном регионе в данный период вида деятельности и «пристраиваемыми» блоками АЗС на ЖМТ, газовые автозаправочные станции, электро-зарядные станции, мойки и.. водородные ЗС.

Литература

1. *Ф.А. Давлетьяров, Е.И. Зоря, Д.В. Цагарели.* Нефтепродуктообеспечение. М.: Математика, 1998. 662 с.
2. *А.А. Безродный, А.Ф. Резчиков.* Модели структур и алгоритмы управления АЗС. Саратов:СГТУ, 2004. 249 с.
3. *А.А. Безродный*. Системный причинно-следственный подход к управлению НПО. Saarbrucken: 2017. 319 с.
4. RENEWABLES 2020. GLOBAL STATUS REPORT 2019. Глобальный обзор состояния.
5. Водородная экономика: путь к низко-углеродному развитию. М: Сколково, 2020 г.
6. *Zheng Li and others.* Hydrogen infrastructure design and optimization: a case study of China / International journal of Hydrogen energy, 33 (2008), 5275-5286.
7. *Цвиркун А.Д.* Основы синтеза сложных систем / А.Д. Цвиркун. – М.: Наука, 1975. – 432 с.
8. *Резчиков А.Ф.* Структуры автоматизированных систем управления энергетикой промышленных предприятий: в 2 т. / А.Ф. Резчиков. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983.
9. Построение системы прослеживаемости в сетях АЗС и нефтебаз / А. А. Безродный [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 6. С. 642–653.