

СЕТИ ПЕТРИ – ИНСТРУМЕНТ ВЫБОРА ПРИОРИТЕТОВ РАЗВИТИЯ РЕГИОНА¹

Для количественного обоснования приоритетных направлений социально-экономического развития региона, оценки последствий стратегических решений необходим модельный инструментальный учитывающий структурные и системные свойства региона, принципы и механизмы устойчивого эколого-экономического развития. Такой инструментальный должен отвечать следующим требованиям:

- учитывать комплексный характер изменений организационно-экономического механизма хозяйствования в регионе, обуславливающий необходимость взаимосвязанного изучения различных аспектов региональной социально-экономической системы – производственных и непроизводственных, финансовых, демографических, внешних связей, т.е. учитывать свойство её целостности;

- быть адекватным к изменениям постановки задач, что особенно важно в условиях становления нового механизма хозяйствования в регионе;

- быть достаточно простым, «работать» в оперативном режиме.

Известные модели и методы исследования и прогнозирования региональной экономики, отвечающие условиям централизованного управления экономикой, не в полной мере учитывают сформулированные требования: они, хотя, как правило, и одноаспектные тем не менее громоздки и трудно реализуемы на ЭВМ, недостаточно отражают научно-технический прогресс, развитие социально-экологической среды, финансовый аспект и организационно-экономический механизм. Их отличительная черта – исследовательский характер, малая ориентированность на практическое использование.

В данной статье использован метод построения модели сложных систем (СС) на основе объектно-ориентированного анализа СС и иерархических алгебраических сетей Петри. С использованием предлагаемого подхода создана объектная модель функционирования газоснабжения Иркутской области на базе Ковыктинского газоконденсатного месторождения (КГКМ).

Как известно, проектирование модели системы начинается с анализа требований, которым она должна удовлетворять. Такой анализ проводится с целью понять назначение и условия эксплуатации системы настолько, чтобы суметь составить ее предварительный проект.

При объектно-ориентированном подходе анализ требований к системе сводится к разработке ее моделей. В настоящее время существует несколько технологий объектно-ориентированной разработки систем, в основе которых лежит построение и интерпретация на компьютере моделей этих систем.

Объектная модель описывает структуру объектов, составляющих систему, их атрибуты, операции, взаимосвязи с другими объектами. В объектной модели должны быть отражены те понятия и объекты, которые важны для исследуемой системы. Методы объектно-ориентированного анализа (ООА) отличаются высокой чувствитель-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РГНФ №02-02-02244.

ностью к уровню знаний и взглядам специалиста, их применяющего, а также сложностью создания иерархии наследования.

Тем не менее, при исследовании и анализе сложных систем требуется, чтобы любой метод моделирования, используемый в концептуальном проектировании, носил объектно-ориентированный характер. Поэтому необходимо адаптировать методы ООА к реальным условиям работы исследуемых систем. Существует несколько путей решения этой проблемы, наиболее перспективным представляется подход, основанный на предположении, что описание объекта исследования на каждом шаге есть описание разных состояний процесса его функционирования. На укрупненном уровне моделируемая система представляет собой совокупность объектов, обладающих своей укрупненной динамикой процессов. Состояния объектов модели описываются значениями наиболее существенных параметров. Изменение состояния объектов обусловлено взаимодействием между объектами. Взаимодействия объектов модели описываются некоторыми предопределенными событиями, смена состояний объектов происходит под воздействием ряда внутренних для объектов модели факторов, связанных с предписанными ситуациями, обусловленными состоянием взаимодействующих и смежных им объектов.

С точки зрения взаимодействия объектов, не все состояния равноправны, следует разделять а) системные состояния (некоторая совокупность состояний инцидентных объектов), б) внешние состояния (состояние инцидентных объектов, через которые осуществляется взаимодействие), в) внутренние состояния объекта.

В рамках указанного подхода при ООА и создании моделей иерархически инкапсулированы внутренние состояния объектов (то есть для всех объектов, кроме объектов верхнего и нижнего уровней, можно выделить внешнюю и внутреннюю среду функционирования), что позволяет абстрагироваться от множества вычисляемых и других параметров объектов и учитывать параметры только по «входу» и «выходу». Таким образом, при объектно-ориентированном моделировании систем а) описание объектов моделирования включает описание разных состояний процесса функционирования объектов; б) текущее состояние процесса функционирования объектов описывается текущим состоянием участвующих в нем и связанных с ним объектов, входящих или не входящих в структуру объектов системы, что позволяет использовать при описании процесса описание только по «входу» и «выходу»; в) процесс функционирования объекта является частью общего процесса (внешняя среда функционирования объекта), и, в его рамках взаимодействует с другими процессами своего уровня, что вызывает необходимость определения уровня процесса, порождающего каждое ограничение на ход протекания данного.

В результате построения модели внешней среды функционирования объекта становится возможным четко определить ситуации, связанные с состояниями объекта и определить характер взаимодействия с другими объектами в рамках возникновения каждой из этих ситуаций.

Построение модели внутренней среды функционирования объекта основано на декомпозиции задачи функционирования объекта, входящей в структуру задач, решаемых во внешней среде функционирования рассматриваемого объекта, в соответствии со структурой объекта. При этом внутренняя среда функционирования объекта будет одновременно являться внешней средой функционирования его составных частей. В ходе построения моделей внешней и внутренней среды функционирования объекта СС существенно сокращается пространство «экспертного произвола» при формировании множества участвующих и связанных объектов и идентификации их структуры.

Сложность объекта исследования предполагает, что этап формализации должен являться одним из основных и предполагает содержательное и формальное определение категорий объектов исследования с целью построения математических моделей сложных систем.

Этапы построения моделей внешней и внутренней сред функционирования объектов СС, анализа процессов функционирования объектов реализуются с помощью сетей Петри (Coloured Petri Nets). Сети Петри были разработаны и используются в основном для моделирования параллельных процессов. С их помощью могут быть смоделированы многие системы, например программное обеспечение, физические и социальные системы. Моделирующие возможности сетей Петри и их эффективность в приложениях объясняются, прежде всего, тем, что сеть Петри – это интеграция графа и дискретной динамической системы, она может служить, таким образом, и статической, и динамической моделью представляемого с ее помощью объекта. Немаловажное значение имеет известное преимущество этих сетей – удобство их программирования на ЭВМ. Сети Петри применяются для моделирования возникновения различных событий, происходящих в системе.

Используя при моделировании различные модификации сетей Петри возможно:

- комплексно описывать сложные процессы взаимодействий;
- рассматривать все возможные, в том числе и альтернативные варианты развития процессов;
- отображать как количественные, так и чисто логические отношения;
- моделировать различные ситуации развития процесса, в зависимости от пути развития системы;
- отображать не только конечные цели функционирования системы, но и нежелательные или сопутствующие процессы и анализировать влияние процессов на функционирование системы в целом.

Другими преимуществами использования сетей Петри также являются:

- возможность представления всего процесса управления в динамике при одновременном протекании его отдельных частей;
- простота перехода к другим методам алгоритмического описания и обратно для использования известных методов анализа и синтеза;
- простота и наглядность при формулировке проблемы или алгоритма управления;
- описание проблемы управления известным математическим аппаратом;
- изменение алгоритмического описания при уточнении проблемы управления;
- простота правил композиции и декомпозиции алгоритмического описания отдельных частей процесса управления.

Не все перечисленные возможности сетей Петри реализуемы классическими сетями Петри, обычно их применяют в различных модификациях. Рассмотрим некоторые модификации несколько подробнее. Наиболее ограниченными сетями Петри являются автоматные сети и маркированные графы, которые допускают один вход и один выход для переходов и позиций соответственно. Введение в рассмотрение мультипликативности для дуг и количества фишек в позициях позволяет уже моделировать не только функционирование параллельных систем, но и динамику и описания физических систем, однако вынуждает прибегать к различным искусственным построениям при описании взаимодействующих процессов, протекающих в одних и тех же функционально неделимых подсистемах. Выходом из этого положения явилось разрешение существования окрашенных фишек и дуг. Развитие этой идеи породило несколько ва-

риантов описания окрашенных сетей Петри, которые, однако, не имеют принципиальных различий и могут быть изоморфно преобразованы друг в друга.

Необходимость исследования динамики ресурсных потоков в системах требует включения в сети Петри в явном виде временных параметров. Между тем в сетях Петри в их классическом представлении не различается порядок поступления фишек в позиции, что не позволяет ввести линейный порядок на множестве фишек в позициях и, следовательно, упорядочить события во времени естественным путем, в рамках собственно сетей Петри, не прибегая к информации извне. Поэтому в сетях Петри для введения временных параметров используют специальные приемы, например, время может быть введено заданием задержек фишек в позициях. Существуют и другие аналогичные пути.

Для моделирования систем распределения ресурсов следует использовать сохраняющие сети Петри, где фишки представляют ресурсы системы. Так как строгое сохранение накладывает сильные ограничения на моделирование сети и если эти ограничения несовместимы с моделируемым объектом то, следует применять сохраняющие сети Петри по отношению к некоторому положительному ненулевому вектору взвешивания.

Посредством алгебраических сетей можно сформулировать ряд классических задач анализа систем с использованием методов сравнения. Вместе с тем алгебраические сети являются и средством непосредственного описания реальных физических систем и процессов. Это дает возможность получать результаты, полезные для практического использования модели. Выбор конкретного языка сетей Петри определяется содержанием задач использования сетевых моделей. На практике широко используются проблемно-ориентированные расширения сетей Петри, среди которых наиболее известны Е-сети, комби-сети, М-сети, словарные сети и др.

В качестве примера для изучаемой предметной области (региональная экономика) исследуем варианты разработки Ковыктинского газоконденсатного месторождения (КГКМ). Основной целью освоения запасов природного газа КГКМ в региональном масштабе остается создание стабильной сырьевой базы для химической промышленности региона, ориентированной на ОАО «Ангарская нефтехимическая компания». Снижение объемов добычи и переработки нефти в последние годы имеет устойчивую тенденцию. Это обуславливает поиск альтернативных источников, среди которых природный газ и газовый конденсат являются наиболее предпочтительными как по технологическим, так и по экологическим соображениям. Значительные экологические преимущества природного газа диктуют необходимость перевода на этот энергоноситель тепловых электростанций, коммунальных котельных, аппаратов химических производств и промышленности строительных материалов.

Основные положения Ковыктинского газового проекта (КГП) изложены в схеме газоснабжения Иркутской области на базе КГКМ В схеме отражены:

- основные сведения о КГКМ, рассматриваемом в качестве сырьевой базы газификации Иркутской области;
- объемы газопотребления Иркутской области, приоритетность потребителей;
- этапность развития газового комплекса и подачи газа потребителям (промысла, магистрального газопровода Ковыкта - Ангарск);
- основные технические решения по обустройству месторождения (технологические решения, размещение площадок и схемы генеральных планов, электроснабжение, водоснабжение и канализация, отопление, вентиляция, теплоснабжение, архитектурно-строительные решения, контроль и автоматизация, технико-экономические решения сравниваемых вариантов);

– основные технические решения по объектам магистрального транспорта газа и конденсата (выбор оптимальной технологической схемы, ее конструктивная характеристика, компрессорные станции);

– газоснабжение природным газом потребителей по трассе;

– электроснабжение линейных потребителей и электрохимзащита;

– связь;

– автомобильные дороги;

– объекты инфраструктуры;

– организация управления и обслуживания, в том числе автоматизированная система управления;

– объекты жилищно-гражданского строительства;

– организация строительства;

– экологические аспекты реализации проекта;

– перспективы разработки проектов развития газового комплекса.

Генеральная схема газоснабжения является в основном техническим документом, в котором рассматриваются технические и технологические вопросы, связанные с добычей, транспортом, переработкой и потреблением газа. Для развития области на базе КГП требуется формирование региональных производственных и социально-экономических систем. С этой целью должна быть разработана стратегия комплексного социально-экономического развития региона, представленная в виде специальной программы.

При проектировании концептуальной модели необходимо выполнение следующих этапов:

– определение структуры исследуемой системы, которую составляют набор и взаимосвязи объектов, структура и целевая функция системы;

– определение структуры каждого элемента системы или ее подсистем;

– выяснение и описание процесса функционирования системы, как последовательности состояний из множества, возникающих под воздействием внешних и внутренних факторов из множества;

– отбор подмножества наиболее существенных факторов и показателей, характеризующих процесс функционирования системы;

– определение характера взаимосвязей между входом, состоянием и выходом системы, формализация математической модели процессов системы.

Опишем создание объектной модели разработки КГКМ. Опишем структуру объектов, входящих в исследуемую систему. Все атрибуты объектов делятся на четыре класса:

• идентификаторы;

• параметры;

• методы;

• функции.

Обозначим описание имени – идентификатора объекта символом K_i , описание j -го параметра (атрибута) объекта символом m_i^j и описание методов и функций объекта символом y_i^j . Тогда статическая модель объекта представима в виде:

$$O_i \Rightarrow (K_i, m_i^j, y_i^j, t).$$

Символ t здесь указывает на то, что статическое описание объекта всегда относится к какому-то моменту времени, то есть характеризует некоторое состояние объекта. Поведение объекта есть процесс изменения его состояний во времени под воз-

действием множества внешних и внутренних факторов. Этот процесс полностью определяется значениями:

- параметров m_i^j ;
- внешних и внутренних факторов X_i^j ;
- разметкой позиций M_i^j ;
- зависимостями, существующими между объектами. В качестве методов реализации существующих между объектами зависимостями используются логические выражения y_i^j .

Однако описание любого параметра (атрибута) m_i^j также включает в себя описания своих атрибутов. Этими атрибутами являются: идентификатор K_i^j (код имени атрибута), множество m_i^j структурных параметров и функциональное значение выражения y_i^j . Иными словами, любой атрибут объекта представляется моделью (K_i, m_i^j, y_i^j, t) , причем параметры объекта либо инкапсулируются объектом, либо наследуются объектом внешнего уровня. Для обозначения наследуемых параметров внутренней среды функционирования введем обозначение m_i^j .

Структура формальной модели выражений y_i^j представляет собой отношение «причина – следствие». Причиной обычно являются некоторые действия, либо некоторые условия, а следствием – результат действия (изменение разметки позиций M_i^j) или обусловленное значение атрибута m_i^j . В общем случае схема этой модели имеет вид:

$$y_i^j = f(A_1, \dots, A_s),$$

где A_1, \dots, A_s – аргументы, f обозначает тип операции с аргументами. Аргументами таких моделей обычно являются параметры m_i^j объектов, разметка позиций M_i^j , влияющие на поведение объектов. Поэтому применительно к j -тому объекту модели функциональных атрибутов имеют вид:

$$y_i^j = f(m_i^j, \dots, m_i^j, M_i^j, \dots, M_i^j)$$

Объекты, определенные на одних и тех же атрибутах с различными значениями, относятся к одному классу объектов, суммарное значение атрибутов передается атрибуту объекта-родителя.

Ковыктинский газовый комплекс (КГК) включает три относительно самостоятельных подкомплекса:

1. Промысловая добыча и подготовка к транспортировке пластовой смеси (собственно промысел);

2. Система трубопроводного транспорта углеводородов на участках:

- углеводородное сырье — Ковыкта–Ангарск;
- природный газ и газовый конденсат — Ковыкта–Окунайка;
- этан и топливный газ — Ангарск–Зима;
- топливный газ — Ангарск–Иркутск–Шелехов;

3. Газоперерабатывающее производство, обеспечивающее разделение газовой смеси на фракции: метановую (топливный газ, сырье для химических производств, например, метанола и аммиака), этановую (сырье для получения этилена, применяемого в производствах полиэтилена, поливинил-хлорида, полистирола и др.), легких углеводородов пропана, бутана и изобутана (сырье для пиролиза на заводах АНХК); в

перспективе, при благоприятной конъюнктуре рынка, предполагается организовать производство товарного гелия.

Объектами первого уровня для этой системы выбираем 3 комплекса КГК (K_1 - добыча, K_2 - транспорт, K_3 - потребление).

Выделяем объекты первого уровня гиперграфами. Опишем атрибуты выбранных объектов.

K_1 – промысловая добыча:

m_1^1 – газоконденсатное месторождение. Выделяя атрибуты для газоконденсатного месторождения - m_1^1 – задаем для него идентификатор $K_{1.1}$ и его атрибуты:

$m_{1.1}^1$ – южный участок (РУСИА Петролеум), идентификатор $K_{1.1.1}$;

$m_{1.1}^2$ – Южно-Усть-Кутский участок (Газпром), идентификатор $K_{1.1.2}$;

$m_{1.1}^3$ – Хандинский участок (Тюменская нефтяная компания), идентификатор $K_{1.1.3}$;

m_1^2 – добывающее оборудование;

K_2 – система трубопроводного транспорта:

m_2^1 – газопровод Ковыкта–Окунайка, идентификатор $K_{2.1}$;

m_2^2 – трубопроводы для транспортировки у.в. сырья Ковыкта–Ангарск, идентификатор $K_{2.2}$;

m_2^3 – трубопроводы для транспортировки топливного газа Ангарск–Зима, идентификатор $K_{2.3}$;

m_2^4 – трубопроводы для транспортировки топливного газа Ангарск–Иркутск–Шелехов, идентификатор $K_{2.4}$;

K_3 – потребители газа Иркутской области:

m_3^1 – газоперерабатывающий комплекс АНХК, идентификатор $K_{3.1}$;

m_3^2 – Иркутск, идентификатор $K_{3.2}$;

m_3^3 – Ангарск, идентификатор $K_{3.3}$;

m_3^4 – Шелехов, идентификатор $K_{3.4}$;

m_3^5 – Зима, идентификатор $K_{3.5}$;

m_3^6 – др. потребители, идентификатор $K_{3.6}$;

K_4 – источники финансирования:

m_4^1 – РП, идентификатор $K_{4.1}$,

m_4^2 – Газпром, идентификатор $K_{4.2}$,

m_4^3 – ТНК, идентификатор $K_{4.3}$,

m_4^4 – администрация Иркутской области идентификатор $K_{4.4}$;

K_5 – трудовые ресурсы.

На множестве вершин K_i задаётся функция, определяющая наличие у каждой вершины свойств, например количество потребляемого (отгружаемого) или добываемого газового конденсата. Кроме того, существуют условия изменения разметки позиций, обеспечивающие функционирование сети.

Формально сеть Петри задается набором

$$N = \{B, D, E, F, M_0\},$$

где $B = \{P, T, y_i^j\}$ – ориентированный биграф, в котором $P = \{p_i\}$ – позиции, $T = \{t_i\}$ – переходы, $\bullet t_i : T \times P \rightarrow \{0,1\}$ – функция следования, $t_i^\bullet : P \times T \rightarrow \{0,1\}$ – функция предше-

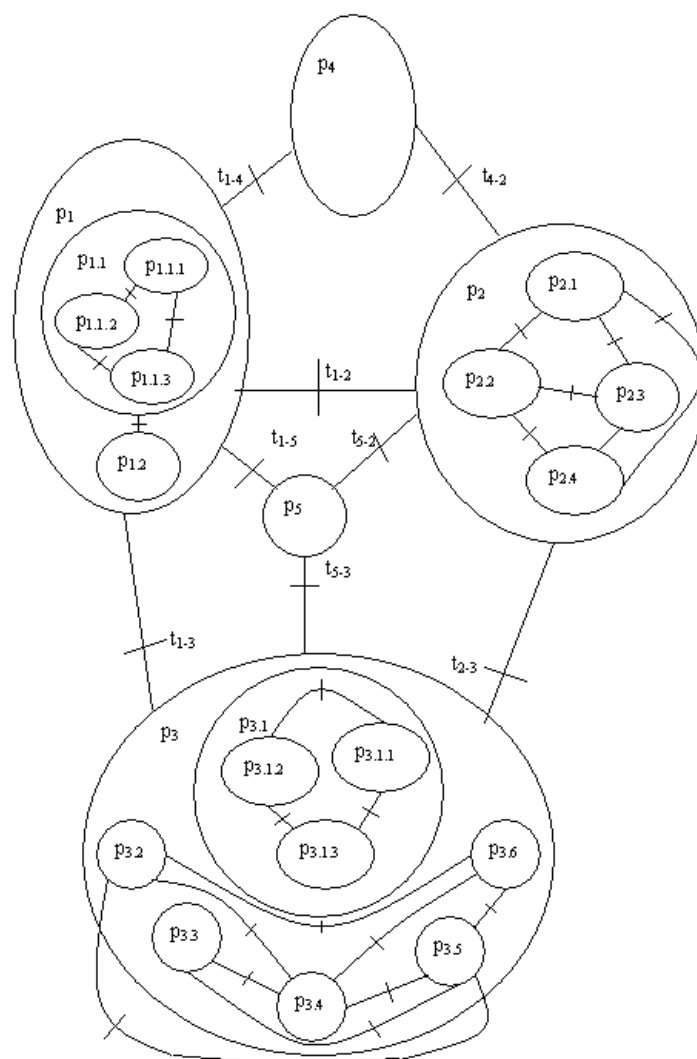
ствования. Позициям присваиваются метки, характеризующие текущее состояние сети. Примем $E = \{e_k\}$ – множество меток; e_k – k -ая метка сети. Каждой метке сопоставим вектор свойств $d_k = (d_1^k, \dots, d_n^k)$, задающий атрибуты (цвета) k -ой метки сети; $D = \{d_k\}$ – множество свойств меток. Функционирование сети определяется разметкой (маркировкой) M^\wedge , сопоставляющей каждой позиции наличие меток в ней и каждой из меток – вектор свойств d_k с определенными значениями атрибутов меток сети. Отображение F определяет значения наследуемых меток. При этом начальная разметка сети задается отображением $M_0 : (P \rightarrow E, E \rightarrow D)$. Управление функционированием сети выполняется заданием значений выражения y_i^j для предусловий выполнения перехода - $\bullet t_i$ (при этом $\bullet t_i : E \rightarrow \{0,1\}$) и постусловий выполнения перехода - t_i^\bullet (при этом $t_i^\bullet : E \rightarrow E$) и определяет операции над вектором свойств d_k меток пересылаемых через переход t_i .

Функционирование рассматриваемой системы в терминах сетей Петри можно интерпретировать следующими позициями и переходами:

- p_1 – промысловая добыча газа;
- $p_{1.1.1}, p_{1.1.2}, p_{1.1.3}$ – углеводородные ресурсы КГКМ;
- $p_{1.2}$ – оборудование для добычи газа;
- p_2 – система трубопроводного транспорта;
- $p_{2.1}$ – газопровод Ковыкта–Окунайка;
- $p_{2.2}$ – трубопроводы для транспортировки газа Ковыкта–Ангарск;
- $p_{2.3}$ – трубопроводы для транспортировки топливного газа Ангарск–Зима;
- $p_{2.4}$ – трубопроводы для транспортировки топливного газа Ангарск–Иркутск–Шелехов;
- p_3 – потребители газа Иркутской области;
- $p_{3.1}$ – газоперерабатывающие комплексы;
- $p_{3.1.1}$ – завод по переработке газового конденсата в п. Окунайский;
- $p_{3.1.2}$ – газоперерабатывающий комплекс АНХК;
- $p_{3.1.3}$ – газораспределительные станции потребителей второй очереди газоперерабатывающего комплекса «Саянскхимпром»;
- $p_{3.2}$ – газораспределительные станции потребителей первой очереди г. Иркутска;
- $p_{3.3}$ – газораспределительные станции потребителей первой очереди г. Ангарска;
- $p_{3.4}$ – газораспределительные станции потребителей первой очереди г. Шелехова;
- $p_{3.5}$ – газораспределительные станции потребителей первой очереди г. Зима;
- $p_{3.6}$ – др. потребители;
- p_4 – источники финансирования (РП, Газпром, ТНК, администрация Иркутской области);
- p_5 – трудовые ресурсы;
- t_n – условия реализации событий между n -объектом и m -объектом.

Объектная модель функционирования КГК изображена на рисунке.

Моделирование динамических изменений через события с использованием сетей Петри позволяет адекватно отображать процессы происходящие в исследуемой системе.



Сеть Петри газоснабжения Иркутской области на основе Ковыктинского газоконденсатного месторождения (объектная модель)

При разработке системы динамического моделирования необходимо выполнить следующие шаги.

- по объектной модели определить активные объекты; эти объекты имеют атрибуты с периодически обновляемыми значениями;
- определить дискретные события; такие события соответствуют дискретным взаимодействиям объекта (например, включение питания) и реализуются как операции объекта;
- определить непрерывные зависимости (например, зависимости атрибутов от времени); значения таких атрибутов должны периодически обновляться.

При функциональном моделировании КГК необходим дополнительный анализ вариантов структуры КГК, сценариев функционирования (например, нарушение обязательств поставщиками и потребителями, необеспеченность квалифицированными кадрами и т.д.), Этому соответствует решение 3-х типов задач, каждая из которых может быть сформулирована в терминах сетей Петри:

- достижимость конечной цели (задача первого типа);
- возможность отклонения от заданной структуры КГК (задача второго типа);
- влияние исходных условий функционирования КГК на достижение поставленной цели.