



*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН, Иркутск, Россия*

ТЕОРИЯ СИСТЕМ И СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Н.И. Воропай



Зачем электроэнергетикам нужна теория систем?

- В обывательском представлении электроэнергетика ассоциируется с наличием электричества в розетке, наличием электрического освещения в нужном месте и в нужное время, надежным обеспечением электричеством бытовых приборов по приемлемым тарифам и т.д. Где-то там есть ГЭСы, ЛЭПы, подстанции во дворе и т.п.
- Неспециалисты часто оперируют миллиардами киловатт-часов, тысячами и миллионами вольт, часто путая вольты и ватты и не задумываясь особо, как они получаются
- Специалисты-электроэнергетики должны понимать, что они имеют дело не с набором изолированных объектов (генераторов, трансформаторов, выключателей и др.), а с совокупностью взаимосвязанных элементов, объединенных в систему, которая является сложным объектом со своими специфическими свойствами и проблемами, которые нужно решать
- Отсюда вытекает системная идеология исследований: от системного представления объекта к его свойствам и далее к его моделированию и выбору решений

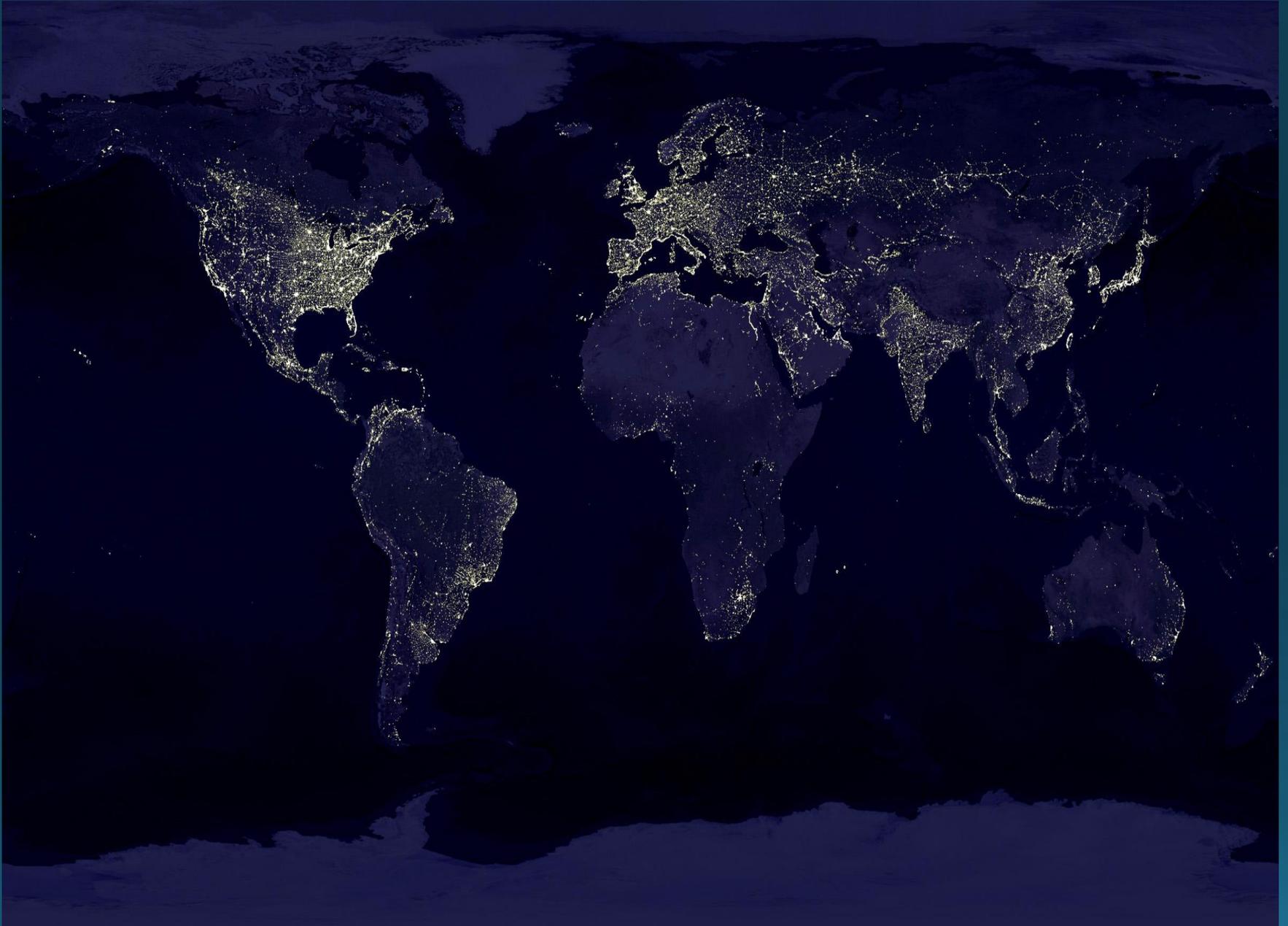


ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СИСТЕМНОГО МИРОВОЗЗРЕНИЯ

- Определенные элементы системных представлений были еще у древних философов
- В средние века идеи системности были забыты
- А.А. Богданов. «Тектология: Всеобщая организационная наука» в 1913-1928 гг.
Людвиг фон Берталанфи в 1930-е годы
- План ГОЭЛРО как образец системного подхода
- Интенсивное развитие системного мировоззрения в 1960-1980-е годы в СССР и за рубежом
- Книга Л.А. Мелентьева «Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития». М.: Наука, 1979 и 1983
- Моисеев Н.Н. «Математические задачи системного анализа». М.: Наука, 1981

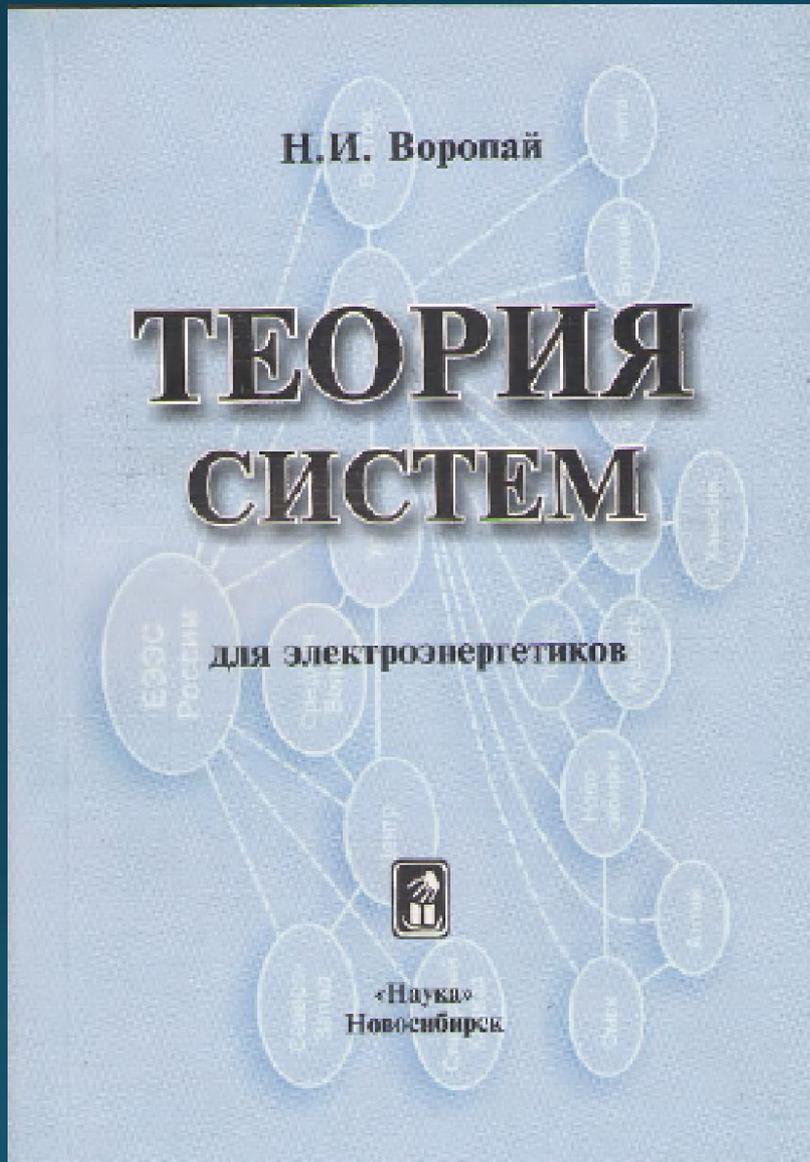


Планета Земля ночью





**Теория систем для электроэнергетиков: Учебное пособие /
Н.И.Воропай. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская
фирма РАН, 2000. - 273 с.**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ИрГТУ–ИСЭМ

Н.И. Воропай
ТЕОРИЯ СИСТЕМ
для электроэнергетиков

Учебное пособие для студентов
электроэнергетических специальностей
Рекомендовано Учебно-методическим
объединением по образованию в области
энергетики и электротехники



Новосибирск
«Наука»
Сибирская издательская фирма РАН
2000



Содержание

1. Основные понятия теории систем
2. Структурный анализ систем
3. Поведение систем
4. Системы и информация
5. Описание систем
6. Выбор решений
7. Имитационное моделирование
8. Примеры системных задач в электроэнергетике
9. Книга Л.А.Мелентьева «Системные исследования в энергетике»



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Система



● 1 — 2 — 3

1 - элемент; 2 - существенная связь; 3 - несущественная связь.

1. Система есть совокупность элементов, объединенных между собой связями.

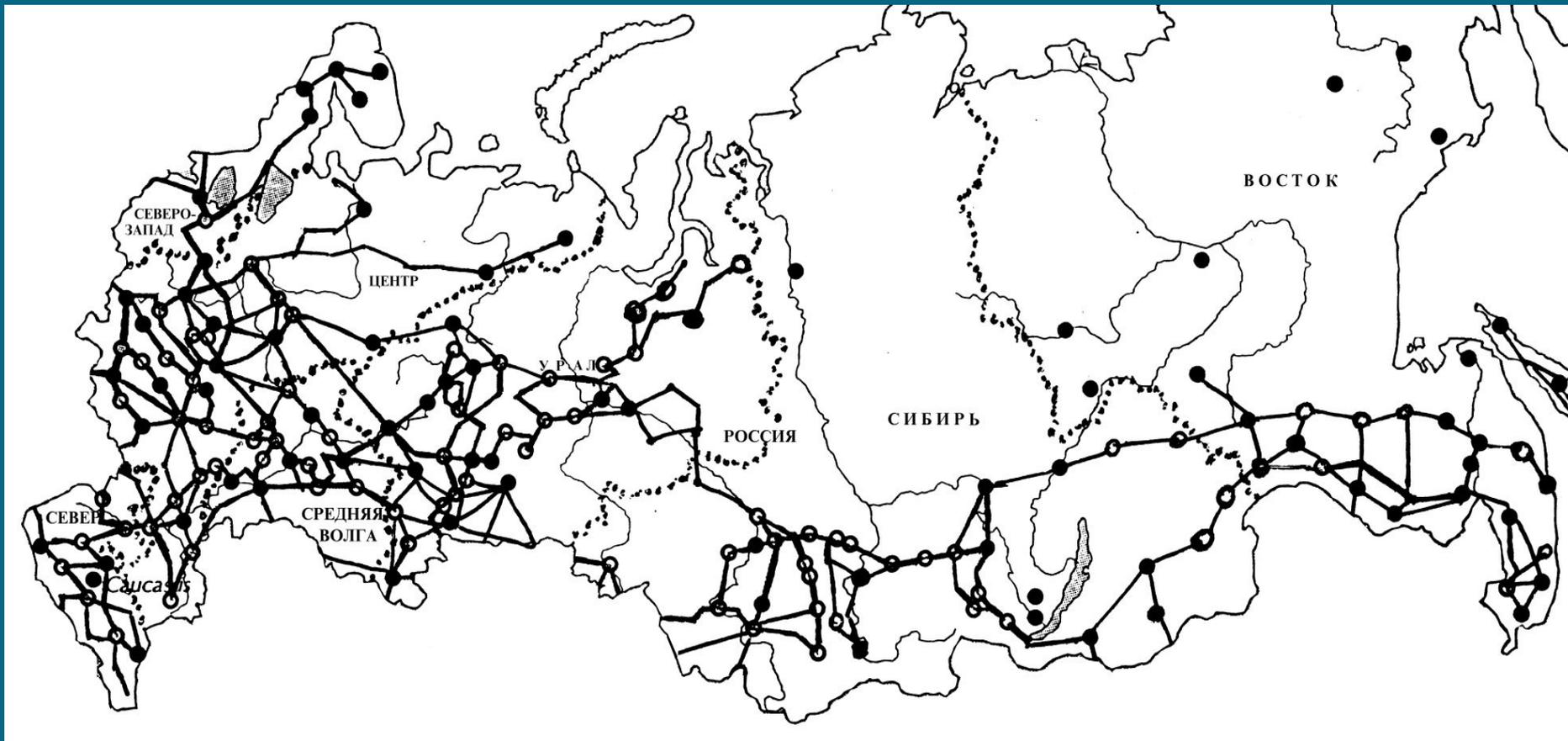
2. Для любых систем характерно наличие *интегративных качеств (свойств)*, присущих системе в целом, но не свойственных ни одному из ее элементов. Поэтому, расчленяя систему на отдельные части (подсистемы) и изучая каждую из них в отдельности, нельзя познать все свойства системы в целом.

3. Для любых систем характерно наличие *существенных связей* между элементами, превосходящих по мощности (силе) связи этих элементов с элементами, не входящими в систему. Это свойство позволяет выделить систему в виде целостного объекта из окружающей среды.



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Система. Примеры систем в энергетике (ЕЭС России)



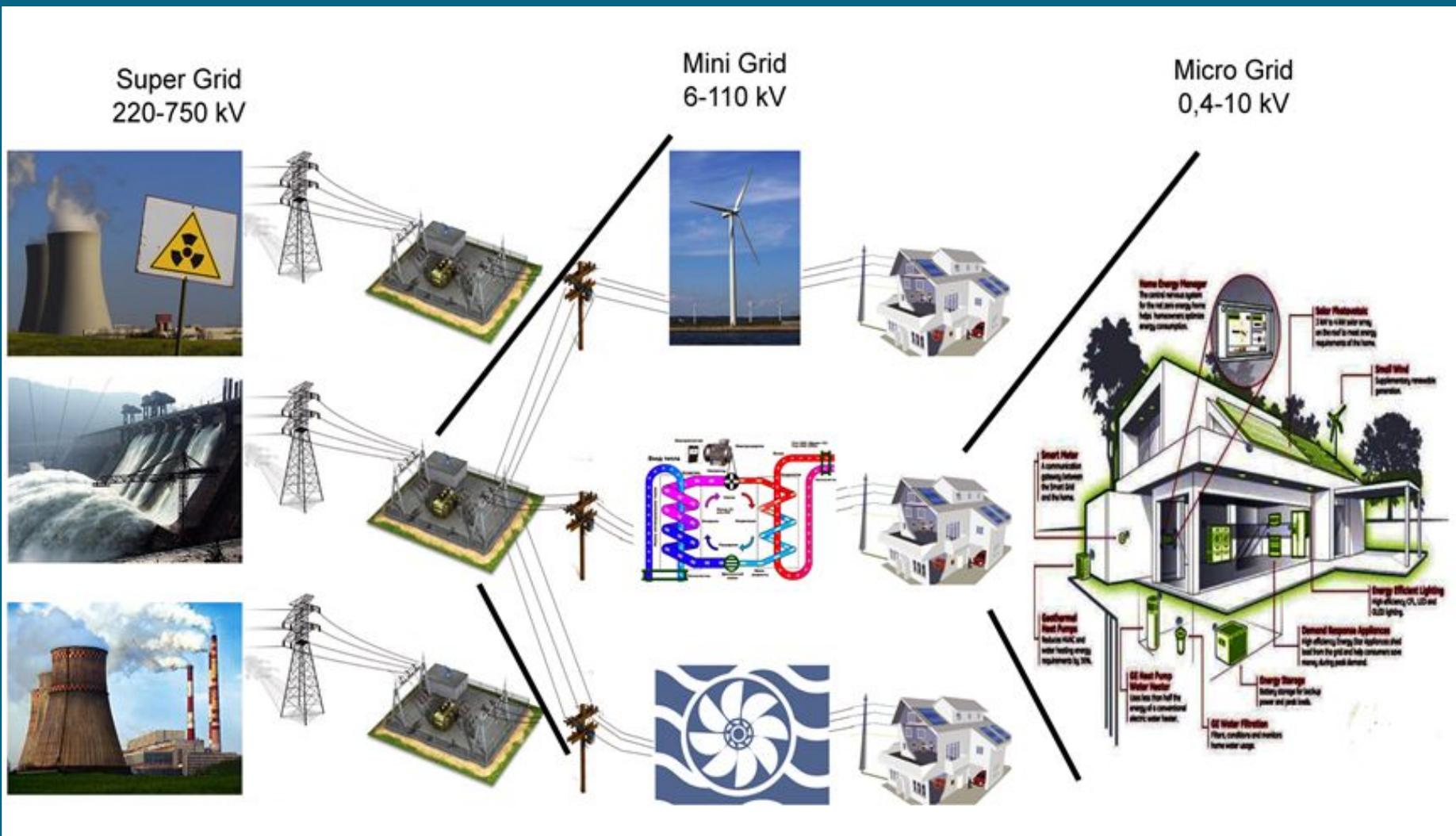
● 1 ○ 2 3

1 - основные электростанции; 2 - основные подстанции;
3 - границы объединенных ЭЭС



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

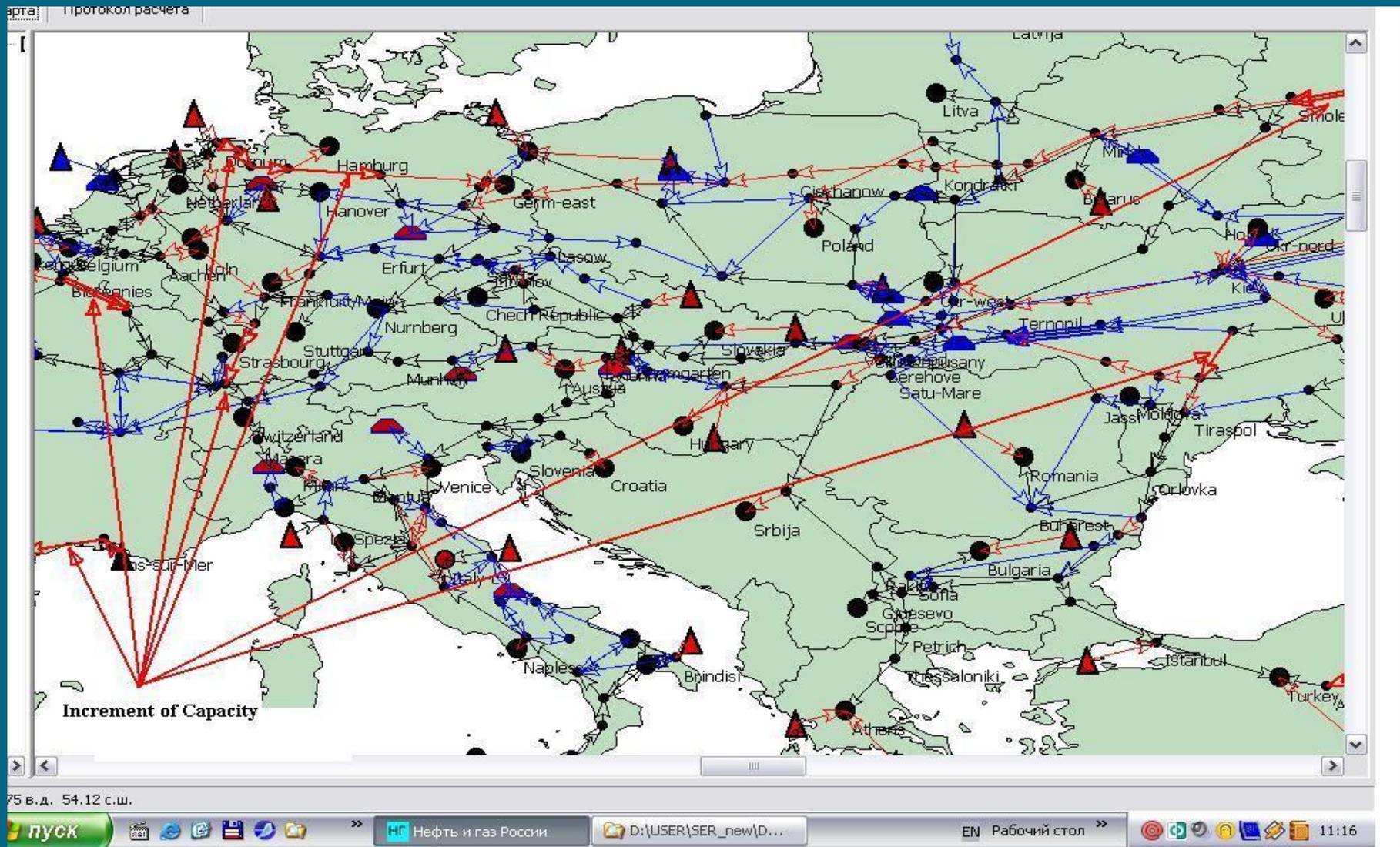
Система. Примеры систем в энергетике (Супер-мини-микро энергообъединение)





1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

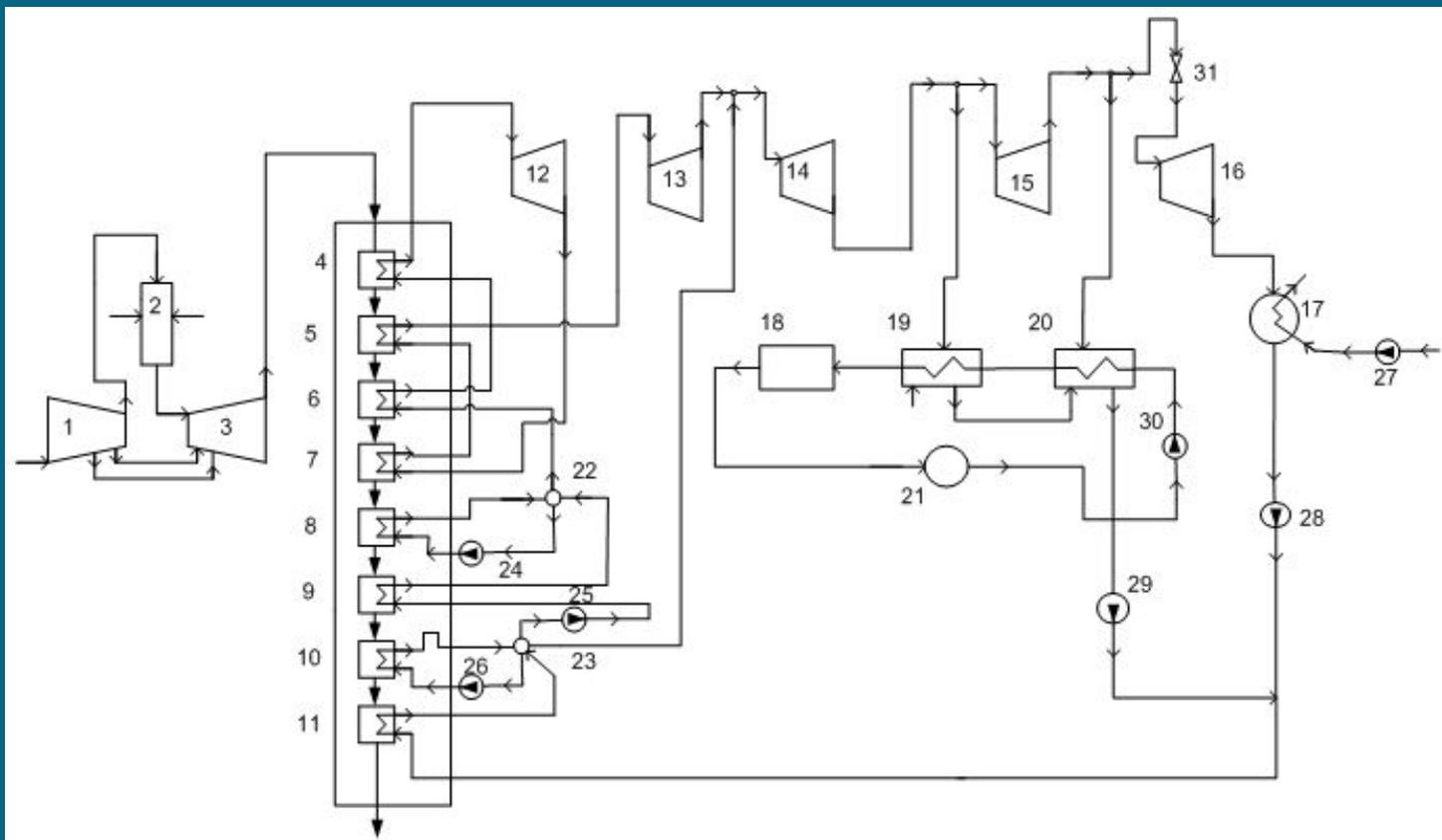
Система. Примеры систем в энергетике (Система газоснабжения в Европе)





1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Система. Примеры систем в энергетике (схема энергетической установки)



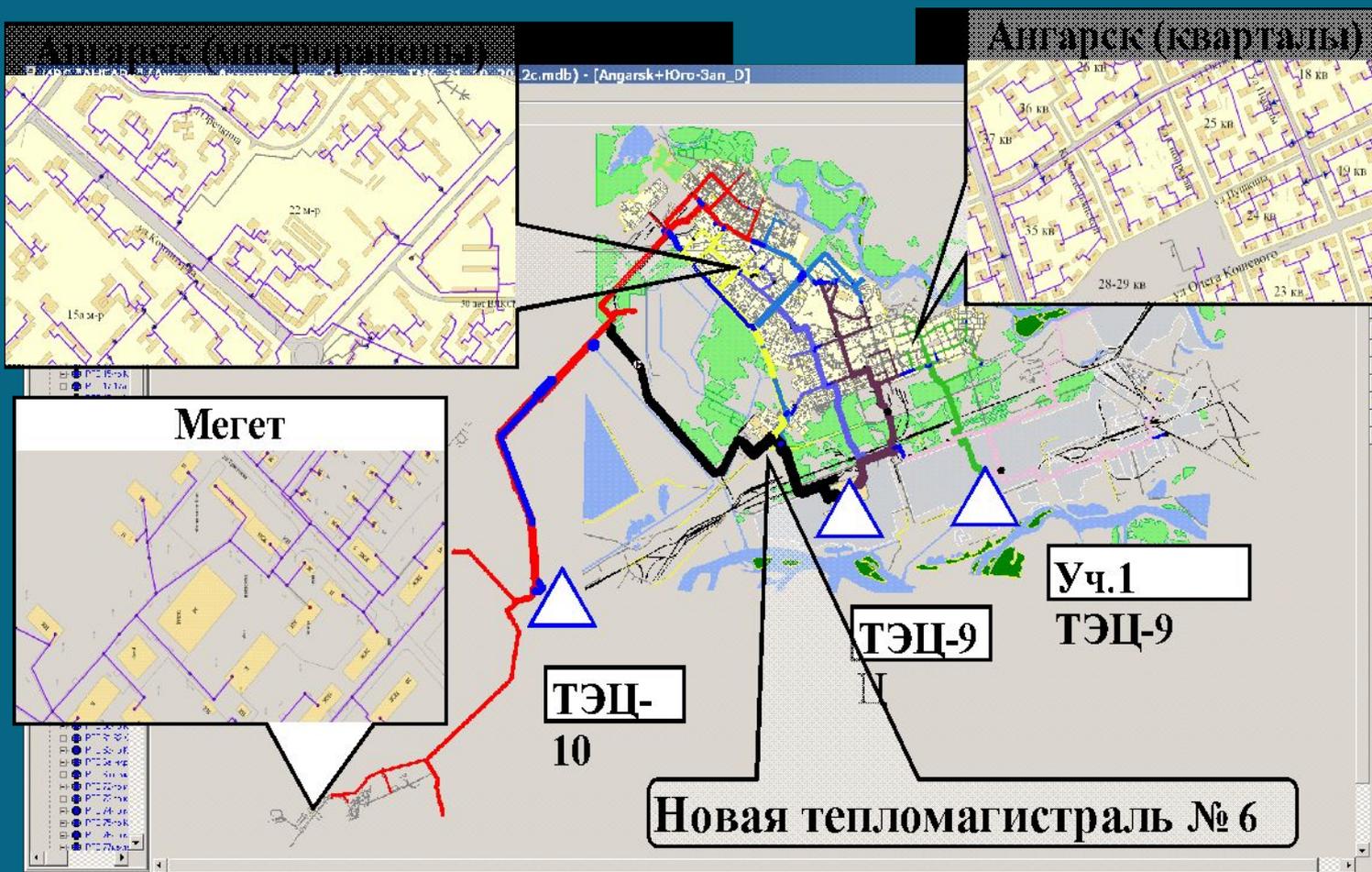
Расчётная схема теплофикационной ПГУ:

1 – воздушный компрессор, 2-камера сгорания, 3-газовая турбина, 4-конвективный пароперегреватель (КПП) 1 ступени, 5-промежуточный пароперегреватель (ПП) 2 ступени, 6-КПП 1 ступени, 7-ПП 1 ступени, 8-испаритель высокого давления, 9-экономайзер 2 ступени, 10-испаритель низкого давления, 11-экономайзер 1 ступени, 12-16 – отсеки паровой турбины, 17-конденсатор, 18-пиковые водогрейные котлы, 19-20 – сетевые подогреватели, 21-потребитель тепла, 22-23 – барабаны-сепараторы, 24-30-насосы, 31 – регулирующая диафрагма.



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Система. Примеры систем в энергетике
(система теплоснабжения)

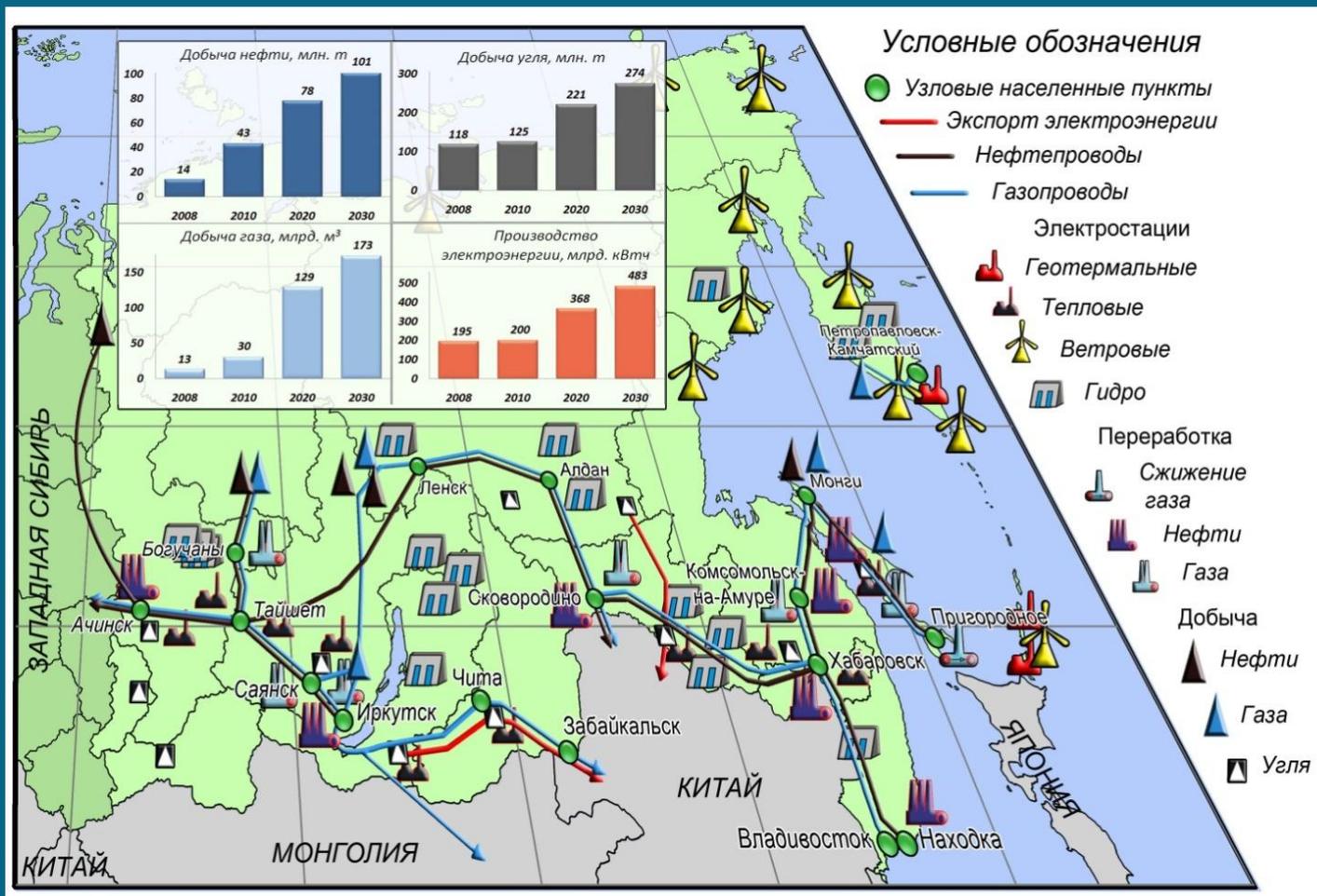


Общий вид новой графической БД по тепловым сетям г. Ангарска в ИВК «АНГАРА-ТС»



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Система. Примеры систем в энергетике (ТЭК ВС и ДВ)

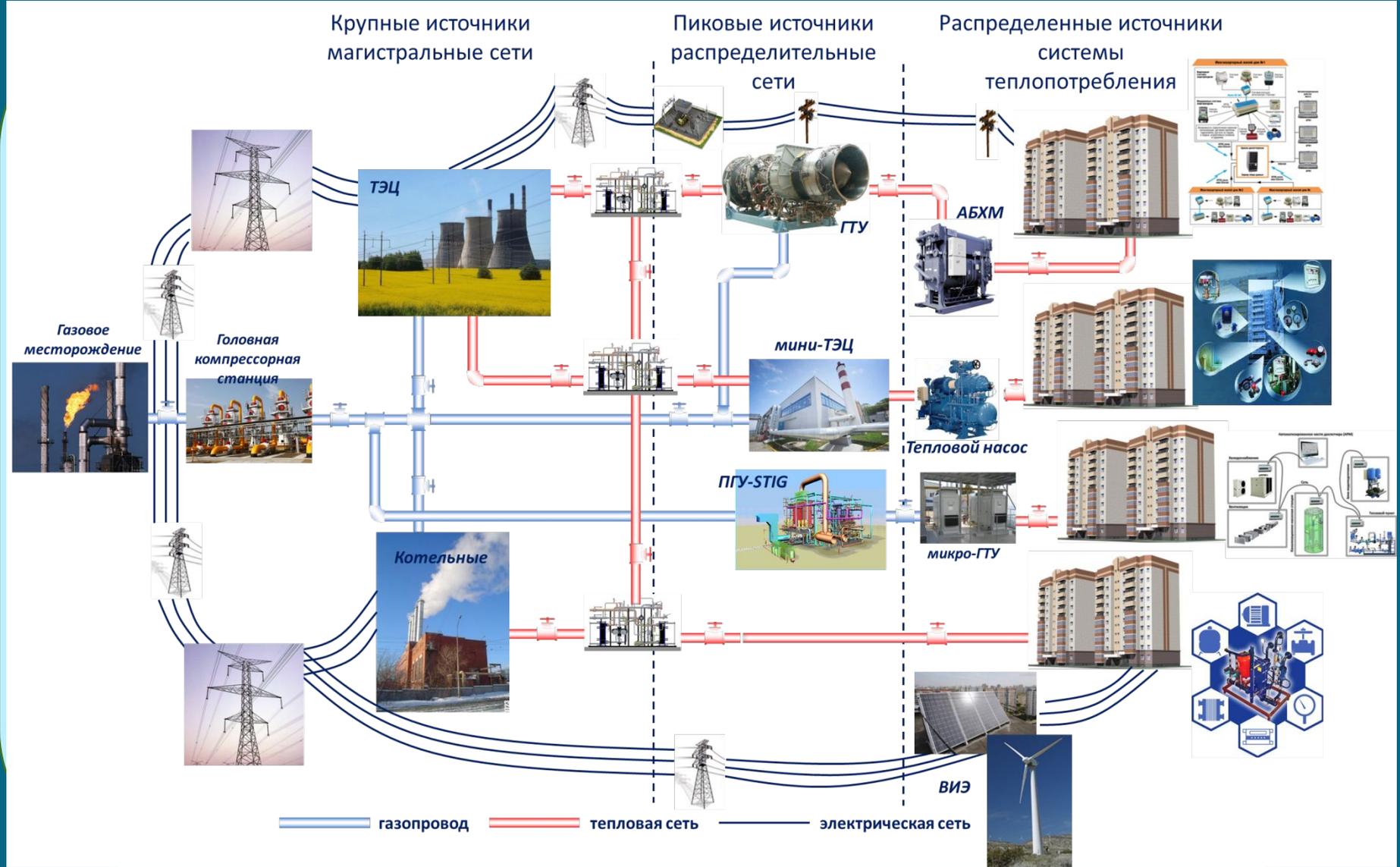


Развитие топливно-энергетического комплекса Восточной Сибири и Дальнего Востока до 2030 года (стратегический сценарий)



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Система. Примеры систем в энергетике (интегрированная система энергоснабжения)





1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Элемент

Под элементом принято понимать простейшую неделимую часть системы. Ответ на вопрос, что является такой частью, может быть неоднозначным и зависит от цели рассмотрения объекта как системы, от точки зрения на него или от аспекта его изучения.

Подсистема

Подсистемы представляют собой компоненты системы, более крупные, чем элементы, и в то же время более детальные, чем система в целом. Возможность деления системы на подсистемы связана с вычленением совокупностей взаимосвязанных элементов, способных выполнять относительно независимые функции, подцели, направленные на достижение общей цели системы. Названием “подсистема” подчеркивается, что такая часть должна обладать свойствами системы, в частности некоторыми интегративными свойствами (свойствами целостности).



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Связь

Понятие “связь” входит в любое определение системы и обеспечивает возникновение и сохранение структуры и целостности системы. Это понятие характеризует и строение (структуру), и функционирование (состояния и поведение) системы.

Связь можно определить направлением, силой, характером (видом) и др. Связи в конкретных системах могут быть охарактеризованы одновременно несколькими признаками.

Состояние

Понятием “состояние” характеризует “временной срез” системы, зафиксированный в ее развитии или функционировании. Состояние определяют либо через входные воздействия и выходные переменные системы, либо через ее внутренние переменные.



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Функционирование и развитие системы

Функционирование обычно относится к такому достаточно короткому интервалу времени жизни системы, когда происходят изменения ее состояния при неизменном составе и параметрах ее элементов и связей.

Развитие рассматривается на существенно большем интервале времени и основной задачей при этом является отслеживание ввода новых элементов и связей (или изменения их параметров) и вывода из работы устаревших, отработавших свой ресурс элементов и связей системы

Цели, функции системы

Цели (функции) системы определяются ее предназначением. Понятие цели обычно применимо к так называемым организованным системам (экономика, общество и др.). Для технических систем больше подходит понятие «функция»

Обычно имеет место иерархия целей, которые могут быть непротиворечивыми или противоречивыми, противоречия могут быть неантагонистическими и антагонистическими



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Структура

Структура означает строение, расположение, порядок элементов и их групп и отражает наиболее существенные взаимоотношения между ними, которые мало меняются при изменениях в системе и обеспечивают существование системы и ее основных свойств

Целостность системы и неаддитивность, интегративность ее свойств обусловлены структурой. Структура является не только системообразующим, но и системосохраняющим фактором для сложных, высокоорганизованных систем. Она существенно определяет поведение системы, при этом устойчивость структуры обеспечивает устойчивость поведения.

Структура изменяется в процессе развития системы, вследствие чего у системы могут появиться новые свойства.

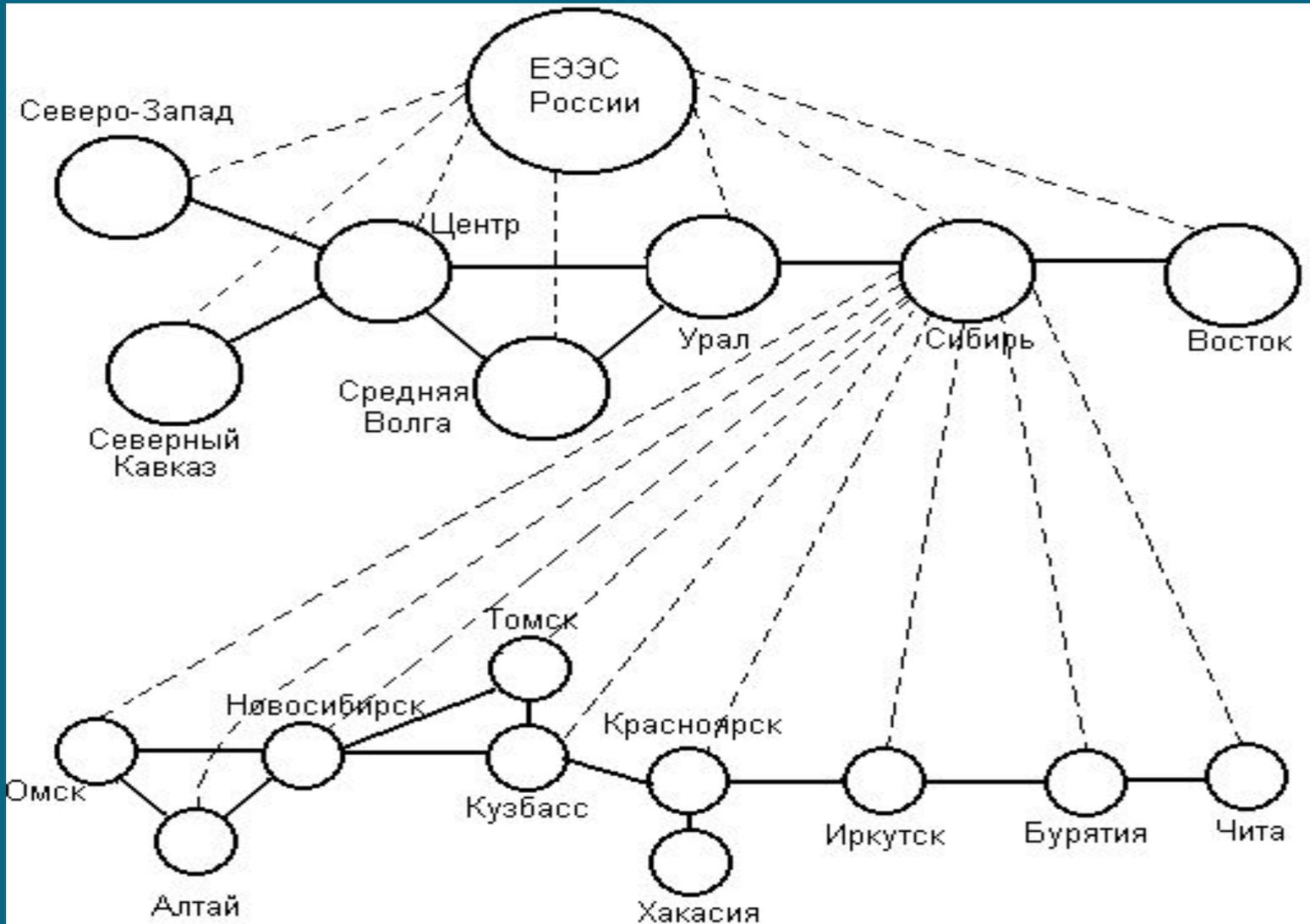
Структурное усложнение системы растет при увеличении ее масштабов медленнее, чем функциональное разнообразие ее поведения.

Структура сложных систем практически всегда иерархична. Иерархия определяется как принцип структурной организации сложных многоуровневых систем, состоящий в упорядочении взаимодействий между уровнями.



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Пример иерархической структуры системы



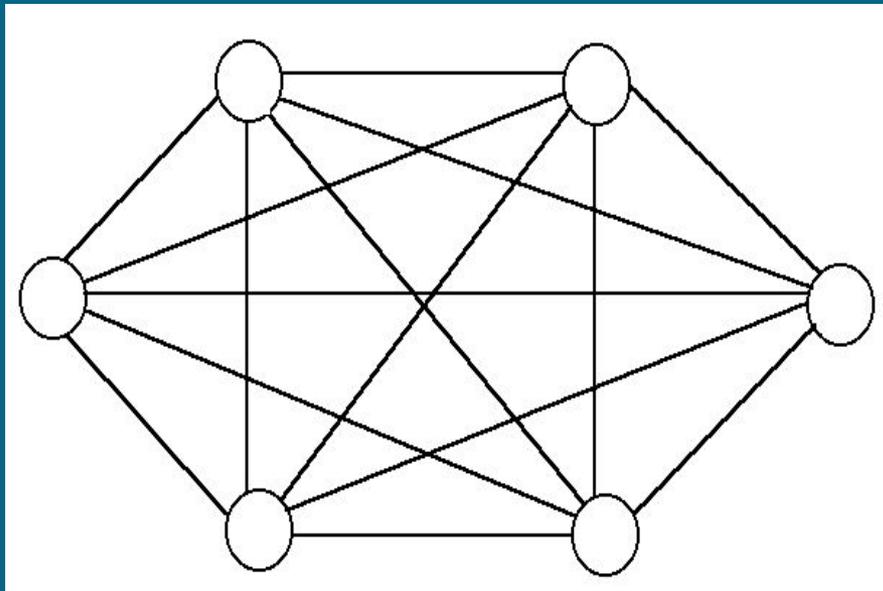


1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Связность

Связность отражает уровень (степень) взаимосвязей элементов в системе. Структурная связность системы – наиболее существенная ее качественная характеристика. С исчезновением структурной связности исчезнет и сама система.

Основной характеристикой связности является количество и сила связей каждого элемента системы с другими элементами





1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Сложность систем

Сложность системы – понятие относительное.

Следует различать *структурную* сложность, определяемую структурой и связностью элементов и подсистем, и *динамическую* сложность или сложность поведения.

Уровень рассмотрения системы и, соответственно, ее сложность может быть различной в зависимости от решаемых задач.

Структурная сложность систем непосредственно связана с такими понятиями, как иерархическая структура, связность, многообразие компонентов, сила взаимодействия компонентов.

Структура сложных систем неоднородна и это также определяет их структурную сложность.



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Поведение систем

Поведение – это процесс смены во времени состояний системы.

Наряду с понятием структуры поведение системы определяет интегративность, системность свойств этого изучаемого объекта. Системные, интегративные свойства системы проявляются через его поведение.

Сложность, многокомпонентность структуры системы, множественность связей между элементами необязательно ведут к сложному ее поведению. И наоборот, бывает, когда сравнительно простые по структуре системы имеют весьма сложное поведение.

Наряду со структурной сложностью системы сложность ее поведения – отличительная характеристика действительно сложной системы



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Нелинейность систем

Нелинейность элементов и связей между ними существенно определяет сложность, непредсказуемость поведения системы.

Линейные системы – это большая редкость, но во многих случаях нелинейностью можно пренебречь и рассматривать систему как линейную

Устойчивость систем

Устойчивость – это свойство системы реагировать на изменения во внешней среде, сохраняя одно и то же поведение на протяжении определенного периода времени.

Классическое определение устойчивости добавляет к сформулированным условиям неизменности при этом структуры и параметров системы (устойчивость по Ляпунову).

Структурная устойчивость связана с выявлением качественных изменений в траекториях движения (поведении) системы при изменениях ее структуры



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Неопределенность

Типы неопределенностей:

- неопределенность целей (нечеткость формулировки, многозначность);
- неопределенность наших знаний об окружающей среде;
- неопределенность параметров, а возможно, и структуры системы;
- неопределенность действий партнера или противника

Информация – совокупность знаний о системе, внешней среде, целях, поведении и т.д.

Уточнение информации позволяет устранить или, по крайней мере, снизить неопределенность.



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Модели и моделирование

Моделью называется некий объект-заместитель, который в определенных условиях может заменить объект-оригинал, воспроизводя интересующие нас свойства и характеристики оригинала, причем имеет существенные преимущества удобства (наглядность, обозримость, легкость оперирования и др.).

Модель – не просто отображение системы, а *отображение целевое*. Для разных целей требуются разные модели.

Применительно к исследованию систем модели и моделирование стали практически единственным средством познания.

Имитация. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование есть процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых некоторым критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование или развитие данной системы.

Имитационное моделирование помогает ответить на вопросы «что будет, если...»



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Выбор (принятие) решений

Выбор решений является действием, придающим всей деятельности целенаправленность. Именно выбор решений реализует подчиненность всей деятельности по изучению систем определенной цели или совокупности целей.

Выбор (принятие) решения – это действие над множеством альтернатив, в результате которого получается подмножество выбранных альтернатив. Выбор осуществляется на основе *критерия (критериев) предпочтения.*



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Множественность задач выбора определяется следующими особенностями:

- ◆ **множество альтернатив** может быть конечным, счетным или континуальным;
- ◆ **оценка альтернативы** может осуществляться по одному или нескольким критериям;
- ◆ **режим выбора** может быть однократным или повторяющимся (обучение);
- ◆ **последствия выбора** могут быть точно известны (**выбор в условиях определенности**), иметь вероятностный характер (**выбор в условиях риска**), или иметь неоднозначный исход (**выбор в условиях неопределенности**);
- ◆ **Ответственность за выбор** – индивидуальная или многосторонняя (групповой выбор);
- ◆ **Степень согласованности целей**
 - кооперативный выбор
 - выбор в конфликтной ситуации



1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Системный подход. Системный анализ. Системные исследования

Системный подход – это методология специального научного познания, в основе которого лежит исследование объектов и проблем как систем

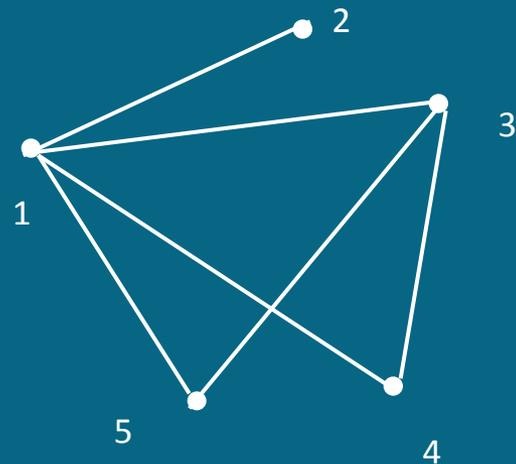
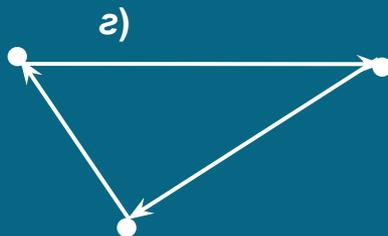
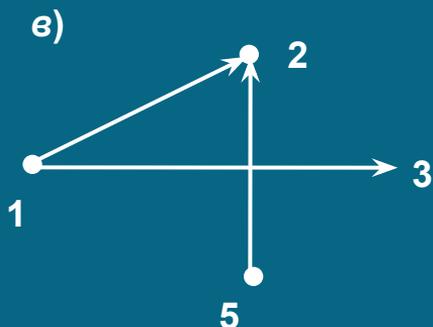
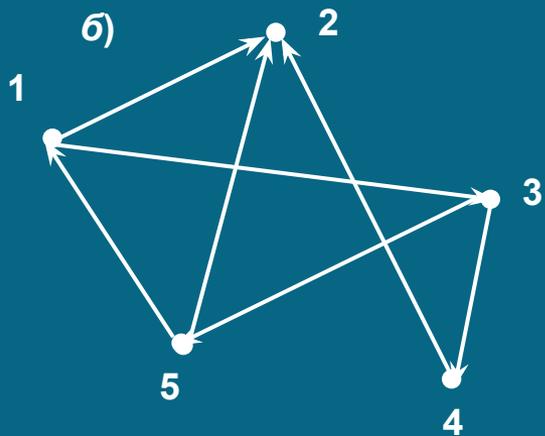
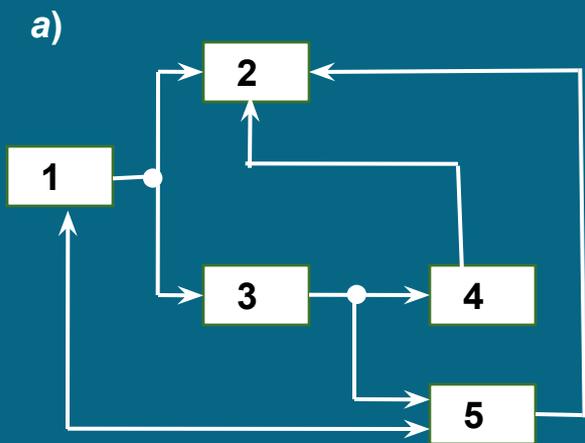
Системный анализ – это методический аппарат системных исследований, совокупность методов, методик, процедур и правил, применяемых в системных исследованиях

Системный исследования – это исследования, основанные на системном подходе и использующие средства системного анализа



2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Формализация структуры на основе теории графов



Структура системы в виде ориентированного графа

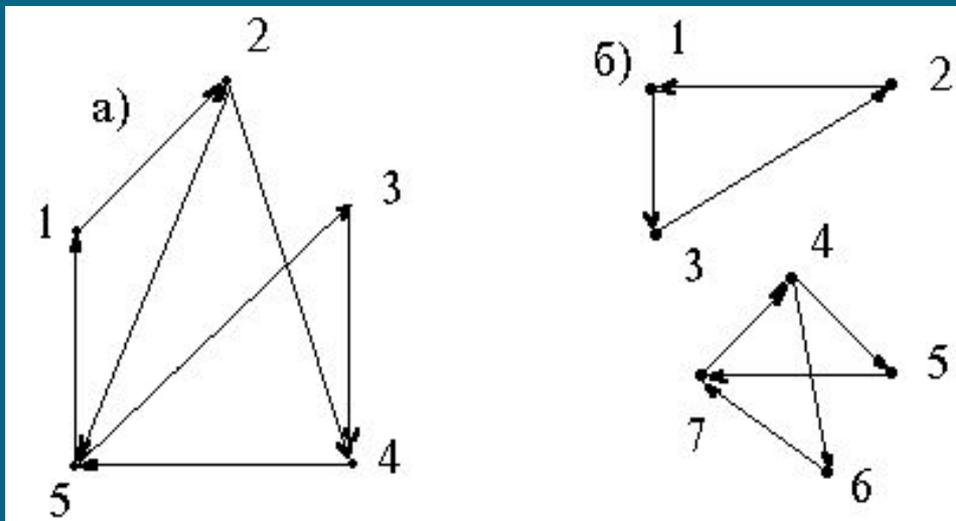
Неориентированный граф

а - структура системы; б - ее граф; в - частичный граф; г - подграф

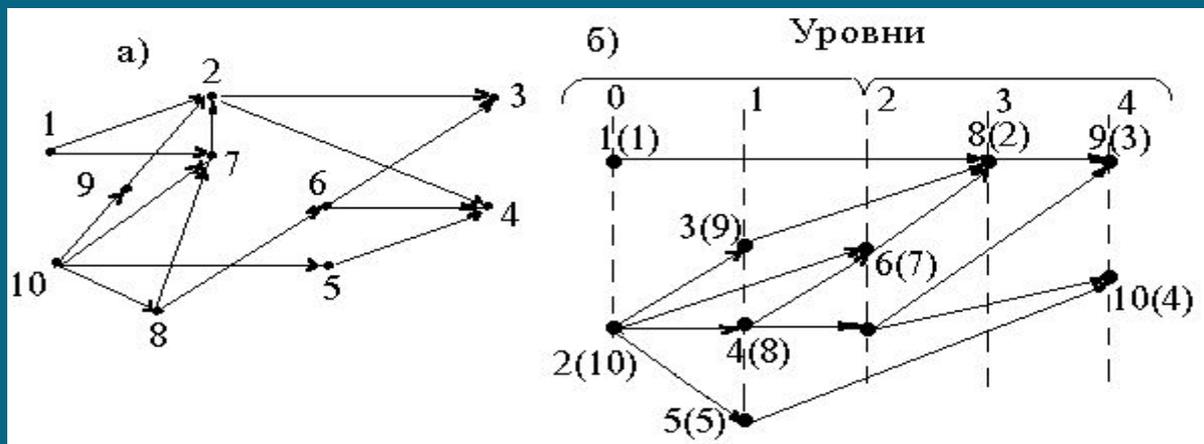


2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Формализация структуры на основе теории графов



сильно связный граф (а) и несвязный граф, распадающийся на сильно связные подграфы (б)



а – неупорядоченный граф;
б – упорядоченный



2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Связность структуры

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \geq n - 1, i \neq j$$

Структурная избыточность

$$R = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right] \frac{1}{n-1} - 1$$

Структурная компактность

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}, i \neq j$$

Степень централизации в структуре

$$\delta = (n - 1) \frac{2Z_{\max} - n}{Z_{\max} (n - 2)}$$

Диаметр структуры

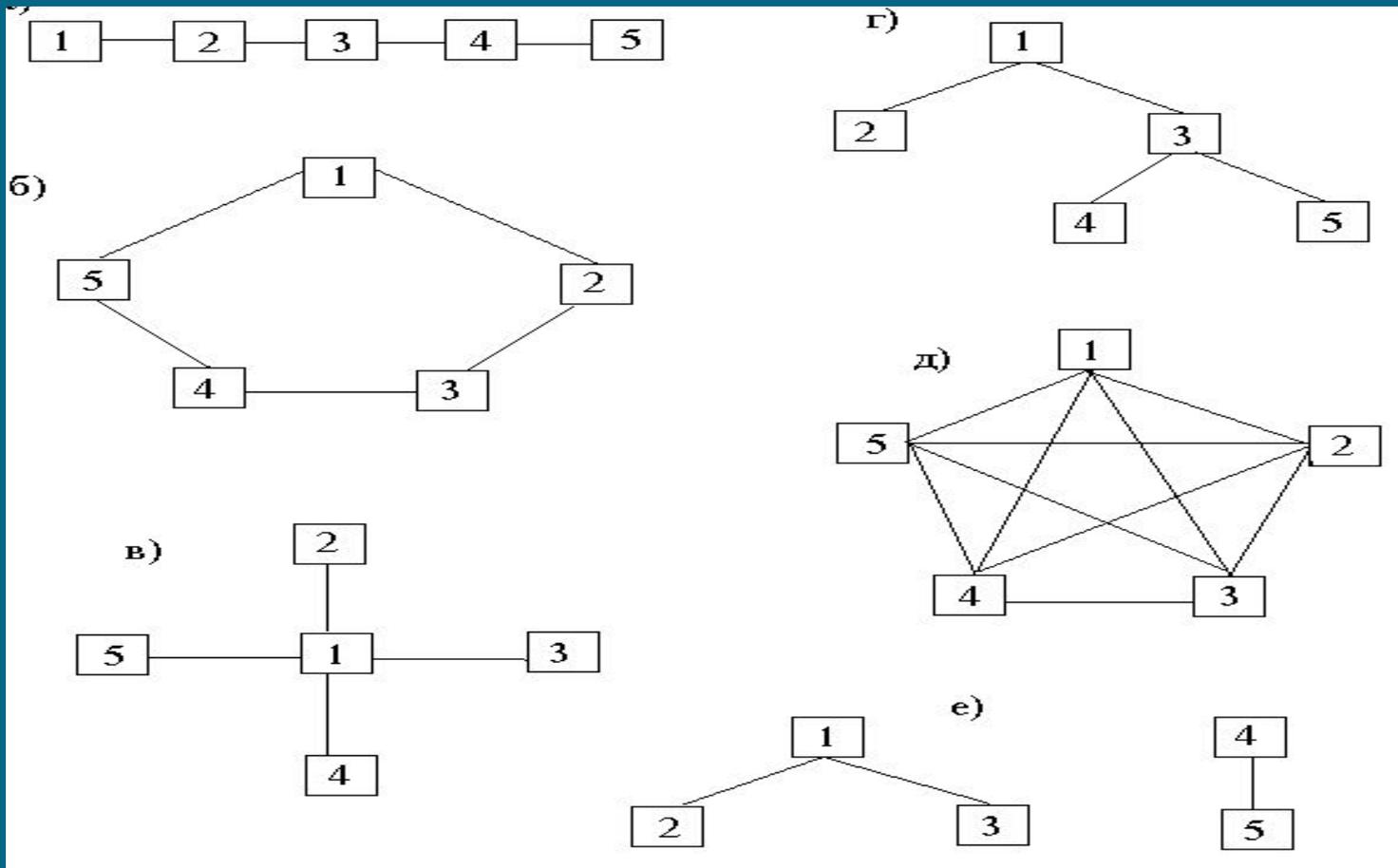
$$d = \max_{ij} d_{ij}$$

$$Z_i = \frac{Q}{2} \left(\sum_{j=1}^n d_{ij} \right)^{-1}, i = \overline{1, n}; i \neq j$$



2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Основные виды структур



а – последовательная ("цепочечная"), б – кольцевая, в – радиальная, г – древовидная, д – полный граф, е – несвязная



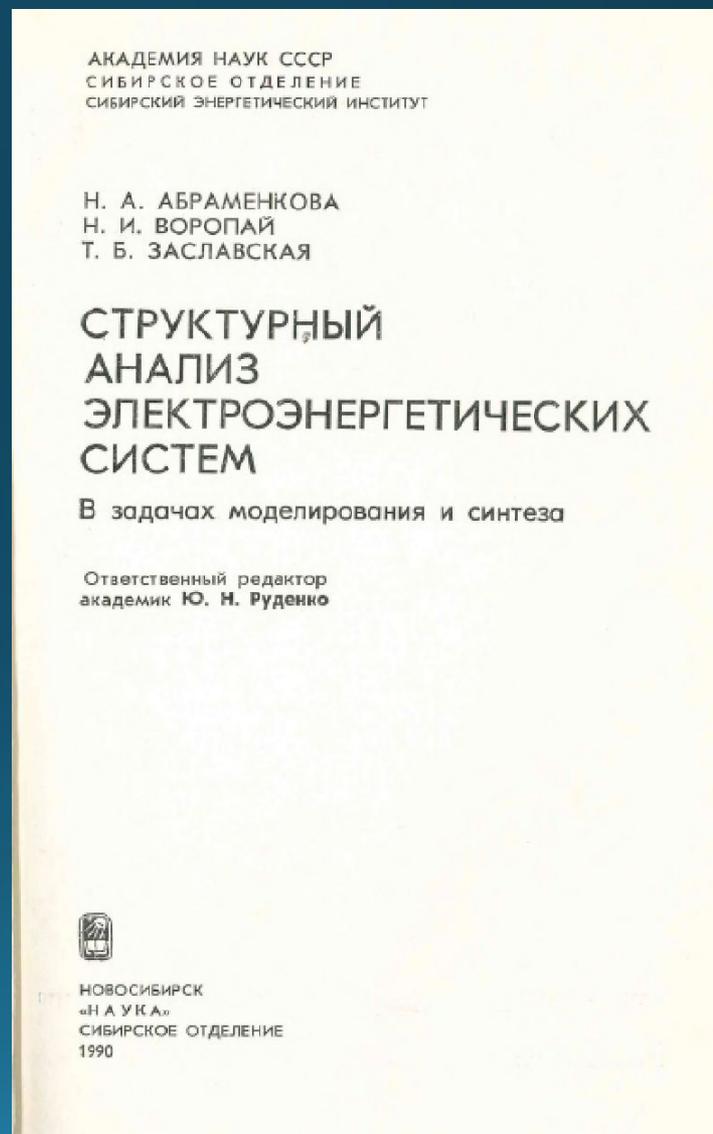
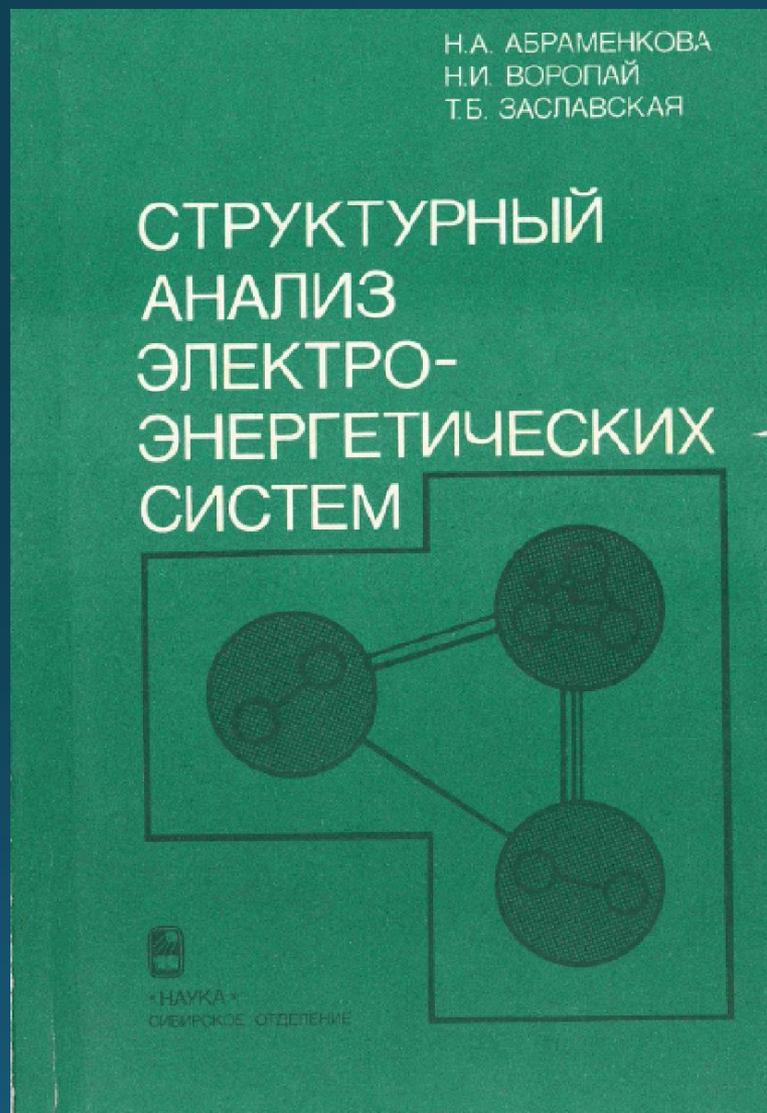
2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Показатели различных структур

Вид структуры (по рис. 2.6)	Показатель			
	R	Q	d	δ
<i>a</i>	0	1,0	4	0,7
<i>б</i>	0,25	0,5	2	0
<i>в</i>	0	0,6	2	1,0
<i>г</i>	0	0,7	3	0,7
<i>д</i>	1,5	0	1	0
<i>е</i>	-0,25	-	-	-



2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

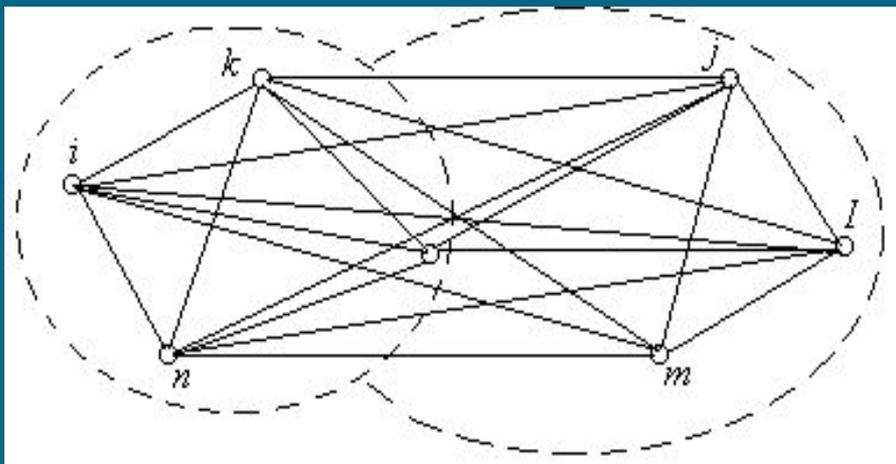




2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Электроэнергетическая система

а



б

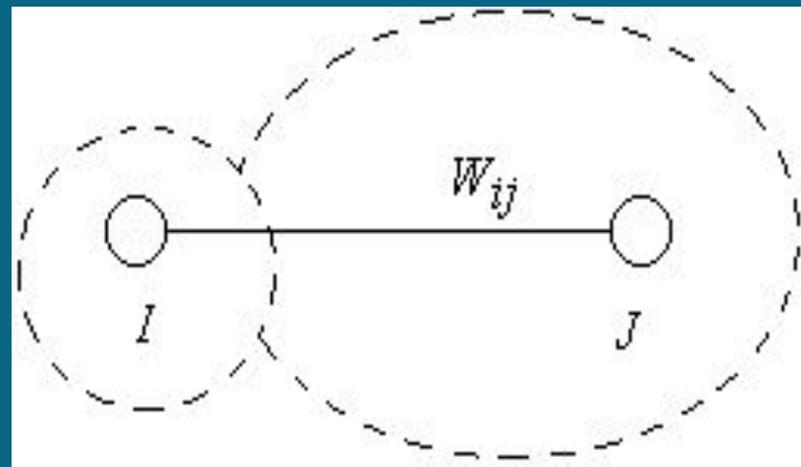


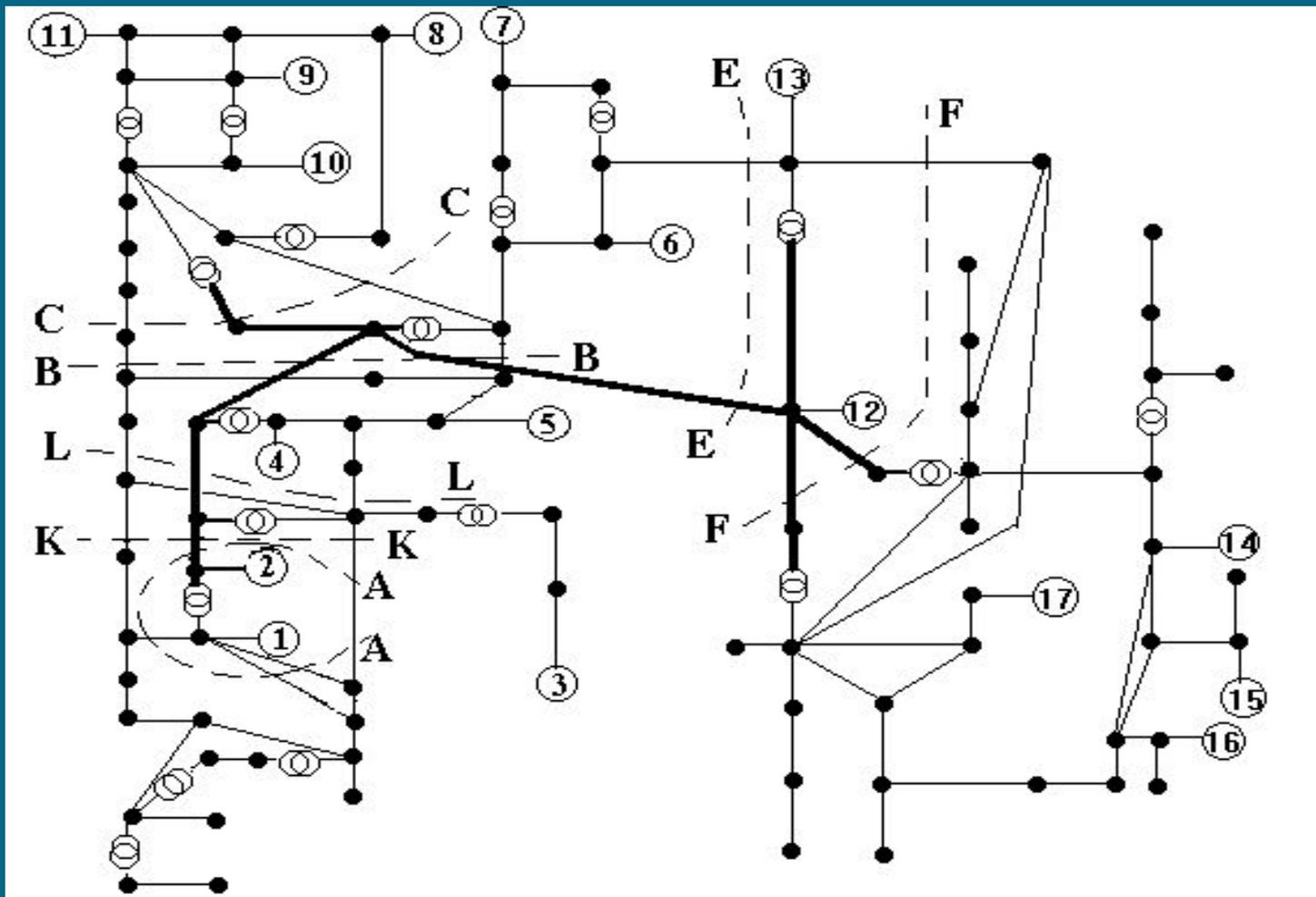
Схема ЭЭС из двух подсистем (а) и ее структурное представление (б)

$$W_{ik} \gg W_{ij}; \quad W_{jl} \gg W_{jk}$$



2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Пример электроэнергетической системы

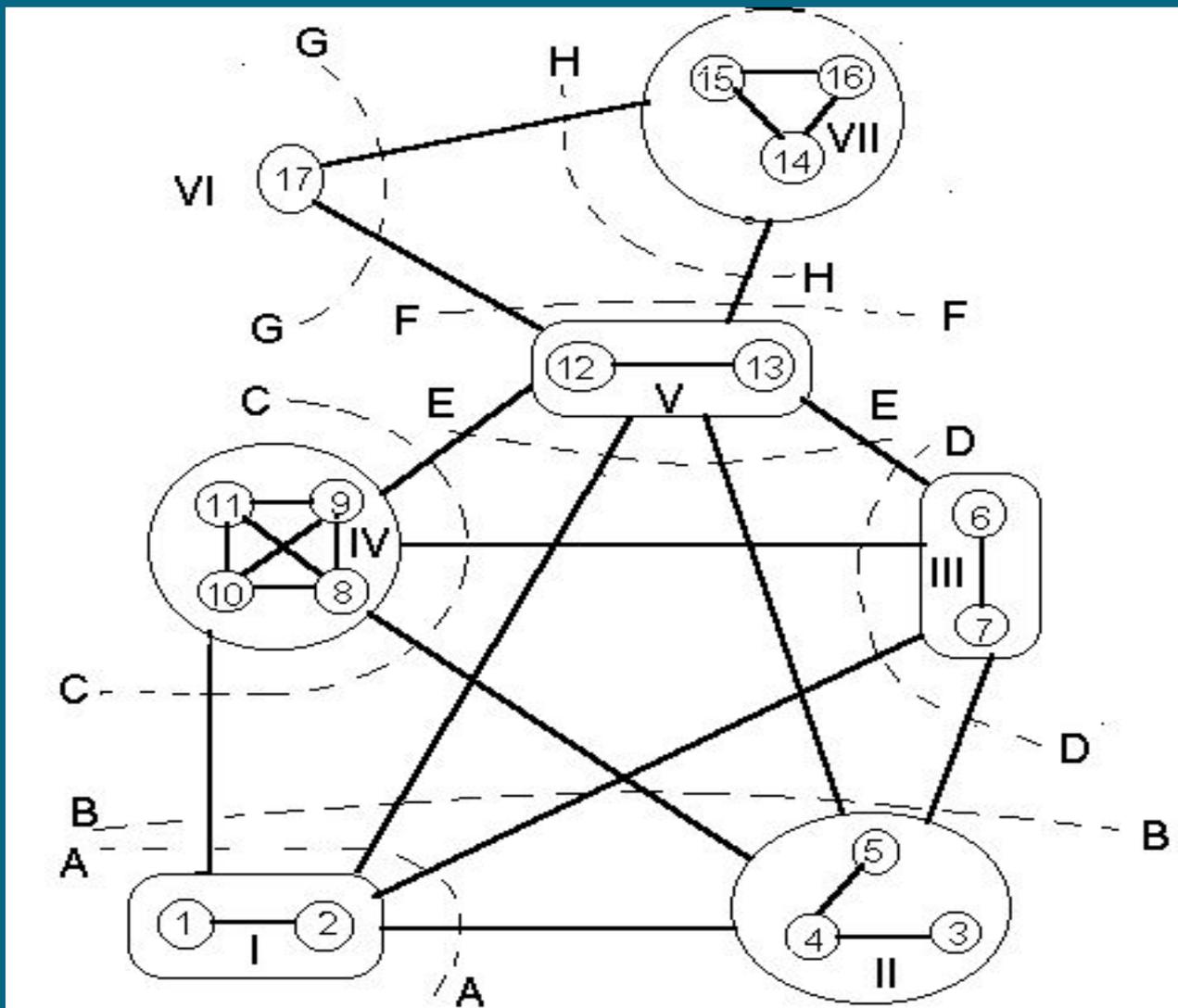


1 – генераторный узел; 2 – сетевой узел; 3 – линия 500 кВ; 4 – линия 220 или 110 кВ



2. СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ

Структурная модель ЭЭС



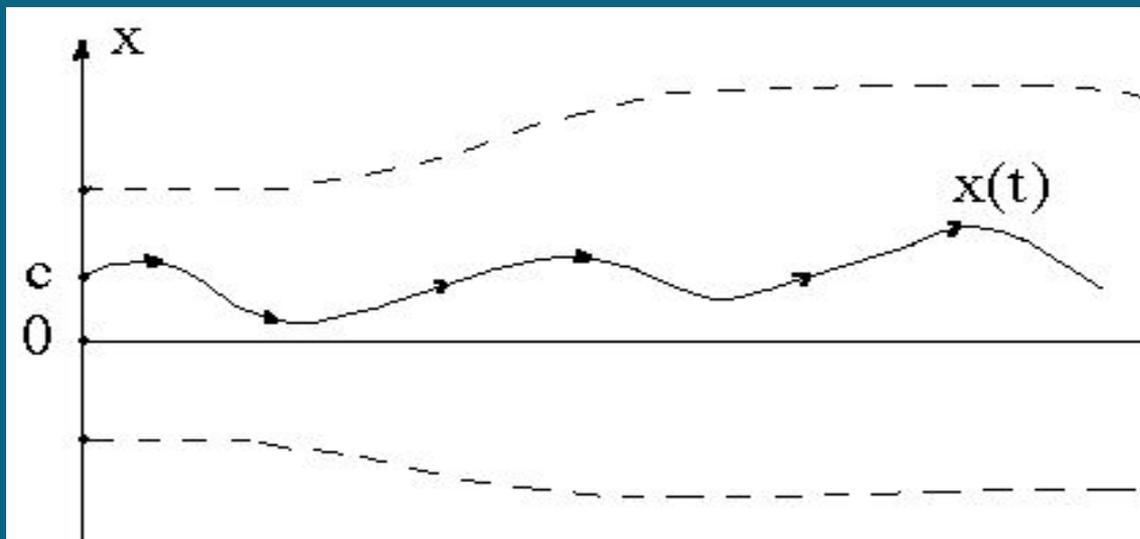


3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

Устойчивость по Ляпунову

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t), \quad x(0) = c$$

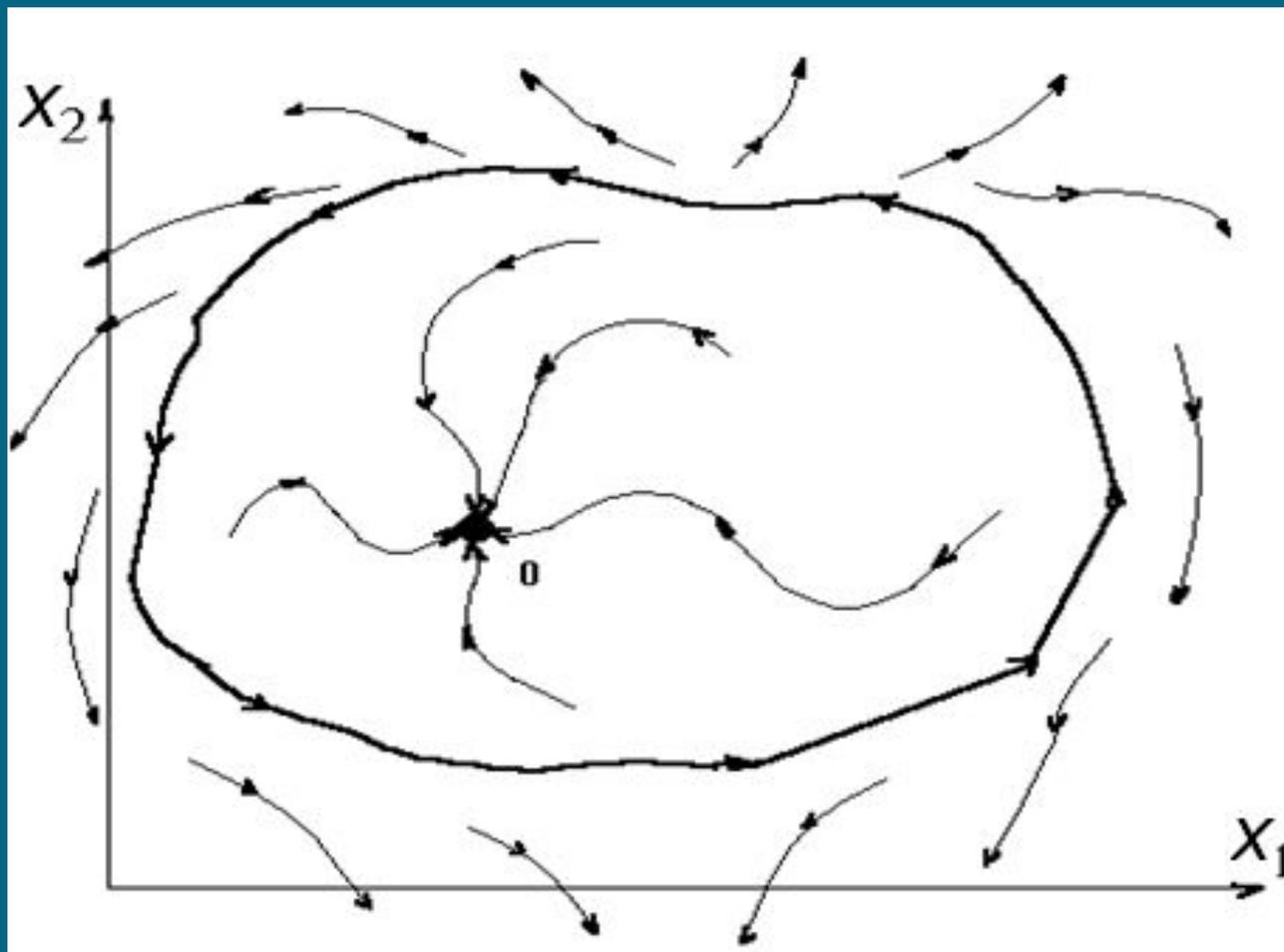
Система устойчива, если ее траектории не выходят за пределы, обозначенные штриховыми линиями





3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

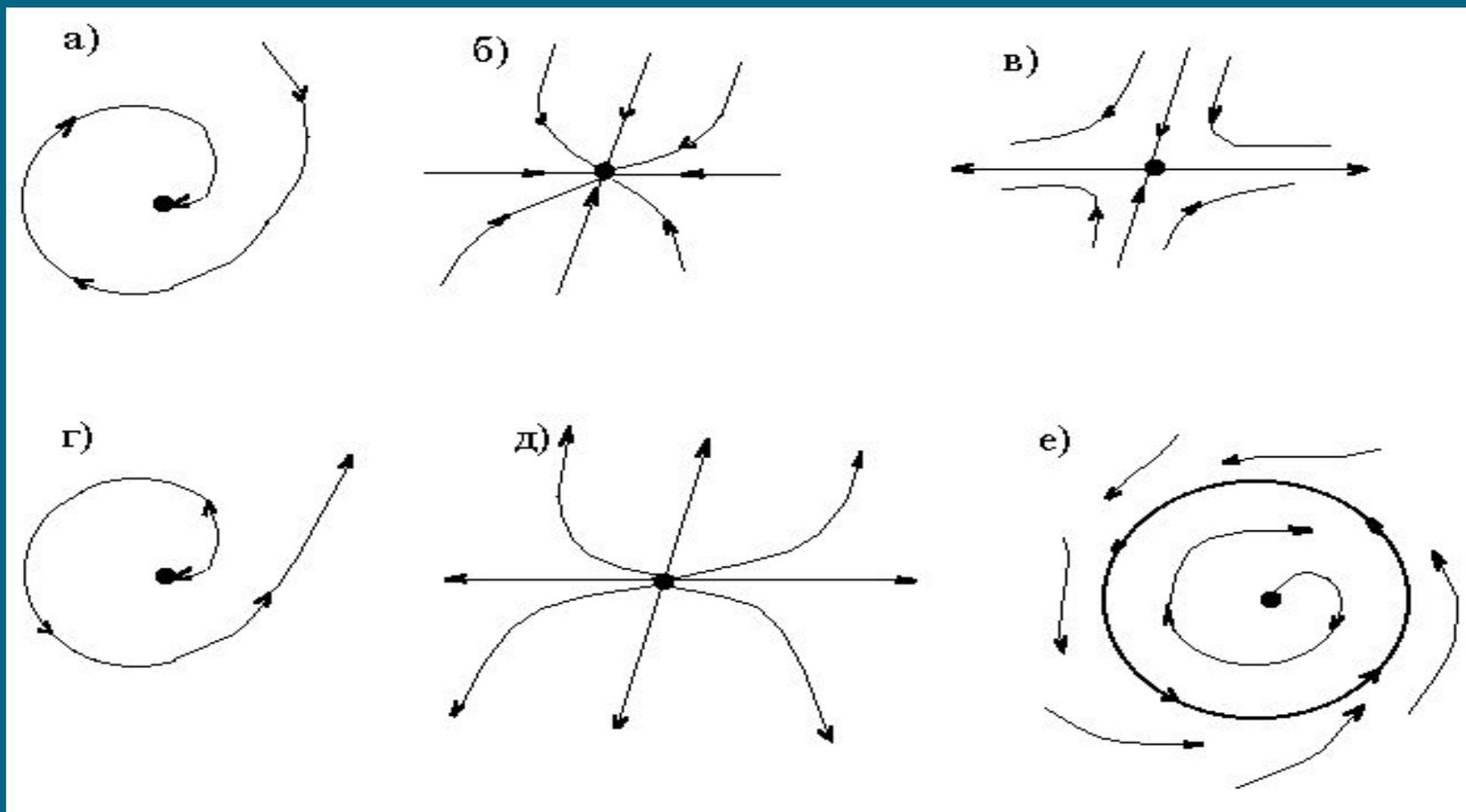
Область притяжения динамической системы в фазовом пространстве. Фазовый портрет траекторий





3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

Основные типы положений равновесия

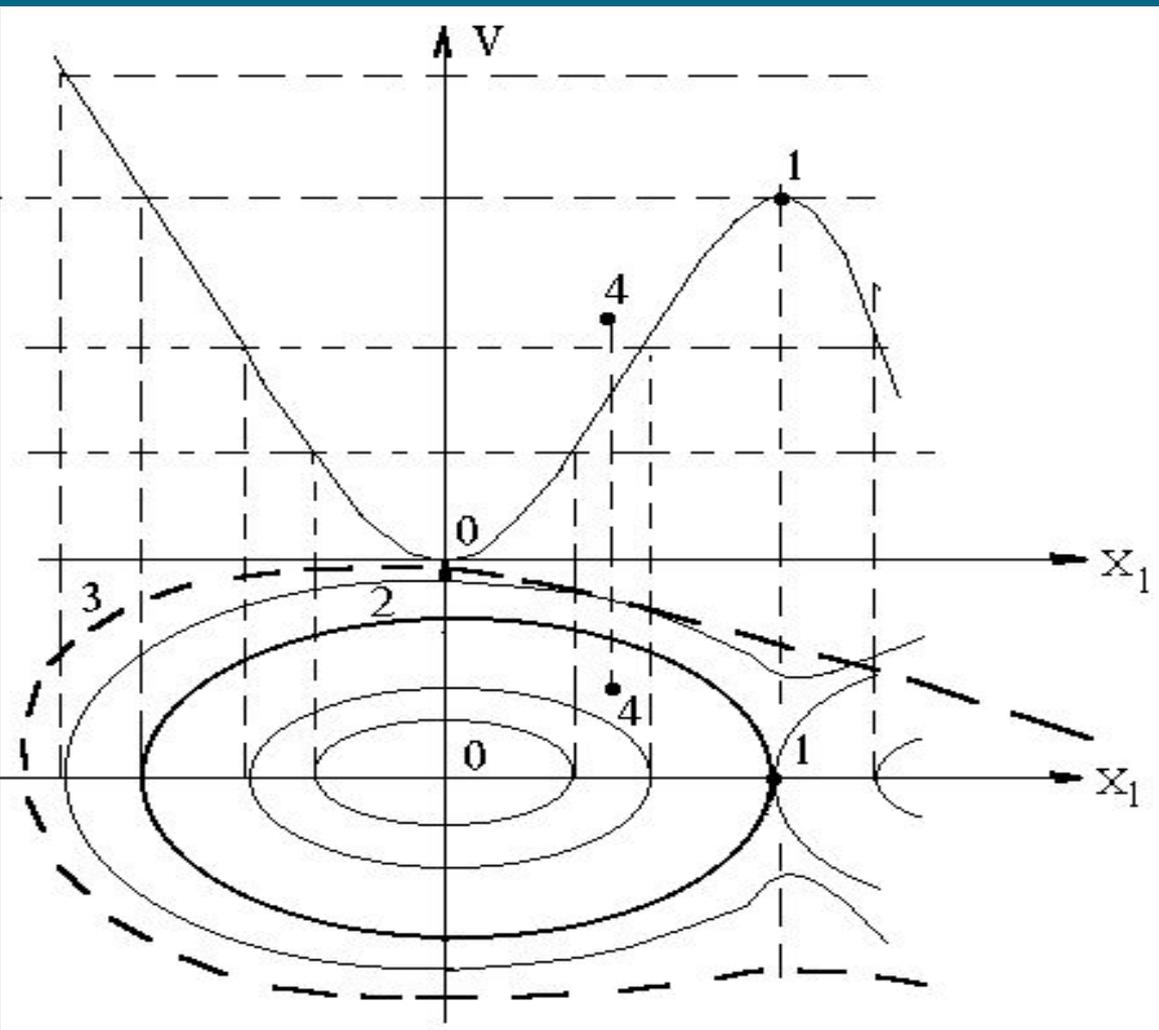


Устойчивые: фокус (а), узел (б), цикл (е); неустойчивые: фокус (г), седло (д), узел (в)



3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

Метод функции Ляпунова



Штриховая линия внизу – граница реальной области устойчивости.

Эллипсы внизу – оценки области устойчивости с помощью функции Ляпунова $V(x_1, x_2)$

$$V = K + \Pi$$

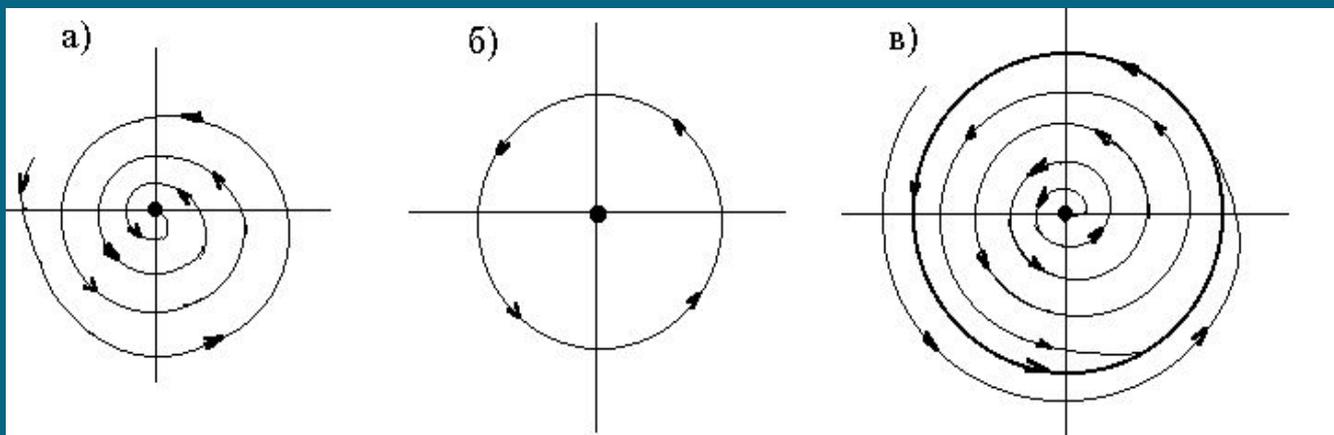
K – кинетическая энергия

Π – потенциальная энергия



3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

Структурная устойчивость. Бифуркации. Катастрофы



$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, a)$$

Трансформация области притяжения при плавном изменении параметра a

Бифуркация (раздвоение) – качественное изменение траекторий в некоторой точке при изменении параметров системы

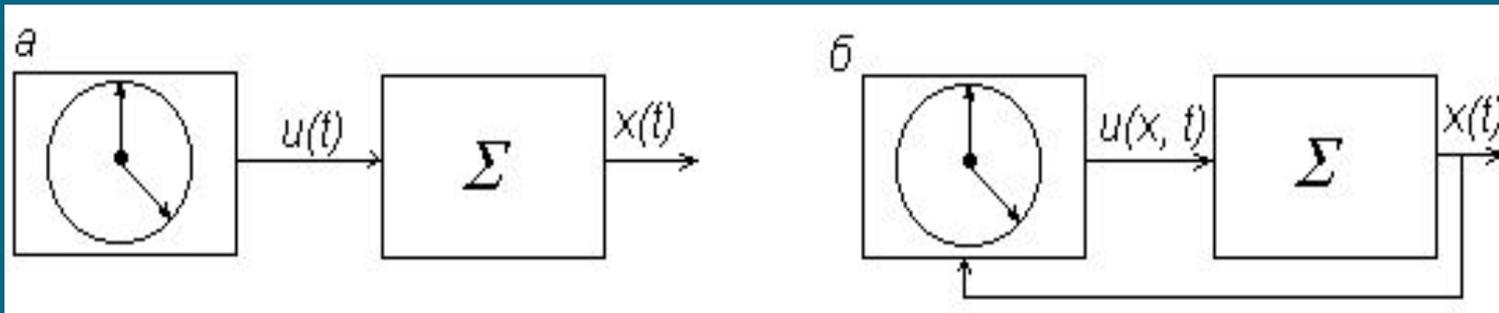
Катастрофа – скачкообразное изменение положения равновесия при плавном изменении параметров системы



3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

Управление ($u(t)$)

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t)), \quad x(0) = c$$

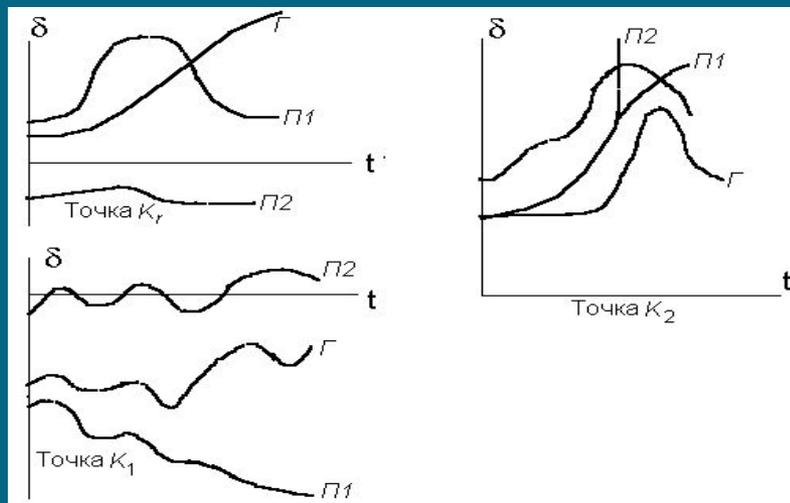
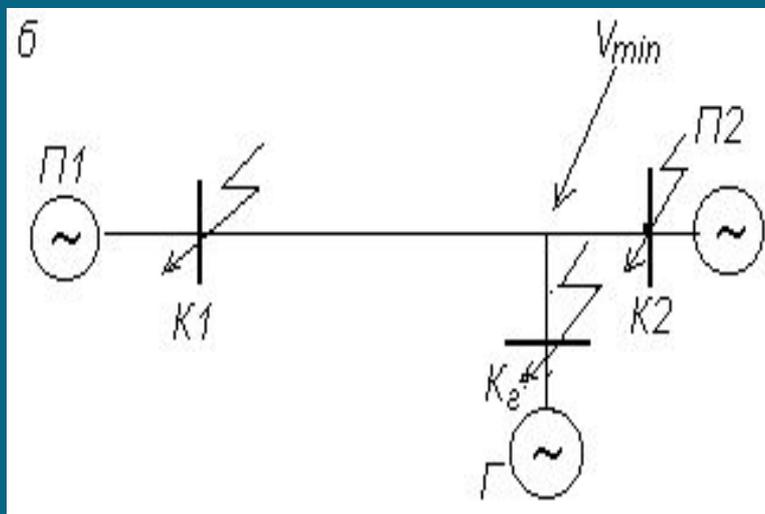
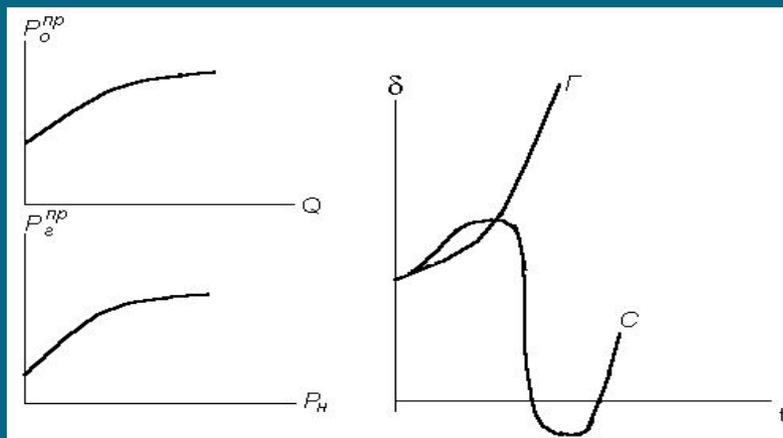
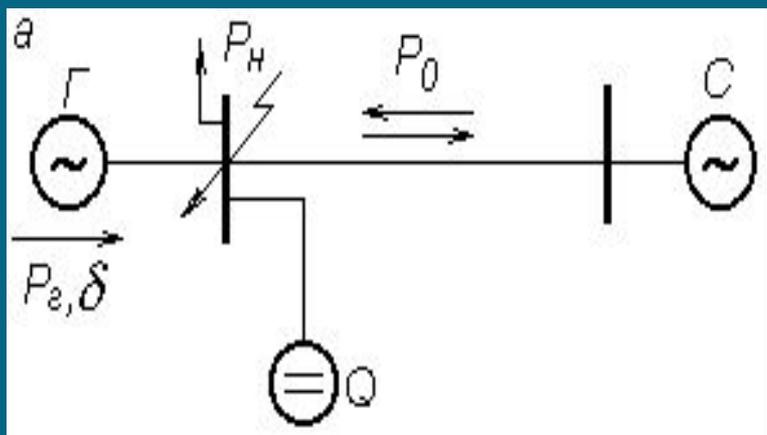


Управление типа открытого (а) и замкнутого (б) контуров



3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

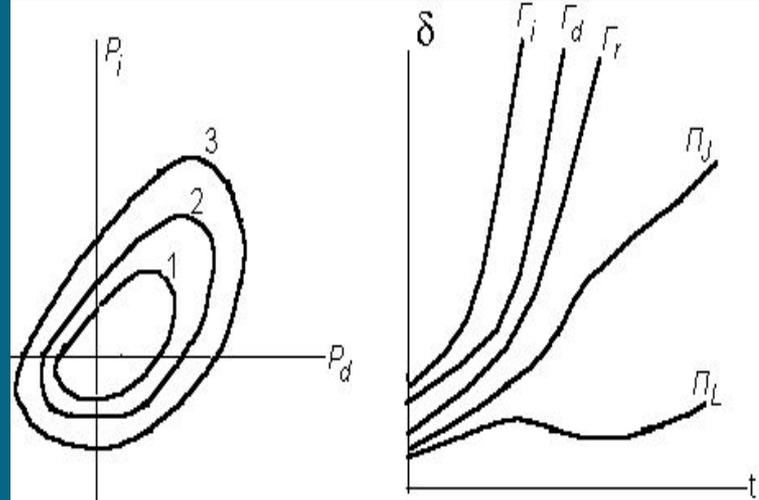
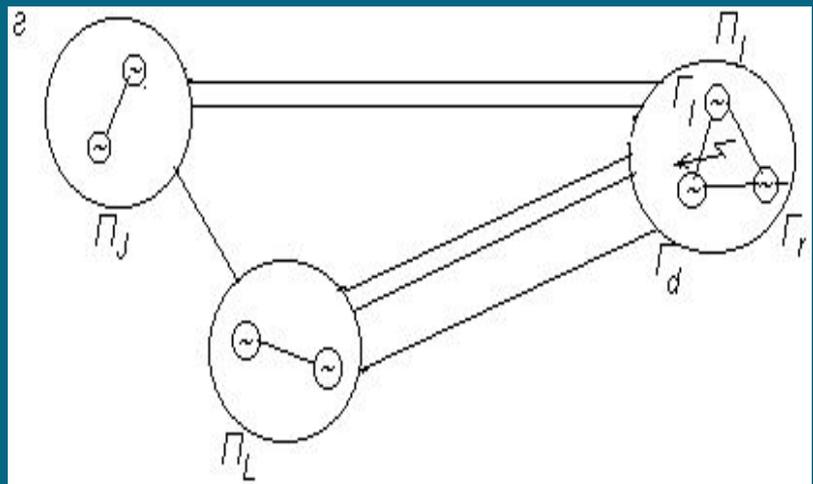
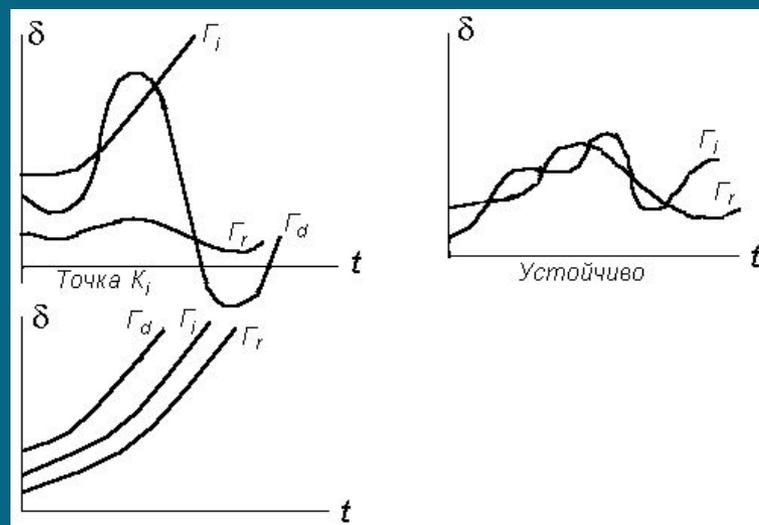
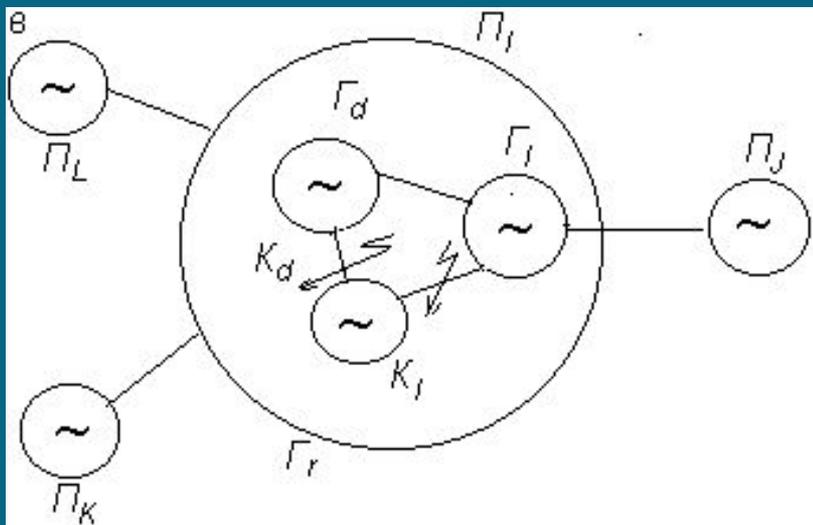
Поведение электроэнергетических систем различной структуры (1)





3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

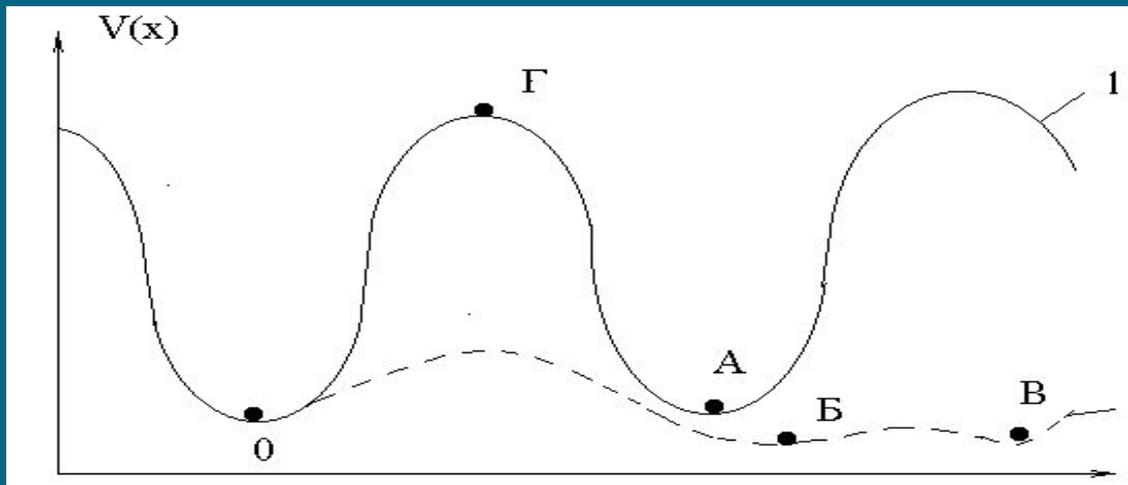
Поведение электроэнергетических систем различной структуры (2)



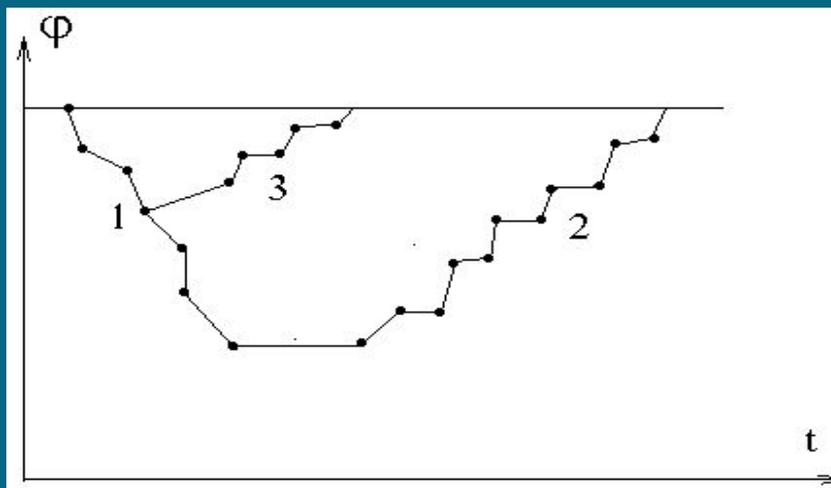


3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

Распространение возмущений. Живучесть систем



Изменение конфигурации потенциальной энергии при увеличении загрузки системы – «ослабление» системы



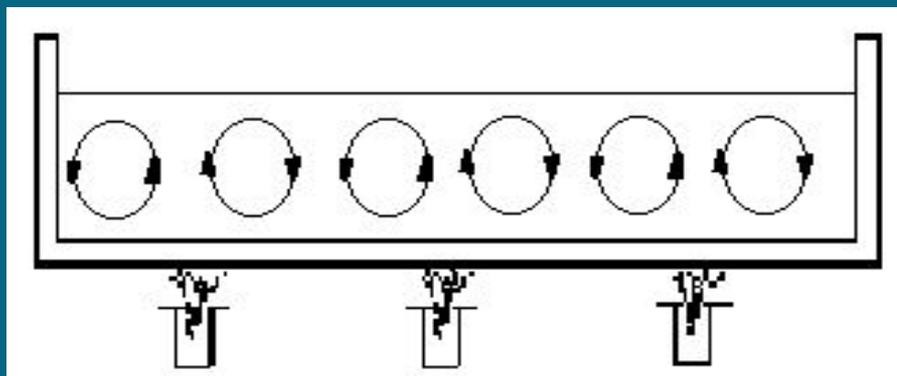
Каскадное развитие аварии в ЭЭС и восстановление системы



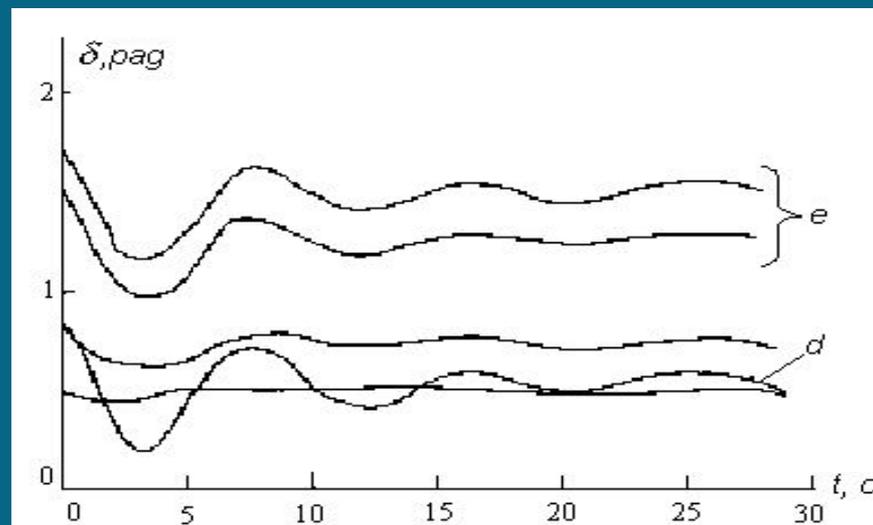
3. ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМ

Самоорганизация в системах. Синергетика

Синергетика связана с явлениями при совместном действии нескольких факторов, в то время как каждый фактор в отдельности к таким явлениям не приводит. Синергетика связана с образованием устойчивых структур



Ячейки Бенара с локальными горелками



e – траектории вблизи возмущения
d – траектории вдали от возмущения

**Слабодемпфированные низкочастотные колебания в ЭЭС,
охватывающие всю систему**



4. СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИЯ

Основные характеристики информации

- Ценность информации
- Старение информации
- Полнота, надежность и достоверность информации
- Избыточность информации
- Скорость передачи и обработки информации
- Периодичность или частота передачи информации
- Затраты на получение, передачу и обработку информации
- Неопределенность информации



4. СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИЯ

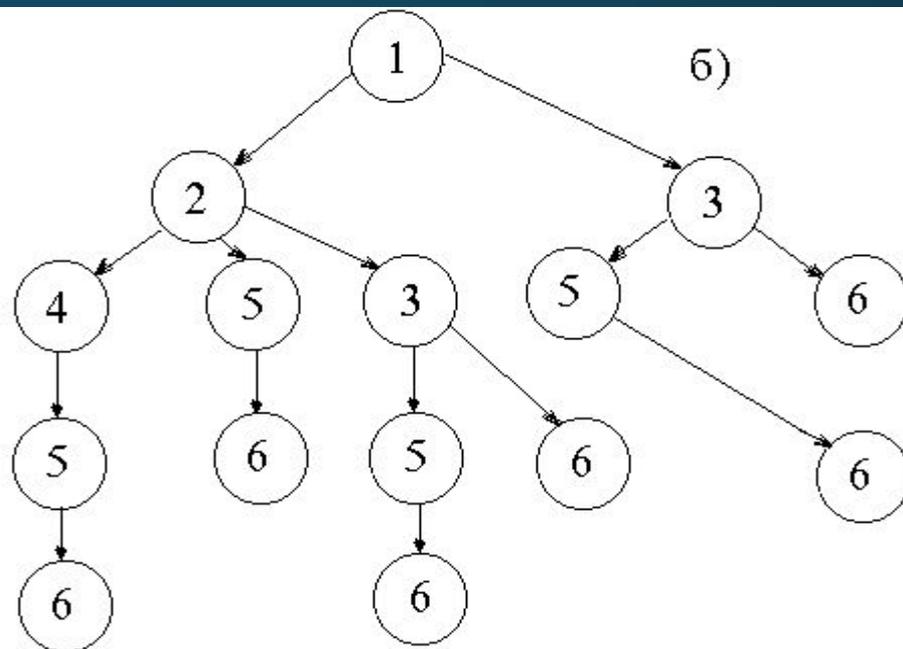
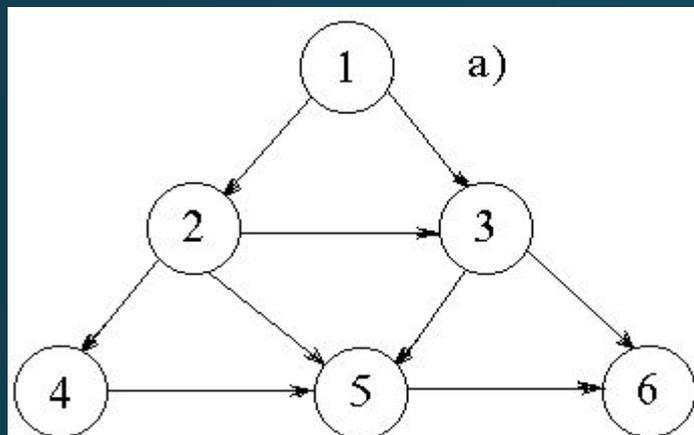
Обработка и представление информации

- Агрегирование информации
- Хранение и поиск данных
- Базы данных. Реляционные базы данных
 - Представление знаний. Правило продукции – «если УСЛОВИЕ, то ДЕЙСТВИЕ»
- Базы знаний



4. СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИЯ

Соответствие сетевой (а) и древовидной (б) структур данных



Любые зависимости, имеющие вид дерева, можно представить в виде обычных двумерных таблиц. Двумерную таблицу такого типа называют отношением, а базу данных, построенную на основе таких таблиц или отношений, – *реляционной базой данных*.



4. СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИЯ

Пример правил и метаправил

Правило 1: «входит (выключатель, подстанция)» есть ИСТИНА ЕСЛИ
«установлен (выключатель подстанция)» есть ИСТИНА

Правило 2: «входит (разъединитель, подстанция)» есть ИСТИНА ЕСЛИ
«установлен (разъединитель, подстанция)» есть ИСТИНА

Метаправило: если «правило 1» есть ИСТИНА и «правило 2» есть
ИСТИНА, ТО «входят (выключатель, разъединитель,
подстанция)» есть ИСТИНА

Пример правила продукции

ЕСЛИ «векторы напряжений на клеммах
разомкнутого выключателя совпадают» ТО
«включить выключатель»



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Системы линейных алгебраических уравнений

$$AX=B$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix}$$



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Метод Гаусса. Исходная система

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1;$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2;$$

.....

$$a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n = b_n.$$

Будем считать, что коэффициент a_{11} , который называют ведущим элементом первого шага, отличен от нуля. (В случае $a_{11} = 0$ поменяем местами уравнения с номерами 1 и i , где $a_{i1} \neq 0$. Поскольку система предполагается невырожденной, такой номер i заведомо найдется).

Составим соотношения

$$m_{21} = -\frac{a_{21}}{a_{11}}; m_{31} = -\frac{a_{31}}{a_{11}}; \dots; m_{n1} = -\frac{a_{n1}}{a_{11}}$$

Прибавим к i -му уравнению системы ($i = 2, 3, \dots, n$), первое уравнение, умноженное на m_{i1} . Прделав это, мы исключим неизвестное x_1 из всех уравнений, начиная со второго.



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Метод Гаусса. Результат первого шага

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1;$$

$$a_{22}^{(1)}x_2 + a_{23}^{(1)}x_3 + \dots + a_{2n}^{(1)}x_n = b_2^{(1)};$$

.....

$$a_{n2}^{(1)}x_2 + a_{n3}^{(1)}x_3 + \dots + a_{nn}^{(1)}x_n = b_n^{(1)}.$$

Результат прямого хода

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1;$$

$$a_{22}^{(1)}x_2 + a_{23}^{(1)}x_3 + \dots + a_{2n}^{(1)}x_n = b_2^{(1)};$$

$$a_{33}^{(2)}x_3 + \dots + a_{3n}^{(2)}x_n = b_3^{(2)};$$

.....

$$a_{nn}^{(n-1)}x_n = b_n^{(n-1)}.$$

Обратный ход – подстановка «снизу-вверх»

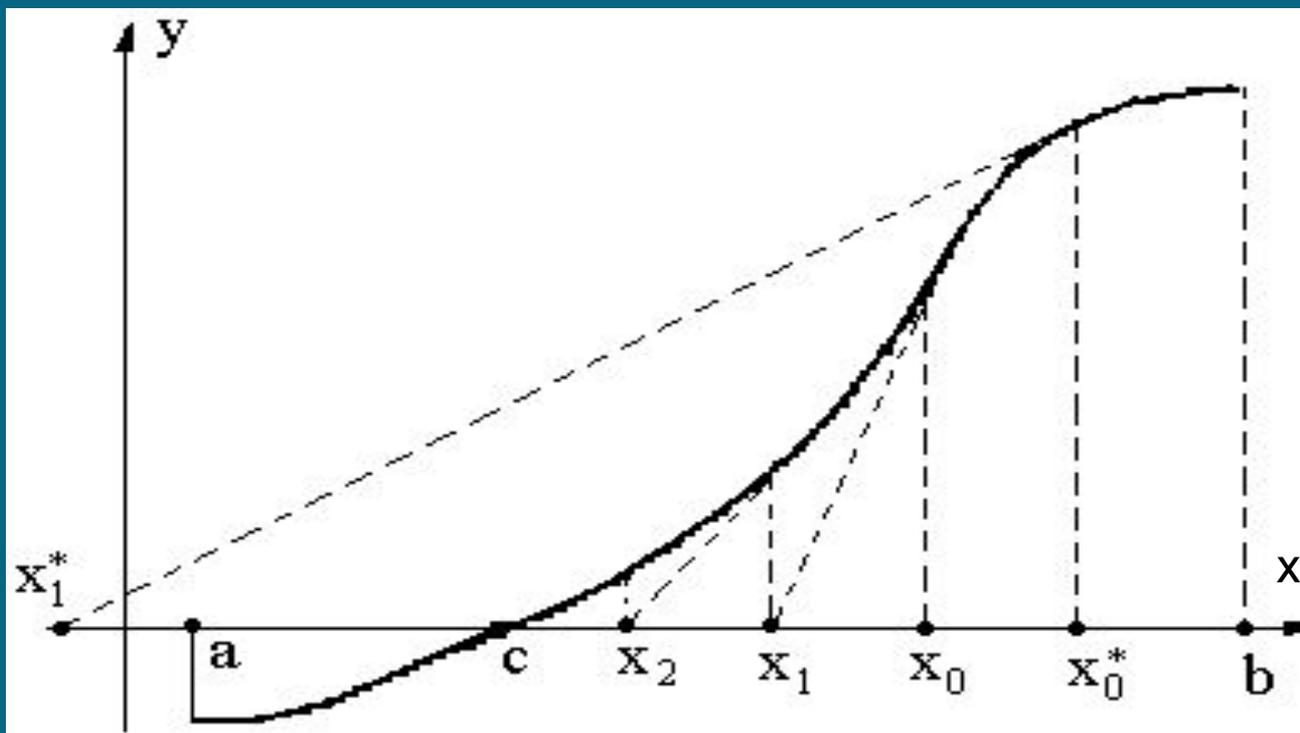


5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Системы нелинейных алгебраических уравнений

$$W(x)=0$$

Метод касательных (метод Ньютона) для одномерного случая



$$y = f(x_0) + f'(x - x_0) = 0$$
$$x_{k+1} = x_k - f(x_k)/f'(x_k - x_0), k = 0, 1, 2, \dots$$
$$f'(x) = df(x)/dx$$



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

В случае системы нелинейных алгебраических уравнений речь идет о касательной плоскости в n -мерном пространстве, которая представляется матрицей частных производных порядка $(n \times n)$ вида

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

называемой матрицей Якоби или якобианом. Обобщение рекуррентной формулы метода Ньютона на многомерный случай будет иметь вид

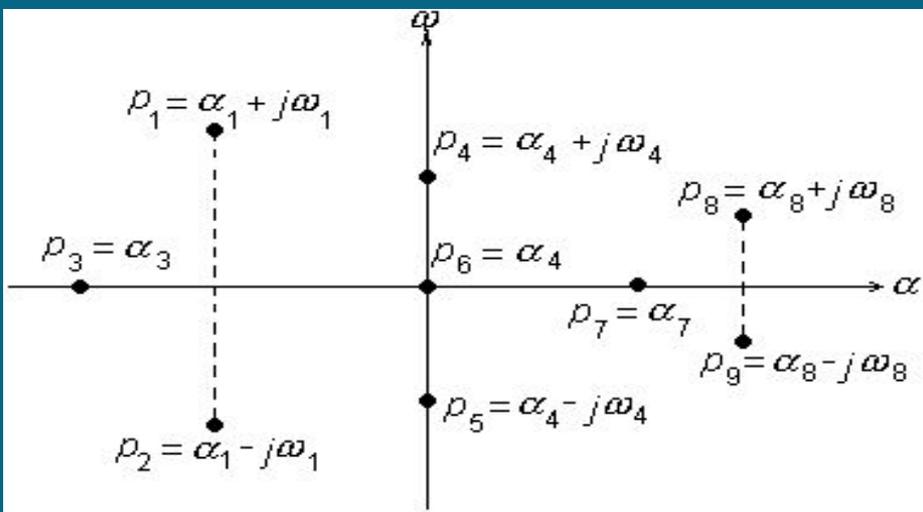
$$X_{n+1} = X_n - F(X_n) \cdot J^{-1}(X_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Системы линейных дифференциальных уравнений

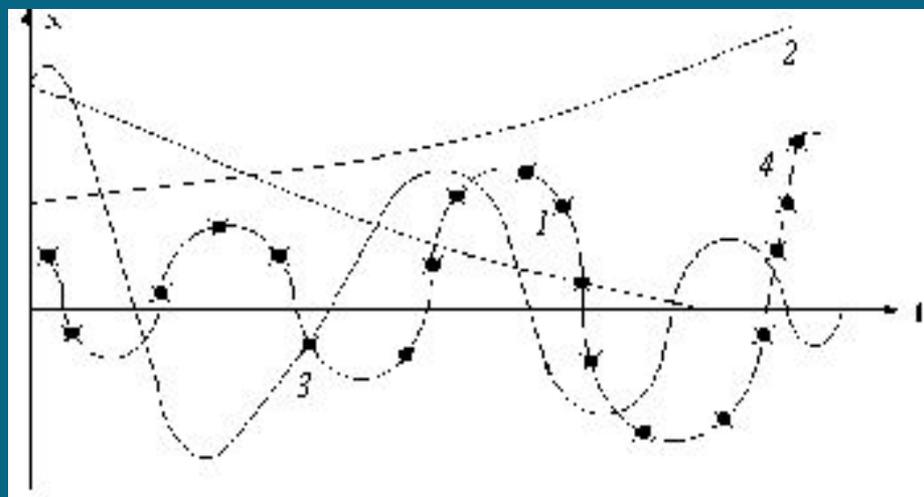
$$\frac{dx}{dt} = Bx, \quad D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_{n-1} p + a_n$$



Система устойчива

Система неустойчива

Расположение корней
характеристического уравнения
 $D(p) = 0$



Система

- 1 – аperiodически устойчива
- 2 – аperiodически неустойчива
- 3 – колебательно устойчива
- 4 – колебательно неустойчива



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, y) \\ 0 &= \varphi(x, y) \end{aligned} \right\}$$

Метод Эйлера

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \rightarrow \frac{\Delta x}{\Delta t} = f(x)$$

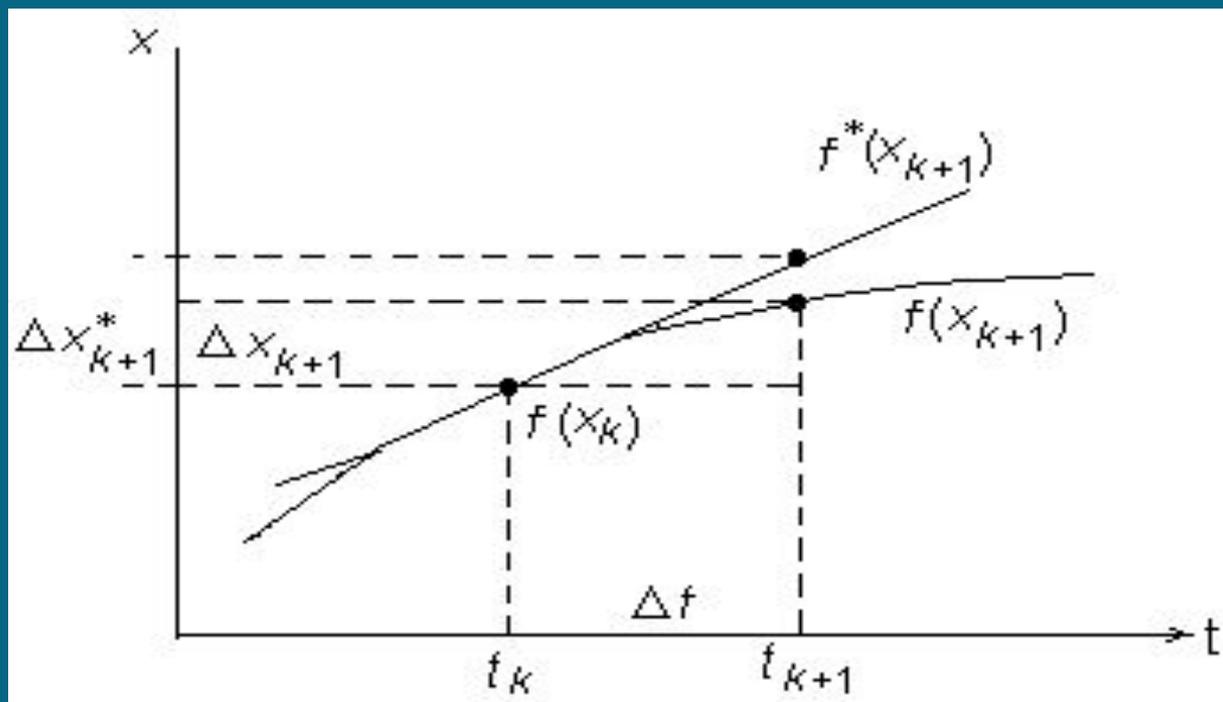
Явная формула

$$x_{k+1}^* = x_k + f(x_k)\Delta t$$

Неявная формула

$$x_{k+1}^* = x_k + f(x_{k+1}^*)\Delta t$$

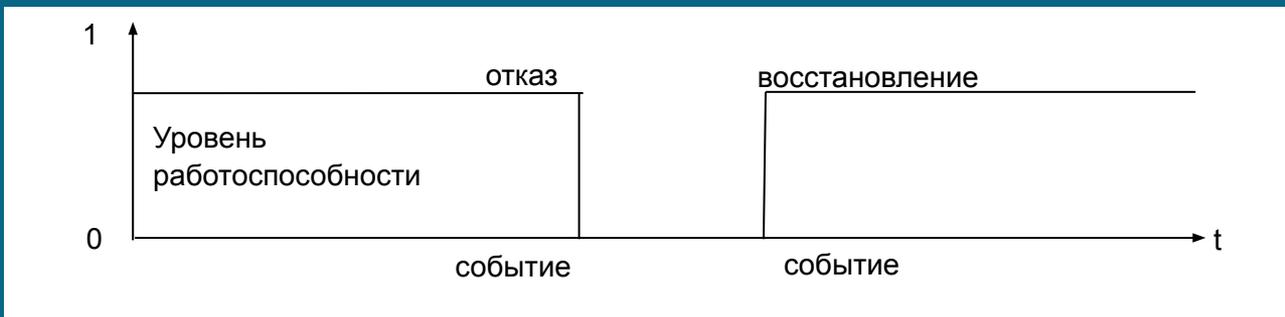
Численное интегрирование
дифференциального уравнения



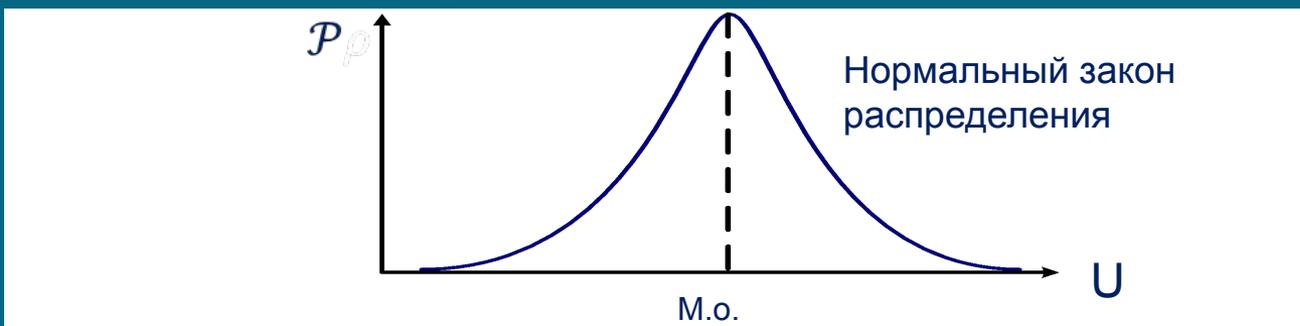


5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Случайные события



Случайные состояния. Случайные величины

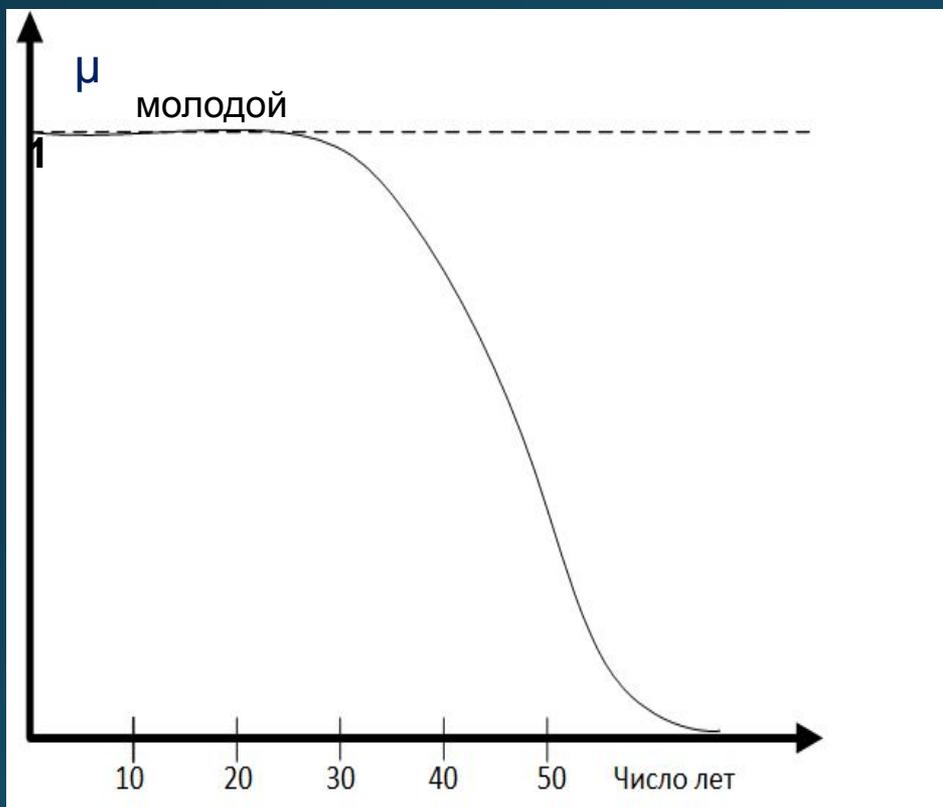


Случайные процессы



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Нечеткое множество. Функция принадлежности.
Операции над нечеткими множествами



Нечеткие множества A и B – примеры операций

Равенство

$$(A = B) = \forall x \in X: \mu_A(x) = \mu_B(x)$$

Пересечение

$$(A \cap B) = \forall x \in X: \mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Объединение

$$(A \cup B) = \forall x \in X: \mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Нечеткое отношение на множестве X – нечеткое подмножество декартова произведения $X \cdot X$ с функцией принадлежности

$$\mu_R: X \cdot X \rightarrow [0, 1]$$

xRy , $\mu_R(x, y)$, R – отношение

$$\mu_1(x) = \bigvee_y \mu(x, y) = \max_y \mu(x, y)$$

$$\mu_2(x) = \bigwedge_y \mu(x, y) = \min_y \mu(x, y)$$

Операции над нечеткими отношениями – пример:
Пересечение двух отношений R и L

$$\mu_{R \cap L}(x, y) = \mu_R(x, y) \cap \mu_L(x, y) = \min(\mu_R(x, y), \mu_L(x, y))$$



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Логика высказываний

«выключатель включен – ИСТИНА» \wedge «ток ненулевой – ЛОЖЬ» \rightarrow
 \rightarrow «нагрузка нулевая – ИСТИНА»
 \wedge - конъюнкция или логическое «и»

Конечный автомат - $C = X, Y, S, \delta, \lambda$

X – конечный входной алфавит

Y - конечный выходной алфавит

S – конечное множество состояний

$\delta: S \times X \rightarrow S$ – функция переходов

$\lambda: S \times X \rightarrow Y$ - функция выходов

Функционирование конечного автомата

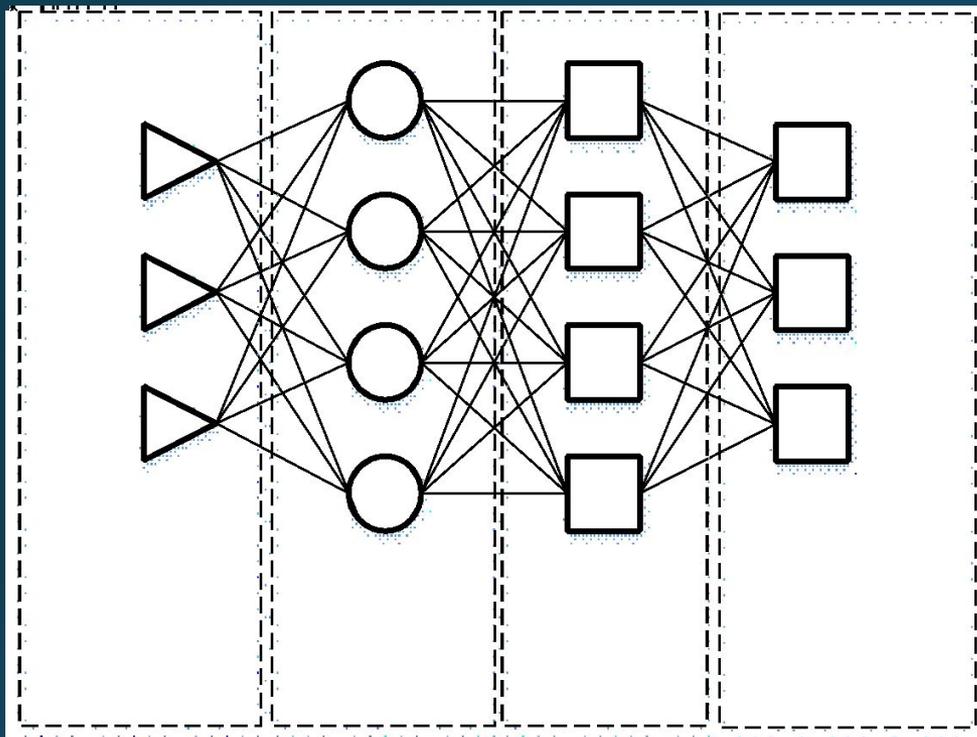
$$s(t + 1) = \delta(s(t), x(t))$$

$$y(t + 1) = \lambda(s(t), y(t))$$



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Искусственные нейронные сети



Формальный нейрон –
множество входов $X = \{x_i, i =$
 $= \overline{1, n}\}$ и один выход $F(Y)$.
 Y – возбуждение,

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

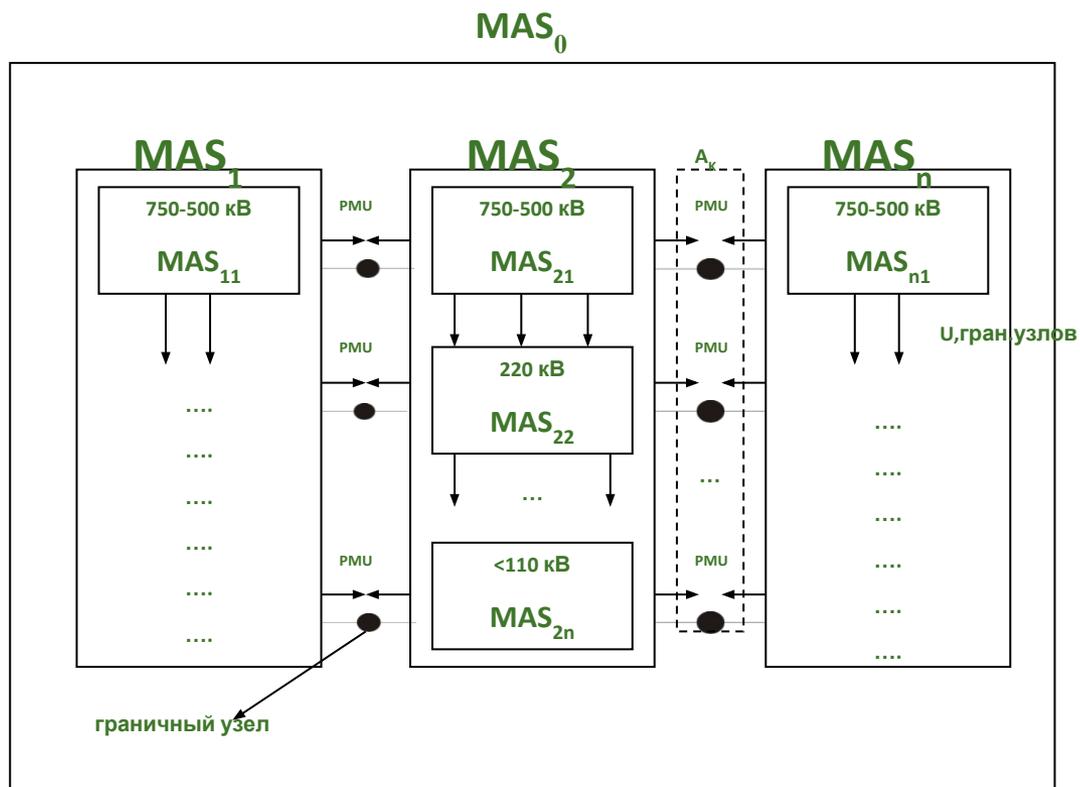
$$F(Y) = \frac{1}{1 + \exp(-aY)}, a > 0 -$$

активационная сигмоидная
функция



5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

Мультиагентные системы

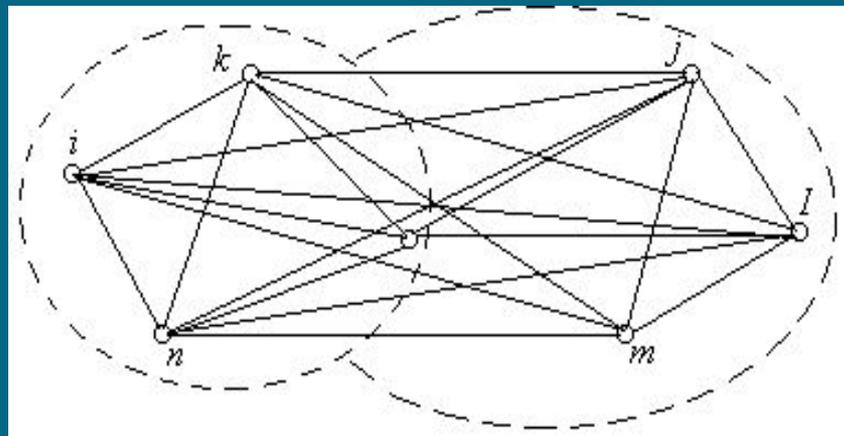




5. ОПИСАНИЕ СИСТЕМ

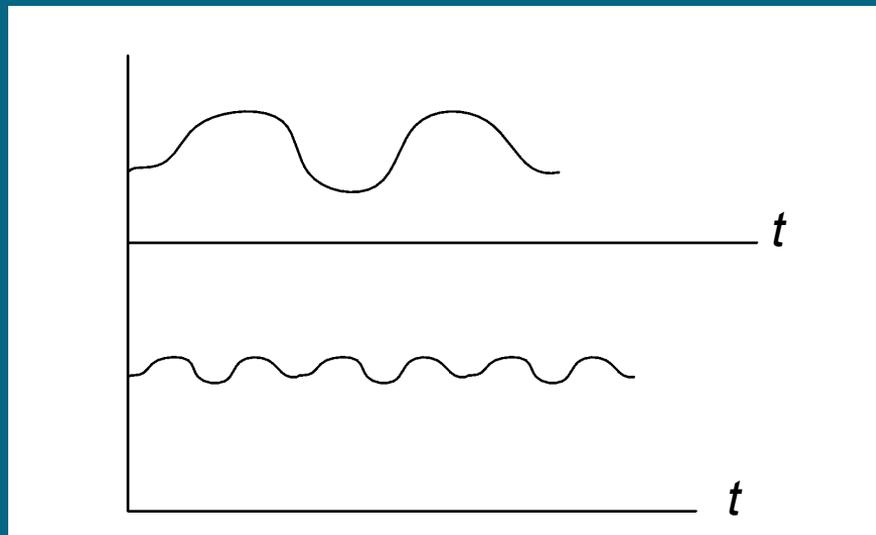
Теория возмущений (малых параметров)

$$\begin{aligned} dZ_\ell / dt &= \varphi_\ell(Z_\ell, \varepsilon h_\ell(Z_m), V), \\ dZ_m / dt &= \varphi_m(Z_m, \varepsilon h_m(Z_l), V); \end{aligned}$$



$$W_{ik} = \varepsilon W_{ij}$$

$$\begin{aligned} dZ_\ell / dt &= \varphi_\ell(Z_\ell, Z_m, V), \\ \varepsilon dZ_m / dt &= \varphi_m(Z_\ell, Z_m, V) \end{aligned}$$





6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Критериальное описание выбора

$$\{X, \Phi\} \rightarrow X^*$$

X – исходное множество альтернатив

Φ – правило выбора

X* – выбранное подмножество альтернатив

Критерий, целевая функция:

если $q(x_1) > q(x_2)$, то x_1 лучше x_2

$$x \in X$$

$$x^* = \arg \max_{x \in X} q(x)$$

$$x \in X$$



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Скаляризация векторного критерия

$$q_0 = \sum_{i=1}^p (\alpha_i q_i) / S_i;$$

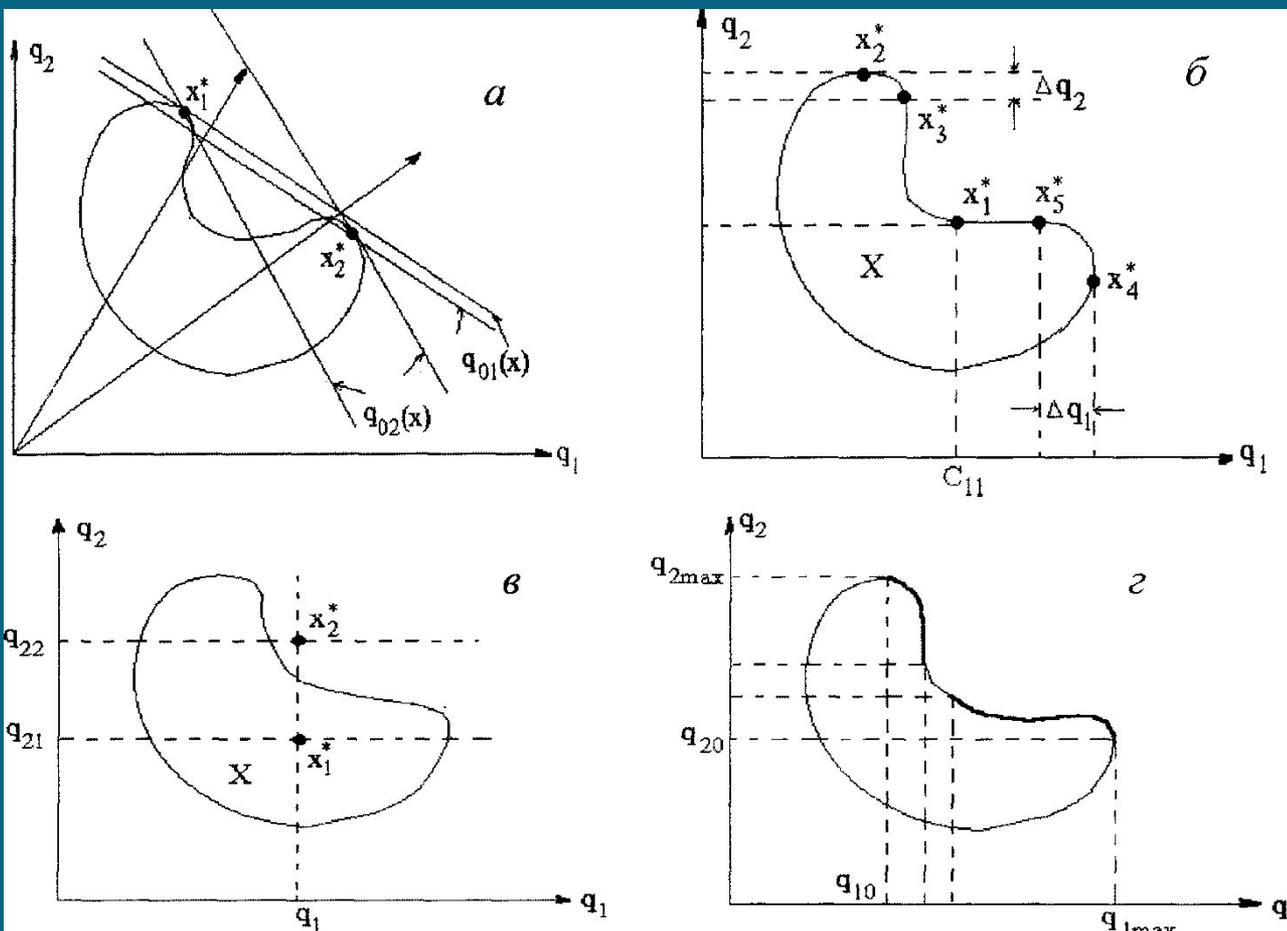
$$1 - q_0 = \prod_{i=1}^p (1 - \beta_i q_i / S_i)$$

$$x^* = \arg \max_{x \in X} q_0(q_1(x), q_2(x), \dots, q_p(x))$$



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Методы решения многокритериальных задач



а - оптимизация по одному суперкритерию;

б - метод уступок;

в - задание уровней притязания;

г - нахождение паретовского множества альтернатив



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Бинарные отношения

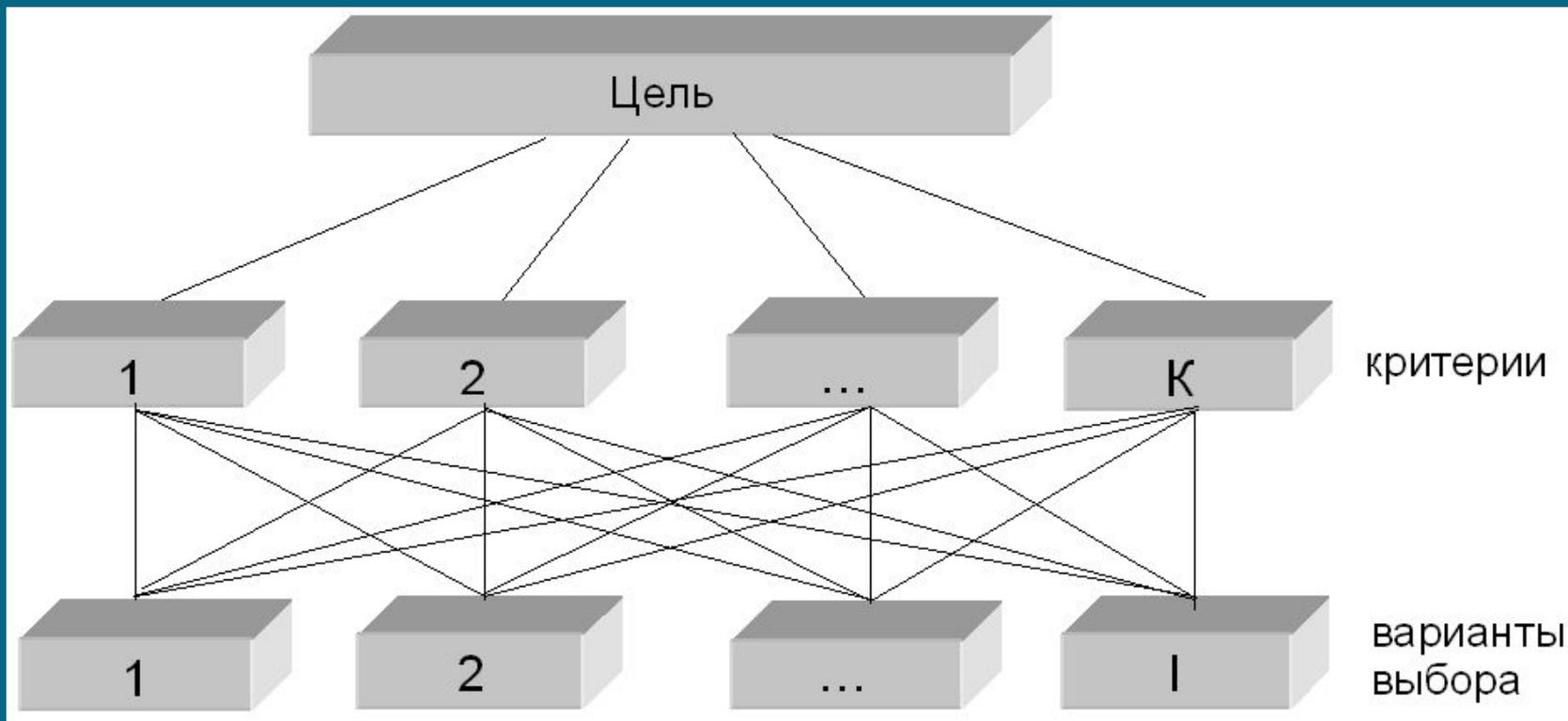
Задать отношение – значит указать все пары (x, y) , для которых выполнено отношение R (например, R означает «лучше», «дешевле» и др.).





6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Метод анализа иерархий (Т. Саати)



В результате формируется $K+1$ квадратных матриц вида $A = \{a_{i,j}, j = \overline{1, n}\}$, $n=K$ или $n=I$. Для второго уровня одна матрица, для третьего – K матриц. На основе анализа матриц путем формирования вторичных интегральных показателей определяются приоритеты выбора



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Выбор в условиях неопределенности

Внешние условия

А
Л
Т
Е
Р
Н
А
Т
И
В
Ы

X^Y	$y_1 \ y_2 \ \dots y_j \ \dots y_m$
X_1	$q_{11} \ q_{12} \ \dots q_{1j} \ \dots q_{1m}$
X_i	$q_{i1} \ q_{i2} \ \dots q_{ij} \ \dots q_{im}$
X_n	$q_{n1} \ q_{n2} \ \dots q_{nj} \ \dots q_{nm}$



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Критерии сравнения альтернатив при неопределенности

Минимаксный критерий

$$x^* = \arg \max_i \min_j q_{ij}$$

Критерий минимаксного сожаления (Сэвиджа)

$$s_{ij} = q_{ij} - \min_j q_{ij}; \quad x^* = \arg \max_i \min_j s_{ij}$$

Критерий пессимизма-оптимизма (Гурвица)

$$q(x_i) = \alpha \min_j q_{ij} + (1 - \alpha) \max_j q_{ij}; \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

$$x^* = \arg \max_i q(i)$$



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Выбор в условиях нечеткости

$$\mu_D(x) = \min [\mu_G(x), \mu_C(x)]$$

G – нечеткая цель **C** – нечеткие ограничения

$$x^* = \arg \max_{x \in X} \mu_D(x)$$



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Оптимальное управление

Функционал качества

$$J(x) = \int_{t_0}^{t_f} \Phi[x(t), \dot{x}(t), t] dt$$

Вариационный принцип

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} = 0$$

Принцип максимума Понтрягина

Динамическое программирование

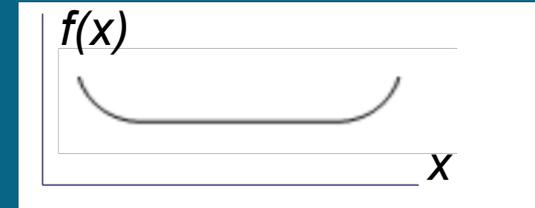
Наблюдаемость и управляемость



6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Ограниченность оптимизационного подхода

$$\left. \begin{array}{l} \text{opt } f(x) \\ \varphi(x) \leq 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{модель операции} \\ \text{модель системы} \end{array}$$



- Неустойчивость оптимальных решений, пологость критерия
- Необходимость увязывать критерии оптимальности системы с критериями подсистем
- Критерий является лишь суррогатом цели, характеризую цель всегда приближенно
- В понятии оптимальности кроме критерия не менее важную роль играют ограничения. Не задав всех необходимых ограничений, получим неверный результат
- Ограничения – это модель системы. Часто для того, чтобы решить задачу оптимизации, приходится «выхолащивать» модель системы



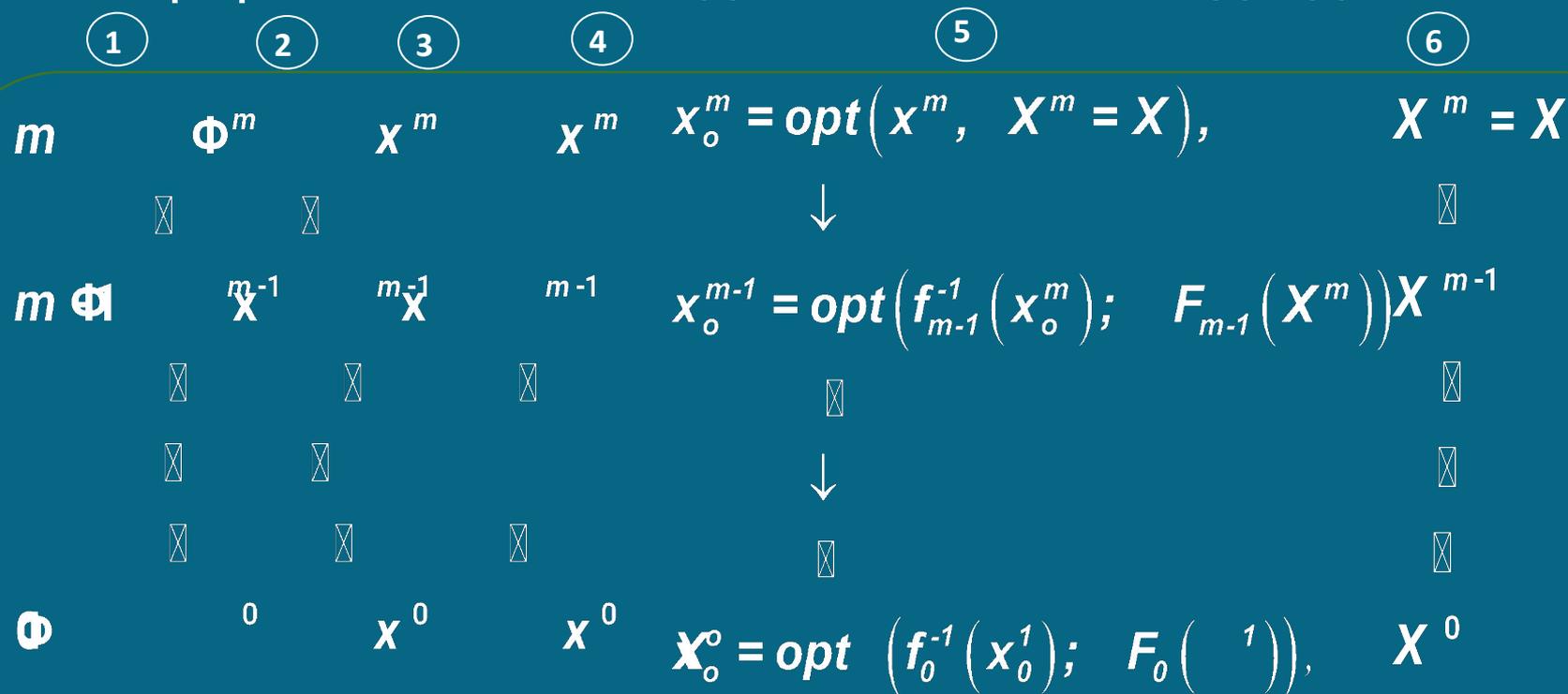
6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Иерархические задачи выбора

Исходная проблема: $X_o = opt (X, \Phi)$

$$x_o = opt (x, X, \Phi)$$

Иерархическая последовательность подзадач:



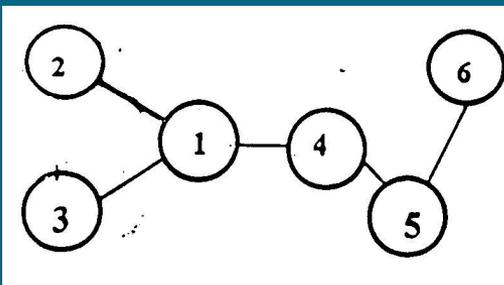


6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

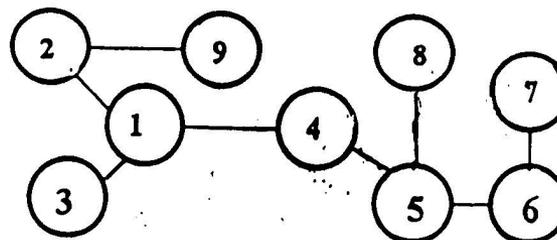
Двухуровневое представление ЕЭЭС России

Уровень 1

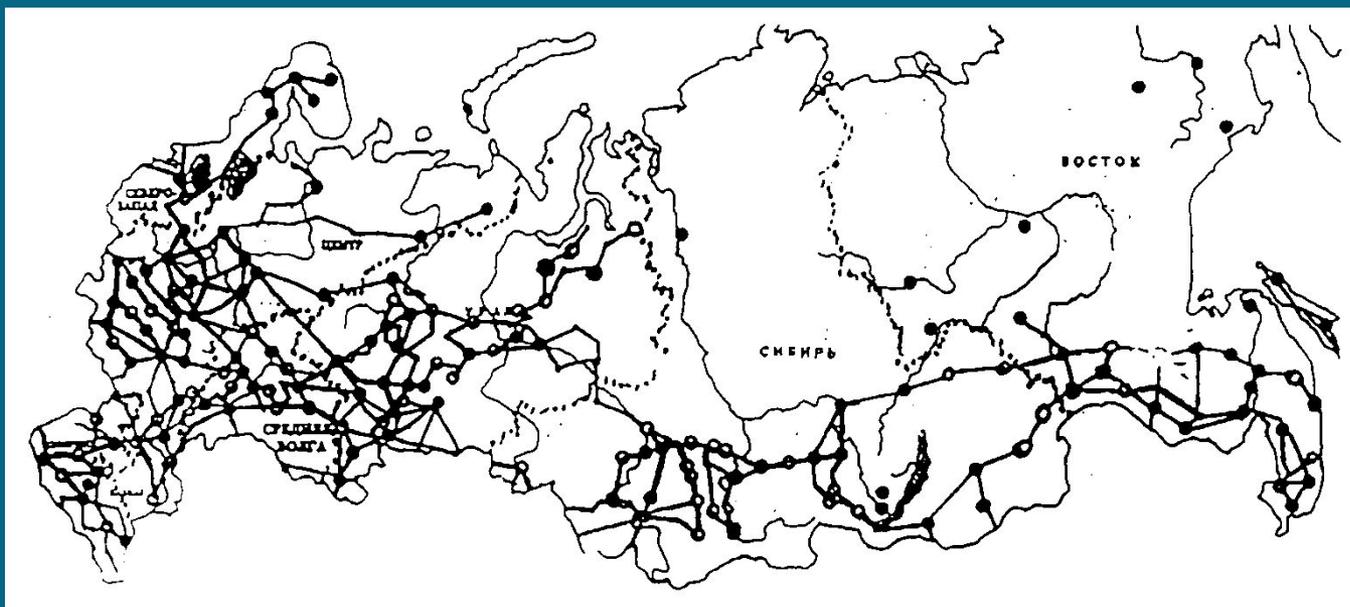
Традиционный



Уточненный



Уровень 0





6. ВЫБОР РЕШЕНИЙ

Неформальные методы выбора

□ Экспертные методы выбора

Метод Делфи

□ Человеко-машинные системы и выбор

Пакеты прикладных программ

Системы поддержки принятия решений

□ Эвристические методы выбора

Эвристики

Табу-поиск решения

Моделирование отжига

Генетические алгоритмы

Метод колонии муравьев

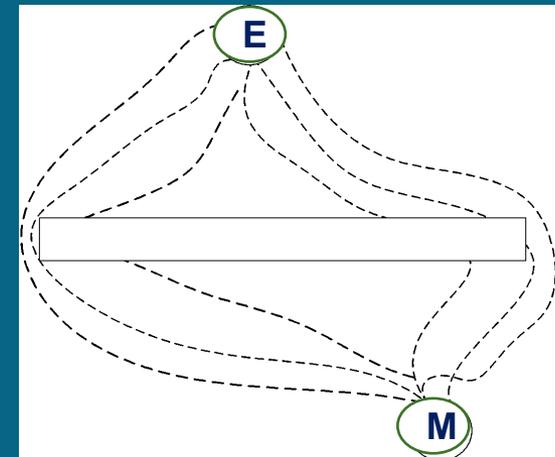
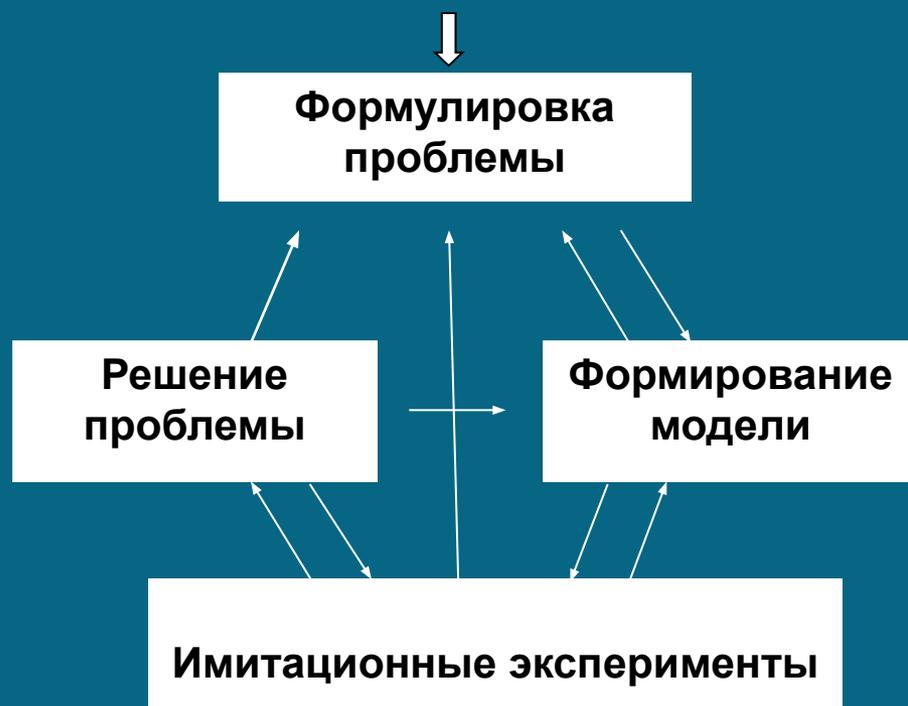


Иллюстрация метода
колонии муравьев



7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Этапы имитационного моделирования





7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Составляющие имитационного моделирования (1)

□ **Формирование целей и критериев**

Трудности выявления целей

Влияние ценностей на цели

Множественность целей

Критерии и ограничения

□ **Генерирование альтернатив**

Способы увеличения числа альтернатив

Создание благоприятных условий

Способы сокращения числа альтернатив

Мозговой штурм

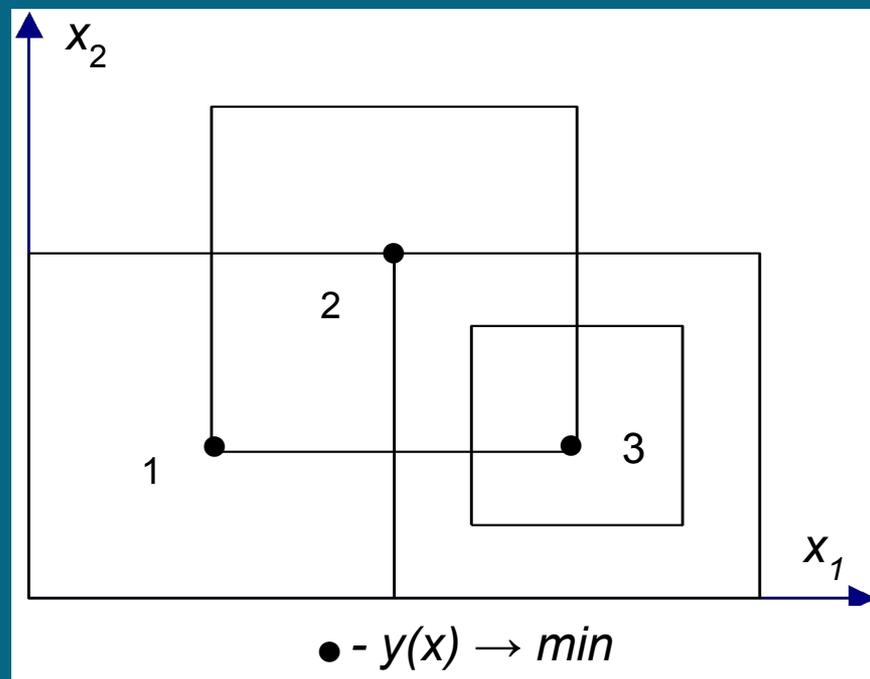
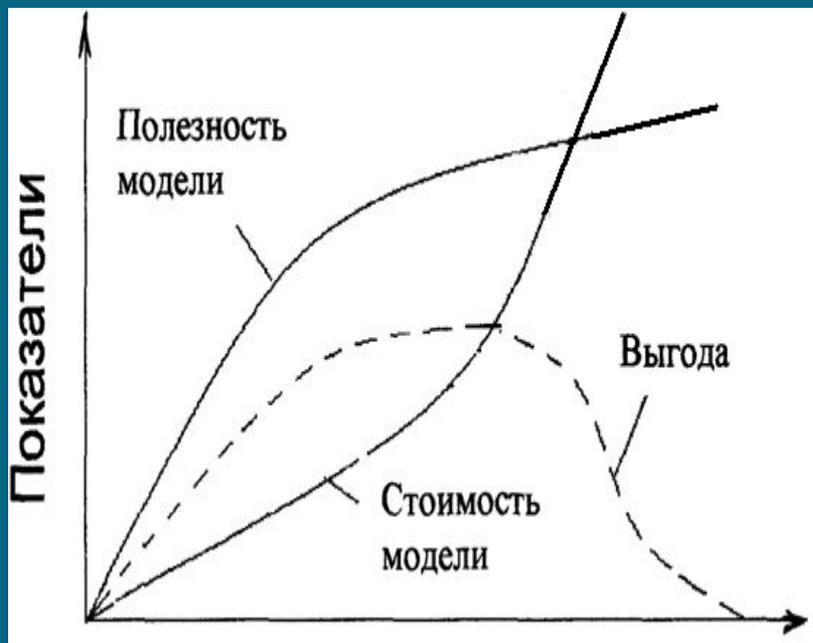
Разработка сценариев



7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Составляющие имитационного моделирования (2)

- Планирование имитационных экспериментов
 - Факторы x и отклики $y-y(x)$
 - Полный и неполный факторный анализ
 - Отыскание оптимальных условий – $y(x) \rightarrow \min$
- Обоснование выбора и анализ модели





7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Целесообразность применения имитационных моделей

- ☞ Не существует законченной математической постановки задачи либо еще не разработаны аналитические методы
- ☞ Аналитические методы имеются, но математические процедуры сложны и трудоемки
- ☞ Аналитические решения существуют, но математическая подготовка персонала недостаточна
- ☞ Кроме оценки параметров, целесообразно отслеживать процесс
- ☞ Трудности и невозможность постановки экспериментов в реальной системе
- ☞ Моделируемый процесс может быть замедлен или ускорен при необходимости
- ☞ Возможность «разыгрывать» на модели реальные процессы и ситуации



7. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

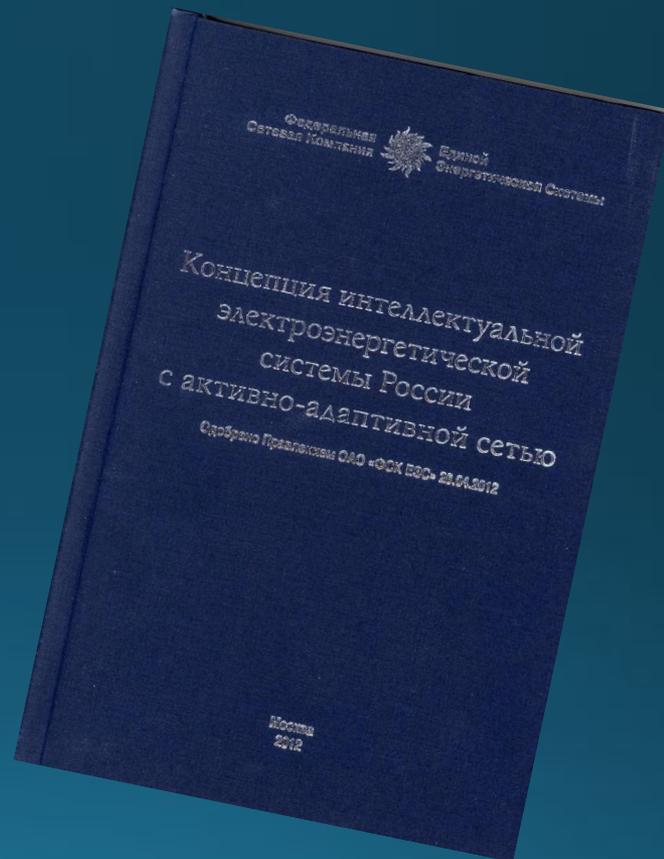
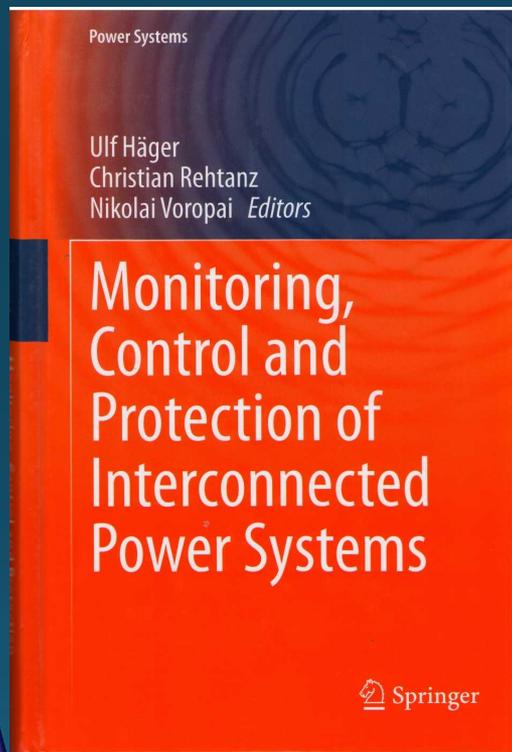
Опасности и ограничения

- Разработка хорошей имитационной модели может стоить дорого и требовать много времени и высококвалифицированных специалистов
- Трудности верификации имитационной модели
- Принципиальная неточность имитационной модели
- Опасность «обожествления чисел»



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Книги с участием ИСЭМ СО РАН





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Общие тенденции в развитии и функционировании будущих энергетических систем (1)

- Увеличение масштабов энергетических систем, расширение обслуживаемых ими территорий
- Усложнение структуры энергетических систем вследствие увеличения многообразия силовых элементов в больших диапазонах технологий и мощностей, включая распределенную генерацию, и усложнения конфигурации сетевой инфраструктуры
- Широкое использование инновационных технологий при производстве, транспорте, хранении, распределении и потреблении энергоресурсов
- Активность поведения потребителей в плане управления собственным энергопотреблением в темпе процесса



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

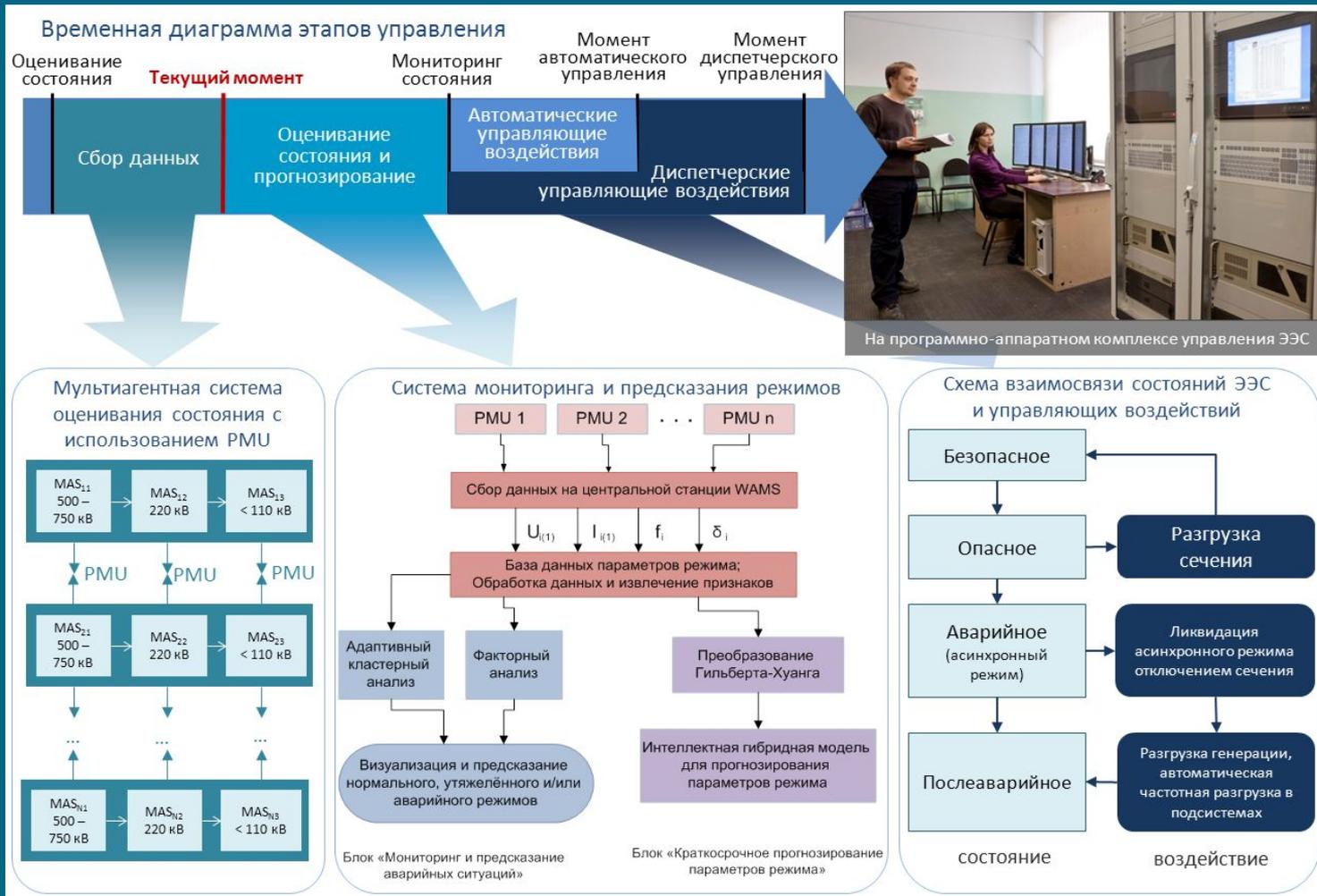
Общие тенденции в развитии и функционировании будущих энергетических систем (2)

- Широкое использование информационно-коммуникационных технологий для мониторинга состояния энергетических систем и управления ими
- Активное применение идеологии интеллектуальных энергетических систем как технологической платформы будущей энергетики
- Существенное изменение свойств будущих интеллектуальных энергетических систем как объектов мониторинга их состояния и управления их режимами
- Создание условий для формирования интегрированных интеллектуальных энергетических систем как единых технологических комплексов с общей системой управления



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

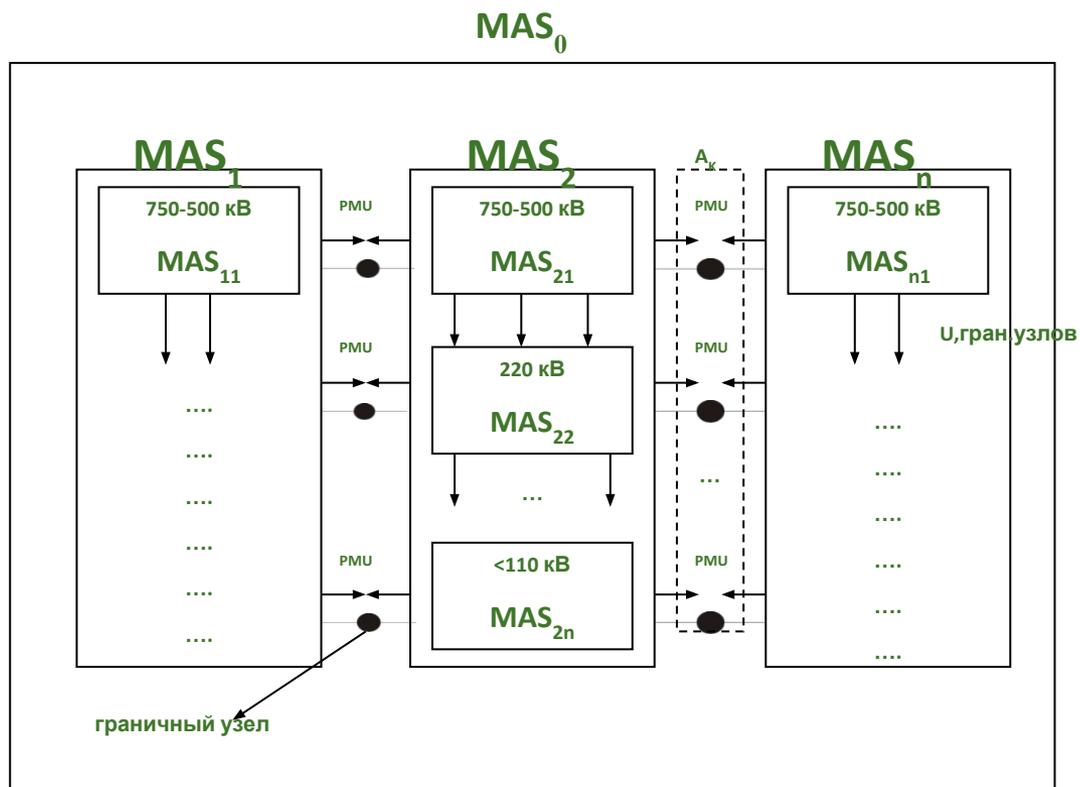
Временная диаграмма этапов управления





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Оценивание текущих режимов ЭЭС на основе интеграции данных и технологий искусственного интеллекта





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Пример . Схема 328 узлов, 420 связей, 1306 ТИ

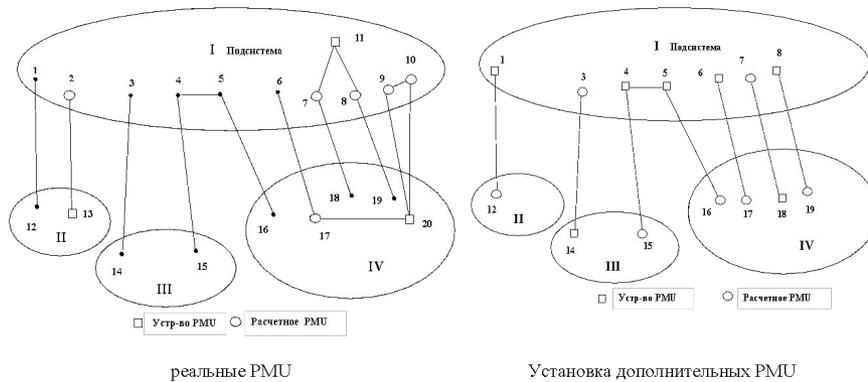
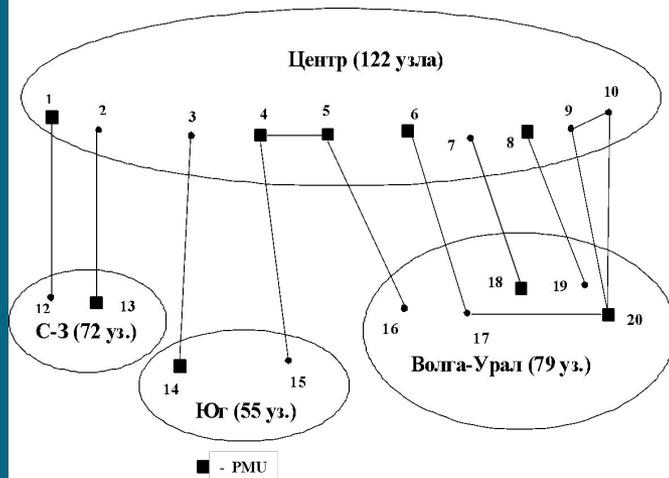


Схема	Время расчета, с
Полная схема	3,07
Центр	1,42
Северо-Запад	0,93
Юг	0,71
Волга-Урал	0,6



$$U_i^{\text{расчетное}} = \sqrt{(U_j^{\text{PMU}} - \Delta U')^2 + (\Delta U'')^2}$$

$$\delta_i^{\text{расчетное}} = \arctg \frac{\Delta U''}{U_j^{\text{PMU}} - \Delta U'}$$

$$\varphi = \sum_{i=1}^m \frac{(\bar{y}_i - y_i(\hat{x}))^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min$$

Целевая функция $O(\varphi)$	φ без установки PMU	φ при установке PMU
φ_{Σ}	151141	112346
φ_P	136660	94075
φ_Q	6956	5022
φ_U	7524	6248



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Основные результаты

1. **Алгоритмы распределенного иерархического оценивания состояния больших энергосистем на базе методов структурной и функциональной декомпозиции, новых источников данных (PMU) и новых информационных технологий позволяют:**
 - снизить нагрузку на вычислительные ресурсы в центре управления объединенной ЭЭС;
 - минимизировать объемы информации, передаваемой между центрами управления параллельно работающими подсистем и центром координации;
 - выполнять параллельную обработку данных для локальных подсистем существенно меньшего размера;
 - сократить время ОС для полной схемы;
 - снизить неоднородность расчетной схемы каждой подсистемы, обеспечив тем самым гарантированную сходимость вычислительного процесса;
 - повысить эффективность алгоритмов обнаружения плохих данных и точность результатов ОС.



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Основные результаты

2. Использование измерений, поступающих от PMU, позволяет решить ряд

проблем, возникающих при декомпозиции задачи ОС:

- установка PMU в граничных узлах подсистем позволяет максимально упростить решение координационной задачи и не требует выполнения итерационных расчетов по подсистемам,
- задание узлов с PMU в качестве базисных узлов подсистем обеспечивает координацию фазовых углов напряжений при расчете по подсистемам,
- измерения от PMU, установленных вблизи граничных узлов, позволяют существенно повысить эффективность обнаружения плохих данных в граничных областях и точность получаемых оценок.

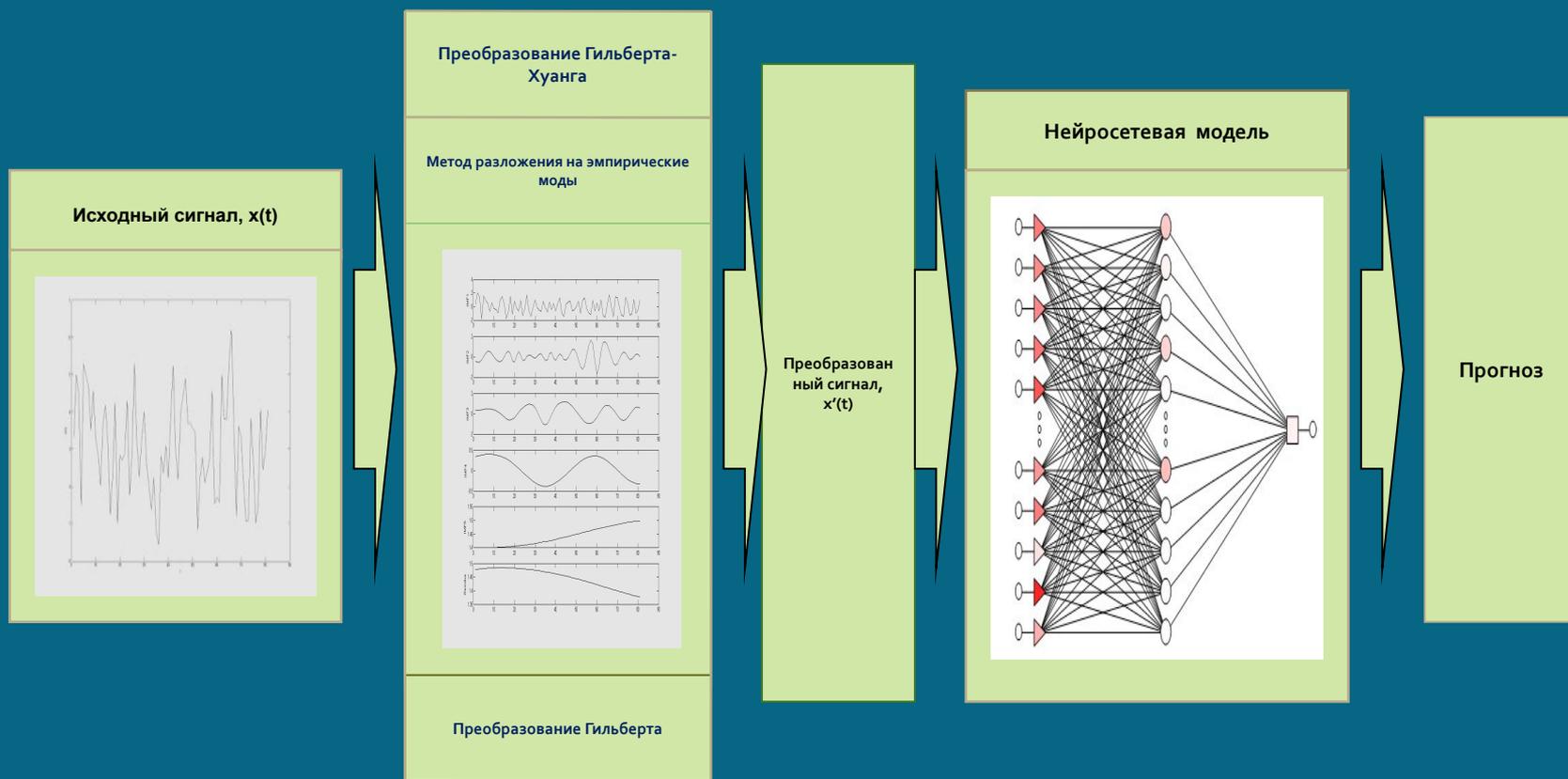
3. Применение мультиагентных технологий для реализации декомпозиционного алгоритма ОС ЭЭС дает возможность:

- координировать взаимодействие и осуществлять быстрый обмен данными между задачами, решаемыми на разных уровнях;
- организовать гибкий выбор метода решения той или иной задачи ОС для каждой подсистемы;
- интегрировать методы искусственного интеллекта и численные методы решения.



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

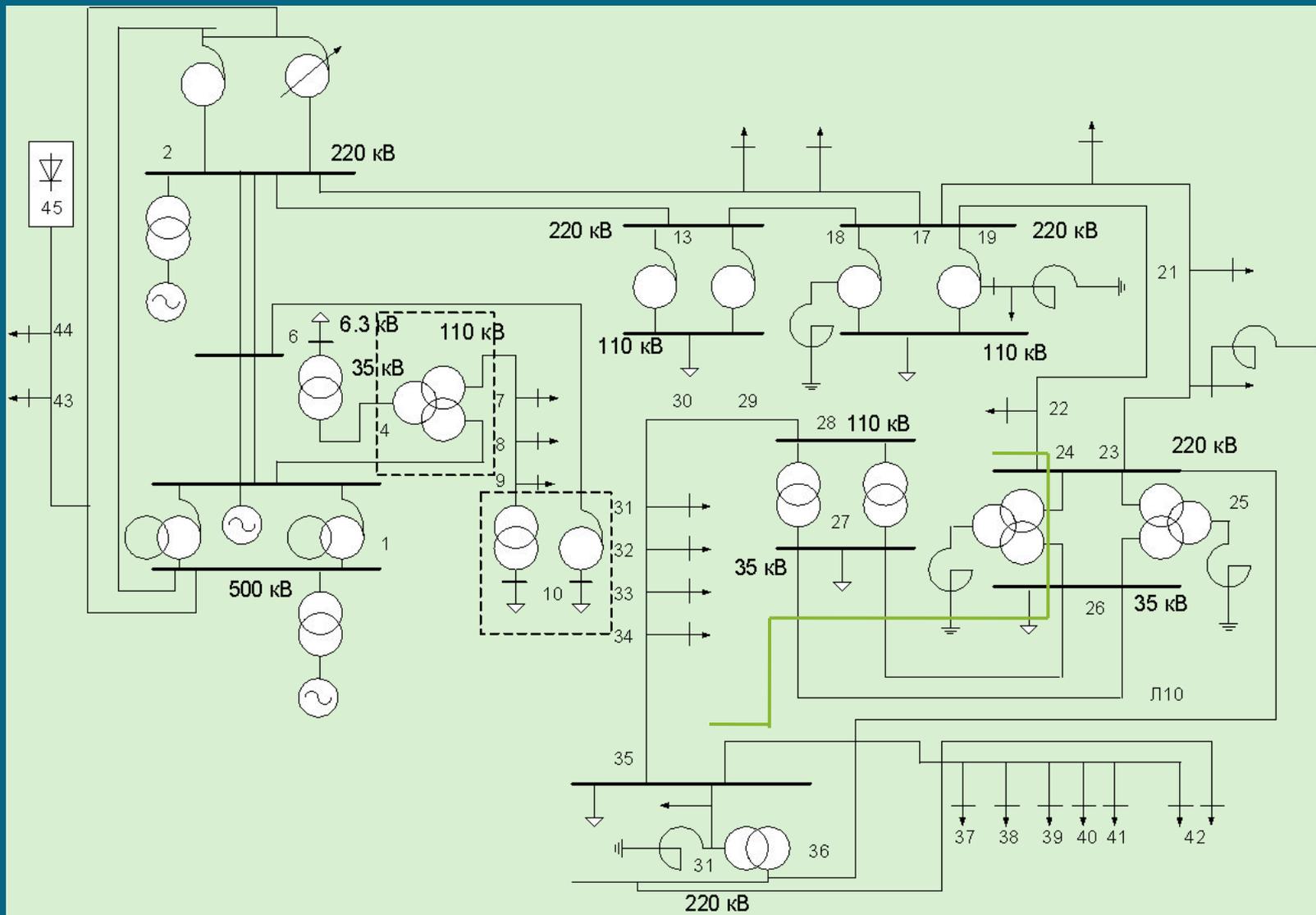
Формирование гибридной модели для краткосрочного прогнозирования параметров режима ЭЭС





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Схема одного из энергорайонов Иркутской энергосистемы





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Сравнительные результаты краткосрочного прогнозирования перетока активной мощности на «1 минуту вперед» на базе традиционной нейронной сети и гибридной (ПГХ-ИНС) модели

- Гибридная модель – прогнозная модель на базе совместного использования преобразования Гильберта-Хуанга (ПГХ) и искусственной нейронной сети (ИНС)
- Традиционная ИНС – нейронная сеть, обученная в рамках задачи нейросетевого прогнозирования

Период	Ошибка	Традиционная нейросетевая модель	Гибридная (ПГХ-ИНС) модель
20:00 – 21:00	MAPE (%)	10.1	5.2
	MAE	6.2	1.8
	RMSE	33.1	3.1
21:00 – 22:00	MAPE (%)	9.1	4.3
	MAE	6.7	1.6
	RMSE	34.1	1.7



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Сравнительные результаты краткосрочного прогнозирования уровня напряжения на «15 минут вперед» на базе традиционной нейронной сети и гибридной (ПГХ-ИНС) модели

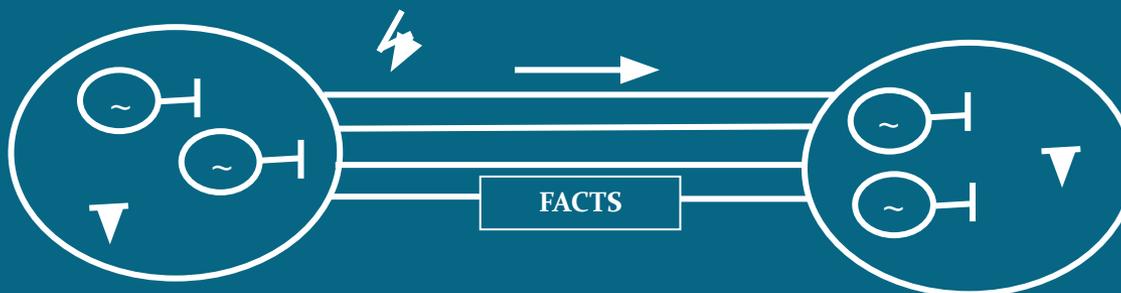
- Гибридная модель – прогнозная модель на базе совместного использования преобразования Гильберта-Хуанга (ПГХ) и искусственной нейронной сети (ИНС)
- Традиционная ИНС – нейронная сеть, обученная в рамках задачи нейросетевого прогнозирования

Период	Ошибка	Традиционная нейросетевая модель	Гибридная (ПГХ-ИНС) модель
00:00 – 23:00	MAPE (%)	2.1	0.29
	MAE	2.2	0.99
	RMSE	6.1	1.29



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Координация противоаварийного управления нагрузкой и устройствами FACTS



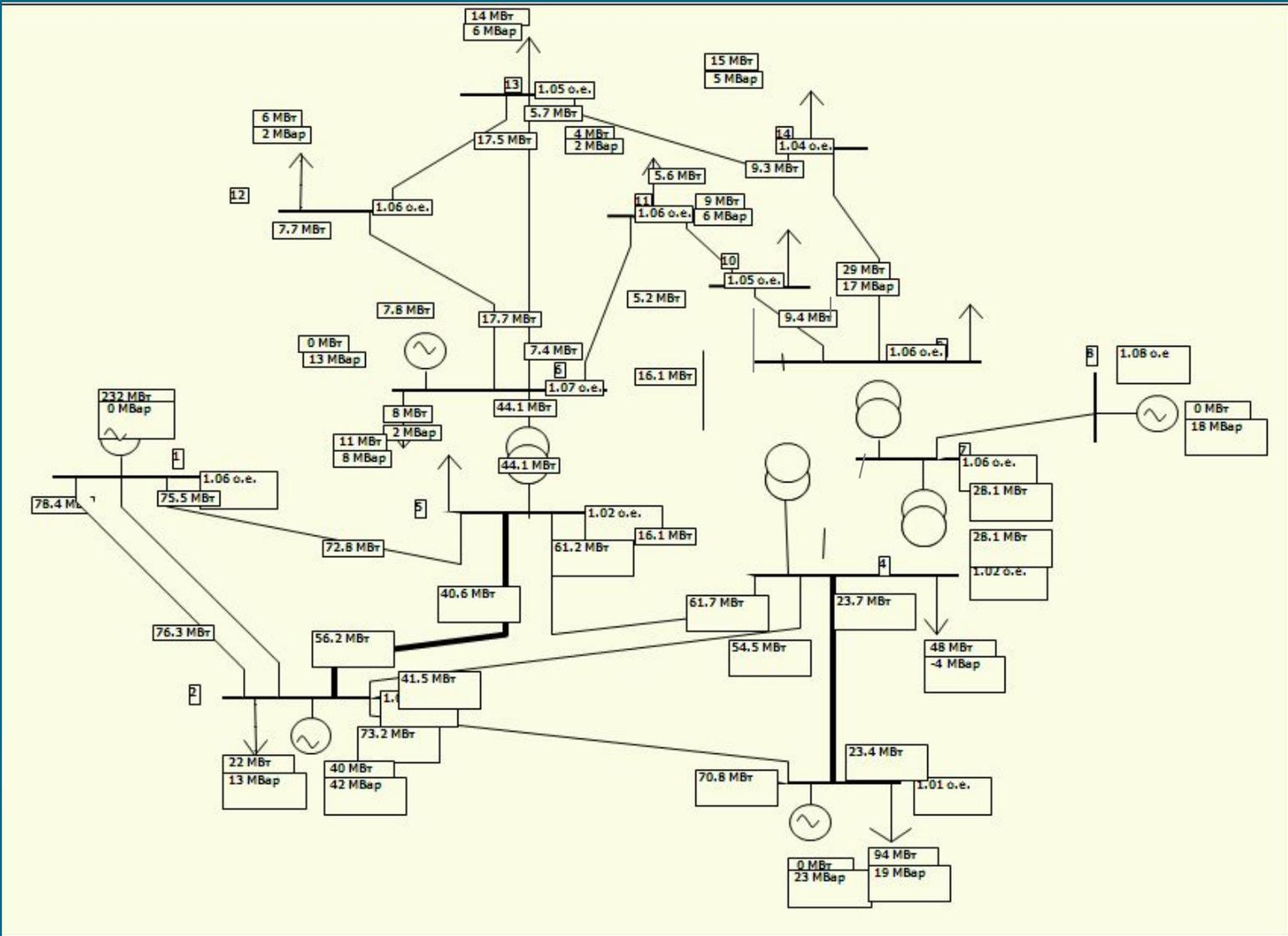
Координация базируется на анализе чувствительности и нахождении коэффициентов влияния устройств FACTS и нагрузок на загрузку по активной мощности контролируемых линий

$$P_{ij} = f(I_{\text{FACTS}}), \quad P_{ij} = f(\Delta P_i)$$



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

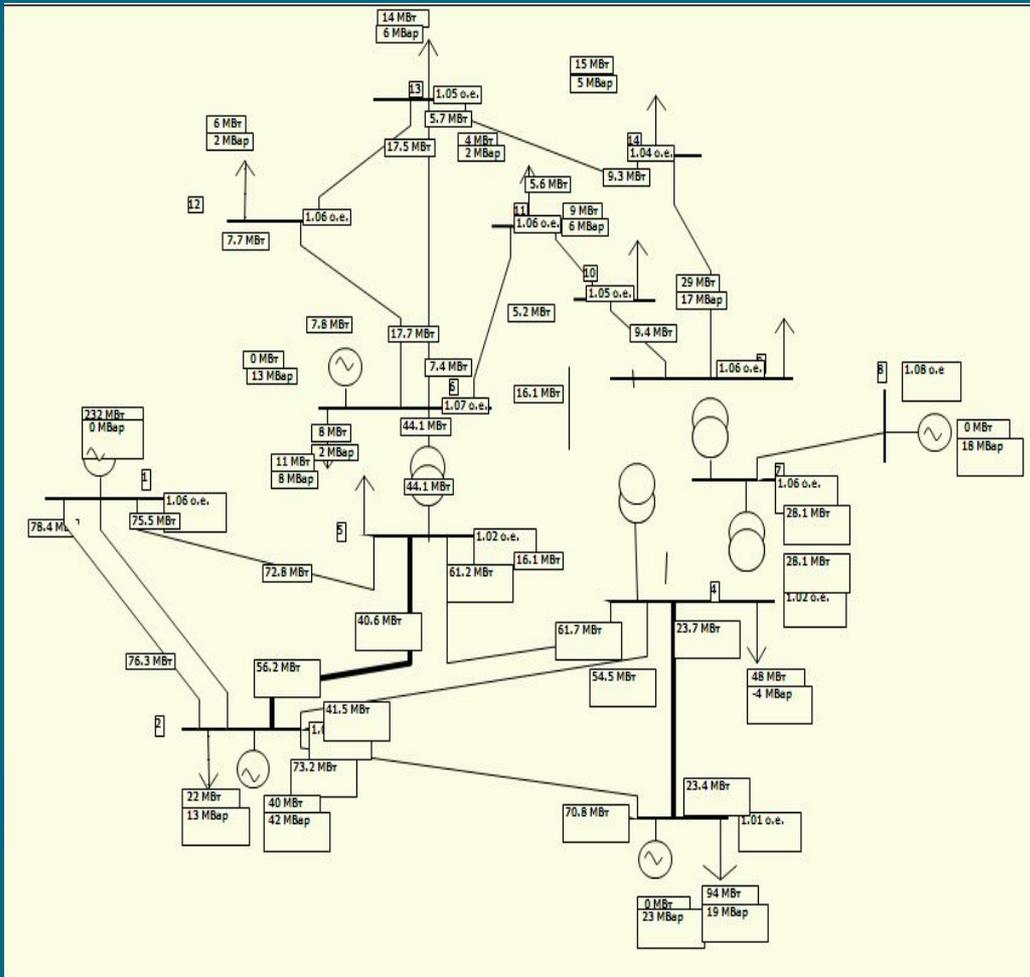
Тестовая 14-узловая схема IEEE





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Исследованные сценарии



□ Устройства FACTS не установлены, возможны лишь отключения нагрузки

□ Устройство ТУПК установлено на линии 2-5

□ Устройство ТУФПТ установлено на линии 2-5

□ Устройства ТУФПТ установлены на линиях 2-5 и 3-4

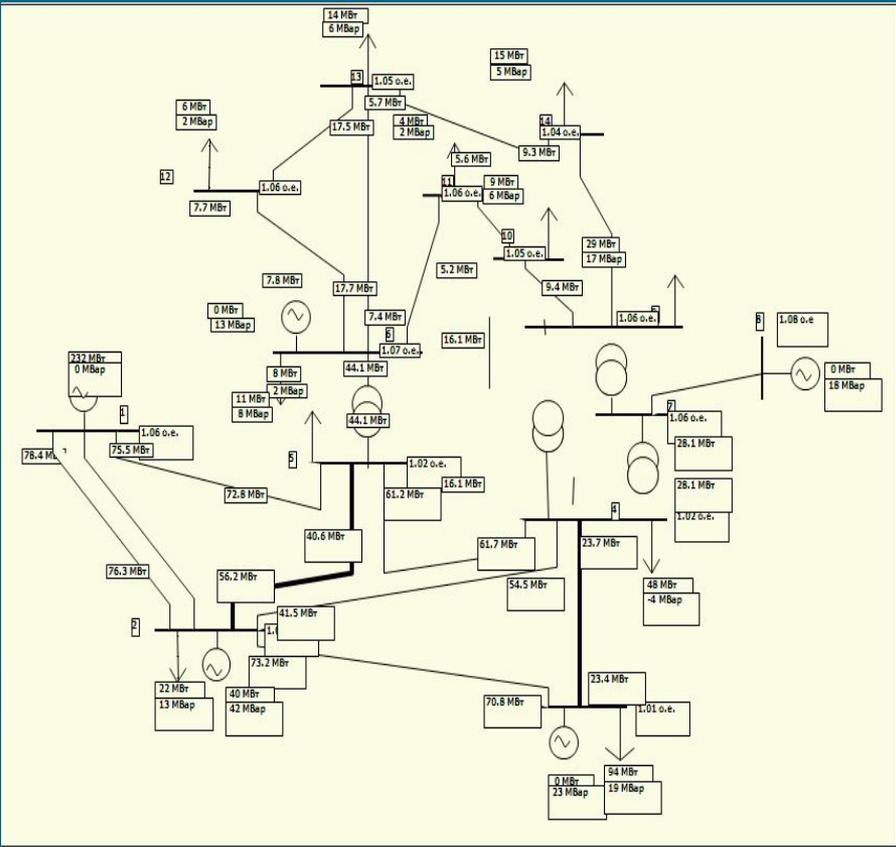
ТУПК – тиристорно-управляемый продольный компенсатор

ТУФПТ – тиристорно-управляемый фазоворотный трансформатор

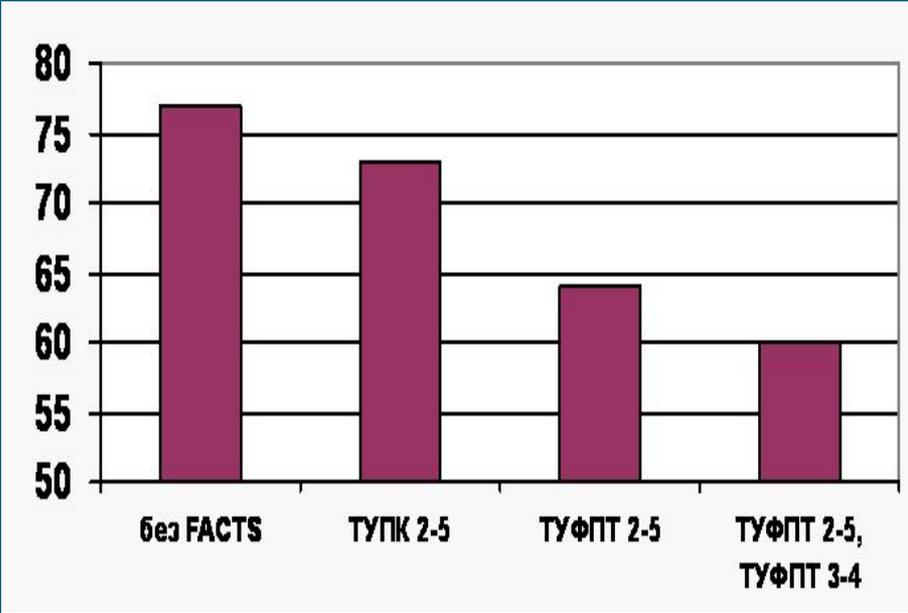


8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Диаграмма эффективности применения устройств FACTS



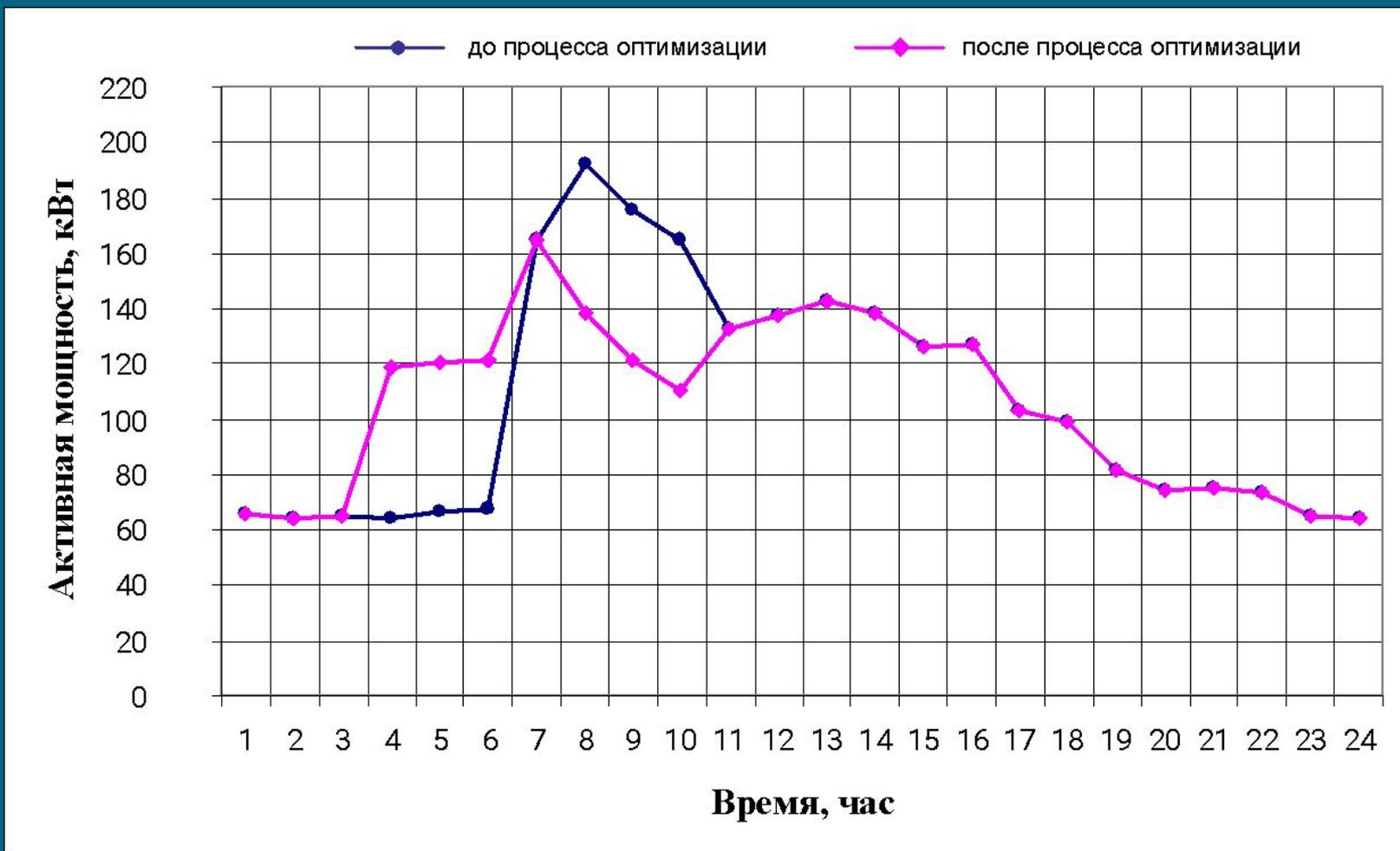
Суммарный ущерб, у.е.





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

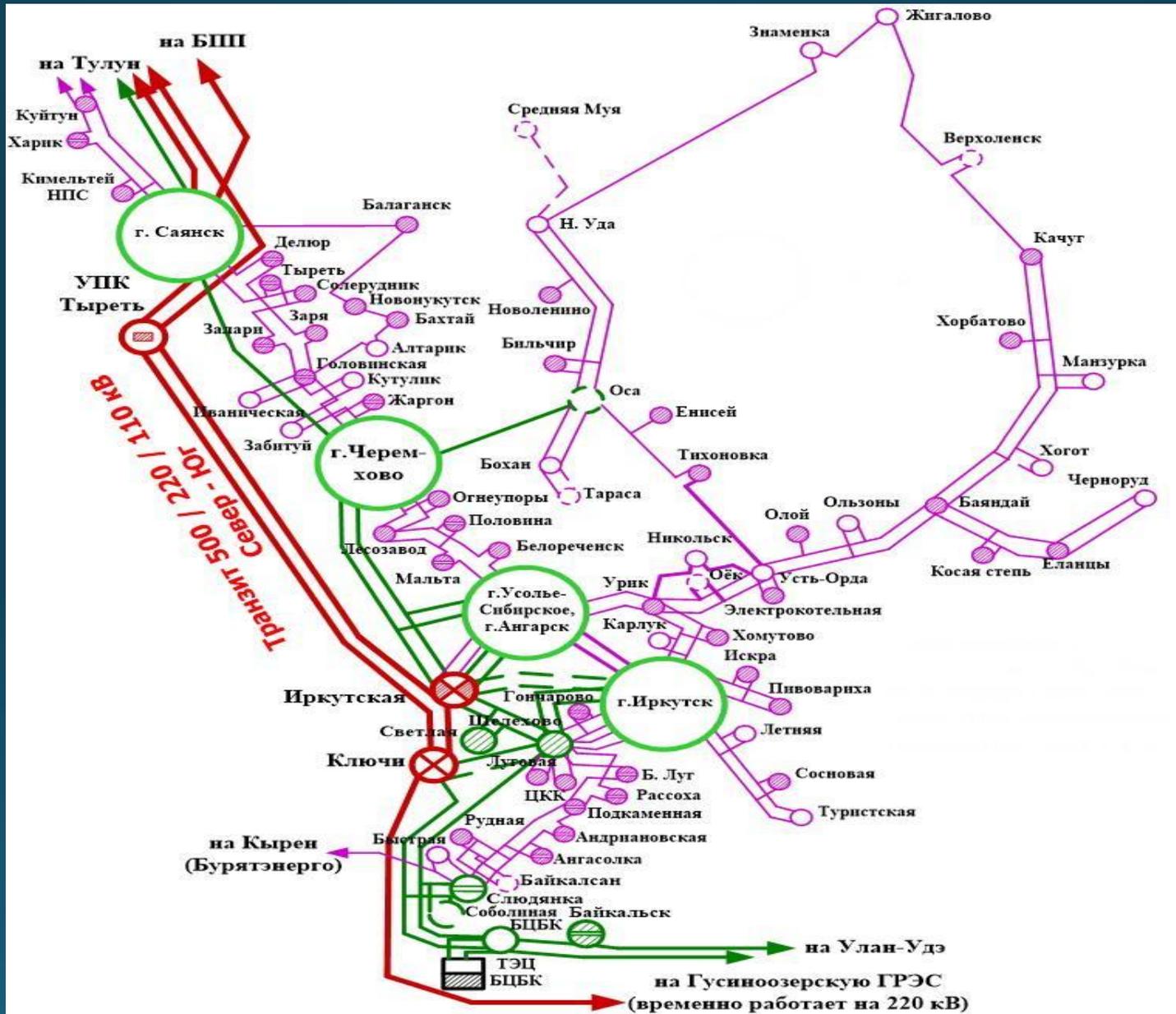
Эффект оптимизации суточного графика нагрузки активного потребителя





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Схема Иркутской ЭЭС



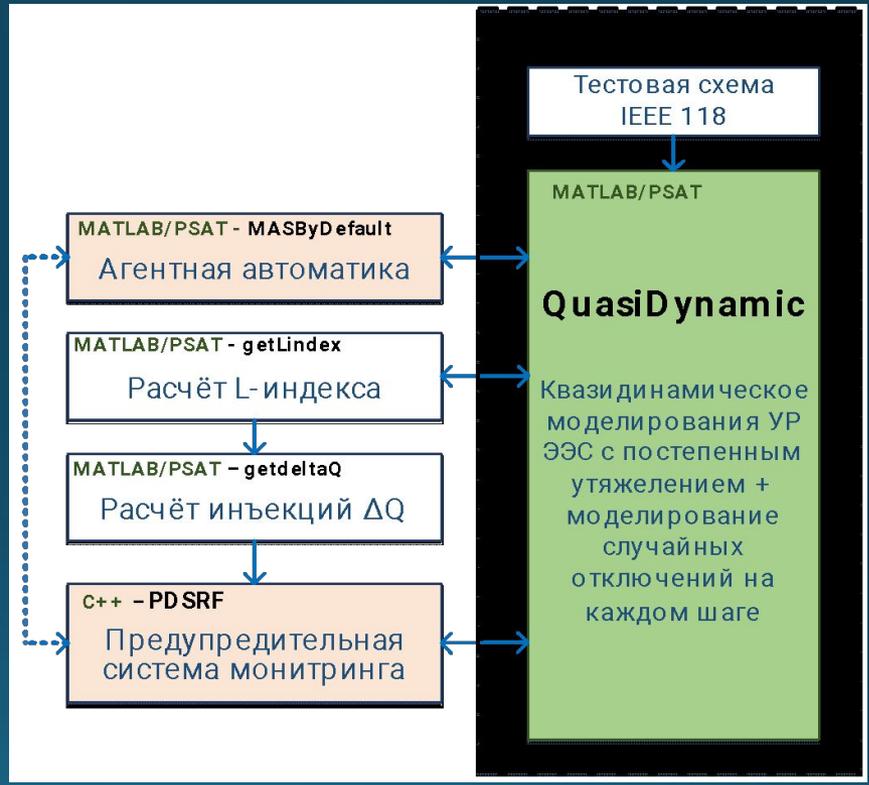


8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Комплекс интеллектуальных средств для предотвращения крупных системных аварий в ЭЭС, связанных с системной неустойчивостью по напряжению



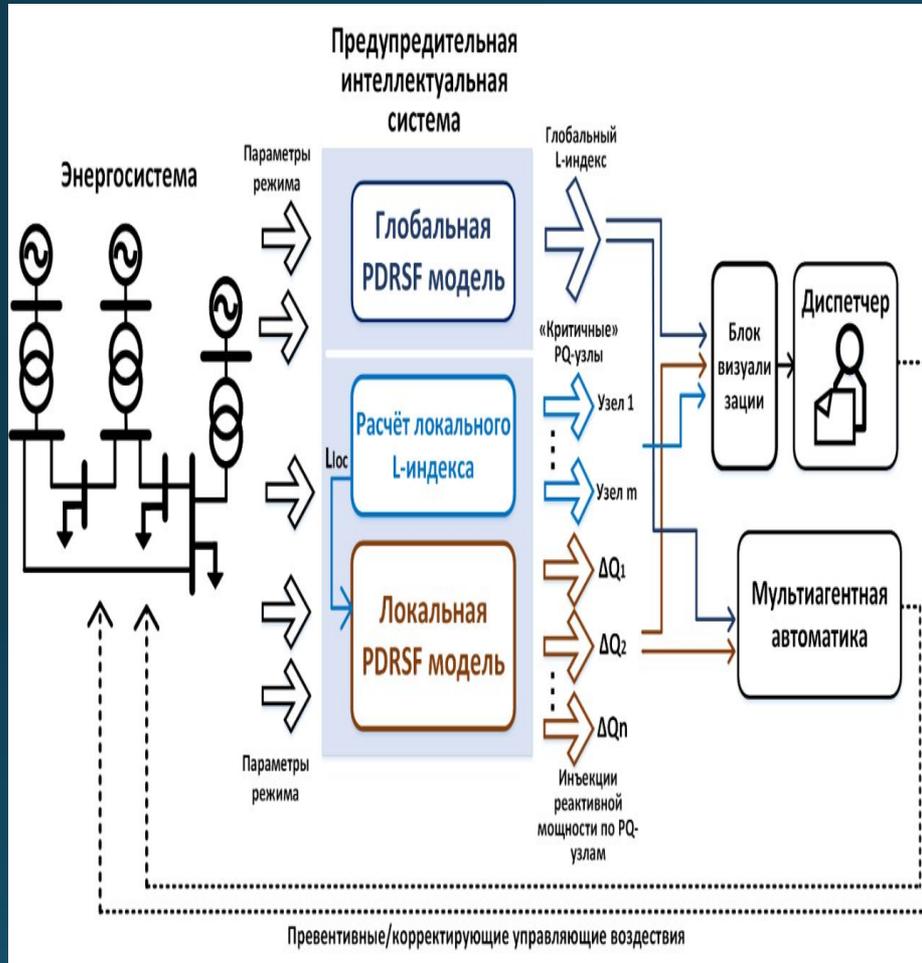
Предложенный подход к мониторингу и управлению ЭЭС



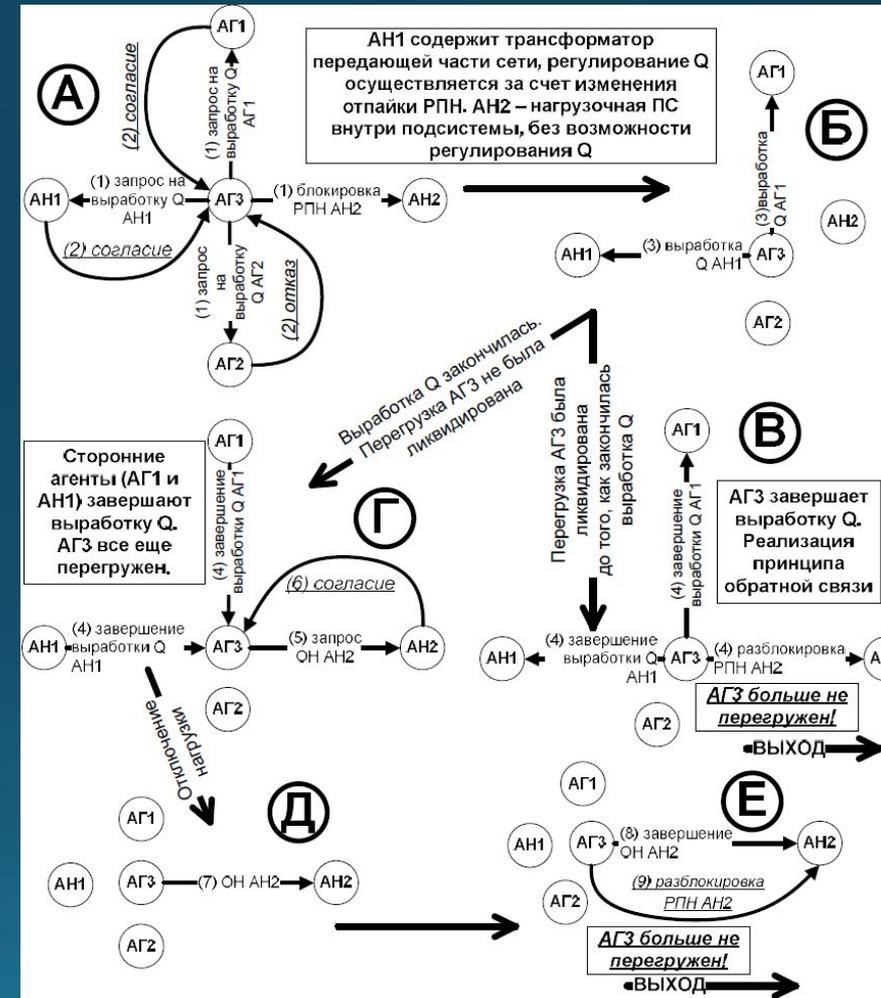
Структура программной реализации интеллектуальной системы



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ



Структурная схема разработанной предупредительной подсистемы для обеспечения надёжности ЭЭС в режиме онлайн

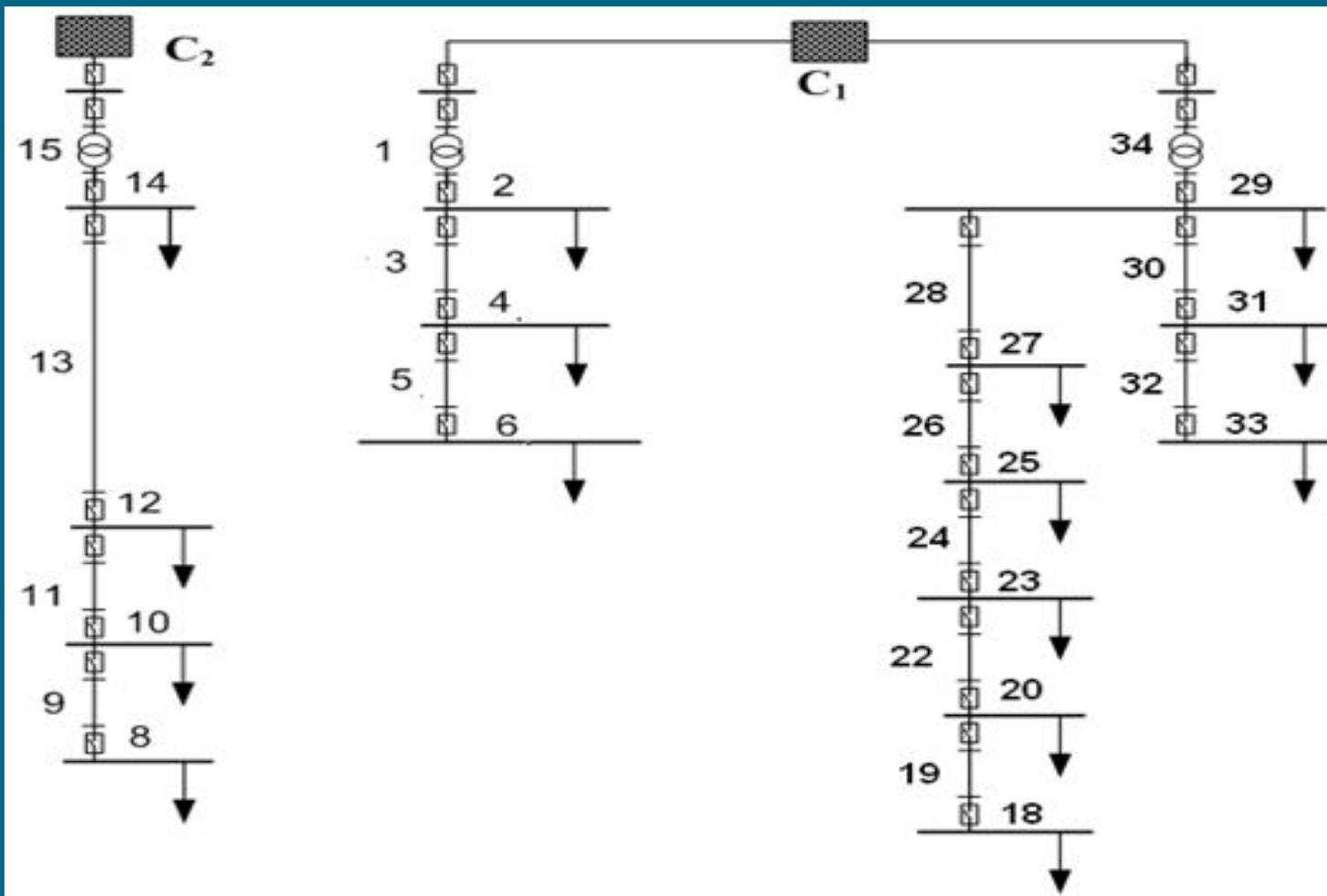


Алгоритм функционирования МАА предотвращения лавины напряжения



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

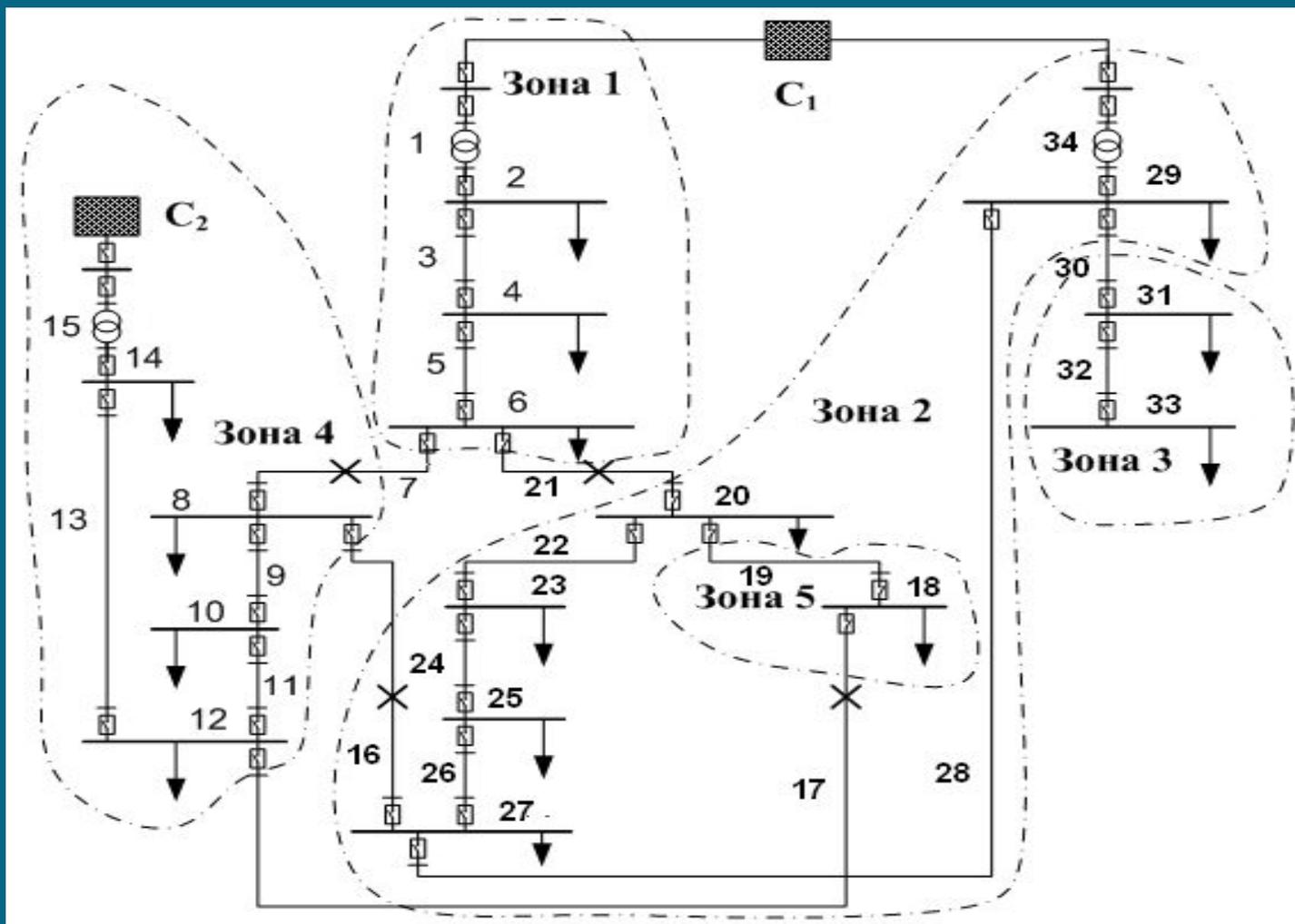
«Активные» системы электроснабжения Схема городской распределительной электрической сети





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

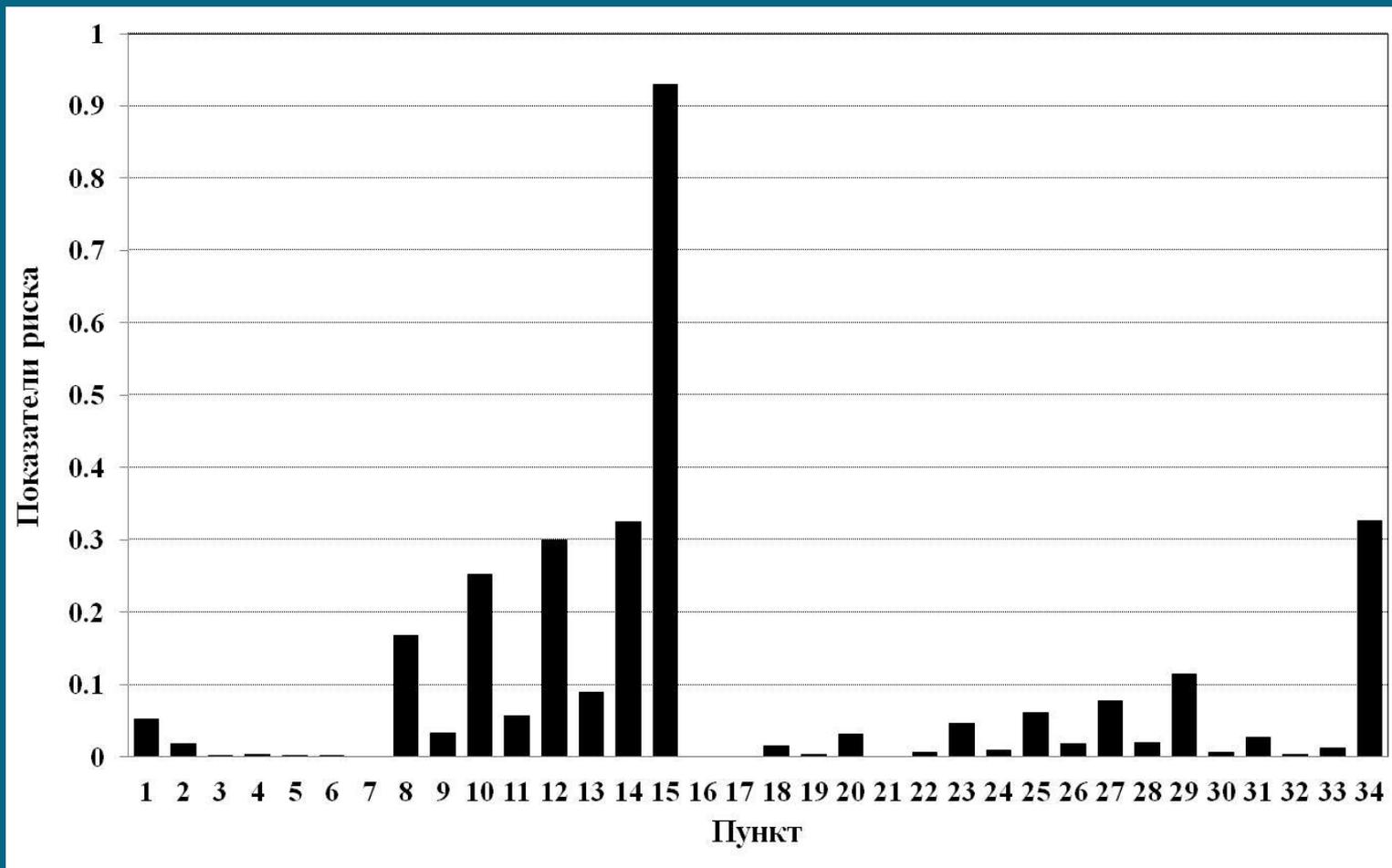
Реконструированная городская распределительная электрическая сеть





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

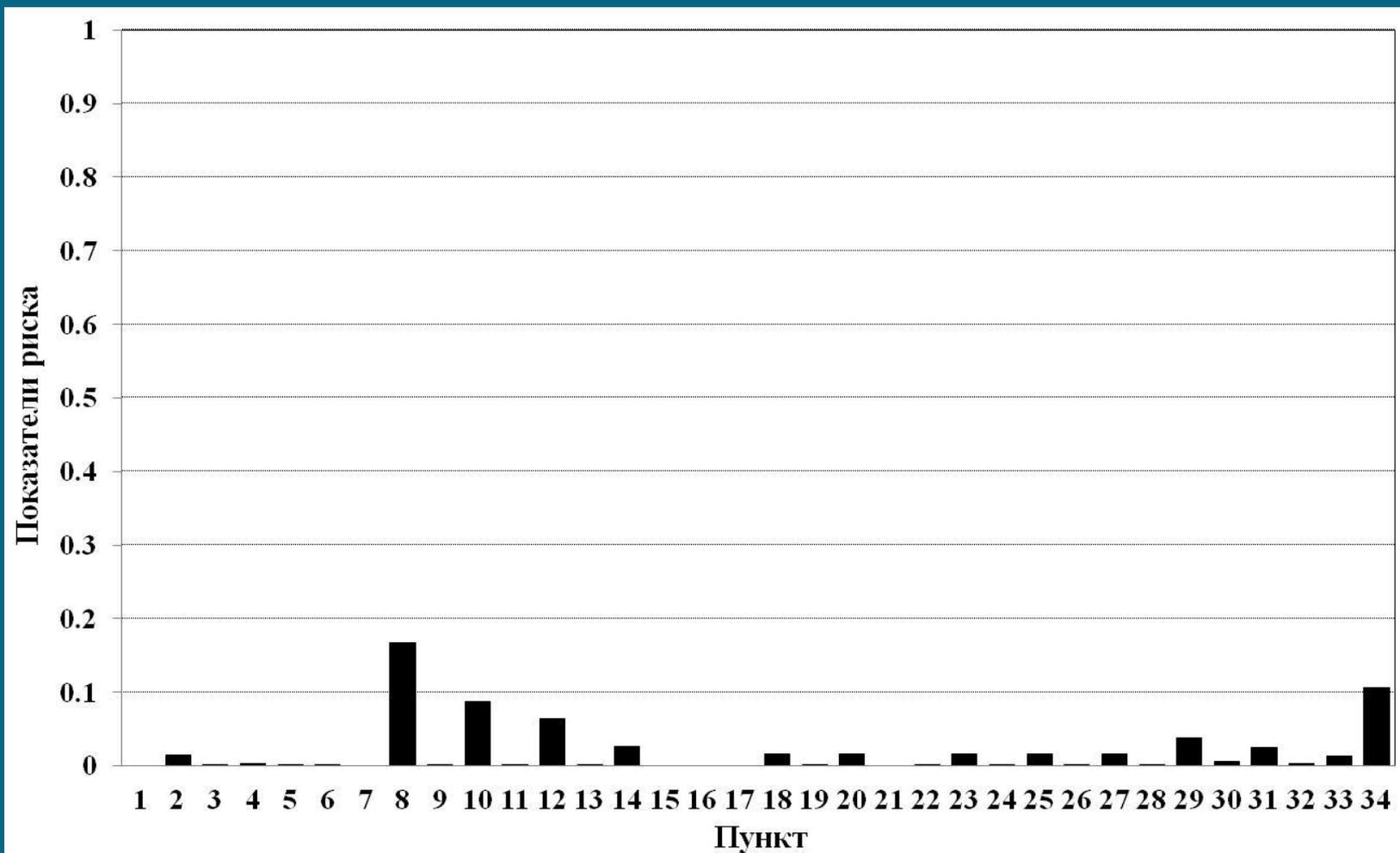
Диаграмма показателей риска дефицита мощности для исходной схемы





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

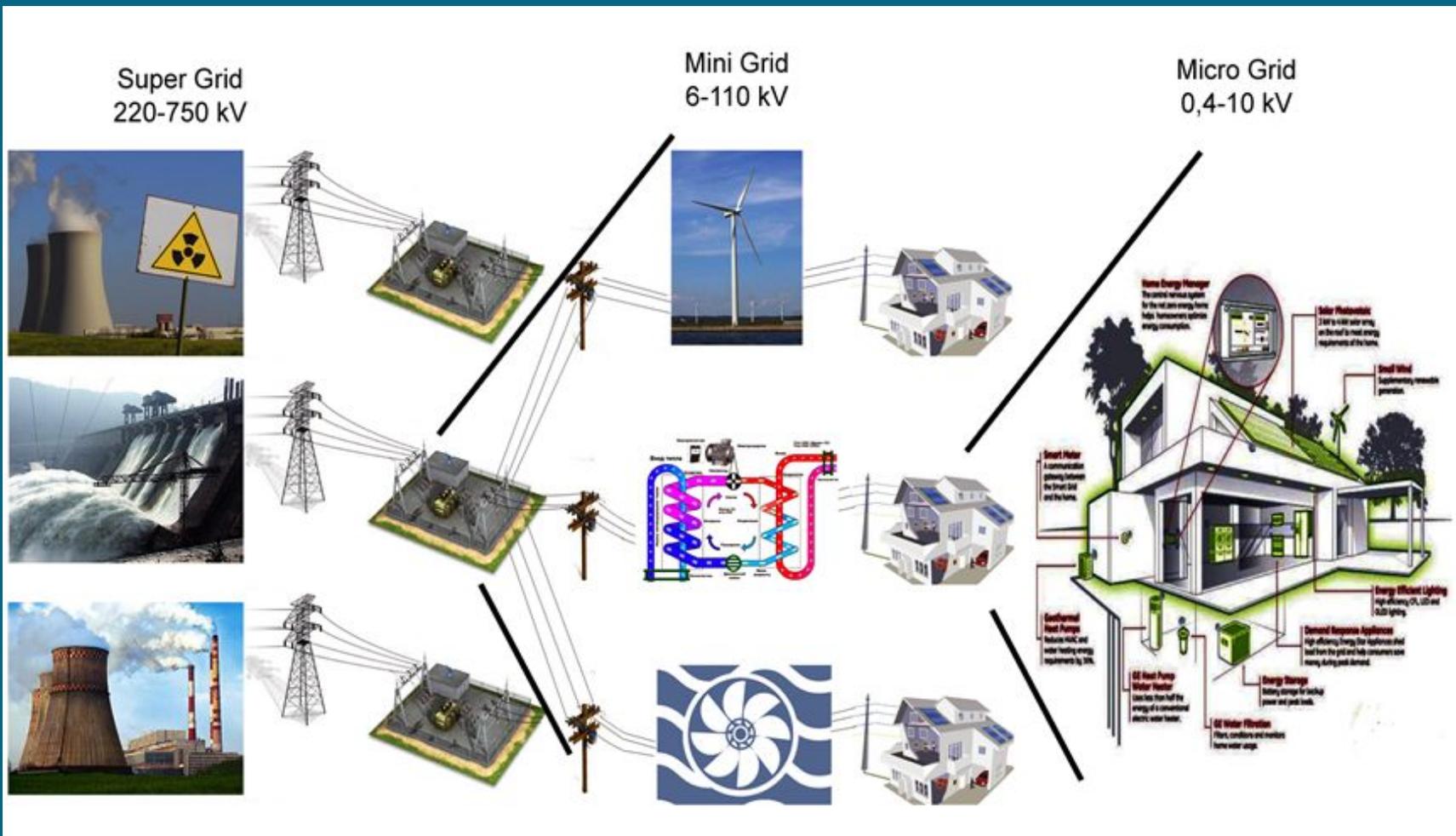
Диаграмма показателей риска для дефицита мощности реконструированной электрической сети





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Супер-мини-микро энергообъединение





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Особенности супер-мини-микро энергообъединений

- Огромное количество элементов с различными физическими свойствами
- Сложная электрическая сеть на различных уровнях напряжений
- Очень разные единичные мощности элементов (генераторов, потребителей, линий) от Вт до ГВт с существенно различными характеристиками
- Широкое использование силовой электроники
- Расширяющееся использование постоянного тока у потребителей
- Высокий уровень автоматизации управления в нормальных и аварийных условиях
- Высокий уровень использования интеллектуальных технологий, особенно для целей управления



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Актуальные проблемы моделирования и управления

- Моделирование новых элементов, работающих совместно с традиционными
- Новые, в том числе интеллектуальные, методы моделирования и имитации больших ЭЭС
- Параллельные и распределенные алгоритмы
- Методы эквивалентирования нелинейных моделей
- Распределенные и иерархические, в том числе интеллектуальные, системы управления
- Оценка рисков для сложных систем
- Методы обоснования решений в реальном времени при больших объемах информации



Новые свойства ЭЭС, определяемые генерацией

- Высокочастотные малые ГТУ, ветроагрегаты подключаются к системе через выпрямительно-инверторные блоки – снижается регулирующий эффект генерации по частоте
- Установки распределенной генерации имеют малые инерционные характеристики ротора и упрощенные системы регулирования – обостряются проблемы устойчивости ЭЭС
- Подключение установок распределенной генерации к распределительной электрической сети требует существенного развития и принципиальной реконструкции систем РЗА



Новые свойства ЭЭС, определяемые электрической сетью

- ❑ Развитие электропередач постоянного тока вследствие использования новых технологий в преобразовательной технике, снижения стоимости, повышения надежности и высокой управляемости ППТ
- ❑ Расширение использования гибких электропередач переменного тока (FACTS) в передающей и распределительной электрических сетях на основе силовой электроники
- ❑ Эти новые технологии радикально повысят надежность и управляемость передающей и распределительной электрических сетей
- ❑ Рост электропотребления при рассредоточении генерации и потребителей по территории приведет к увеличению плотности передающих и распределительных электрических сетей с возможными проблемами ограничения токов к.з., обеспечения устойчивости по напряжению.



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Новые свойства ЭЭС, определяемые электропотреблением

- Новые электроприемники с новыми нагрузочными характеристиками (частотно-регулируемый электропривод; компьютерная, офисная и бытовая техника с импульсными источниками питания, светодиодное освещение и др.) поддерживают неизменной величину потребляемой активной мощности при изменении в широком диапазоне величины напряжения в питающей сети – снижается регулирующий эффект нагрузки по напряжению
- Те же электроприемники, а также большинство электронагревательных приборов сохраняют неизменной потребляемую мощность при изменении частоты в питающей сети – снижается регулирующий эффект нагрузки по частоте
- Появление активных потребителей, самостоятельно оперативно управляющих собственным электропотреблением создает проблемы для диспетчерского управления режимами вследствие неопределенности электропотребления активных потребителей



Новые свойства ЭЭС, определяемые хранением электроэнергии

- Системные накопители электроэнергии с высокоэффективными системами управления на базе силовой электроники способны существенно повысить надежность, устойчивость и управляемость ЭЭС
- Массовое использование электромобилей существенно изменит облик и режимы работы будущих ЭЭС



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Новые решения в конструкции распределительных электрических сетей

Все большее распространение электроприемников и систем хранения электроэнергии, питающихся на постоянном токе, приведет к целесообразности формирования питающих распределенных электрических сетей на постоянном токе



Будущее за постоянным током?

- Широкомасштабное развитие линий постоянного тока
- Вставки постоянного тока для подключения накопителей электроэнергии, ветровых и солнечных электростанций, топливных элементов
- Повышенная эффективность светодиодов и других устройств с преобразователями
- Микросети на постоянном токе
- Преимущества постоянного тока для подземных и подводных кабелей
- Развитие электромобилей
- Частотно-регулируемый электропривод



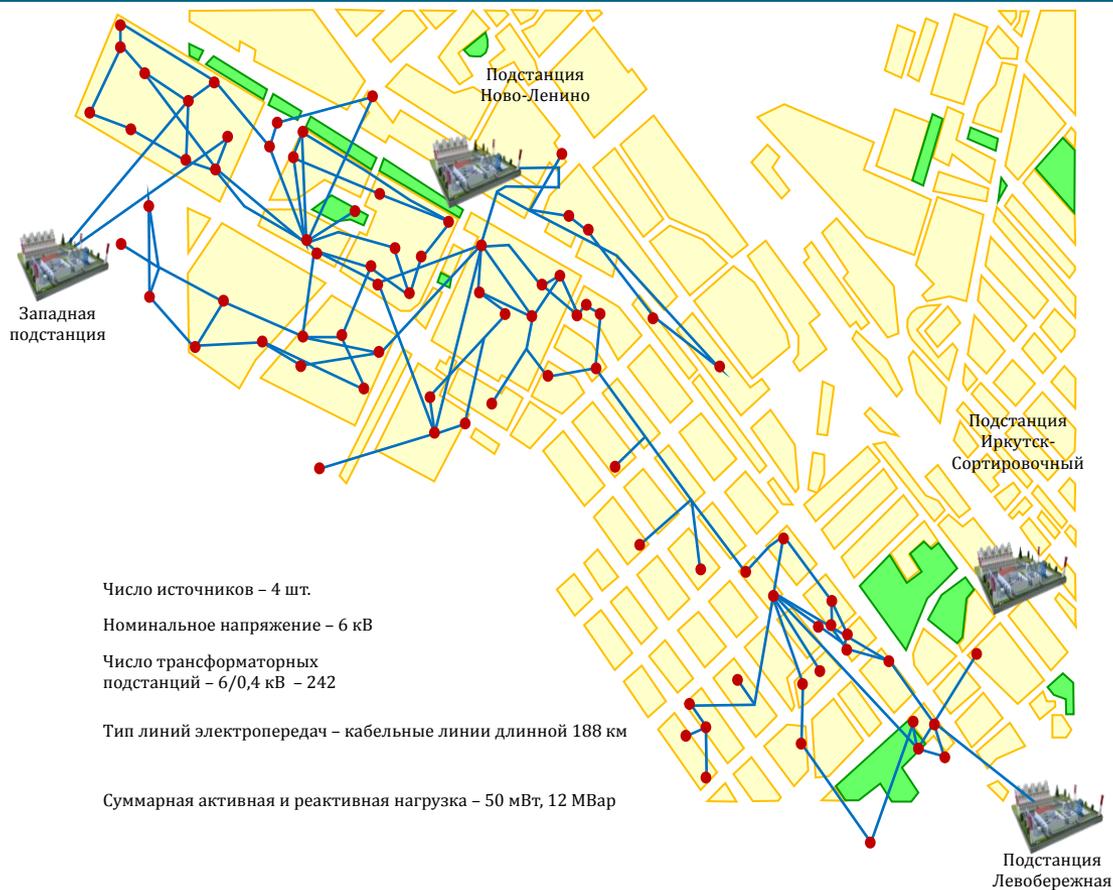
8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Необходимость трансформации принципов управления режимами ЭЭС

- Существующие принципы управления режимами в традиционных ЭЭС учитывают наличие регулирующего эффекта нагрузки по напряжению и частоте и частотных характеристик генерации
- За счет указанных эффектов современные ЭЭС обладают внутренней самоустойчивостью, а системы управления воздействуют при выходе режимных параметров за определенные границы
- В связи с изменением свойств будущих ЭЭС их внутренняя самоустойчивость во многом трансформируется, вследствие чего традиционные принципы управления режимами ЭЭС потребуют существенной модификации и развития



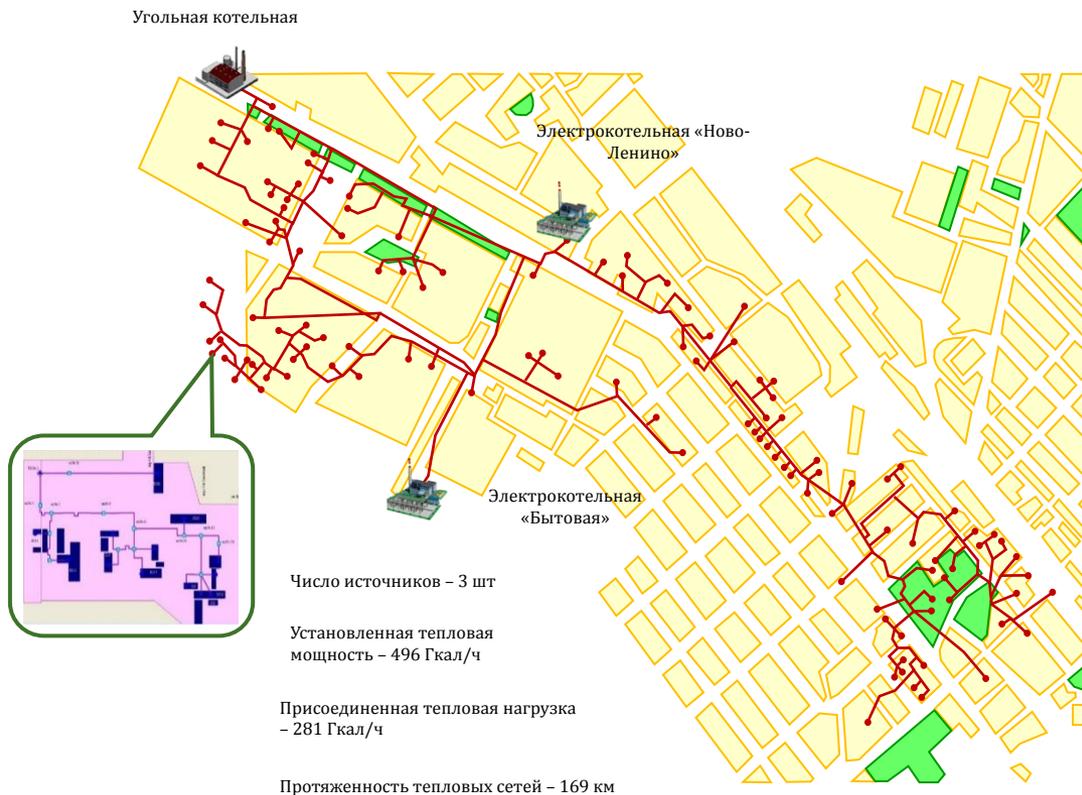
Система электроснабжения района Ново-Ленино г.Иркутска





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

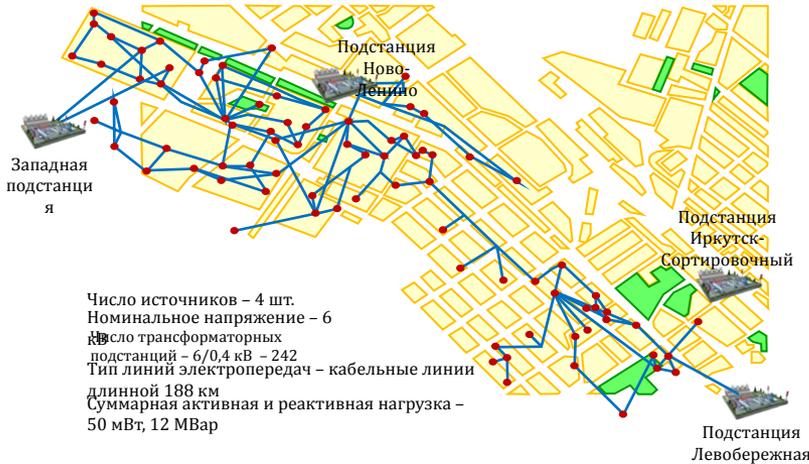
Система теплоснабжения района Ново-Ленино г. Иркутска





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Сценарий развития аварии в интегрированной системе энергоснабжения

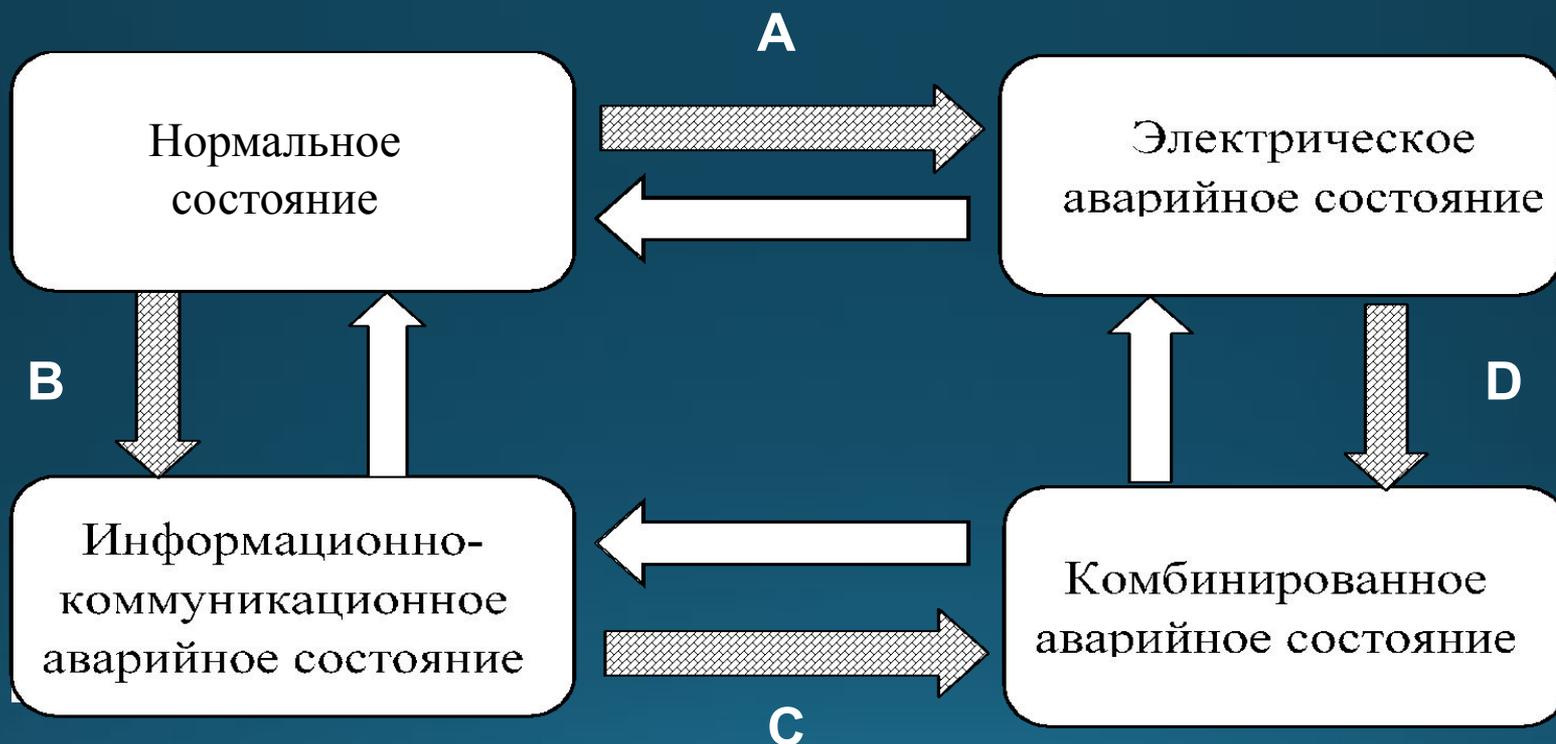


1. Аварий на п/ст. «Ново-Ленино» с потерей питания электрокотельной и образованием дефицита тепла 80 МВт (тепл.)
2. Требуемая тепловая нагрузка частично распределяется между оставшимися тепловыми источниками
3. Ресурсов этих источников и тепловой сети недостаточно, остается дефицит тепловой мощности около 10 МВт (тепл.).
4. Многие потребители в зонах дефицита тепла начинают использовать электронагреватели
5. Электрическая нагрузка увеличивается на 7 МВт
6. Происходит перегрузка линий и трансформаторов электрической сети
7. Потребители в зонах перегрузок отключаются действием защиты от перегрузок



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

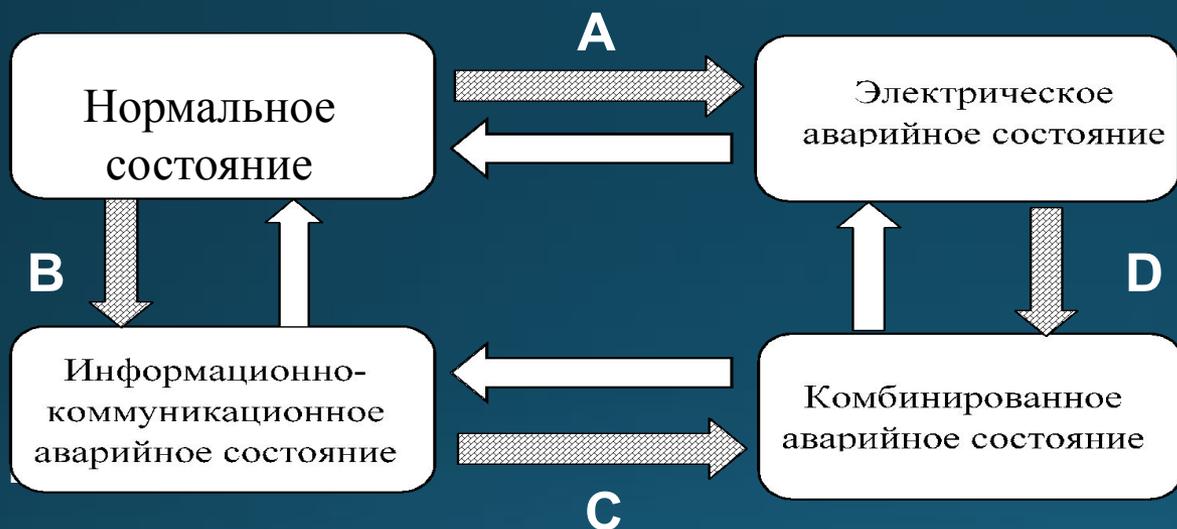
Состояния и переходы кибер-физической системы





8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Состояния и переходы кибер-физической системы



A.1) Отказ или авария одного или более компонентов ЭЭС

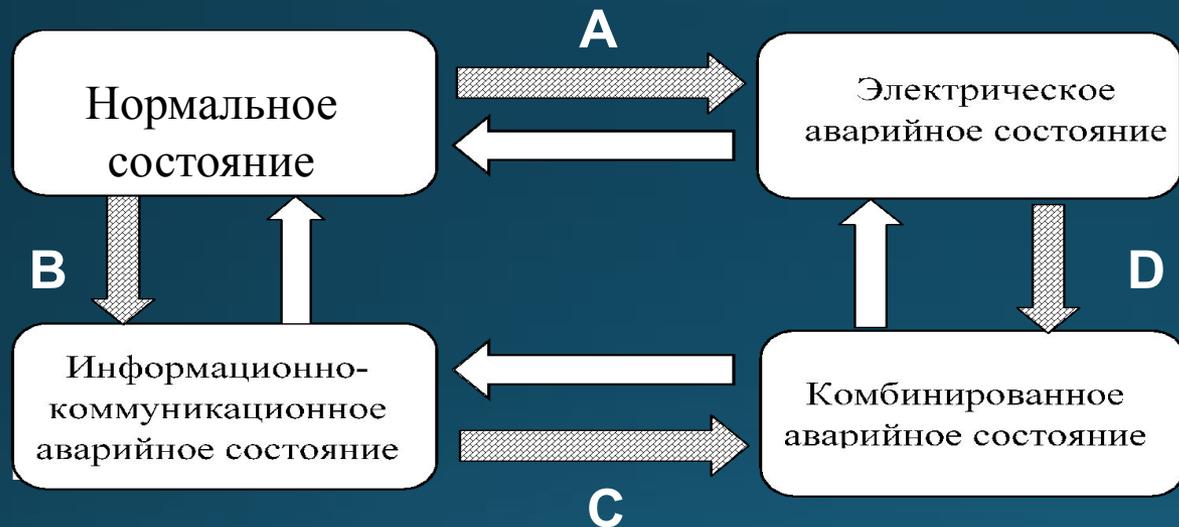
A.2) Неожиданное большое или быстрое изменение нагрузки

A.3) Ошибка оператора в его реакции на изменения в системе



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Состояния и переходы кибер-физической системы

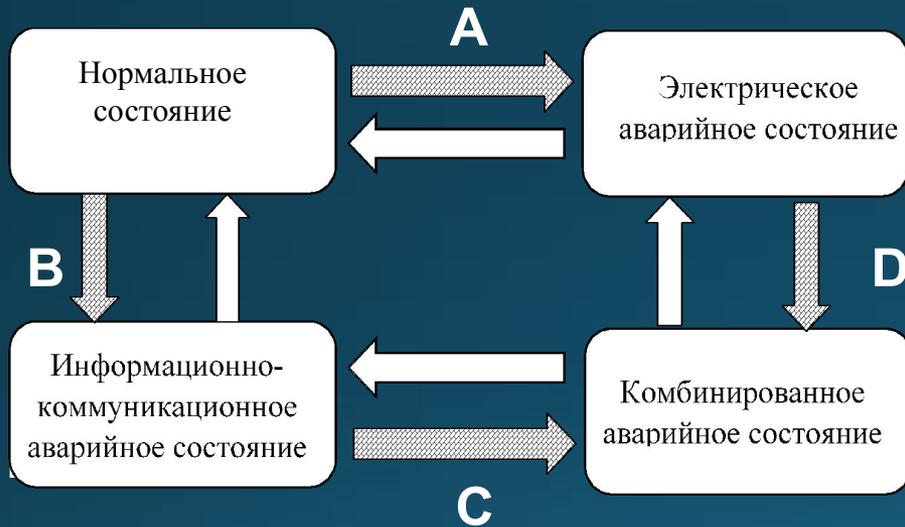


- В.1) Отказ любого элемента в измерительной системе;
- В.2) Отказ любого элемента в системе телеуправления (например, в системе противоаварийного управления);
- В.3) Отказ любого элемента в локальной системе управления (например, в системах автоматического управления возбуждением и скоростью генератора);
- В.4) Отказ в системе коммуникаций между электростанцией или подстанцией и центром управления);
- В.5) Отказ части или всей компьютерной системы, которую использует оператор для мониторинга и управления ЭЭС.



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Состояния и переходы кибер-физической системы

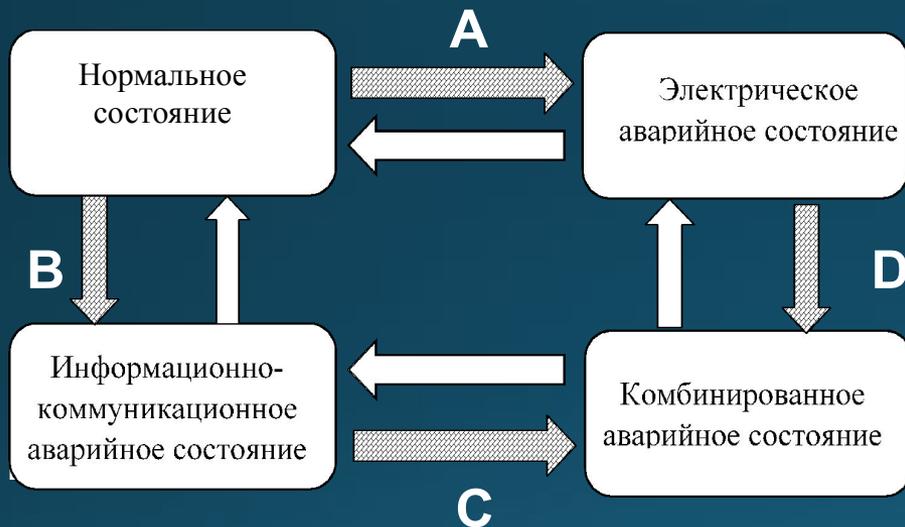


- С.1) Некоторые компоненты информационной подсистемы перестают функционировать вследствие перерыва или ограничения их питания электроэнергией;
- С.2) Скрытый отказ релейной защиты является инициирующим событием для непредвиденного отключения одного (или более) электрического компонента;
- С.3) Повреждение электрического компонента, послужившего причиной перехода из нормального в электрически аварийное состояние, оказалось настолько большим, что из-за потери питания вывело из строя систему диспетчерского управления;
- С.4) В результате повреждения электрического компонента (или нескольких) система оказалась в состоянии, близком к пределу устойчивости, вследствие чего алгоритм оценки состояния ЭЭС дал несошедшееся решение и тем самым ложную информацию, послужившую основой для неверного управляющего воздействия оператора;
- С.5) В информационной подсистеме произошел отказ после перехода физической подсистемы из нормального в аварийное состояние по независимой от этого перехода причине.



8. ПРИМЕРЫ СИСТЕМНЫХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Состояния и переходы кибер-физической системы



- D.1) Электрическая система перешла в аварийное состояние вследствие ослабления информационно-коммуникационной подсистемы, которая не дала оператору сигнал на реализацию требуемых корректирующих действий
- D.2) Аналогично, отказ информационно-коммуникационной подсистемы привел к потере информации для оператора о необходимости корректирующих действий в физической подсистеме;
- D.3) На основе некорректной информации или ложного совета информационно-коммуникационной подсистемы оператор предпринял одно (или более) действие, которое ухудшило состояние физической системы;
- D.4) Отказ компонента информационно-коммуникационной подсистемы вызвал переход физической системы в аварийное состояние;
- D.5) Имея доступ к информационно-коммуникационной подсистеме, хакер реализует воздействия, приводящие к аварийному состоянию физической системы;
- D.6) Возникают независимые события, приводящие к аварийным состояниям физическую и информационно-коммуникационную подсистемы одновременно.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО
РАН

**КНИГА Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА
«СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В
ЭНЕРГЕТИКЕ»: КЛЮЧЕВЫЕ
ПОЛОЖЕНИЯ И ВЗГЛЯД ИЗ НАШИХ
ДНЕЙ**



ПРЕДПОСЫЛКИ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

- Развитие энергетики и создание к последней четверти XX-го столетия территориально распределенных больших систем энергетики и топливно-энергетического комплекса страны
- Разработка Г.М. Кржижановским комплексного энергетического метода исследования и его использование и развитие, начиная с плана ГОЭЛРО
- Использование в качестве методической основы системных исследований в энергетике фундаментальных понятий материалистической диалектики и прежде всего – понятий единства, целостности и развития
- Использование базовых положений и принципов общих системных исследований и системного анализа
- Бурное развитие вычислительной техники, методов математического моделирования и оптимизации во второй половине XX-го столетия



ГЛАВНЫЕ ЗАДАЧИ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

- Изучение тенденций развития энергетики как совокупности больших систем, а также свойств этих систем и научных основ управления ими
 - Разработка необходимых для этого методов и средств
- Решение (с использованием методов системных исследований) фундаментальных межотраслевых проблем энергетики, в том числе энергоэкологических
- Научно-обоснованное прогнозирование развития энергетики



ГЛАВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

☞ Теоретическая и методическая часть

- изучение природы исследуемых систем, объективных тенденций их развития, их свойств, особенностей проявления тенденций и свойств
- создание и совершенствование методов исследования систем, их моделей и процедур принятия решений
- создание и совершенствование средств изучения систем (сбора, обработки, передачи, анализа информации, программных комплексов и др.)

☞ Приложение системных исследований к решению фундаментальных проблем энергетики

- оптимальное управление в энергетике
- решение основных межотраслевых комплексных проблем энергетики
- долгосрочное прогнозирование энергетики



КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

- ❖ Главные свойства систем энергетики
- ❖ Цели и критерии принятия решений при оптимизации развития систем энергетики
- ❖ Влияние неполноты информации на решение энергетических задач
- ❖ Математические модели оптимального управления системами энергетики
- ❖ Автоматизированные системы управления в энергетике
- ❖ Задачи долгосрочного прогнозирования в энергетике



ГЛАВНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

- **Структурные свойства**

- Централизация иерархической структуры систем

- **Свойства движения (в т.ч. развития)**

- Динамичность
- Гибкость – Инерционность, Адаптация, Надежность
- Экономичность

- **Свойства управляемости**

- Недостаточная определенность оптимальных решений
- Многокритериальность выбора решений

- **Специфические свойства систем энергетики**

- Взаимозаменяемость элементов и продукции
- Универсальность и значимость продукции
- «Активность» в экономике
- Масштабность и сложность структур систем
- Материальность основных связей
- Непрерывность, часто неразрывность процессов
- Двойственность систем энергетики



- ✦ Единственный аппарат изучения систем энергетики и управления ими. Его роль возрастает в связи с ростом сложности систем и проблем
- ✦ Ввиду сложности систем необходимо квалифицированно упрощать модель без ущерба для точности результатов. Иерархический принцип построения моделей с использованием методов декомпозиции и агрегирования (эквивалентирования). Если модель сформирована приближенно, то никакие последующие математические преобразования не смогут дать содержательных результатов
- ✦ Соотношение точности результатов расчетов с точностью используемой для этого информации

Если расчет ведется с точностью до 1%, то третья цифра, получаемая в результате расчета, уже является лишней

Чем больше заблаговременность расчетов, тем меньше оснований для большой территориальной дифференциации развития энергетики



ЗАДАЧИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

- **Выявление основных объективных тенденций развития энергоснабжения народного хозяйства**
- **Определение эффективных направлений и уровней электрификации и моторизации экономики и социальной сферы**
- **Выявление научной концепции и ведущих направлений НТП в энергетике**
- **Выбор наилучших пропорций получения и переработки энергоресурсов, их распределение по районам страны и категориям потребителей**
- **Оценка основных взаимных требований развития энергетического хозяйства и смежных отраслей экономики**
- **Разработка главных комплексных программ развития энергетики**
- **Обоснование ведущих направлений развития энергетической науки с определением ее главных задач**

A scenic view of a coastline. In the foreground, there are green pine trees. The middle ground shows a blue sea with a rocky cliffside on the left and a small, pointed rock formation in the distance. The sky is clear and blue.

Благодарю за внимание!