



Методологический семинар
**Предлагаемый цикл докладов по интеллектуальным
энергетическим системам**

1. Интеллектуальные электроэнергетические системы (*Н.И.Воропай*)
2. Интеллектуальные трубопроводные системы (*Н.Н.Новицкий*)
3. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы (*В.А.Стенников*)
4. Элементы методологии исследований интеллектуальных энергетических систем (*Н.И.Воропай, В.А.Стенников*)
5. Системный анализ инновационных энергетических технологий (*А.М.Клер*)
6. Информационно-коммуникационные технологии в интеллектуальной энергетике (*Л.В.Массель*)
7. Математические и эвристические методы оптимизации и управления в интеллектуальной энергетике (*О.В.Хамисов*)
8. Методы обоснования развития интеллектуальных энергетических систем и управления ими (*В.А.Стенников*)
9. Методы исследования и обеспечения надежности интеллектуальных энергетических систем и энергетической безопасности (*С.М.Сендеров*)
10. Комплексные проблемы интеллектуальной энергетики и энергетическая политика (*Б.Г.Санеев*)



Интеллектуальные электроэнергетические системы

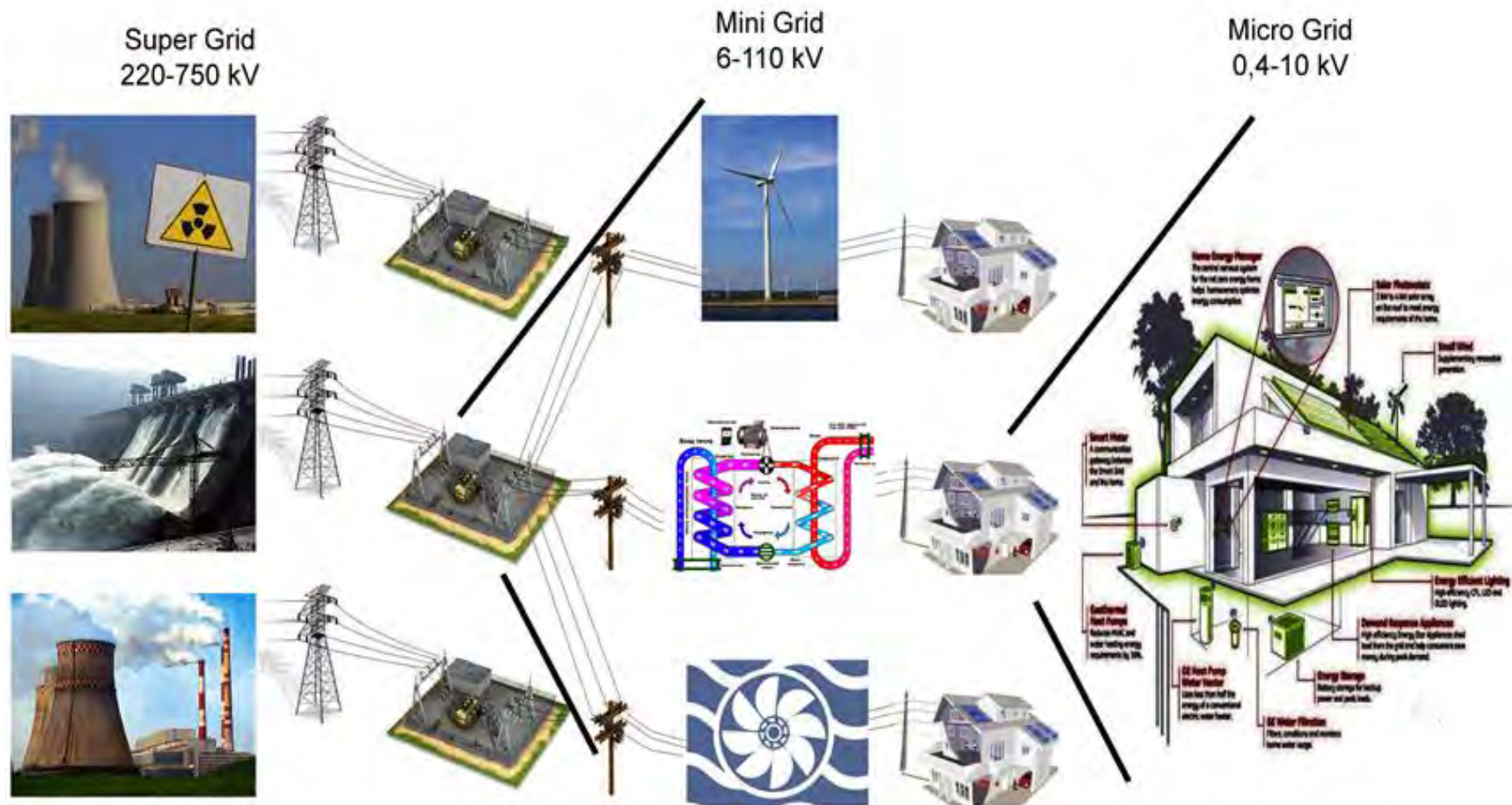
Н.И.Воропай



- ✓ *Тенденции и особенности развития энергетических систем*
- ✓ **Инновационные технологии интеллектуальной энергетики**
- ✓ **Достоинства концепции интеллектуальной энергетической системы**
- ✓ **Примеры решения задач с использованием интеллектуальных технологий и средств**
- ✓ **Новые свойства перспективных электроэнергетических систем и актуальные направления исследований**



Супер-мини-микро энергообъединение





Ключевые факторы развития и функционирования энергетики будущего

- ✓ Внутренние для энергетики инновационные процессы
 - Интенсивное развитие инновационных энергетических технологий
 - Масштабное применение интеллектуальных информационно-коммуникационных технологий и средств для управления энергетическими объектами и системами
- ✓ Принципиальное изменение парадигмы развития и функционирования энергетических систем как клиентоориентированных инфраструктурных систем для надежного и эффективного обслуживания отраслей экономики и социальной сферы



Новые вызовы времени

- **Продолжающееся формирование агломераций вокруг крупных городов**
- **Повышение статуса и жизненного уровня в средних и небольших городах**
- **Увеличение доли электроэнергии как наиболее универсального энергоресурса в структуре конечного энергопотребления**
- **Повышение эффективности использования электроэнергии**
- **Ужесточение экологических ограничений**



Новые вызовы времени

- Существенно возросшие и трансформирующиеся требования потребителей к электроснабжению
- Изменение градостроительной политики
- Снижение энергоемкости продукции, развитие наукоемких отраслей
- Приоритетное развитие регионов Сибири и Дальнего Востока



СОДЕРЖАНИЕ

- ✓ Тенденции и особенности развития энергетических систем
- ✓ *Инновационные технологии интеллектуальной энергетики*
- ✓ Достоинства концепции интеллектуальной энергетической системы
- ✓ Примеры решения задач с использованием интеллектуальных технологий и средств
- ✓ Новые свойства перспективных электроэнергетических систем и актуальные направления исследований



Инновационные технологии интеллектуальной энергетики

- Инновационные средства производства, передачи, распределения, накопления и потребления энергии
- +
- Новые средства измерений, передачи, обработки и представления информации
- +
- Современные информационные и компьютерные технологии
- +
- Новые методы и средства управления режимами энергетических систем
- +
- Активные потребители



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**

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**



Новые средства, обеспечивающие интеллектуальность ЭЭС (1)

- **Силовые**
 - распределенная генерация
 - FACTS
 - силовая электроника
 - ППТ
 - накопители энергии
 - сверхпроводимость
 - виртуальные электростанции
- **для измерения, обработки, передачи и представления информации**
 - PMU и концентраторы данных через спутниковую навигационную сеть
 - оптоволокно
 - радиосвязь
 - цифровая основа устройств
 - информационные технологии
 - Интернет



Новые средства, обеспечивающие интеллектуальность ЭЭС (2)

- системы мониторинга и управления
 - искусственный интеллект
 - сетевые подходы к мониторингу и координации управления
 - новые методы теории управления
 - новые возможности локального управления на основе искусственного интеллекта и информационных технологий
 - Интернет
- для обеспечения активности потребителей
 - цифровые системы сбора, обработки и представления информации
 - Интернет
 - тарифные и ценовые механизмы



Инновационные технологии и компоненты микро-системы

Распределенная генерация

- микротурбина
- топливный элемент
- солнечная батарея
- ветровой генератор
- микросеть

Распределенные накопители электрической энергии

- серно-натриевый
- ванадий-редоксный
- никель-кадмиевый
- суперконденсаторы
- сверхпроводниковый накопитель
- электромеханический накопитель

Сложные проводники

- алюминиевый провод с композитным сердечником
- сталеалюминиевый термостойкий провод
- термостойкий провод с композитным сердечником
- компактный провод плотной упаковки с низким аэросопротивлением



Опыт применения АББЭ

Тип электролита	Объект	Мощность, МВт	Время работы, мин.	Год установки
Серно-кислотный	1. BEWAG, электроснабжение Западного Берлина.	8,5	20	1990
	2. Резервирование и поддержание частоты маломощной сети Пуэрто-Рико.	20	15	1998
	3. Чинно (Калифорния), различные объекты для исследования возможностей регулирования нагрузки, частоты, напряжения и реактивной мощности	10	240	1986
Никель-кадмиевый	GVEA, обеспечение бесперебойного электроснабжения прибрежных районов Аляски вблизи г. Анкоридж	40	15	2003
Серно-натриевый	Ветряная станция Rokkacho, Япония. Всего внедрено 100 объектов	34	600	2008 (самый крупный)
Цинк-бромный	ПС Detroit Edison Site, Мичиган. Для поддержания напряжения собственных нужд	0,4	480	2001
Ванадий-редоксный	Один из крупных высокотехнологичных заводов в Японии. Выравнивание графика нагрузок	1,5	60	2001

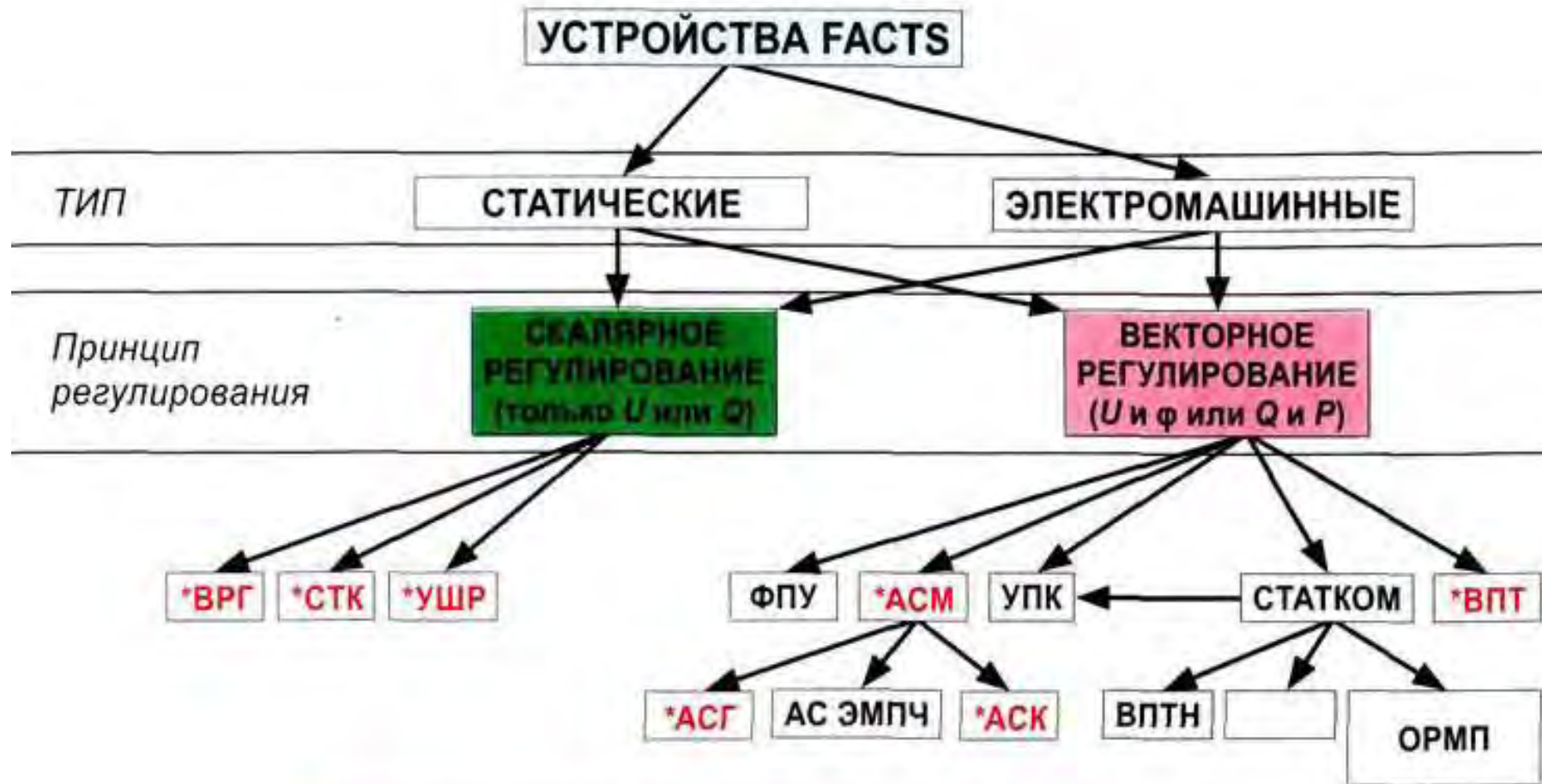


Интегрированные коммуникации

Название технологии	Основные компоненты
Беспроводные технологии	• мультиадресная радиосистема; • сети оповещения; • радиосистемы расширенного спектра; • WiFi; • WiMAX; • ячеистое строение будущего поколения (Next generation cellular, <i>англ.</i>); • множественный доступ с разделением по времени; • множественный доступ с кодовым разделением (Code Division Multiple Access — CDMA, <i>англ.</i>); • малый спутниковый терминал
Другие технологии	• Интернет нового поколения (Internet-2); • высокочастотная связь по проводам ЛЭП (Broadband over Power Line — BPL, <i>англ.</i>); • сеть с доведением оптического кабеля до пользователя; • оптоволоконный коаксиальный кабель; • радиочастотная идентификация (Radio Frequency Identification — RFID, <i>англ.</i>)



Классификация устройств FACTS в России



*Производство этого оборудования освоено в России.



- ✓ Тенденции и особенности развития энергетических систем
- ✓ Инновационные технологии интеллектуальной энергетики
- ✓ *Достоинства концепции интеллектуальной энергетической системы*
- ✓ Примеры решения задач с использованием интеллектуальных технологий и средств
- ✓ Новые свойства перспективных электроэнергетических систем и актуальные направления исследований

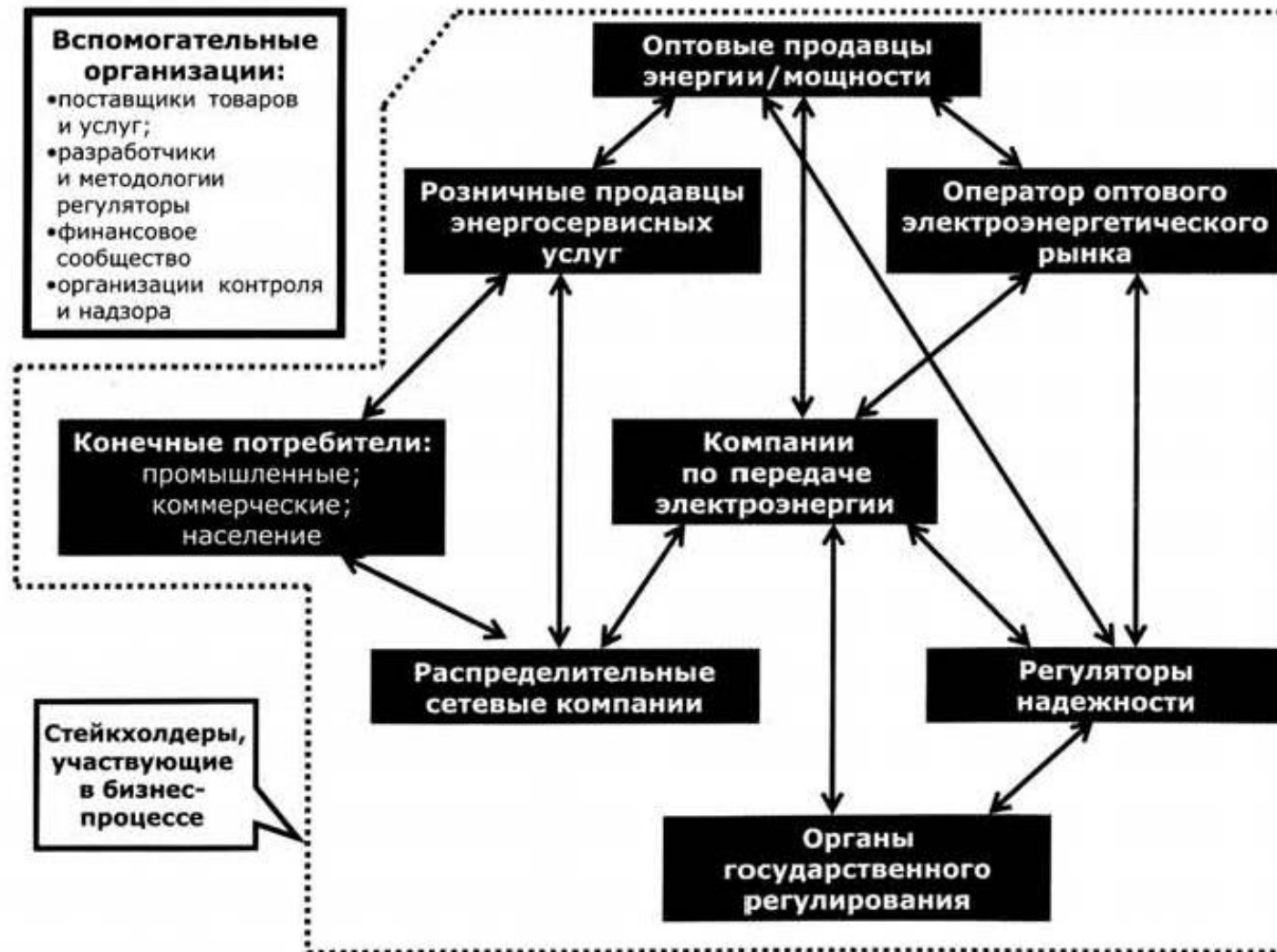


Сравнительная характеристика функциональных свойств сегодняшней энергетической системы и энергетической системы на базе концепции Smart Grid

Энергетическая система сегодня	Энергетическая система на базе концепции Smart Grid
Односторонняя коммуникация между элементами или ее отсутствие	Двусторонние коммуникации
Централизованная генерация — сложно интегрируемая распределенная генерация	Распределенная генерация
Топология — преимущественно радиальная	Преимущественно сетевая
Реакция на последствия аварии	Реакция на предотвращение аварии
Работа оборудования до отказа	Мониторинг и самодиагностика, продлевающие «жизнь» оборудования
Ручное восстановление	Автоматическое восстановление — «самолечащиеся сети»
Подверженность системным авариям	Предотвращение развития системных аварий
Ручное и фиксированное выделение сети	Адаптивное выделение
Проверка оборудования по месту	Удаленный мониторинг оборудования
Ограниченный контроль перетоков мощности	Управление перетоками мощности
Недоступная или сильно запоздавшая информация о цене для потребителя	Цена в реальном времени



Стороны, заинтересованные в развитии концепции Smart Grid в США





Приоритеты развития Smart Grid в странах ЕС





Последовательность реализации основных этапов развития технологий и компетенций Smart Grid в США





Эффекты от внедрения проекта Telegestore





Ожидаемые выгоды при реализации концепции Smart Grid в США

ЭЭС сегодня	Источник эффекта	ЭЭС на базе концепции Smart Grid
Менее 13 %	Доля используемых возобновляемых источников энергии	Более 30%
Менее 1 %	Уровень использования генерации потребителей	Более 10%
50 %	Уровень использования активов магистральных сетей	80%
30 %	Уровень использования активов распределительных сетей	80%
47 %	Уровень участия потребителя	90%
0,41	Энергоемкость ВВП (кВт·ч / \$ВВП)	0,2



Что дает интеллектуализация ЭЭС (1)

- интеграцию управления режимами ЭЭС
 - за счет сетевой (распределенной) координации мониторинга и управления распределенными средствами
 - за счет усиления координации планирования режимов, оперативного и автоматического управления ими
- усиления роли управления on-line
 - оперативного
 - автоматического
- радикальное повышение управляемости ЭЭС и за счет этого обеспечения устойчивости и живучести системы



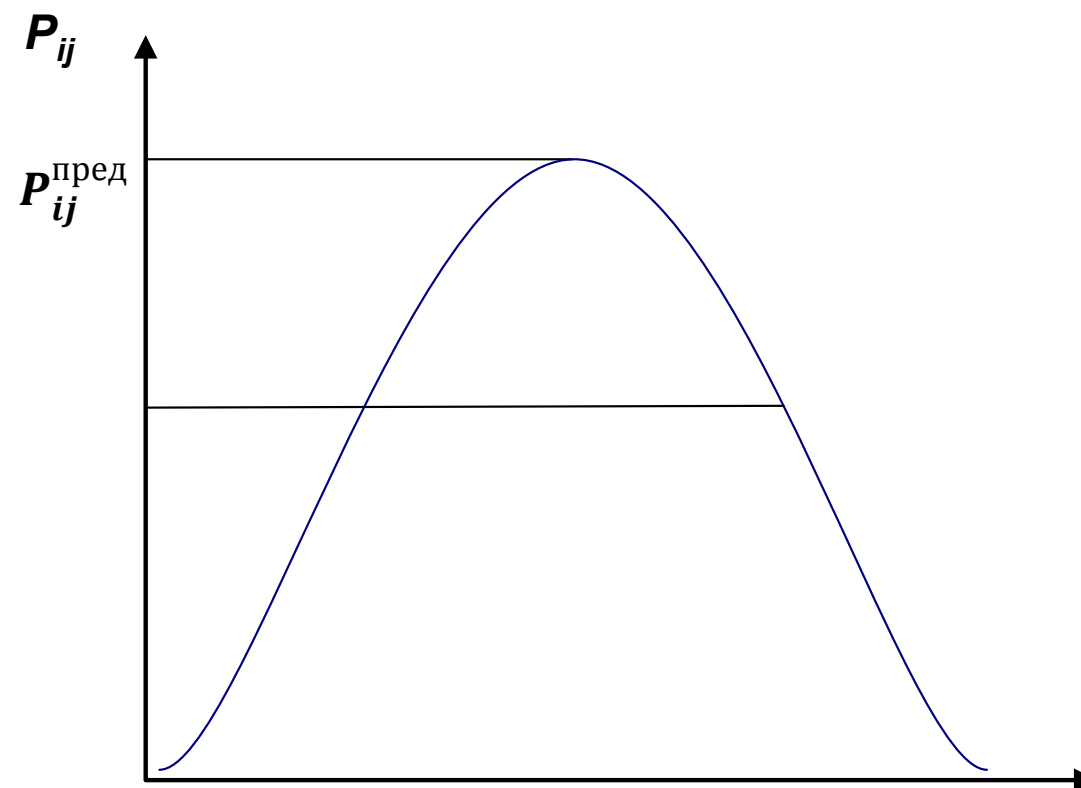
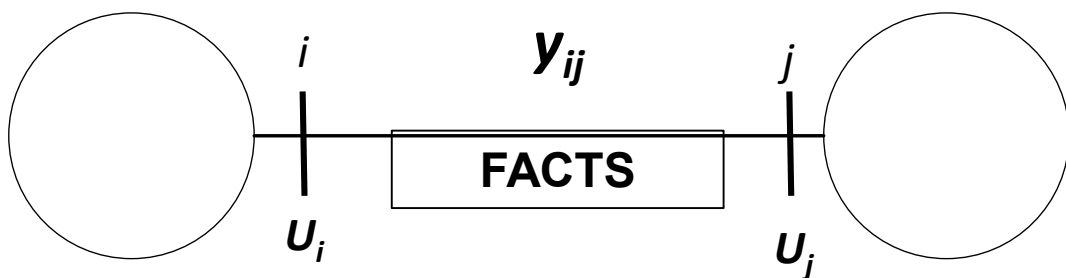
Что дает интеллектуализация ЭЭС (2)

- **снижение нормируемых запасов пропускных способностей связей**
- **снижение уровня необходимых резервов генерации**
- **повышение степени использования пропускных способностей электрической сети**
- **сокращение необходимости ввода новой генерации за счет более эффективного использования электрической сети и активности потребителей**



Повышение степени использования пропускных способностей электрической сети

$$P_{ij}^{\text{пред}} = U_i U_j y_{ij}$$





Основные вызовы, порождаемые технологией интеллектуальной ЭЭС

- ➡ **Изменение свойств объектов при использовании силовой электроники, вследствие изменения структуры ЭЭС, появления новых элементов**
- ➡ **Повышение непредсказуемости и динамичности режимов**
- ➡ **Кибербезопасность (Cyber Security)**



Стимулирование развития Smart Grid в мире

Китай – 70 млрд. долл. США

США – 19 млрд. долл. США

Индия – 10 млрд. долл. США

Европейский Союз – 7 млрд. долл. США

Великобритания – 3 млрд. долл. США

Австрия – 1 млрд. долл. США

Канада – 0,5 млрд. долл. США

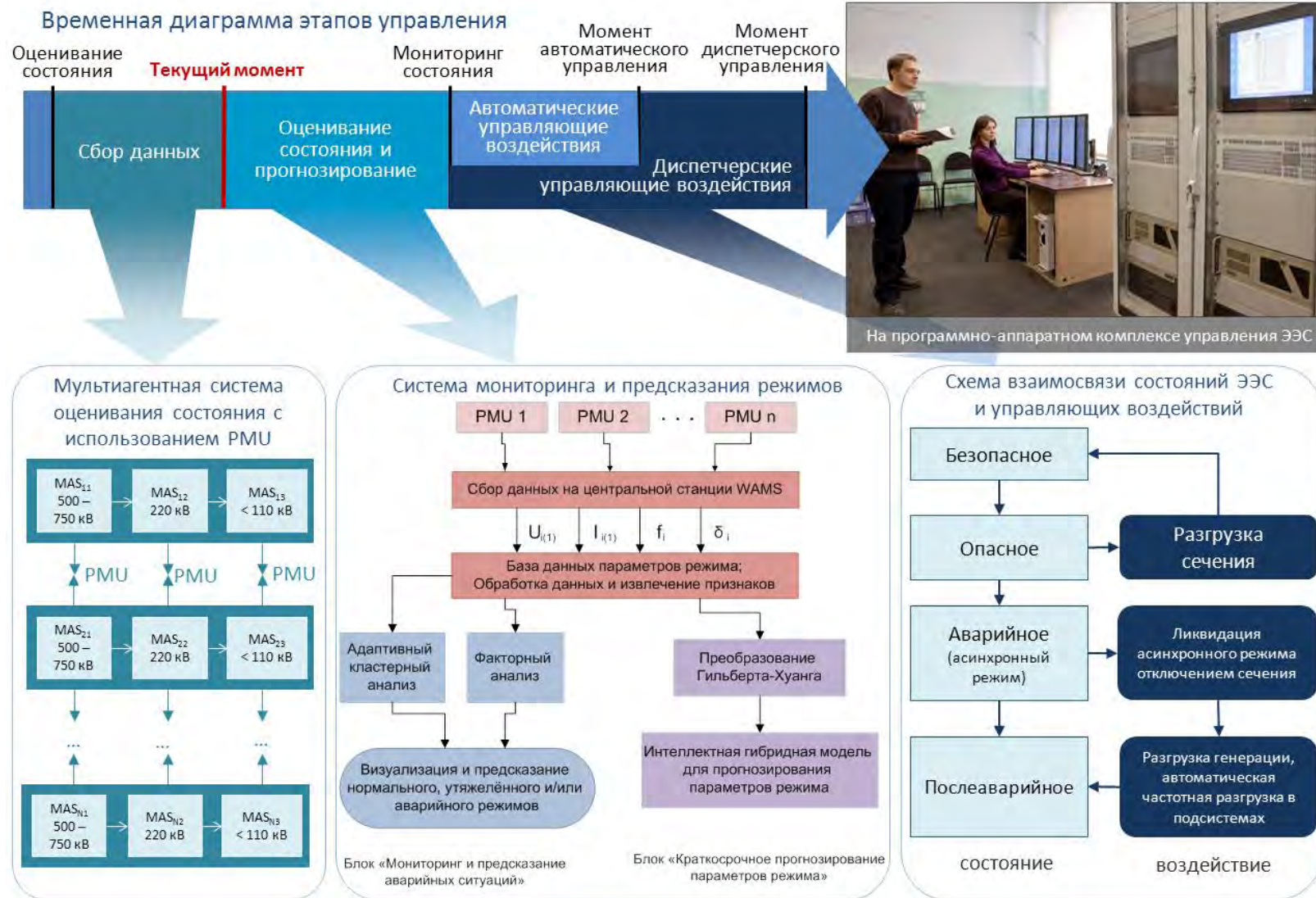
Южная Корея – 0, 3 млрд. долл. США



- ✓ Тенденции и особенности развития энергетических систем
- ✓ Инновационные технологии интеллектуальной энергетики
- ✓ Достоинства концепции интеллектуальной энергетической системы
- ✓ *Примеры решения задач с использованием интеллектуальных технологий и средств*
- ✓ Новые свойства перспективных электроэнергетических систем и актуальные направления исследований

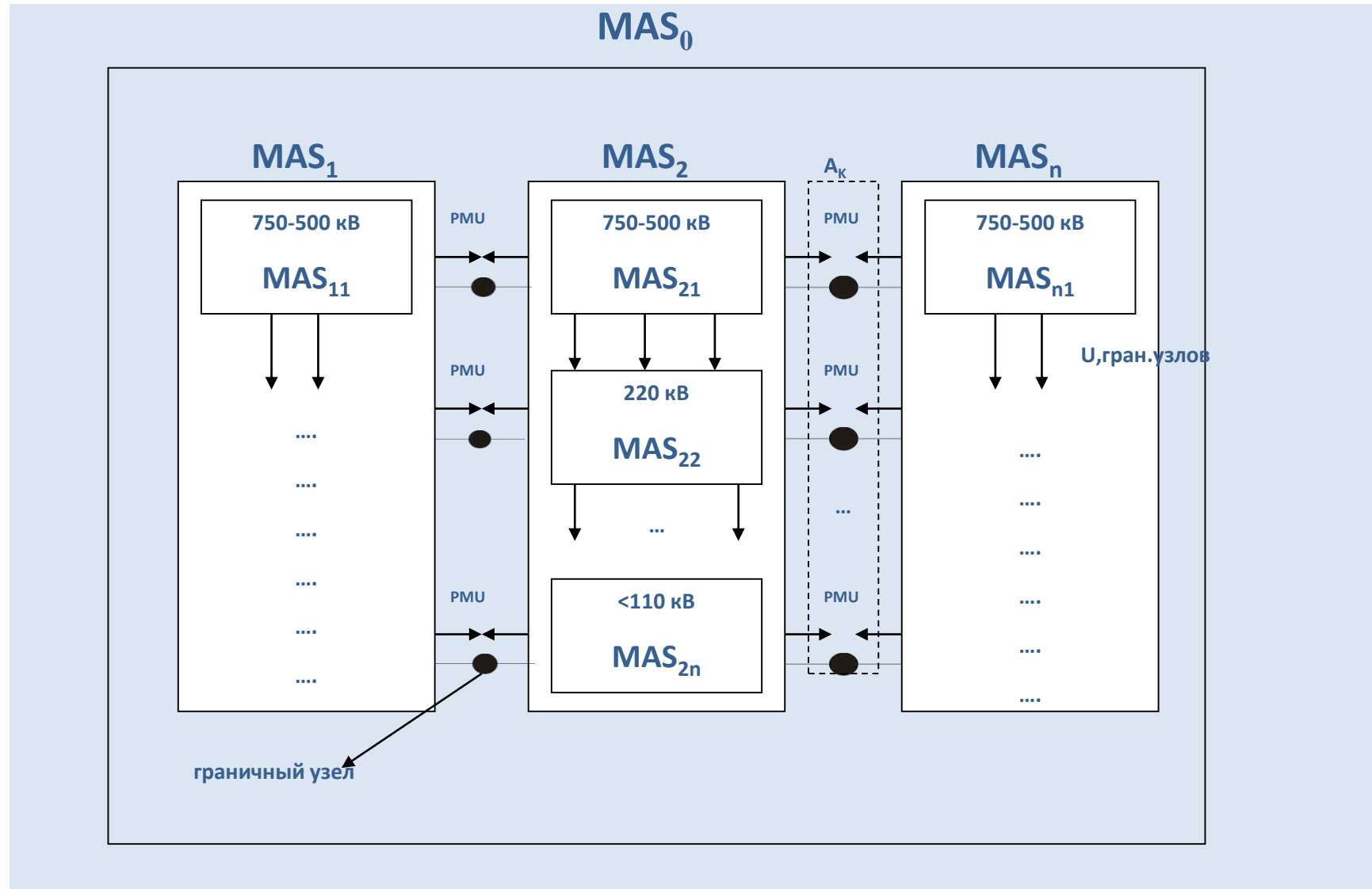


Временная диаграмма этапов управления режимами ЭЭС





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



Пример . Схема 328 узлов, 420 связей, 1306 ТИ

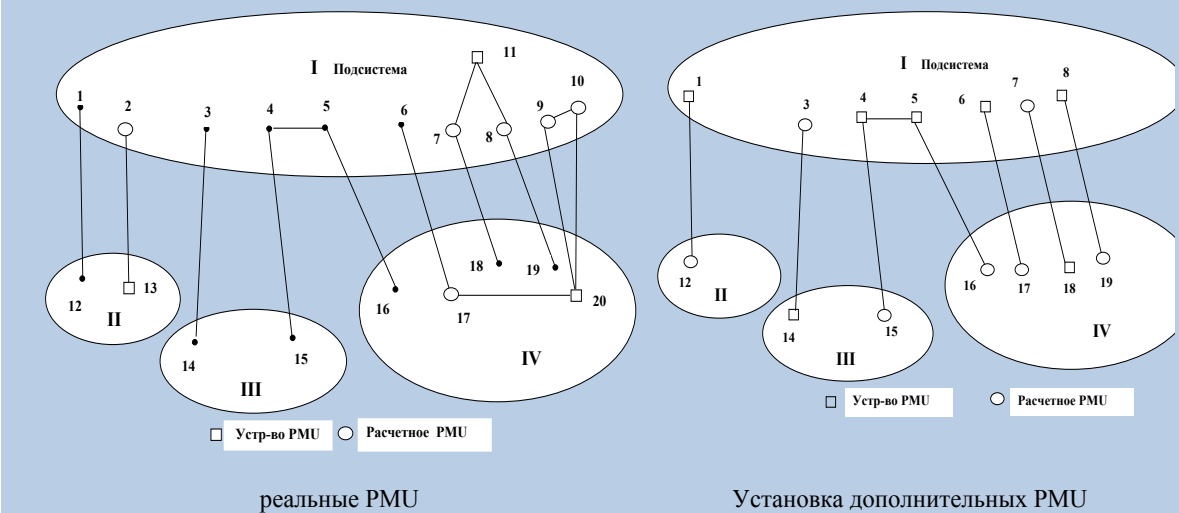
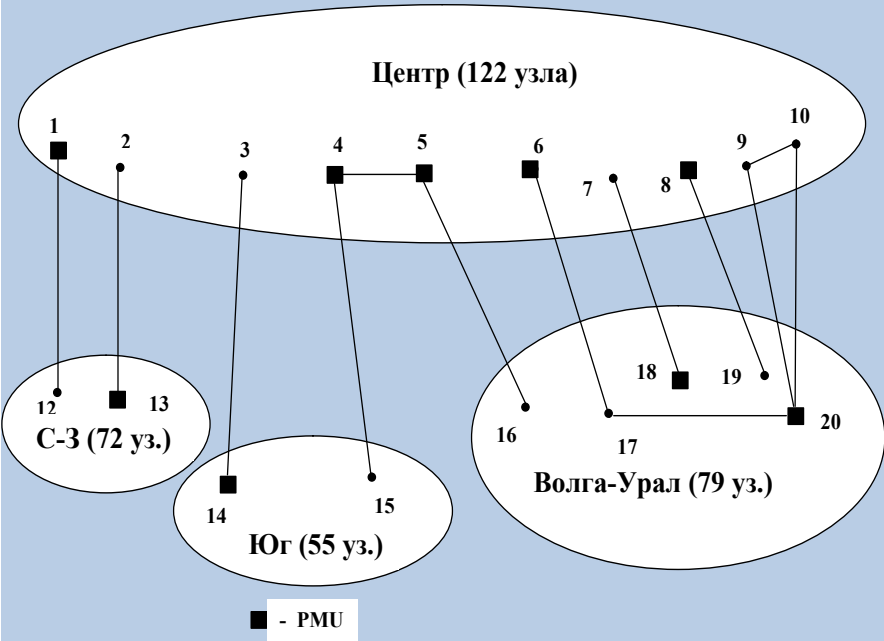


Схема	Время расчета, с
Полная схема	3,07
Центр	1,42
Северо-Запад	0,93
Юг	0,71
Волга-Урал	0,6



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

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

$$\varphi = \sum_{i=1}^m \frac{(\overline{y_i} - y_i(\mathfrak{E}))^2}{\sigma_i^2} \rightarrow \min$$

Целевая функция ОС φ	φ без установки PMU	φ при установке PMU
φ_{Σ}	151141	112346
φ_F	136660	94075
φ_Q	6956	5022
φ_U	7524	6248



Формирование гибридной модели для краткосрочного прогнозирования параметров режима ЭЭС

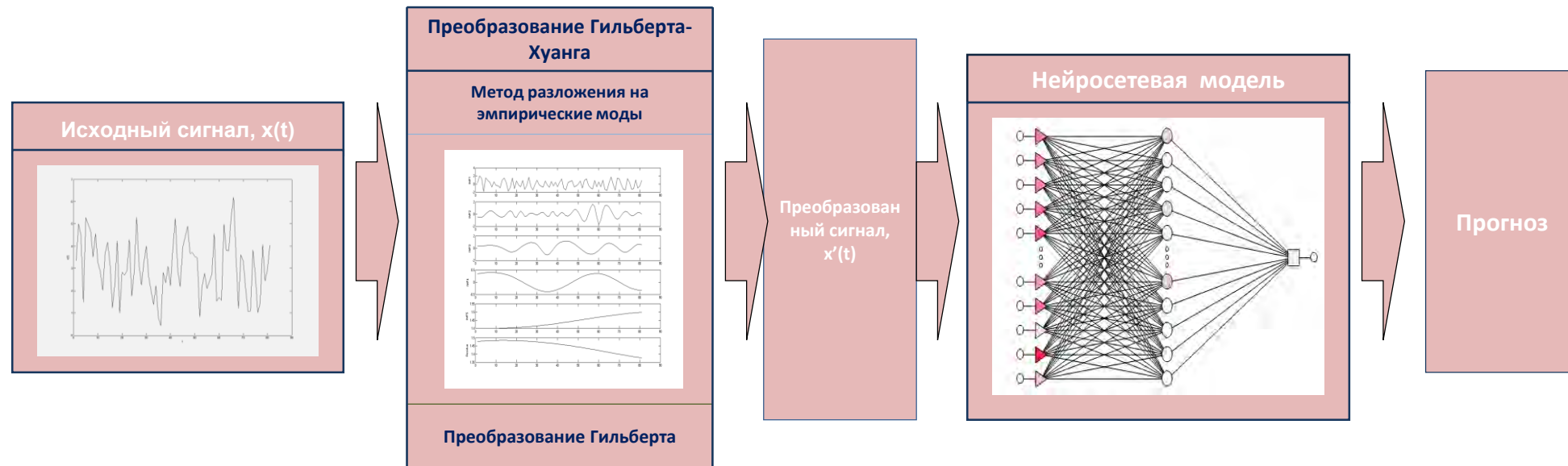
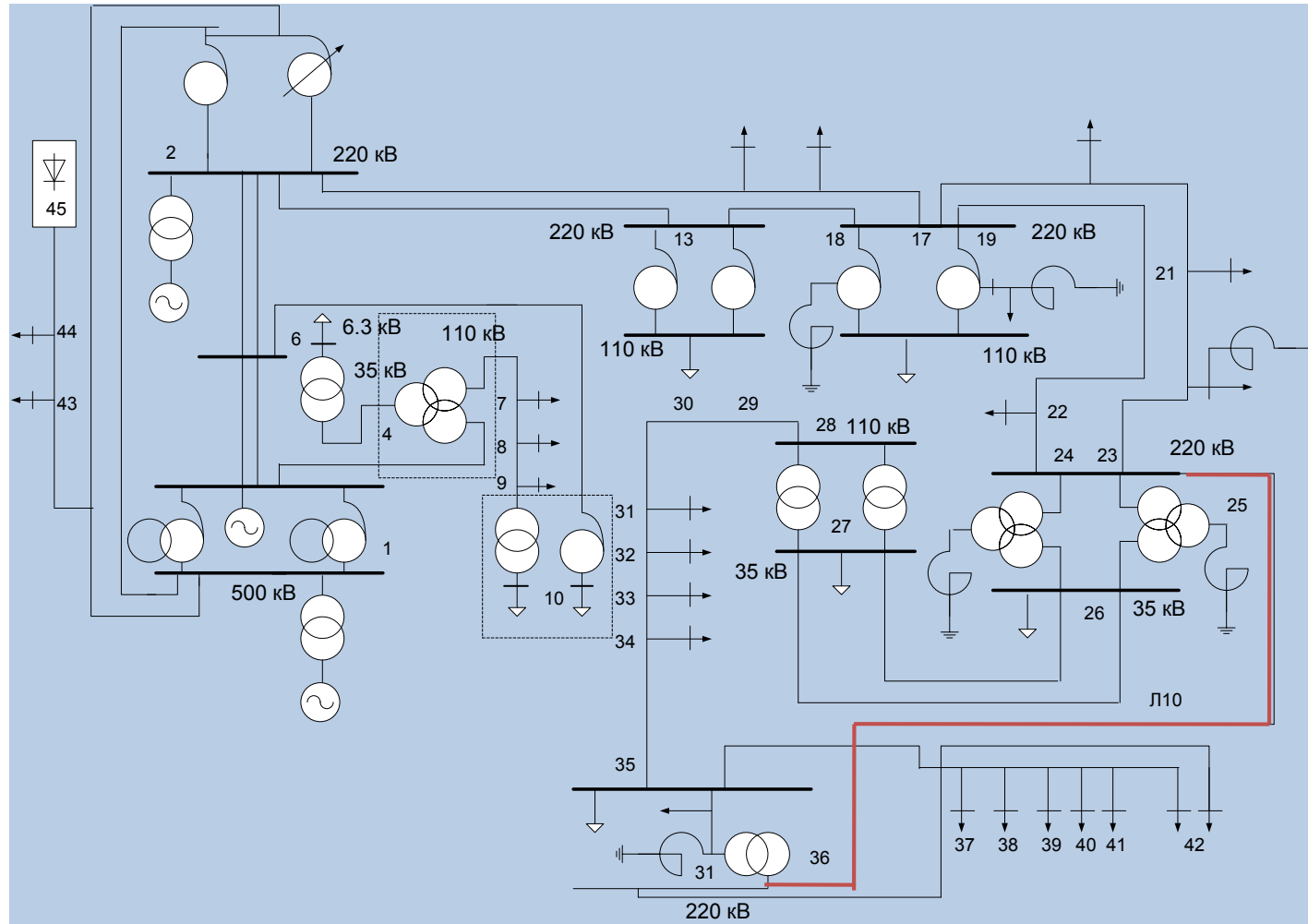




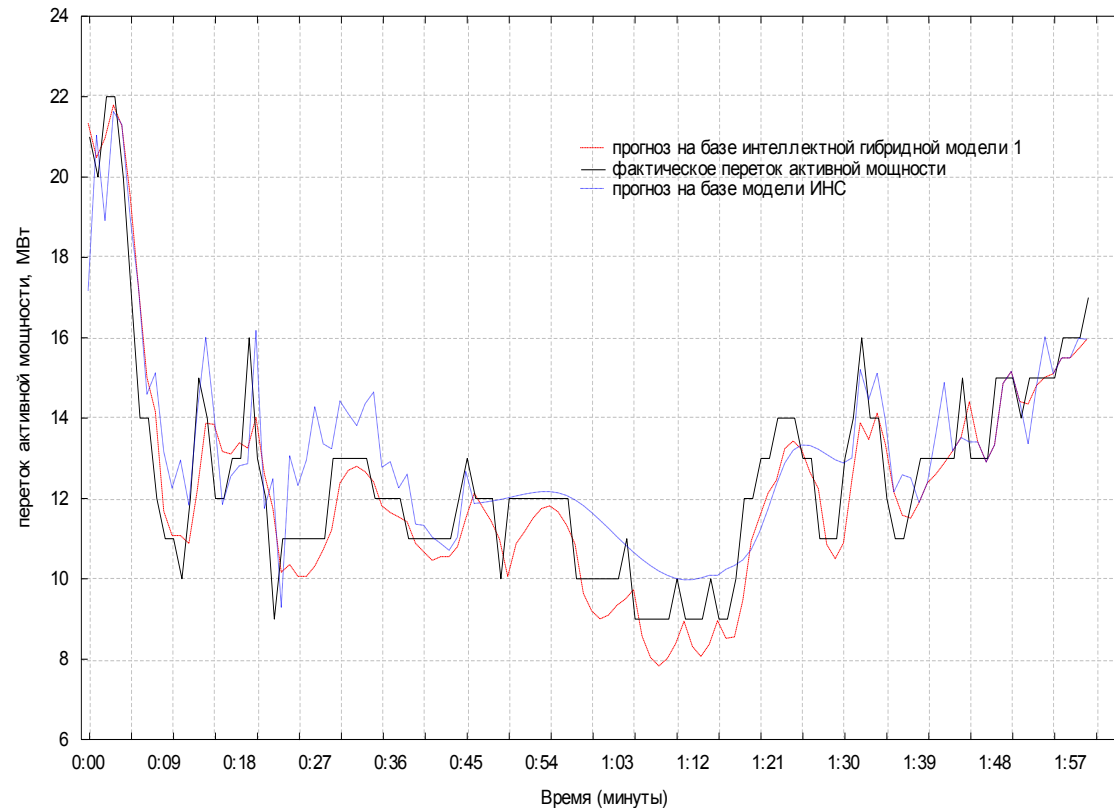
Схема одного из энергорайонов Иркутской энергосистемы





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

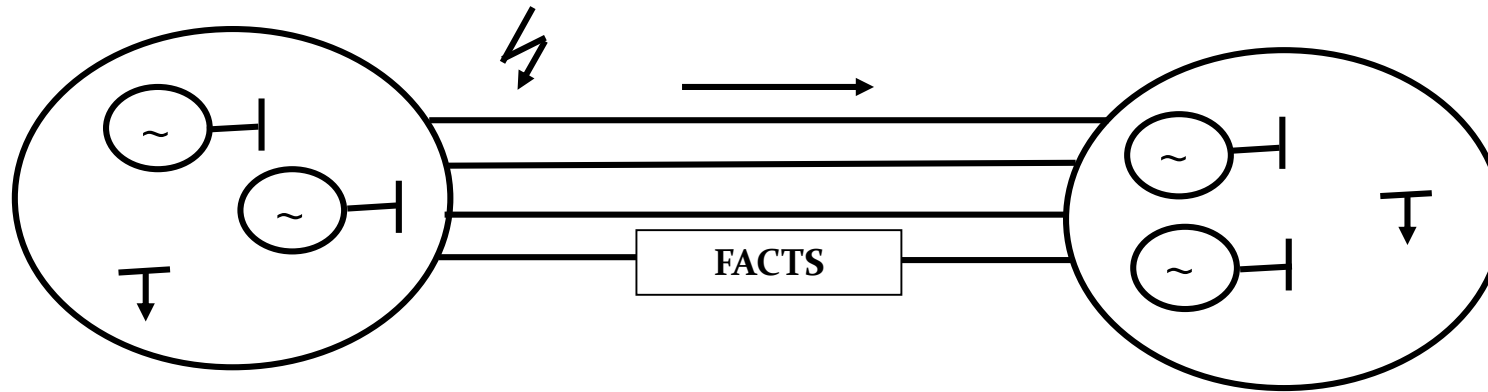
- Гибридная модель – прогнозная модель на базе совместного использования преобразования Гильберта-Хуанга (ПГХ) и искусственной нейронной сети (ИНС)
- Традиционная ИНС – нейронная сеть, обученная в рамках задачи нейросетевого прогнозирования



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



Координация противоаварийного управления нагрузкой и устройствами FACTS

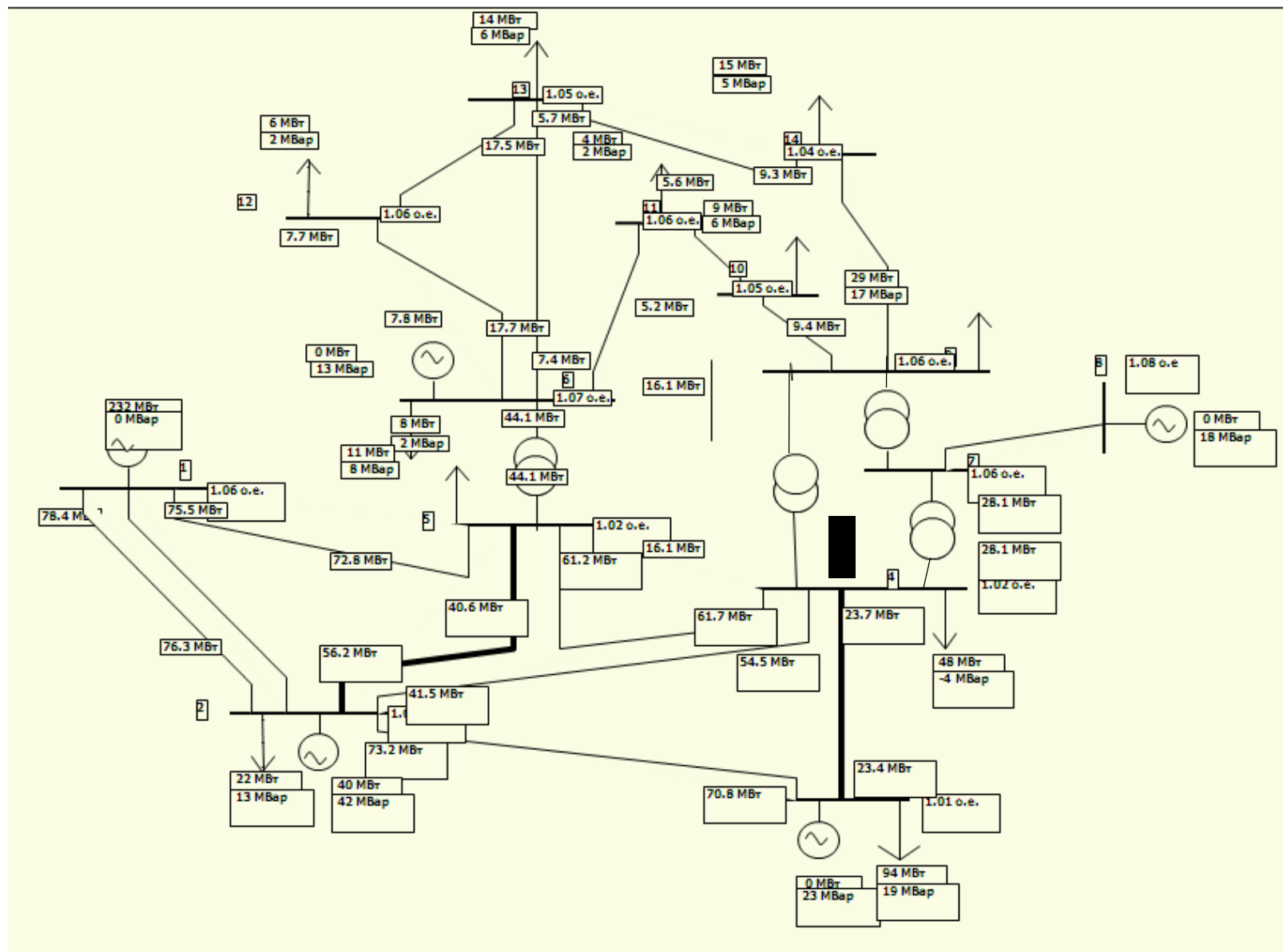


Координация базируется на анализе чувствительности и нахождении коэффициентов влияния устройств FACTS и нагрузок на загрузку по активной мощности контролируемых линий

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

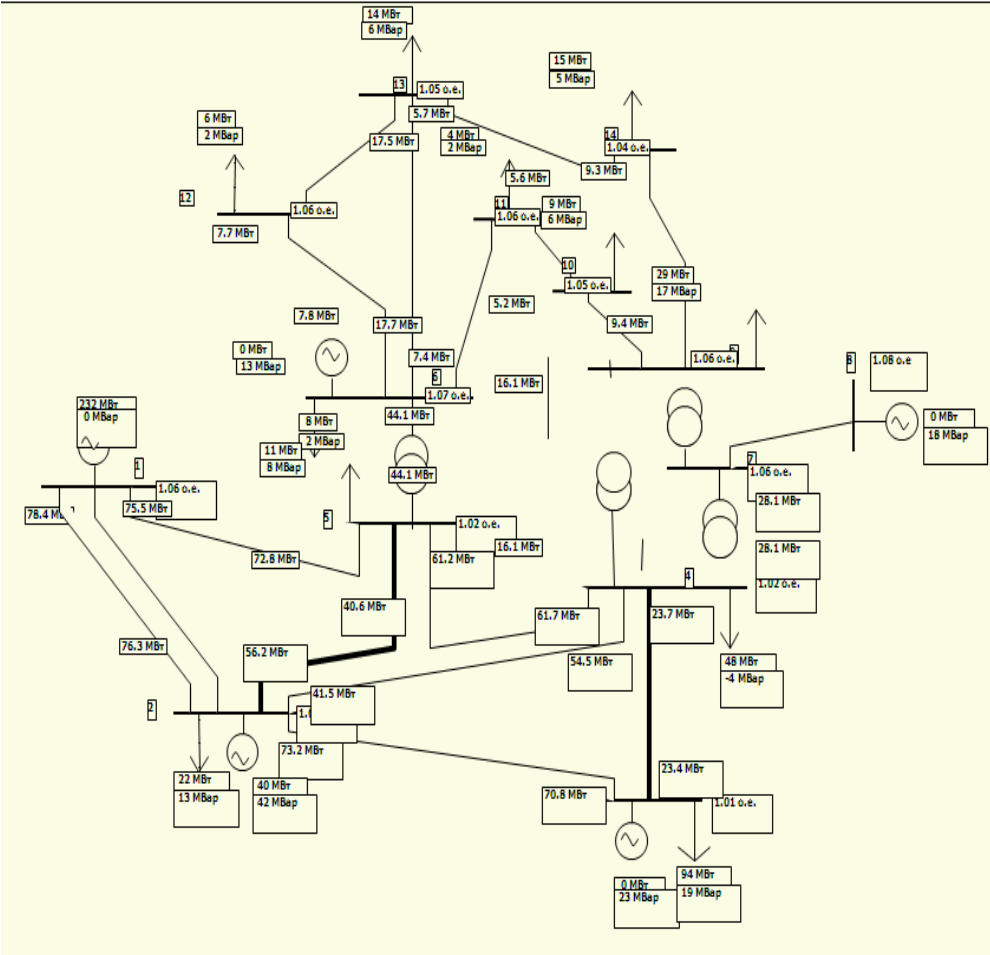


Тестовая 14-узловая схема IEEE





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

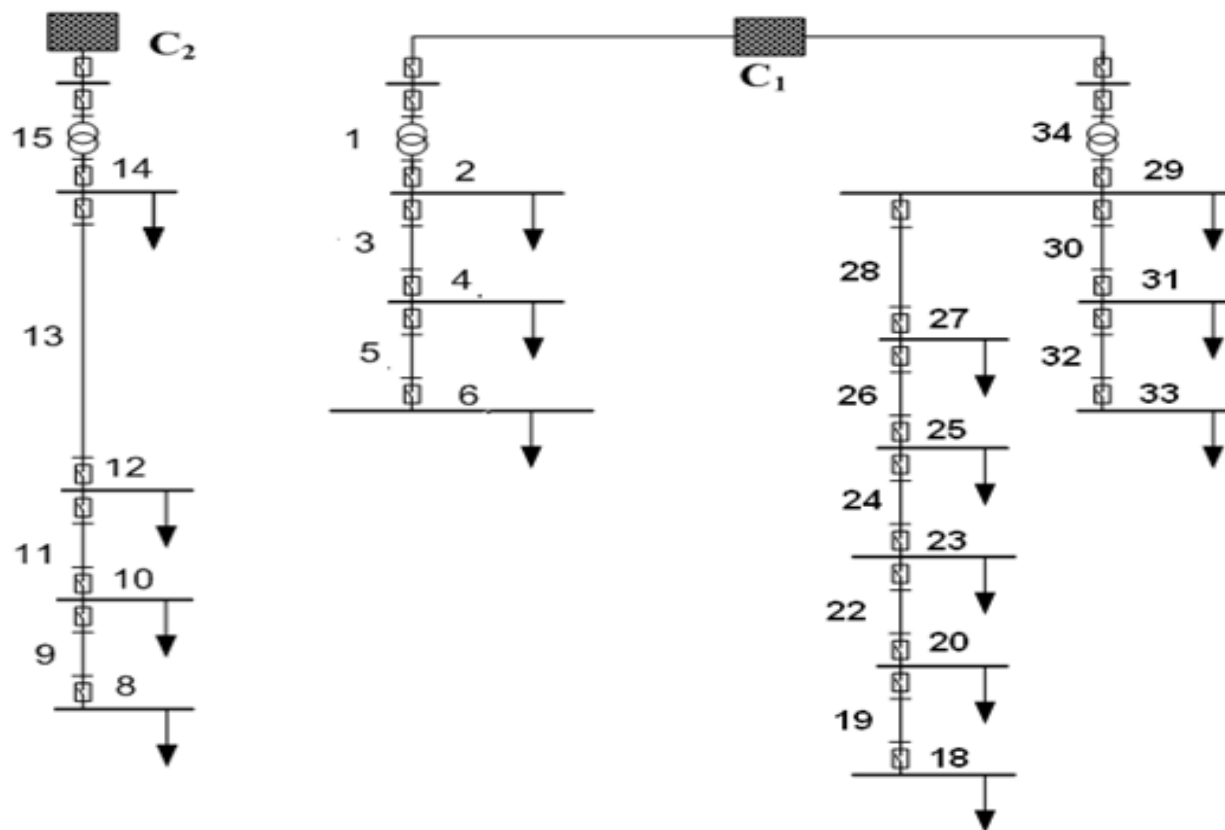
ТУФПТ – тиристорно-управляемый фазоворотный трансформатор





«Активные» системы электроснабжения

Схема городской распределительной электрической сети



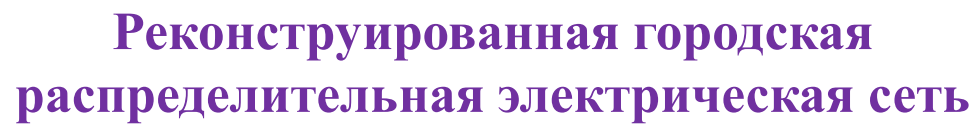




Диаграмма показателей риска дефицита мощности для исходной схемы

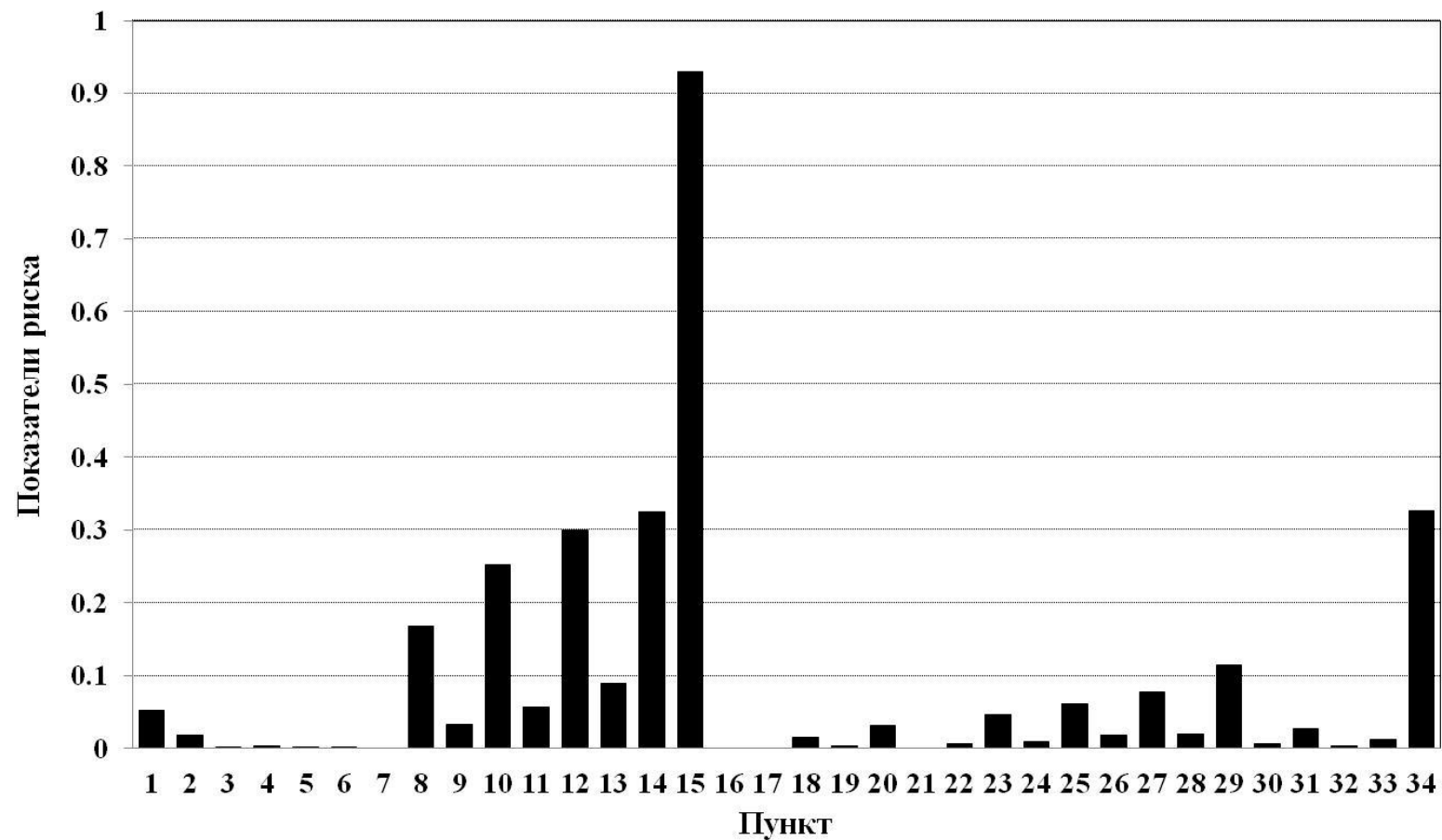
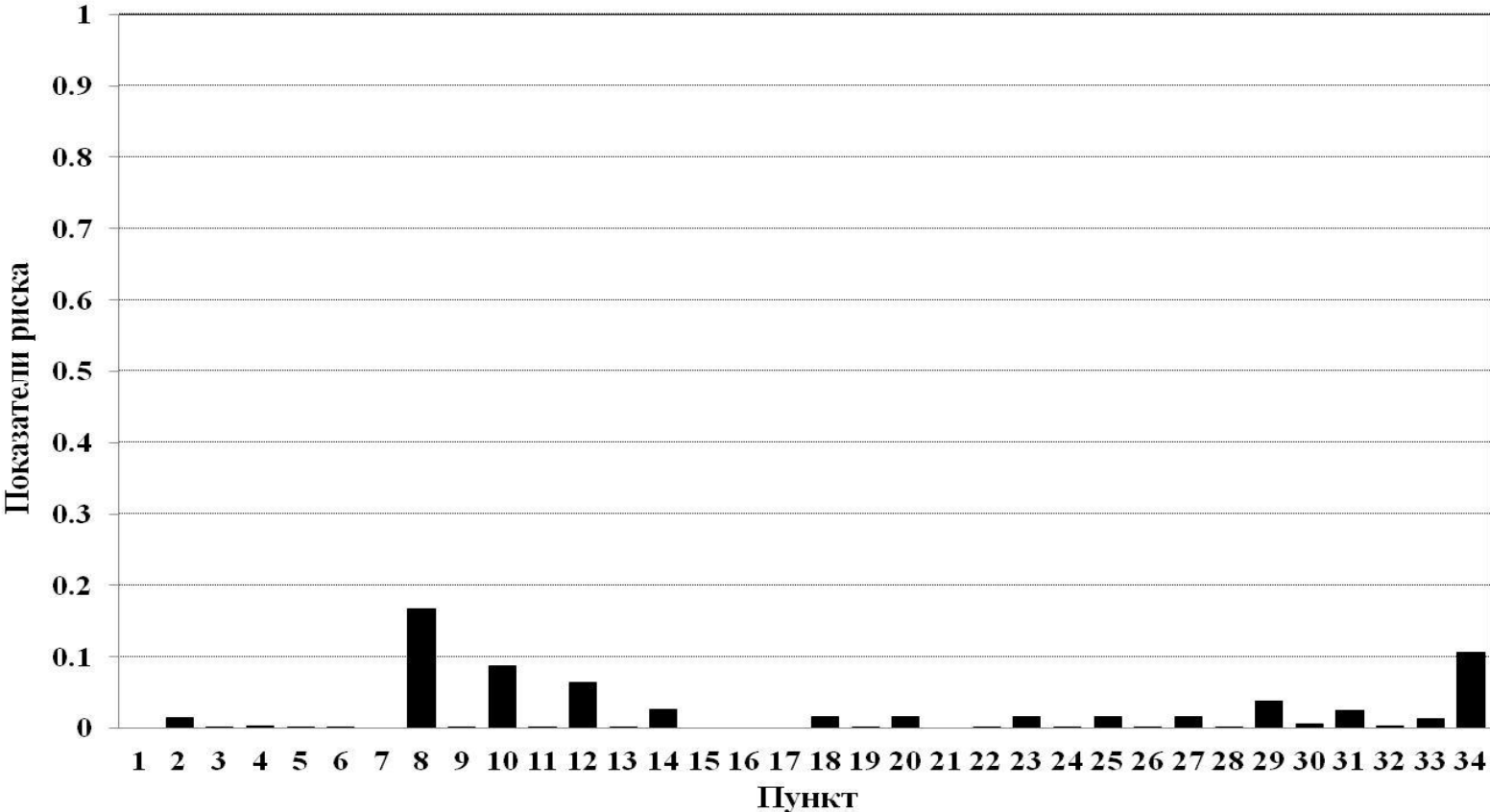




Диаграмма показателей риска для дефицита мощности реконструированной электрической сети



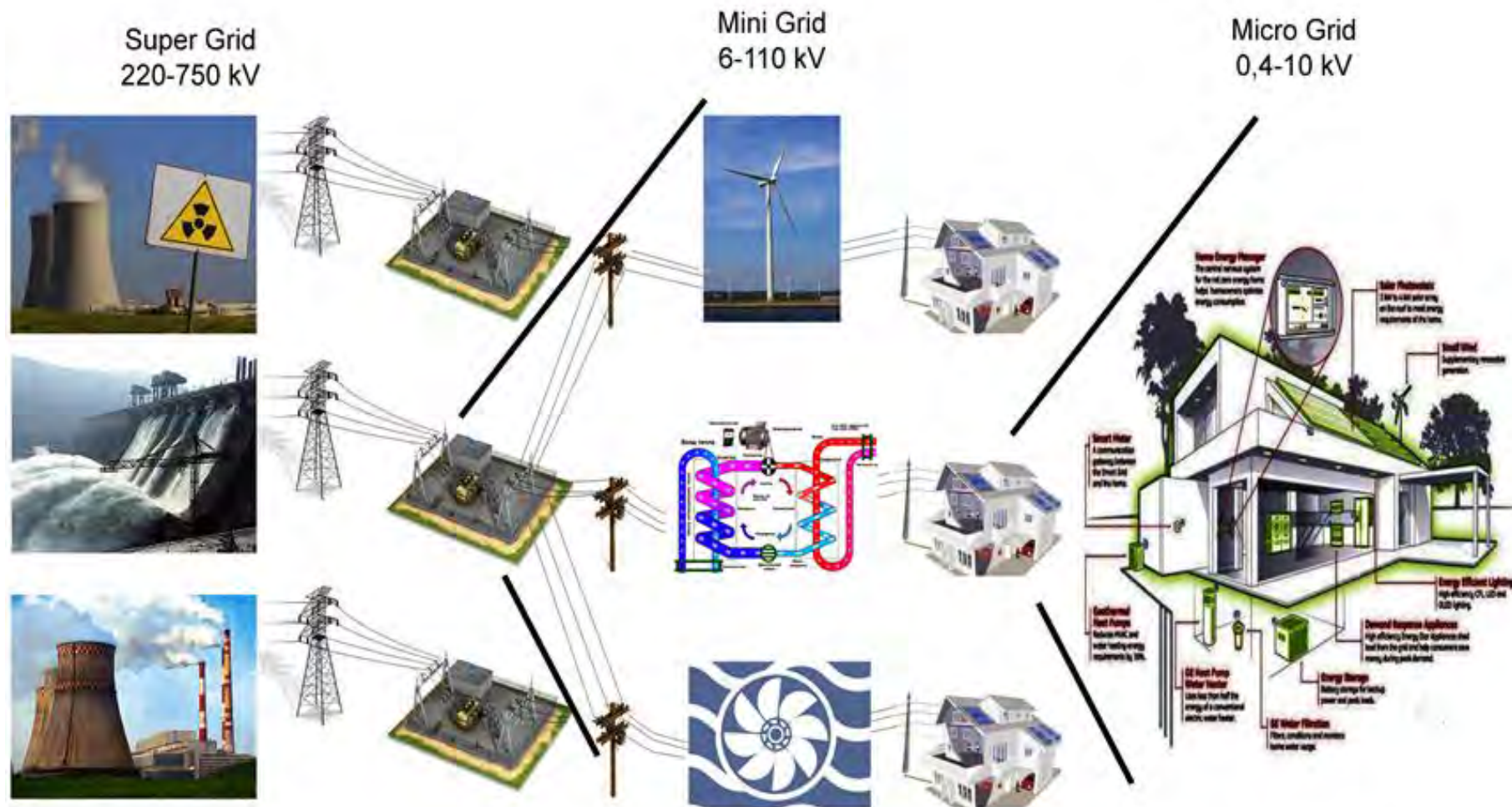


СОДЕРЖАНИЕ

- ✓ Тенденции и особенности развития энергетических систем
- ✓ Инновационные технологии интеллектуальной энергетики
- ✓ Достоинства концепции интеллектуальной энергетической системы
- ✓ Примеры решения задач с использованием интеллектуальных технологий и средств
- ✓ *Новые свойства перспективных электроэнергетических систем и актуальные направления исследований*



Супер-мини-микро энергообъединение





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



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.



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



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



Необходимость трансформации принципов управления режимами ЭЭС

- ♦ Существующие принципы управления режимами в традиционных ЭЭС основываются на использовании регулирующего эффекта нагрузки 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



Спасибо за внимание!