



# Распределенная информационно-вычислительная система управления режимами электрических сетей в концепции EnergyNet

В.А. Макеечев  
Ю.В. Шаров  
ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

Конференция «EnergyNet», Ялта, июнь 2016 г.



## ENERGYNET И РАЗВИТИЕ СЕТЕЙ: ВЫЗОВЫ

- **EnergyNet** – сетевой рынок энергии, основанный на технологических решениях, обеспечивающих интеллектуализацию и распределенный характер ЭЭС (Smart grid).
- **EnergyNet (интеллектуальные сети)** – это комплекс организационно технических мероприятий, позволяющих достигать целевых показателей деятельности сетевых компаний, не проводя глобальной реновации основных фондов. Так ли это??
- **EnergyNet** не заменяет полностью модернизацию сетей, однако может стать частичной (бюджетной) ее альтернативой. Если использовать технологии **EnergyNet**, то при посильных вложениях можно достичь существенных результатов в плане надежности энергоснабжения и снижения расходов на покупку потерь электроэнергии в сетях.
- Внедрение средств и систем малой энергетики (когенерация, ВИЭ) рассматривается как альтернатива новому строительству, реконструкции существующих электрических сетей 0,4-110 кВ, строительству и реконструкции существующих котельных.
- Внедрение технологий **EnergyNet** потребует новых моделей рынка электроэнергии, более сложных систем производства и распределения электроэнергии, ресурсов для подключения объектов малой энергетики.



## НОВЫЕ ЭТАПЫ В РАЗВИТИИ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ СЕТЯМИ

- Разграничение функционала между ОАО «СО ЕЭС», осуществляющим единое диспетчерское управление объектами электроэнергетики, и сетевыми компаниями.
- Центр управления сетями (ЦУС) – одна из ключевых точек, в которой осуществляется централизованный мониторинг функционирования энергетического комплекса региона РФ.
- Операционные функции ЦУС - организация управления технологическим режимом работы и эксплуатационным состоянием объектов электрических сетей, при котором параметры изменяются по команде диспетчера ЦУС.
- Прогнозирование потребления и управление качеством электроэнергии на уровне субъектов РФ, включая обеспечение стабильности управления ТСО , принадлежащих разным собственникам.
- Решение задачи оптимизации параметров распределенной генерации с учетом суточного потребления, среднесрочного и долгосрочного прогноза в регионе.
- В соответствии с проектом стратегии развития электросетевого комплекса РФ к 2017 г. все сетевые компании должны обеспечить сбор данных по надежности системы и качеству электроснабжения.



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ЭЭС: ключевые задачи (1)

*EnergyNet должна обеспечивать решение следующих задач:*

- доступ любых видов генерации и потребителей электроэнергии к услугам инфраструктуры;
- «активность» потребителей электроэнергии за счет их оснащения интеллектуальными системами учета с возможностью управления спросом;
- нормированное качество электроэнергии, задаваемого развитием мегаполисов, научно-технических центров и т.д.;
- реализация энергетического роутера — устройства, обеспечивающего управление потоками мощности в интеллектуальных электрических сетях;
- оптимизация производства и потребления электроэнергии за счет регулирования нагрузки с максимальным учетом требований потребителей (в том числе и экономических);
- использование оптимальных инструментов и технологий эксплуатации и обслуживания активов;
- повышение наблюдаемости сети (сбора информации) о текущем состоянии сети и ее элементов (включая внешние воздействия окружающей среды), а также обработка данной информации в режиме реального времени.



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ЭЭС: ключевые задачи (2)

*Интеллектуальная сеть должна обеспечивать ключевые ценности, основанные на клиенто- и социальной направленности с высоким общественным имиджем:*

- достаточность (по мощности, объему и графику электропотребления) энергетических услуг надлежащего качества;
- допустимость (технологическую и социально-экологическую) совместной работы систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения, поддерживая необходимый уровень резервирования и надежности энергоснабжения;
- необходимость реализации проектов развития сетей с учетом интересов потребителей и отраслевых компаний.
- доступность предоставления услуг (подключения) и передачи электроэнергии в соответствии с экономически обоснованным спросом.

*Введение рыночных механизмов приводит к фундаментальному изменению целевой функции управления режимами, переводя ее из критерия минимума народнохозяйственных затрат отрасли (топливо, потери электроэнергии, инвестиции в повышение надежности, компенсация ущерба и др.) в адекватный критерий максимума консолидированной чистой прибыли у независимых участников рынка с экономическим механизмом распределения между ними получаемого совокупного эффекта (дополнительной прибыли).*



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ: инновационные задачи

- Создание стимулов для развития потенциала для всех участников модернизации ЭЭС и внедрение инновационных технологий и решений, включая новые методы управления и создание горизонтальных связей между объектами энергосистем (генерацией, сетями и потребителями).
- Создание принципиально новой технологической платформы ЭЭС с целью обеспечения надежности энергоснабжения и качества электроэнергии, включая модернизированную сеть с активно-адаптивными элементами.
- Получение синергетического эффекта за счет оптимизации соотношения структур управления объектами централизованной и распределенной энергетики.
- Создание инновационных видов услуг, обеспечивающих лучшее ценовое предложение и разнообразие выбора на рынках электроэнергии.
- Создание инновационных решений, которые помогут наиболее экономичным методом получать информацию в зоне функционирования ЦУС.

***Целевая задача управления режимами – определение оптимальных значений и предельных ограничений для каждого объекта ЭЭС с учетом регламентов рынков электроэнергии.***



## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ ЭЭС: требования

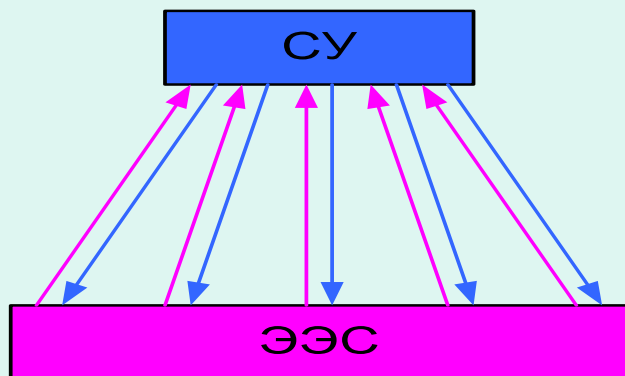
*EnergyNet должна обеспечивать следующие требования:*

- стандартизованный высокотехнологичный гибкий интерфейс в многосторонних отношениях субъектов рынка (генератор, сеть, потребитель);
- информационный обмен объектов энергетики с ЦУС сетевых организаций и ДЦ ОАО «СО ЭЭС» и *внедрение новых информационно-вычислительных ресурсов и технологий* для оценки ситуаций, выработки и принятия оперативных и долговременных решений;
  - эффективное использование электроэнергии за счет ситуационного регулирования нагрузки с максимальным учетом требований потребителей (в том числе экономических);
- реализацию адаптивной реакции энергосистемы в режиме реального времени на основе сочетания централизованного и местного режимного и противоаварийного управления в нормальных и аварийных режимах;
- расширение рыночных возможностей инфраструктуры путем взаимного оказания широкого спектра услуг субъектами рынка и инфраструктурой.



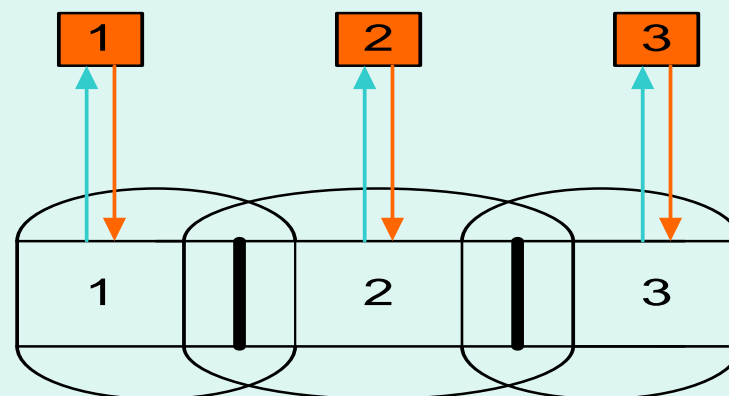
# СУЩЕСТВУЮЩИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ КООРДИНАЦИИ РЕЖИМОВ СЕТЕЙ

Централизованная система



ЦСУ обеспечивает совместное решение задач расчета режимов работы ЭЭС только при условии передачи всех данных в единый центр управления.

Децентрализованная система



ДЦСУ обеспечивает совместное решение задач расчета режимов работы ЭЭС только при условии «бинарных» согласований результатов между граничащими субъектами.

*В условиях распределенных объектов электроэнергетики и (или) рынков и центров управления ими требуется создание и внедрение новых условий и форм недискриминационного вовлечения объектов управления в процесс обеспечения надежной и экономической работы сетей в составе энергосистем.*

Новая распределенная информационно-вычислительная система в концепции EnergyNet должна обеспечить совместное решение задач расчета, планирования режимов работы сетей и управления ими.





# КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В EnergyNet

*Ключевая идея состоит в том, что все субъекты управления (источники генерации, сети, потребители) «распределены» в энергосистеме, но связаны общим электрическим режимом работы в EnergyNet, техническими условиями и ограничениями, а также регламентами рынков электроэнергии .*

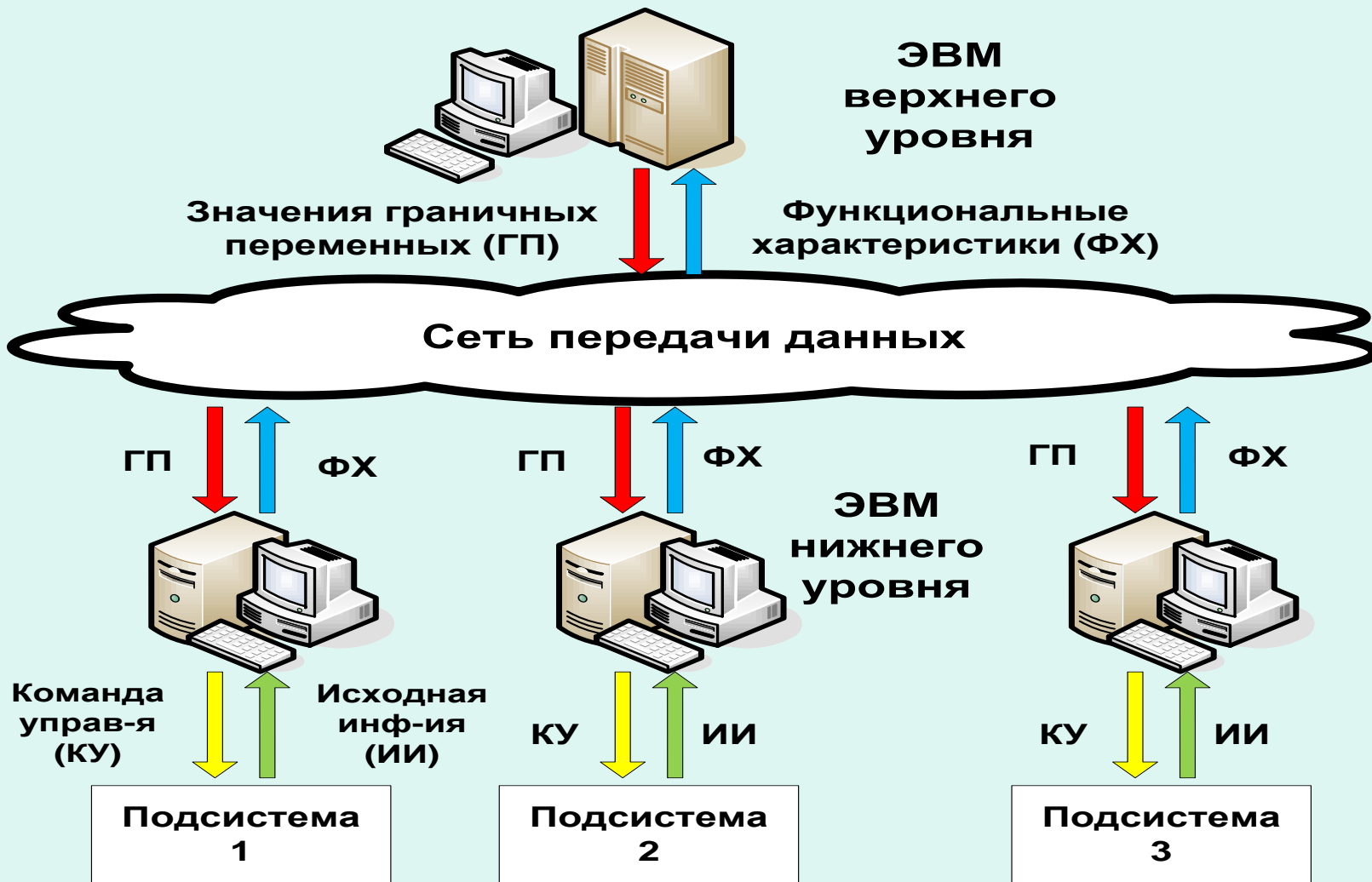
Режим торговли (значения перетоков мощности и цены за продаваемую или покупаемую электроэнергию в пределах каждого часа *или в пределах другого интервала времени*) может быть сформулирован как математическая задача, не требующая для своего решения передачи информации в централизованную систему управления.

**Отличительные свойства концепции распределенной системы, основанной на принципах функционального моделирования, в сравнении с другими СУ:**

- Каждая часть энергосистемы (электрической сети) представляет собой иерархическую подсистему.
- Любой субъект управления (источник генерации, электрическая сеть, потребитель) в иерархии управления представляет собой подсистему.
- Расчет оптимального режима сети для каждой подсистемы (субъекта управления) выполняется независимо на ЭВМ, находящейся в пределах данной подсистемы.
- Расчет оптимальных перетоков мощности между подсистемами выполняется ЭВМ верхнего уровня, решающей **задачу оптимизации режима, имеющую размерность числа граничных переменных.**



# СТРУКТУРА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ



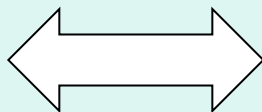


# ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА И КООРДИНАЦИИ РЕЖИМОВ

Распределенная система функционирует как иерархическая структура, в которой ЭВМ нижнего уровня выполняют операции с системами уравнений подсистем (субъектов управления), а ЭВМ верхнего уровня выполняет операции с системой уравнений связи, в которую входят только граничные переменные (перетоки мощности между подсистемами).

**Передача данных между уровнями организована следующим образом:**

*с нижнего уровня на верхний передаются данные о функциональных характеристиках (ФХ) подсистем*



*с верхнего уровня на нижний передаются данные о вычисленных значениях граничных переменных*

*ФХ подсистем - это соотношения между граничными переменными подсистем при соблюдении всех внутренних ограничений в виде равенств и неравенств:*

1. При расчете установившихся режимов ФХ – это зависимости между значениями перетоков мощности через граничные узлы подсистем и модулей (фаз) напряжений в граничных узлах.
2. При оптимизации режимов ФХ представляются в виде зависимостей между значениями перетоков мощности через граничные узлы и маргинальных затрат (цен) на электроэнергию в подсистемах.



# ОРГАНИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ

1. Формирование систем уравнений подсистем и расчет **функциональных характеристик** каждой подсистемы на ЭВМ нижнего уровня.
2. Передача **функциональных характеристик** подсистем по каналам связи из ЭВМ нижнего уровня в ЭВМ верхнего уровня.
3. Формирование и решение систем **уравнений связи** на центральной ЭВМ верхнего уровня.
4. Передача данных о значениях **граничных переменных** из ЭВМ верхнего уровня в ЭВМ нижнего уровня.
5. Расчет значений **внутренних переменных** подсистем в ЭВМ нижнего уровня.



# ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СРЕДА

**Архитектура:** территориально-распределенная среда вычислительных устройств подсистем.

**Компоненты архитектуры:** координирующий процесс, локальный диспетчер, клиентская библиотека и средства мониторинга.

**Взаимодействие компонент** осуществляется по собственному протоколу, реализованному совместно с протоколом TCP/IP, применяемого в глобальных компьютерных сетях.

## Основные функции :

1. Отслеживание доступных вычислительных ресурсов с возможностью их динамического подключения и отключения.
2. Обмен между параллельными процессами задачи.
3. Удаленный запуск параллельных процессов по событию запуска одного из них.
4. Мониторинг хода выполнения задачи с отслеживанием обменов данными между параллельными процессами и обнаружением логической некорректности в программировании информационных обменов.



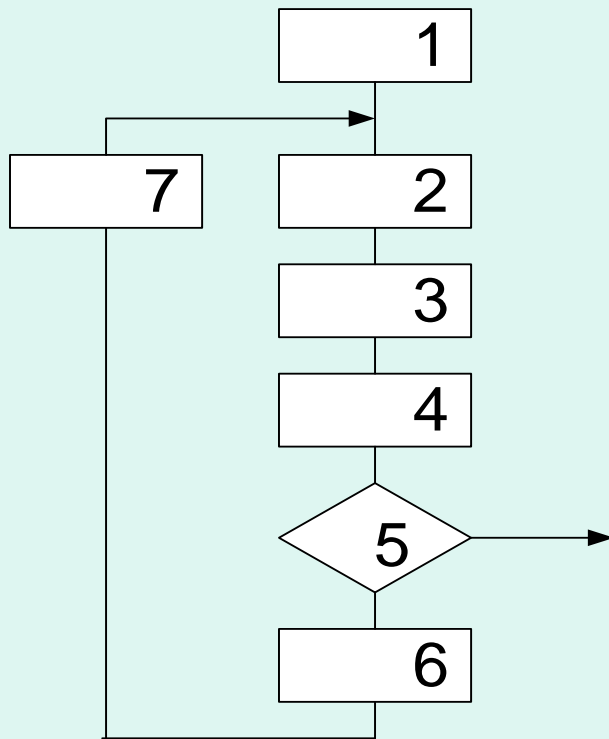
# СВОЙСТВА ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

- Все вычисления, относящиеся к расчету режима подсистем, выполняются в параллельном режиме на ЭВМ нижнего уровня.
- Все исходные и конечные данные, относящиеся к режиму подсистем, сохраняются в ЭВМ нижнего уровня.
- Расчет оптимальных значений перетоков мощности между подсистемами выполняется на ЭВМ верхнего уровня.
  - Передача данных между ЭВМ ограничивается информацией о функциональных характеристиках подсистем и перетоках мощности между подсистемами. Необходимости передачи экономической информации от подсистем нет.
- Результаты расчетов в распределенной информационно-вычислительной системе (конечные и промежуточные) полностью совпадают с результатами расчетов в централизованной системе.

*Таким образом, РИВС является уникальной системой координации энергорынка EnergyNet, в которой решается задача определения режима торговли (значения перетоков мощности и цены за продаваемую электроэнергию в пределах установленного интервала времени) при сохранении полномочий и функций субъектов рынка электроэнергии, решающих свои собственные задачи купли-продажи электроэнергии.*



# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИЕРАРХИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ



1. Установка начальных значений внутренних переменных.
2. Формирование уравнений, представляющих оптимальный режим подсистем.
3. Расчет функциональных характеристик подсистем.
4. Формирование систем уравнений связи при условии оптимальности энергосистемы в целом.
5. Проверка выполнения условий окончания итерационного процесса.
6. Решение систем уравнений связи.
7. Расчет внутренних переменных подсистем для оптимального режима энергообъединения.

*Аналогичная схема алгоритма может быть реализована для оптимизации параметров активно-адаптивных элементов в электрических сетях.*



# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ

ПО имеет форму распределенных вычислительных модулей, реализуемых на ЭВМ подсистем (энергосистем) и ЭВМ верхнего уровня, а также модули сетевого взаимодействия (координация операций ЭВМ в системе и передача данных между ними).

**К настоящему времени:**

- 1) разработаны версии ПАК для решения задач расчета установившихся режимов и оценивания состояния энергосистем, а также задачи оптимизации режима по активной мощности \*;
  - 2) определены подходы к включению в программное обеспечение модулей, решающих задачи оптимизации режима по реактивной мощности, а также оптимизации параметров активных элементов электрической сети.
- *Выполнены расчеты установившихся режимов для ЭЭС, имеющей расчетные схемы в 1430 узлов (модель ЭЭС Казахстана, России и Беларуси). Время расчета, включая настройку системы и проведение итераций, составляло от 9 сек до 15 сек.*
  - *Результаты расчетов установившихся режимов ЭЭС, выполненные при одинаковом представлении элементов в распределенной ИВС и в централизованной СУ, полностью совпадают при идентичной сходимости итерационных процессов.*

\* Разработка защищена патентами РФ и США.





# ПЕРСПЕКТИВЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Направления исследований и практических разработок, для которых могут быть эффективно применены алгоритмы и программы распределенных систем расчета режимов ЭЭС и их оптимизации:**

- **Оптимизация режимов работы электрических сетей в составе энергосистем различного масштаба в условиях рыночных отношений (проекты Virtual Power Plant, cyberGrid, ALSTOM GRID NMS, Oracle Utilities и др...).**
- **Управление режимами распределительных сетей (расширение функций ЦУС по оптимизации перетоков реактивной мощности и регулированию напряжения).**
- **Управление режимами распределенной генерации в энергосистемах, включая ВИЭ и накопители электроэнергии.**
  - **Расчеты оптимальных параметров средств регулирования режимов электрических сетей в составе ЭЭС.**
  - **Разработка структуры и принципов функционирования системы противоаварийной автоматики распределительных сетей, а также настройки ее параметров.**



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

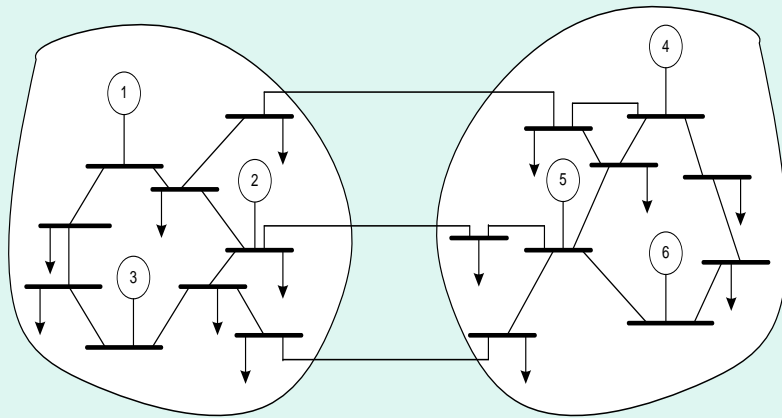
1. Реализация развития энергосистем в концепции EnergyNet с различными техническими характеристиками в условиях финансовых ограничений нетривиальна - ее техническая и экономическая эффективность зависит от перспективных технологий интеграции и управления.
2. Усиление ответственности электрических сетей при управлении режимами распределенных источников энергии, включая ВИЭ, должно сопровождаться внедрением инновационных методов мониторинга и управления – **НОВОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ**.
3. Основой развития управления в формате EnergyNet должны являться распределенные информационно-вычислительные системы, отвечающие современным требованиям рыночных отношений.
4. Внедрение новых концепций, средств и ПО для распределенного расчета режимов электрических сетей и управления ими будет способствовать ускоренной реализации практических проектов развития проекта EnergyNet.
5. Распределенная система расчетов, координации режимов энергосистем и управления ими может быть включена в состав «дорожной карты» для последовательного решения задач в концепции EnergyNet.



# ПРИМЕР ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ (1)

Условная схема ЭЭС

Расходная характеристика:  $F_i(P_i) = f_i(a_i + b_i P_i + c_i P_i^2)$



Подсистема 1

Подсистема 2

№	Цена топлива -f	Коэффициенты			Мощности, MW	
		a	b	c	$P_{min}$ ,	$P_{max}$ ,
1	2,0	561	7,92	0,001562	150	600
2	2,0	310	7,85	0,00194	100	400
3	2,0	78	7,97	0,00482	50	200
4	1,9	500	7,06	0,00139	140	670
5	1,9	295	7,46	0,00184	110	440
6	1,9	295	7,46	0,00184	110	440

Результат расчета режима при нулевом перетоке.

A.B.Wood, B.F.Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, 2-nd Edition, 1996, Chapter 10, Interchange of Power and Energy

Подсистема 1: Мощность нагрузки PL = 700 MW

PGmin = 300 MW PGmax = 1200 MW

Подсистема 2: Мощность нагрузки PL = 1100 MW

PGmin = 360 MW PG max= 1470 MW

Подсистема 1: P1 = 322,7 MW P2 = 277,9 MW P3 = 99,4 MW PG1 = 700 MW

Маржинальная цена электроэнергии  $\lambda_1 = 17,856$  \$/MWh

Суммарные затраты 13 677,21 \$/h

Подсистема 2: P4 = 524,7 MW P5 = 287,7 MW P6 = 287,7 MW PG2 = 1100 MW

Маржинальная цена электроэнергии  $\lambda_2 = 16,185$  \$/MWh

Суммарные затраты 18 569,23 \$/h



Суммарные затраты в энергообъединении = 32 246,44 \$/h



## ПРИМЕР ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ (3)

Определение оптимального перетока в ЭЭС ( Wood–Wollenberg algorithm):

$$P1 = 166,5 \text{ MW} \quad P2 = 152,23 \text{ MW} \quad P3 = 48,85 \text{ MW} \quad PG1 = 367,71 \text{ MW}$$

$$P4 = 656,99 \text{ MW} \quad P5 = 387,49 \text{ MW} \quad P6 = 387,49 \text{ MW} \quad PG 2 = 1432,27 \text{ MW}$$

$$\sum PG = 1800,0 \text{ MW}$$

Оптимальный переток: 332,4 MW

Маржинальная стоимость энергии  $\lambda = 16,882 \text{ \$/MWh}$

Расходы в подсистеме 1: 7 895,5 \$/h При нулевом перетоке 13 677,21 \$/h

Расходы в подсистеме 2: 24 043, 7 \$/h При нулевом перетоке 18 569,23 \$/h

Суммарные расходы в ЭЭС = 31 942,2 \$/h = 32 246,44 \$/h

Частный результат: Подсистема 1 – выигрыш 5 781,7 \$

Подсистема 2 - проигрыш 5 474,5 \$

Суммарная экономия в ЭЭС = 307,238 \$

Специфика традиционных оптимизационных расчетов в энергетике связана с необходимостью проведения многочисленных итерационных расчетов режимов ЭЭС для всей системы в целом. Данный расчет потребовал 8 итераций.

Распределенная система расчетов позволяет снизить число расчетов за счет оптимизации условий только на границах подсистем – уравнений связи.





## ПРИМЕР ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ (3)

Применение иерархического алгоритма оптимизации режимов.

Расчет ФХ для подсистем:

Уравнения для подсистемы 1:

$$15,84 + 0,00625 P_1 - \lambda_1 = 0$$

$$15,7 + 0,00776 P_2 - \lambda_1 = 0 \quad P_1 + P_2 + P_3 - 700 + P_b = 0$$

$$15,94 + 0,01928 P_3 - \lambda_1 = 0$$

Исключая внутренние переменные ( $P_1, P_2, P_3$ ), получаем ФХ в виде:

$$\lambda_1 = 17,856 - 0,00293 P_b$$

Уравнения для подсистемы 2:

$$13,41 + 0,005282 P_4 - \lambda_2 = 0$$

$$14,174 + 0,00699 P_5 - \lambda_2 = 0 \quad P_4 + P_5 + P_6 - 1100 - P_b = 0$$

$$14,174 + 0,00699 P_6 - \lambda_2 = 0$$

Исключая внутренние переменные ( $P_4, P_5, P_6$ ), получаем ФХ в виде:

$$\lambda_2 = 16,183 + 0,0021 P_b$$

Расчет оптимального перетока на ЭВМ верхнего уровня:

Система уравнений связи формируется из ФХ подсистем при условии равенства маржинальных цен:  $\lambda_1 - \lambda_2 = 0$ , что однозначно определяет:  $0,00503 P_b = 1,672$  и значение оптимального перетока:  $P_b = 332,4 \text{ MW}$ .

Подставляя это значение в ФХ подсистем, получим оптимальную маржинальную цену для ЭЭС в целом:  $\lambda_1 = \lambda_2 = 16,882 \text{ \$/MWh}$ .

Подсистема 1, MW	$P_1$	$P_2$	$P_3$
	166,5	152,23	48,85
Подсистема 2, MW	$P_4$	$P_5$	$P_6$
	656,99	387,49	387,49





**БЛАГОДАРИМ ЗА ВНИМАНИЕ!**

**[makeechev\\_va@interra.ru](mailto:makeechev_va@interra.ru)**

**+7 916 373 2428**

**[sharov\\_yv@interra.ru](mailto:sharov_yv@interra.ru)**

**+7 495 664 8840**

