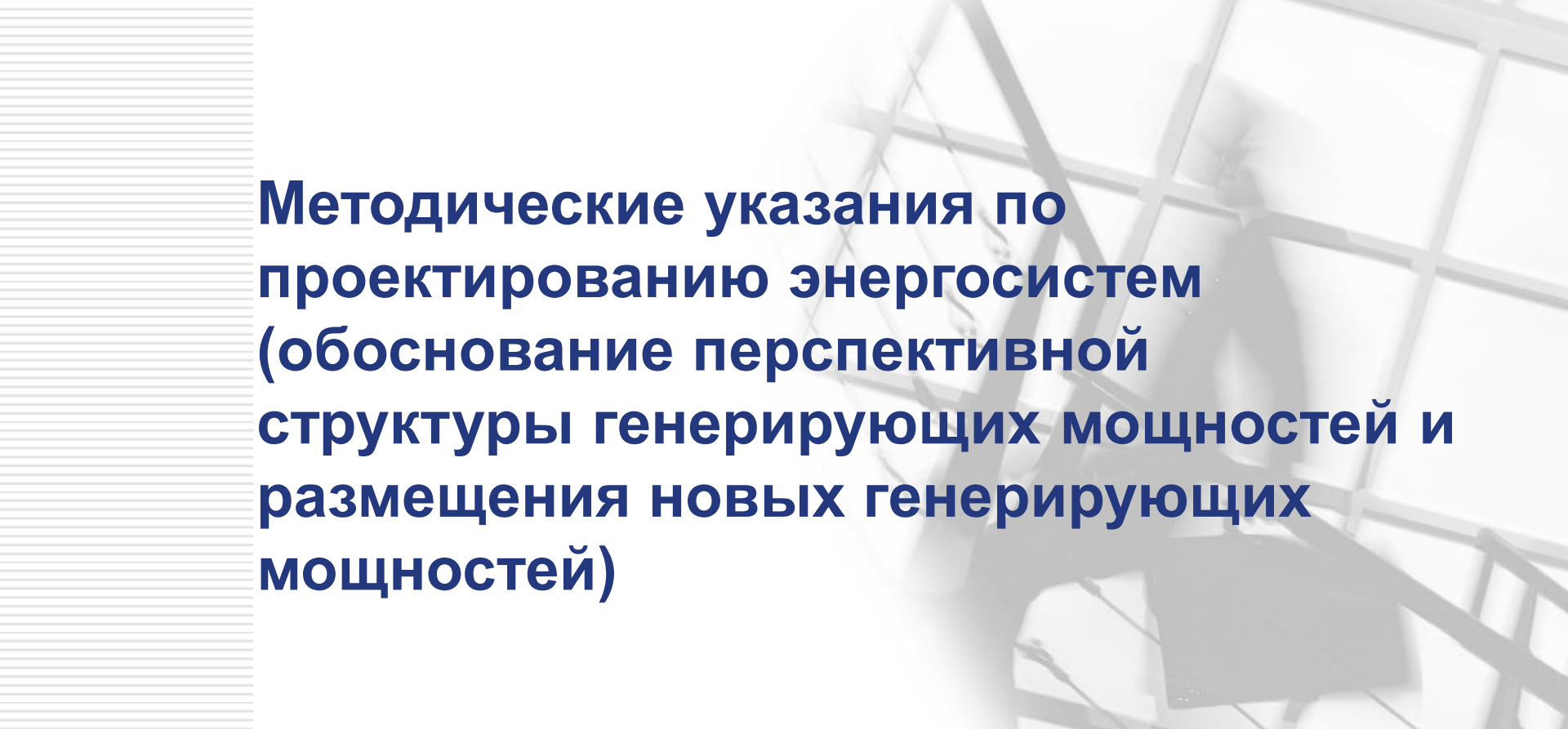




# Методические указания по проектированию энергосистем (обоснование перспективной структуры генерирующих мощностей и размещения новых генерирующих мощностей)

Федор Веселов (ИНЭИ РАН)

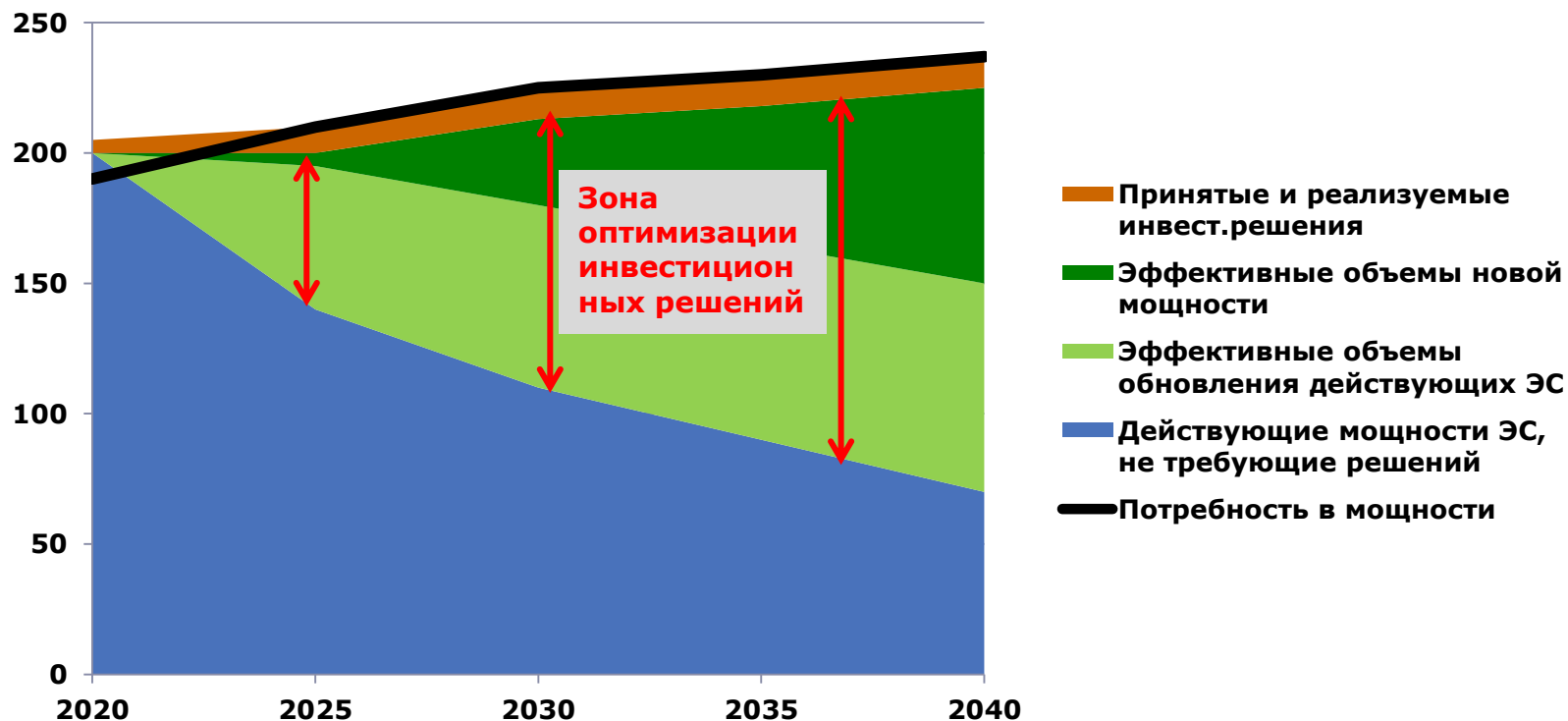
Павел Полудницын (Институт ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ)

Совещание в Минэнерго России по обсуждению Методуказаний по проектированию энергосистем

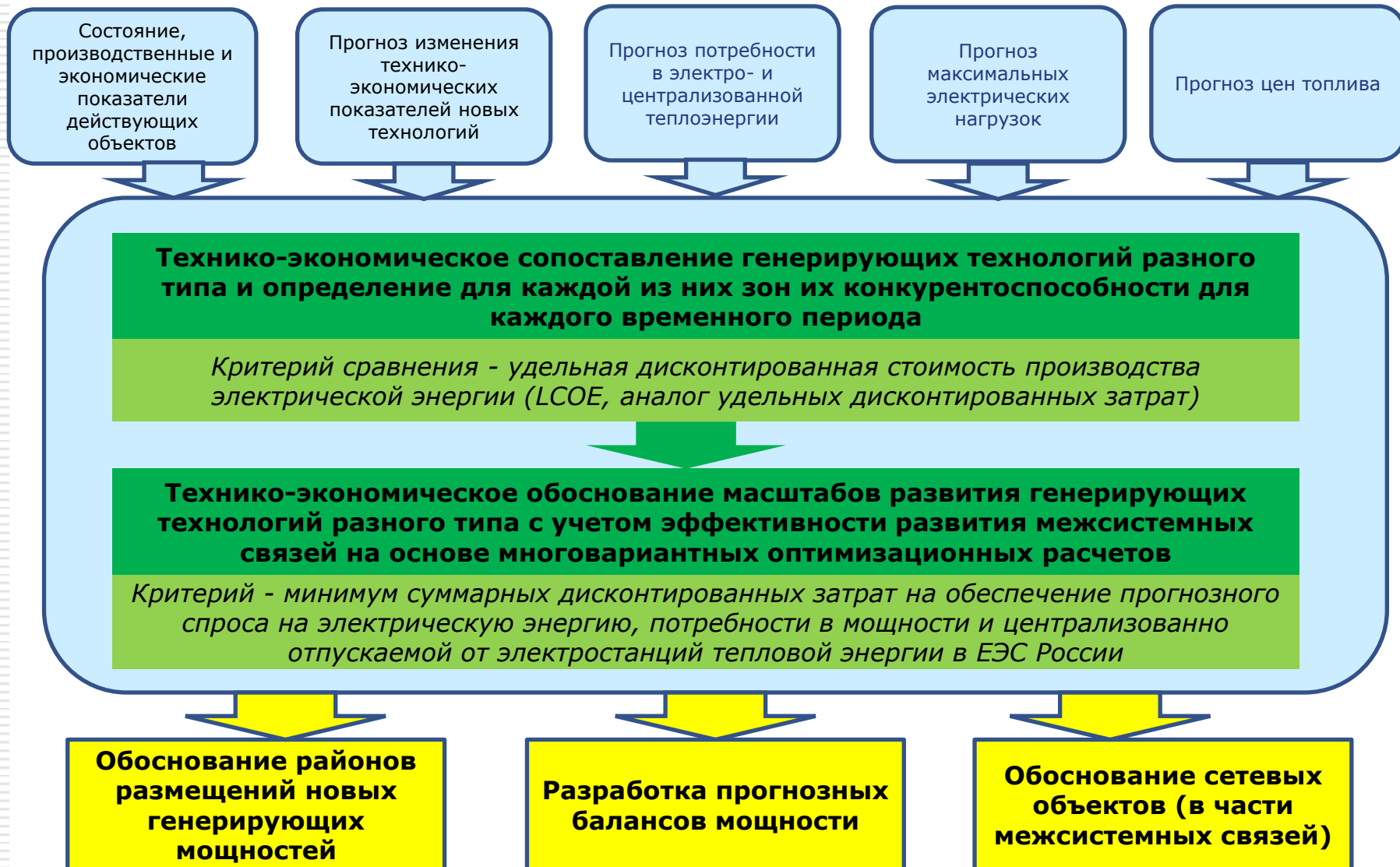
Москва, июль 2019

## Назначение и область применения

- Цель обоснования рациональной перспективной структуры генерирующих мощностей в ЕЭС России является комплексная оценка масштабов нового строительства, расширения, реконструкции и модернизации (технического перевооружения), вывода из эксплуатации генерирующих мощностей разных типов, а также развития межсистемных электрических связей
- Выполняется при разработке генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики и мониторинге ее реализации



# Обоснование перспективной структуры генерирующих мощностей



## Уровень научной проработки и апробации методики

- Соответствует российской и мировой практике прогнозирования и обоснования приоритетов развития энергосистем (анализ по удельной стоимости, LCOE, оптимизационные методы least-cost planning)
- Имеет широкий спектр модельных комплексов (российских и зарубежных), позволяющих выполнять многовариантные оптимизационные расчеты
- Применение в отрасли 20+ лет:
  - Разработка сценариев развития электроэнергетики в циклах Энергетической стратегии, стратегиях (схемах) развития топливных отраслей и компаний (оптимизация структуры электроэнергетики совместно с развитием топливных отраслей)
  - Разработка прогнозов структуры генерирующих мощностей в циклах Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики
  - Разработка научно-методических основ и апробация в рамках НИР Минэнерго РФ (2013 год)

# Технико-экономическое сопоставление генерирующих технологий разного типа по показателю удельной дисконтированной стоимости производства электрической энергии

$$LCOE_{i,r,g} = \frac{\sum_{t=5,g}^{T_i^{стр} + T_i^{экс} + T_i^{дем}} \left( KB_{i,r,t} + I_{i,r,t}^{монл} + I_{i,r,t}^{посм} + Z_{i,r,t}^{дем} \right) \cdot (1+d)^{-t}}{\sum_{t=5,g}^{T_i^{экс}} W_{i,r,t}^{омн} \cdot (1+d)^{-t}}$$

Особенности оценки эффективности инвестиционных решений при расчете LCOE:

- учитываются только прямые материальные затраты (капиталовложения, топливо, эксплуатационные затраты, затраты на демонтаж)
- не учитываются амортизационные отчисления, налоговые платежи и расходы, связанные с обслуживанием привлеченного и собственного капитала

## Основные типы задач для технико-экономических сравнений:

- строительство новых КЭС на газе, угле или АЭС с учетом стоимости выдачи их мощности
- варианты реконструкции и замены оборудования на действующих ТЭС
- развитие ТЭЦ разной крупности и с разным составом оборудования в сопоставлении с раздельной схемой (КЭС + котельная)
- строительство ГЭС с учетом условий использования их установленной мощности в графике нагрузки, вариантов выдачи мощности и конкуренции с ТЭС
- сопоставление пиковых источников на базе ГАЭС и ГТУ а также комплексов пиковых и базисных генерирующих мощностей АЭС+ГАЭС и КЭС+ГТУ

**Отсев  
неконкурентоспособных  
технологий**

**Отбор конкурентоспособных  
технологий**  
(разница в LCOE до 20% для  
отдельных временных  
периодов)

**Оценка изменения диапазонов  
для факторов неопределенности**  
(цены топлива, удельные  
капиталовложения, КИУМ)

**Оптимизация перспективной структуры генерирующих  
мощностей**

# Технико-экономическое сопоставление генерирующих технологий разного типа по показателю удельной дисконтированной стоимости производства электрической энергии

Экономический смысл LCOE – постоянная во времени цена электроэнергии, обеспечивающая безубыточность инвестиций при оценке общественной эффективности проекта:  $NPV(LCOE)=0$

$$NPV = \sum_{t=1}^T \overset{\text{Выручка}}{C_{\text{эз}} \cdot W_t \cdot \frac{1 - \alpha_{\text{соб.нужд}}}{(1+d)^t}} - \sum_{t=1}^T \overset{\text{Затраты}}{\frac{KB_t + \text{Топл}_t + \text{Пост}_t + \text{Дем}_t + \text{Выбр}_t}{(1+d)^t}}$$

$$\sum_{t=1}^T C_{\text{эз}} \cdot W_t \cdot \frac{1 - \alpha_{\text{соб.нужд}}}{(1+d)^t} = \sum_{t=1}^T \frac{KB_t + \text{Топл}_t + \text{Пост}_t + \text{Дем}_t + \text{Выбр}_t}{(1+d)^t}$$

$$C_{\text{эз}} = LCOE = \text{const}$$

$$LCOE \cdot \sum_{t=1}^T W_t \cdot \frac{1 - \alpha_{\text{соб.нужд}}}{(1+d)^t} = \sum_{t=1}^T \frac{KB_t + \text{Топл}_t + \text{Пост}_t + \text{Дем}_t + \text{Выбр}_t}{(1+d)^t}$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{KB_t + \text{Топл}_t + \text{Пост}_t + \text{Дем}_t + \text{Выбр}_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^T W_t \cdot \frac{1 - \alpha_{\text{соб.нужд}}}{(1+d)^t}}$$

## Технико-экономическое обоснование масштабов развития генерирующих технологий разного типа с учетом эффективности развития межсистемных связей на основе многовариантных оптимизационных расчетов

Расчетная многозонная модель ЕЭС России обеспечивает агрегированное представление электрических станций (структура генерирующих мощностей) и объектов электрической сети:

- Агрегированное представление электрической сети представляет собой совокупность:
  - **энергозон**, выделяемых в ЕЭС России в границах одной или совокупности нескольких смежных территориальных энергосистем, внутри которых принимается допущение об отсутствии ограничений на передачу мощности и неизменном уровне цен топлива
  - **межсистемных связей** между энергозонами, пропускная способность которых определяется с учетом фактической пропускной способности контролируемых сечений электрической сети и решений усилению электрической сети в зоне влияния межсистемной связи (сечения), утвержденных на предшествующем этапе перспективного планирования
- Агрегированное представление электростанций в виде совокупности агрегированных групп с однородными признаками (далее – генерирующие технологии):
  - состояние оборудования;
  - используемый первичный энергоресурс;
  - тип генерирующего оборудования;
  - признак крупности объекта (объекты малой генерации до 25 МВт и прочие объекты генерации)

Пример зонирования ЕЭС РФ  
использованный при расчете



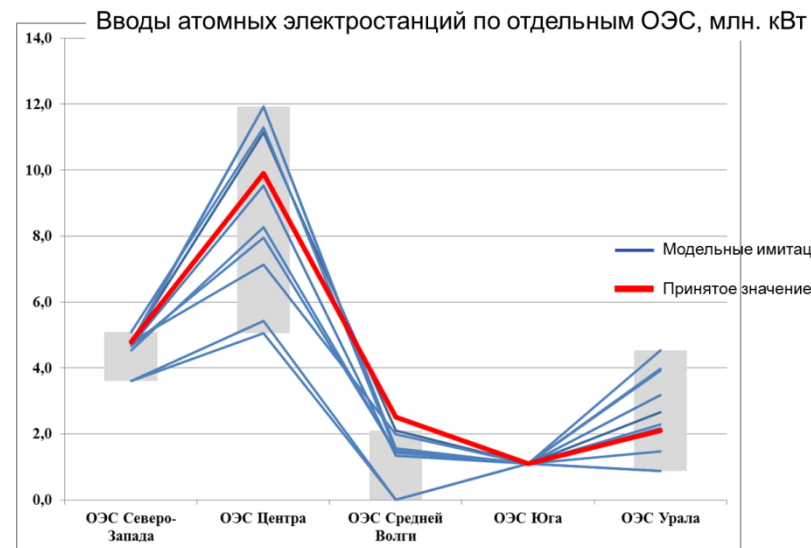
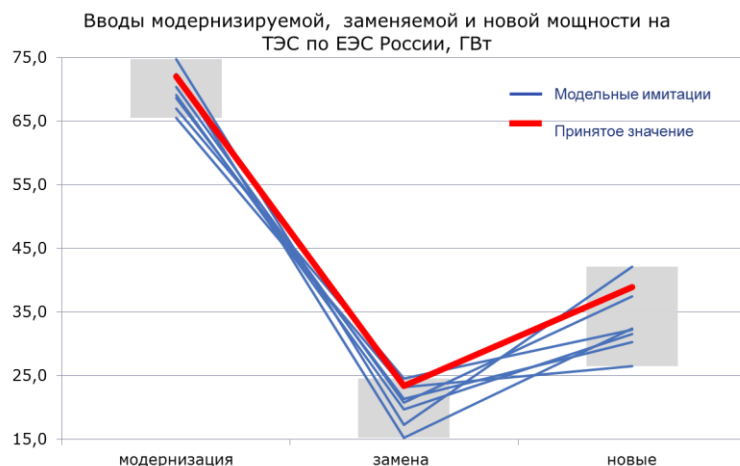
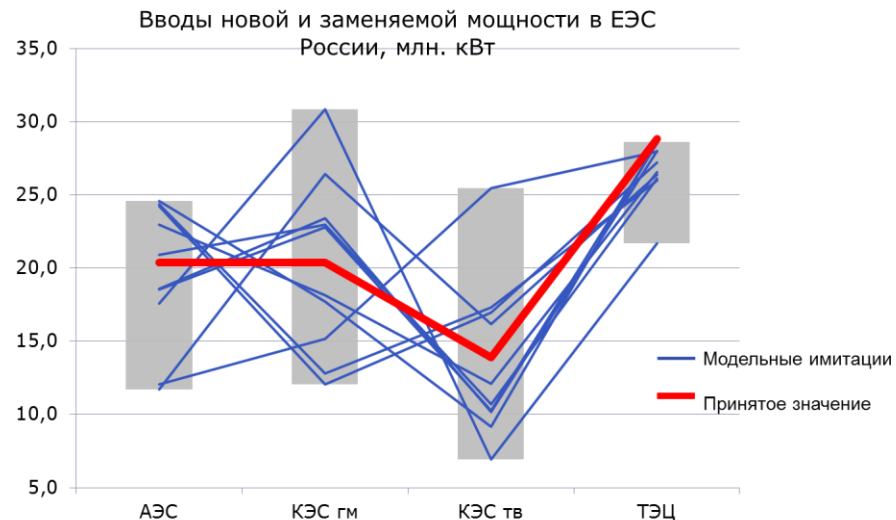
## Технико-экономическое обоснование масштабов развития генерирующих технологий разного типа с учетом эффективности развития межсистемных связей на основе многовариантных оптимизационных расчетов

Методические указания определяют систему необходимых функциональных требований к организации и результатам расчетов, которые могут быть выполнены с использованием разных математических моделей.

- Оптимизационная задача обоснования эффективных масштабов развития генерирующих технологий и межсистемных электрических связей разного типа с учетом:
- Граничных условий для **переменных**:
  - установленной мощности и годового производства электрической энергии генерирующими технологиями разного типа
  - Пропускной способности существующих межсистемных электрических связей
- Системы балансовых и иных **уравнений** (ограничений задачи):
  - Баланса активной мощности на час годового максимума
  - Годового баланса электрической энергии
  - Годового баланса централизованно производимой тепловой энергии (с учетом конкуренции с котельными)
  - Ограничениям по ресурсами топлива, объемам эмиссии
- **Целевой функции** (критерия оптимизации), отражающей минимум суммарных дисконтированных затрат на обеспечение прогнозного спроса на электрическую энергию, потребности в мощности и централизованно отпускаемой от электрических станций тепловой энергии в ЕЭС России за весь расчетный период + 20 лет.

# Многовариантная оптимизация структуры генерирующих мощностей

| Варьируемые факторы        | Обновление действующих ТЭС                                                         | Развитие теплофикации                                                         | Развитие общесистемных электростанций (КЭС и АЭС)            |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Цены топлива               | Цена газа $\Delta \pm 10\%$                                                        |                                                                               |                                                              |
| Стоимость строительства    | Сарех замены на ПГУ $\Delta \pm 10-15\%$                                           | Сарех новых ТЭЦ $\Delta \pm 10-15\%$                                          | Сарех новых КЭС и АЭС $\Delta \pm 10-15\%$                   |
| Спрос                      | Электроэнергия $\Delta \pm 5-7\%$                                                  | Тепло $\Delta \pm 2-3\%$                                                      | Электроэнергия $\Delta \pm 5-7\%$                            |
| Другие факторы             | меры стимулирования обновления (доля нового оборудования во вводах от 20% до 100%) | внедрение распределенной генерации - (замещение до 10% котельных на мини-ТЭЦ) | количество районов потенциального размещения новых АЭС и КЭС |
| Кол-во модельных вариантов | 10                                                                                 | 8                                                                             | 11                                                           |



# Формирование рациональной структур генерирующих мощностей по результатам многовариантных расчетов



## Обоснование размещения новых генерирующих мощностей

- Выполняется на основе рациональной перспективной структуры генерирующих мощностей ЕЭС России – определяются приоритетные для размещения типы генерирующих технологий
- Задача размещения ТЭЦ решается в рамках схем теплоснабжения
- При выборе районов размещения учитываются:
  - возможность размещения (наличие территории), в т.ч. на существующих площадках;
  - наличие источника технического водоснабжения;
  - возможность доставки топлива (в т.ч. наличие подъездных путей);
  - соблюдение норм и требований по охране окружающей среды и радиационной безопасности;
  - наличие солнечного (для СЭС) или ветряного (ВЭС) потенциала;
  - водно-энергетические показатели створов рек (для ГЭС).
- Возможные районы размещения новых генерирующих мощностей определяются на основании:
  - кадастры площадок размещения АЭС и ТЭС;
  - предложения органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, субъектов электроэнергетики, потребителей электроэнергии по размещению генерирующих мощностей;
  - схемы использования гидроэнергетических ресурсов рек и кадастра перспективных створов водохранилищ;
  - г) карты (атласы) размещения возобновляемых ресурсов с выделением районов

## Обоснование размещения новых генерирующих мощностей

- Альтернативные варианты размещения генерирующих мощностей:
  - на разных площадках, в т.ч. расширение действующих станций
  - с оборудованием разной единичной мощности
  - другой тип генерирующей мощности (при его наличии в перспективной структуре мощностей)
  - сопутствующие решения по развитию электрической сети для выдачи мощности в привязке к существующим или вновь сооружаемым подстанциям
- Выбор альтернативного варианта с учетом:
  - соответствия площадки техническим требованиям для возможного размещения электростанции
  - особенностей технико-экономических показателей электростанций при разных вариантах размещения (прежде всего – разница в капитальных затратах при применении разных технических решений или затратах на инфраструктуру (топливо, вода))
  - капиталовложений в электросетевые объекты для выдачи мощности

$$LCOE_{n,r,g^*} = \frac{\sum_{t=\tau_g^*+1}^{T_{n,cmp}^* + T_{n,эксн}^* + T_{n,дем}^*} (KB_{n,r,t} + KB_{n,r,t}^{свм} + I_{n,r,t}^{монл} + I_{n,r,t}^{носм} + Z_{n,r,t}^{дем}) \cdot (1+d)^{-t}}{\sum_{t=\tau_g^*+1}^{T_{n,эксн}^*} W_{n,r,t}^{омн} \cdot (1+d)^{-t}}$$

*При одинаковых технико-экономических показателях электростанций по вариантам размещения задача сводится к минимизации затрат на схему выдачи мощности*

**Институт энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН)**

[www.eriras.ru](http://www.eriras.ru)

**Федор Веселов, к.э.н., зам. директора**

[info@eriras.ru](mailto:info@eriras.ru), [erifedor@mail.ru](mailto:erifedor@mail.ru)

**АО «Институт ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»**

[www.aoesp.ru](http://www.aoesp.ru)

**Павел Полудницын, ЕЦК АО "Институт "ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ"**

[poludnitsyn\\_p@aoesp.ru](mailto:poludnitsyn_p@aoesp.ru)

**Спасибо за внимание!**