



22-24 апреля
2026



Санкт-Петербург
EXPOFORUM



XIV РОССИЙСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФОРУМ

«Инвариантность структур при моделировании энергосистем с ВИЭ»

Михаил Георгиевич Тягунов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

РИСКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ



- К рискам в области энергетической безопасности Доктриной энергетической безопасности Российской Федерации отнесены:
 - **увеличение доли возобновляемых источников энергии** в мировом топливно-энергетическом балансе
 - **несогласованное развитие отраслей топливно-энергетического комплекса и видов деятельности в сфере энергетики**, включая экспорт продукции и услуг организаций топливно-энергетического комплекса, в условиях ограниченного государственного контроля и регулирования.



НАРУШЕНИЯ СИСТЕМНОЙ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ

3

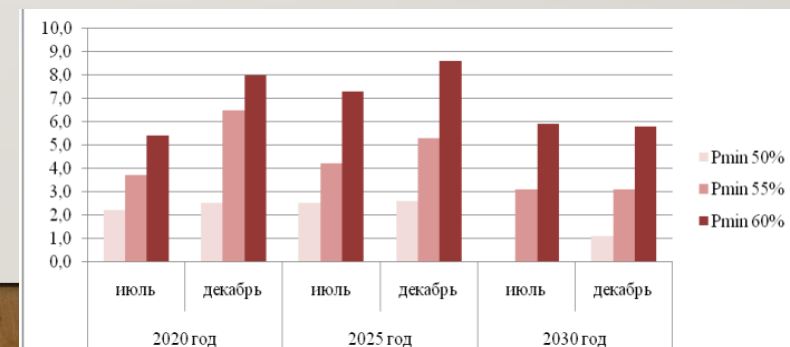
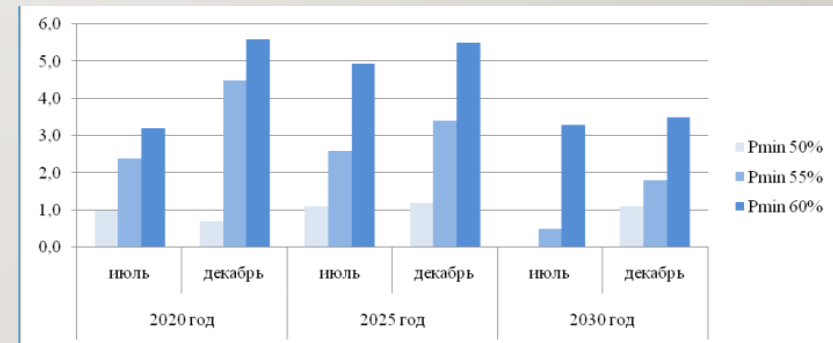
1. потеря регулирования при некоординированном вводе АЭС и ВИЭ
2. нарушение закона разнообразия при использовании одного вида энергии (электричество на транспорте, в управлении, отоплении)
3. нарушение принципа разумности объема информации, которую способны преобразовать люди для выработки управленческих решений.

РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ПРИ ВВОДЕ АЭС И ВИЭ

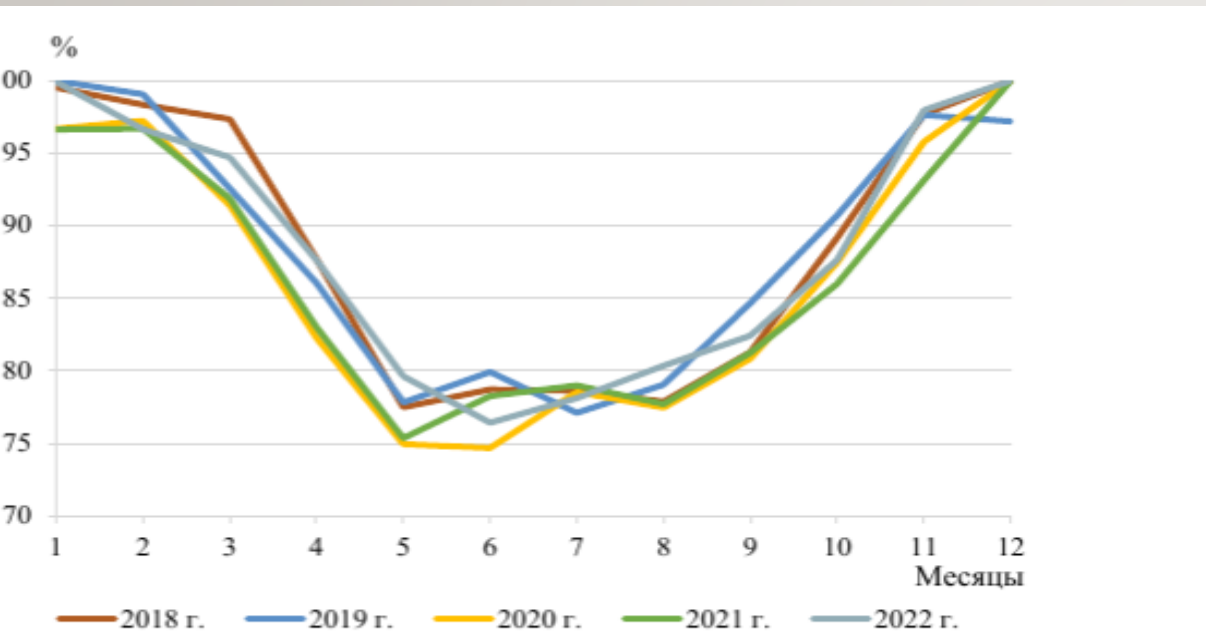


- В ряде ОЭС Европейской части РФ наблюдаются проблемы с БАЛАНСОМ МОЩНОСТИ В пиковые ночные ЧАСЫ суточных графиков нагрузки (некомпенсированные избытки мощности).
- Избытки мощности возникают при недостаточной глубине регулирования мощности АЭС и ВИЭ
- Возможности балансировки энергетических режимов ЕЭС России перетоками между смежными ОЭС ограничены пропускной способностью сечения.

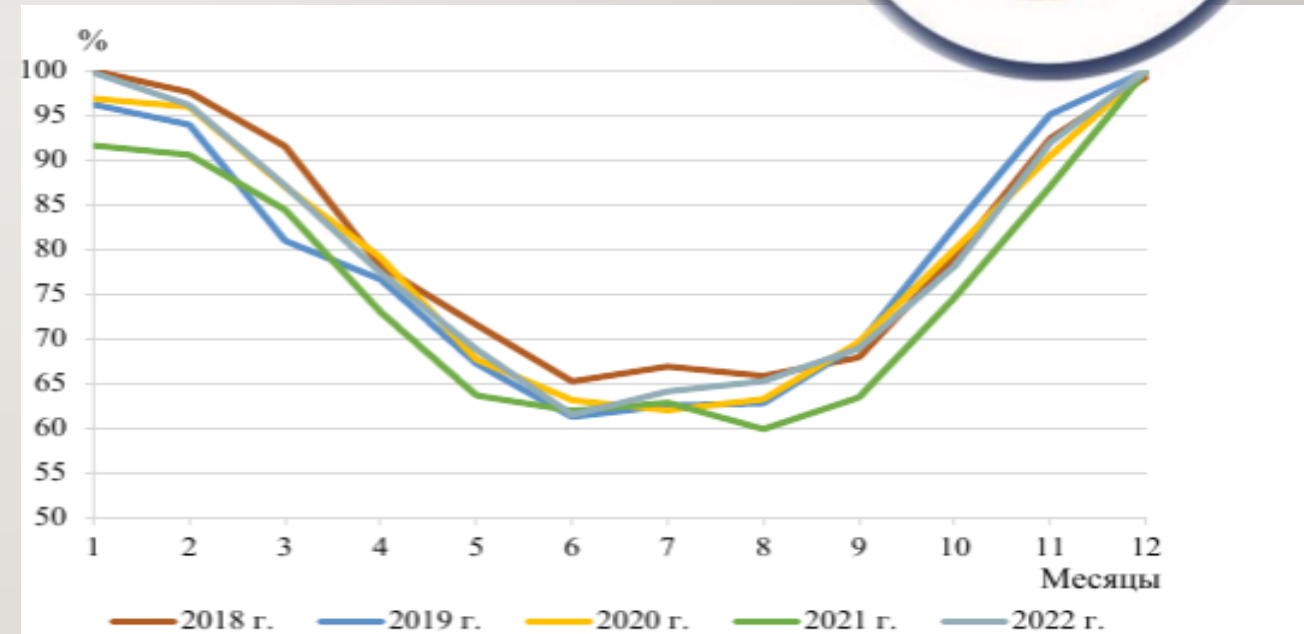
Некомпенсированные избытки мощности рабочего и выходного дней



НЕРАВНОМЕРНОСТЬ НАГРУЗКИ 1-Й И 2-Й СИНХРОННЫХ ЗОН ЕЭС РОССИИ



– Годовые графики месячного потребления мощности 1-й синхронной зоны



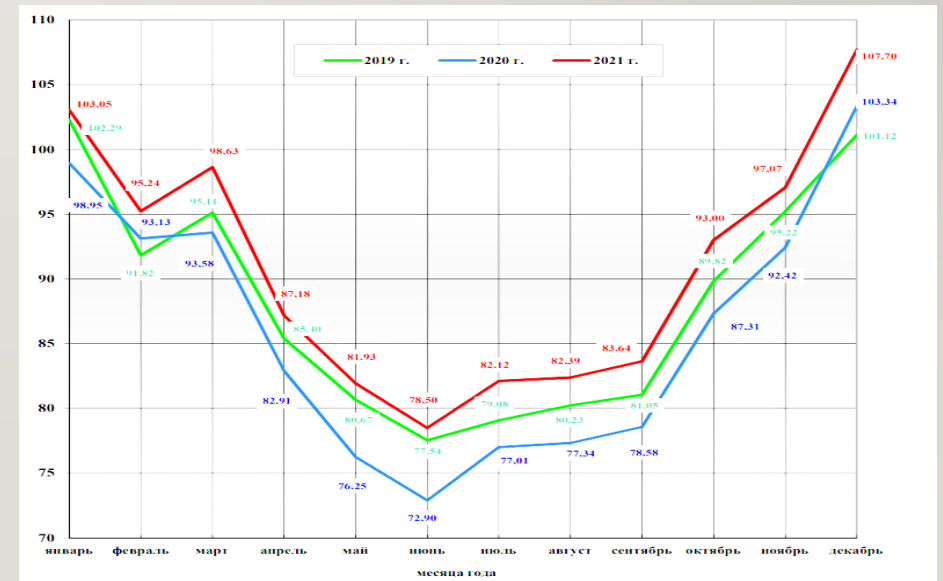
– Годовые графики месячного потребления мощности 2-й синхронной зоны

ТРЕБУЕМАЯ ГЛУБИНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ



- Годовой максимум потребления мощности ЕЭС России в 2021 году зафиксирован на уровне 166,1 ГВт.
- Выпускаемые резервы мощности на час прохождения годового максимума потребления мощности ЕЭС России составили 34,7 ГВт, т.е. около 20%
- **Требуемая Глубина регулирования мощности в ЕЭС России составляет порядка (25-40)%**

Динамика потребления электроэнергии в ЕЭС России, млрд. кВт.ч

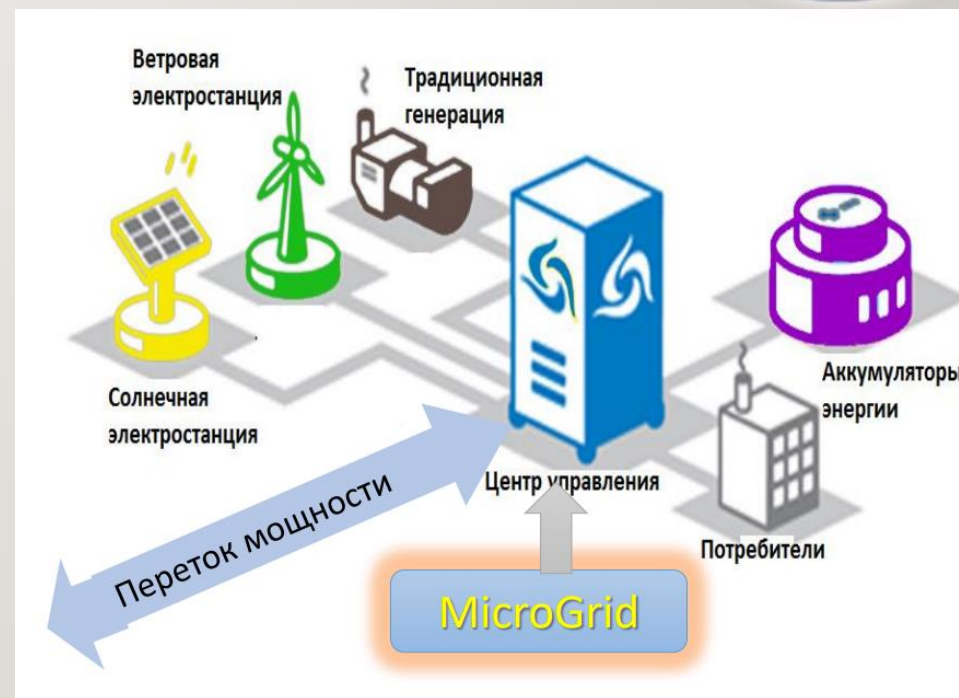


7

ЖИВУЧЕСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

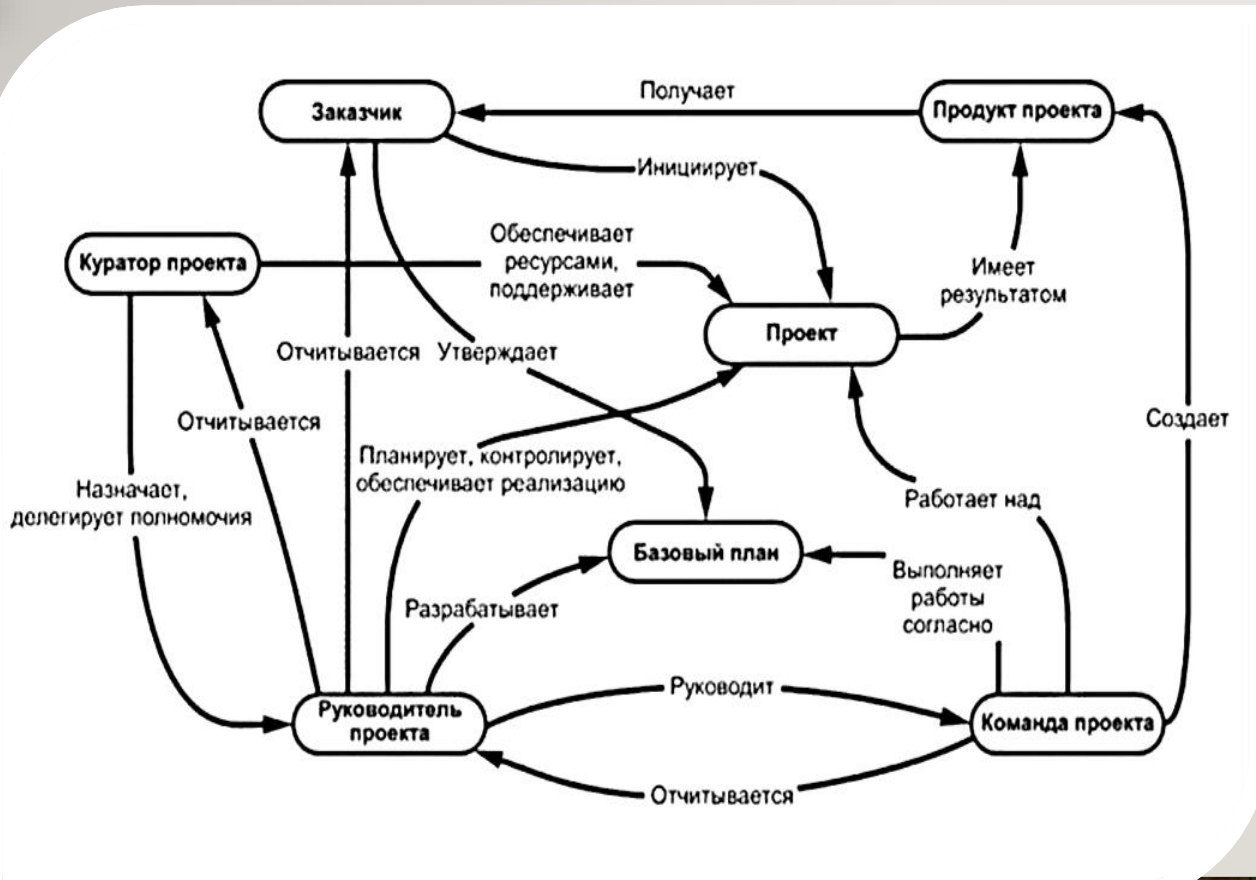


- эффективность функционирования системы и способность системы сохранять хотя бы часть функционала при в аварийной ситуации называется функциональной живучестью, которая обеспечивается функциональной и структурной избыточностью.
- Это значит, что части энергосистемы, не обеспечивающие ее нормальное функционирование в части регулирования, должны дополняться средствами обеспечения **гарантированной мощности**





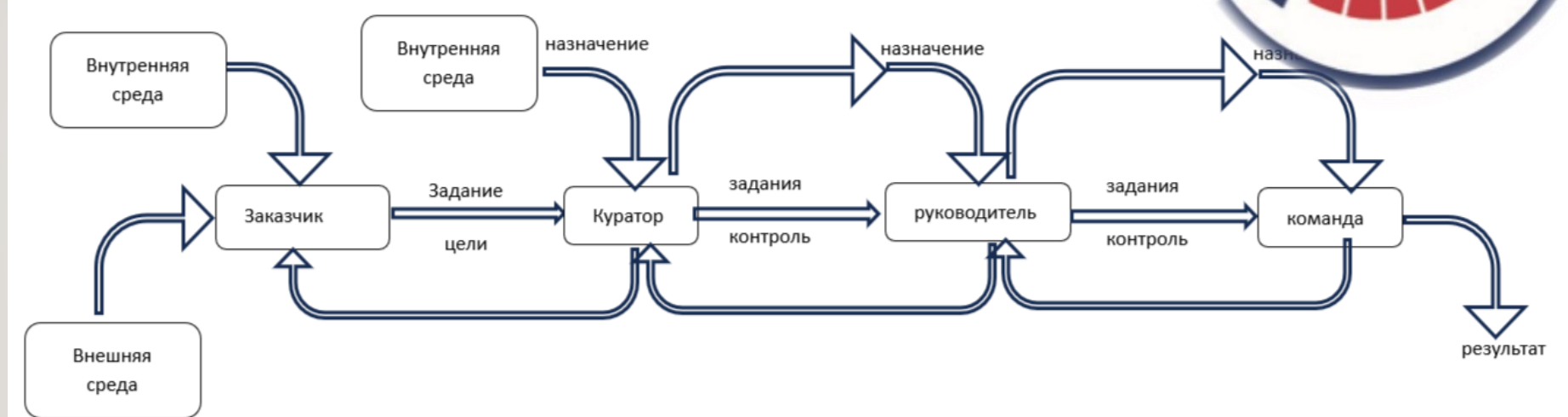
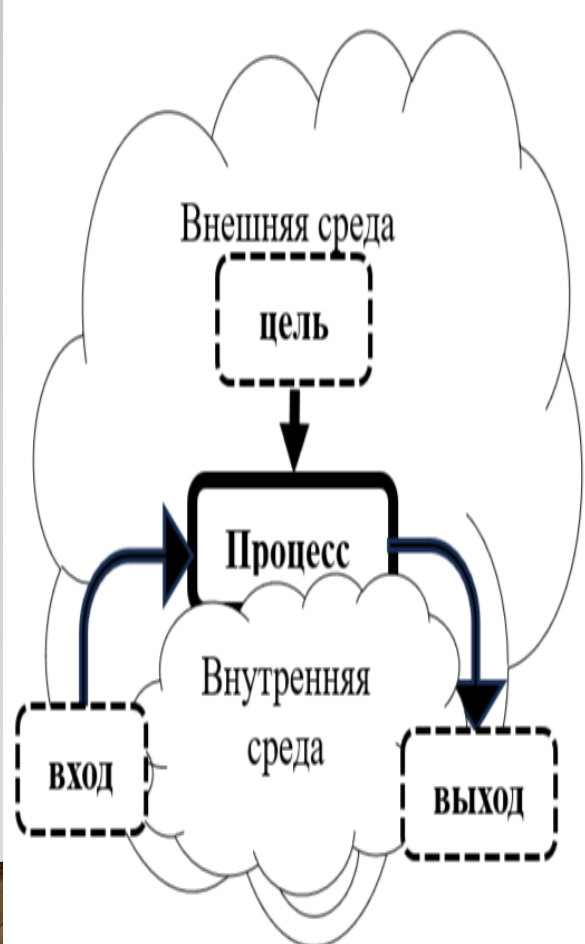
8 НЕТОЧНОСТИ В НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ



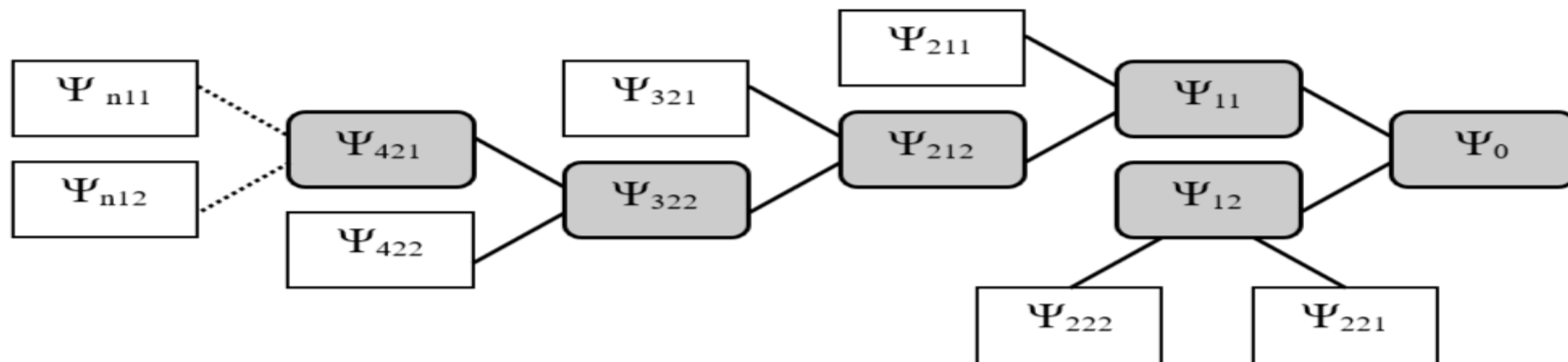
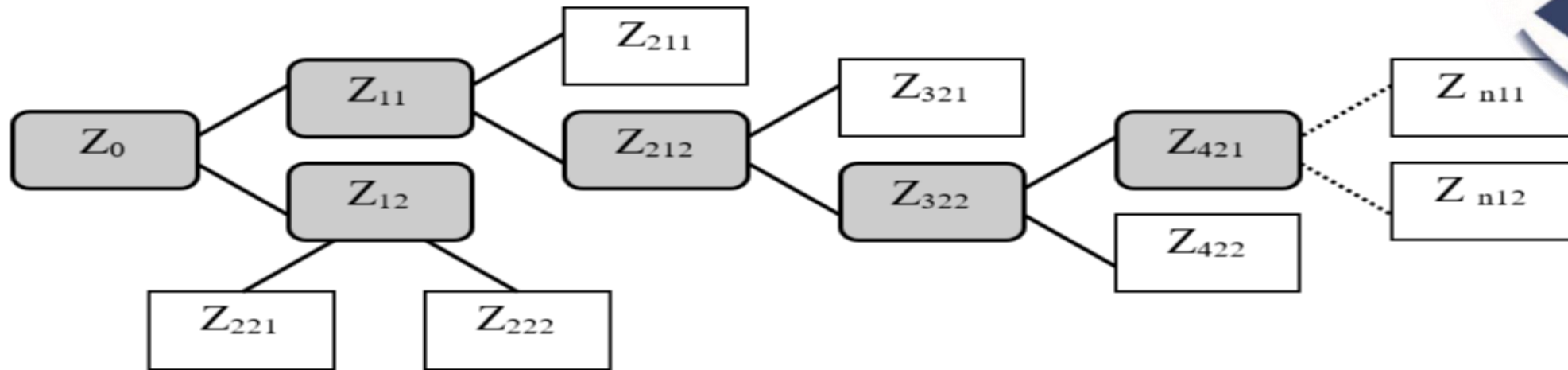
- В один граф включены разные объекты – процессы (проект) и участники (заказчик, руководитель и т.д.)
- Дуги (связи) не имеют четкого назначения – передача ресурсов, передача информации и т.д.
- Не учтены продукты взаимодействия внешней и внутренней сред процессов (проектов).



9 ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ ИНВАРИАНТОВ



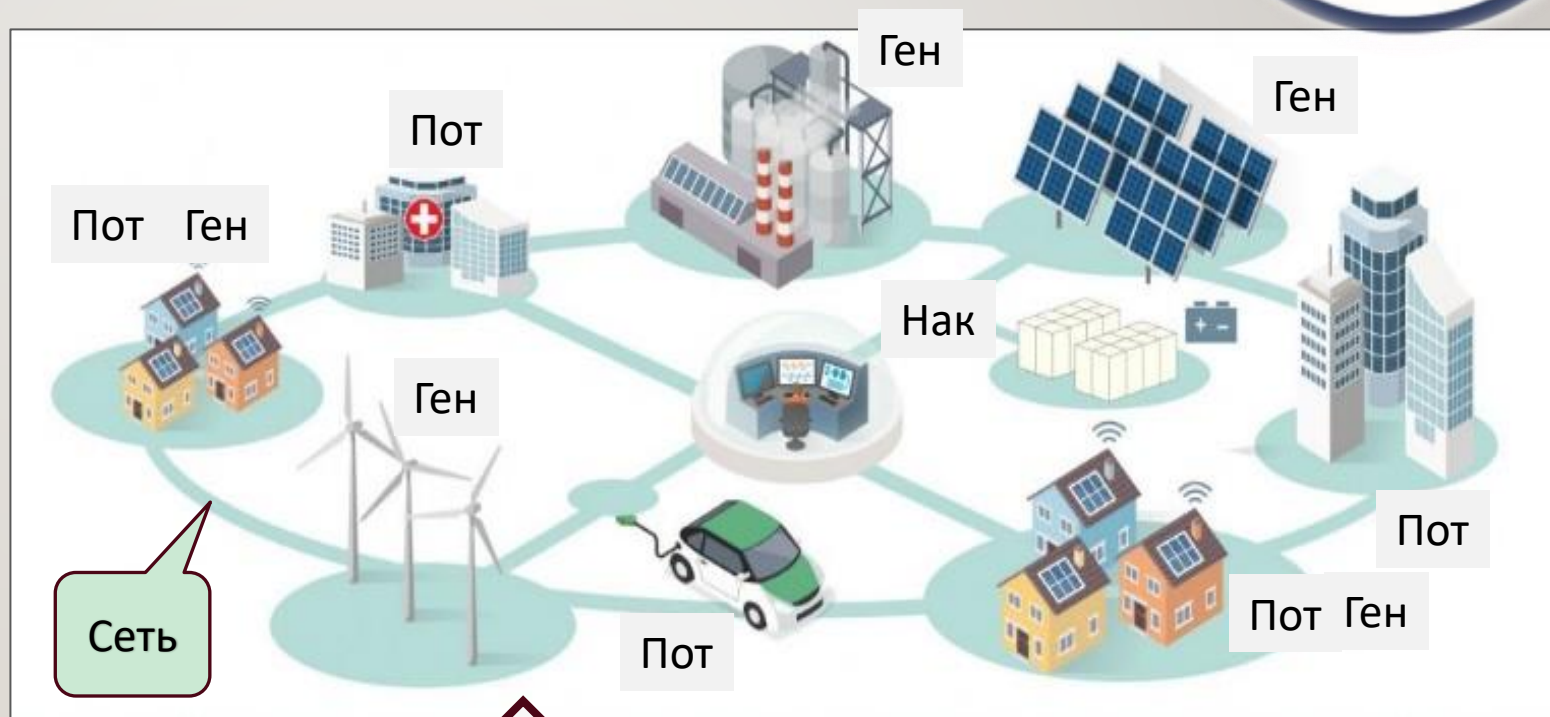
10 ДАРЕВЬЯ ЦЕЛЕЙ И ДЕЙСТВИЙ ПРОЕКТА



ПРИНЯТАЯ СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



- Ген – генераторы
- Пот – потребители
- Нак – накопители
- Пот-ген – объекты распределенной генерации
- Сеть – транспортная-распределительная электрическая сеть.
- ЭЭС – электроэнергетическая система



ЭЭС

Переток

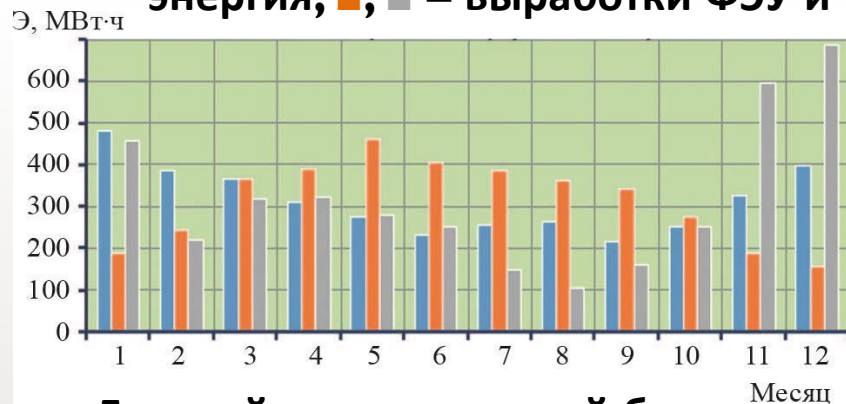


ТРЕБОВАНИЯ К СНЭ НА ГОДОВОМ ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ



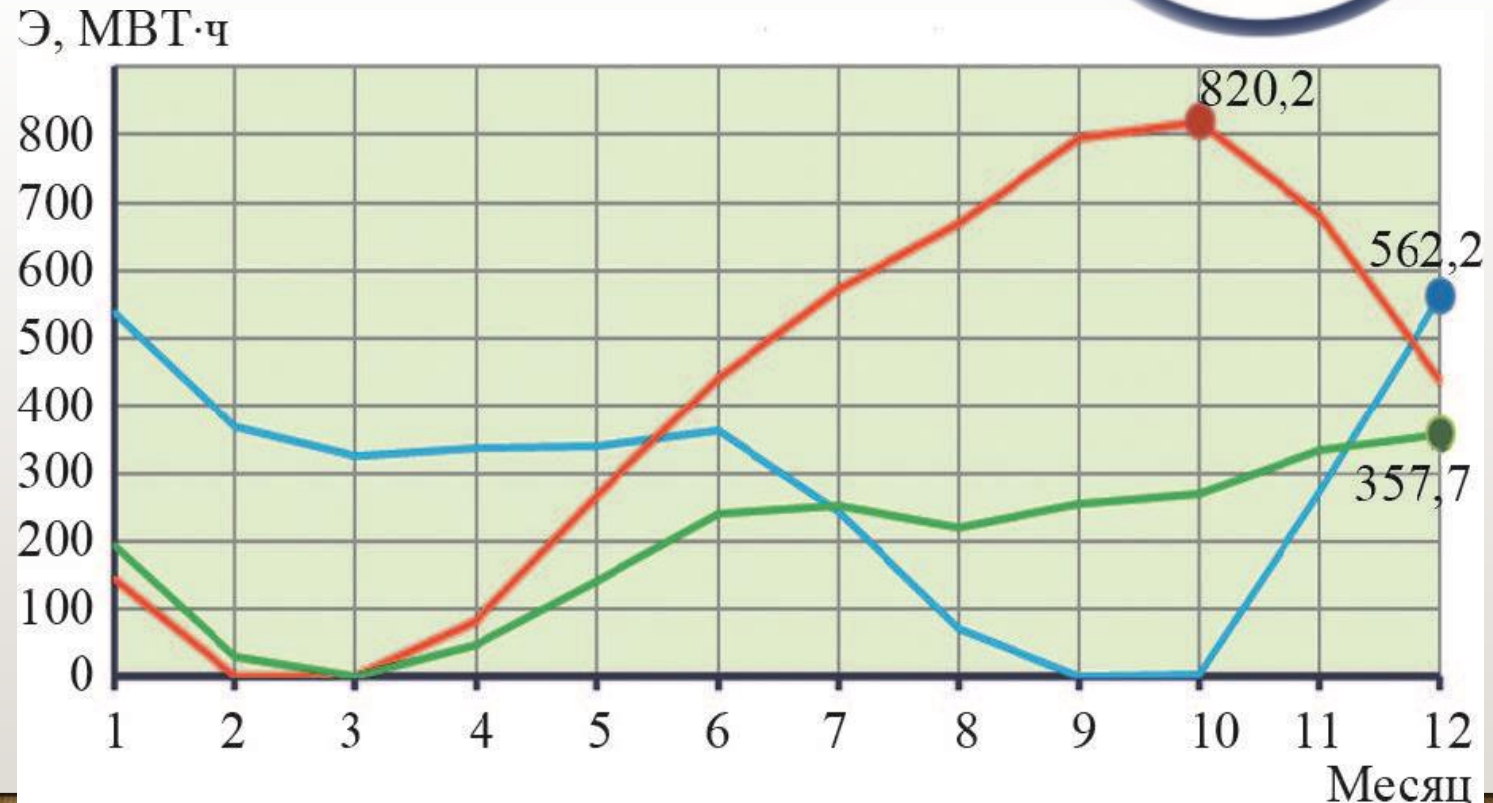
12

Годовой энергетический баланс при раздельном применении ФЭУ и ВЭУ: ■ – потребляемая энергия, ■, ■ – выработки ФЭУ и ВЭУ



Объем хранения электроэнергии идеальной СНЭ, необходимой для сглаживания сезонных колебаний энергии, вырабатываемой ФЭУ (—) и ВЭУ (—) отдельно и совместно (—)

Годовой энергетический баланс при комбинированном применении ФЭУ и ВЭУ: ■ – потребляемая энергия, ■ – суммарная выработка ФЭУ и ВЭУ

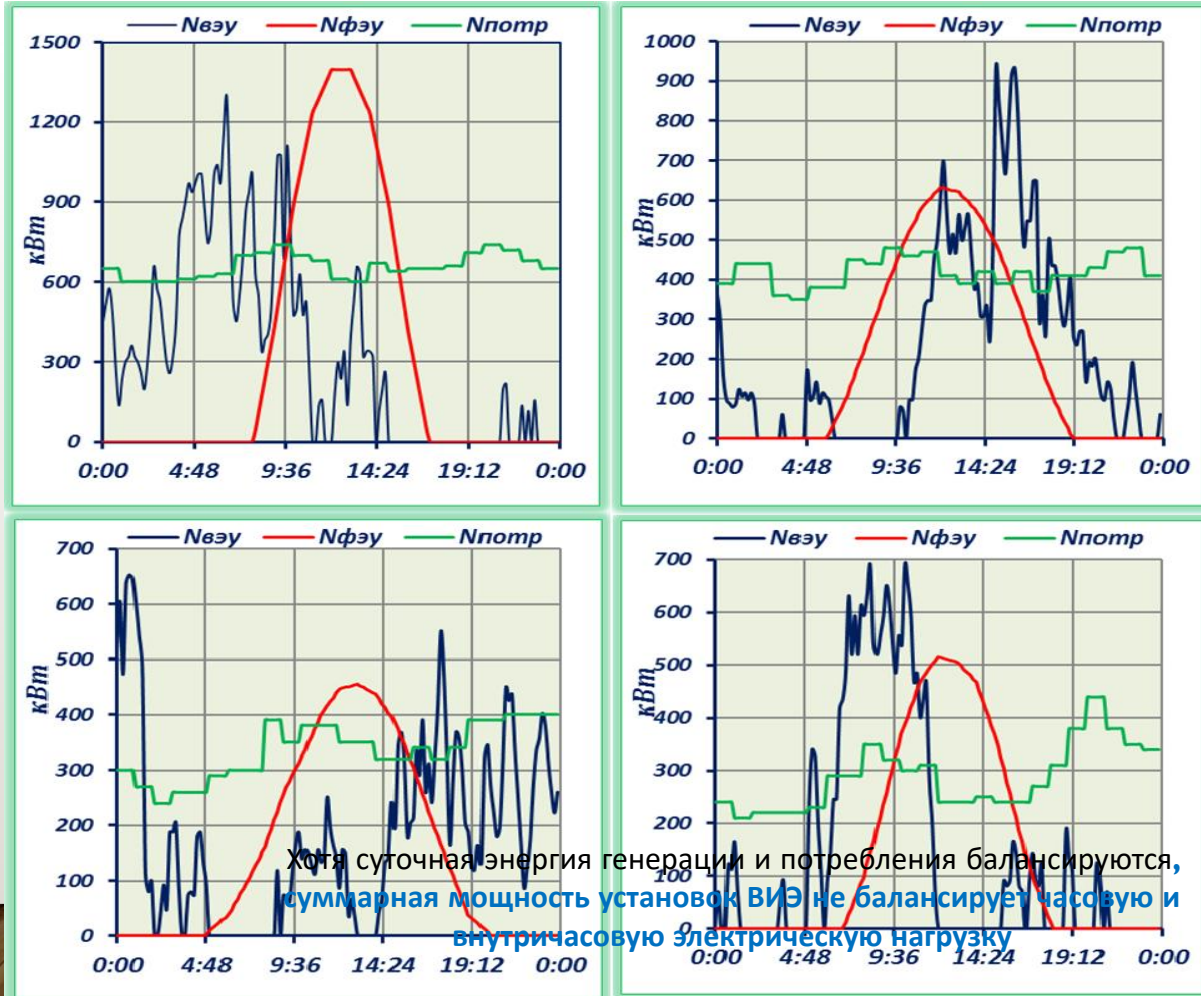


ТРЕБОВАНИЯ К СНЭ НА СУТОЧНОМ ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ

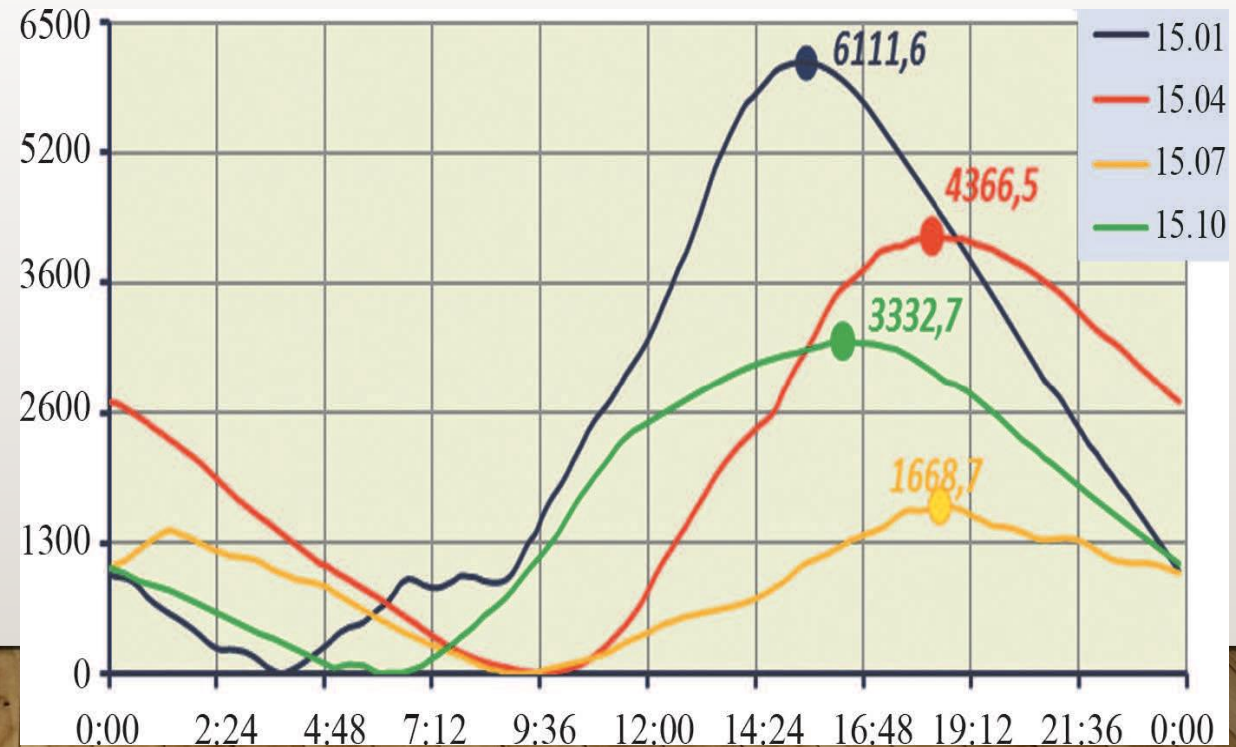


13

Зависимости изменения мощности ВЭУ, ФЭУ и электропотребления внутри суток *

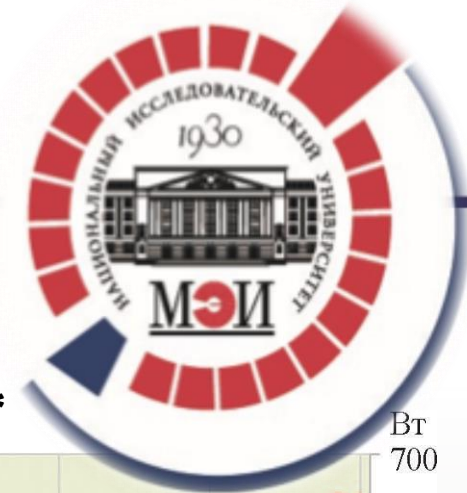


Объемы хранения электроэнергии идеальной СНЭ, необходимые для сглаживания суточных колебаний потребляемой и вырабатываемой энергии ФЭУ и ВЭУ



* Расчеты сделаны для 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября одного года.

ТРЕБОВАНИЯ К СНЭ НА ВНУТРИСУТОЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ ВРЕМЕНИ



14

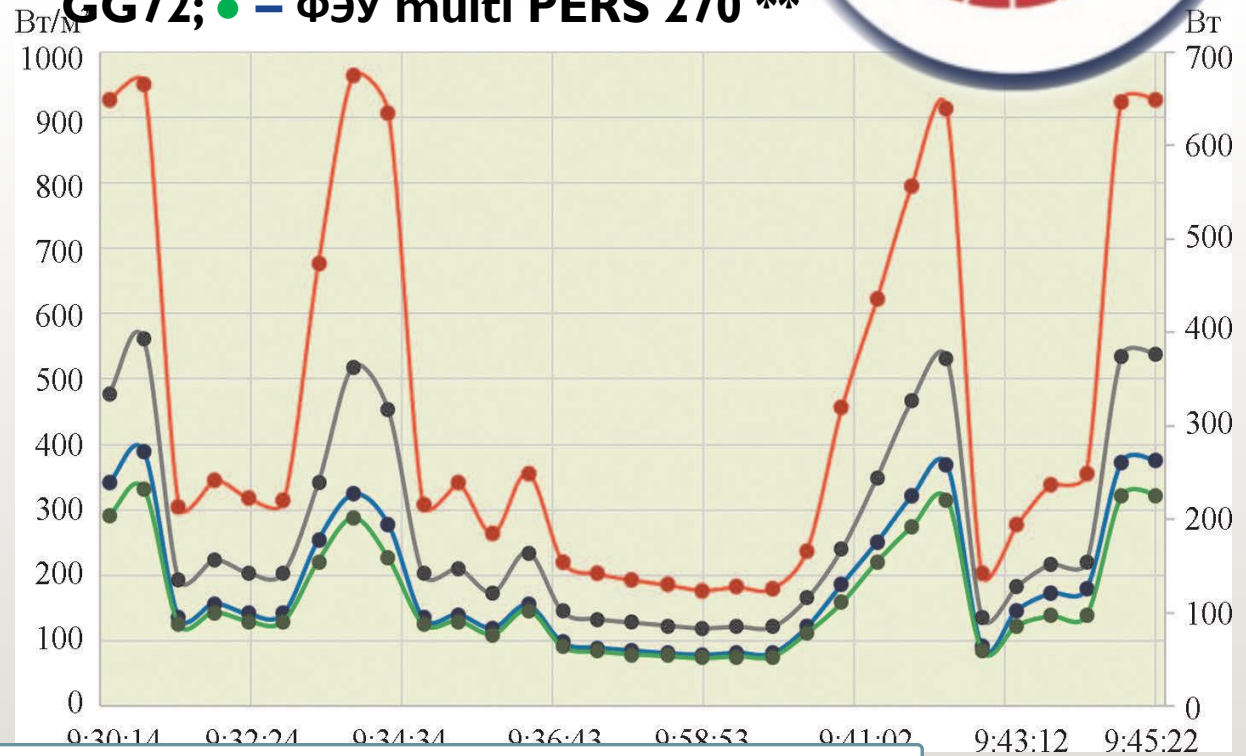
Рабочие режимы ВЭУ:

- скорость ветра; — расчетная выходная мощность;
- фактическая выходная мощность;
- скорость вращения ветроколеса*



Рабочие режимы ФЭУ:

- — солнечная радиация; ● — ФЭУ Hevel HJT 305;
- — ФЭУ Hevel GG72; ● — ФЭУ multi PERS 270 **

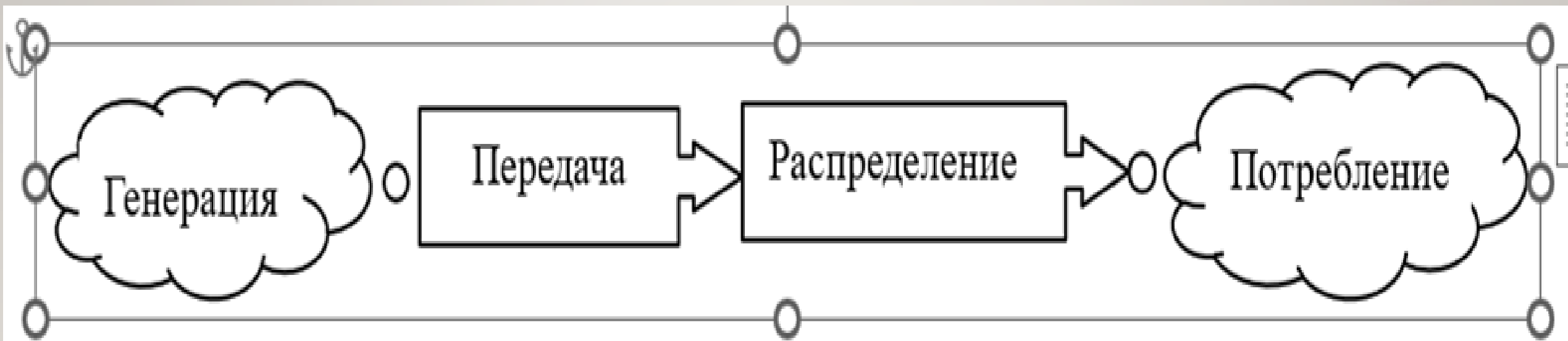


При наличии ФЭУ и ВЭУ в составе ГЭК высока вероятность появления режимов дефицита и избытка мощности на очень коротких (секундных) интервалах времени

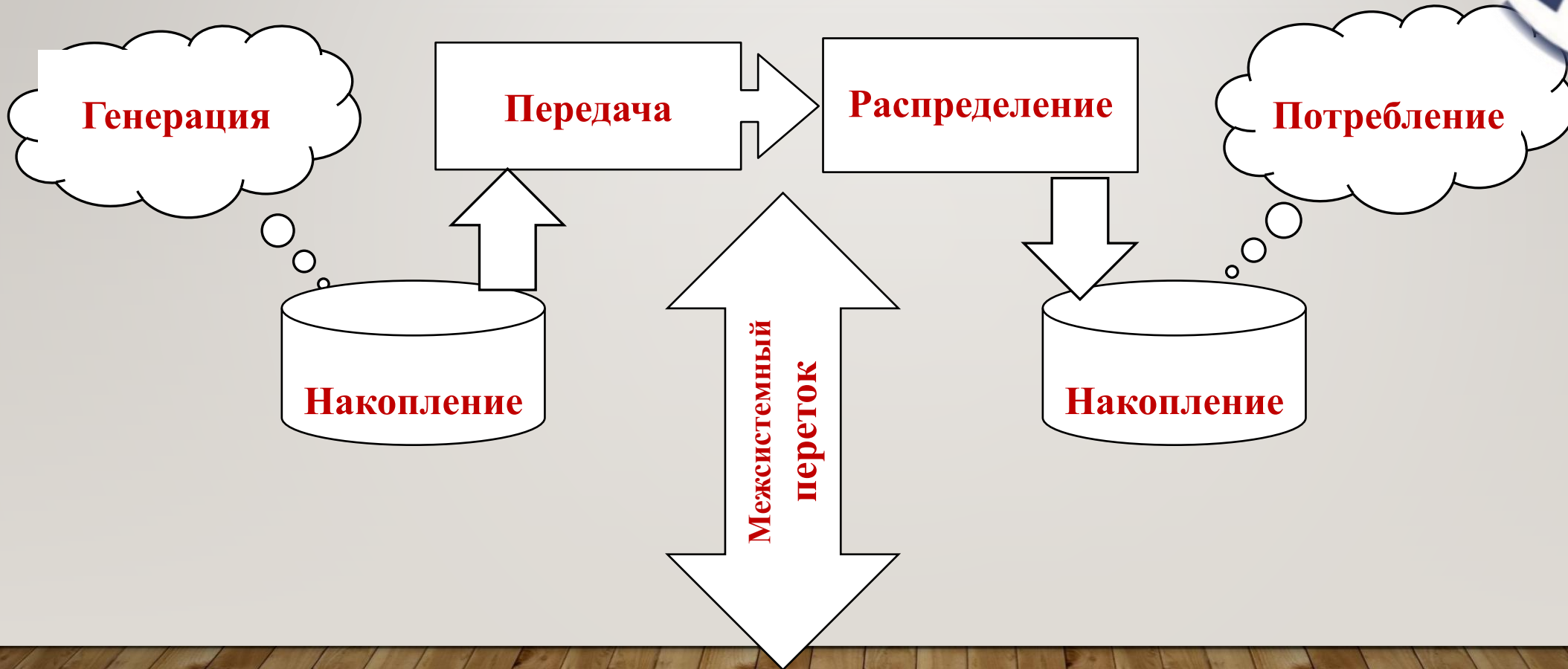
* фактически данные эксплуатации ВЭУ ВДМ-2 в Санкт-Петербурге ФЭУ за 8 января 2017 года

** фактически данные эксплуатации экспериментальной солнечной станции в Пятигорске ФЭУ за 8 января 2017 года

15 САМОБАЛАНСИРУЮЩИЙСЯ УЗЕЛ ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭЭС



16 САМОБАЛАНСИРУЮЩИЙСЯ УЗЕЛ ЭЭС

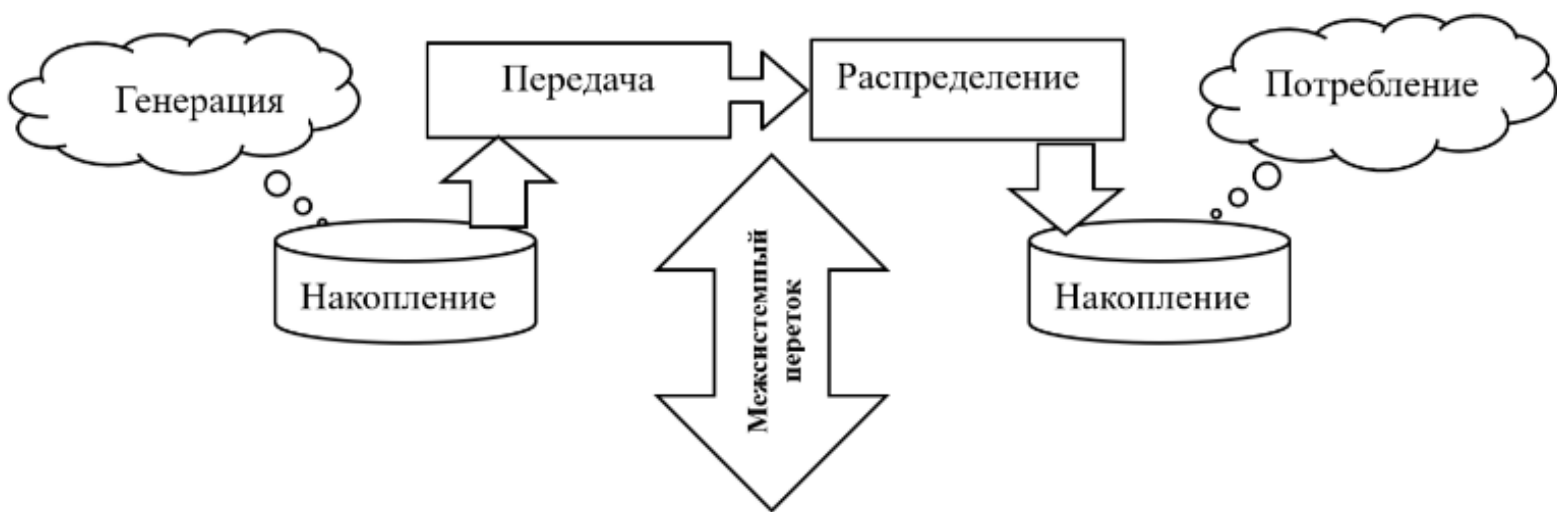
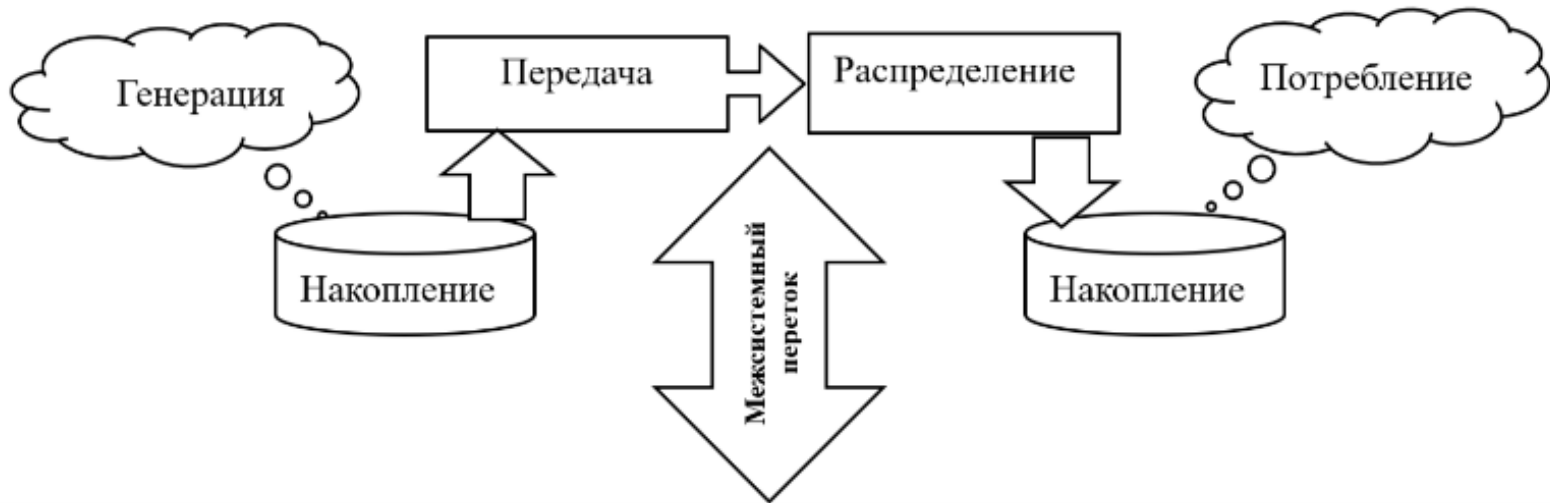


17

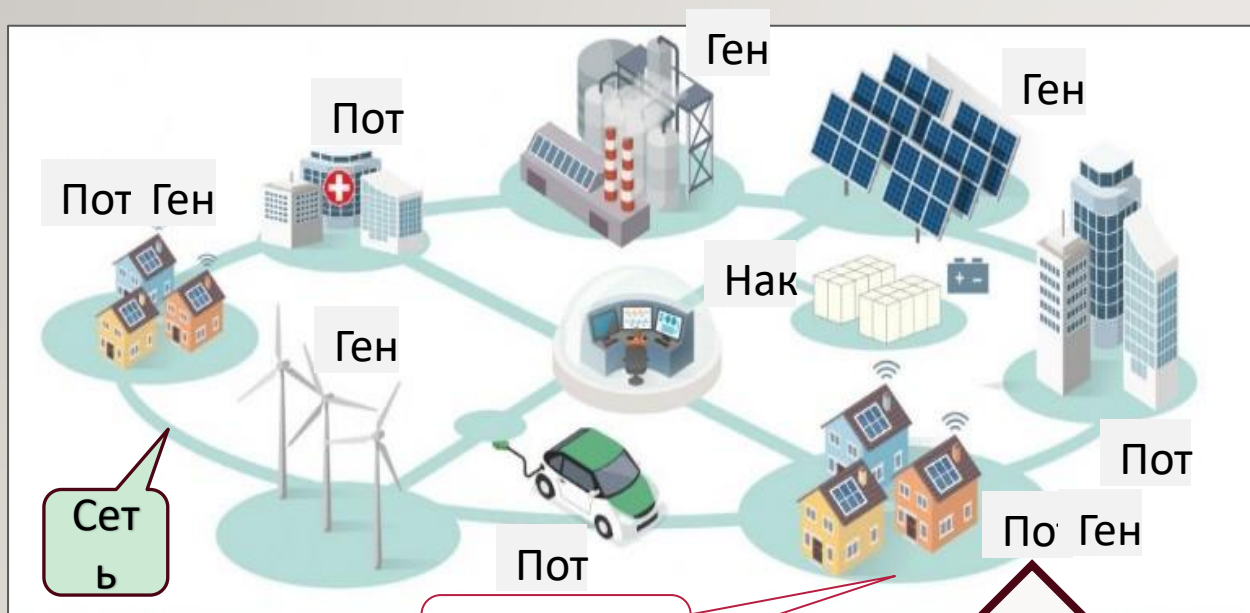
САМОБАЛАНСИРУЮЩИЙСЯ УЗЕЛ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОЭС



- Использование структурных решений позволяет построить непротиворечивую модель процесса еще до придания каждому из элементов системы количественных значений параметров.



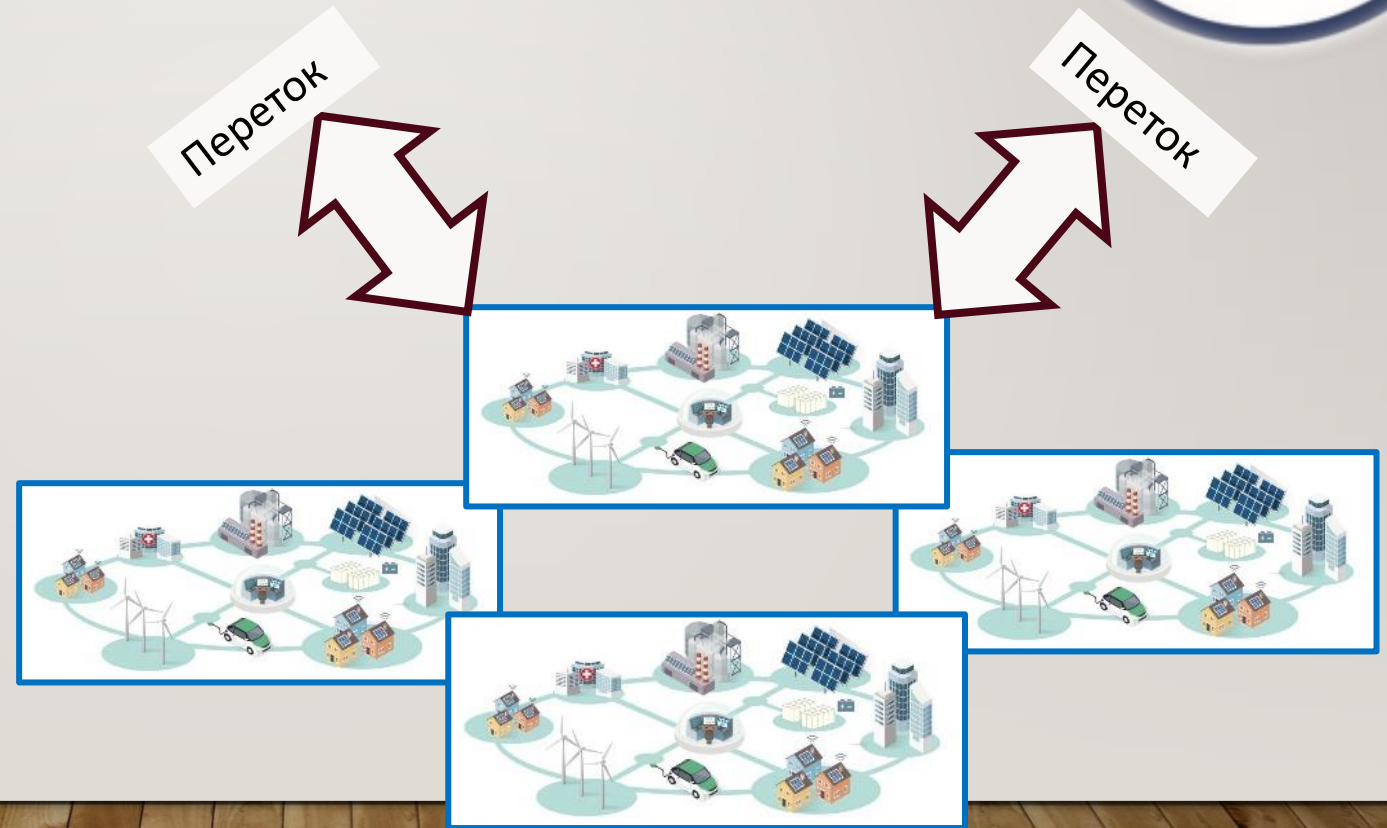
СТРУКТУРНЫЙ ИНВАРИАНТ УЗЛА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭЭС



- Полнофункциональный Узел распределенной ээс, удовлетворяющий условию:
- Внешний переток узла минимален или идеальный узел распределенной ЭЭС – ЭЭС со сбалансированными потреблением и генерацией.

СТРУКТУРНЫЙ ИНВАРИАНТ 19 РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭЭС

- Полнофункциональная структура многоэлементной иерархически вложенной ЭЭС в составе сбалансированных энергоузлов, связанных между собой двухсторонними внешними перетоками



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРНОГО ИНВАРИАНТА ЭЭС



- ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ РЕШЕНИЙ ПОЗВОЛЯЕТ ПОСТРОИТЬ НЕПРОТИВОРЕЧИВУЮ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЕЩЕ ДО ПРИДАНИЯ КАЖДОМУ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ.
- ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЖДОМУ ЭНЕРГОРАЙОНУ **ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БАЛАНСОМ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ** ВО ВСЕХ ЦИКЛАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗВОЛЯЕТ СТРУКТУРНОЕ РЕШЕНИЕ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОЙ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ ЭЭС.





- «То, что **мы называем хаосом** — это всего лишь закономерности, которые мы не **2**умели распознать. То, что мы называем случайностями — это всего лишь закономерности, которые мы не в состоянии расшифровать» (**Чарльз Майкл (Чак) Паланик**) <https://citaty.info/quote/12535>
- «**Инвариантность** – фундаментальное физическое понятие, выражающее независимость физических закономерностей от конкретных ситуаций, в которых они устанавливаются, и от способа описания этих ситуаций». (**Большая Российская энциклопедия**) <https://bigenc.ru/c/invariantnost-d43e24>
- «**Симметрия**... является той идеей, посредством которой человек на протяжении веков пытался постичь и создать порядок, красоту и совершенство. Под симметрией следует понимать неизменность (инвариантность) какого-либо объекта при определенном рода преобразованиях». (**Герман Клаус Гуго Вейль**, Симметрия. -М., 1968) <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/23505/1/iurp-1997-05-07.pdf>



22-24 апреля
2026



Санкт-Петербург
EXPOFORUM



XIV РОССИЙСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФОРУМ

Спасибо за внимание!

Михаил Тягунов
НИУ «МЭИ»