

# Предпосылки и подходы к созданию моделей управления объектами распределенной генерации в составе распределительных сетей

**Илюшин Павел Владимирович**

Заместитель Генерального директора –  
Главный инспектор  
ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС», к.т.н.,  
руководитель подкомитета С6 РНК СИГРЭ,  
руководитель подкомитета ПК-5  
ТК 016 «Электроэнергетика» Росстандарта

Москва, 2015





# Мировые тенденции в развитии распределенной генерации



Рост суммарной установленной мощности установок РГ в энергосистемах развитых стран

Рост установленной мощности единичных объектов РГ (ветропарки, крупные солнечные электростанции)


Рост воздействия объектов РГ на установившиеся и динамические режимы работы ЭЭС

Тренд на гармоничное развитие традиционной и распределенной генерации

Решение вопросов резервирования объектов РГ энергоустановками ТЭС, АЭС и их реновация



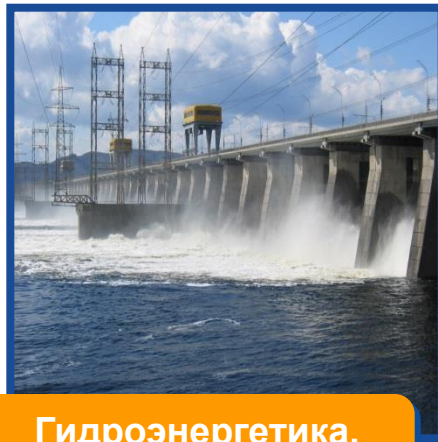
Развитие стандартизации и ужесточение ТТ к работе объектов РГ в составе ЭЭС

- 
1. Развитие гибридных комплексов с применением технологий накопления электрической энергии
  2. Развитие технологий «Smart Grid»
  3. Развитие технологий сбора, обработки и передачи данных
  4. Создание новых моделей рыночного и технологического управления объектами распределенной генерации и потребителями



# Виды возобновляемой энергетики

Солнечная энергетика



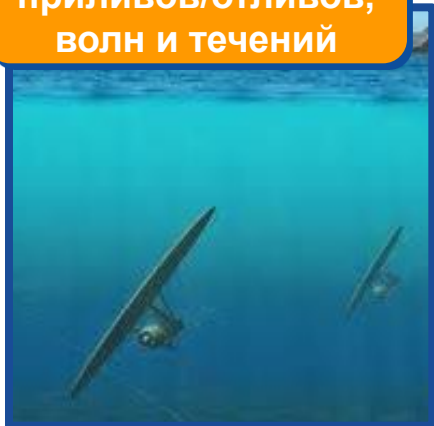
Гидроэнергетика, включая малые ГЭС

Ветроэнергетика



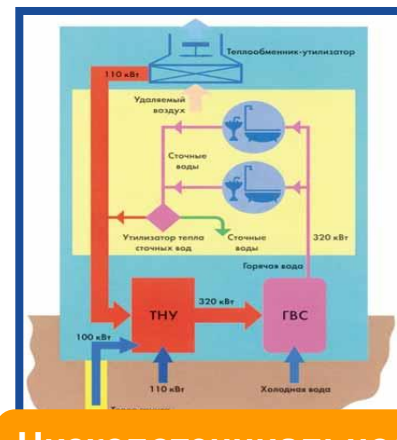
Другие технологии ВИЭ

Энергия приливов/отливов, волн и течений



Геотермальная энергетика

Энергия биомассы



Низкопотенциальное тепло





# Солнечная прибрежная электростанция 70 МВт г. Кагосима (Япония)



 **KYOCERA**

**S = 1 270 000 кв. м**

**Годовой отпуск:  
78 800 МВт\*ч**

**Электроснабжение  
22 000 домов**

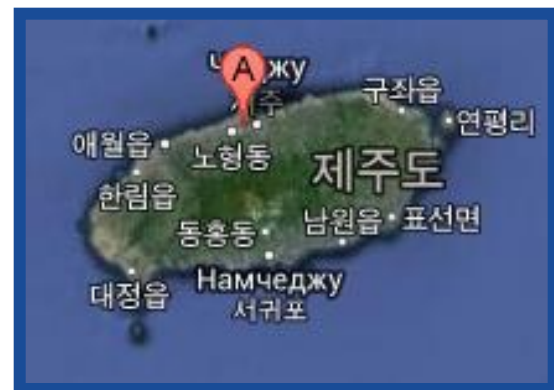
***Начало  
строительства:***  
**сентябрь 2012 г.**

***Окончание  
строительства:***  
**октябрь 2013 г.**



# Ветряные электростанции о. Чеджу 127 МВт (Южная Корея)

- Установленная мощность генерирующего оборудования – 787 МВт
- Интеграция электротранспорта в систему электроснабжения
- Вставки постоянного тока для подключения к основной энергосистеме
- Интеллектуальный учет 6000 домохозяйств
- Максимальная нагрузка о. Чеджу – 681 МВт



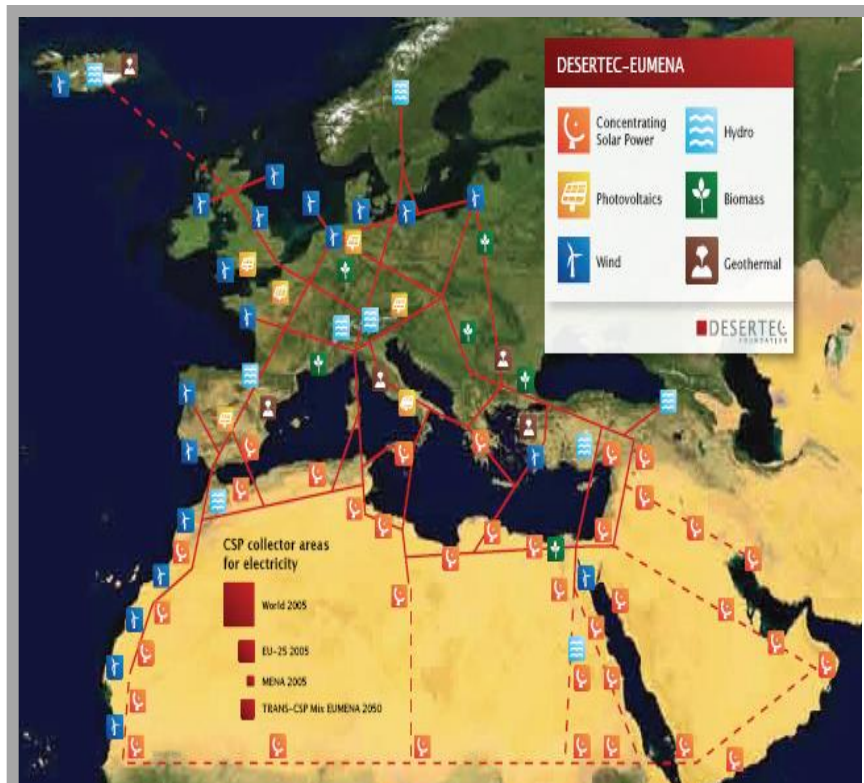
**Остров Чеджу:**  
**S = 73 км x 41 км**  
**Численность населения:**  
**500 000 человек**



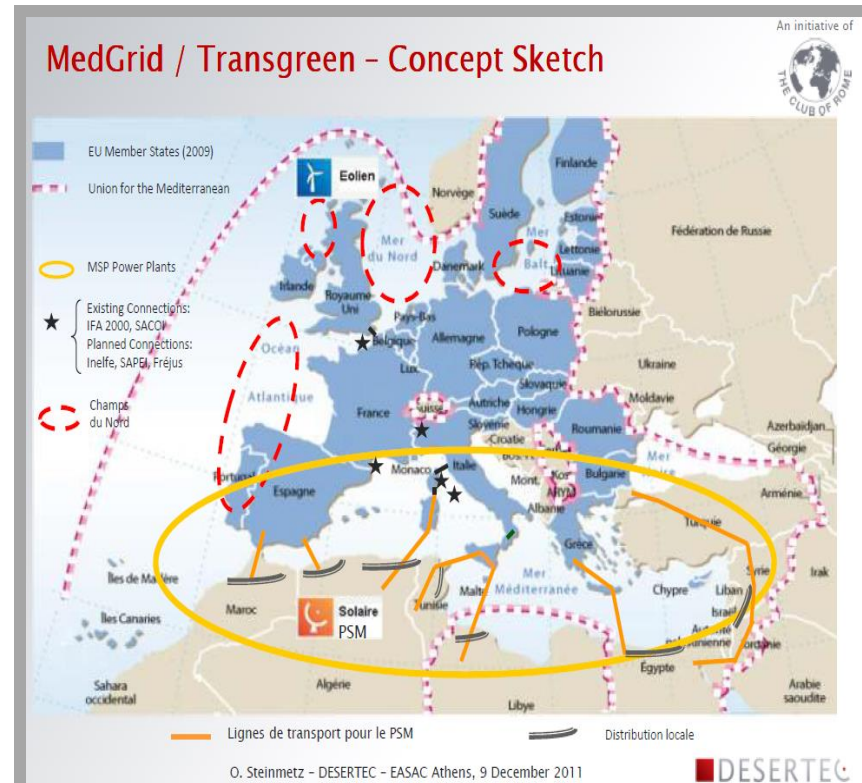


# Глобальные энергетические проекты на базе ВИЭ

Развитие систем управления ГУ ВИЭ различных видов в будущем позволит реализовывать энергетические проекты глобального характера



Концепция интеграции чистой энергии пустынь с другими ВИЭ с помощью передачи э/э постоянного тока на высоком напряжении



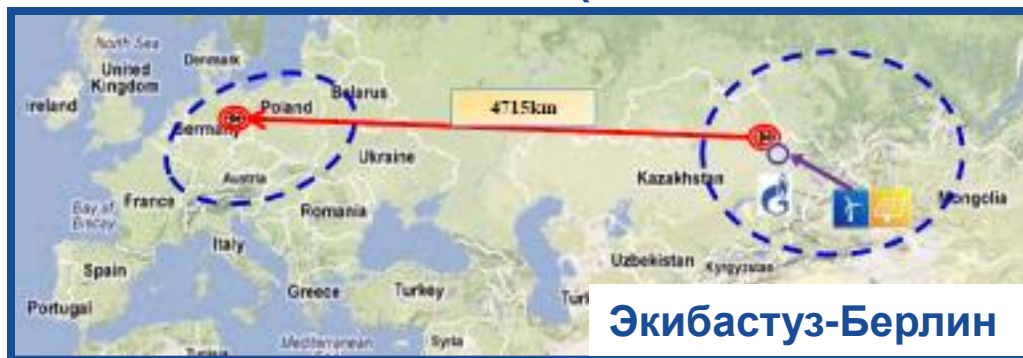
Перспективные места развития Международных энергообъединений на базе ВИЭ по версии Римского Клуба



# Энергомост «Центральная Азия – Европа»

Электропередачи **постоянного** тока высокого напряжения

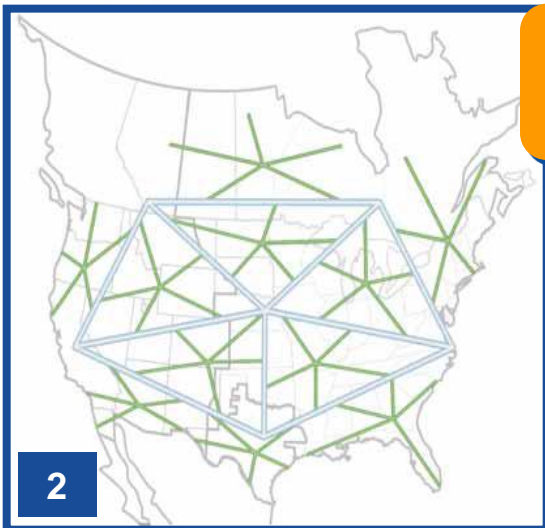
- **±800 кВ: 8 ГВт** (5 кА, 6x1000 кв. мм), в диапазоне 1100-2500 км
- **±1100 кВ: 11 ГВт** (5 кА, 8x1000 кв. мм), в диапазоне 2500-5000 км



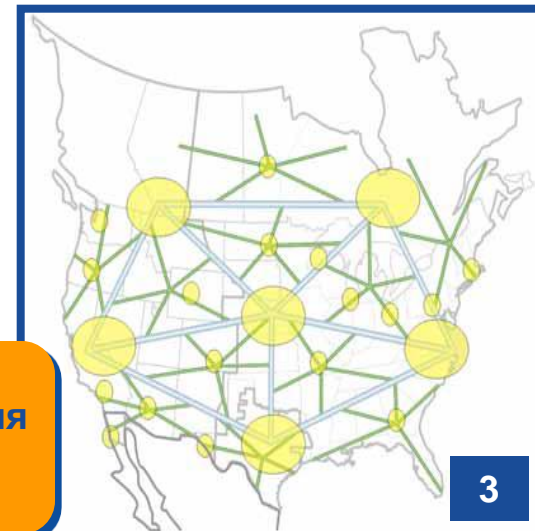




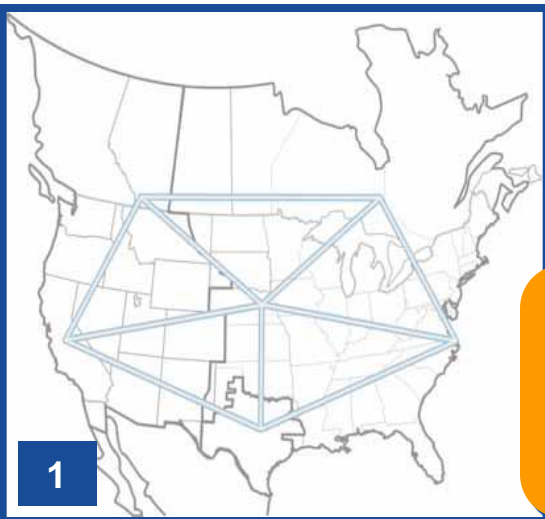
# Глобальные энергетические проекты с участием объектов РФ



Coast-to-Coast модель + региональные энергообъединения

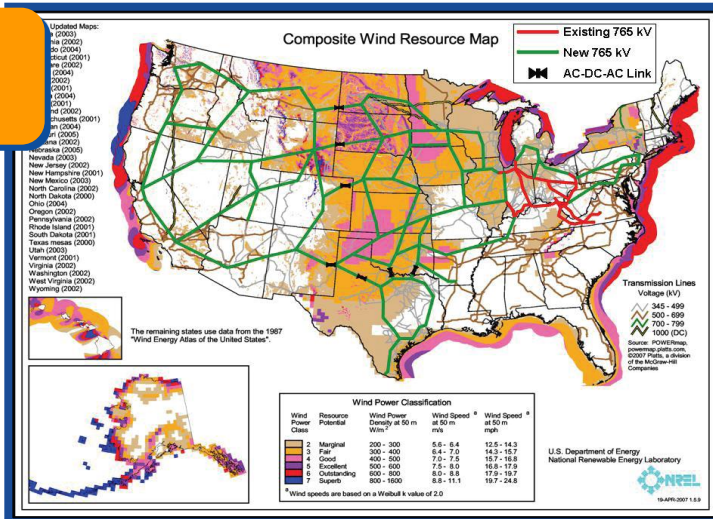


Coast-to-Coast модель + региональные энергообъединения + локальные распределенные мини- и микро-энергосистемы



КОНЦЕПТ – проект сети 765 кВ в США

Модель национальной электрической сети для обмена Э/Э между побережьями США (Coast-to-Coast модель)

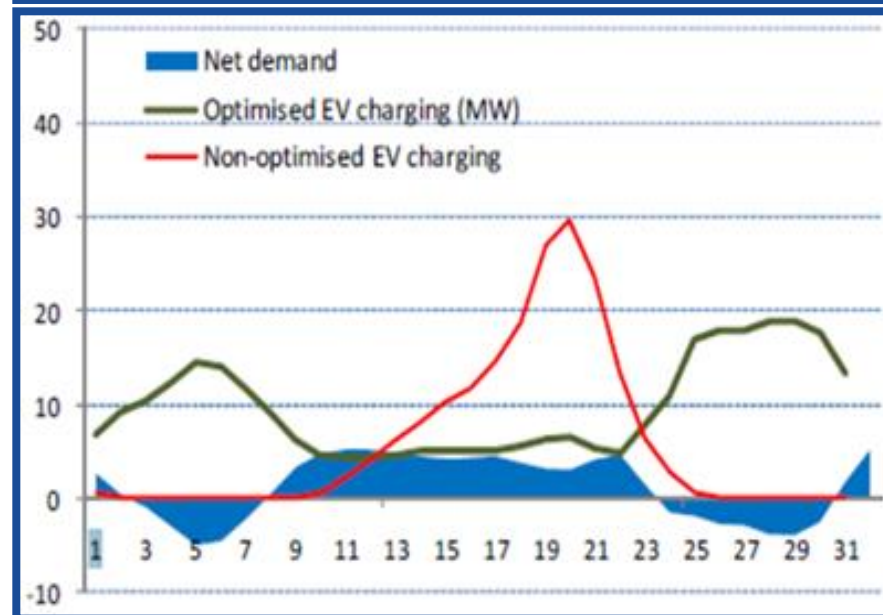
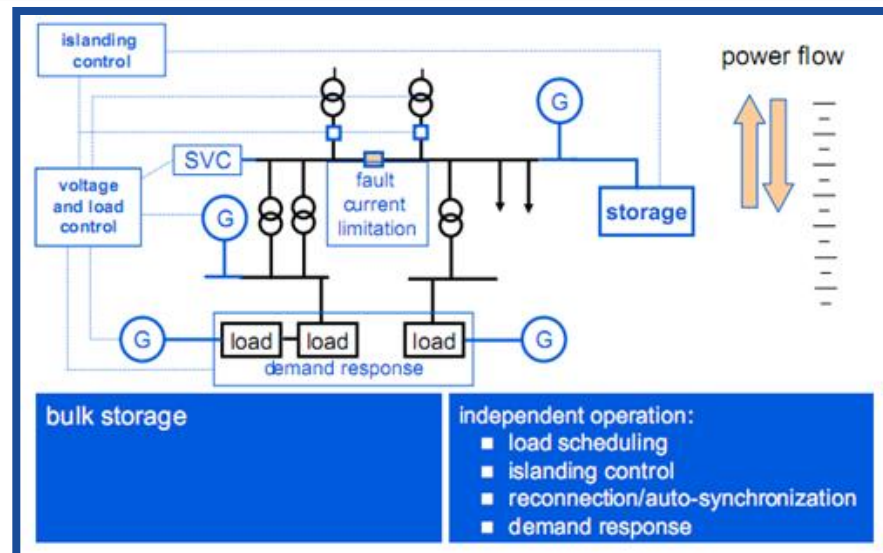






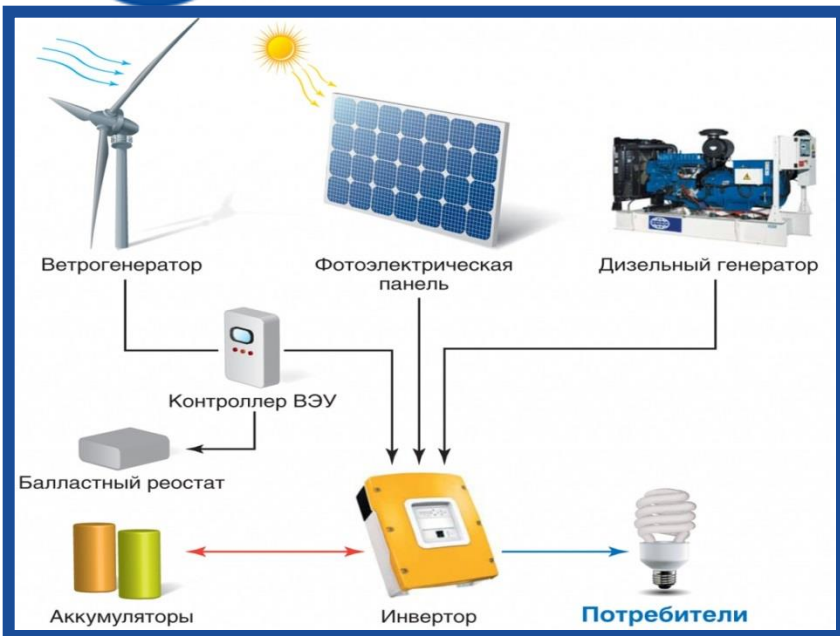
# Трудности режимного управления энергосистемой при применении РГ

- отклонения  $U$  переменного знака во всех узлах сети (взаимное влияние графиков электропотребления и выработки электроэнергии объектами РГ)
- реверсивные потоки мощности в сетях низкого и среднего напряжения
- изменение структуры схем РЗА в сетях низкого и среднего напряжения и принципов применяемых защит
- рост уровня токов КЗ в сетях низкого и среднего напряжения
- обеспечение устойчивости энергосистемы при отключении большого числа ГУ объектов РГ
- обеспечение возможности изолированной работы всех типов ГУ на объектах РГ (реализация АВСН)
- сложность обслуживания фидеров с «активными потребителями» (минимизация опасных факторов и исключение травматизма персонала электросетевых компаний)





# Эффекты комплексной интеграции



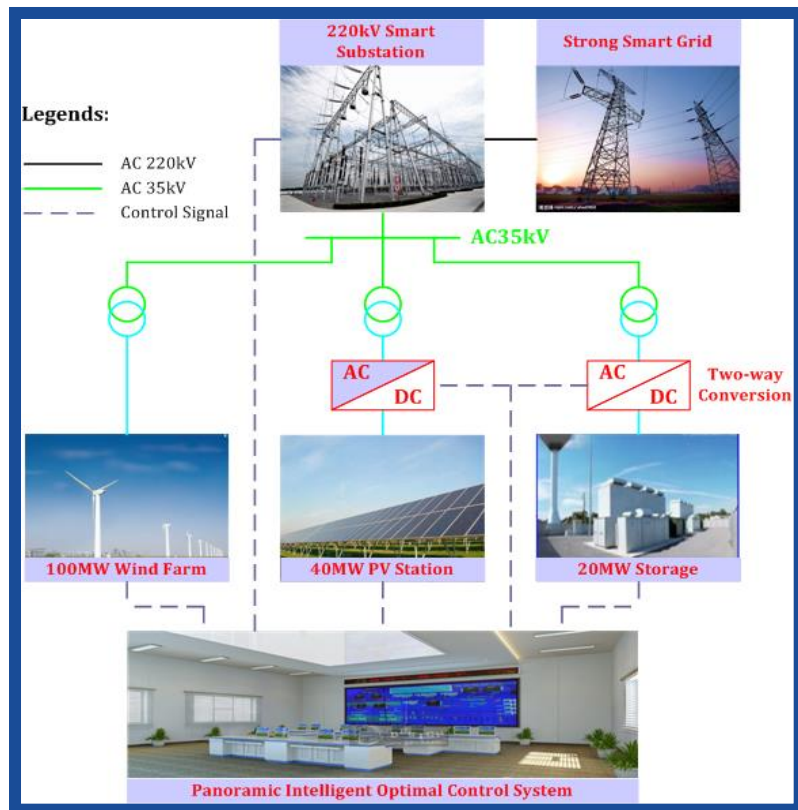
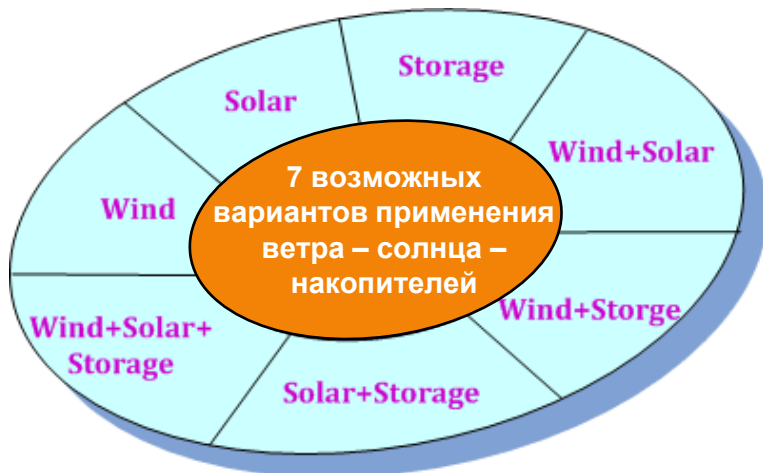
- интеграция в ЭЭС разнородных источников электроэнергии, в том числе на основе ВИЭ, и «активных» потребителей
- выбор оптимального состава генерирующих источников, включая объекты РГ
- автоматическое обнаружение, устранение или уменьшение последствий нарушений в работе ЭЭС на локальном и системном уровнях
- управление электропотреблением и загрузкой объектов РГ стимулирующими методами и избирательным ограничением потребления
- устойчивость к воздействию угроз безопасности (физическая, информационная и ресурсная)
- возможность развития системных услуг на базе рыночных механизмов
- оптимальное использование и обслуживание производственных фондов объектов электроэнергетики на всем жизненном цикле

**Максимальный положительный эффект достигается за счет комбинированного использования различных видов генерации с минимизацией негативных аспектов**



# Накопители электроэнергии как инструмент интеграции объектов РГ

## Smart Grid проект в Провинции Хэбэй



**Система управления электрической сетью с ВИЭ и накопителями энергии:**

- ветростанция: 100 МВт
- солнечная установка: 40 МВт
- накопитель энергии: 20 МВт





# Функции, возлагаемые на системы АСУ ТП объектов РГ

- Оптимальное управление выбором состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО)
- Обеспечение группового регулирования активной мощности (ГРАМ) с учетом регулировочных диапазонов и технологических ограничений
- Обеспечение группового регулирования напряжения (ГРН) с учетом регулировочных диапазонов и технологических ограничений
- Реализация функции автоматического регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ) в изолированном энергорайоне
- Реализация автоматики выделения на сбалансированную нагрузку (АВСН) при возникновении повреждений в питающей сети или режима высоких рисков нарушения электроснабжения
- Автоматический разворот ГУ/электростанции «с нуля» из холодного и горячего состояний
- Автоматическое обеспечение заданных параметров потребления из сети/выдачи мощности в сеть ГУ/электростанцией
- Мониторинг работы оборудования объекта РГ с контролем текущего режима и формированием аварийно-предупредительных сообщений обслуживающему персоналу
- Проведение расчетов оперативных технико-экономических показателей работы объекта РГ и т.п.)



# Тенденции в развитии распределенной генерации в России

Широкое распространение получают электростанции малой и средней мощности: газотурбинные (ГТЭС), газопоршневые (ГПЭС) и дизельные (ДЭС), подключаемые к распределительным электрическим сетям и/или к сетям внутреннего электроснабжения промышленных предприятий

## ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ:

1

Ограничение возможностей подключения новых потребителей и увеличения мощности присоединенной нагрузки к существующим распределительным сетям (наличие закрытых центров питания)

2

Необходимость обеспечения надежного электроснабжения особо ответственных потребителей, перерывы электроснабжения которых являются недопустимыми по условиям технологии производства

3

Снижение затрат на выработку электрической энергии за счет эффективной утилизации вторичных энергоресурсов (доменный и конвертерный газ, попутный нефтяной газ, шахтный газ (метан), отходы лесопереработки и сельского хозяйства и пр.)

4

Снижение затрат на передачу электроэнергии по магистральным и распределительным электрическим сетям



# Утилизация вторичных энергоресурсов для выработки электроэнергии



Выработка электроэнергии за счёт утилизации энергии давления доменного газа



Утилизации шахтного газа с целью выработки тепловой и/или электрической энергии



Использование попутного нефтяного газа для выработки электроэнергии для промышленных нужд



Использование в качестве топлива конвертерного газа для снижения расхода природного газа





# Дополнительные преимущества применения объектов РГ

- Оптимизация перетоков активной мощности (приближение мест генерации к центрам электропотребления)
- Оптимизация перетоков реактивной мощности (минимизация потерь электрической энергии в электрических сетях)
- Нормализация уровней напряжения в послеаварийных режимах
- Экономичность за счет развития когенерации и тригенерации (решение вопросов теплоснабжения и кондиционирования)
- Ликвидация перегрузок силовых трансформаторов и линий электропередачи при подключении объектов РГ к распределительным сетям
- Отсрочка в реконструкции электросетевых объектов с целью увеличения пропускной способности ЛЭП и трансформаторных мощностей на ПС
- Возможность подключения новых потребителей за счет разгрузки ЛЭП и трансформаторных подстанций (ликвидация закрытых центров питания)



# Международный стандарт IEEE 1547

IEEE 1547 (2003 – 2014) – серия международных стандартов Института инженеров электротехники и электроники, регламентирующих вопросы присоединения распределенных источников энергии к ЭЭС

IEEE Standards

- IEEE 1547.1 - Приёмсдаточные испытания оборудования малой генерации
- IEEE 1547.2 - Руководство по применению стандарта IEEE 1547
- IEEE 1547.3 - Руководство по мониторингу, информационному обмену и управлению малой генерацией, подключенной к энергосистеме
- IEEE 1547.4 - Руководство по проектированию, эксплуатации и внедрению автономных систем с малой генерацией
- IEEE 1547.5 - Руководящие указания по подключению к энергосистеме генерирующих источников мощностью от 10 МВА
- IEEE 1547.6 - Методические рекомендации по подключению малой генерации к распределительным сетям НН и СН
- IEEE 1547.7 - Руководство по определению влияния малой генерации на энергосистему
- IEEE 1547.8 - Методические рекомендации по внедрению IEEE 1547



Единственный существующий международный стандарт на подключение РГ IEEE 1547 не является законченным и признанным документом (США использует свои стандарты), задачей которого является обозначение проблематики и **создание структуры требований**, в которую хорошо интегрируются конкретные требования и численные значения национальных стандартов, **носит научно-технический характер** и в чистом виде **не может быть использован** в качестве национального стандарта по подключению РГ



# Регламентация технических требований к объектам РГ при их интеграции в ЭЭС



Обзор итогового отчета «Развитие распределенной генерации и последствия для энергосистем» («Development of Dispersed Generation and Consequences for Power Systems», ELECTRA, August, 2004). Рабочая группа WG C6.01.

Техническая брошюра 271 «Подключение генераторов и других абонентов - правила и опыт реализации», 2005 г. (рабочая группа WG C6.02)

Техническая брошюра 311 «Управление распределенной генерацией с использованием информационных технологий», 2007 г., (рабочая группа WG C6.03)

Техническая брошюра 313 «Критерии подключения распределенной генерации в распределительную сеть», 2007 г. (рабочая группа TF C6.04.01)

Техническая брошюра 423 «Техническая и коммерческая стандартизация распределенной генерации/компонентов microGrid», 2010 г. (рабочая группа WG C6.10)

Техническая брошюра 450 «Подключение ветряной генерации к электрической сети», 2011 г. (рабочая группа WG C6.08)

Техническая брошюра 475 «Организация участия потребителей в управлении режимом энергосистемы», 2011 г. (рабочая группа WG C6.09)

Техническая брошюра 457 «Развитие и управление активными распределительными сетями», 2011 г. (рабочая группа WG C6.11)

Техническая брошюра 458 «Системы хранения электрической энергии», 2011 г. (рабочая группа WG C6.15)

Техническая брошюра 575 «Системы оценки возможности интеграции возобновляемой и распределенной генерации в электрическую сеть», 2014 г. (рабочая группа TF C6.04)

Техническая брошюра 586 «Пропускная способность питающих линий распределительной сети для подключения распределенной генерации, 2014 г. (рабочая группа WG C6.24)

Техническая брошюра 591 «Методы планирования и оптимизации в распределительных сетях», 2014). Рабочая группа WG C6.19.





# Причины учета особенностей отечественной электроэнергетики

- Сохранение параллельной работы ЕЭС с минимизацией возможности выделения отдельных частей на изолированную работу
- Многолетнее развитие и строительство удаленных от центров нагрузок больших источников энергии (блоки единичной мощности в сотни МВт) на АЭС, ГРЭС и ГЭС
- Строительство и эксплуатация линий электропередачи высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения для передачи больших мощностей на сотни и тысячи км.
- Минимальное сетевое резервирование и высокий технический износ сетей
- Низкий уровень автоматизации в распределительных сетях (АВР, реклоузеры) при значительных протяженностях сетей и отдельных фидеров 0,4 – 6 – 10 кВ
- Применение в сетях несинхронного АПВ и противоаварийной автоматики
- Выбор принципов построения систем РЗА (ближнее и дальнее резервирование)
- Необходимость обеспечения надежного электроснабжения потребителей в изолированных энергорайонах и энергосистемах, а также реализация АВСН
- Широкая сеть котельных (муниципальных и производственных), используемых для выработки тепловой энергии и организации теплоснабжения промышленных и бытовых потребителей
- Достаточная механическая прочность и термическая стойкость отечественных ГУ к воздействиям близких КЗ
- Достаточная термическая стойкость отечественных ГУ к воздействию токов КЗ, с учетом уставок по времени устройств РЗА электросетевых элементов
- Производство и применение на электростанциях одновальных ГУ (большие значения механических постоянных инерции)



# Модели управления объектами распределенной генерации

Для оптимальной интеграции объектов РГ необходимо использовать современные модели управления

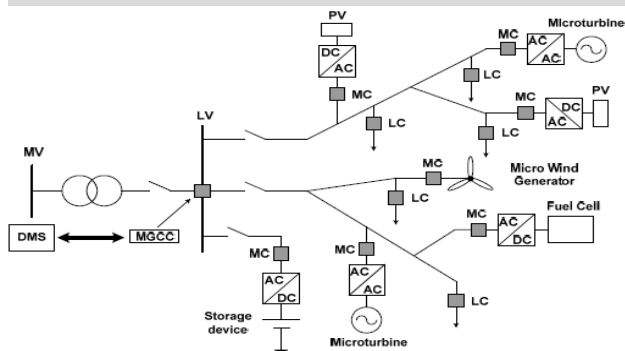
## Виртуальная электростанция (VPP)

### Главные функции VPP

- обрабатывать информацию о производстве ЭЭ каждым объектом РГ, входящим в состав VPP, а также информацию о нагрузке участка сети к которому подключен объект РГ
- объединять полученную информацию в единый блок для организации управления

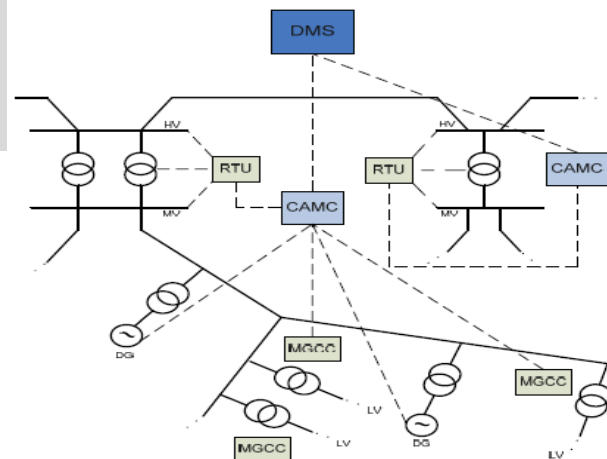
## Микроэнергосистема (МЭ)

*МЭ – управляется центральным контроллером, установленном на низкой стороне тр-ра СН/НН*  
Центральный контроллер осуществляет обмен данными с контроллерами нагрузки и контроллерами нижнего уровня, которые, в свою очередь, управляют микрогенерацией и накопителями ЭЭ



## Мульти-микроэнергосистема (ММЭ)

*ММЭ – более высокий структурный уровень, сформированный на СН из транспонированных МЭ, работающих на НН, и объектов РГ, подключенных к сетям СН*



Повышение маневренности объектов РГ на базе ВИЭ в рамках ЭЭС

Снижение финансовых рисков от индивидуального участия объектов РГ на рынке ЭЭ



# Повышение эффективности использования РГ в алгоритмах ПА

Учитывая свойства объектов РГ, в первую очередь – возможность принять нагрузку значительно быстрее, чем на тепловых электростанциях, целесообразно использовать генерирующие установки в реализации алгоритмов следующих видов противоаварийной автоматики:

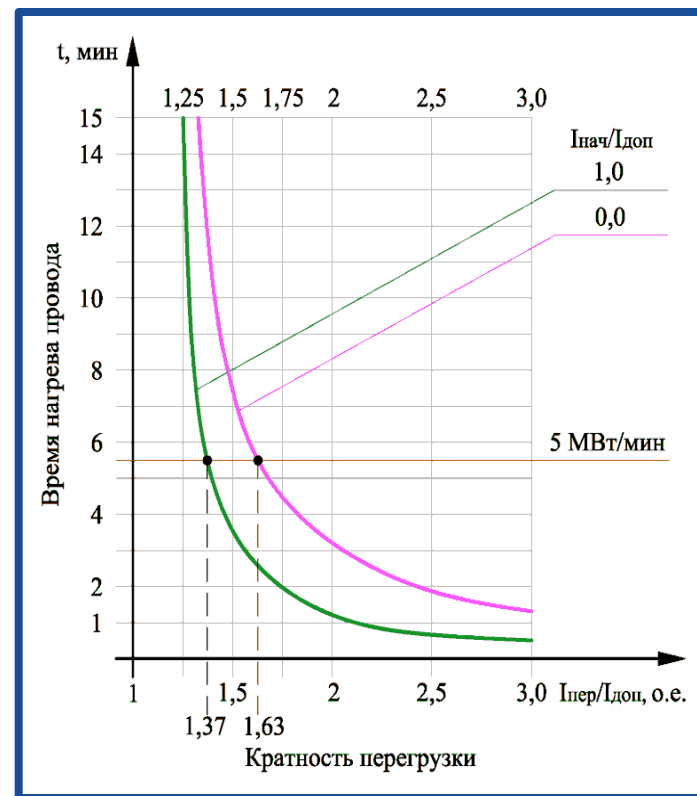
- автоматика ограничения перегрузки оборудования (ЛЭП, трансформаторов)
- автоматика ограничения снижения напряжения (АОСН)

## РЕАЛИЗАЦИЯ

Полная автоматизация процесса пуска агрегатов электростанции по команде от внешних устройств

Обеспечение возможности приема и реализации управляющих воздействий от устройств ПА в центральное устройство управления ГУ или станции

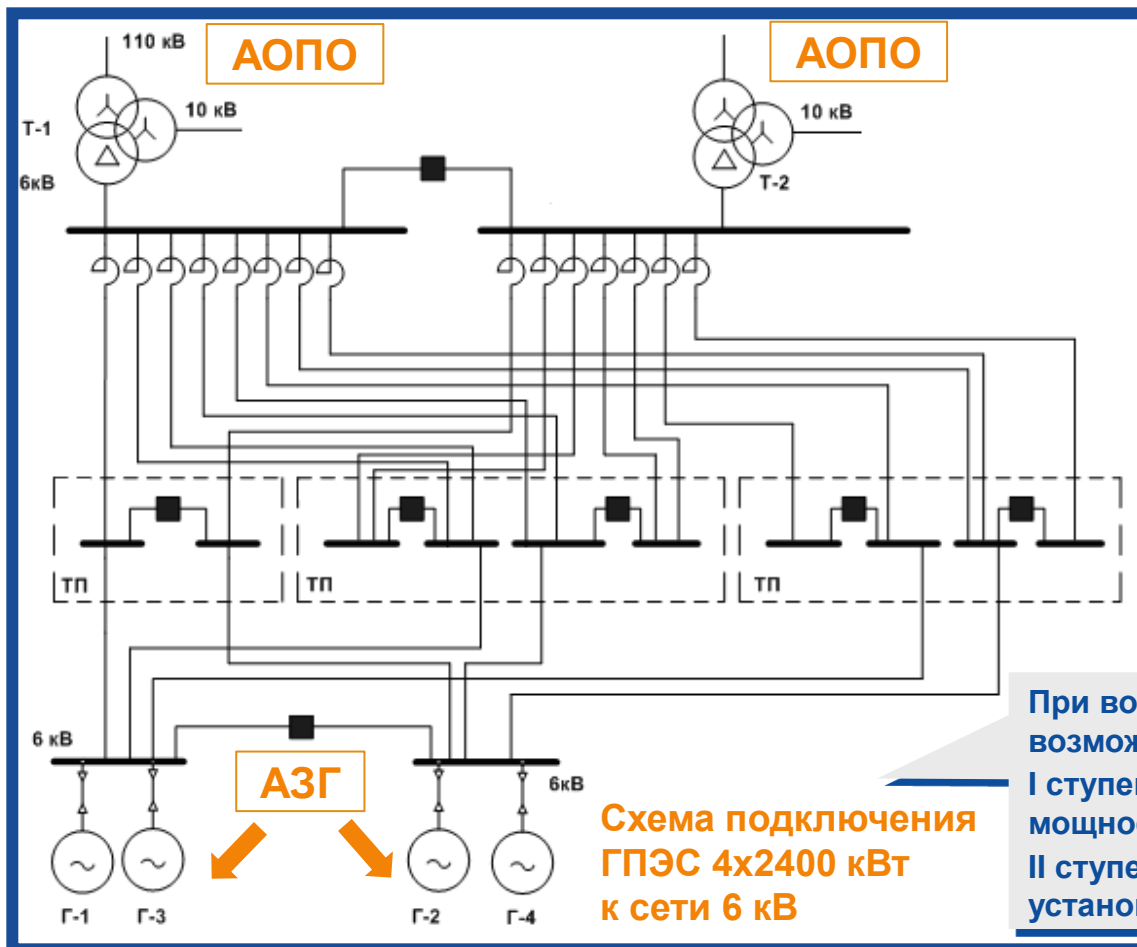
Расчетная настройка уставок регуляторов мощности генерирующих установок на скорость набора мощности, обеспечивающую разгрузку ЛЭП или трансформаторов в необходимом объеме







# Ликвидация перегрузок силовых трансформаторов



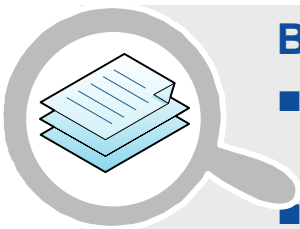
## Необходимость внедрения АОПО обусловлена:

- ростом числа трансформаторов, работающих в режиме систематической перегрузки
- величиной перегрузки в послеаварийных режимах составляет 5 - 100%
- выбранной концепцией сети с ПС 35–110 кВ без постоянного обслуживающего персонала, с обслуживанием ОВБ (сложность перемещения бригад, высокие затраты)

**!** Целесообразна интеграция систем мониторинга и диагностики Т (АТ) в АОПО для определения фактической перегрузочной способности с учетом температуры обмоток в ННТ и износом изоляции не выше номинального



# Участие ОРГ в алгоритмах АОСН



В соответствии с п.3.3.85 ПУЭ устройства АОСН могут воздействовать на:

- форсировку возбуждения синхронных машин  
*(редко используется по причине удаленности станций от узлов нагрузки)*
- форсировку устройств компенсации реактивной мощности  
*(общее количество незначительное; рассредоточены по потребителям; малая единичная емкость СКРМ)*
- отключение шунтирующих реакторов  
*(в распределительных электрических сетях практически не применяется)*
- отключение потребителей электрической энергии

на объектах РГ устанавливаются генерирующие установки (ГУ) не только малых, но и средних мощностей, при этом становится реальным расширение возможностей повышения напряжения в сети за счет перевода ГУ в режим синхронного компенсатора (СК)

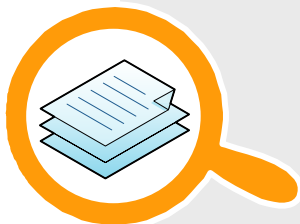
для усиления эффекта регулирования  $U$  на выбранном участке сети, возможно дополнительно обеспечивать подачу напряжения контролируемого узла на вход устройства автоматического регулятора возбуждения (АРВ) генератора

данный режим работы должен быть оговорен при заказе на генерирующее оборудование





# Реализация ЧДА на ГУ объектов РГ



В соответствии ГОСТ Р 55105-2012 все ТЭС 25 МВт и выше должны оснащаться частотной делительной автоматикой (ЧДА), за исключением электростанций, на которых установка устройств ЧДА невозможна по условиям работы

**ЦЕЛЬ:** При возникновении в ЭЭС значительного дефицита мощности и недостаточности действия АЧР предотвратить аварийное отключение электростанций при недопустимом снижении частоты и сохранить надежное электроснабжение собственных нужд станции, социально-значимых и особо ответственных потребителей

Должна выполняться проверка обеспечения длительной устойчивой работы генерирующего оборудования ТЭС при его выделении путем проведения испытаний или имитационным моделированием

## Уставки ЧДА:

- 1-я ступень:  
 $f = 46,0-47,0$  Гц,  $t = 0,3-0,5$  с
- 2-я ступень:  
 $f = 47,0-47,5$  Гц,  $t = 30-40$  с

1. В одной из системных аварий в США и Канаде в августе 2003 г. в течение десятков минут отключились с посадкой на «0» 263 электростанции (531 ЭБ), включая 10 АЭС (19 ЭБ) с нарушением электроснабжения около 50 млн. чел.
2. Количество успешных выделений электростанций в мире действием делительной автоматики составляет около 25% (*открытые источники*)
3. Необходима разработка и реализация современных алгоритмов ДА для повышения числа успешных выделений электростанций до 70 - 80 %





# Совмещенное исполнение ЧДА и ДАН


**Необходимость выполнения ДАН в настоящее время не регламентирована НТД, но ее применение оправдано, если:**

- расчеты выявят возможные аварии, сопровождающиеся лавиной напряжения
- быстрое действие ДАН при таких авариях будет достаточным для сохранения устойчивой работы ответственных потребителей в выделяемом районе
- объем отключений электроприемников при срабатывании ДАН меньше, чем при такой же аварии, но без применения ДАН

**Выделение электростанций действием ДАН на сбалансированную нагрузку целесообразно:**

- при возникновении повреждений в питающей сети без снижения частоты, но с недопустимым аварийным понижением напряжения
- при возникновении режима высоких рисков нарушения электроснабжения

**Совмещенное исполнение ЧДА и ДАН оправдано, так как схемы имеют общие входные и выходные цепи, различия существуют только в пусковых органах**

 **Невозможность реализации ЧДА в ряде случаев обосновывается не технической невозможностью ее выполнения, а неправильным выбором уставок устройств РЗА, технологических защит и алгоритмов систем автоматического управления/регулирования**



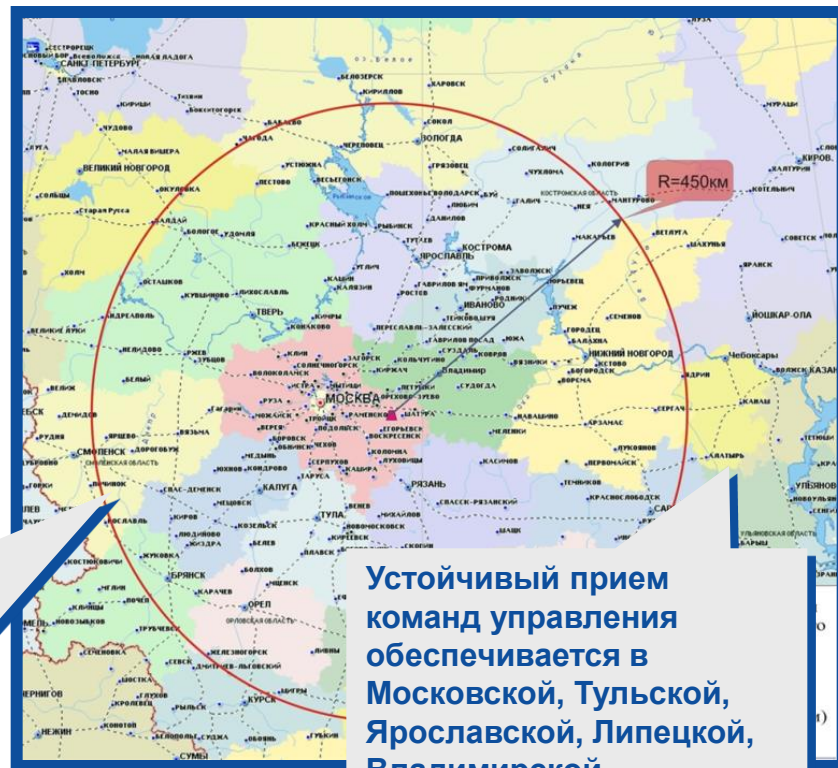
# Управление нагрузкой потребителей



В распределительных сетях имеется значительное количество фидеров со смешанной нагрузкой, отключение которых от устройств ПА со стороны питающих подстанций не представляется возможным по причине питания опасных, социально-значимых объектов и объектов жизнеобеспечения

Перспективное решение для реализации УВ на ОН (АПВ после ОН) – создание беспроводного комплекса приемных устройств:

- размещается на энергопринимающих устройствах потребителей электрической энергии
  - передает команды посредством радиоканала связи с высоким быстродействием ( $\leq 3$  сек.)
  - отвечает требованиям по помехозащищенности и защите от несанкционированного доступа
- реализован режим односторонней передачи команд по ДВ радиоканалу с подтверждением исполнения команды через GSM-модули
  - радиус расчетной зоны покрытия при размещении ДВ передатчика мощностью 100 кВт  $f = 129,1$  кГц составляет порядка 400–500 км
  - предусмотрена возможность интеграции системы с устройствами ПА (АОПЛ, АОПТ)



Устойчивый прием команд управления обеспечивается в Московской, Тульской, Ярославской, Липецкой, Владимирской, Ивановской, Калужской и Рязанской областях



## Основные выводы

- Необходимо детальное изучение международного опыта по созданию и функционированию моделей управления объектами РГ при их параллельной работе с ЭЭС и в изолированном режиме
- Необходима разработка обобщенной функциональной модели системы АСУ ТП для объектов распределенной генерации
- Представляется целесообразным возложение на системы АСУ ТП объектов РГ значительного количества технических и технологических задач
- Требуется разработка типовых моделей управления объектами РГ с учетом особенностей отечественной электроэнергетики, правил функционирования оптового и розничного рынков электрической энергии и мощности
- Целесообразно привлечение объектов РГ в реализации алгоритмов локальной противоаварийной автоматики (АОПО, АОСН) для минимизации объемов и времени отключения потребителей (необходимо решение вопроса функционирования рынка системных услуг для объектов РГ)



# Благодарю за внимание!

ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС»  
[www.ti-ees.ru](http://www.ti-ees.ru)

