

Особенности применения оптимизационных моделей для планирования развития энергосистем при возрастающей роли возобновляемой энергетики

Хоршев А.А., Веселов Ф.В., Ерохина И.В.

**Институт энергетических исследований
Российской академии наук**

**Тринадцатая международная конференция «Управление
развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2020)**

Москва, 29 сентября 2020 г.



*Исследование выполнено при
поддержке гранта РФФ
(проект №17-79-20354)*

Модели планирования развития энергосистем

- долгосрочная модель развития энергетики **MARKAL** и ее приемник, разработанный Международным энергетическим агентством – модель **TIMES**;
- созданная в IIASA и в настоящее время используемая в МАГАТЭ и странах ее членах модель **MESSAGE** (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact);
- **Electricity Market Module** (EMM) в составе основного инструмента долгосрочного моделирования энергетики США в увязке с национальной и мировой экономикой – National Energy Modeling System (NEMS), который поддерживается Администрацией США по энергетической информации (EIA);
- **PLEXOS** разработки компании Energy Exemplar, являющаяся одной из наиболее мощных и продвинутых моделей развития электроэнергетики в мире;
- свободно распространяемые модели с открытым исходным кодом, развиваемые международными сообществами ученых: **OSeMOSYS** (Open Source Energy Modeling System) разработки Королевского технологического института (KTH) в Стокгольме, **Backbone** разработки финского технического исследовательского центра VTT, **TEMOA** разработки Университета Северной Каролины (Tools for Energy Model Optimization and Analysis) и др.
- разработанная в ИНЭИ РАН динамическая оптимизационная модель развития электроэнергетики России в рамках ТЭК – **EPOS**, которая является составной частью модельно-информационного комплекса SCANNER для исследования долгосрочного развития энергетики России и мира.

Основные особенности технологий на базе ВИЭ, требующих учета при моделировании (1)

Особенность технологии	Эффект	Учет при моделировании
Изменчивость (волатильность)	Выдаваемая мощность меняется по территории и времени в зависимости от погодных условий, что приводит к соответствующим изменениям нагрузки других типов электростанций	Необходимость соответствующей временной и территориальной детализации для правильного описания изменчивости выдаваемой мощности
Непредсказуемость (стохастичность)	Выдаваемая мощность не может быть достаточно точно спрогнозирована, что определяет и непредсказуемость режимов работы остальных типов электростанций	Необходимость адекватного определения необходимого уровня резерва в энергосистеме
Близкие к нулю маржинальные затраты	По сравнению с традиционными технологии на базе ВИЭ имеют низкие или нулевые переменные издержки, а в случае наличия дотаций – эти величины могут быть и отрицательными	Необходимость правильного учета всех затрат и субсидий, а также, что не менее важно, воздействия на рынок
Низкая готовность (Lower capacity value)	Переменность режима работы ВИЭ определяет более низкий уровень готовности к несению нагрузки, особенно в часы пиковых нагрузок, наиболее важные с точки зрения надежности энергосистемы. Уровень готовности повышается по мере роста объемов генерации на базе ВИЭ в энергосистеме	Требует специальных методов учета готовности к несению нагрузки ВИЭ с использованием синхронизированный во времени информации о нагрузке и производстве ВИЭ. Предпочтительно использование вероятностных методов

Основные особенности технологий на базе ВИЭ, требующих учета при моделировании (2)

Особенность технологии	Эффект	Учет при моделировании
Вынужденное снижение выработки (Curtailment)	Из-за переменности режима работы ВИЭ могут возникать ситуации, когда остальные типы электростанций не могут далее снижать свою нагрузку, чтобы вписать ВИЭ в график нагрузки. В результате мощность ВИЭ окажется невостребованной в балансе и должна будет вынуждено снизиться	Требует использования синхронизированной во времени информации о нагрузке и производстве ВИЭ, а также основных параметров других типов электростанций, таких как минимально допустимый уровень загрузки, скорость сброса/набора нагрузки, затраты на старт/остановку и т.п. Кроме того, это отражается и на цене электроэнергии
Распределенность	Распределенность ресурсов ВИЭ требует адекватного развития электросетевой инфраструктуры	Необходимость достаточно детального представления электрической сети с учетом возможности ее расширения, а также необходимость учета дополнительных затрат на подключение распределенной генерации, что должно находить свое отражение в конечных ценах электроэнергии

Подходы к адаптации моделей планирования развития ЭС при возрастающей роли ВИЭ

- ❑ дальнейшее усложнение оптимизационной модели за счет включения в нее все больших объемов детальной информации о режимах спроса и производства электроэнергии наряду с ростом детализации территориального представления;
- ❑ декомпозиция прогнозной задачи с выделением отдельной подзадачи по исследованию оптимальных режимов функционирования энергосистемы с использованием специального класса моделей диспетчеризации мощностей на часовых (или даже более малых) интервалах

А) Дополнительная детализация режимов спроса и генерации электроэнергии во временном и территориальном разрезах

1) Условие по обеспечению достаточного резерва определяется уравнением баланса установленной мощности в каждой ОЭС (v) на час годового максимума нагрузки в ЕЭС России (зимний рабочий день):

$$\sum_{i \notin I_{res}} \sum_{r \in R_v} X_{i,r}^{inst} + \sum_{i \in I_{res}} \sum_{r \in R_v} \mu_{i,r}^{cap.cred} \cdot X_{i,r}^{inst} + \sum_{j,s} Z_{j,s,v} - \sum_{j,s} Z_{j,v,s} = P_v^{Peak+RM}$$

где $X_{i,r}^{inst}$ – искомая установленная мощность генерирующей технологии (i) в каждой региональной энергосистеме (r);

$Z_{j,s,v}, Z_{j,v,s}$ – соответственно искомые объемы выдачи и получения мощности по разным типам ЛЭП (j) между ОЭС (v) и соседними (s), ограниченные сверху величиной пропускной способности электрических связей;

$P_v^{Peak+RM}$ – потребность в мощности в ОЭС (v), задаваемая как годовой максимум нагрузки, увеличенный на норматив резерва, существующий объем ограничений на использование мощности ГЭС и сальдо экспорта/импорта мощности в час годового максимума;

А) Дополнительная детализация режимов спроса и генерации электроэнергии во временном и территориальном разрезах

2) Условие по обеспечению запаса регулировочного диапазона генерирующего оборудования для каждого типовых суток (g):

- уравнение баланса рабочей мощности для часа максимальной суточной нагрузки ОЭС (v)

$$\sum_i \sum_{r \in R_v} \chi_{i,r,g}^{rated} \cdot X_{i,r}^{inst} + \sum_{j,s} Z_{j,s,v} - \sum_{j,s} Z_{j,v,s} = P_{v,g}^{max.load}$$

где $\chi_{i,r,g}^{rated}$ – коэффициент использования установленной мощности каждой генерирующей технологии (i) для типовых суток (g), учитывающий величину аварийных и плановых ремонтных простоев, а также участие в обеспечении резерва.

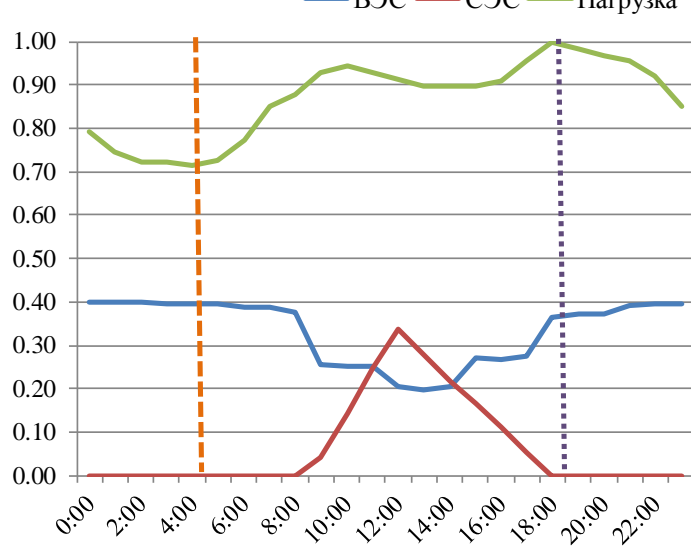
- уравнение баланса рабочей мощности для часа минимальной суточной нагрузки ОЭС (v)

$$\sum_i \sum_{r \in R_v} \chi_{i,r,g}^{must-run} \cdot \chi_{i,r,g}^{rated} \cdot X_{i,r}^{inst} + \sum_{j,s} Z_{j,s,v} - \sum_{j,s} Z_{j,v,s} = P_{v,g}^{min.load}$$

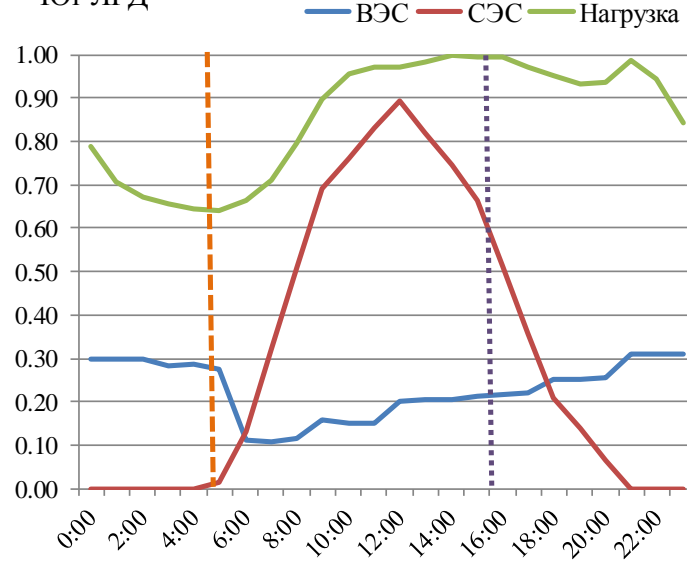
где $\chi_{i,r,g}^{must-run}$ – коэффициент максимально допустимого снижения используемой рабочей мощности, исходя из технического или технологического минимума разгрузки оборудования для каждой генерирующей технологии (i).

Вероятная часовая выработка ВЭС и СЭС (в долях от установленной мощности) и график нагрузки (в долях от максимальной суточной нагрузки) для типовых суток

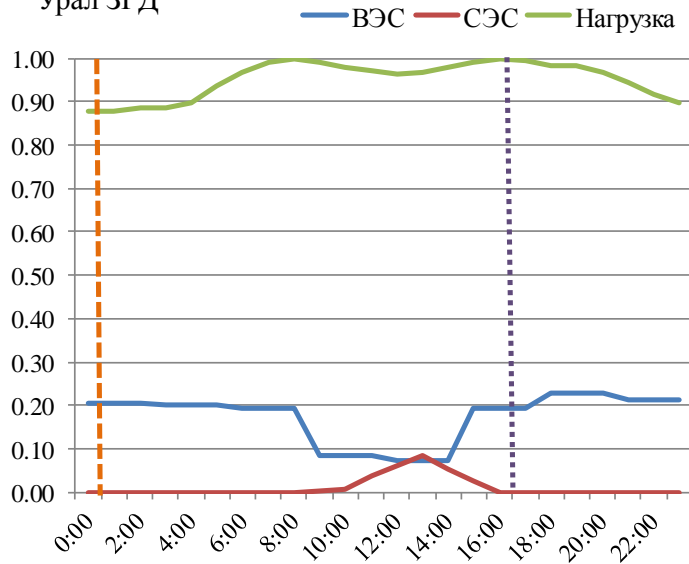
Юг ЗРД



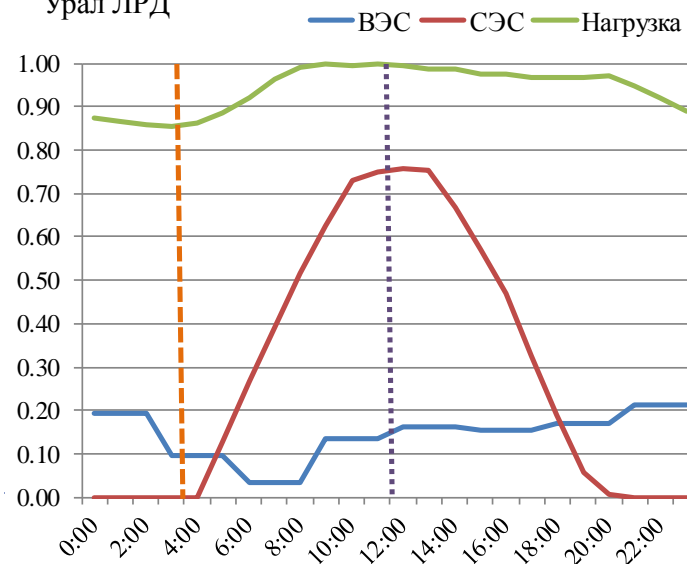
Юг ЛРД



Урал ЗРД



Урал ЛРД



Б) Детализация экономических условий функционирования ВИЭ-электростанций разной единичной мощности, включая распределенную генерацию у потребителей

Динамика удельных капиталовложений в крупные ВЭС и СЭС в России, руб. 2019 г./кВт

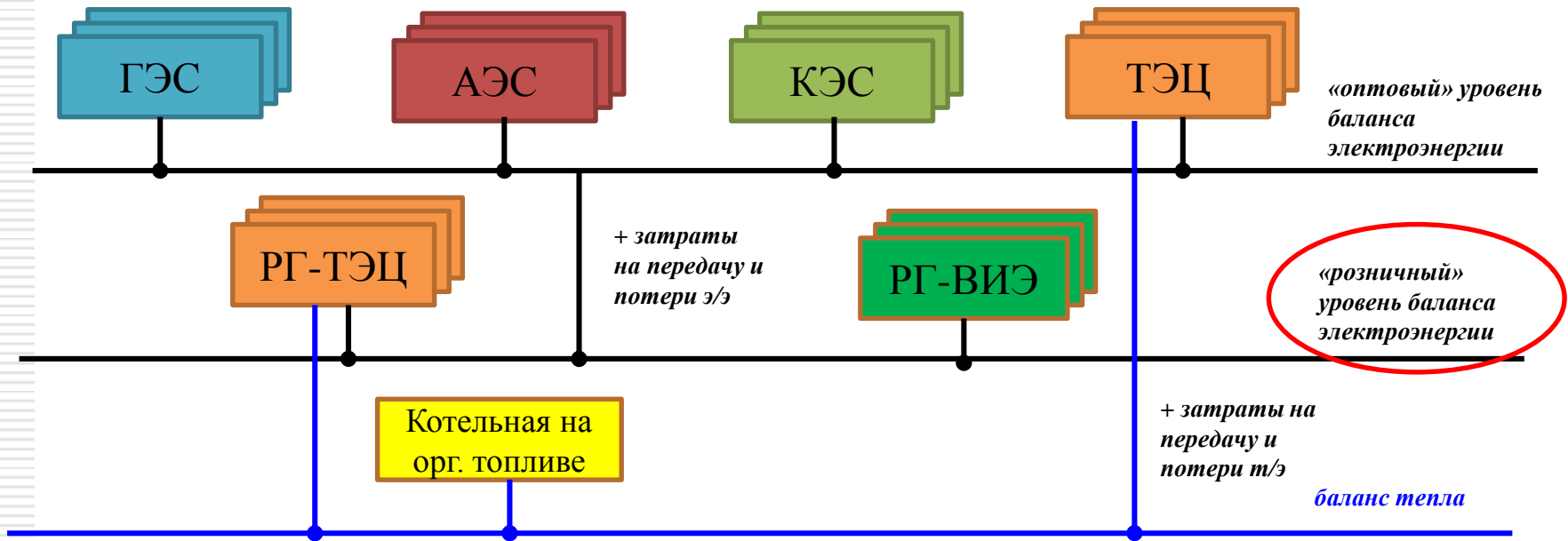
	2020 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.	2040 г.	2050 г.
ВЭС						
Минимум	65000	63050	61750	60125	58500	56550
Максимум	95000	90250	87400	85025	82650	77900
СЭС						
Минимум	60000	45000	39000	36000	33000	31200
Максимум	90000	58500	45000	40500	36000	34200

Удорожание распределенных ВИЭ-электростанций относительно крупных:

- СЭС – в 1,5 раза
- ВЭС – в 2 раза

КИУМ распределенных ВИЭ-электростанций – примерно на 20 % ниже, чем у крупных

Подход к моделированию распределенной генерации (1)



Подход к моделированию распределенной генерации (2)

Баланс электроэнергии формируется не только на «оптовом» (энергосистема в целом), но и «розничном» уровне (уровень конечного потребителя)

$$\begin{cases} \sum_i W_{i,r,t} + \sum_s (W_{s,r,t}^{действ} + W_{s,r,t}^{нов}) = E_{r,t}^{ээсеть} + \sum_s (W_{r,s,t}^{действ} + W_{r,s,t}^{нов}), i \notin I^{MG} \\ (1 - K_{\vartheta(r)}^{nom}) \cdot E_{r,g}^{ээсеть} + \sum_i W_{i,r,t} = E_{r,t}^{ээ} / (1 + K_{\vartheta(r)}^{nom}), i \in I^{MG} \end{cases}$$

Баланс тепла также формируется двухуровневым:

- баланс отпуска тепла крупной генерацией в магистральную сеть
- Баланс тепла у конечных потребителей

$$\begin{cases} \sum_{i \notin I^{MG}} q_{i,r,t} \cdot X_{i,r,t} + \sum_{i \in I_1^{kom}} H_{i,r,t}^{kom} \cdot G_{i,r,t}^{нов} = E_{r,t}^{тэсеть} \\ (1 - K_{m(r)}^{nom}) \cdot E_{r,t}^{тэсеть} + \sum_{i \in I_2^{kom}} H_{i,r,t}^{kom} \cdot G_{i,r,t}^{нов} + \sum_{i \in I^{MG}} q_{i,r,t} \cdot X_{i,r,t} = E_{r,t}^{тэ} / (1 + K_{m(r)}^{nom}) \end{cases}$$

В целевой функции необходимо дополнительно учесть затраты на транспорт электроэнергии и тепла с одного уровня на другой

$$C_{opt} = \sum_t \sum_r (k_{r,t}^{ээсеть} \cdot E_{r,t}^{ээсеть} + k_{r,t}^{тэсеть} \cdot E_{r,t}^{тэсеть}) \cdot \frac{1}{(1+d)^t}$$

Апробация изменений методического подхода и модельного инструментария

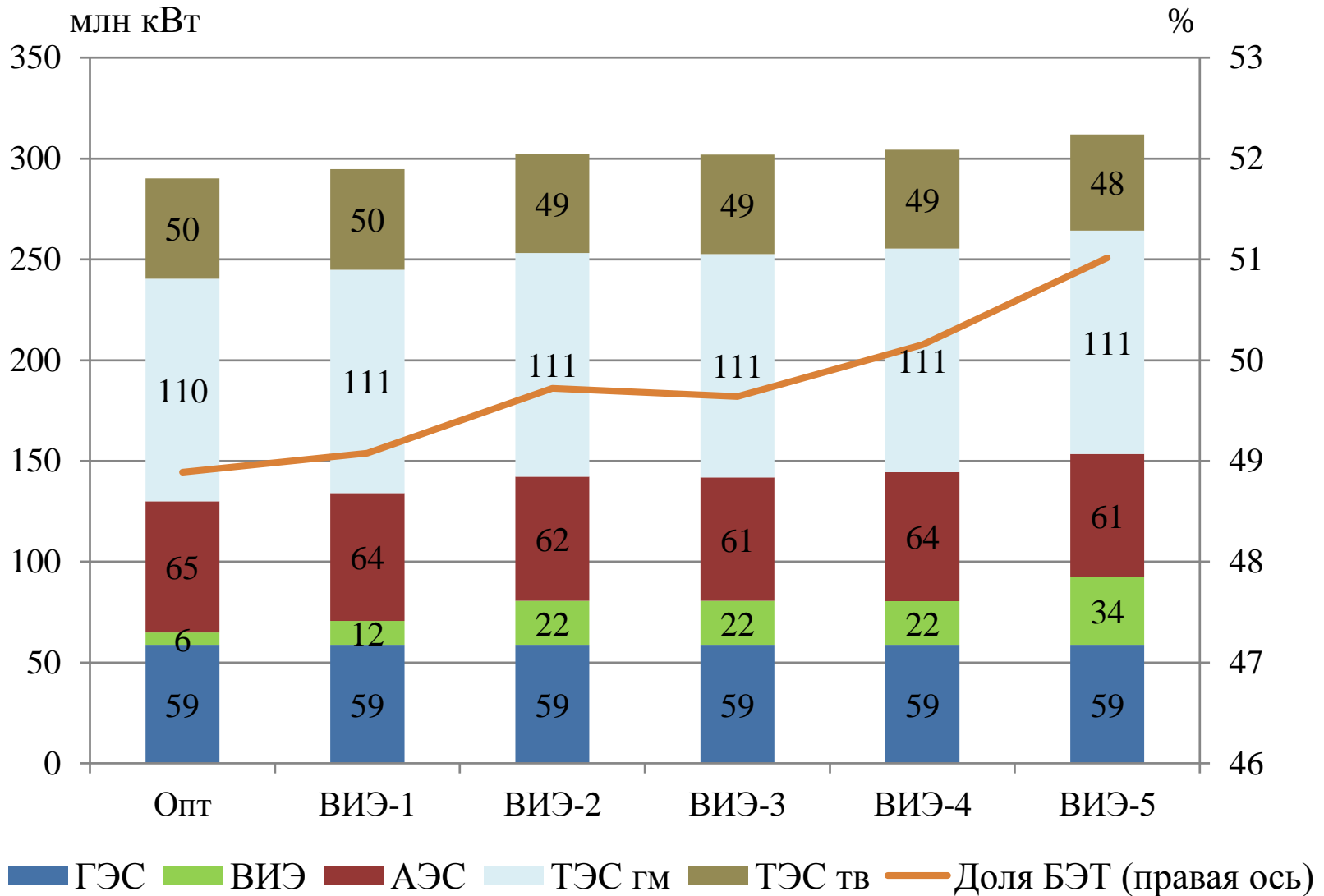
Исходные условия для моделирования:

- Высокие цены газа – с выходом на равнодоходность с экспортными поставками к 2030 г.
- Инновационный сценарий развития экономики (среднегодовой темп роста ВВП РФ в период до 2040 г. – около 3%)
- Ставка дисконтирования – 7,5%
- Оптимистичный прогноз технико-экономических показателей генерирующих технологий

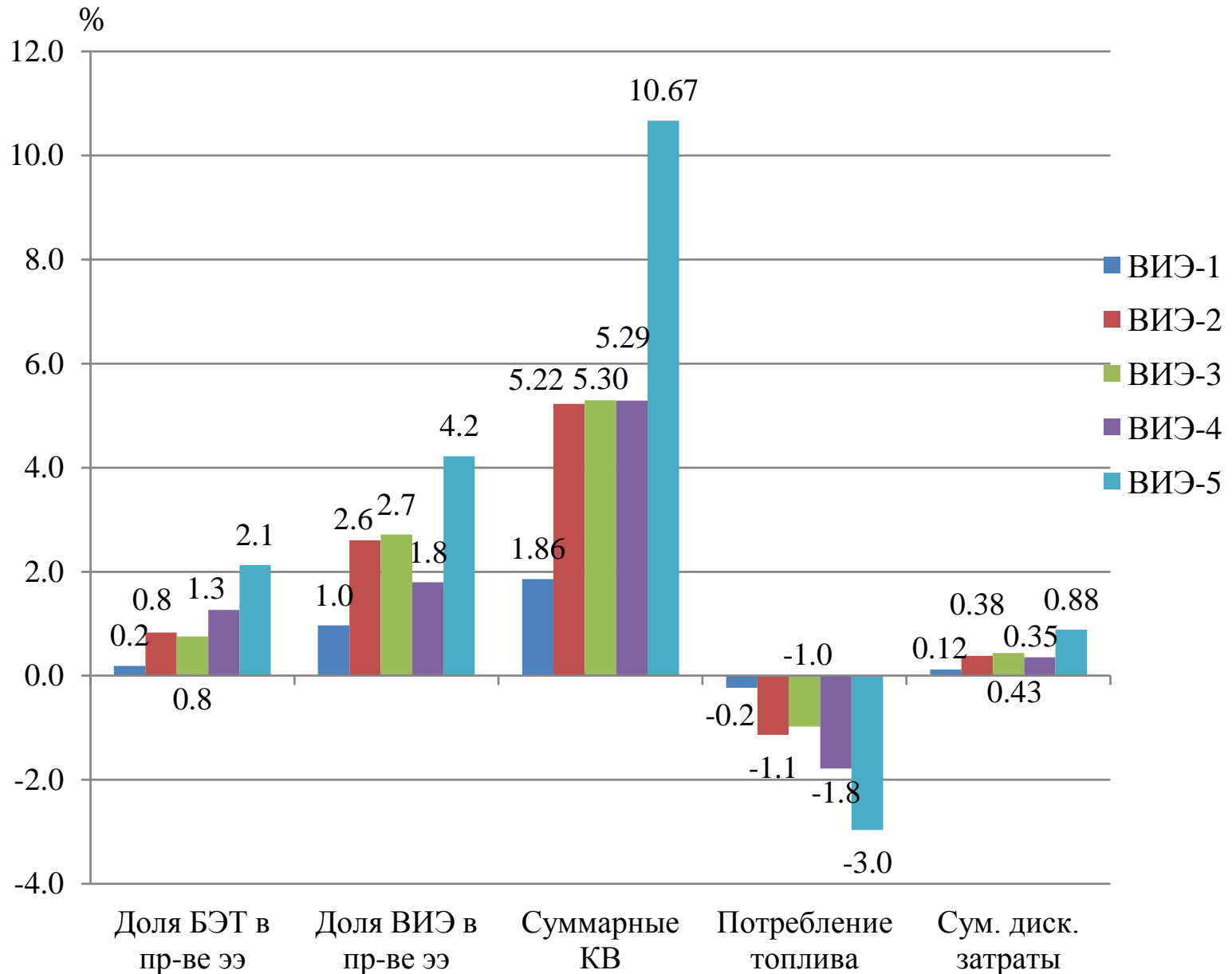
Рассмотренные варианты развития ВИЭ в ЕЭС России

Варианты	Мощность ВИЭ в 2040 г., млн кВт	Пропорция ВЭС/СЭС, %	
		ВЭС	СЭС
ОПТ	6	67	33
ВИЭ-1	12	67	33
ВИЭ-2	22	67	33
ВИЭ-3	22	80	20
ВИЭ-4	22	20	80
ВИЭ-5	34	67	33

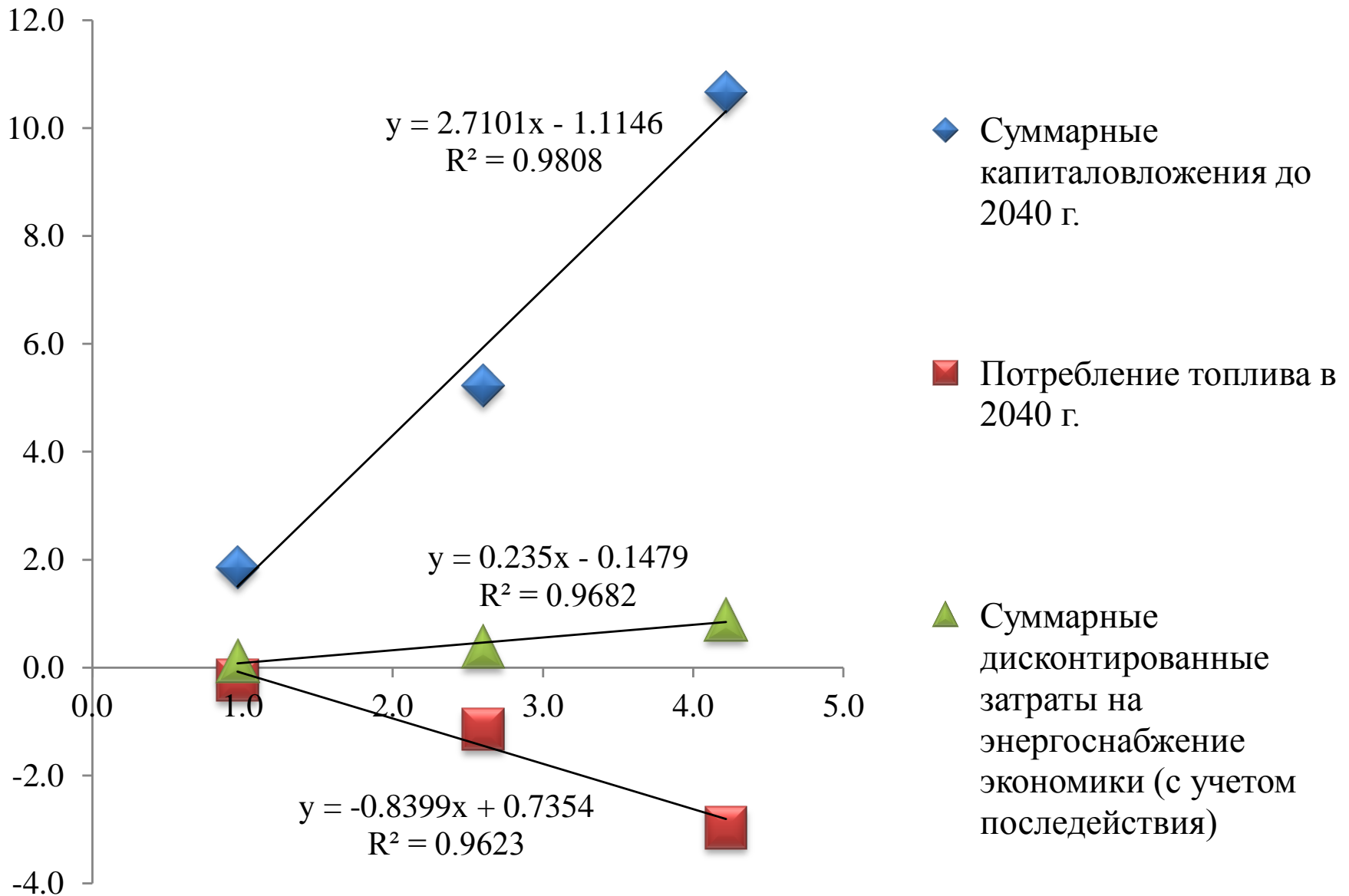
Результаты оптимизационных расчетов – структура установленной мощности (левая шкала) и доля безуглеродной генерации (правая шкала)



Результаты оптимизационных расчетов – отклонение основных интегральных характеристик развития ЕЭС России



Зависимость относительного изменения основных интегральных характеристик развития электроэнергетики от прироста доли ВИЭ в структуре производства электроэнергии



Институт энергетических исследований РАН

www.eriras.ru

Андрей Хоршев, к.э.н., вед.науч.сотрудник

epos@eriras.ru

*Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ
(проект №17-79-20354)*

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!