

# 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
<b>Изменчивость (волатильность)</b>	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
<b>Непредсказуемость (стохастичность)</b>	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
<b>Близкие к нулю маржинальные затраты</b>	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
<b>Низкая готовность (Lower capacity value)</b>	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
<b>Вынужденное снижение выработки (Curtailment)</b>	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
<b>Распределенность</b>	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.

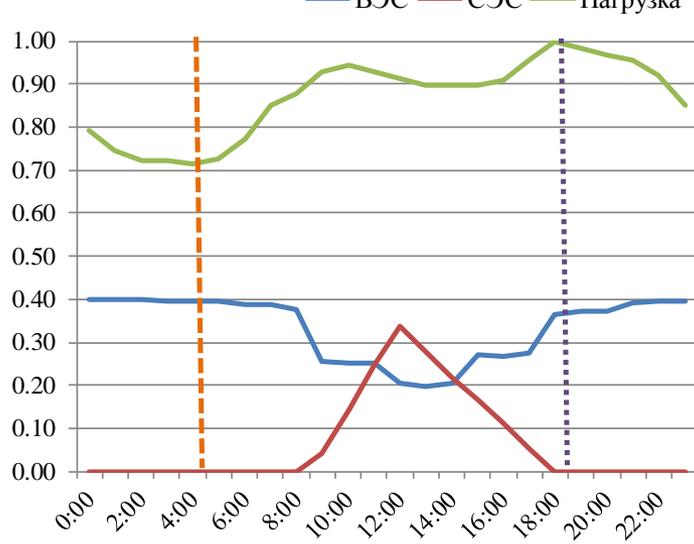
- уравнение баланса рабочей мощности для часа минимальной суточной нагрузки ОЭС (v)

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

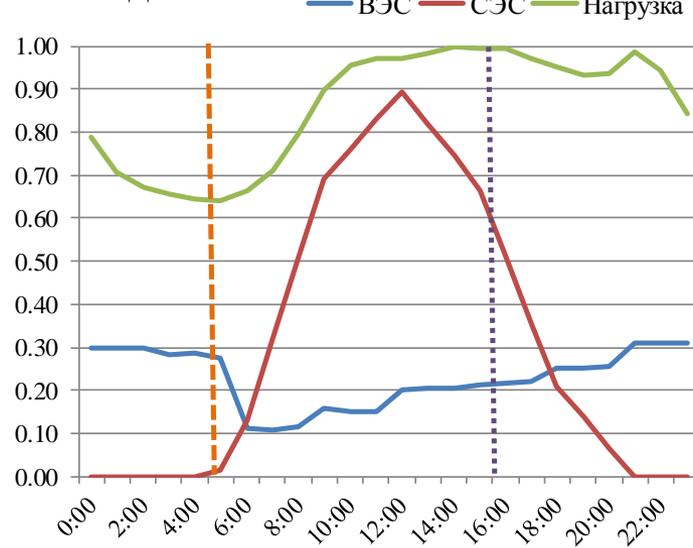
где  $\chi_{i,r,g}^{must-run}$  – коэффициент максимально допустимого снижения используемой рабочей мощности, исходя из технического или технологического минимума разгрузки оборудования для каждой генерирующей технологии (i).

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

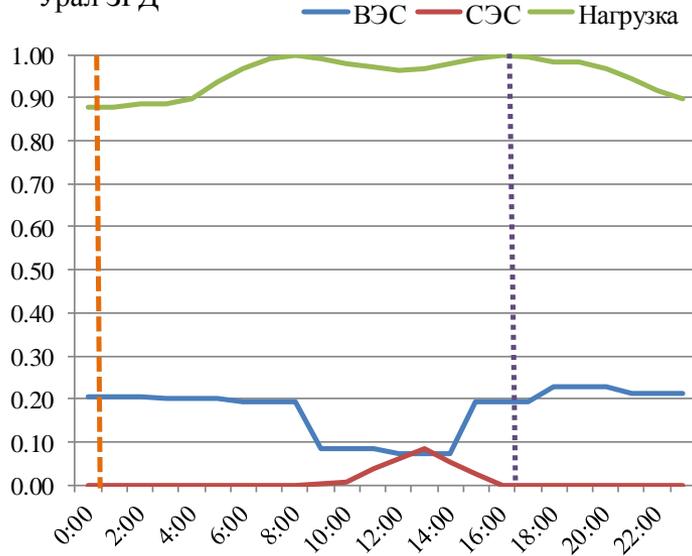
Юг ЗРД



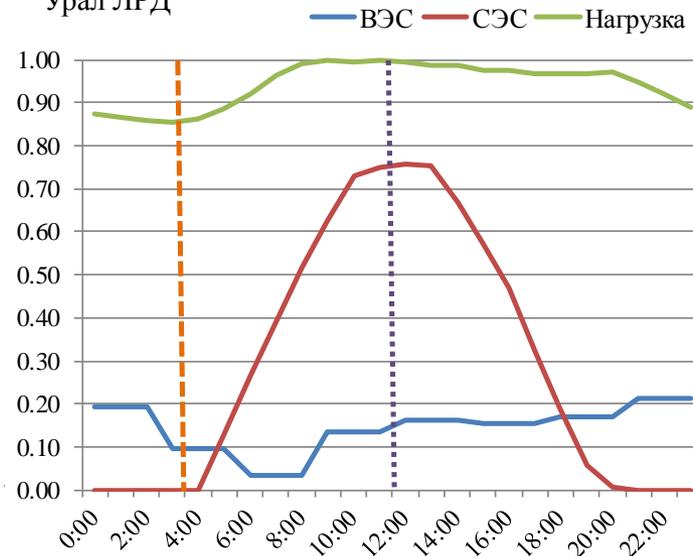
Юг ЛРД



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

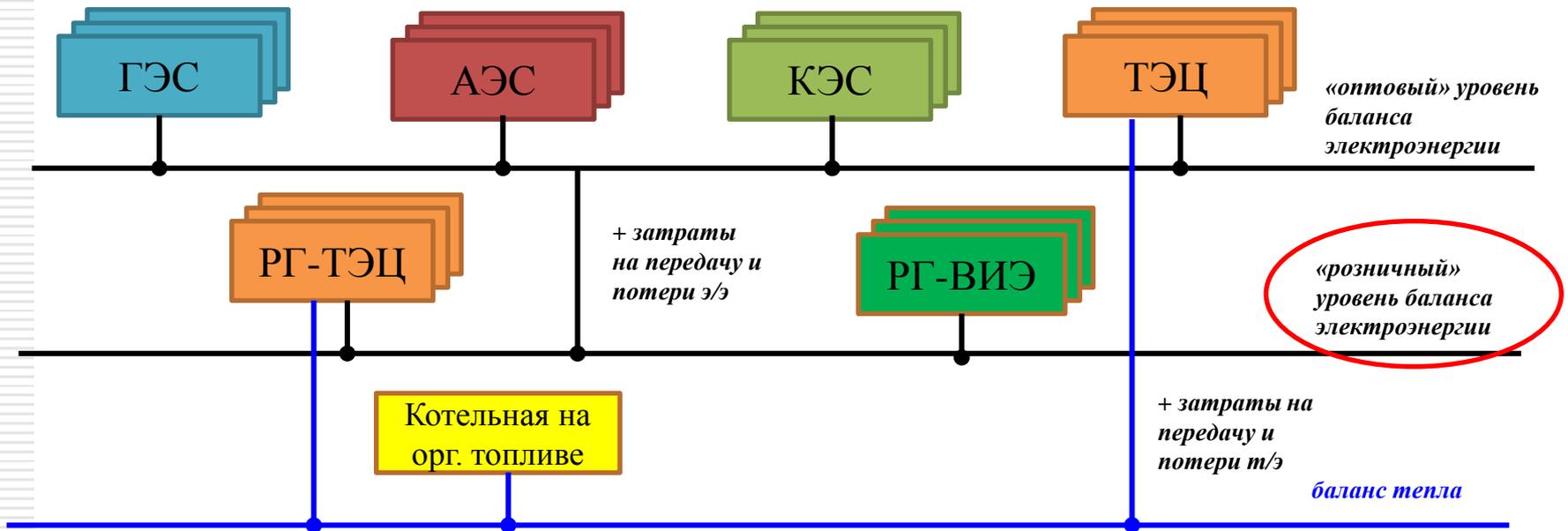
	2020 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.	2040 г.	2050 г.
<b>ВЭС</b>						
Минимум	65000	63050	61750	60125	58500	56550
Максимум	95000	90250	87400	85025	82650	77900
<b>СЭС</b>						
Минимум	60000	45000	39000	36000	33000	31200
Максимум	90000	58500	45000	40500	36000	34200

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)

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

**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

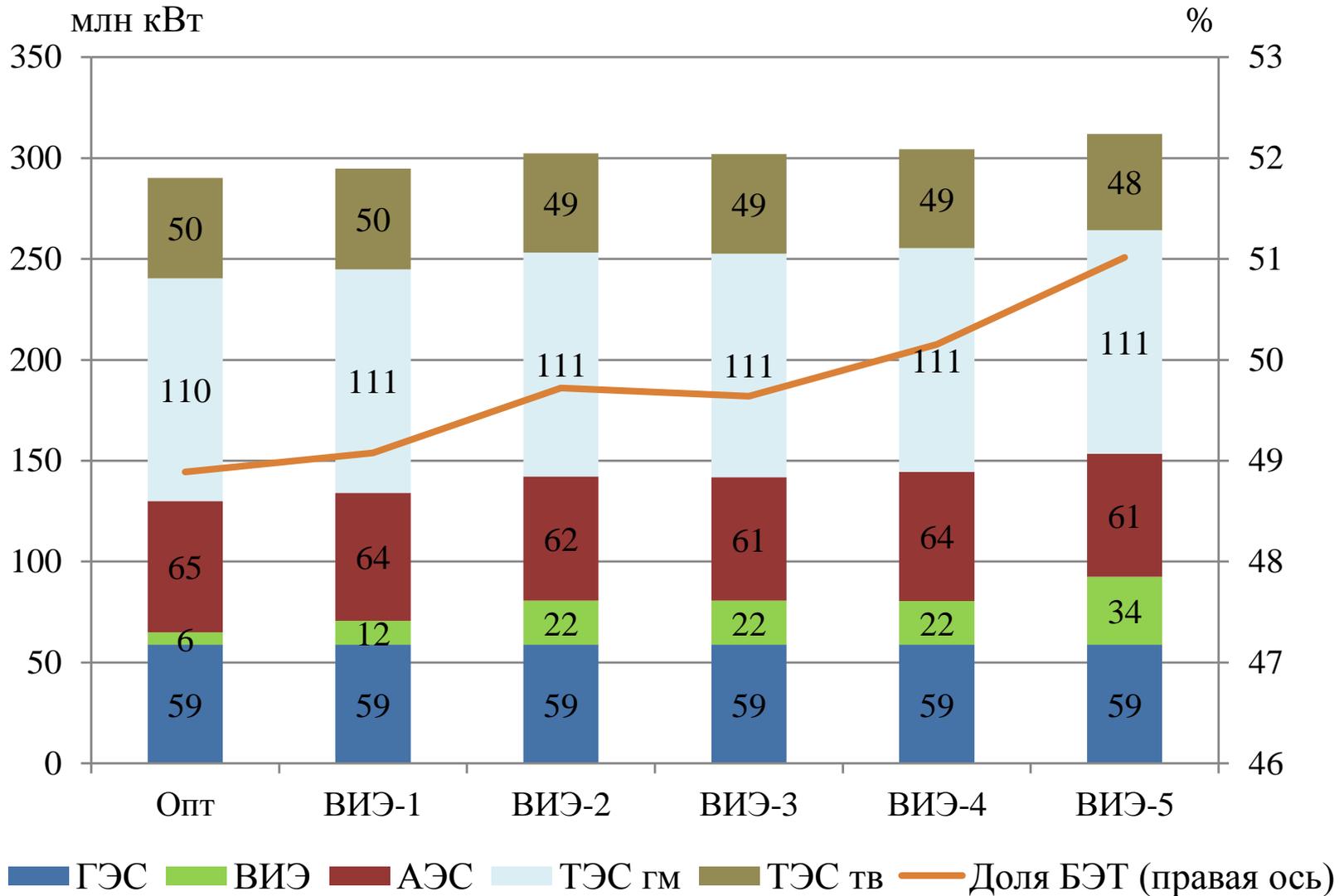
### Исходные условия для моделирования:

- 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

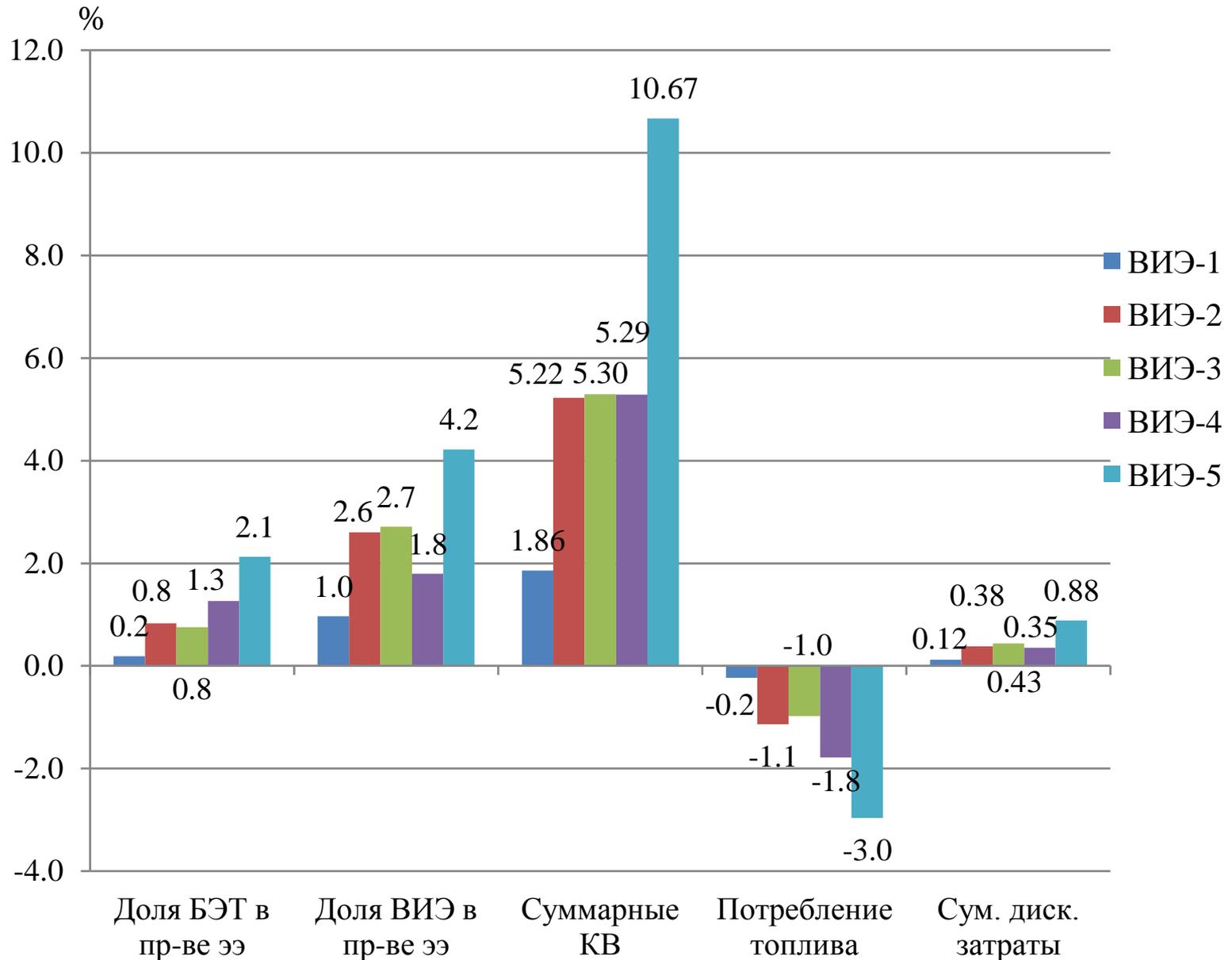
### Рассмотренные варианты развития ВИЭ в ЕЭС России

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

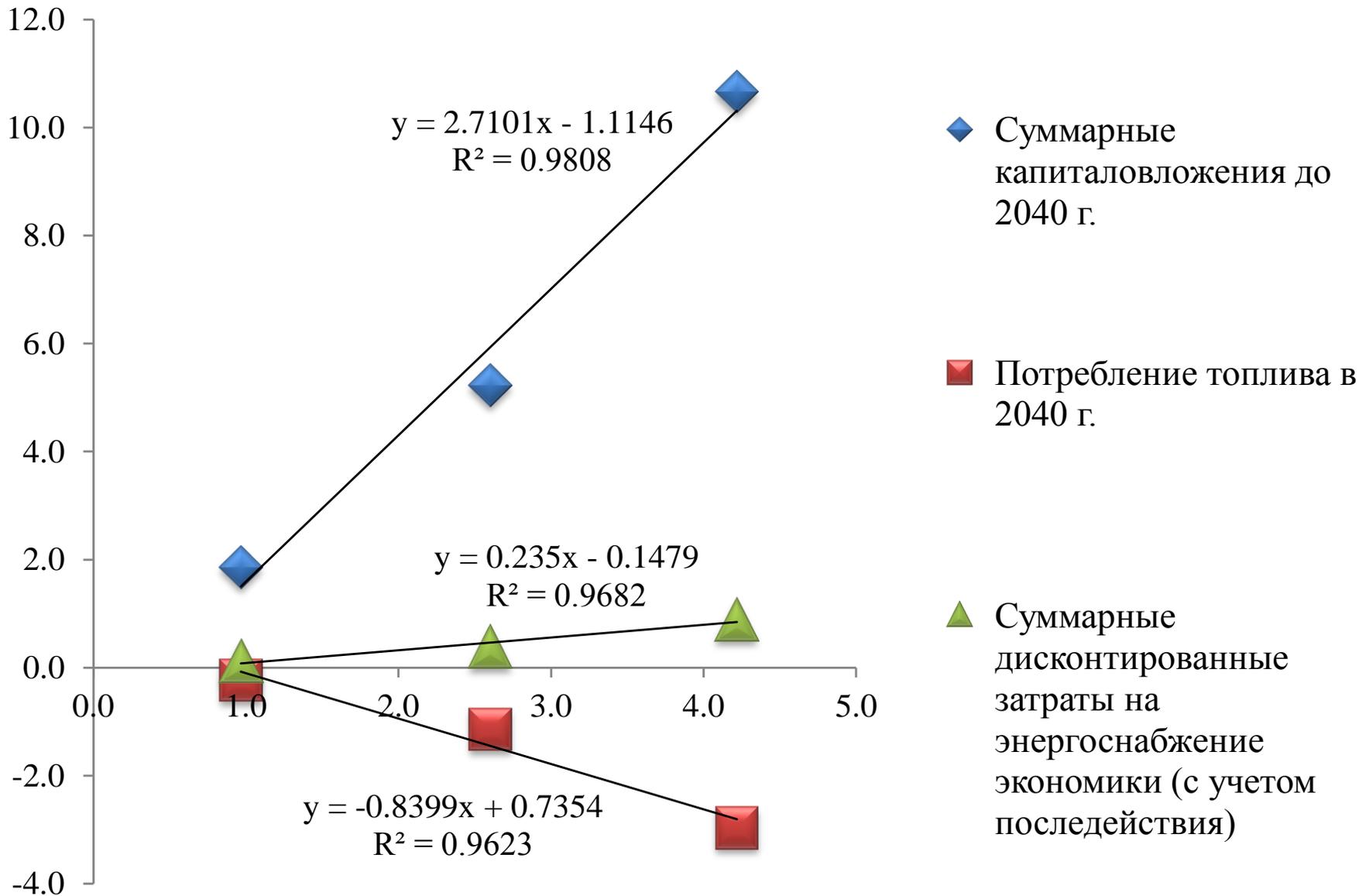
# Результаты оптимизационных расчетов – структура установленной мощности (левая шкала) и доля безуглеродной генерации (правая шкала)



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

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

[epos@eriras.ru](mailto:epos@eriras.ru)

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

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!**