



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Управление неопределенностью на рынках электроэнергии

Владимир Дворкин

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

23 октября 2016 г.

- Функционирование оптовых рынков э/э
 - Либерализация рынков электроэнергии
 - Организация рынков электроэнергии
 - Рынок на сутки вперед
 - Балансирующий рынок
 - Примеры оптовых рынков электроэнергии
- Источники неопределенности на рынках электроэнергии
 - Неопределенность спроса
 - Неопределенность предложения ВИЭ
 - Прочие источники
- Case Study: Совершенствование механизмов торгов на рынках с большой долей производства на основе ВИЭ



- На протяжении большей части XX века преобладающая модель рынка электроэнергии - монополия
- Электроэнергия производилась, передавалась и распределялась крупными государственными компаниями
- В 80-90х годах правительства многих стран задумались о переходе от монопольного устройства рынка к конкурентной модели с целью повышения эффективности функционирования отрасли
- Рынки разделились на монопольную (передача и распределение) и конкурентную (производство и сбыт) части
- Большая часть производимой электроэнергии реализуется на оптовых рынках



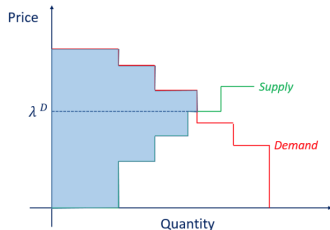
- Электроэнергия - товар, который невозможно эффективно складировать в масштабах ЭС
- Для подготовки энергосистемы к работе, торги производятся на каждый час за 24 часа до фактической поставки
- Эти торги осуществляются на *Рынке на сутки вперед* (PCB, day-ahead, pool, forward market ...)
- Отклонения от плановых значений торгуются на *Балансирующем рынке* (БР, balancing or real-time market) практически в режиме реального времени
- Существуют также рынки резерва, регулирования частоты и т.д.



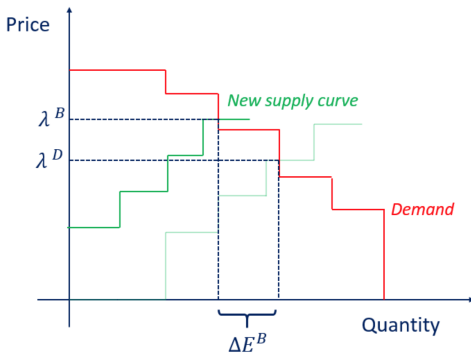
- Большая часть электроэнергии торгуется на рынке на сутки вперед
- Производители и потребители заблаговременно подают заявки на каждый час предстоящих суток, указывая цену предложения или покупки и соответствующий объем электроэнергии
- Оператор рынка собирает эти заявки и проводит клиринг рынка
- По итогам аукциона определяются плановые объемы удовлетворенного спроса и предложения, а также равновесная цена (клиринговая цена)

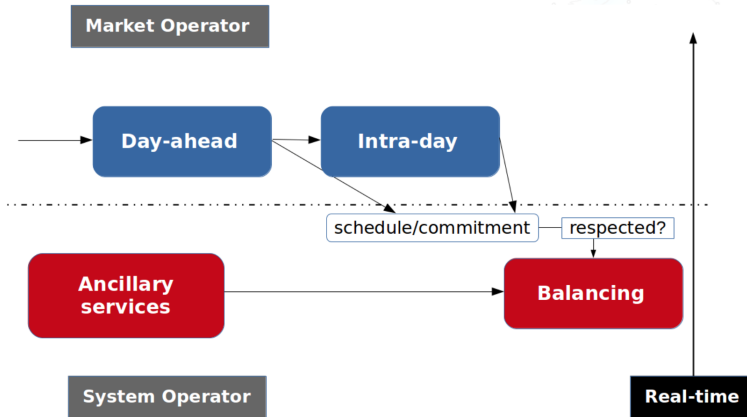
- Аукцион РСВ - классическая задача линейного программирования
- Задача оператора рынка - максимизировать общественное благосостояние

$$\begin{aligned} & \underset{p_i^S, p_j^D}{\text{Maximize}} && \sum_{i \in I} c_i^S p_i^S - \sum_{j \in J} c_j^D p_j^D \\ & \text{Subject to} && \sum_{i \in I} p_i^S = \sum_{j \in J} p_j^D : \lambda^D, \\ & && 0 \leq p_i^S \leq \bar{p}_i^S \quad \forall i, \\ & && 0 \leq p_j^D \leq \bar{p}_j^D \quad \forall j. \end{aligned}$$



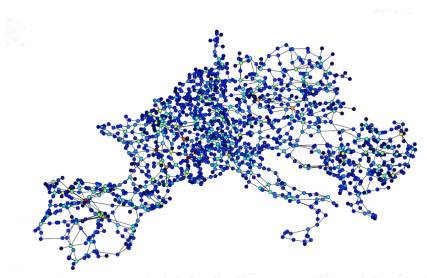
- Балансирующий рынок функционирует в режиме реального времени
- Основной задачей БР является компенсация небалансов, вызванных отклонениями от плановых значений РСВ





Источник: Pierre Pinson personal [website](#)

- Российский рынок ОРЭМ: за развитие, контроль и оперирование рынка отвечают НП Совет рынка, АТС ЕЭС, СО ЕЭС
- Европейские рынки: NordPool, EEX, EXAA, APX UK и т.д.



- Американские: ISO New England, PJM, California ISO



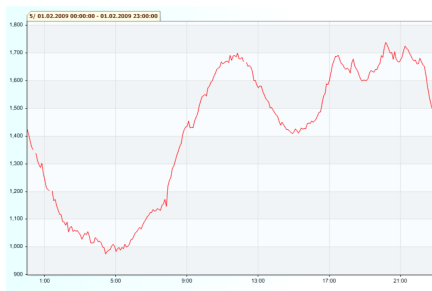
- Любой процесс принятия решений требует некоторого набора входных данных для выработки *оптимального* решения
- Если входные данные являются детерминированными, то процесс принятия решения является тривиальным
- Однако в реальной практике оперирования энергосистем, эти данные имеют стохастическую природу
- Это и образует неопределённость среды, в которой функционируют рыночные агенты

Чемпионат мира по гандболу, Хорватия-Франция, 01/02/2009,
ЭС Хорватии

Прогноз спроса



Фактический спрос



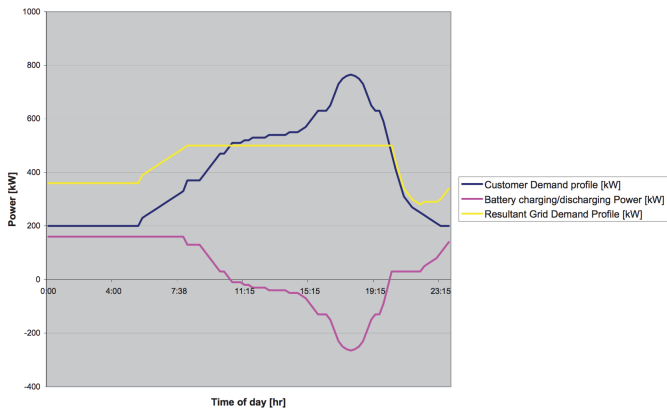
Появление аккумуляторов достаточной емкости и мощности видоизменяет график нагрузки потребителей

Tesla Energy Powerpack



ABB ESM

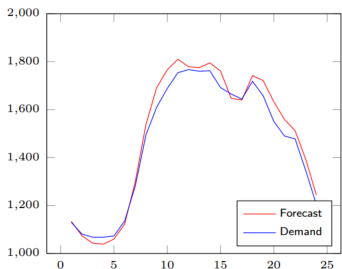




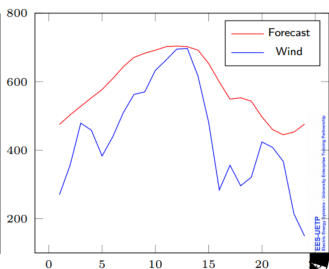
- Современные энергосистемы демонстрируют стремительный переход от производства на основе традиционных источников энергии к производству на основе ВИЭ
- *Renewable goals (доля от электропотребления):* Дания - 50% к 2020, 84% к 2035; Германия - 35% к 2020, 60% к 2050; США - 20% к 2020
- Дания - мировой лидер по внедрению ветровой генерации
 - Отбор ценовых заявок РСВ по виду топлива ([клик](#))
 - Функционирование энергосистемы в режиме реального времени ([клик](#))

- Производство на основе ВИЭ обладает стохастической природой
- Производство на основе ВИЭ сложно предсказать за 24 часа до фактической поставки электроэнергии

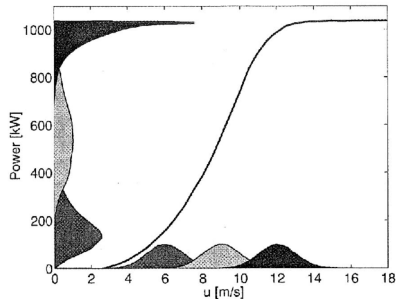
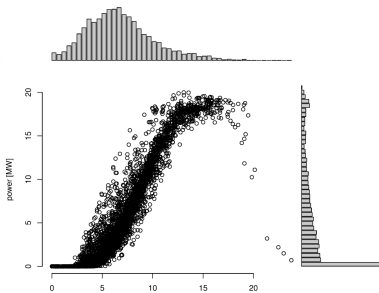
Demand DK2 (12/08/14)



Wind DK2 (12/08/14)



- Wind turbine power curve





- С чем еще связана неопределенность?

- С чем еще связана неопределенность?

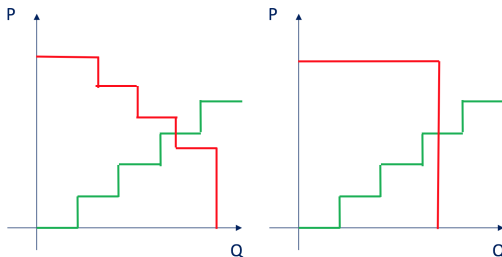


Регулирование в электроэнергетике!

Совершенствование механизмов торгов на оптовых рынках с большой долей производства на основе ВИЭ

- Цель исследования - усовершенствовать модель двухэтапного стохастического клиринга рынка электроэнергии при помощи координации рынков РСВ и оперативного резерва
- В работе последовательно рассматриваются три модели клиринга оптового рынка
 - Традиционный клиринг (ТК)
 - Стохастический клиринг (СК)
 - Усовершенствованный клиринг (УК)

- Спрос является неэластичным по отношению к цене \rightarrow задача максимизации общественного благосостояния трансформируется в задачу минимизации затрат на производство ε/ε



- Стоимость отключения нагрузки велика



- Неопределенность связана только со стохастической выработкой на основе ВИЭ, которая может быть описана набором сценариев $\omega \in \Omega$ с соответствующими значениями вероятности π_ω ($\sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega = 1$)

$$\text{WP} \left\{ \begin{array}{l} \text{High: (50 MW, 0.6)} \\ \text{Low: (10 MW, 0.4)} \end{array} \right.$$



- Тепловые станции способны производить э/э в объеме от 0 МВт до P_{max}
- Рассматривается узловое ценообразование
- Производители э/э указывают предельные издержки в ценовых заявках (true costs)
- Функция издержек производства станций - линейная
- Участники не демонстрируют стратегического поведения



- ТК максимально близко приближена к реальной практике оперирования оптового рынка
- За 24 часа до фактической поставки проводится клиринг РСВ
- Предполагается, что ВИЭ указывают ожидаемое значение объема производства в ценовых заявках
- Через 24 часа проводится клиринг балансирующего рынка для соблюдения баланса активной мощности





Клиринг РСВ на некоторый час предстоящих суток

$$\text{Min}_{\Phi^D} C^D(\Phi^D)$$

$$\text{S.t. } \mathbf{h}^D(\Phi^D) - \mathbf{L} = 0 : \lambda^D$$

$$\mathbf{g}^D(\Phi^D) \leq 0$$

Обозначения

Φ^D – Вектор переменных РСВ

C^D – Функция издержек РСВ

\mathbf{L} – Спрос в каждом узле ЭС

λ^D – Цена РСВ в каждом узле

Φ^D включает переменные, относящиеся к отбору мощности ТЭС p_G и ВИЭ p_W , а также угол напряжения δ

Клиринг БР для некоторого исхода ω'

$$\text{Min}_{\Phi_{\omega'}^B} C^B(\Phi_{\omega'}^B)$$

$$\text{S.t. } \mathbf{h}^B(\Phi^{D*}, \Phi_{\omega'}^B) - \mathbf{W}_{\omega'} = 0 : \lambda_{\omega'}^B$$

$$\mathbf{g}^B(\Phi_{\omega'}^B, \Phi^{D*}; \mathbf{W}_{\omega'}) \leq 0$$

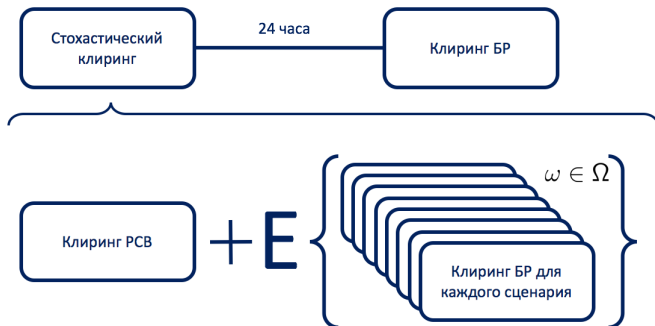
Обозначения

- $\Phi_{\omega'}^B$ — Вектор переменных БР
- C^B — Функция издержек БР
- $\mathbf{W}_{\omega'}$ — Реализация пр-ва ВИЭ
- $\lambda_{\omega'}^B$ — Цена БР в каждом узле

$\Phi_{\omega'}^B$ включает переменные, относящиеся к балансированию энергосистемы в режиме реального времени, а именно:

- Активирование резерва \uparrow или резерва \downarrow , $\mathbf{r}_{\omega'}^{\uparrow}$ и $\mathbf{r}_{\omega'}^{\downarrow}$
- Гашение производства ВИЭ, $\mathbf{W}_{\omega'}^{SP}$
- Отключение нагрузки, $\mathbf{L}_{\omega'}^{SH}$
- Угол напряжения $\delta_{\omega'}$

- В основе СК лежит идея о совместной минимизации затрат РСВ и ожидаемого значения затрат БР
- Это позволяет учесть влияние отбора РСВ на стоимость балансирования системы через 24 часа



$$\begin{aligned} \text{Min}_{\Phi^D, \Phi_\omega^B} \quad & C^D(\Phi^D) + \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega \Phi_\omega^B \\ \text{S.t.} \quad & \mathbf{h}^B(\Phi^D, \Phi_\omega^B) - \mathbf{W}_\omega = 0 : \lambda_\omega^B \quad \forall \omega \in \Omega \\ & \mathbf{g}^B(\Phi_\omega^B, \Phi^D; \mathbf{W}_\omega) \leq 0 \quad \forall \omega \in \Omega \\ & \mathbf{h}^D(\Phi^D) - \mathbf{L} = 0 : \lambda^D \\ & \mathbf{g}^D(\Phi^D) \leq 0 \end{aligned}$$

- СК действительно позволяет значительно сократить совокупные затраты (PCB + БР) на оперирование энергосистемы
- Было доказано, что СК гарантирует возмещение затрат для традиционных станций, обеспечивающих поддержание оперативного резерва в системе ([клик](#))
- Однако в некоторых исходах неопределенности производства ВИЭ эти 'маневренные станции' несут убытки. Это в том числе вызвано тем, что отбор на PCB производится с нарушением принципа монотонного возрастания кривой предложения
- Для решения этой проблемы предлагается внедрить в модель СК рынок оперативного резерва

- Пример рынка оперативного резерва

$$\text{Min}_{R_i^\uparrow, R_i^\downarrow} \sum_{i \in I} (c_i^\uparrow R_i^\uparrow + c_i^\downarrow R_i^\downarrow)$$

$$\text{S.t.} \quad \sum_{i \in I} R_i^\uparrow = D^\uparrow : \lambda^\uparrow$$

$$\sum_{i \in I} R_i^\downarrow = D^\downarrow : \lambda^\downarrow$$

$$0 \leq R_i^\uparrow \leq \bar{R}_i^\uparrow$$

$$0 \leq R_i^\downarrow \leq \bar{R}_i^\downarrow$$

Обозначения

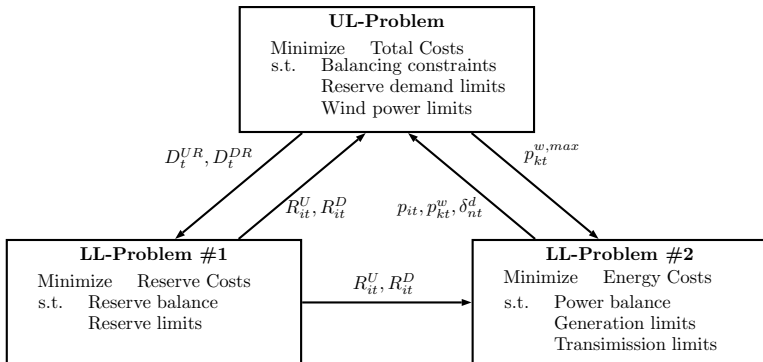
$R_i^\uparrow, R_i^\downarrow$ — Отбираемый резерв

$\bar{R}_i^\uparrow, \bar{R}_i^\downarrow$ — Объемы предложения

$c_i^\uparrow, c_i^\downarrow$ — Стоимость предложения

D^\uparrow, D^\downarrow — Спрос на резерв

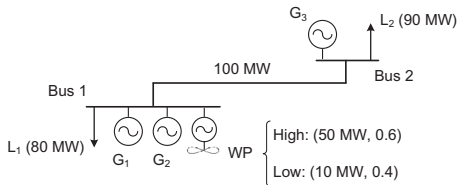
$\lambda^\uparrow, \lambda^\downarrow$ — Цена резерва



$$\begin{aligned}
 & \text{Min}_{\Phi^D, \Phi^R, \Phi_\omega^B, \bar{D}^R, \bar{W}} C^D(\Phi^D) + \sum_{\omega \in \Omega} \pi_\omega \Phi_\omega^B \\
 & \text{S.t. } \mathbf{h}^B(\Phi^D, \Phi_\omega^B) - \mathbf{W}_\omega = 0 : \lambda_\omega^B \quad \forall \omega \in \Omega \\
 & \mathbf{g}^B(\Phi_\omega^B, \Phi^R, \Phi^D; \mathbf{W}_\omega) \leq 0 \quad \forall \omega \in \Omega \\
 & \mathbf{g}^{lim}(\bar{D}^R, \bar{W}) \leq 0 \\
 & \Phi^D \in \arg \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}_{\Phi^D} C^D(\Phi^D) \\ \mathbf{h}^D(\Phi^D) - \mathbf{L} = 0 : \lambda^D \\ \mathbf{g}^D(\Phi^D, \Phi^R; \bar{W}) \leq 0 \end{array} \right\} \\
 & \Phi^R \in \arg \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}_{\Phi^R} C^R(\Phi^R) \\ \mathbf{h}^R(\Phi^R) - \bar{D}^R = 0 : \lambda^R \\ \mathbf{g}^R(\Phi^R) \leq 0 \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

- УК является примером двухуровневой оптимизационной проблемы (Bilevel problem)
- Проблема верхнего уровня стремится минимизировать совокупные ожидаемые затраты на РСВ и БР
- Проблемы нижнего уровня (i) определяют обязательное условие монотонного возрастания функции издержек производителей и (ii) внедряют рынок оперативного резерва для создания нового источника прибыли для 'маневренных' станций
- Требуется применить условия ККТ для представления задачи в виде одноуровневой проблемы MILP

- Двухузловая ЭС



Unit	G_1	G_2	G_3
\bar{p}_i , MW	100	110	50
c_i , \$/MWh	35	30	10
c_i^\uparrow , \$/MW	40	35	12
c_i^\downarrow , \$/MW	34	28	9
\bar{R}_i^\uparrow , MW	10	10	5
\bar{R}_i^\downarrow , MW	20	20	5

- Стоимость отключения нагрузки - 200 \$/MW

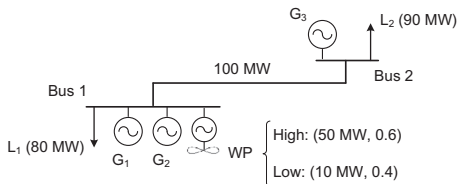


Таблица: Отбор РСВ и БР [MW]

Модель	Агент	Рынок на сутки вперед			Балансирующий рынок	
		p_i	R_i^\downarrow	R_i^\uparrow	High	Low
TK	G_1	0	-	-	0	10
	G_2	86	-	-	16	10
	G_3	50	-	-	0	0
	WP	34	-	-	0	0
	L_1	80	-	-	0	4
	L_2	90	-	-	0	0

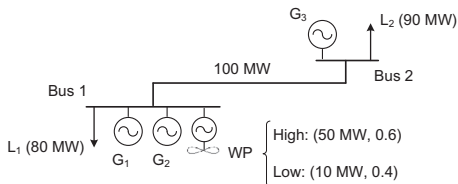


Таблица: Отбор РСВ и БР [MW]

Модель	Агент	Рынок на сутки вперед			Балансирующий рынок	
		p_i	R_i^\downarrow	R_i^\uparrow	High	Low
СК	G_1	10	-	-	10	0
	G_2	90	-	-	0	10
	G_3	50	-	-	20	0
	WP	20	-	-	0	0
	L_1	80	-	-	0	0
	L_2	90	-	-	0	0

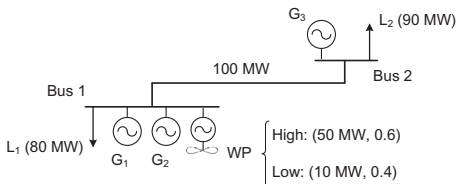
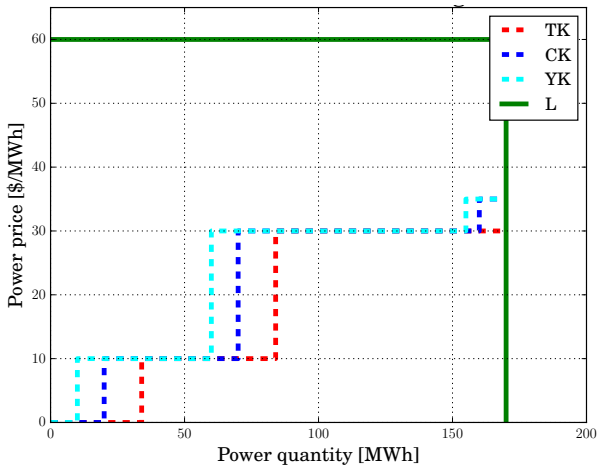


Таблица: Отбор РСВ и БР [MW]

Модель	Агент	Рынок на сутки вперед			Балансирующий рынок	
		p_i	R_i^\downarrow	R_i^\uparrow	High	Low
УК	G_1	15	15	0	15	0
	G_2	95	20	0	20	0
	G_3	50	5	0	5	0
	WP	10	-	-	0	0
	L_1	80	-	-	0	0
	L_2	90	-	-	0	0



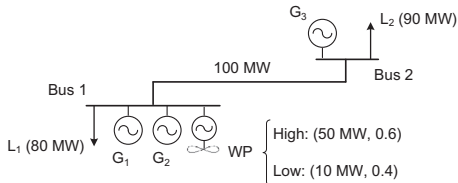


Таблица: Оптовые цены, \$/MW

Модель	λ_n^D		λ^\uparrow	λ^\downarrow	$\lambda_{n\omega}^D / \pi_\omega$			
	Узел				Исход		High	
	N_1	N_2	-	-	N_1	N_2	N_1	N_2
TK	30	30	-	-	28	28	200	200
CK	30	30	-	-	25.7	25.7	36.5	36.5
УК	30	30	12	34	0	0	75	75

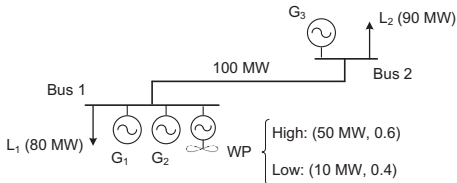


Таблица: Ожидаемые затраты, \$

Модель	Всего	Рынок на сутки вперед	Балансирующий рынок
TK	3431.2	3080	351.2
СК	3150	3550	-400
УК	3206	3875	-669

Таблица: Прибыль традиционных генераторов, \$

Модель	Агент	PCB	OP	БР Исход		Всего Исход		Exp
				High	Low	High	Low	
TK	G_1	0	-	0	1600	0	1600	640
	G_2	0	-	0	1650	0	1650	660
	G_3	1000	-	0	0	1000	1000	1000
СК	G_1	-50	-	83,3	0	33,3	-50	0
	G_2	0	-	46,7	15	46,7	15	34
	G_3	1000	-	0	0	1000	1000	1000
УК	G_1	-75	510	510	0	945	435	741
	G_2	0	680	560	0	1240	680	1016
	G_3	1000	170	45	0	1215	1170	1197



- Двухуровневая архитектура позволяет внедрить дополнительные условия в модель СК
- Моделирование на примере миниатюрной ЭС показало, что координация ОР, РСВ и БР позволяет учесть вариативность производства на основе ВИЭ и гарантировать возмещение затрат 'маневренных' станций
- Дальнейшие шаги:
 - Рассмотреть обратный порядок клиринга, РСВ \rightarrow ОР
 - Осуществить моделирование на примере ЭС реального масштаба. Например, [IEEE 24 Test System](#)
 - Найти оптимальное распределение затрат на оперативный резерв среди потребителей и ВИЭ.

Спасибо за внимание!