



ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬВА СО РАН

**ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ
МОЩНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ И НАКОПИТЕЛИ
ЭНЕРГИИ**

Клер А.М.
Карамов Д.Н.

Москва 2015

Текущее состояние АСЭС

- Свыше 160 АСЭС расположены на территории респ. Якутия
- В качестве основного генерирующего оборудования используются ДЭС
- Суммарная установленная мощность составляет свыше 210 МВт
- Высокая себестоимость произведенной единицы электроэнергии (20 – 60) руб./кВт*ч

Направление развивалось в работах

Н.И. Воропая, З. Стычинского, Л.Б. Директора, Б.В. Лукутина, О.С. Попеля, В.В. Елистратова, И.Л. Майкова, Ю.И. Ивановой, О.В. Марченко, G. Rauschenbach, Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín, J.A. Carta, Orhan Ekren, Tremblay O, A. Hina Fathima, Jonas Allegrini, J. Dekker, Minna Ranjeva, V. Salas, M. P. Musgrove, E. Dursun и многих других.

Наиболее известные оптимизационные комплексы (ОК)

HYPORA (США) – **HY**brid **OP**timization for **R**ural/**R**emote **A**reas

HOMER (США) – **H**ybrid **O**ptimization **M**odel for Multiple **E**nergy **R**esources

HOGA (Испания) – **H**ybrid **O**ptimization using **G**enetic **A**lgorithm

PSS (Россия/Томск) – **P**ower **S**ystem **S**imulation

Достоинства

- Решение задачи структурной оптимизации
- Учет случайного характера скорости ветра для среднемесячных значений
- Имеются открытые бета-версии для ознакомления

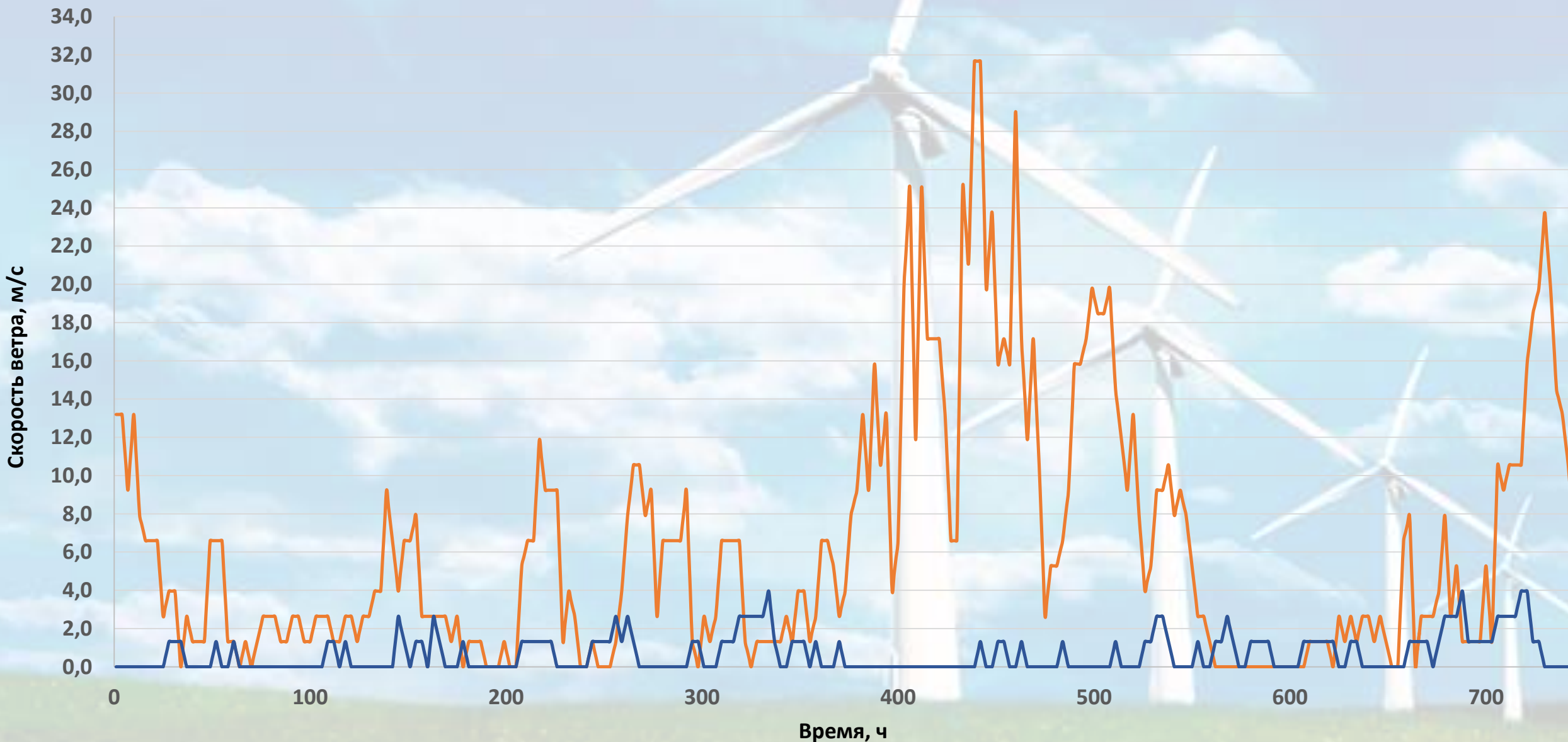
Недостатки

- Отсутствие учета случайного характера продолжительности временных отрезков на протяжении которых различные метеопараметры остаются в пределах некоторых границ
- Использование средних величин для некоторых параметров окружающей среды (температура воздуха, коэффициенты ослабления солнечного излучения, давление и т.д.)
- Отсутствие учета корреляции между параметрами окружающей среды
- Отсутствие электрических расчётов мгновенных режимов
- Отсутствие учета надежности при оптимизации

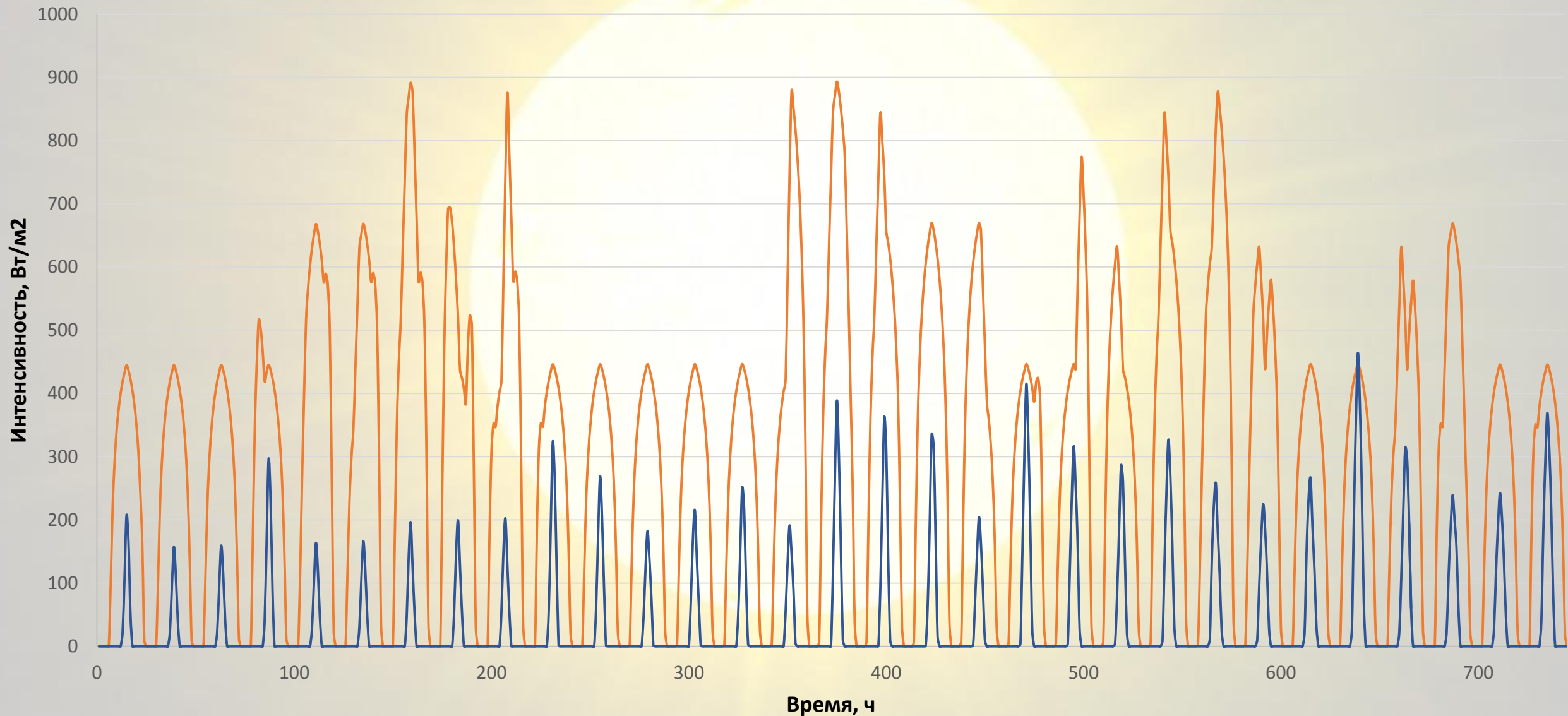
Предлагаемый подход

- При оптимизации используются массивы параметров окружающей среды зафиксированные на ближайшей автоматической метеостанции
- Моделируется работа АСЭС с шагом один час, с определением основных эксплуатационных параметров элементов генерации, аккумулярования, преобразования и распределения электроэнергии
- Проводятся расчеты работы АСЭС для всех лет периода метеонаблюдений
- Определяются среднегодовые экспл показатели

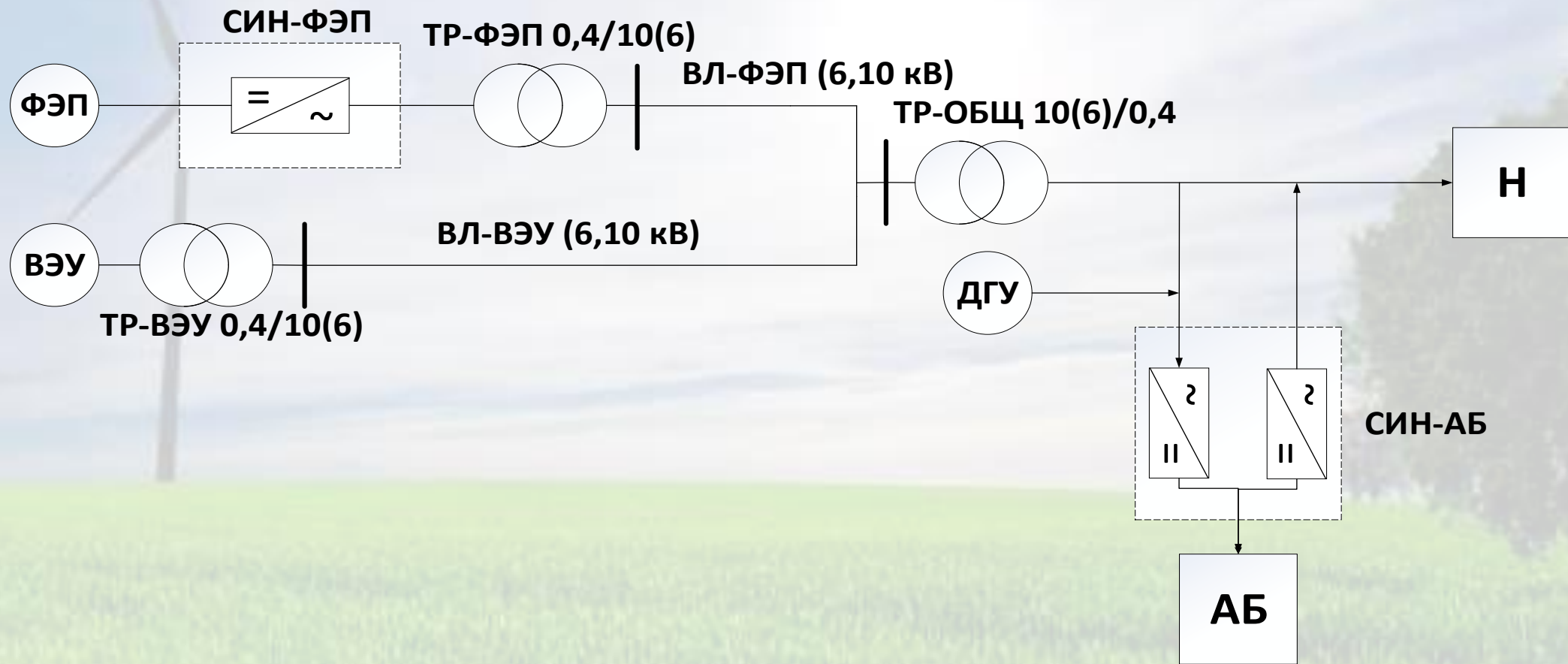
Динамика скорости ветра на высоте 15 м. в пп. «Усть-Миль» и пп. «Найба» в течение месяца (Январь)



Интенсивность солнечного излучения в п. «Усть-Миль» в июне и январе



Принципиальная схема АСЭС



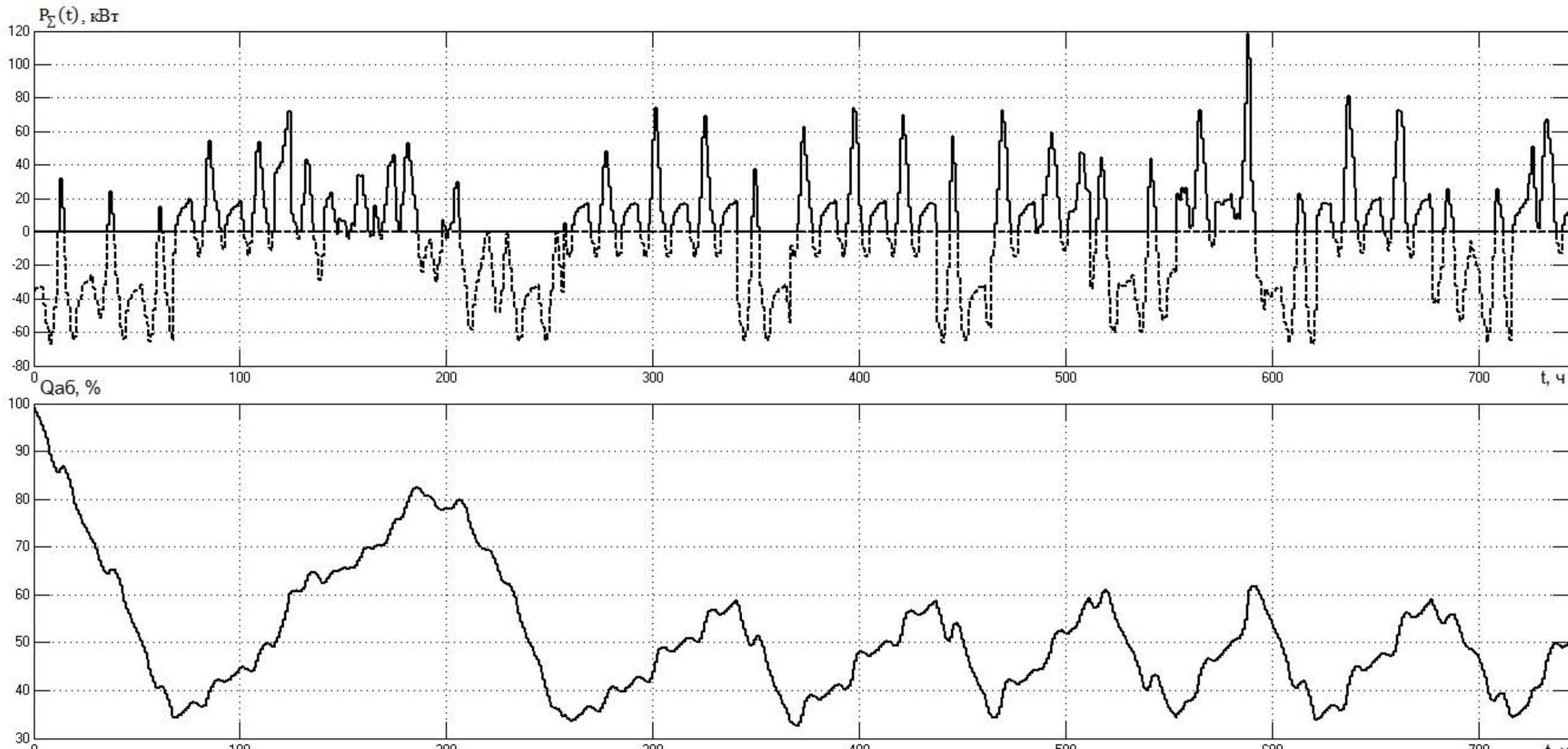
Принципы распределения нагрузок по агрегатам

- Для каждого часа и года периода метеонаблюдений определяется (исходя из текущих параметров окружающей среды и астрономических параметров Солнца) потенциально-возможная выработка электроэнергии ФЭП и ВЭУ (при их заданной установленной мощности).
- Определяется потери активной мощности при передачи потенциально-возможной выработки ФЭП и ВЭУ до потребителя.
- Если поступающая к потребителю суммарная мощность ФЭП и ВЭУ не меньше текущей нагрузки потребителя, то вся она покрывается за счет ВИЭ.
- Если наблюдается избыток мощности, то он поступает на зарядку накопителей. В случае, когда накопители уже заряжены полностью, то на соответствующую величину сокращается мощность ВИЭ. Причем в первую очередь сокращается генерируемая мощность ВЭУ (как наиболее изнашивающихся при работе), а затем ФЭП.

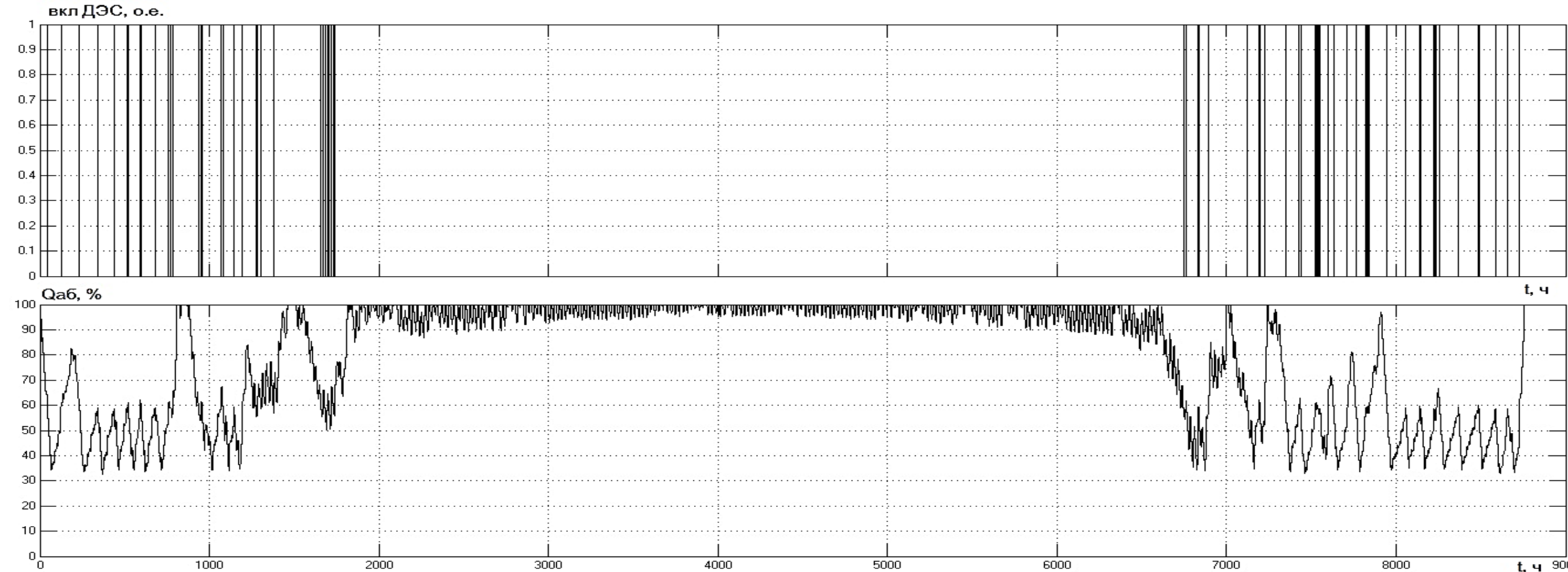
- Если суммарная мощность ВИЭ меньше нагрузки потребителей, то недостаток мощности покрывается за счет накопителей.
- Если накопители разряжены (заряд 30% от номинального), то включается необходимое число ДГУ. ДГУ включаются на полную мощность и отключаются при достижении зарядом накопителя некоторого порогового значения (50% от номинального).
- Если мощность ДГУ совместно с ВИЭ при разряженном накопителе, меньше нагрузки потребителя, то имеет место недоотпуск электроэнергии.
- По известному заряду накопителя в начале рассчитываемого часа работы АСЭС и режиму его работы на протяжении этого часа определяется заряд накопителя в конце часа.

- $P_{\Sigma}(t) = P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t) + P_{\text{ФЭП}}^{\text{max}}(t) - \sum \Delta P(t) - P_{\text{H}}(t)$
- $P_{\Sigma}(t)^+ = \begin{cases} P_{\Sigma}(t); (P_{\Sigma}(t) > 0) \wedge (Q_{\text{АБ}}^{\text{max}} - Q_{\text{АБ}}^{\text{TM}}(t)) \geq \eta_{\text{АБ}} \cdot \eta_{\text{ВЫП}} \cdot P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t \\ \frac{Q_{\text{АБ}}^{\text{max}} - Q_{\text{АБ}}^{\text{TM}}(t)}{\Delta t}; (P_{\Sigma}(t) > 0) \wedge (Q_{\text{АБ}}^{\text{max}} - Q_{\text{АБ}}^{\text{TM}}(t)) < \eta_{\text{АБ}} \cdot P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t \\ 0; (P_{\Sigma}(t) < 0) \end{cases}$
- $P_{\Sigma}(t)^- = \begin{cases} P_{\Sigma}(t); (P_{\Sigma}(t) < 0) \wedge (Q_{\text{АБ}}^{\text{min}} - Q_{\text{АБ}}^{\text{TM}}(t)) \geq \frac{P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{ИНВ}}} \\ \frac{Q_{\text{АБ}}^{\text{min}} - Q_{\text{АБ}}^{\text{TM}}(t)}{\Delta t} \cdot \eta_{\text{ИНВ}}; (P_{\Sigma}(t) < 0) \wedge (Q_{\text{АБ}}^{\text{min}} - Q_{\text{АБ}}^{\text{TM}}(t)) < \frac{P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{ИНВ}}} \\ 0; (P_{\Sigma}(t) > 0) \end{cases}$
- $Q_{\text{АБ}}(t) = Q_{\text{АБ}}(t-1) + (P_{\Sigma}(t)^+ + P_{\Sigma}(t)^-) \Delta t$

Функция мощности системы на протяжении месяца



- $$P_{\text{БМС}}(t) = P_{\text{H}}(t) + \sum \Delta P(t) - P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t) - P_{\text{ФЭП}}^{\text{max}}(t) - (P_{\Sigma}(t)^+ + P_{\Sigma}(t)^-)$$
- $$P_{\text{ДЭС}}(t) = \begin{cases} 0; P_{\text{БМС}}(t) \leq 0 \\ P_{\text{БМС}}(t); (P_{\text{БМС}}(t) > 0) \wedge (P_{\text{БМС}}(t) \leq P_{\text{ДЭС}}^{\text{УСТ}}) \\ P_{\text{ДЭС}}^{\text{УСТ}}; (P_{\text{БМС}}(t) > 0) \wedge (P_{\text{БМС}}(t) > P_{\text{ДЭС}}^{\text{УСТ}}) \end{cases}$$



$$\begin{aligned}
 & P_{\text{ВЭУ}}(t) = \begin{cases} P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t); P_{\text{БМС}}(t) \geq 0 \\ P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t) + P_{\text{БМС}}(t); (P_{\text{БМС}}(t) < 0) \wedge ((P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t) + P_{\text{БМС}}(t)) \geq 0) \\ 0; (P_{\text{БМС}}(t) < 0) \wedge ((P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t) + P_{\text{БМС}}(t)) < 0) \end{cases} \\
 & P_{\text{ФЭП}}(t) = \begin{cases} P_{\text{ФЭП}}^{\text{max}}(t); (P_{\text{ВЭУ}}(t) > 0) \\ (-P_{\text{БМС}}(t) - P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t)); (P_{\text{ВЭУ}}^{\text{max}}(t) = 0) \end{cases} \\
 & W_{\text{ВЭУ}}^j = \sum_{t=1}^{T_{\text{год}}} P_{\text{ВЭУ}}(t) \cdot \Delta t \quad W_{\text{ФЭП}}^j = \sum_{t=1}^{T_{\text{год}}} P_{\text{ФЭП}}(t) \cdot \Delta t \quad W_{\text{ДЭС}}^j = \sum_{t=1}^{T_{\text{год}}} P_{\text{ДЭС}}(t) \cdot \Delta t \\
 & Q_{\text{ДЭС}}^j = \sum_{t=1}^{T_{\text{год}}} \varphi_{\text{ДЭС}}(P_{\text{ДЭС}}(t)) \cdot \Delta t \\
 & W_{\text{ВЭУ}}^{\text{ср}} = (W_{\text{ВЭУ}}^1 + W_{\text{ВЭУ}}^2 + W_{\text{ВЭУ}}^3 + \dots + W_{\text{ВЭУ}}^n) / n^{\text{лет}} \\
 & W_{\text{ФЭП}}^{\text{ср}} = (W_{\text{ФЭП}}^1 + W_{\text{ФЭП}}^2 + W_{\text{ФЭП}}^3 + \dots + W_{\text{ФЭП}}^n) / n^{\text{лет}} \\
 & W_{\text{ДЭС}}^{\text{ср}} = (W_{\text{ДЭС}}^1 + W_{\text{ДЭС}}^2 + W_{\text{ДЭС}}^3 + \dots + W_{\text{ДЭС}}^n) / n^{\text{лет}} \\
 & Q_{\text{ДТ}}^{\text{ср}} = (Q_{\text{ДТ}}^1 + Q_{\text{ДТ}}^2 + Q_{\text{ДТ}}^3 + \dots + Q_{\text{ДТ}}^n) / n^{\text{лет}}
 \end{aligned}$$

Целевая функция

- Для сравнения вариантов применяется методика уравнишенной стоимости электроэнергии (Levelized cost of electricity; LCOE)

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{K_i + M_i + F_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1+r)^i}}$$

$$K_i = K_{\text{ФЭП}i} + K_{\text{ВЭУ}i} + K_{\text{ДГУ}i} + K_{\text{АБ}i} + K_{\text{СИН}i}^{\Phi} + K_{\text{ТР}i}^{\Phi} + K_{\text{ВЛ}i}^{\Phi} + K_{\text{ТР}i}^{\text{В}} + K_{\text{ВЛ}i}^{\text{В}} + K_{\text{ТР}i}^{\text{О}} + K_{\text{ВП}i}^{\text{АБ}} + K_{\text{ИН}i}^{\text{АБ}}$$

$$M_i = M_{\text{ФЭП}i} + M_{\text{ВЭУ}i} + M_{\text{ДГ}i} + M_{\text{АБ}i} + M_{\text{СИН}i} + M_{\text{ТР-ФЭП}i} + M_{\text{ВЛ-ФЭП}i} + M_{\text{ТР-ВЭУ}i} + M_{\text{ВЛ-ВЭУ}i} + M_{\text{ТР-ОБЩ}i} + M_{\text{ВП}i} + M_{\text{ИН}i}$$

Оптимизация АСЭС «Алысардах» (Якутия)

- Максимальная электрическая нагрузка потребителей составляет 11 кВт
- Характер нагрузки коммунально-бытовой
- Цена дизельного топлива с учетом доставки составляет 55 руб./литр
- Параметры окружающей среды принимались по замерам автоматической метеостанции, расположенной в 36 километрах от с. «Алысардах».
- Период метеонаблюдений составил 10 лет

Используемое оборудование

Генерирующее оборудование

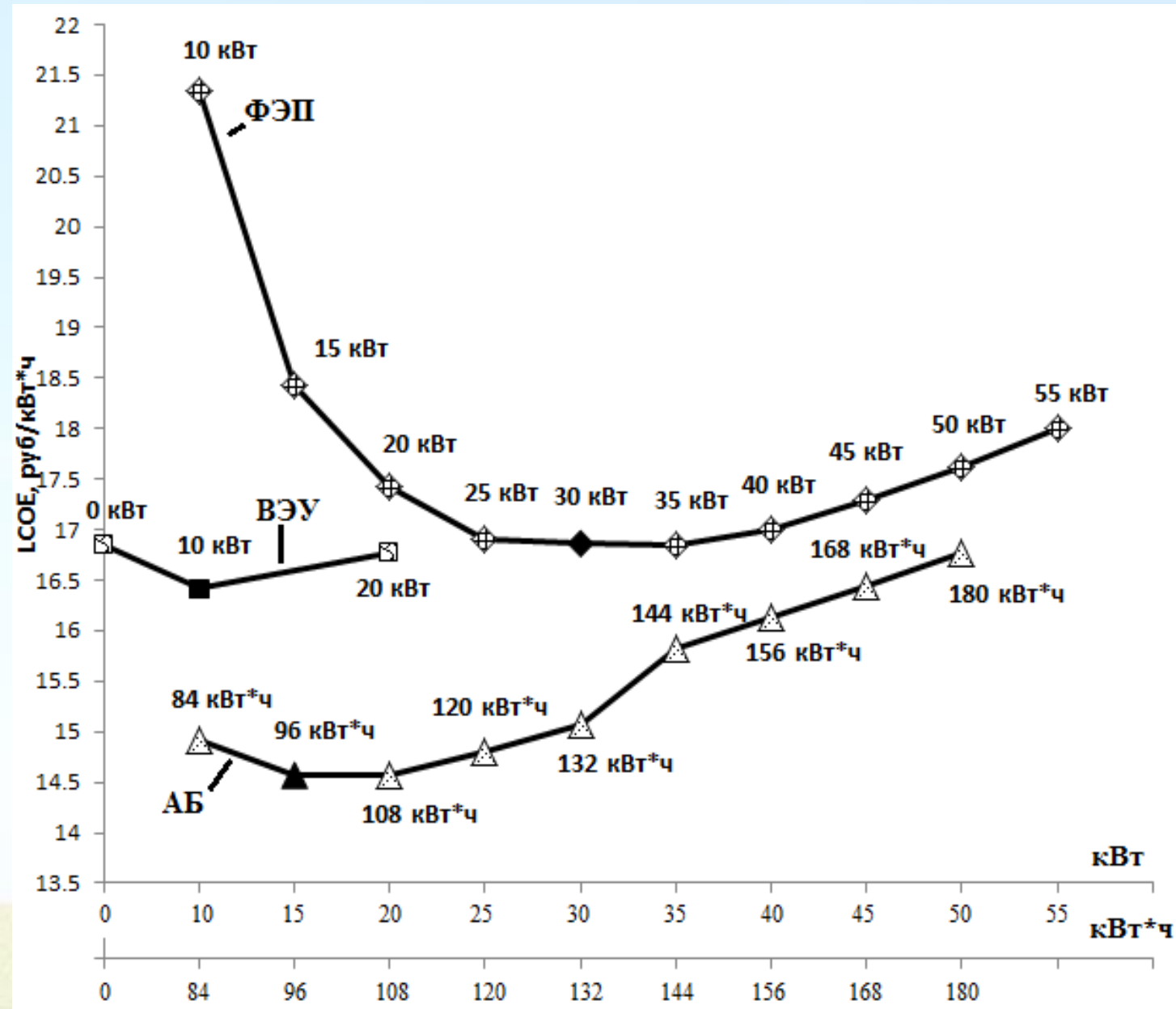
Тип, марка	$P_{уст}$, кВт	КПД, %	К, тыс руб.	М, %	$M_{уст}$, %	$K_{прк}$
ФЭП, ТСМ-250 А	0,250	20	16,950	2	25	1,7
ВЭУ, Sokol air vertical	10	40	560	2	25	1,7
ДЭУ, АД 12-Т400	12	35	350	1	25	1,7
АБ, ДТ (Delta-12-200)	2,4 (кВт*ч)	95	17,530	7	10	1,7

Силовая электроника

Тип, марка	$P_{уст}$, кВт	КПД, %	К, тыс руб.	М, %	$M_{уст}$, %	$K_{прк}$
СИН, STP TL20	5-12	98	92,7-155,7	2	30	1,7
БИН, SMA Sunny Island 8.0.	6	95	98,7	2	30	1,7

* $P_{уст}$ - единичная установленная мощность агрегата, K - стоимость, M - доля годовых издержек от капиталовложений, $M_{уст}$ - доля затрат от капиталовложений на доставку и установку оборудования, $K_{прк}$ - повышающий районный коэффициент на строительство.

Поведение целевой функции при покоординатном спуске



Результаты оптимизации АСЭС «Алысардах» (Якутия)

<i>ВЭУ</i>	<i>ФЭП</i>	<i>АБ</i>	<i>ДЭС</i>	<i>Кап.влож. млн.руб.</i>	<i>Годовой расход топлива, т.</i>	<i>Годовая выработка по элементам тыс. кВт*ч</i>				<i>Стоимость кВт*ч, руб.</i>
Вариант 1 (Вариант электроснабжения от ДЭС)						ДЭС	Нагр. (11 max, 4 min)			27,81
0	0	0	2x12	0,3	13,9	39,8	39,8			
Вариант 2 (Оптимальный вариант ФЭП-ДЭС-АБ)						ФЭП	ВЭУ	ДЭС	Нагр.	14,56
10	30	96	2x12	4,64	3,5	22,64	7,34	9,82	39,8	

Результаты оптимизации АСЭС «Усть-Миль» (Якутия)

<i>ВЭУ</i>	<i>ФЭП</i>	<i>АБ</i>	<i>ДЭС</i>	<i>Кап.влож. млн.руб.</i>	<i>Годовой расход топлива, т.</i>	<i>Годовая выработка по элементам тыс. кВт*ч</i>			<i>Стоимость кВт*ч, руб.</i>
Вариант 1 (Вариант электроснабжения от ДЭС)						ДЭС	Нагр. (144 max, 23 min)		22,34
0	0	0	2x200	3,72	224,5	641,5	641,5		
Вариант 2 (Оптимальный вариант ФЭП-ДЭС-АБ)						ФЭП	ДЭС	Нагр.	16,63
0	250	600	2x200	30,42	112,9	319	322,5	641,5	

Результаты оптимизации АСЭС «Найба» (Якутия)

<i>ВЭУ</i>	<i>ФЭП</i>	<i>АБ</i>	<i>ДЭС</i>	<i>Кап.влож. млн.руб.</i>	<i>Годовой расход топлива, т.</i>	<i>Годовая выработка по элементам тыс. кВт*ч</i>			<i>Стоимость кВт*ч, руб.</i>
Вариант 1 (Вариант электроснабжения от ДЭС)						ДЭС	Нагр. (525 max, 220 min)		25,96
0	0	0	2x400	6,8	384,2	1097,8	1097,8		
Вариант 2 (Оптимальный вариант ВЭУ-ДЭС-АБ)						ВЭУ	ДЭС	Нагр.	16,84
500	0	3120	2x400	77,84	189,9	555,4	542,4	1097,8	

Заключение

В ИСЭМ СО РАН разработан универсальный комплекс, моделирующий работу АСЭС и позволяющий:

- Решать задачи комплексной оптимизации установленных мощностей основного генерирующего оборудования
- Учитывать параметры окружающей среды за длительный период наблюдений
- Учитывать схему электрических соединений АСЭС
- Определение оптимального единичного типоразмера оборудования
- Учет вопросов надежности при решении задачи комплексной оптимизации



Спасибо за внимание