



ЕВРОСИБЭНЕРГО

EN+

DEVELOPMENT

**Расчет оптимального объема
мощности в ценовой заявке на
КОМ методом Монте-Карло**

Вадим Борохов
Директор по развитию рынка электроэнергии
ООО «Эн+девелопмент»

Виталина Викулина
Советник информационно-аналитического отдела,
ООО «Эн+девелопмент»

- Пусть x_m - объем в заявке на КОМ в отношении данного ген объекта; при этом объем в заявке на декабре является ограничителем для объема в заявках на другие месяцы (исключая ГЭС)

- Прибыль в рынке мощности в месяц m зависит от ряда факторов:
 - Коэффициенты сезонности
 - Индексация цены КОМ
 - Цена КОМ по итогам отбора
 - % РД
 - Тариф на мощность (РД)
 - Фактический объем поставки мощности
 - Затраты на выполнение требований по готовности
 - Затраты на покупку мощности при превышении пикового потребления в ГТП потребления поставщика над нормативом

- **Как определить оптимальный набор x_m по каждому генерирующему объекту поставщика?**

Задача максимума прибыли

- ❑ Суммарная за год прибыль поставщика описывается функцией вида $\pi(x, \xi)$, где ξ – набор (не зависящих от x) случайных независимых величин, которые описывают случайные факторы вне контроля поставщика
- ❑ Если известно вероятностное распределение ξ , то ожидаемое значение прибыли зависит только от x и имеет вид

$$\langle \pi \rangle (x) = \langle \pi(x, \xi) \rangle$$

- ❑ Оптимальные объемы x в заявках на КОМ определяются из условия

$$\mathbf{\max} \langle \pi \rangle (x) \quad (*)$$

- ❑ Если распределение вероятности ξ задано в виде функции, то к (*) применяются стандартные методы нахождения максимума аналитически заданной функции
- ❑ На практике часто задан ряд исторических значений ξ вместо функции распределения случайных величин ξ
- ❑ Возможные подходы к решению (*):
 - используя исторические значения ξ , подобрать аналитическую функцию распределения ξ и решить задачу (*) аналитически
 - применить метод Монте-Карло, который позволяет сгенерировать независимые случайные величины ξ из заданного вероятностного распределения и получить вероятностные распределения функций от ξ

- ❑ Пусть для нахождения оптимальных объемов в заявке на КОМ необходимо построить функцию распределения некоторой функции от случайных переменных $f(\xi)$ (пример: f – функция прибыли поставщика при фиксированном объеме на КОМ)
- ❑ Нахождение оптимальных объемов в заявках на КОМ методом Монте-Карло:
 - на основе исторических данных определяется вероятностное распределение случайных величин ξ
 - генерируется множество значений случайных величин ξ с заданным вероятностным распределением, для каждого сгенерированного значения ξ определяется значение $f(\xi)$
 - формируется частотное распределение значений $f(\xi)$ (кол-во значений $f(\xi)$, попавших в заданный интервал)
 - используя частотное распределение полученных значений, определяется функция распределения $f(\xi)$
 - определяются объемы x , на котором ожидаемая прибыль достигает максимума

- **Дополнительные предположения для упрощения расчетов по ГЭС:**
 - пик потребления по ГТП собственных нужд не выше норматива
 - весь объем мощности сверх РД продается по ценам КОМ
 - факт поставки мощности не ниже объема поставки по РД (и выше нуля)
 - в отношении ЕГО подается одна заявка на КОМ
 - ГТП генерации включает только одну ЕГО
 - затраты на поддержание готовности не зависят от отобранного на КОМ объема
 - УМ=ПО, поставщику заранее известны значения УМ и ПО
 - регулировочная мощность ГЭС в каждый день суток не выше УМ
 - отсутствуют сетевые ограничения на выдачу мощности и ограничения по возможности набора и поддержания максимальной нагрузки
 - недопоставка мощности обусловлена исключительно
 - объемом прогнозных ограничений по напору, учтенных в заявке на КОМ: $\Delta_{1,m}^0$
 - объемом факт. ограничений по напору сверх учтенных в заявке на КОМ: $\Delta_{2,m}^0$
- В указанных предположениях (т.к. объем поставки мощности по РД не зависит от отобранного на КОМ объема и для декабря применяется особый порядок формирования объема в заявке ГЭС) задача максимизации ожидаемой суммарной прибыли ГЭС разделяется на отдельные задачи максимизации ожидаемой месячной выручки, которые в свою очередь сводятся к нахождению **максимума ожидаемого фактического объема поставки мощности в данный месяц**

- ❑ Расчет регулировочной мощности по итогам месяца (PM_m):
 - ежесуточно определяется значение напора (в метрах)
 - по технико-экономическим показателям ГЭС напор пересчитывается в посуточное значение регулировочной мощности
 - определяется регулировочная мощность по итогам месяца как среднее арифм посуточных значений регулировочной мощности в данном месяце

- ❑ Фактический объем поставки мощности ГЭС в месяце m (кроме декабря) зависит от объема в заявке на КОМ x_m , регулировочной мощности, СН (не зависит от x_m)

$$\Phi_m(x_m, PM_m) = \min[x_m; PM_m - \underbrace{5\%(x_m - PM_m)^+}_{\text{«штраф» за превышение заявленного на КОМ объема над } PM_m}] - \text{СН}$$

«штраф» за превышение заявленного на КОМ объема над PM_m

- ❑ Фактором неопределенности является PM_m , которая зависит от посуточных значений напора (в свою очередь зависят от множества «первичных» факторов: расхода воды, приточности, пр.)
- ❑ Кандидаты на роль случайной переменной:
 - посуточный напор (~1000 исторических значений)
 - изменение посуточного напора от суток к суткам (~1000 исторических значений)
 - посуточная регулировочная мощность (~1000 исторических значений)
 - изменение посуточной регулировочной мощности от суток к суткам (~1000 исторических значений)
 - регулировочная мощность по итогам месяца (33 исторических значений)

Оптимизация ожидаемого факт. объема поставки мощности ГЭС

- Задача нахождения максимума ожидаемого фактического объема поставки мощности в месяц m (искл. декабрь)

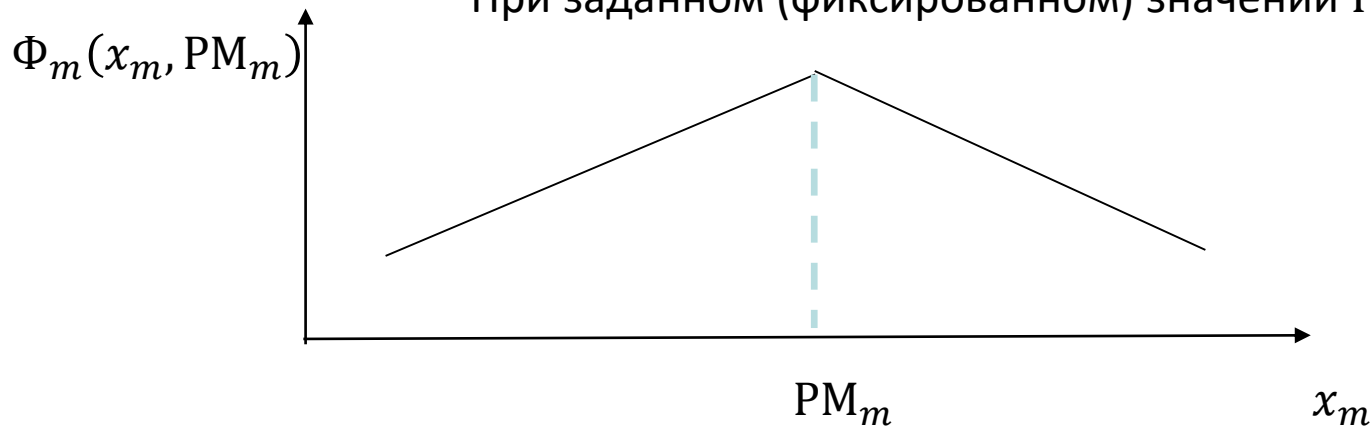
$$\max \langle \Phi_m \rangle (x_m)$$

x в диапазоне от объема мощности при минимальных напорах (PM_m^{min}) до УМ

где $\langle \Phi_m \rangle (x_m) = \langle \Phi_m (x_m, PM_m) \rangle$.

$$\Phi_m(x_m, PM_m) = \min[x_m; PM_m - 5\%(x_m - PM_m)^+] - CH$$

При заданном (фиксированном) значении PM_m



- Если бы значение PM_m было бы известно на момент подачи заявки на КОМ, то оптимальная стратегия: $x_m = PM_m$

□ Пусть $\rho(PM_m)$ – функция распределения значений PM_m , тогда

$$\langle \Phi_m \rangle (x_m) = \int_{PM_m^{min}}^{PM_m^{max}} dPM_m \rho(PM_m) \Phi_m(x_m, PM_m)$$

□ Условие максимума в виде $\partial \langle \Phi_m \rangle (x_m) / \partial x_m = 0$:

$$\int_{PM_m^{min}}^{x_m} dPM_m \rho(PM_m) = \frac{1}{1 + 5\%} \approx 0,9524$$

Вывод: x_m – 95,24% процентиль вероятностного распределения месячной регулировочной мощности PM_m (95,24% значений PM_m не выше x_m)

□ Недостаток исторических данных PM_m :

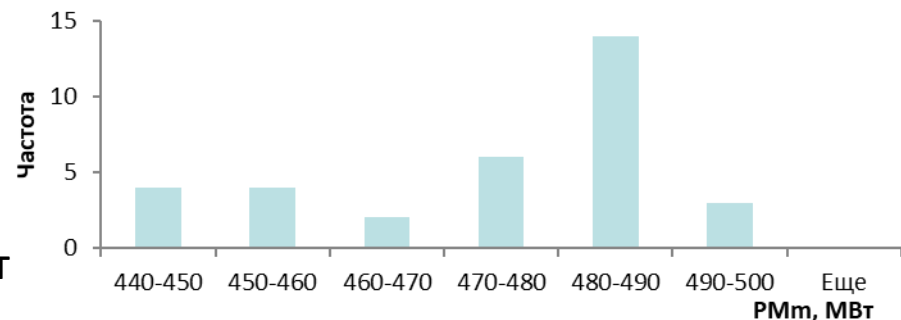
33 значения, вес каждого значения $\sim 3\%$.

Для января, 1991-2023:

- процентиль 93,9% = 491,0 МВт
- процентиль 97,0% = 491,1 МВт

Расчетный процентиль 95,24% = 491,0 МВт

Частотное распределение PM_m для января
за 1991-2023



Вывод: необходимо смоделировать значения PM_m исходя из значений суточной регулировочной мощности (~ 1000 значений)

Моделирование вероятностного распределения PM_m

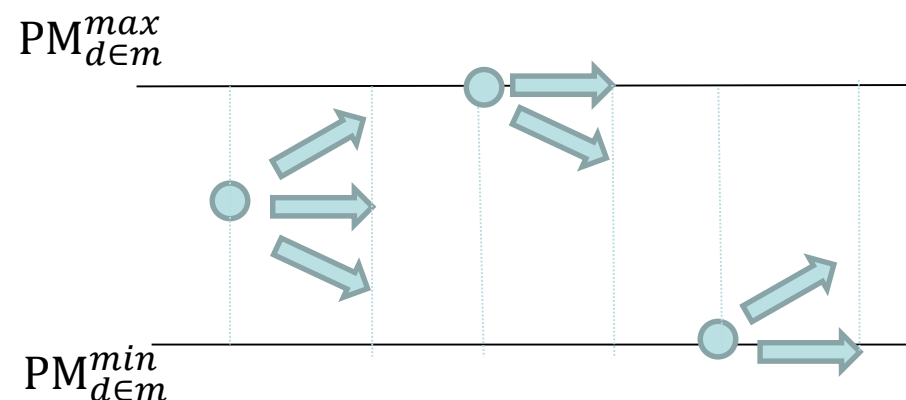
- ❑ Временной ряд какого параметра идентифицировать в качестве значений независимой случайной величины?
- ❑ Необходимое условие независимости: отсутствие корреляции значений
- ❑ Посуточные значения располагаемой мощности в соседние сутки имеют высокую корреляцию (т.к. напор имеет близкие значения).

Корреляция последовательных значений посуточной регулировочной мощности в январе 1991-2023 гг. близка к 1 (равна 0,97).

- ❑ Изменения посуточного значения располагаемой мощности при переходе на следующие сутки имеют низкую корреляцию

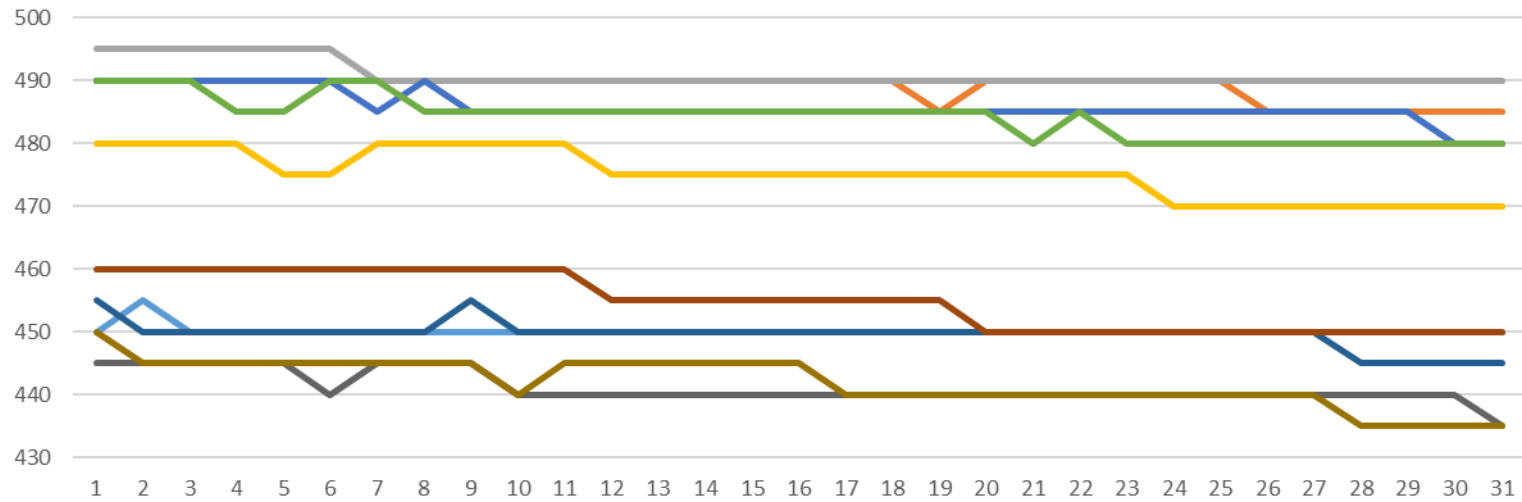
Корреляция изменений последовательных значений посуточной регулировочной мощности в январе 1991-2023 гг. близка к 0 (равна -0,02).

Вероятности изменений посуточной PM, МВт			
PM	-5	0	5
435	0,0%	80,0%	20,0%
440	8,2%	89,6%	2,2%
445			
450			
455			
460			
465			
470	3,6%	95,2%	1,2%
475			
480			
485	7,4%	91,2%	1,4%
490			
495			
500	50,0%	50,0%	0,0%

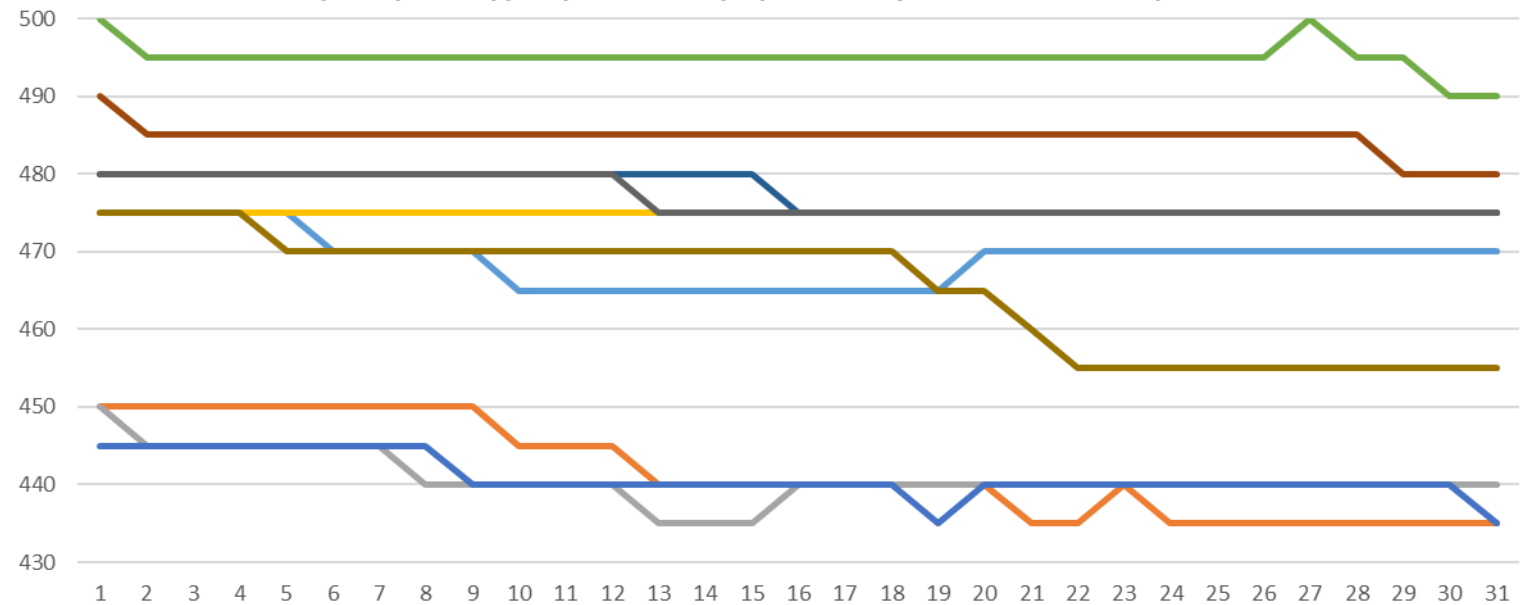


Типовые модельные графики посуточной рег. мощности

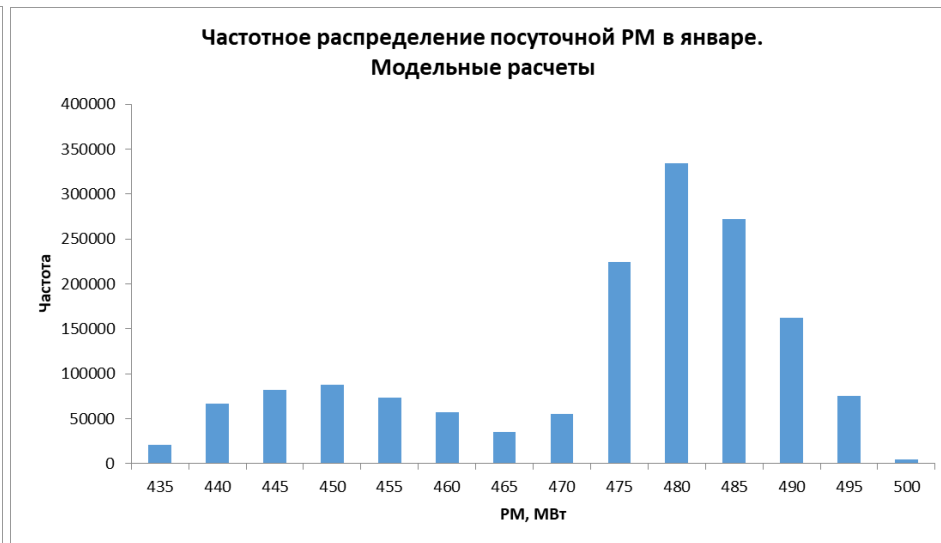
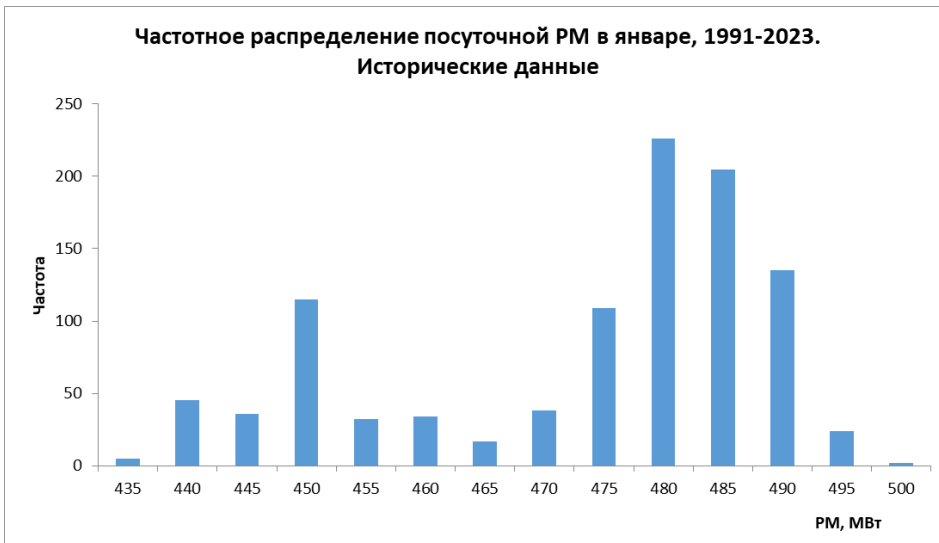
Примеры исторических графиков посуточной РМ в январе



Примеры смоделированных графиков посуточной РМ в январе



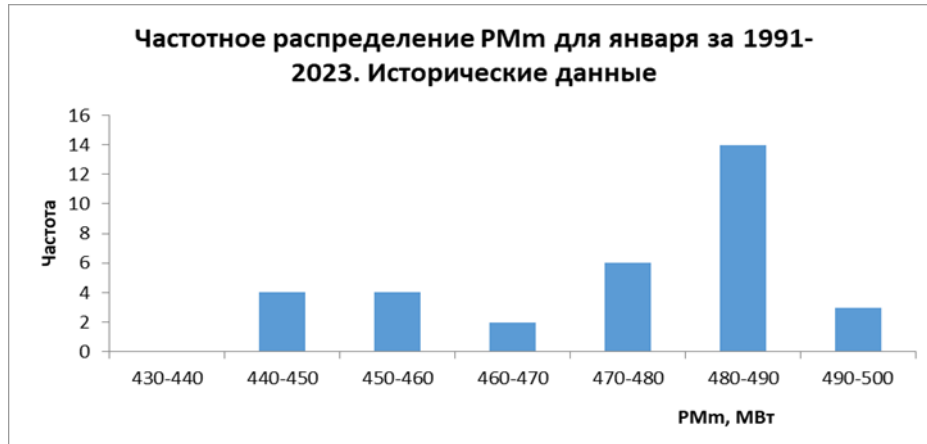
Итоги модельных расчетов - I



- ❑ В сравнение с историческими данными модельные расчеты дают
- «сглаженное» частотное распределение для низких значений посуточной РМ
 - схожее частотное распределение для высоких значений РМ

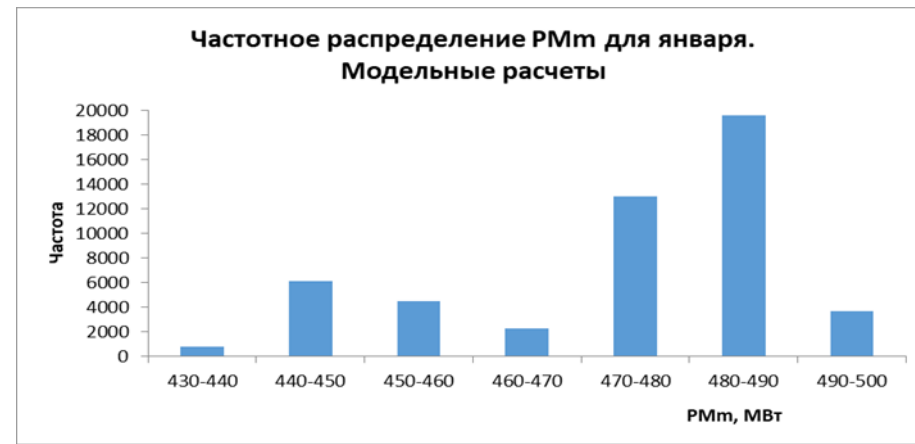
<i>Вероятность нахождения посуточной РМ в интервале</i>			
Диапазон РМ, МВт	Исторические данные	Модельные расчеты	Отличие
435-470	31,5%	30,8%	0,7%
475-485	52,8%	53,6%	-0,8%
490-500	15,7%	15,6%	0,1%

Исторические данные (33 значения)



Процентиль 95,24% = 491,0 МВт

Модельные расчеты (50 000 значений)



Процентиль 95,24% = 491,6-491,8 МВт

- ❑ Схожие исторические и модельные частотные распределения для РМм, близких к максимальным значениям
- ❑ Процентили 95,24%, определенные по историческим данным и по результатам моделирования, дают близкие значения
- ❑ Процентиль 95,24% выше среднего значения в январе за период 1991-2023 (~473 МВт): за 33 года
 - РМм только в двух годах была выше процентили 95,24%
 - «штраф» в 31-м году компенсируется дополнительной выручкой в 2х годах

- ❑ Прибыль генерирующего объекта на оптовом рынке мощности зависит, в т.ч. от набора случайных факторов (примеры: водный режим - для ГЭС, температура окружающего воздуха – для ПГУ/ГТУ, ограничения мощности Р-турбин в зависимости от отборов пара – для ТЭЦ)
- ❑ При известном вероятностном распределении случайных факторов, влияющих на прибыль ген объекта, и зависимости прибыли от значений этих факторов, метод Монте-Карло позволяет произвести расчет оптимального объема в заявке на КОМ (объема, на котором достигается максимум ожидаемой прибыли)
- ❑ Приведен модельный пример учета напора в качестве случайного фактора при определении оптимальной стратегии ГЭС на КОМ в отношении января
- ❑ Основные этапы расчета:
 - определение набора случайных независимых факторов
 - определение зависимости прибыли от этих факторов и отбираемого объема мощности на КОМ
 - определение вероятностного распределения независимых факторов
 - расчет вероятностного распределения значений соотв. функции(-ий) независимых факторов
 - определение оптимального объема в заявке на КОМ как решения задачи максимизации ожидаемой прибыли