

**XXIV ежегодный семинар «Нелинейные явления
в сложных системах»
Минск, Сосны, 25-27 октября 2016 г.**

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ АЭС В ЭНЕРГОСИСТЕМУ БЕЛАРУСИ

Б.И. Попов

*Государственное научное учреждение «Объединенный институт
энергетических и ядерных исследований –Сосны»
Национальной академии наук Беларуси*



Содержание

- Проблема баланса мощностей
- Проблема устойчивости энергосистемы в аварийных ситуациях
- Анализ и прогноз некоторых характеристик электропотребления для использования в оптимизационных расчетах



Актуальность

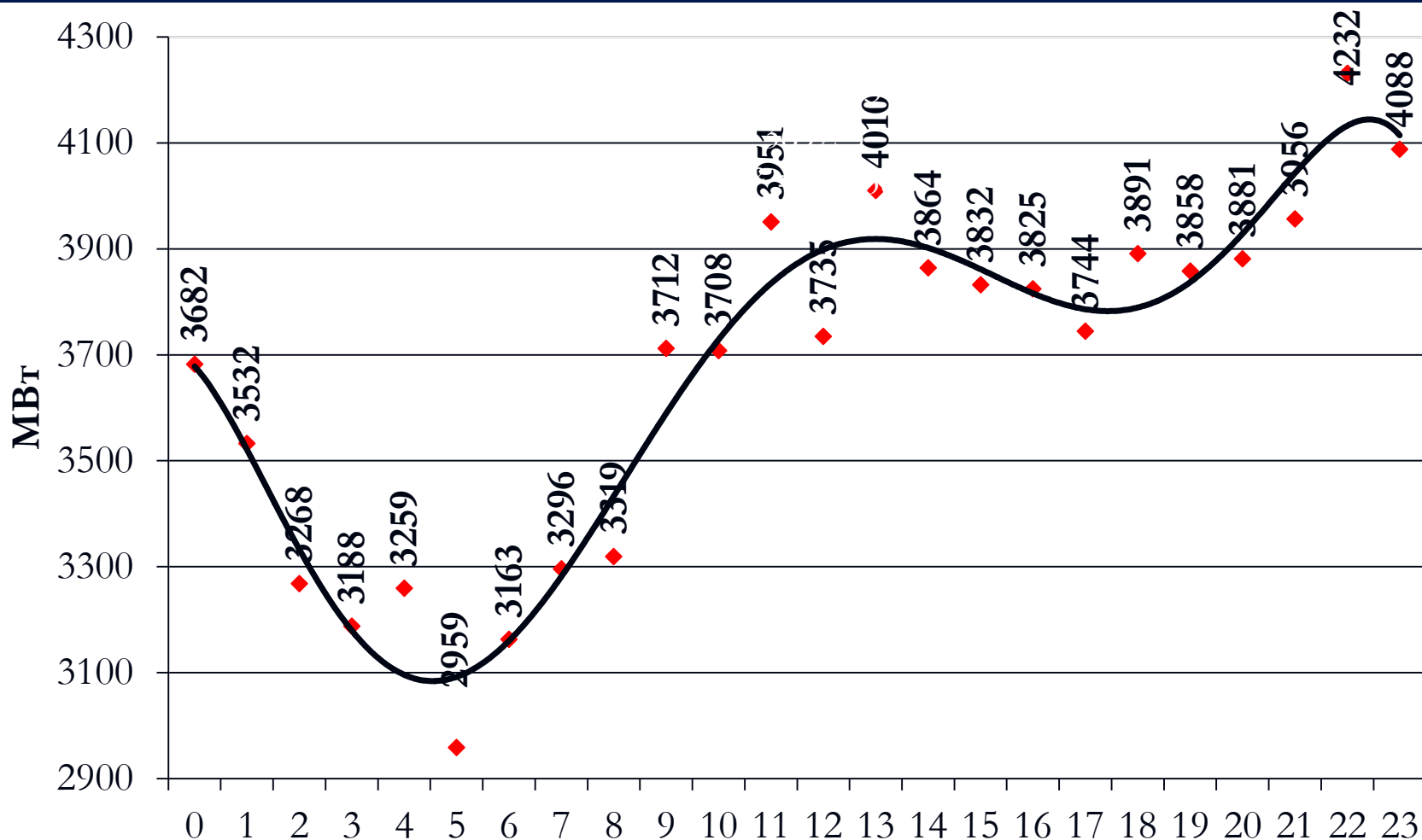
3

- Установленная электрическая мощность одного блока Белорусской АЭС - 1170 МВт.
- Проектное значение коэффициента использования установленной мощности - 0,9.
- Выработка электроэнергии АЭС - 18,44 млрд. кВт·час в год (46% от прогнозируемого «Концепцией энергобезопасности» полного потребления в 2020 г. 39,9 млрд. кВт·час).
- Интеграция АЭС вызывает необходимость решения, по крайней мере, двух задач:
 1. Обеспечить сбалансированную работу электрогенерирующих мощностей энергосистемы, в том числе в часы ночного провала нагрузки, когда эта проблема стоит наиболее остро.
 2. Предусмотреть меры, необходимые для обеспечения устойчивой работы энергосистемы в случае аварийной остановки блока АЭС.





День минимальной нагрузки 2020 г. 4



Почасовая нагрузка дня минимальной нагрузки 2020 г.





Пиковая нагрузка энергосистемы

Год	2020	2025	2030	2035
Потребление э/э, млрд. кВт·час	39,9	41,6	42,1	43,8
Пиковая нагрузка*, МВт	6507/ 6698	6784/ 6984	6866/ 7068	7143/ 7353

*В числителе – при коэффициенте заполнения графика нагрузки энергосистемы 0,68, в знаменателе – при 0,7

Установленная мощность





Необходимая мощность

- Пиковая нагрузка + «горячий» резерв в размере максимальной единичной мощности + такая же величина «холодного» резерва

- 2020 – 2025 гг.:

$$7000 \text{ МВт} + 1200 \text{ МВт} + 1200 \text{ МВт} = 9400 \text{ МВт}$$



Баланс мощностей и аварийное частотное регулирование

- В установившемся режиме работы энергосистемы соблюдается баланс мощностей - суммарная мощность генерации равна нагрузке энергосистемы:
$$P_G = P_H.$$
- В нормальном режиме этот баланс сохраняется при номинальной частоте 50 Гц.
- Нагрузка системы — величина переменная из-за изменения мощности отдельных потребителей.
- Превышение нагрузки над мощностью приводит к понижению частоты; нагрузка, меньшая мощности, приводит к повышению частоты.
- Аварийная частотная разгрузка - вынужденное отключение ряда потребителей с целью поддержания частоты энергосистемы, близкой к номинальной.

Аварийное снижение частоты

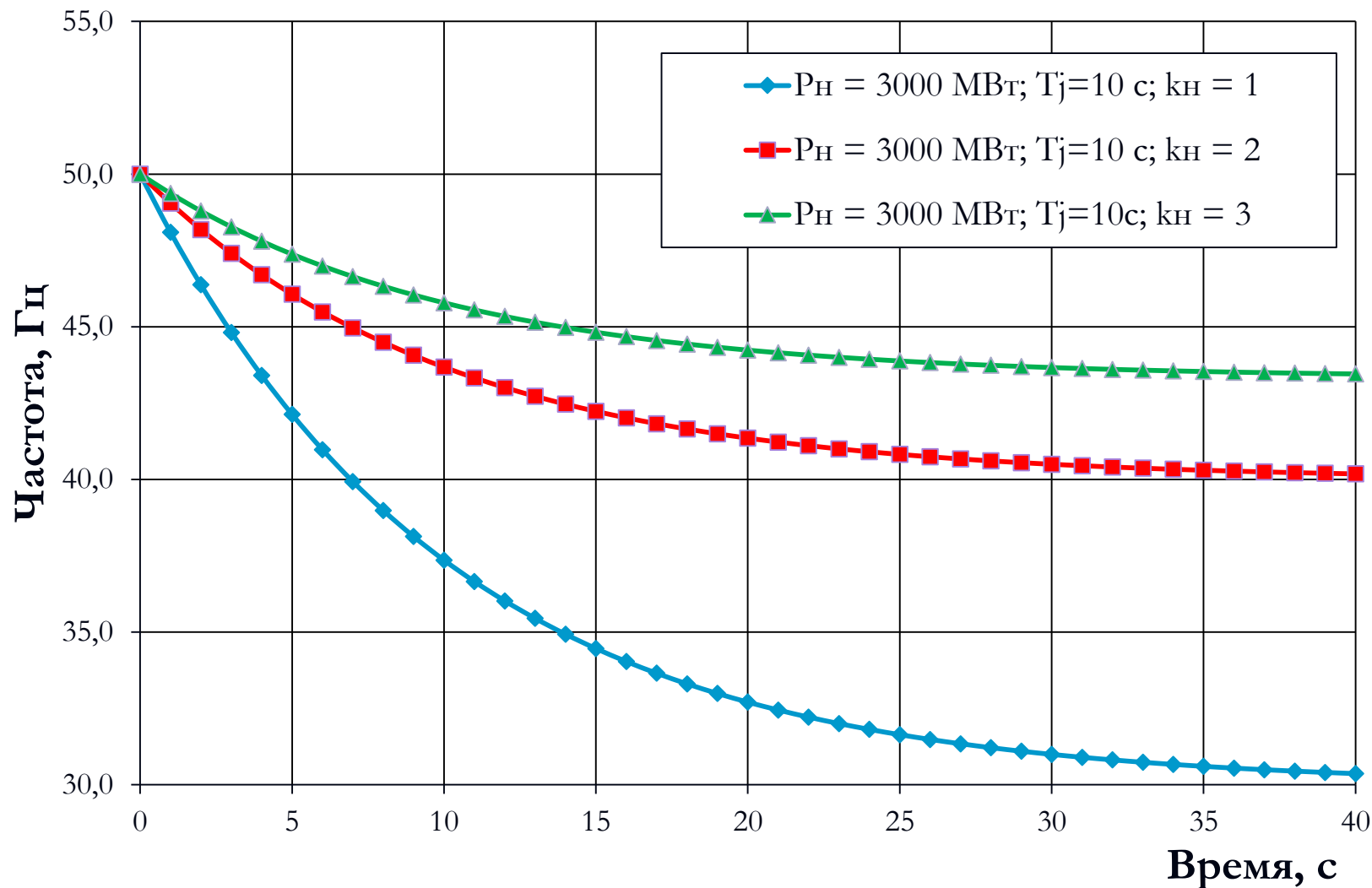
$$\frac{\Delta f}{f_i} = \frac{\Delta P}{k_i} (1 - e^{-\frac{t}{T_j}})$$

- Постоянная времени T_j - обусловлена инерционностью вращающихся масс энергосистемы. T_j находится в пределах **5 -10 с.**
- k_n – регулирующий эффект нагрузки (зависит от состава потребителей) в пределах **1 - 3.**
- $\Delta P = (P - P_n) / P_n$; P – мощность системы; P_n – нагрузка.

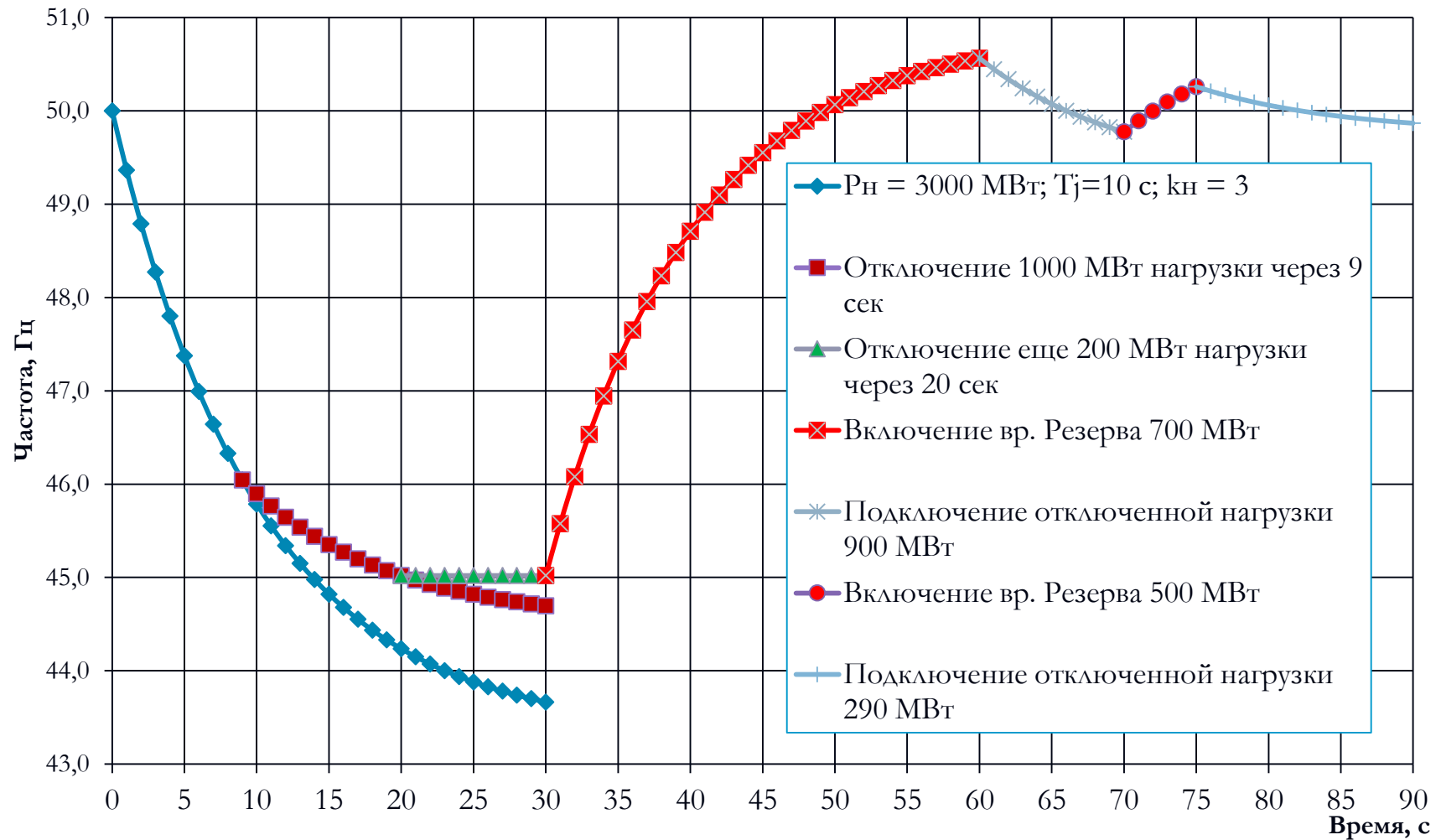
Примем:

- $P_n = 3000 \text{ МВт}$
- $P = 1800 \text{ МВт}$ при отключении блока АЭС.

Поведение частоты при отключении блока АЭС



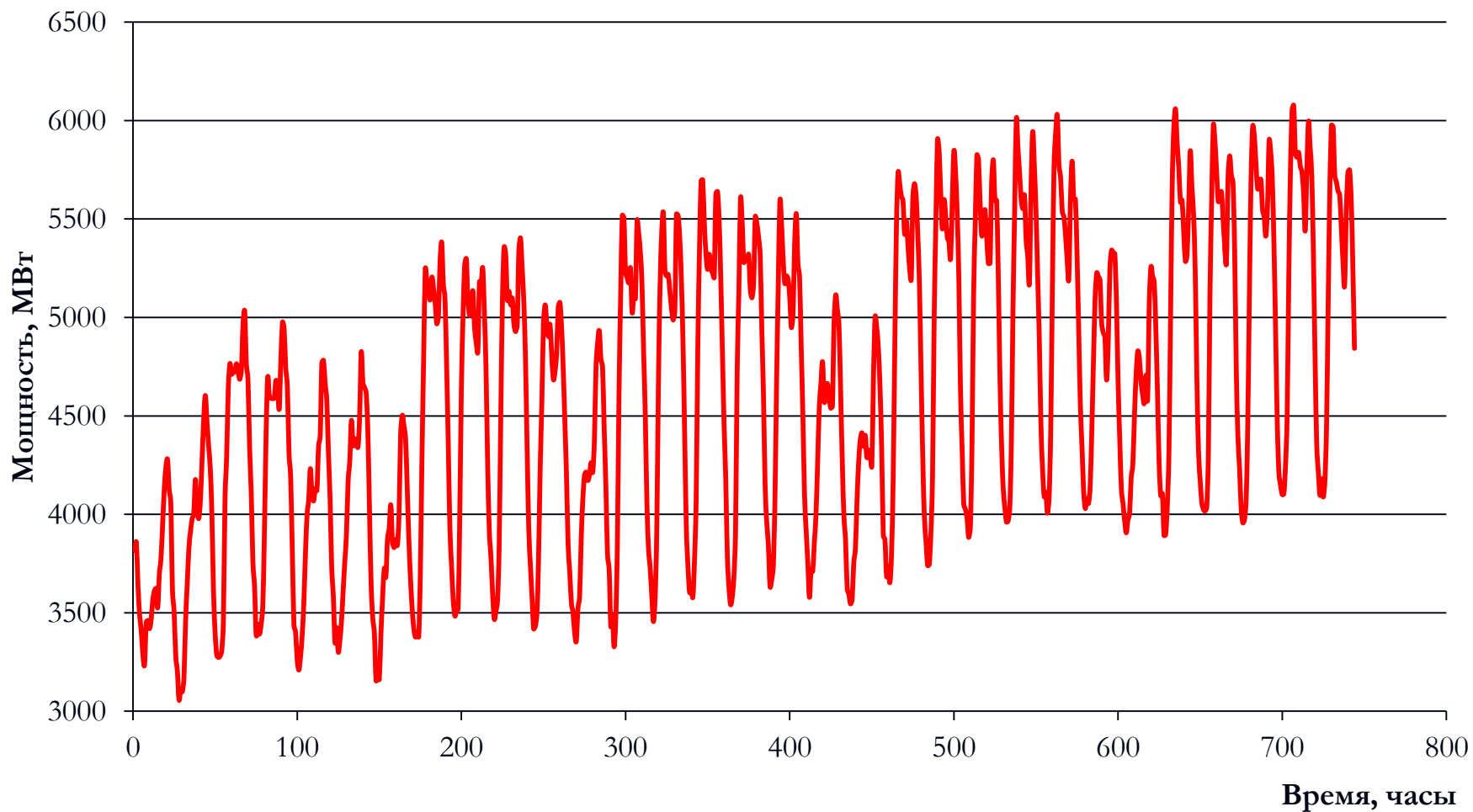
Вращающийся резерв



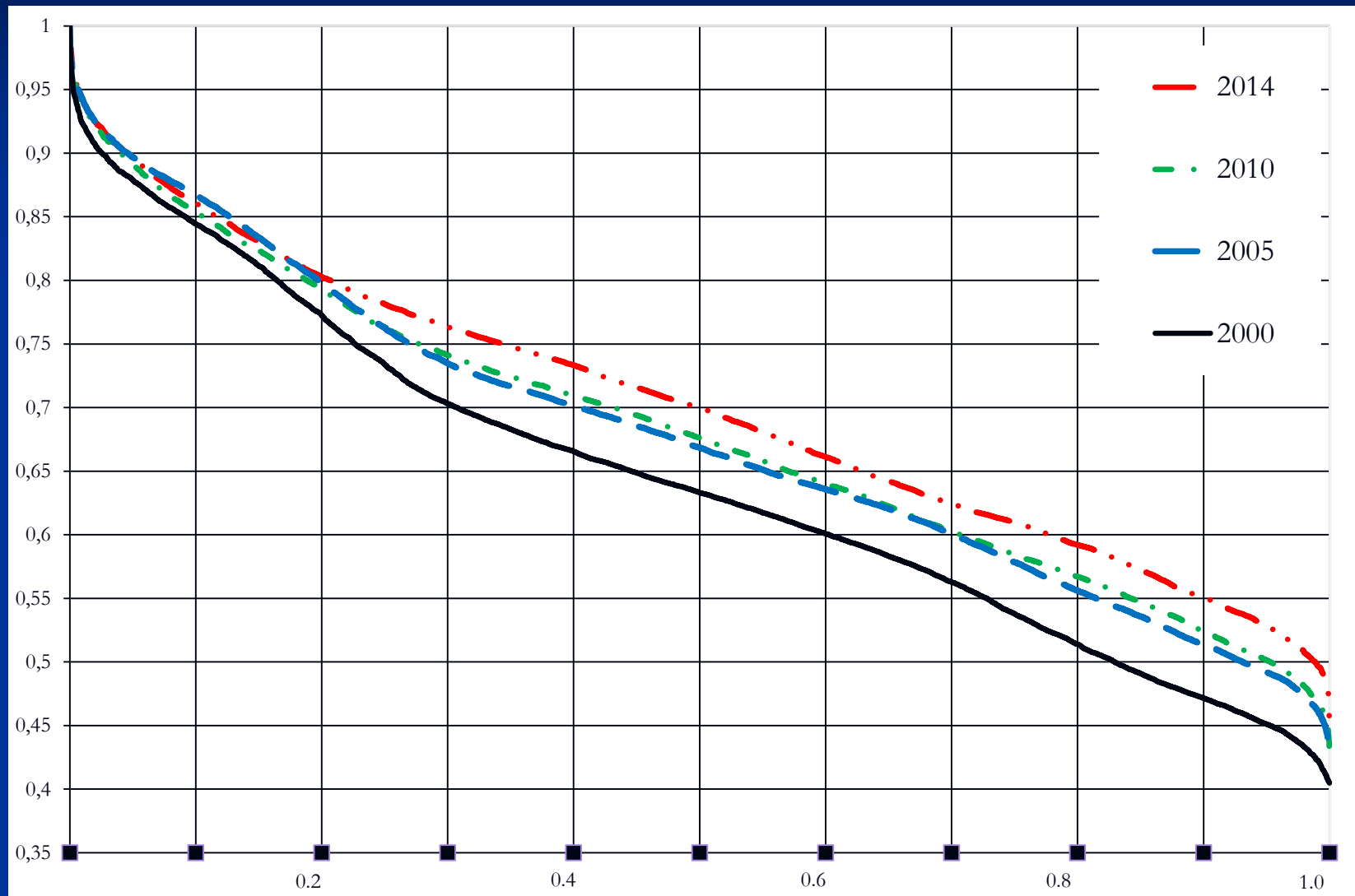
Выводы

1. Решать проблему преодоления ночных провалов нагрузки необходимо при условии обеспечения проектного режима работы АЭС.
2. В случае изолированной энергосистемы Беларуси аварийное отключение блока АЭС может привести к аварийной ситуации, характеризуемой малыми временами для принятия мер по предотвращению развала электрогенерирующей системы .

Электрическая нагрузка



Кривая продолжительности электрической нагрузки





Восстановление кривой

$$y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5,$$

$$y_i(t_i) = b_0 + b_1t_i + b_2t_i^2 + b_3t_i^3 + b_4t_i^4 + b_5t_i^5$$

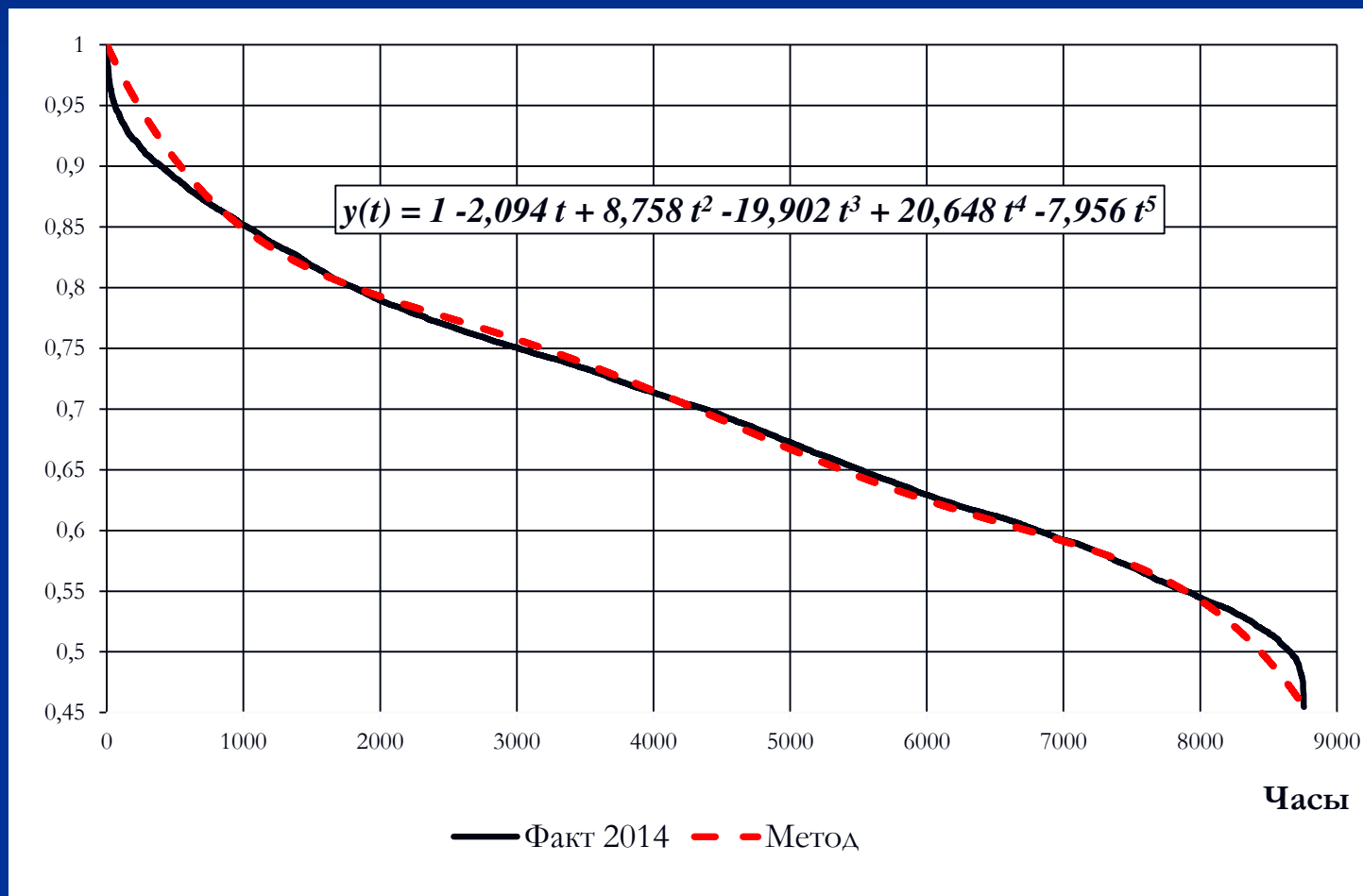
$$i = 1-6$$

При составлении систем (2) целесообразно принять во внимание следующие обстоятельства:

- - для 1-го, рассмотреть момент времени $t = 0$; для этого момента $y_0(t) = 1$, что сразу определяет $b_0 = 1$;
- - для уравнения j , рассмотреть момент времени $t = 1$;
- - вместо j ' уравнения использовать выражение для средней по интервалу нагрузки, которая в случае единичного интервала представляет собой просто интеграл полинома в интервале от 0 до 1. По смыслу эта величина представляет собой коэффициент заполнения графика нагрузки и является одной из важнейших его характеристик.

Реперные точки для 2014 г.

	t=0,1	t=0,2	t=0,9	t=1,0	Коэфф-т заполнения
Значение	0,860	0,803	0,551	0,455	0,701





Прогнозирование характеристик кривых

17

Для построения прогнозов *коэффициентов заполнения и неравномерности* предположим следующее:

- тренд изменения коэффициентов можно построить по их фактическим значениям методом наименьших квадратов и продолжить на необходимый временной период;
- значения коэффициентов являются случайной величиной, распределенной по нормальному закону относительно построенного тренда; основанием для такого предположения является подверженность работы электроэнергетической системы влиянию многочисленных факторов;
- в соответствии с характером нормального распределения диапазон изменения коэффициентов, в который с большой вероятностью (0,997) укладываются их значения, определим как $K_{\text{тр}} \pm \delta_{\text{тр}}$,

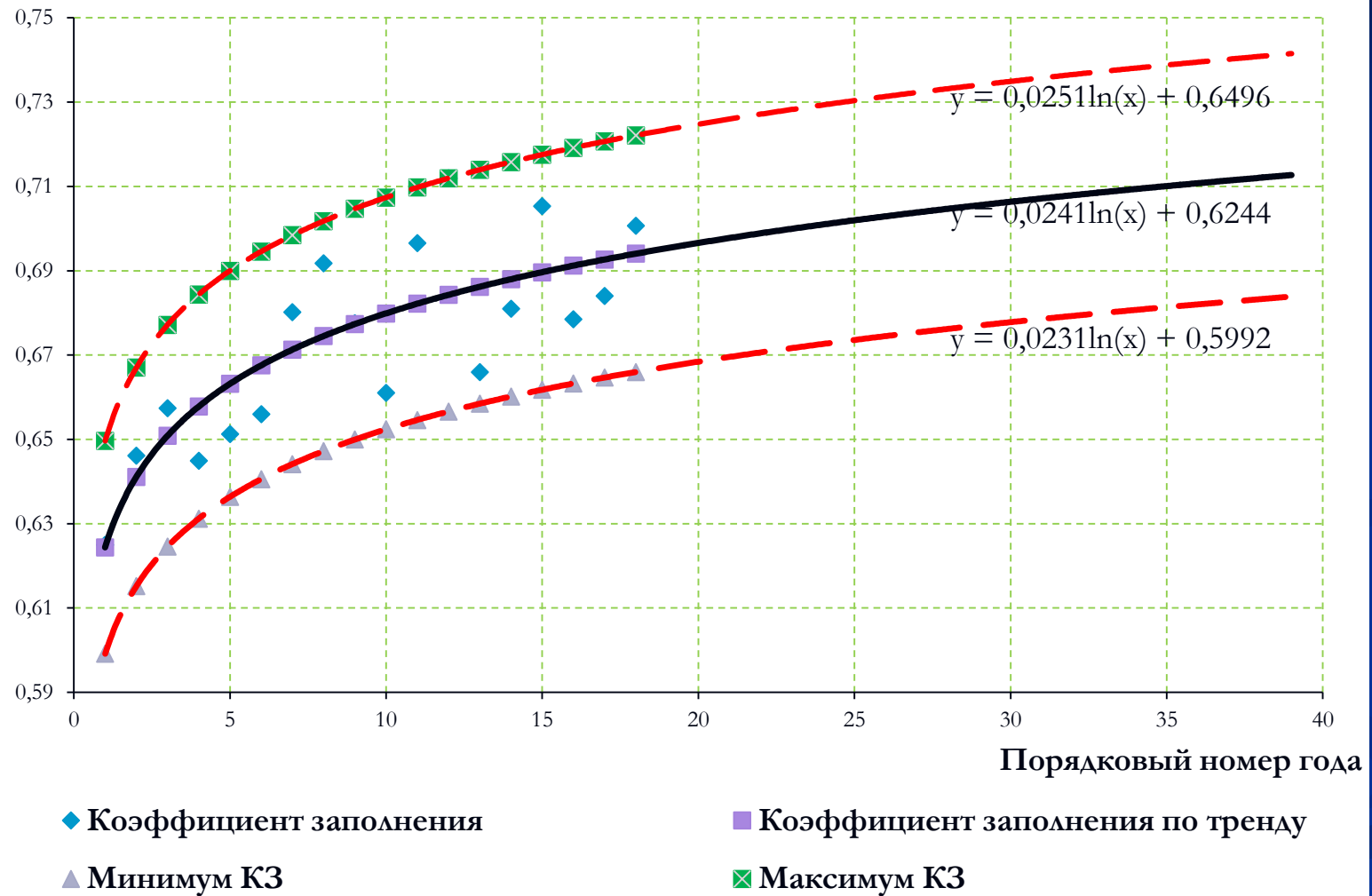
где $K_{\text{тр}}$ - значение коэффициента, полученное по его тренду, а $\delta_{\text{тр}}$ - максимальное относительное отклонения фактического значения от величины, полученной по тренду, определенное из фактических данных.

- Тогда значения коэффициента в году i прогнозируемого периода попадут в диапазон:

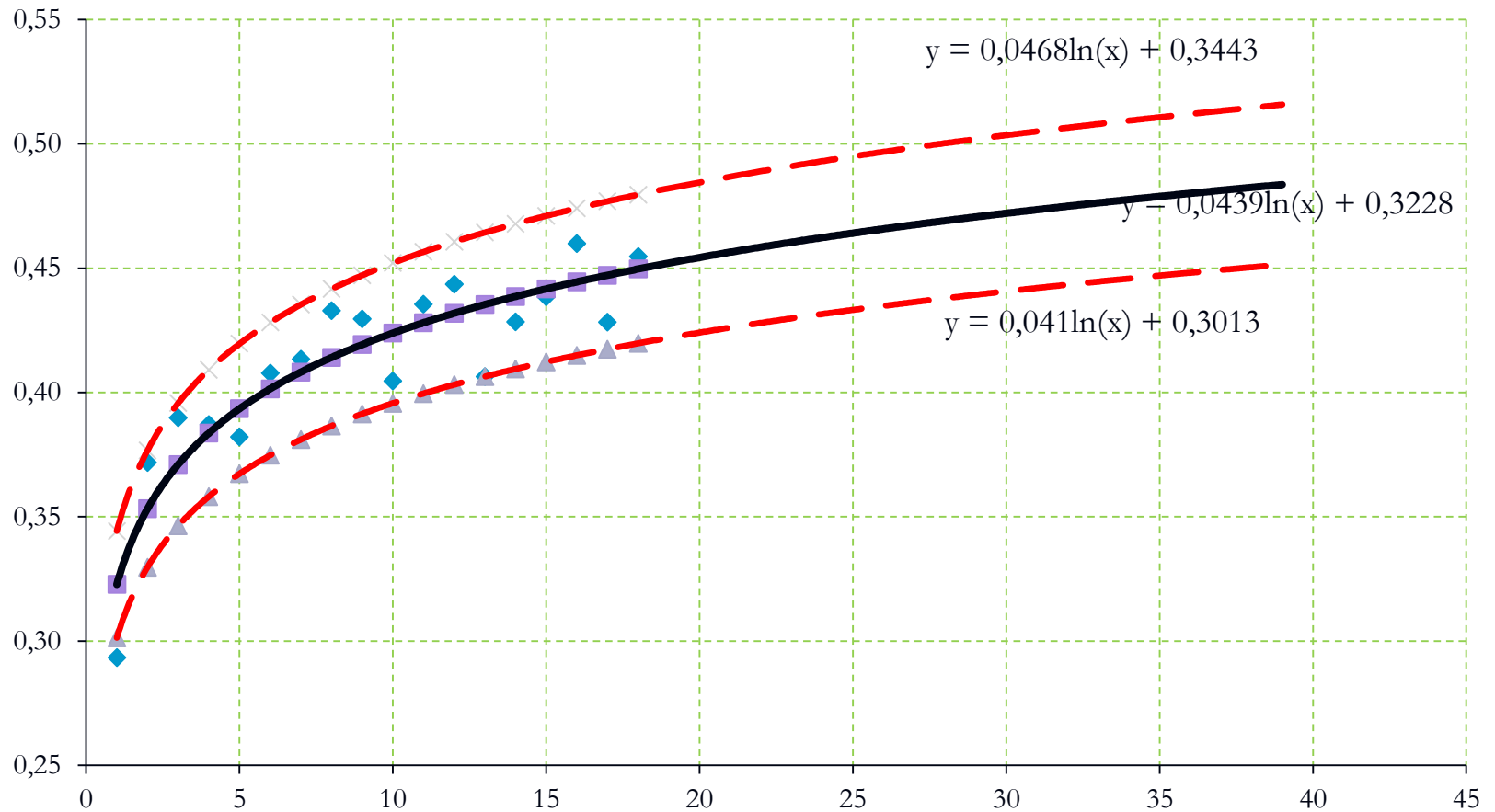
$$K_i = K_{\text{тр}} i \pm \delta_{\text{тр}} \cdot K_{\text{тр}} i.$$



Коэффициент заполнения



Коэффициент неравномерности



◆ Коэффициент неравномерности

■ Коэффициент неравномерности по тренду

▲ КН минимум

× КН максимум

Сценарии коэффициентов и трендов

Год	Сценарий «минимум»		Сценарий «максимум»	
	Коэффициент заполнения максимум	Коэффициент неравномерности максимум	Коэффициент заполнения минимум	Коэффициент неравномерности минимум
2020	0,729	0,493	0,673	0,432
2025	0,734	0,502	0,677	0,439
2030	0,738	0,509	0,681	0,446
2035	0,742	0,516	0,684	0,452

Реперная точка (в относительных единицах)	Сценарий коэффициентов	Вид функции тренда (x – порядковый номер года, для 1997 г. x=1)
0,1	Минимум	$0.0105 * \ln(x) + 0.8633$
0,1	Максимум	$0.0099 * \ln(x) + 0.8113$
0,2	Минимум	$0.0172 * \ln(x) + 0.7895$
0,2	Максимум	$0.0158 * \ln(x) + 0.7295$
0,9	Минимум	$0.0378 * \ln(x) + 0.4630$
0,9	Максимум	$0.0334 * \ln(x) + 0.4096$



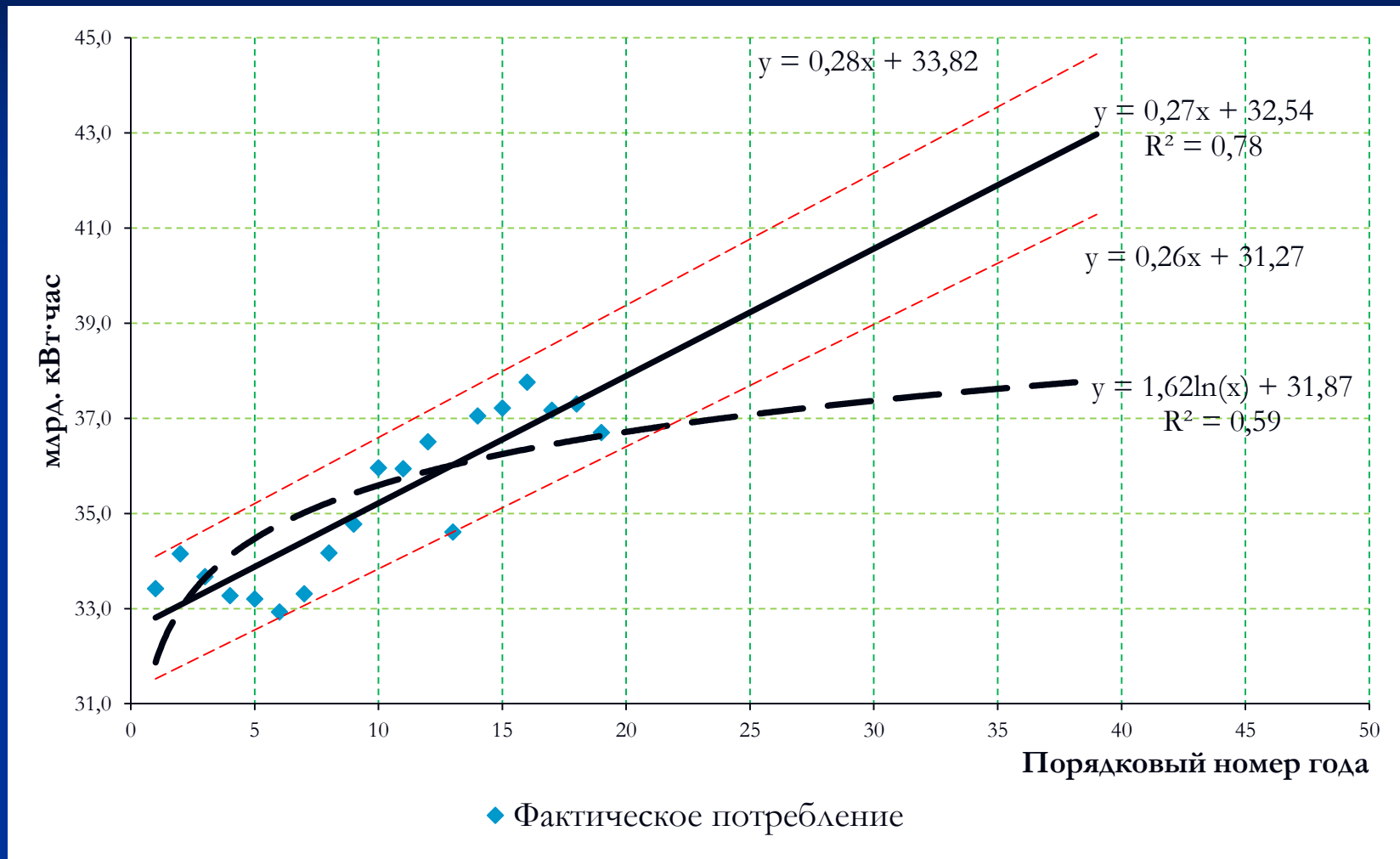
Коэффициенты полиномов кривых

Год	Сценарий	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
2020	Минимум	1,000	-1,480	5,728	-14,014	15,612	-6,353
	Максимум	1,000	-2,364	9,916	-22,196	22,569	-8,493
2025	Минимум	1,000	-1,455	5,671	-13,933	15,542	-6,324
	Максимум	1,000	-2,339	9,849	-22,072	22,443	-8,441
2030	Минимум	1,000	-1,434	5,623	-13,864	15,484	-6,299
	Максимум	1,000	-2,319	9,792	-21,968	22,337	-8,397
2035	Минимум	1,000	-1,416	5,582	-13,805	15,433	-6,278
	Максимум	1,000	-2,301	9,744	-21,877	22,245	-8,359



Прогноз объемов потребления электроэнергии

22



Объемы электропотребления

Год	Сценарий	
	Минимум	Максимум
2020	37,43	40,49
2025	38,72	41,88
2030	40,00	43,27
2035	41,29	44,66



- В комбинации с двумя сценариями поведения коэффициентов заполнения и неравномерности будем иметь 4 следующих сценария поведения характеристик графиков нагрузки:
- сценарий «минимум-минимум» предполагает развитие объемов электропотребления на минимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с вышеописанным сценарием «минимум»;
- сценарий «минимум-максимум» предполагает развитие объемов электропотребления на минимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с вышеописанным сценарием «максимум»;
- сценарий «максимум-минимум» предполагает развитие объемов электропотребления на максимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с вышеописанным сценарием «минимум»;
- сценарий «максимум-максимум» предполагает развитие объемов электропотребления на максимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с вышеописанным сценарием «максимум».

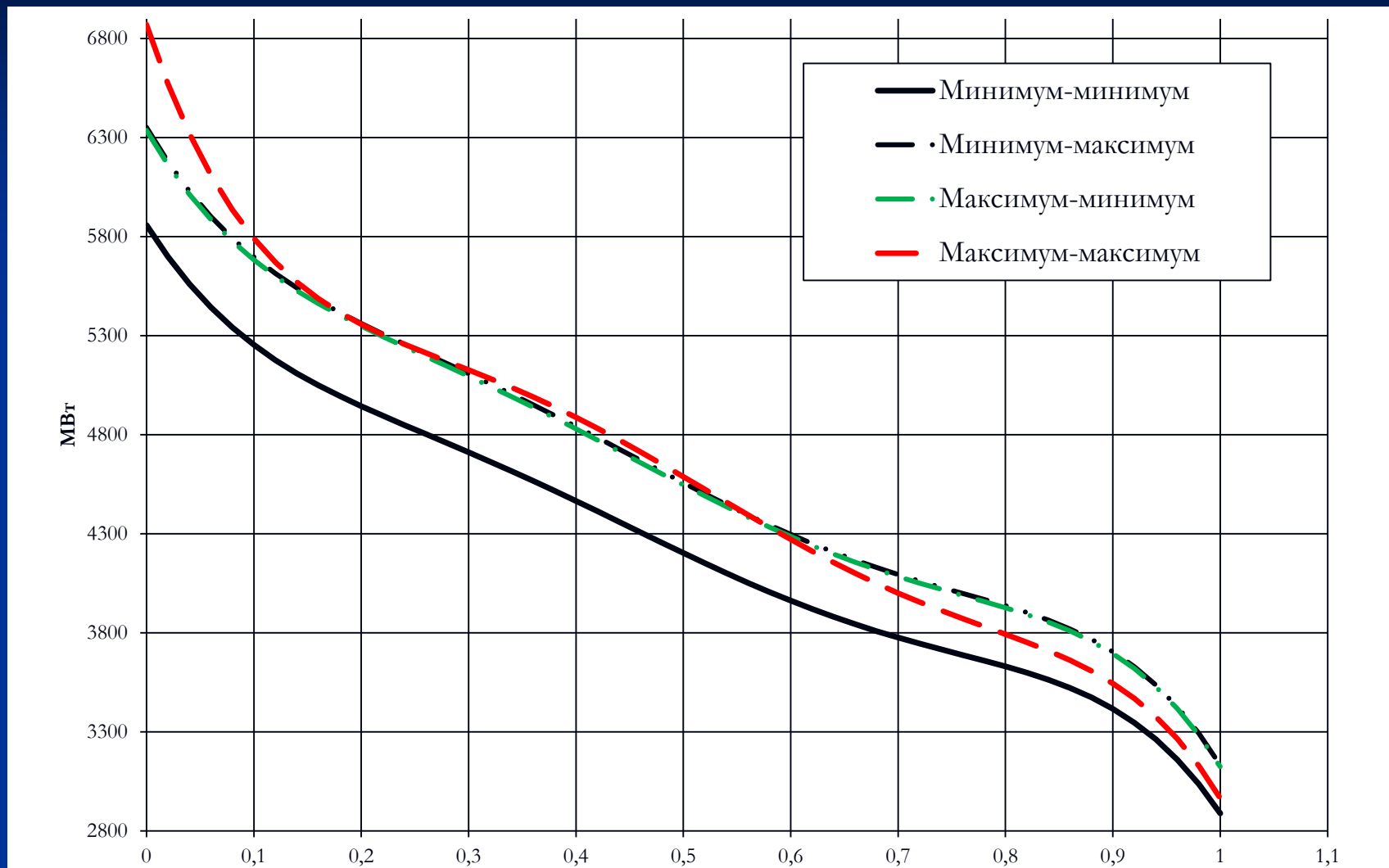
Пиковая и минимальная нагрузки

Год	Сценарий							
	«минимум - минимум»		«минимум максимум»		«максимум — минимум»		«максимум - максимум»	
	$P_{\max}$	$M_{\min}$	$P_{\max}$	$M_{\min}$	$P_{\max}$	$M_{\min}$	$P_{\max}$	$M_{\min}$
2020	5859	2889	6353	3133	6337	3125	6872	2966
2025	6021	3022	6529	3277	6512	3268	7062	3104
2030	6187	3152	6709	3418	6692	3409	7256	3236
2035	6356	3278	6892	3554	6874	3545	7455	3366



Кривые продолжительности электрической нагрузки в 2020 г.

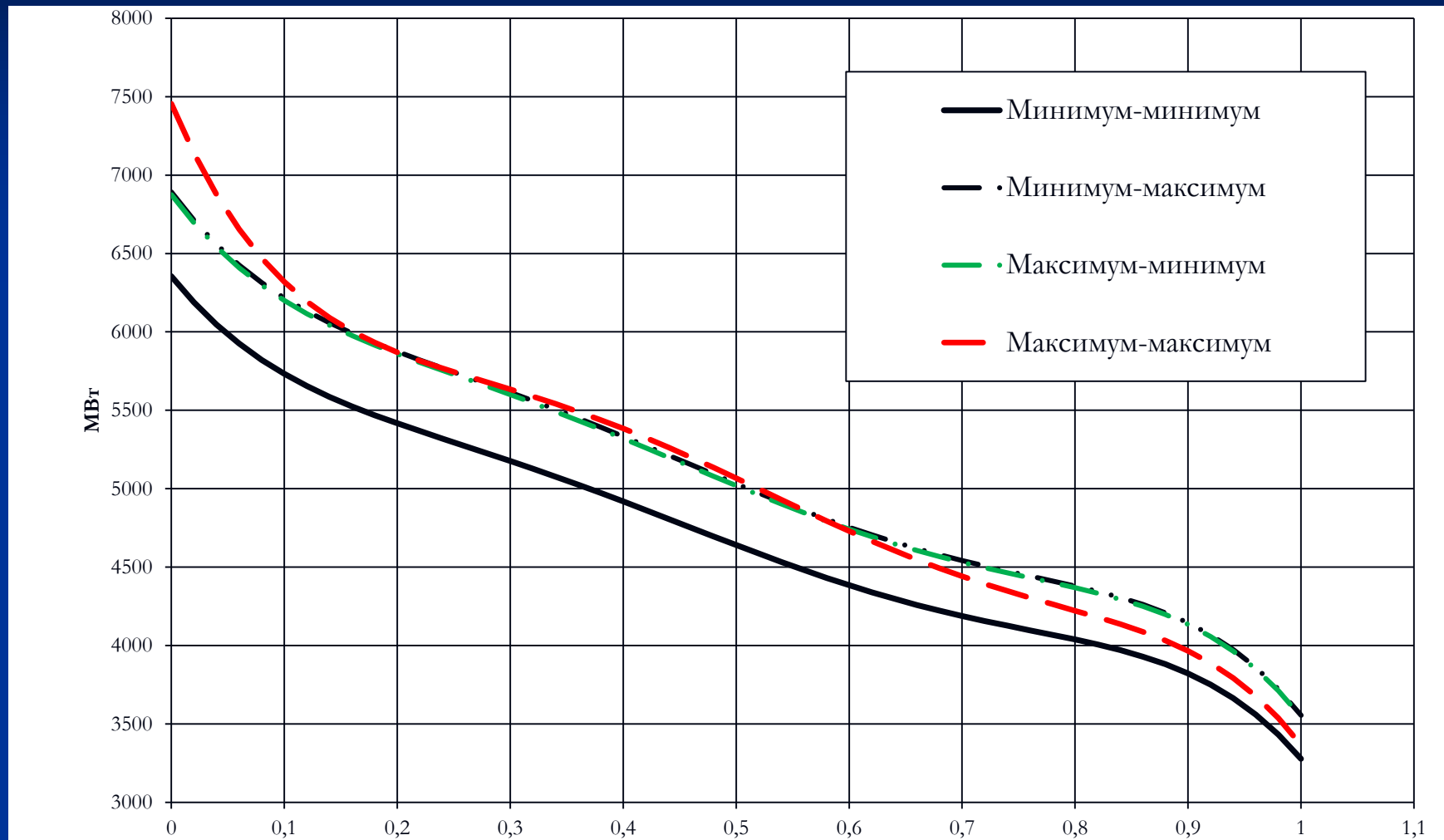
26





Кривые продолжительности электрической нагрузки в 2035 г.

27



Спасибо за внимание!

