

Научно-техническая молодёжная конференция
«Будущее – Атомная энергетика»



**Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина**



**СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
НА АЭС ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ 2 КОНТУРА
НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Выполнил: аспирант каф. АЭС ИГЭУ
Павел Алексеевич Минеев
Руководитель: проф., д.т.н.
Владимир Александрович Горбунов**



1. СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Цель создания таких систем – повышение энергетической эффективности оборудования (2 контура АЭС)

Система поддержки принятия решений – это программный комплекс, в котором:

- 1) в ходе анализа эксплуатационных характеристик есть возможность получения **оптимального режима работы** оборудования в диапазоне данных промышленного эксперимента;
- 2) основным результатом являются величины, на которые требуется изменить варьируемые параметры, и пути их достижения

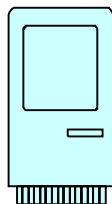


2. ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПТУ НА АЭС



Коэффициент использования установленной мощности

Внешние
ограничивающие
факторы



Энергосистема

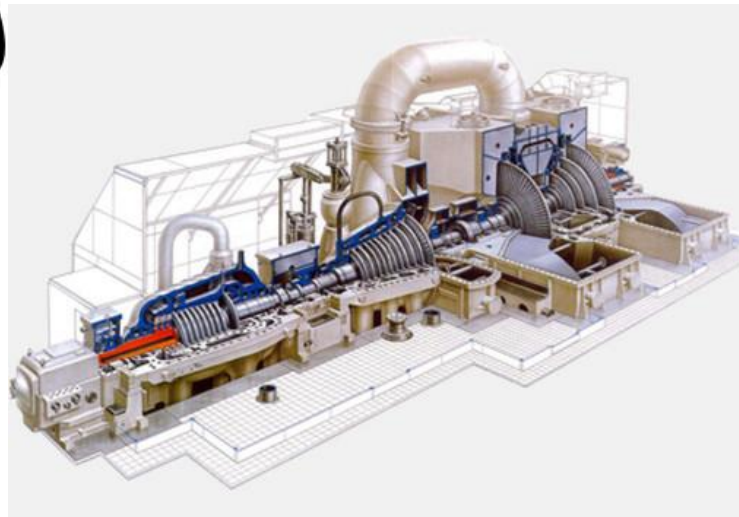


Станционные
факторы

АЭС



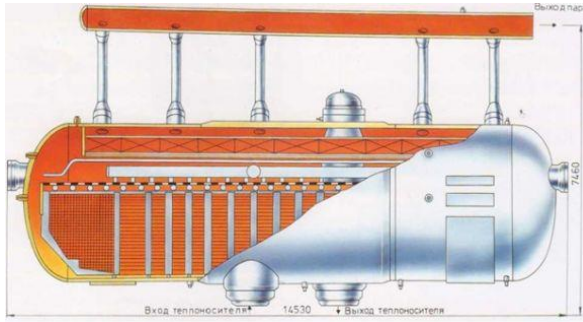
2. ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПТУ НА АЭС



Анализ, проведенный WNA, свидетельствует, что среди причин внеплановых остановов преобладает нештатная работа оборудования турбины, генератора, электрической части и так далее, тогда как собственно реактор оказывается более надежным звеном системы. Суммарная ежегодная недовыработка из-за турбинного оборудования составляет около 44 млрд кВт.ч, а из-за сбоев в функционировании электрической части – около 39 млрд кВт.ч.



2. ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПТУ НА АЭС



Помимо оптимизации производственных процессов, КИУМ зависит от изменений в технических параметрах работы энергоустановки. Повышение рабочей мощности энергоблока обеспечивает на отдельных этапах рост КИУМ. Увеличение мощности действующих блоков стало распространенным явлением в атомной отрасли во многих странах.

В США различают несколько типов повышения мощности.

Первый обусловлен возрастанием точности измерений и обеспечивает прирост мощности до 2 %.

Второй связан с изменением в функционировании оборудования без его глубокой модернизации, что позволяет нарастить мощность на величину до 7 %.

Третий тип предусматривает замену части основного оборудования АЭС, что может увеличить производительность на 20 %.



2. ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПТУ НА АЭС

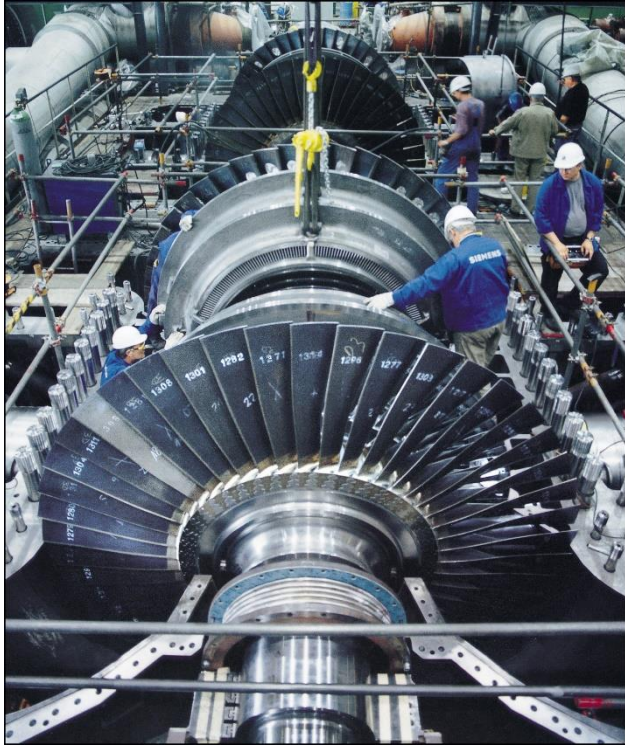
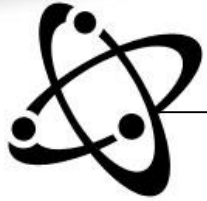


Технические изменения, в свою очередь, могут быть направлены на улучшение параметров работы самого реактора (за счет, например, некоторых изменений в активной зоне), либо на увеличение КПД энергоблока в целом (благодаря замене оборудования второго или первого контура, дополнительного осушения пара, повышения давления, снижения присосов воздуха в конденсаторе, снижения расхода энергии на собственные нужды и так далее). Средний КПД энергоблоков с водой под давлением составляет порядка 33 %.

Наибольшее влияние на КПД энергоблока оказывает КПД турбоустановки, учитывающий основную потерю теплоты в цикле производства электроэнергии. Технические параметры блока, кроме проектных условий, в некоторой степени зависят от климата, что может заметно отражаться на КИУМ.



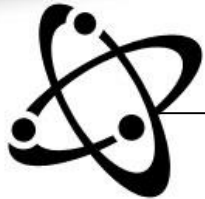
3. ОСНОВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ



1. Поверочный расчёт турбины, разработанный на основе **инженерных методик**.
2. Трёхмерное моделирование турбины на основе **CFD и CAE** пакетов.
3. Моделирование работы турбин на основе статистического анализа. (Моделирование турбины может осуществляться с помощью пассивного промышленного эксперимента на основе линейного и множественного регрессионного анализа. Для анализа в работе предлагается использовать **нейросетевое моделирование**).



4. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 И ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМАЯ ДЛЯ К-1000-60/1500



Для доказательства эффективности этой методики можно рассмотреть в качестве объекта исследования газовую, утилизионную бескомпрессорную турбину (ГУБТ-25), установленную на расширительной газовой станции газового цеха ОАО “Северсталь” г. Череповец. Турбина одноцилиндровая, двухпоточная изготовлена АОО “Невский завод ” г. Санкт-Петербург. Турбина пущена в эксплуатацию летом 2002 года. В качестве энергоносителя в турбине используется влажный доменный газ, влага которого, проходя через турбину частично конденсируется.

Для оценки режимных параметров, влияющих на энергетическую эффективность, работы ГУБТ-25 статистические данные собирались в период с 2.06.03 по 1.09.04: по мощности турбины в зависимости от расхода доменного газа через турбину, давлений и температур доменного газа до и после турбины, а также степени открытия поворотных лопаток и перепускного клапана.

На основании анализа предварительных статистических данных была установлена зависимость мощности турбины от расхода доменного газа, его давления, температуры и угла открытия поворотных направляющих лопаток, установленных в турбине для поддержания давления во входном патрубке.



4. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 И ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМАЯ ДЛЯ К-1000-60/1500

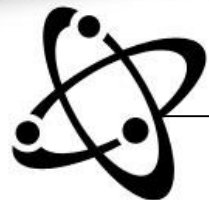


Результаты замеров давления на основе статистических данных показывают, что колебания абсолютного давления влажного газа перед турбиной за время сбора статистических данных несколько отличались от проектных данных и находились в диапазоне от 0,28 до 0,308 МПа (проектные от 0,29 до 0,306). По результатам замеров влияние изменения давления на электрическую мощность турбины при прочих усреднённых показателях составило 0,4 – 0,5 МВт.

Основные параметры установки ГУБТ-25 при составе доменного газа (нормативном)

CO=21%; CO2=21%; H2=2%; N2=56%

№ п/п	Наименование параметра	Значение		
1.	Объёмный расход газа при давлении 0,101 МПа и температуре 0°C, м ³ (н)/ч	650000	900000	1000000
2.	Избыточное давление газа во входном патрубке, МПа	0,29	0,304	0,306
3.	Температура газа во входном патрубке, °C	40 (макс.60)		
4.	Избыточное давление газа в выходных патрубках, МПа	0,108		
5.	Относительная влажность, %	100		
6.	Свободная влага, не более, г/м ³ (н)	15		
7.	Содержание пыли, не более, мг/м ³ (н)	30		
8.	Частота вращения, об/мин	1500		
9.	Мощность на муфте турбины, МВт	14,05	22,5	24,2
10.	КПД на муфте турбины, %	77,0	87,0	85,0
11.	КПД генератора (ТУ 3383-055-05757908-96), %	97,5		
12.	Мощность на клеммах генератора, МВт	13,7	21,94	23,5



4. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 И ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМАЯ ДЛЯ К-1000-60/1500

Частичные результаты замеров режимных параметров используемых
для разработки статистической математической модели работы турбины ГУБТ-25

Мощность турбины, МВт	Расход доменного газа через турбину, м ³ (н)/ч	Избыточное давление доменного газа перед турбиной, бар	Избыточное давление доменного газа за турбиной, бар	Температура доменного газа перед турбиной, °С	Температура доменного газа после турбины, °С	Степень открытия лопаток слева по ходу доменного газа, %	Степень открытия лопаток справа по ходу доменного газа, %	Степень открытия быстрооткрывающегося клапана SOK, %	Температура окружающей среды, °С
19,4	941000	1,89	0,0878	54,4	27,0	80,8	81,3	0	15
18,9	917000	1,90	0,101	53,9	26,8	74,5	75,2	0	18
19,0	883000	1,92	0,0968	55,0	28,5	66,4	67,1	0	17
17,7	821000	1,95	0,0869	54,2	27,1	53,2	53,8	0	18
18,3	946000	1,88	0,0878	53,6	26,7	64,6	65,2	0	17
17,8	768000	1,93	0,0816	58,4	33,2	53,2	53,6	1,6	18
18,1	960000	1,81	0,110	56,0	30,2	92,8	93,2	9,2	17
17,8	915000	1,90	0,113	48,8	20,4	64,8	65,4	0	16
17,2	888000	1,81	0,106	54,4	27,2	91,8	92,8	19,2	18
19,0	972000	1,92	0,08	57,6	32,2	92,8	94,0	0	18
16,3	832000	1,93	0,0992	53,2	26,0	49,2	50,0	0	15
11,8	792000	1,99	0,102	51,2	23,2	32,8	33,2	0	15
18,0	960000	1,85	0,110	51,6	24,4	73,2	74,4	0	15



4. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 И ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМАЯ ДЛЯ К-1000-60/1500

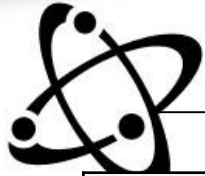


Частичные результаты замеров режимных параметров используемых
для разработки статистической математической модели работы турбины К-1000-60/1500

Мощность ЭГ, МВт	Давление острого пара, кгс/см ²	Давление пара 1 отбора, кгс/см ²	Давление пара 2 отбора, кгс/см ²	Давление пара 3 отбора, кгс/см ²	Давление пара 4 отбора, кгс/см ²	Давление пара 5 отбора, кгс/см ²	Давление пара 6 отбора, кгс/см ²	Давление пара 7 отбора, кгс/см ²	Расход питательн ой воды, т/ч	Расход питательн ой воды, т/ч	Расход питательн ой воды, т/ч	Расход питательн ой воды, т/ч	Вакуум в конденсат оре, кгс/см ²
1072,7	61,09	27,6	17,16	10,354	5,63	3,116	-0,9027	0,1139	1533	1514	1536	1539	0,046
1075,8	61,09	27,6	17,195	10,354	5,63	3,107	-0,9027	0,1139	1510	1538	1547	1534	0,045
1071,5	61,09	27,6	17,166	10,355	5,63	3,111	-0,9027	0,1139	1510	1508	1563	1542	0,045
1071,2	61,09	27,6	17,164	10,355	5,63	3,12	-0,9027	0,1139	1526	1523	1536	1546	0,045
1071,5	61,2	27,6	17,164	10,355	5,63	3,116	-0,9027	0,1139	1528	1551	1540	1515	0,045
1071,8	61,2	27,6	17,184	10,355	5,636	3,113	-0,9027	0,1139	1527	1535	1537	1540	0,045
1072,3	61,2	27,6	17,199	10,355	5,636	3,114	-0,9027	0,1139	1535	1515	1542	1562	0,045
1073	61,2	27,6	17,168	10,355	5,637	3,109	-0,9027	0,1139	1520	1531	1534	1534	0,045
1071,1	61,3	27,6	17,172	10,355	5,637	3,116	-0,9027	0,1139	1533	1540	1539	1530	0,045
1070,4	61,3	27,6	17,148	10,355	5,635	3,113	-0,9027	0,1139	1515	1528	1550	1543	0,045
1071,3	61,3	27,6	17,17	10,355	5,633	3,11	-0,9027	0,1139	1523	1534	1526	1546	0,045
1072,8	61,3	27,6	17,17	10,355	5,627	3,111	-0,9027	0,1139	1527	1551	1551	1533	0,045
1072,9	61,2	27,6	17,184	10,355	5,627	3,116	-0,9027	0,1139	1523	1527	1533	1542	0,045
1074,2	61,2	27,6	17,176	10,355	5,627	3,118	-0,9027	0,1139	1511	1526	1524	1561	0,045
1074,9	61,2	27,6	17,172	10,355	5,634	3,115	-0,9027	0,1145	1539	1528	1541	1506	0,045
1073,1	61,2	27,6	17,164	10,355	5,634	3,114	-0,9027	0,1145	1531	1528	1535	1560	0,045
1072,2	61,09	27,5	17,162	10,355	5,633	3,112	-0,9027	0,1145	1536	1529	1528	1540	0,045
1074,2	61,09	27,6	17,17	10,355	5,639	3,112	-0,9027	0,1145	1510	1527	1555	1531	0,045
1074,7	61,09	27,6	17,17	10,355	5,627	3,113	-0,9027	0,1145	1537	1502	1541	1533	0,045
1070,7	61,09	27,6	17,168	10,355	5,639	3,106	-0,9027	0,1145	1534	1532	1539	1523	0,045
1072,9	61,21	27,5	17,162	10,355	5,647	3,115	-0,9027	0,1145	1549	1547	1552	1515	0,045
1071,2	61,21	27,6	17,164	10,35	5,618	3,105	-0,9027	0,1145	1533	1533	1535	1542	0,045
1070,8	61,32	27,5	17,146	10,35	5,623	3,104	-0,9027	0,1145	1524	1534	1545	1530	0,045



4. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 И ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМАЯ ДЛЯ К-1000-60/1500



Показатели эффективности

ГУБТ-25

К-1000-60/1500

1. Мощность, полученная на клеммах ЭГ

2. КПД брутто

$$\eta^{\text{брутто}} = \frac{N_{\text{ЭЛ}}}{Q_n + Q_{\text{вн}} + Q_x} \cdot 100\%$$

2. КПД нетто

$$\eta^{\text{нетто}} = \frac{N_{\text{ЭЛ}} - N_{\text{СН}}}{Q_p} \cdot 100\%$$

3. Удельный расход
энергоносителя

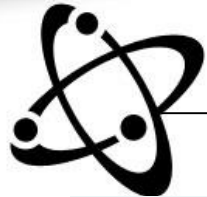
$$q_{\text{УД}}^{\text{Э}} = \frac{G_{\text{ДГ}} \cdot \rho_{\text{ДГ}}^{\text{НУ}}}{N_{\text{ЭЛ}}}$$

3. Удельный расход
теплоты

$$q_{\text{Э}} = \frac{3600 \cdot Q_0}{N_{\text{ЭЛ}}} = \frac{3600}{\eta_{\text{ЭЛ}}}$$



4. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 И ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМАЯ ДЛЯ К-1000-60/1500



В качестве метода моделирования работы турбины был выбран метод моделирования с помощью **нейронных сетей**

Программа моделирования режимов работы ГУБТ-25 состоит из двух частей:

- «Расчет основных показателей работы ГУБТ-25»,
- «Моделирование режимов работы ГУБТ-25».

Программа «Расчет основных показателей работы ГУБТ-25» позволяет **по входным параметрам:**

- расходу доменного газа на стандартные условия, $m^3(n)/ч$;*
- избыточному давлению доменного газа до турбины, бар ($кгс/см^2$);*
- избыточному давлению доменного газа после турбины бар ($кгс/см^2$);*
- температуре доменного газа до турбины, °С;*
- температура доменного газа после турбины, °С;*
- степени открытия левых лопаток по ходу доменного газа к турбине, %;*
- степени открытия правых лопаток по ходу доменного газа к турбине, %;*
- температура окружающего воздуха, °С;*
- составу доменного газа перед газоочисткой;*
- избыточному давлению доменного газа перед газоочисткой, бар ($кгс/см^2$);*
- температуре доменного газа перед газоочисткой, °С,*

определить

- мощность турбины,*
- удельный расход сухого энергоносителя на выработку 1 кВт·ч,*
- КПД брутто эффективности использования энергоносителя после доменной печи.*



4. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 И ВНОВЬ ПРОЕКТИРУЕМАЯ ДЛЯ К-1000-60/1500



Для паротурбинной установки К-1000-60/1500 также предполагается разработка двух частей программы:

«Расчет основных показателей работы К-1000-60/1500»,
«Моделирование режимов работы К-1000-60/1500».

На сегодняшний день произведен отбор **основных измеряемых (влияющих) параметров** (оценка влияния каждого из них на целевые показатели определяется посредством факторного и кластерного анализа):

*Расход греющего пара ПП-1,
Давление греющего пара 1 отбора на ПП-1,
Давление греющего пара на ПП-2,
Температура пара за ПП-1,
Давление пара за ПП-1,
Температура пара за ПП-2,
Давление пара за ПП-2,
Давление острого пара,
Температура конденсата П-5,
Температура пит. Воды за ТПН,
Давление в П-5,
Давление пара к Д-7
и т.д. (порядка 80 параметров)*

В качестве **определяемых (зависимых) параметров** выступают:

*мощность турбины,
удельный расход теплоты на выработку 1 кВт·ч,
КПД нетто.*



5. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 (ПРОГРАММА)

Расчёт основных показателей работы ГУБТ

Программа моделирования режимов работы ГУБТ-25

Файл Работа ГУБТ-25 Справка

Газоочистка	
Температура доменного газа перед газоочисткой, гр.С	200
Избыточное давление доменного газа перед газоочисткой, кгс/см2 (бар)	2.3
Турбина	
Расход доменного газа на стандартные условия, м3(н)/ч	800000
Избыточное давление доменного газа до турбины, кгс/см2 (бар)	1.96
Избыточное давление доменного газа после турбины, кгс/см2 (бар)	0.09
Температура доменного газа до турбины, гр.С	45
Температура доменного газа после турбины, гр.С	21
Степень открытия левых лопаток по ходу турбины, %	40
Степень открытия правых лопаток по ходу турбины, %	36
Температура окружающего воздуха, гр.С	19.2
Затраты энергии на собственные нужды, МВт	1
Результаты расчета	
Мощность турбины, МВт	12.9191
Удельный расход энергоносителя, рассчитанный на сухую массу, кг/кВт*ч	82.0597
Коэффициент полезного действия брутто использования энергоносителя, %	1.04099

Состав доменного газа	
CO, %	20
CO2, %	19
H2, %	2
N2, %	56
H2O, %	3

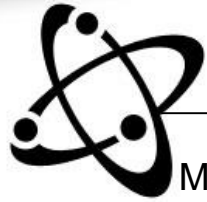
Расчет

Сохранить результаты

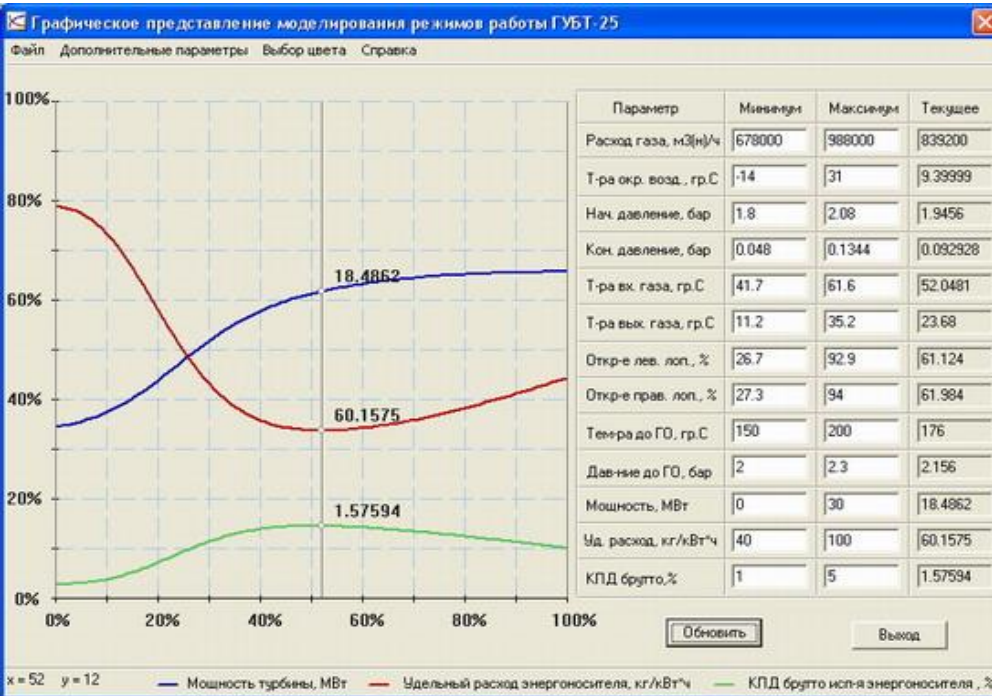
Реальное состояние и работа турбины несколько отличаются от теоретически расчётных режимов работы ГУБТ-25. На основе статистических экспериментальных данных, полученных во время выполнения работы, была получена эмпирическая математическая модель. Эта модель эмитирует работу ГУБТ-25 в существующем во время замеров диапазоне варьирования параметров влияющих на мощность и к.п.д. турбины. Её использование позволило получить режимные карты работы на существующие условия эксплуатации ГУБТ-25.



5. РАЗРАБОТАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГУБТ-25 (ПРОГРАММА)



Моделирование режимов работы ГУБТ-25



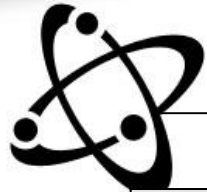
Единицы измерения представлены в соответствии с единицами измерения, которые выводятся на монитор машиниста турбины. В программе имеется возможность масштабирования зависимостей при помощи изменения минимальных и максимальных значений показателей.

Диапазон варьируемых параметров, влияющих на эффективность работы турбины

Параметры	Единицы измерения	Диапазон варьирования
Мощность турбины	<i>МВт</i>	10,2 – 19,4
Расход доменного газа через турбину	<i>м³ (н)/час</i>	678000 – 988000
Избыточное давление доменного газа перед турбиной	<i>бар</i>	1,8 – 2,08
Избыточное давление доменного газа за турбиной	<i>мбар</i>	48 – 134
Температура доменного газа перед турбиной	<i>°С</i>	41,7 – 61,6
Температура доменного газа после турбины	<i>°С</i>	11,2 – 35,2
Степень открытия направляющих лопаток в левой части турбины по ходу доменного газа	<i>%</i>	26,7 – 92,9
Степень открытия направляющих лопаток в правой части турбины по ходу доменного газа	<i>%</i>	27,3 – 94
Температура окружающего воздуха	<i>°С</i>	-14 – 31



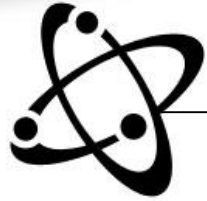
6. ВЫВОДЫ



Результаты определения мощности на клеммах генератора ГУБТ-25

№	Расход доменного газа через турбину, тыс. м ³ (н)	Избыточное давление доменного газа перед турбиной, бар	Значение избыточного давления доменного газа за турбиной, мбар	Значение температуры доменного газа перед турбиной, °С	Определяемая мощность, МВт
1	810	1,97	48	41,7	16,4
2	810	1,97	134,4	41,7	15,8
3	810	1,97	48	61,6	17,7
4	810	1,97	134,4	61,6	16,6

1. Из примера видно, что модель турбины на основе нейросетевой технологии с использованием статистических данных, может помочь в определении эффективных показателей турбины: мощности электрической энергии, КПД брутто, удельного расхода энергоносителя на производство электрической энергии. Модель может использоваться для тарифного прогнозирования в качестве макета работы турбины.
2. Нейросетевой подход при моделировании режимов работы турбин АЭС является актуальным направлением повышения эффективной эксплуатации АЭС.
3. Модели, разработанные на основе нейросетевого подхода, также позволяют рассматривать электрическую мощность, КПД нетто и удельный расход тепла, отвечающие за эффективность эксплуатации 2 контура АЭС



СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА АЭС ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ 2 КОНТУРА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская,
д. 34, кафедра АЭС
Тел./факс (4932) 38-57-78
<http://игэу.рф>, <http://ispu.ru>
npp@aes.ispu.ru; gorbynov.w@mail.ru

**Выполнил: АСПИРАНТ КАФ. АЭС ИГЭУ
ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ МИНЕЕВ
Руководитель: ПРОФ., Д.Т.Н.
ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ ГОРБУНОВ**