



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.039.52

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ВТОРОГО КОНТУРА АЭС С РЕАКТОРАМИ ТИПА ВВЭР

¹ Минеев П.А., Горбунов В.А., Мечтаева М.Н.

ФГБОУ ВО «ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА» Иваново, Россия (153003, Ивановская область, город Иваново, Рабфаковская ул., д.34) e-mail: ¹pasha.mineevr@ya.ru.

В статье рассматривается вопрос повышения энергетической эффективности работы второго контура Атомных Электрических Станций (АЭС). Основной идеей статьи является использование нейросетевых моделей для оптимизации работы второго контура АЭС и повышения его энергетической эффективности. В работе представлены ключевые показатели работы отдельных систем второго контура, определены целевые функции, такие как удельный расход теплоносителя-пара, удельный расход тепла и абсолютный электрический КПД брутто. Предлагается использовать эти показатели для разработки и обучения нейросетевых моделей, которые смогут помочь в оптимизации работы второго контура АЭС. Дальнейшее усовершенствование методов машинного обучения и тестирование моделей на различных сценариях с целью обеспечения безопасности и надежности работы системы также являются важными аспектами исследования. Использование нейросетей для оптимизации работы второго контура АЭС может значительно повысить энергетическую эффективность и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова: Энергетическая эффективность, Атомная Электрическая Станция, нейросетевая модель, целевая функция, КИУМ, УРП, УРТ.

SEARCH OF STANDARTS FOR OPTIMIZING NPP SECOND CIRCUIT OPERATION WITH VVER TYPE REACTORS

¹ Mineev P.A., Gorbunov V.A., Mechtaeva M.N.

IVANOVO STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY NAMED AFTER V.I. LENIN, Ivanovo, Russia (153003 Ivanovo, Ivanovo city, Rabfakovskaya st., 34) e-mail: ¹pasha.mineevr@ya.ru.

The article considers the issue of increasing the energy efficiency of the second circuit of Nuclear Power Plants (NPP). The main idea of the article is the use of neural network models to optimize NPP second circuit operation and increase its energy efficiency. The paper presents the key performance indicators of individual second-circuit systems, defines target functions such as the specific consumption of coolant-steam, specific heat consumption and absolute gross electrical efficiency. It is proposed to use these indicators for the development and training of neural network models that can help optimize the operation of the NPP second circuit. Further improvement of machine learning methods and testing of models in various scenarios in order to ensure the safety and reliability of the system are also important aspects of the study. The use of neural networks to optimize the operation of the NPP second circuit can significantly increase energy efficiency and reduce the negative impact on the environment.

Keywords: Energy efficiency, Nuclear Power Plant, neural network model, objective function, IPUF, SSC, SHC.

Основным показателем работы Атомных Электрических Станций является коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). КИУМ показывает процент, на который та

или иная станция была загружена (насколько полно были задействованы ее мощности) в течение определенного периода. На сегодняшний день данный показатель широко используется, так как АЭС, в большинстве случаев, работают в базовой части графика нагрузок. Однако при помощи КИУМ практически невозможно оценить энергетическую эффективности работы, как станции в целом, так и отдельных систем и единиц оборудования.

В данной работе наибольший интерес представляет второй контур АЭС с реакторами типа ВВЭР, а именно: отдельные системы (вакуумная система, система регенерации [1], система турбопитательного насоса [2]) и паротурбинная установка (ПТУ) в целом. В ранних исследованиях были определены ключевые показатели работы отдельных (вспомогательных) систем, целью настоящего исследования является определение таких показателей для ПТУ в целом.

Определение таких показателей и дальнейшая оптимизация работы оборудования второго контура АЭС с их использованием является актуальной задачей, поскольку данные мероприятия могут позволить повысить энергетическую эффективность станций с минимальными затратами материальных, физических и временных ресурсов. В свою очередь, повышение энергетической эффективности оборудования станций является главной задачей РФ в соответствии с [3].

Одной из ключевых и очень серьезных проблем, с которой сталкивается атомная энергетика, является то, что приоритеты в организации работы атомных электростанций часто смещаются в сторону постоянного повышения безопасности и надежности функционирования первого контура, в то время как вопросы эффективности использования второго контура остаются на втором плане. Несмотря на это, стоит отметить, что усиленное внимание к повышению энергетической эффективности паротурбинного оборудования атомных электростанций может привести к значительному снижению себестоимости производимой электроэнергии. Это, в свою очередь, открывает дополнительные возможности для высвобождения ресурсов, включая ресурсы, необходимые для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования, что может быть достигнуто за счет собственных финансовых средств атомных электростанций.

В контексте текущего исследования особое значение приобретает процесс определения критериев оптимизации, которые будут использованы в качестве основы для последующего совершенствования эксплуатационных процессов с помощью передовых методов нейросетевого моделирования. Нейросетевая модель, применяемая для моделирования второго контура, представляет собой уникальный инструмент, который может быть охарактеризован как "цифровой двойник" оборудования. Эта модель обладает высокой степенью достоверности, что делает её более предпочтительной по сравнению с другими математическими моделями аналогичного оборудования. Основанием для формирования нейросетевой модели служит не теоретический подход, а реальные эксплуатационные данные, что позволяет добиться максимальной точности и надежности моделирования.

При рассмотрении нейросетевых моделей, критерии оптимизации такие, как КИУМ, имеют название – целевая функция. Целевая функция – это вещественная или целочисленная функция нескольких переменных, подлежащая оптимизации. То есть это такая величина (как правило, определенная косвенно), которая зависит от ряда параметров (давления, температуры, расходы, электрическая мощность и т.д.), характеризует эффективность

эксплуатации единичного оборудования или системы, необходима для проведения оптимизация.

В дальнейшем расчет всех основных показателей представлен для второго контура АЭС с реактором типа ВВЭР с тихоходной паровой турбиной К-1000-60/1500. Принципиальная схема второго контура представлена на рисунке 1.

Для оптимизации работы системы регенерации, вакуумной системы и системы турбопитательных насосов в предыдущих исследованиях использовались такие показатели как:

- для системы регенерации – удельный расход тепла, коэффициент использования тепла;
- для вакуумной системы – экономический и предельный вакуум;
- для системы турбопитательных насосов – удельный расход тепла на ТПН.

На ТЭС, ТЭЦ или ГРЭС основной целевой функцией является удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (УРУТ на ээ). На АЭС внедрение такого показателя является достаточно сложной задачей, поскольку отсутствует прямой расход (сжигание) органического топлива, а единственным способом получения энергии является реакция деления ядер урана для АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, и эффективность эксплуатации определяется топливной компанией. Ближайшей характеристикой к УРУТ на ээ для оборудования второго контура является удельный расход теплоносителя-пара (УРП) на паровую турбину. Данный показатель определяет, сколько килограмм пара требуется для выработки одного кВт-ч электроэнергии. УРП является достаточно полным показателем и учитывает работу оборудования второго контура АЭС как системы в целом.

Формула для определения УРП, кг/[кВт-ч]:

$$b_{ээ} = (D_0 + D_{пп}) / N_э - b_т,$$

где D_0 – расход пара на цилиндр высокого давления турбины, т/ч;

$D_{пп}$ – расход пара промежуточного перегрева, т/ч;

$N_э$ – электрическая мощность турбины, МВт;

$b_т$ – удельный расход теплоносителя на выработку тепловой энергии, кг/[кВт-ч].

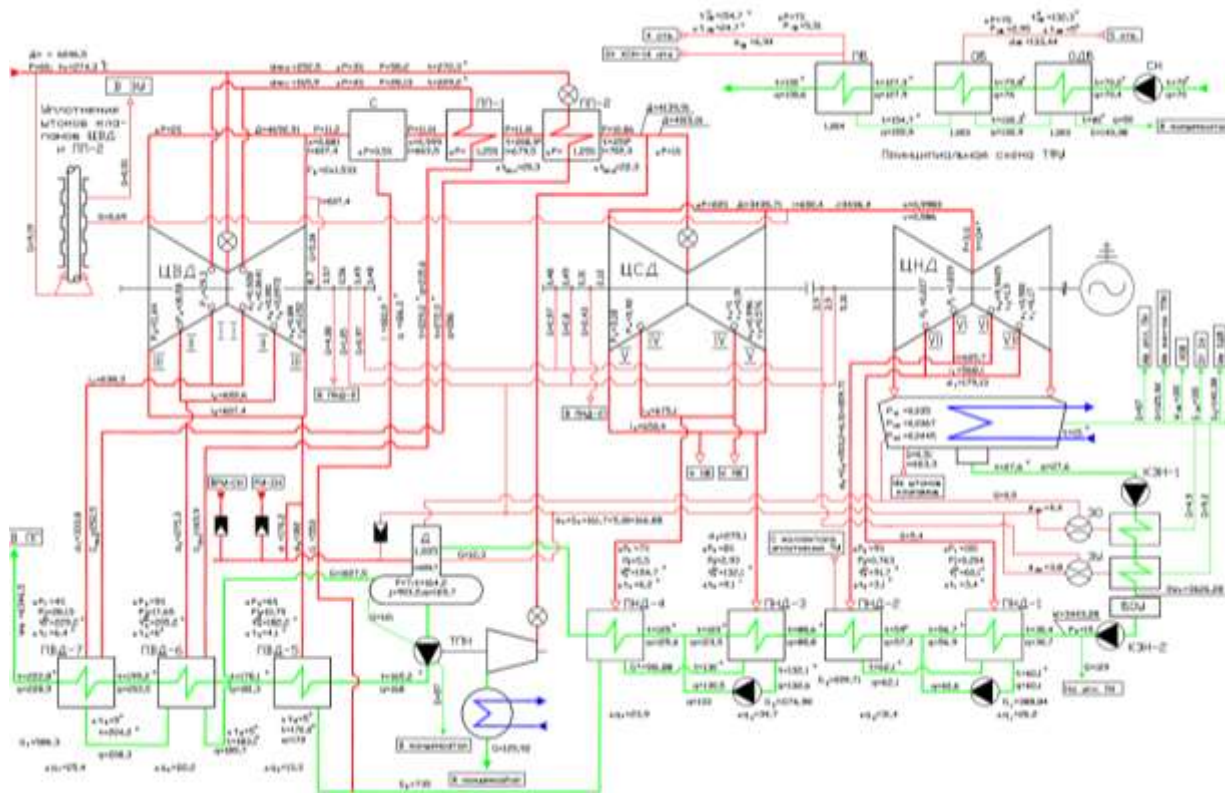


Рисунок 1. - Принципиальная тепловая схема второго контура АЭС с турбиной К-1000-60/1500

Схожим с УРП является показатель – удельный расход тепла (УРТ), отображающий, какое количество тепла необходимо для выработки одного кВт·ч электроэнергии, кДж/[кВт·ч]:

$$q_{\text{ээ}} = D_{\text{пг}} \times (h_0 - h_{\text{пв}}) / N_{\text{э}} - q_{\text{т}},$$

где $D_{\text{пг}}$ – расход пара из парогенератора, т/ч;

h_0 и $h_{\text{пв}}$ – энтальпии свежего пара и питательной воды соответственно, кДж/кг.

Абсолютный электрический КПД брутто также может быть использован в качестве целевой функции, и аналогично УРП и УРТ характеризует энергетическую эффективность 2 контура в целом:

$$\eta^{\text{абс}} = 3600 \times N_{\text{э}} / [D_{\text{пг}} \times (h_0 - h_{\text{пв}})].$$

УРП, УРТ и абсолютный электрический КПД брутто не учитывают расход электроэнергии на собственные нужды электростанции. В связи с этим совместно с ними в качестве целевых функций необходимо использовать такие измеряемые показатели, как: расход электроэнергии на собственные нужды электростанции, расход свежего пара на турбоустановку и величину отпускаемой электрической энергии.

В ходе итерационного теплового расчета второго контура АЭС с целью получения недостающих величин (значений расходов пара в отборы, энтальпий пара и воды и т.д.) для определения значений целевых функций получен массив данных (Таблицы 1-2) и разработана и обучена первая версия нейросетевой модели, которая может быть использована для дальнейшей оптимизации работы второго контура рассматриваемой АЭС.

Таблица 1. - Фрагмент массива данных для обучения нейросетевой модели

№ п/п	Регулируемые параметры						Входные параметры			Целевая функция			
	1	2	...	4	5	6	7	...	58	59	...	62	
1	5432	5798	...	6,003	8,903	65,5	3898	...	154,9	1061,4	...	33,96%	
2	5484	5814	...	5,993	8,92	64,3	3930	...	154,9	1070,6	...	33,69%	
3	5468	5818	...	5,99	8,928	65,6	3920	...	154,9	1067,2	...	33,60%	
4	5479	5803	...	5,988	8,955	65,5	3918	...	154,9	1068,0	...	33,42%	
5	5467	5733	...	5,983	8,93	66,5	3924	...	154,9	1067,4	...	33,75%	
6	5470	5823	...	5,988	8,928	66,7	3923	...	154,9	1067,5	...	33,56%	
7	5463	5833	...	5,985	8,91	69,2	3928	...	154,9	1067,8	...	33,64%	
8	5483	5875	...	5,993	8,933	67,8	3935	...	154,9	1070,3	...	33,92%	
9	5451	5829	...	5,995	8,933	69,2	3912	...	154,9	1064,1	...	33,67%	
10	5471	5815	...	5,988	8,915	70,7	3940	...	154,9	1069,4	...	33,80%	
...	
73999	5488	5819	...	5,928	8,228	79	3939	...	154,9	1072,9	...	33,80%	
74000	5471	5814	...	5,925	8,188	83,1	3941	...	154,9	1072,2	...	34,05%	

Таблица 2. - Диапазон значений целевых функций для оптимизации нейронной сети

Наименование параметра	Диапазон значений показателя
Удельный расход пара, кг/[кВт-ч]	5,645 - 6,112
Удельный расход тепла, кДж/[кВт-ч]	10501 - 11326
Абсолютный электрический КПД, %	31,78 - 34,28
Электрическая мощность, МВт	984 - 1077,3
Расход пара на турбоустановку, т/ч	5157 - 5684

В результате исследования определены основные целевые функции, которые могут быть использованы для разработки нейросетевой модели, и дальнейшей оптимизации работы второго контура блока АЭС с реакторами типа ВВЭР-100.

Для достижения указанных целей необходимо провести дополнительные исследования и разработать специальные алгоритмы, которые позволят интегрировать все указанные системы и модели в одну общую сеть. Такой подход позволит существенно улучшить управление энергетическими процессами второго контура атомной электростанции и повысить ее эффективность.

Одним из ключевых направлений дальнейших исследований может быть улучшение точности и скорости работы нейросетевых моделей для предсказания процессов в системах АЭС. Разработка новых алгоритмов машинного обучения и методов оптимизации позволит

создать более точные модели, которые будут способны быстро реагировать на изменения в рабочих условиях станции. Кроме того, необходимо уделить внимание аспектам безопасности и надежности работы нейросетевых систем в таком критическом для окружающей среды объекте, как атомная электростанция. Разработка специальных механизмов обнаружения и исправления ошибок, а также тестирование моделей на различных сценариях аварийных ситуаций поможет обеспечить надежную работу системы в любых условиях.

В целом, перспективы дальнейших исследований в области использования нейросетевых моделей для оптимизации работы второго контура АЭС очень обширны и могут привести к значительному улучшению энергетической эффективности и надежности работы энергоблока. Это позволит не только сократить затраты на производство электроэнергии, но и уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду.

Список литературы

1. Горбунов, В.А. Перспективы повышения энергетической эффективности работы систем регенеративного подогрева воды / Горбунов В.А., Теплякова С.С // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2023. – с. 131-133.
2. Горбунов, В.А. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса / Горбунов В.А., Теплякова С.С., Лоншаков Н.А., Андрианов С.Г., Мечтаева М.Н., Минеев П.А.// Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2022. – №4. – с. 14-23.
3. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон № 261-ФЗ :[принят Государственной Думой 11 нояб. 2009 г.: одобрен Советом Федерации 18 нояб. 2009 г.].

References

1. Gorbunov, V.A. Prospects for improving the energy efficiency of regenerative water heating systems / Gorbunov V.A., Teplyakova S.S. // State and prospects of development of electrical and thermal technology (XXII Benardos readings). – Ivanovo, 2023. – pp. 131-133.
 2. Gorbunov, V.A. Methodology for assessing the impact of operational parameters on the operation of a turbopump pump / Gorbunov V.A., Teplyakova S.S., Lonshakov N.A., Andrianov S.G., Mechtaeva M.N., Mineev P.A.// Bulletin of IGEU. – Ivanovo, 2022. – No.4. – pp. 14-23.
 3. The Russian Federation. Laws. On Energy Saving and Energy Efficiency Improvement and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation: Federal Law No. 261-FZ :[adopted by the State Duma on November 11, 2009: approved by the Federation Council on November 18, 2009].
-