
УДК 621.316

В.А. АГИБАЛОВ, А.С. ПОМОГАЕВ, С.В. КИЛЬЧАНОВ студенты гр. ТФ-06м-20 (НИУ «МЭИ»)

Научный руководитель И.А. ЩЕРБАТОВ, к.т.н., доцент (НИУ «МЭИ») г. Москва

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ
ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ**

Одной из проблем современного энергетического сектора является снижение энергоэффективности объектов генерации со временем их эксплуатации [1].

Это сложная многоаспектная проблема, имеющая большое количество переменных. Решение задачи выявления и локализации в тепловой схеме дефектов оборудования существенно повлияет на энергоэффективность ТЭС.

Энергетические объекты обладают свойством нестационарности. Из-за того, что в процессе эксплуатации они подвергаются множеству негативных воздействий, со временем их параметры сильно меняются. Современные автоматические системы регулирования не могут наглядно показать оператору станции разницу в параметрах между эталонной моделью тепловой схемы для заданного режима работы и реальными данными мониторинга. Также опираясь только на показания приборов невозможно провести полный анализ состояния того или иного элемента тепловой схемы.

В связи с этим возрастает актуальность разработки и применения систем цифрового моделирования на энергетических объектах.

Цифровой двойник - эталонная (без дефектов) программная модель тепловой схемы, в которой производится сравнение реальных данных мониторинга и результатов моделирования для заданного режима.

На основе заложенной создателем математической модели, программа, с учетом всех особенностей работы энергетического оборудования создает цифровой клон объекта. Информация, поступающая с реальных датчиков этого же оборудования, сравнивается с показателями виртуальной модели. Далее оператором или программным обеспечением на основе собранных данных об отклонениях реальных и эталонных параметров выявляются аномалии, строится анализ дефектов и их локализация в схеме, устанавливаются причины их возникновения.

Цифровой двойник тепловой схемы реально работающей станции может быть получен при создании виртуальной копии каждого ее элемента, их объединении и построении передачи данных между ними. Идея в том,

чтобы виртуально описать работу станции настолько полно, насколько это вообще возможно.

Для реализации цифровой модели, с достаточной точностью, описывающей реальную систему, используются такие методы имитационного моделирования, как сбор информации и данных, разработка концептуальных моделей, проверка макетов на адекватность поставленной задаче и выполнение структурного критического анализа, перевод концептуальной модели с помощью программных средств в машинное представление, верификация, валидация и тестирование. Также для удобного представления тенденций оператору используются такие методы обработки данных, как табулирование, корреляционный и дисперсный анализ.

Таким образом, создание системы цифрового моделирования тепловой схемы станции позволит существенно повысить ее энергоэффективность и сделать более конкурентоспособной.

Согласно [2], в настоящий момент более половины вырабатываемой электроэнергии электростанциями ЕЭС России осуществляется за счет работы ТЭС. В 2019 г. этот показатель составил 679.9 млрд кВт · ч.

Состав тепловой электростанции: система топливоподачи; основное оборудование; система регенерации; система эвакуации дымовых газов; электрическая часть; система технического водоснабжения.

В рамках данной исследовательской работы создание цифрового двойника тепловой схемы ТЭС является невыполнимой задачей, поэтому в дальнейшем будет рассмотрен элемент системы регенерации – подогреватель низкого давления.

Для создания программного кода необходимо разработать математическую модель оборудования, в данном случае подогревателя низкого давления. Построение математической модели велось согласно [3].

1. Уравнение теплового баланса для подогревателя (1):

$$D_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{н}}) \cdot \eta_{\text{п}} = G_{\text{к}} \cdot (h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}) \quad (1)$$

где $D_{\text{п}}$ - расход греющего пара;

$h_{\text{п}}$ - энтальпия греющего пара;

$h_{\text{н}}$ - энтальпия при температуре насыщения греющего пара;

$\eta_{\text{п}}$ - КПД теплообмена через стенку;

$G_{\text{к}}$ - расход нагреваемого конденсата;

$h_{\text{вых}}$ - энтальпия конденсата на входе в теплообменник;

$h_{\text{вх}}$ - энтальпия конденсата на выходе.

2. Количество теплоты, передаваемое греющим паром в подогревателе (2):

$$Q = D_{\pi} \cdot (h_{\pi} - h_{\text{н}}) \cdot \eta_{\pi} \quad (2)$$

3. Значение температурного напора (3):

$$\Delta t = \frac{(\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}})}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} \quad (3)$$

где $\Delta t_{\text{б}} = t_{\text{н}} - t_{\text{вх}}$ - температурный набор;
 $\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{н}} - t_{\text{вых}}$ - температурный напор.

4. Средний коэффициент теплопередачи конденсирующегося пара к стенкам трубы при ламинарном режиме течения (4):

$$\alpha_1 = 1.01 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{g}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{-\frac{1}{3}} \quad (4)$$

где λ - коэффициент теплопроводности;
 g - ускорение свободного падения;
 ν - кинематическая вязкость;
 Re - число Рейнольдса.

5. Средний коэффициент теплопередачи от стенок трубы к конденсату при сверхкритическом режиме течения (5):

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{\text{ж}} \cdot \lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{вн}}} \quad (5)$$

где $Nu_{\text{ж}}$ - число Нуссельта;
 $\lambda_{\text{ж}}$ - коэффициент теплопроводности конденсата;
 $d_{\text{вн}}$ - внутренний диаметр трубок.

6. Коэффициент теплопередачи (6):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\Delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ - коэффициент теплопроводности материала стенки трубок;
 Δ - толщина стенки трубок.

Подогреватели низкого давления - часть системы регенерации тепловых электростанций. Регенеративный подогрев основного конденсата и питательной воды является одним из важнейших методов повышения экономичности современных ТЭС и ТЭЦ. При этом под основным конденсатом понимается поток конденсата рабочего пара от конденсатора до деаэратора, а под питательной водой — поток от деаэратора до котла (парогенератора).

Особенность регенеративного цикла ПТУ по сравнению с циклом без регенерации состоит в том, что конденсат, имеющий после конденсатора температуру 28—35 °С, прежде чем поступить в парогенератор, подогревается в специальных теплообменниках паром, отбираемым из промежуточных ступеней турбины. Осуществляя ступенчатый подогрев питательной воды за счет ступенчатого отбора теплоты пара в процессе его расширения, можно реализовать идею регенеративного цикла Карно для участка в области насыщенного пара. Увеличивая число отборов до бесконечности и приближаясь к предельно регенеративному циклу, процесс расширения пара можно приблизить к идеальному. На рис. 1 изображена блок-схема создаваемого цифрового двойника.



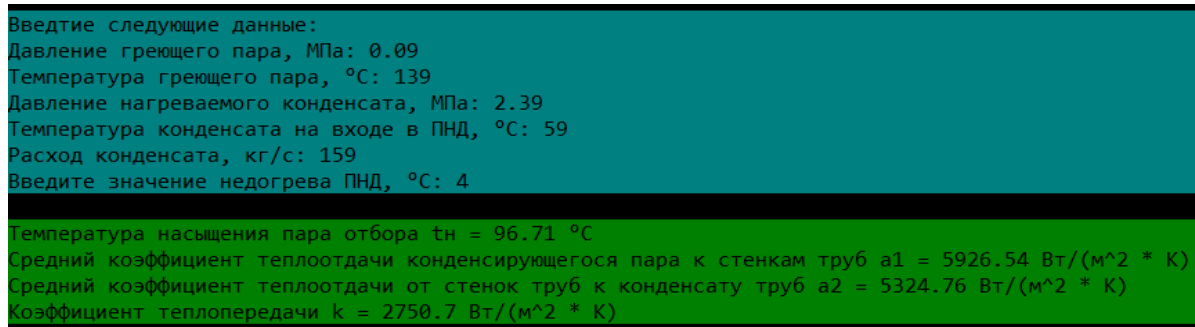
Рис. 1. Блок-схема цифрового двойника

При запуске программы пользователю поступает запрос на ввод данных, необходимых для поверочного расчета теплообменника. Входными параметрами являются: температура греющего пара, давление греющего пара, температура конденсата на входе в ПНД, давление конденсата, расход конденсата.

Стоит отметить, что конструктивные параметры подогревателя уже заложены в программе и пользователь не имеет возможности задать их.

Выходными параметрами являются: температура насыщения пара отбора, средний коэффициент теплоотдачи конденсирующегося пара к стенкам труб, средний коэффициент теплоотдачи от стенок труб к конденсату труб, коэффициент теплопередачи. Программа была реализована на высокоуровневом языке программирования общего назначения – Python.

Пример вызова программы представлен на рис. 2.



```
Введите следующие данные:  
Давление греющего пара, МПа: 0.09  
Температура греющего пара, °C: 139  
Давление нагреваемого конденсата, МПа: 2.39  
Температура конденсата на входе в ПНД, °C: 59  
Расход конденсата, кг/с: 159  
Введите значение недогрева ПНД, °C: 4  
  
Температура насыщения пара отбора  $t_n = 96.71$  °C  
Средний коэффициент теплоотдачи конденсирующегося пара к стенкам труб  $a_1 = 5926.54$  Вт/(м2 * К)  
Средний коэффициент теплоотдачи от стенок труб к конденсату труб  $a_2 = 5324.76$  Вт/(м2 * К)  
Коэффициент теплопередачи  $k = 2750.7$  Вт/(м2 * К)
```

Рис. 2. Вызов программы поверочного расчета подогревателя низкого давления

Создание цифрового двойника - это сложный и трудоемкий процесс, который требует большого объема знаний. Внедрение виртуальных моделей в энергетический сектор также непростая задача. Этот процесс должен проходить поэтапно, начиная с самых важных процессов и агрегатов, устранить проблемы, в которых невозможно традиционными способами.

Однако, несмотря на все сложности производства и внедрения, дороговизну ПО, цифровые двойники - это шаг в будущее. Их применение в энергетической сфере поможет не только лучше изучить процессы, и разработать новые методы, теории, на основе полученных данных, но и сэкономить большие суммы денег.

Список литературы:

1. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
2. Основные характеристики российской электроэнергетики. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения 2.10.20).
3. Назмеев Ю.Г., Теплообменные аппараты ТЭС: учеб. пособие для вузов / Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. - 4-е изд., дополненное. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 269 с.

Информация об авторах:

**III Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

402-6

12-14 ноября 2020 года

Агибалов Владимир Алексеевич, студент гр. ТФ-06м-20, НИУ «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 AgibalovVA@mpei.ru

Помогаев Александр Сергеевич, студент гр. ТФ-06м-20, НИУ «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 PomogaevAS@mpei.ru

Кильчанов Сергей Викторович, студент гр. ТФ-06м-20, НИУ «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 KilschanovSV@mpei.ru

Щербатов Иван Анатольевич, к.т.н., доцент, НИУ «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14 ShcherbatovIA@mpei.ru