

УДК 621.165

**А. В. БОЙКО**, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. НТУ «ХПІ»;  
**А. П. УСАТЫЙ**, д-р техн. наук, с.н.с.; с.н.с. НТУ «ХПІ»;  
**Н. С. ШАПОВАЛОВА**, інженер 2 кат. НТУ «ХПІ»

## МОДЕРНИЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСА *DNA* ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ПТУ

Статья посвящена вопросу модернизации программного комплекса *DNA* для расчета тепловых схем паротурбинных установок. Основной целью является создание новых моделей элементов теплообменного оборудования для их интеграции в существующий программный комплекс с целью его модернизации и повышения эффективности. Получена программа с расширенными функциональными возможностями и проведено моделирование тепловой схемы одной из модификаций турбоустановки К-300-240. Приведены результаты моделирования схемы с существующими и новыми компонентами. Сделаны выводы о дальнейших перспективах развития данного направления.

**Ключевые слова:** *DNA*, ПТУ, моделирование, тепловая схема, модификация

### Введение

В настоящее время остро стоит задача экономии энергоресурсов. Одним из путей решения данной проблемы является модернизация существующего оборудования тепловых схем ТЭС, которую осуществляют на основе математического моделирования их элементов. Преимуществом такого подхода является возможность варьирования параметров в широких диапазонах, создания и рассмотрения различных компоновок или перекомпоновок элементов схемы, оценка её экономичности. Для реализации вышеупомянутого подхода необходимо иметь математические модели теплообменного оборудования, в которых должны быть заложены основные термодинамические характеристики, граничные условия, внутренние и внешние связи, которые характеризуют свойства данной системы.

### Обоснование поставленной задачи

Программный комплекс *Dynamic Network Analysis (DNA)*, разработанный в Датском техническом университете (*DTU*), используют в качестве универсального комплекса автоматизированного моделирования теплоэнергетических систем. Благодаря большой библиотеке моделей элементов и рабочих тел, *DNA* позволяет моделировать различные тепловые схемы (*ТС*). Данный комплекс распространяют в виде исходных кодов программы на языке программирования *FORTRAN77* (частично *FORTRAN90*) [1], что позволяет расширить его функциональные возможности путем создания новых моделей элементов. Недостатком пакета является отсутствие графического интерфейса. Отсутствие редактора графических схем и компонентов *DNA* и необходимость правки исходного кода его модулей усложняют использования данного программного комплекса, что требует не только знания предметной области, но и высокой квалификации в области программирования. Кроме того, используемый стандарт языка программирования затрудняет модификацию и взаимодействие *DNA* с программами, написанными на других языках, а также ограничено и усложнено моделирование *ТС* ПТУ. В зависимости от типа решаемой задачи моделирование и расчет теплоэнергетических систем в *DNA* производят на номинальном и переменном режимах. К тому же *DNA* является не только комплексом для моделирования, но и языком описания моделей элементов системы.

Анализ показал, что для решения задач расчета тепловых схем ПТУ применение

© А.В. Бойко, А.П. Усатый, Н.С. Шаповалова, 2015

*DNA* позволяет настроить данный программный комплекс на специфику решаемой задачи, не требуется дополнительных материальных затрат для покупки специализированного ПО, такого как *MATLAB Simulink* и т.п., что делает его использование оправданным с учетом рассмотренных выше недостатков.

**Целью исследования** является повышение точности моделирования тепловых схем ПТУ на основе разработки усовершенствованных моделей элементов ТС и дальнейшего их использования в программном комплексе *DNA*.

#### **Новые модели в DNA**

В процессе исследования ПТУ, проводимых на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ», на основе существующих моделей компонентов ТС в *DNA* авторами были разработаны модели следующих компонентов: насос с турбоприводом, подогреватель, учитывающий величину недогрева, клапан с заданием величины потери давления в трубопроводе, сепаратор с переменным значением степени сухости.

Модель насоса с турбоприводом (1) определим на основе математической модели насоса с электрической мощностью (2) (компонент *turbo.for DNA*) [2]:

$$\eta E = m v_1 (p_2 - p_1) \cdot 10^2, \quad (1)$$

$$\eta W = m v_1 (p_2 - p_1) \cdot 10^2, \quad (2)$$

где  $\eta$  – КПД насоса;  $E$  – электрическая мощность насоса, кВт;  $W$  – мощность, передаваемая от турбины;  $m$  – массовый расход воды, кг/с;  $v_1$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $p_1, p_2$  – давление на входе и выходе соответственно, бар.

Для турбопривода используется модель турбины с входными и выходными параметрами, КПД и турбинной константой. В основе модели лежат уравнения для определения изэнтропного КПД (3) и турбинной константы (4):

$$\eta_{is} = \frac{i_2 - i_1}{i_{p_2, s_1} - i_1}, \quad (3)$$

$$C_t = \frac{m_1 \sqrt{(t_1 + 273,15)}}{\sqrt{(p_1^2 - p_2^2)}}, \quad (4)$$

где  $\eta_{is}$  – изэнтропный КПД;  $i_1, i_2$  – энтальпия пара на входе и выходе из турбины, кДж/кг;  $i_{p_2, s_1}$  – энтальпия пара как функция от  $p_2$  и  $s_1$ ;  $C_t$  – турбинная константа;  $t_1$  – температура пара на входе в турбину, °С;  $p_1, p_2$  – давление на входе и выходе соответственно, бар.

По заданным параметрам определяется мощность на валу данной турбины, которая передается насосу, и затем из (2) определяются недостающие параметры.

Недогрев до температуры насыщения в регенеративных подогревателях определяется технико-экономическими показателями. На ОАО «Турбоатом» эмпирическим путем получена оценка недогрева до температуры насыщения в виде соотношения (5), которая позволяет определить истинные параметры воды за подогревателем:

$$k_{sub} = \frac{\Delta t_{sub}}{G_{in} \Delta i_w}, \quad (5)$$

где  $k_{sub}$  – коэффициент недогрева;  $\Delta t_{sub}$  – температура недогрева, °С;  $G_{in}$  – массовый расход воды, кг/с;  $\Delta i_w$  – разность энтальпий воды на входе и на выходе в подогреватель, кДж/кг.

Из (5) возникает необходимость создания двух моделей подогревателей: с известной величиной температуры недогрева и с известным коэффициентом недогрева (компонент *heatex.for DNA*). В первом случае необходимо найти параметры воды при температуре насыщения, а затем задать величину недогрева и по формуле (6) найти истинную температуру воды за подогревателем. Причем недогрев принимается со знаком «+», перегрев – со знаком «-».

$$t_s = t - \Delta t_{sub}, \quad (6)$$

где  $t_s$  – температура насыщения, °С;  $t$  – истинная температура воды за подогревателем, °С;  $\Delta t_{sub}$  – температура недогрева, °С.

Во второй модели для нахождения температуры за подогревателем задают величину коэффициента недогрева, находят параметры воды за подогревателем по температуре, которую получают при первом расчете. Затем из (5) находят величину недогрева и по (6) получают истинную температуру воды за подогревателем.

При создании модели сепаратора (компонент *sepmix.for DNA*) для нахождения параметров при заданной степени сухости сначала находят степень сухости пара на выходе из сепаратора. Из уравнения  $x_3 = 1 - x_2$ , где  $x_2, x_3$  – степень сухости пара и воды соответственно, находят степень сухости по стороне воды и затем по ней определяют недостающие параметры.

Для автоматического расчета давления после клапана, при известной доле потерь в трубопроводе, использована модель обычного клапана и по уравнению (7) определяется давление на выходе (компонент *valve.for DNA*):

$$p_2 = p_1 (1 - k), \quad (7)$$

где  $p_1, p_2$  – давление на входе и выходе из клапана,  $k$  – величина потери давления в трубопроводе в долях.

#### **Моделирование тепловой схемы турбоустановки**

Процесс моделирования в *DNA* состоит из следующих этапов: 1) подготовка ТС и ее описание на языке входных параметров *DNA*; 2) компиляция программы; 3) моделирование; 4) анализ результатов; 5) модификация элементов и повтор моделирования.

Для оценки показателей эффективности было проведено моделирование ТС одной из модификаций турбоустановки К-300-240 на основе существующих и дополнительно разработанных компонентов. В первом случае с учетом утечки пара в концевых уплотнениях получены результаты моделирования для упрощенной тепловой схемы (рис. 1), которая состоит из элементов, модели которых присутствуют в первоначальной версии программного комплекса, за исключением модели питательного насоса с турбоприводом.

Во втором случае для уточнения результатов моделирования применены новые модели клапана и подогревателей, а также учтен тот факт, что подогреватели высокого давления состоят из собственно подогревателя, охладителя пара и охладителя дренажа, а ПНД-5 содержит охладитель пара. Поэтому для этих элементов разработаны так называемые макросы, схемы которых приведены на рис. 3–6.

В качестве примера приведено описание на языке входных параметров *DNA* подогревателя высокого давления модификации турбоустановки К-300-240 (рис. 2а) и соответствующая ему схема (рис. 2б).

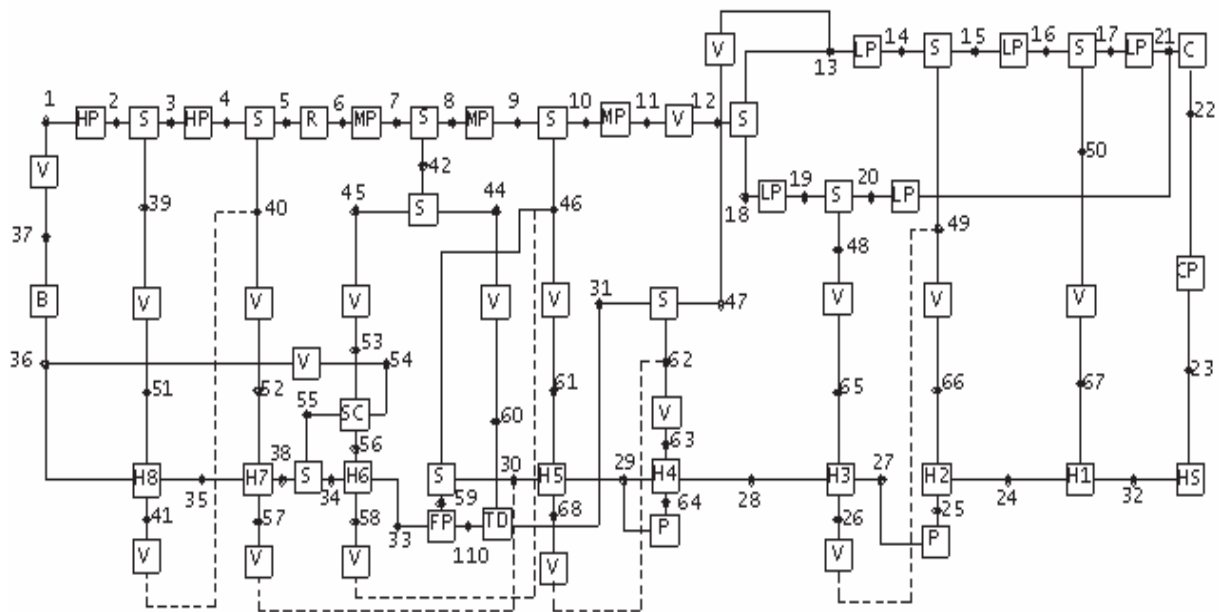


Рис. 1 – Упрощенная схема связей и компонентов тепловой схемы

*HP* – турбина высокого давления; *MP* – турбина среднего давления; *LP* – турбина низкого давления;  
*V* – клапан; *B* – котел; *C* – конденсатор; *S* – разделитель потока; *H1* – *H8* – регенеративные подогреватели; *HS* – подогреватель; *P* – насос; *CP* – конденсатный насос; *FP* – питательный насос; *TD* – турбопривод

```
STRUC Value_34 VALUE_01 50 127
ADDCO P 127 15.91
```

```
STRUC SPLIT1 SPLITTER 33 160 164
ADDCO M SPLIT1 164 -27.78
START H SPLIT1 164 731.85
```

```
STRUC CONDCOOLER1 HEATEX_1 161 51 164 165 304 0 0
ADDCO H CONDCOOLER1 51 778.91
ADDCO Q CONDCOOLER1 304 0
```

```
STRUC VALVEN1 VALUE_01 165 160
```

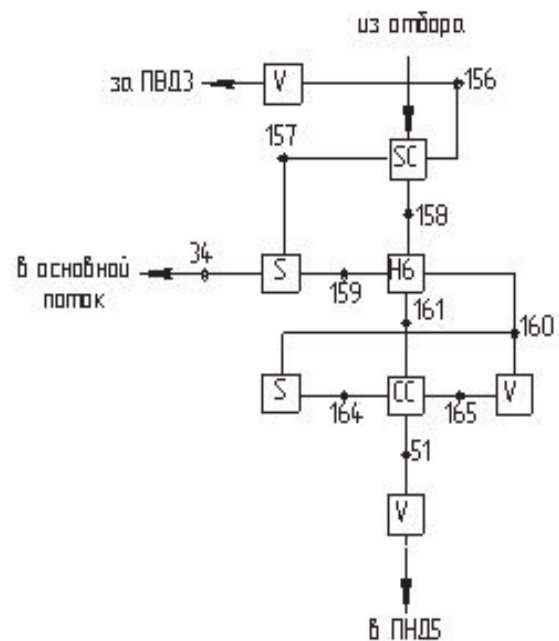
```
STRUC Preheat6 STECON_1 158 161 160 159 0 0
START X Preheat6 161 0
```

```
STRUC SPLIT2 SPLITTER 159 34 157
ADDCO M SPLIT2 157 -13.89
START H SPLIT2 157 1080.61
```

```
STRUC STEAMCOOLER2 HEATEX_1 127 158 157 156 310 0 0
ADDCO H STEAMCOOLER2 156 1547.02
ADDCO Q STEAMCOOLER2 310 0
```

```
STRUC VALVEN2 VALUE_01 156 36
```

```
STRUC Value_35 VALUE_01 51 162
```



а

б

Рис. 2 – Модель подогревателя:  
 а – на языке входных параметров *DNA*; б – ПВД-1;  
*SC* – охладитель пара; *CC* – охладитель дренажа

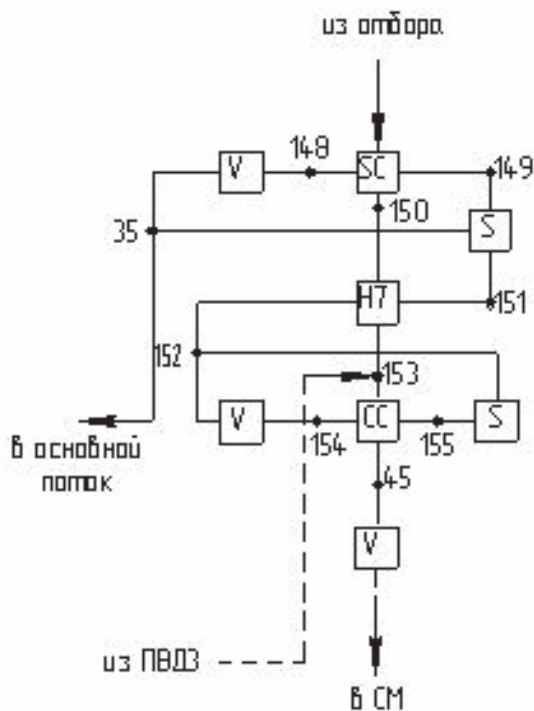


Рис. 3 – ПВД-2

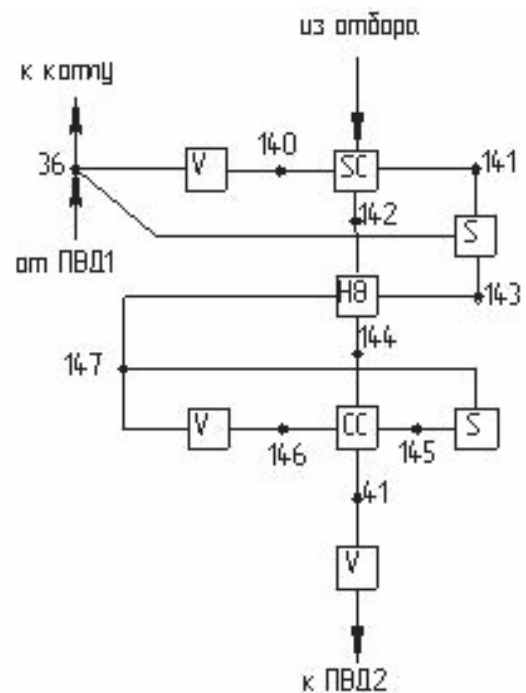


Рис. 4 – ПВД-3

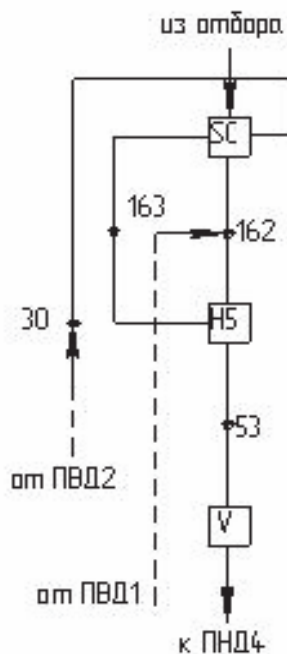


Рис. 5 – ПНД-5

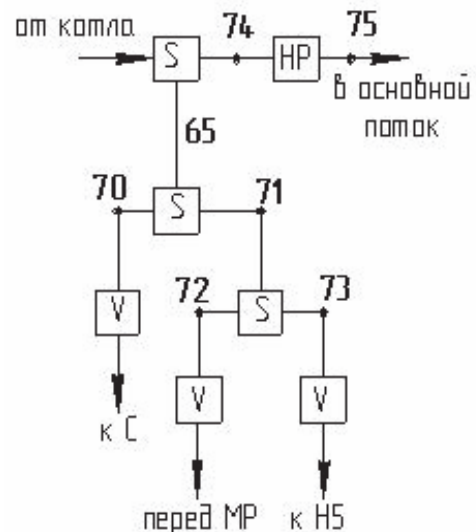


Рис. 6 – Схема утечек из концевых уплотнений

### Анализ результатов моделирования

В результате расчета были получены параметры пара на выходе из каждого отсека, параметры питательной воды на выходе из каждого регенеративного подогревателя, термический КПД цикла и мощность турбоустановки.

Исходя из табл. 1 можно сделать вывод, что результаты моделирования упрощенной схемы имеют большее отклонение от данных, полученных на ОАО «Турбоатом», по расчету ТС модификации турбоустановки К-300-240.

Результати моделювання

Параметри	Упрощенная схема	Расширенная схема
1 Температура воды за подогревателями, °С:		
– ПНД-1	49,33	49,50
– ПНД-2	89,40	89,64
– ПНД-3	107,58	108,92
– ПНД-4	124,81	126,08
– ПНД-5	154,24	153,33
– ПВД-1	199,61	199,89
– ПВД-2	241,54	247,89
– ПВД-3	271,50	279,20
2 Температура питательной воды, °С	275,27	282,56
3 Термический КПД	0,4689	0,4749
4 Мощность, кВт	350,541	350,461
5 Тепловая производительность, кДж/с	747610	737917

**Выводы**

1) Расширены функциональные возможности программного комплекса *DNA* путем внедрения новых компонентов элементов ТС ПТУ. Указанные компоненты могут быть использованы в дальнейших научных исследованиях и инженерных расчетах.

2) Правильность разработанных моделей подтверждается результатами моделирования, которые ближе соответствуют результатам, полученным на ОАО «Турбоатом».

3) Перспективой дальнейших исследований является создание графического интерфейса построения тепловых схем и ее элементов, а также разработка специального парсера, предназначенного для автоматического анализа структуры схемы и создания соответствующего файла данных для *DNA*.

4) Не менее важным является и дальнейшее исследование по разработке различных компонент ГТУ.

**Список литературы:** 1. *DNA* – an integrated open-source optimization platform for thermo-fluid systems [Electronic resource] / Leonardo Pierobon, Jorrit Wronski [et al] // 55th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 55). October 21-22, 2014; Proceedings. – Mode of access: URL: [http://www.sims55.aau.dk/SIMS55\\_Proceedings.pdf](http://www.sims55.aau.dk/SIMS55_Proceedings.pdf) – Last access: 03.02.2015. – Title from the screen. 2. *Elmegaard, B.* Simulation of Boiler Dynamics – Development, Evaluation and Application of a General Energy System Simulation Tool [Electronic resource]: Ph.D. Thesis: Report Number ET-PhD 99-02 / Brian Elmegaard. – Kgs. Lyngby : Technical University of Denmark, 1999. – Mode of access: URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.118.9595&rep=rep1&type=pdf> Last access: 10.01.2015. – Title from the screen.

**Bibliography (transliterated):** 1. Pierobon, L., and J. Wronski. "DNA - An integrated open-source optimization platform for thermo-fluid systems". 2014. 13 p. Web. 03 February 2015 <[http://www.sims55.aau.dk/SIMS55\\_Proceedings.pdf](http://www.sims55.aau.dk/SIMS55_Proceedings.pdf)>. 2. Elmegaard, B. "Simulation of Boiler Dynamics: Development, Evaluation and Application of a General Energy System Simulation Tool Department of Energy Engineering". 1999. Web. 10 January 2015 <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.118.9595&rep=rep1&type=pdf>>.

*Поступила (received) 12.02.15*