



УДК 629.7.048.7:681.14 УДК 629.7.048.7:681.14

**В. Я. Кондращенко**, д-р техн. наук.

Ин-т проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины  
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,  
тел. (044) 4241063, e-mail: ipme@ipme.kiev.ua)

### **Автоматическое построение алгоритмов моделирования технических систем сетевой топологии посредством логического вывода на функциональной схеме**

Описаны общие подходы и принципы автоматического построения моделирующих алгоритмов решения задач на этапе проектного анализа определенного класса технических систем на основе методов искусственного интеллекта. Введено понятие логической модели теплотехнической системы и ее элементов.

Описано загальні підходи та принципи автоматичної побудови моделюючих алгоритмів розв'язування задач на етапі проектного аналізу певного класу технічних систем на основі методів штучного інтелекту. Введено поняття логічної моделі теплотехнічної системи та її елементів.

*Ключевые слова:* структурное моделирование, автоматическая алгоритмизация.

**Классы систем и области их технического использования.** Для систем сетевой топологии, используемых в технике, характерна возможность представления отдельных частей рабочего процесса локализованными в функциональных элементах системы — агрегатах, обеспечивающих наполнение ветвей сетевой структуры. На концах веток расположены узлы, через которые ветки могут взаимодействовать между собой. Процессы в агрегатах (ветвях) и узлах могут иметь различную физическую природу, даже в пределах одной системы, но все они и система в целом подчиняются фундаментальным физическим законам: массы, энергии (с учетом преобразований ее формы), непрерывности среды, а также законам механики, термодинамики, электротехники и др.

Примером являются малые теплотехнические (холодильные, распределительные) системы, назначение которых — получение нужного количества рабочего тела (РТ) и переработка его до достижения заданных параметров с последующим распределением по потребителям. Конструктивно это — совокупность лопаточных машин (турбин, компрессоров,

Таблица 1. Модели параметров сечений системы

Сечение	Математическая	Информационная	Логическая
Узел	$[G, p, T, d]$	[3600; 8,2; *; *]	[1, 1, 0, 0]
Труба, канал, сопло	$[G, d]$	[3600; *]	[1, 0]
Ступень турбомашин (ТМ)	$[N, L]$	[32000; *]	[1, 0]
Вал ТМ	$[N, dL]$	[320 00; *]	[1, 0]

Примечание. Звездочкой обозначены величины, не определенные в текущем состоянии.

вентиляторов), различных теплообменных аппаратов, труб, регуляторов, клапанов и др. Они взаимодействуют между собой и окружающей средой посредством обмена потоками массы РТ, тепла, механической энергии. Это небольшие, но жизненно важные системы в машиностроении, авиации, транспорте, медицинских технологиях.

**Общие функции модели системы.** Цель моделирования — проектный анализ системы в широком диапазоне рабочих режимов, для чего модель должна реагировать на все функционально значимые параметры.

Функция модели: для заданной системы и ее граничных условий найти распределение температуры  $T$ , давления  $p$ , влаги  $d$  и ее фаз, расходов РТ  $G$  во всех трубах и каналах системы, определить обороты вала  $n$  и мощность  $L$  машинных агрегатов, тепловые потоки  $Q$  в теплообменниках. Сделать это необходимо на основе совместного использования характеристик элементов системы и согласования всех балансов — материальных, энергетических и кинематических.

**Модели элементов системы.** Описания элементов системы обычно представляют векторную зависимость параметров РТ на выходе  $\Pi_2$  от параметров на входе  $\Pi_1$ , граничных условий (ГУ) и конструктивных параметров (КП) [1]. Различные элементы имеют собственные структуры данных в граничных сечениях (табл. 1).

Для пассивных элементов, связанных только с передачей потока массы РТ, существует функция

$$\Pi_2 = \Pi (\Pi_1, G, \text{ГУ}, \text{КП}), \quad (1)$$

где  $\Pi_i = \{p_i, T_i, d_i\}$ . В активных элементах наблюдаются процессы преобразования и передачи механической и тепловой форм энергии, зависящие от оборотов вала турбомашин и определяющие потоки обмена механической энергией между валами турбомашин и тепловой энергией в теплообменниках. Функция активного элемента имеет вид

$$\Pi_2 = \Pi (\Pi_1, G, n, \text{ГУ}, \text{КП}), \text{ или } \Pi_2 = \Pi (\Pi_1, G, Q, \text{ГУ}, \text{КП}), \quad (2)$$

$$L = L (\Pi_1, \Pi_2, G, n, \text{ГУ}, \text{КП}). \quad (3)$$

В критических (звуковых) элементах системы (например, в соплах турбины) при  $p_2 < p_{кр}$  происходит насыщение расхода, определяемое функцией

$$G = G(\Pi_1, n, p_2, \text{КП}). \quad (4)$$

Пара логических моделей входного и выходного сечений для определенного элемента системы составляет его логический шаблон. Параметры представлены логическими значениями 1 или 0 в зависимости от определенности ( $= 1$ ), или неопределенности ( $= 0$ ) их физической величины. Назовем такую модель логической.

Формулы (1) — (4) являются разрешенными относительно неизвестных параметров на выходе математическими моделями функционирования элементов системы. Такая форма моделей соответствует распространенным теоретическим (формулам) и экспериментальным характеристикам, с помощью которых выполняется описание элементов. Для автономного (отдельно от системы) расчета элементов по формулам (1)—(4) достаточно одного неизвестного параметра. Недостающие переменные необходимо доопределить.

**Сетевые соотношения.** Сетевая структура формируется из элементов посредством:

- слияния или разделения потоков в узлах-тройниках системы;
- передачи механической энергии по валу ТМ между активными элементами;
- передачи тепловой энергии через разделительную поверхность теплообменного аппарата.

При этом действуют следующие условия баланса массы, энергии, целостности твердого тела (вала) и непрерывности среды РТ:

на стыке элементов

$$\Pi_{c1} = \Pi_{c2}, \quad G_{c1} + G_{c2} = 0; \quad (5)$$

на тройниках узла

$$\begin{aligned} P_{y1} &= P_{y2} = P_{y3} = P_{y0}, \\ G_{y1} + G_{y2} + G_{y3} &= 0, \\ d_1 G_{y1} + d_2 G_{y2} + d_3 G_{y3} &= 0, \\ i_1 G_{y1} + i_2 G_{y2} + i_3 G_{y3} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $P_{yi}$  — давление в конце  $i$ -й ветви, входящем в узел;  $G_{yi}$  — расходы  $i$ -й ветви в узловых координатах;  $i_i$  — энтальпия потока;

на валу машины

$$n_{ст1} = n_{ст2} = \dots = N_{стS}, \quad \sum_S L_{стi} = 0, \quad (7)$$

где  $n_{сти}$  — скорость вращения вала на  $i$ -й ступени машины;  $S$  — число ступеней вала;

на поверхности теплообменных аппаратов (ТО):

$$Q_{\Gamma} = Q_{\chi} = Q(\varepsilon, \mathbf{P}_{\Gamma 1}, \mathbf{P}_{\chi 1}, G_{\Gamma 1}, G_{\chi 1}), \quad (8)$$

где  $Q_{\Gamma}$  и  $Q_{\chi}$  — тепловой поток между горячей и холодной линиями ТО;  $\varepsilon$  — эффективность ТО.

**Условия использования формул (1) — (8).** Возможность использования формулы зависит от числа и состава известных и искомых переменных в ней. Разрешимость формул относительно их левых частей, безусловно, необходима.

Рассмотрим моделирование системы, которая является совокупностью указанных выше элементов. Все элементы системы перед расчетом можно разделить на две группы:

граничные — как правило пассивные, в которых хотя бы один край (узел) является границей системы;

внутренние — не касающиеся границы системы.

Можно ли применить одну из формул (1)—(4) для расчета какого-либо элемента системы? Для расчета внутренних элементов это невозможно, так как неизвестны их параметры. Для расчета граничных элементов некоторые параметры известны согласно условиям задачи. Возможны два случая:

1) список известных переменных — полный, т.е. полностью соответствует правой части формулы, и можно провести операцию расчета выходных параметров объекта;

2) список известных переменных — неполный, задача не корректна, но ее можно искусственно сделать корректной, воспользовавшись операцией доопределения.

**Операция доопределения параметров** создает возможность выполнения «элементных» задач при неизвестных значениях отдельных переменных в правой части формулы. Она заключается в присвоении отсутствующим переменным временных допустимых значений, подлежащих уточнению в дальнейших вычислениях.

**Операция передачи параметров, движение границы.** Полученные параметры выхода элемента передаются через стык или тройник соседнему элементу. После определения параметров входа соседнего элемента его можно считать новой граничной точкой системы. Граница изменилась, а в схеме системы появилась область определенных (возможно, не окончательно) элементов. Теперь можно продолжить поиск или создание пригодных к использованию формул элементов в рамках новой границы системы.

Для продвижения по системе могут быть использованы формулы (1) — (8) непосредственно или с доопределением. Выбор конкретной формулы зависит от текущего состояния определенности системы и выбранной приоритетности операций с возможными скачкообразными перемещениями текущей точки продолжения процесса. Этот процесс должен продолжаться до охвата определенностью всей системы с возможными нарушениями его монотонности в точках контрольных операций. Полный перечень всех элементарных операций приведен в табл. 2.

**Контрольные операции** выполняются для выявления возможного отсутствия баланса в сетевых соотношениях системы вследствие ранее выполненных доопределений. Поскольку каждое доопределение обуславливает возможность нарушения определенного баланса, требуется его проверка собственной контрольной операцией и, при необходимости, итерационное уточнение.

В контрольной операции балансовые формулы используются в ситуациях, когда все переменные в точке баланса определены на предыдущих шагах и с помощью формул можно определить погрешность баланса:

$$\text{для стыка элементов (труб)} \Delta G_c = G_{c1} + G_{c2};$$

$$\text{для тройников } \Delta G_b = G_{b1} + G_{b2} + G_{b3};$$

$$\text{для вала турбомашин } \Delta L_L = \sum_S L_{ст};$$

$$\text{для теплообменника } \Delta Q_L = Q_r - Q_x.$$

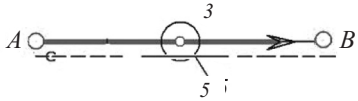
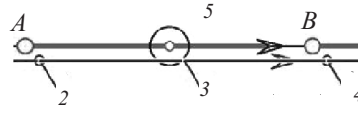
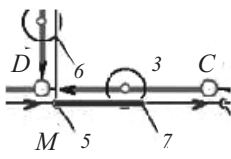
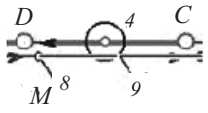
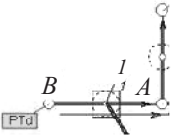
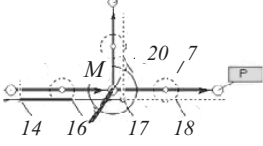
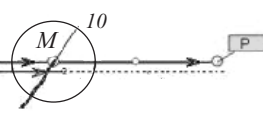
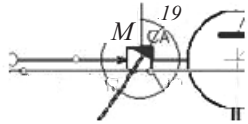
После оценки величины погрешности выполняется переход в точку доопределения (если погрешность велика) и уточнение переменной, затем движение границы продолжается.

Контрольная операция закрывает область итерационного процесса, открытую одной из предыдущих операций доопределения и имеющую близкую к контрольной операции открытую точку доопределения. Области итерационного процесса могут быть вложенными и последовательными, но не могут пересекаться.

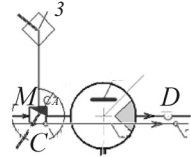
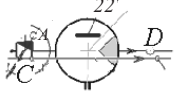
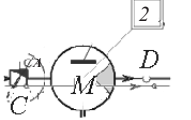
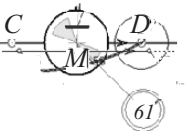

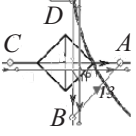
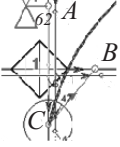
**Пути возможного решения (ПВР) задачи на схеме системы.** Каждый шаг процесса решения задачи заключается в выполнении одной из приведенных в табл. 2 операций. Выбор операции определяется в результате анализа текущей ситуации в системе относительно возможности ее выполнения. Для всех граничных на текущем шаге элементов анализируется состав известных и неизвестных параметров и в порядке определенных приоритетов оценивается возможность ее выполнения. Первая положительно оцененная операция принимается к выполнению.

После выполнения шага и перемещения границы проводится анализ новой текущей ситуации, выбор и выполнение нового шага. Процесс

Таблица 2. Элементарные шаговые задачи

Тип операции	Содержание	Схема
1	Найти расходы по перепаду давления: <i>A</i> и <i>B</i> — начало и конец ветви; 3 — <i>Id</i> ветви; 5 — номер шага	
2	Найти неизвестное давление в узле <i>B1</i> по давлению <i>A1</i> и расходу в ветви: <i>A</i> и <i>B</i> — начало и конец ветви; <i>A</i> , <i>B</i> — первый (второй) узлы по обходу; 2 — 4 — номер шага; 5 — <i>Id</i> ветви	
3 3С	Найти неизвестный расход и параметры смешивания в узел-тройнике: <i>C</i> и <i>D</i> — начало и конец ветви; <i>M</i> — узел; 3 — <i>Id</i> ветви; 7 — номер шага	
3А 3В	Передать расход через узел-стык: <i>C</i> и <i>D</i> — начало и конец ветви; <i>M</i> — узел; 4 — <i>Id</i> ветви; 9 — номер шага	
4	Доопределить расходы в ветви <i>A—B</i> : <i>A</i> и <i>B</i> — начало и конец ветви	
5	Оценить баланс расходов в тройнике: <i>M</i> — проверяемый узел; <i>A</i> , <i>B</i> — см. тип 4; 20 — номер шага	
5А	Оценить баланс расходов в узел-стыке: <i>M</i> — проверяемый узел; <i>A</i> , <i>B</i> — см. тип 4; 10 — номер шага	
5В	Оценить баланс расходов в сопле турбины: <i>M</i> — проверяемый узел; <i>A</i> , <i>B</i> — см. тип 4; 19 — номер шага	

Окончание табл. 2

Тип операции	Содержание	Схема
6	Доопределить степени расширения на турбине: $M$ — сопло; $CD$ — ветвь с турбиной; 3 — номер шага	
7	Найти мощность ступени турбомашины на ветви $CD$ и валу: $CD$ — ветвь с турбиной; 22 — номер шага	
8	Доопределить обороты вала турбины: $CD$ — ветвь со ступенью турбомашины; $M$ — точка вала ступени; 2 — номер шага	
9	Оценить баланс мощности на валу турбины: $CD$ — ветвь с одной ступенью турбомашины; $M$ — точка вала ступени; 61 — номер шага	
10	Доопределить температуру на входе хладагента теплообменника: $A$ — узел доопределения температуры; 12 — номер шага	
11	Тепловой расчет теплообменника: $AB$ — узлы с искомыми температурами; $CD$ — узлы с заданными температурами; 13 — номер шага	
12	Оценить погрешность температуры в узле $A$ : $A$ — узел оценки разрыва температуры; 62 — номер шага	

продолжается до тех пор, пока в схеме не останется неопределенных параметров хотя бы для одного элемента. Таким образом на схеме системы прокладывается, т.е. искусственно создается ПВР.

Построение ПВР не является монотонным процессом. Между каждой парой операций доопределение — контроль возникает процесс многократных возвратов, проходов по элементам итерационной области, уточнений и повторных контролей, продолжающийся до тех пор, пока не будет достигнута допустимая погрешность соответствующего баланса.

**Логика механизма создания ПВР.** Процесс построения ПВР для заданной схемы состоит из ряда шагов, выполняемых на основании логического анализа определенности текущего состояния системы, в результате чего определяется тип следующего шага и его место на схеме. Весь процесс можно представить как логический вывод на схеме системы. Таким образом, создается логическая модель (ЛМ) технической системы.

**Шаговый процесс распространения зоны определенности.** Совокупность сечений системы, помеченных на схеме значениями логических параметров, не равными нулю, определяет текущую зону определенности системы. Определенность параметра может быть окончательной или временной (при итерациях).

Входные данные задачи:

описание схемы в терминах узел-ветка, для узлов — имена  $Id$ ;  
логические ГУ на узлах системы.

Узлы ГУ определены полностью или частично. Совокупность ГУ определяет начальную зону определенности. Все остальные сечения полностью не определены, но известны логические шаблоны функций на ветках.

Рассмотрим возможность расширения зоны определенности посредством использования логических шаблонов функций отдельных элементов системы. Сформулируем следующие правила.

**Правило 1.** Если определенный узел  $A$  входит в ветви  $A—B$  (условие 1) и имеет ЛМ, которая совпадает с левой частью шаблона функции ветки (условие 2), и узел  $B$  является неопределенным (условие 3), то узел  $B$  получает в качестве ЛМ правую часть функции ветви  $A—B$  и становится определенным.

Правилом 1 сформулирован способ и общие условия расширения зоны определенности на один узел. Из этого правила следует:

процесс расширения зоны определенности является шаговым;  
выполнению каждого шага предшествует поиск схемы узлов и прилегающих к ним веток, соответствующих условиям 1—3 правила 1;  
для того чтобы начать процесс расширения, необходимо иметь в системе изначально определенные узлы в виде ГУ;



следующий шаг выполняется для конфигурации зоны неопределенности, полученной на предыдущем шаге;

расширение должно продолжаться до исчерпания всех неопределенных узлов.

**Правило 2.** Если шаблоны функции для входа и выхода элемента частично определены (условие 1) и после выполнения функции ее левая часть становится полностью определенной (как для трубы или сопла) (условие 2), то сечение, прилегающее к входу ветви, становится определенным.

**Правило 3.** Для функций, связывающих три сечения определенность двух входных функций приводит к определенности третьей и соответствующему расширению всей зоны определенности.

**Определение параметров, контроль балансов.** Граничные условия могут быть определены частично. Как правило, являются искомыми расходы  $G$  и обороты вала  $n$ . Отсутствуют также данные о распределении расходов в тройниках и о давлении за турбиной. Совпадение ЛМ сечений и шаблонов функций, необходимое для расширения зоны определенности, наблюдается не всегда, так как часто отсутствуют значения  $G$  и  $n$ , а также неизвестна степень расширения на турбине  $\pi$ . В этом случае необходима операция доопределения, т.е. введение приближенного значения неизвестного параметра, отсутствующего в модели сечения. Такие операции обозначим знаком  $\approx$  ( $\approx G, \approx n, \approx \pi$ ).

В результате операции доопределения может возникнуть нарушение материальных или энергетических балансов в модели системы. Каждая такая операция влияет на баланс определенного узла или вала. Для коррекции приближенных значений итерационно вводятся операции контроля балансов затрат узла  $\Delta G$  и мощности на валу  $\Delta L$ . Операции  $\approx$  открывают итерационные циклы, а операции  $\Delta$  — закрывают их. Большая погрешность баланса вызывает возврат к соответствующей операции доопределения. Для того чтобы циклы не пересекались и число их было минимальное, необходимо выполнять следующие правила.

**Правило 4.** Операция контроля типа  $\Delta$  закрывает ближайшую предыдущую операцию доопределения типа  $\approx$ .

**Правило 5.** Если на шаге существуют варианты операций, доступных для выполнения, выбирается один вариант в соответствии с такими приоритетами:

- 1) операция доопределения типа  $\approx Q''$ ;
- 2) операция доопределения типа  $\approx n''$ ;
- 3) операция контроля балансов типа  $\Delta G''$ ;
- 4) операция доопределения типа  $\approx \pi''$ ;
- 5) операции с функциями wheel, komr;
- 6) операции с функциями tube, jet;

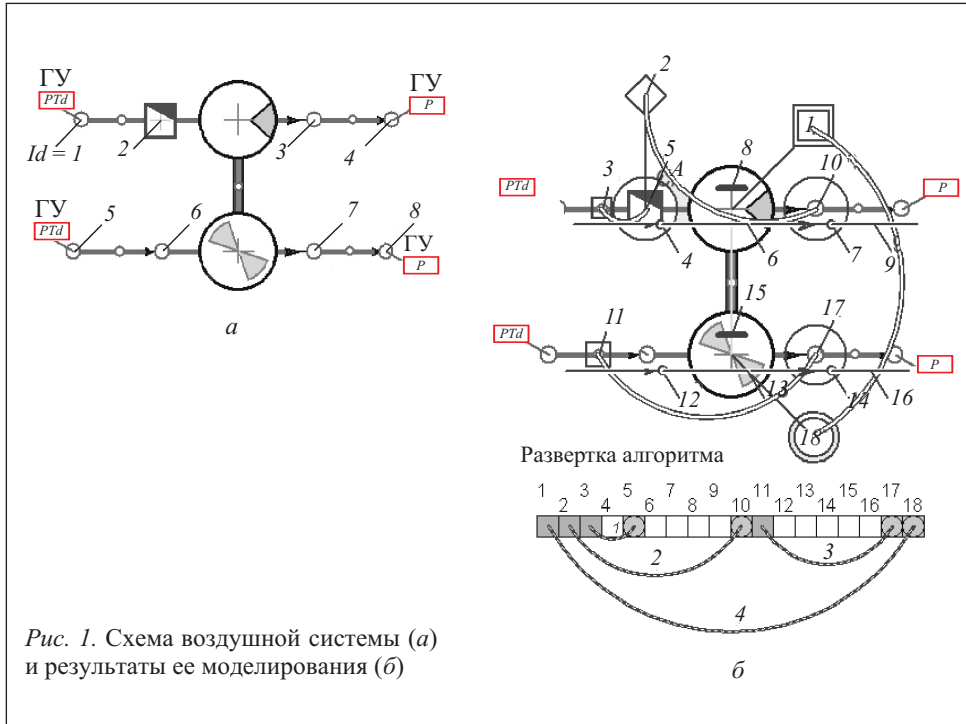


Таблица 3. Процесс логического моделирования системы

Шар	Идентификатор узла $ld$ $\Delta$																		Функция						
	1	5	4	8	$n$	$\pi$	G	П	G	$\Delta$	G	3	3	3	3	G	6	G		7	7	7	7	$\Delta$	$\Delta$
1	П	П																							$\approx n$
2																									$\approx \pi$
3																									$\approx G$
4	•																								tube (2)
4a																									jet
5																									$\Delta G$
6																									$Gn \rightarrow Gk$
7																									wheel-1
8																									wheel-2
9																									tube (4)
10																									$\Delta G$
11																									$\approx G$
12																									tube (2)
13																									$Gn \rightarrow Gk$
14																									komp-1
15																									komp-2
16																									tube (4)
17																									$\Delta G$
18																									$\Delta L$

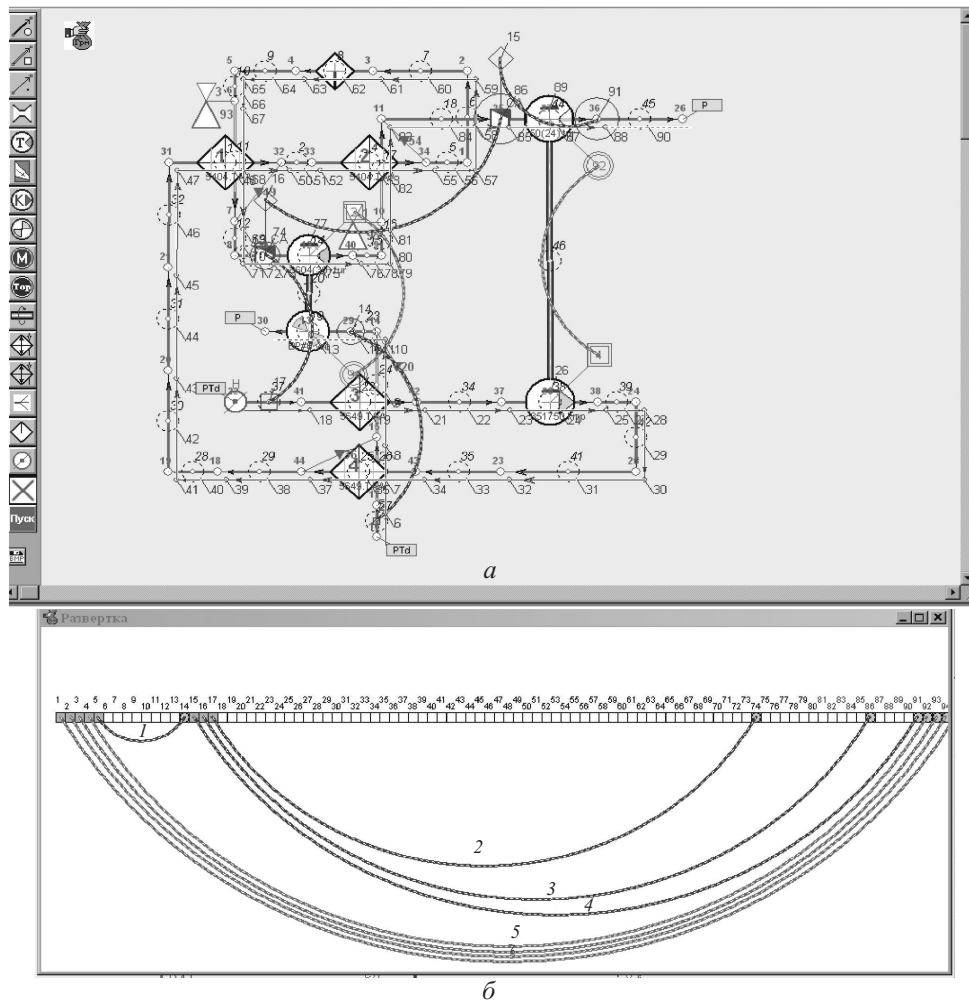


Рис. 2. Экранная форма программы (а) и пример моделирования реальной системы (б)

- 7) операции с функцией  $\text{trian}$ ;
- 8) операция определения типа  $\approx G''$ ;
- 9) операция контроля балансов типа  $\Delta L''$ .

**Функция и программная реализация ЛМ системы.** Функция ЛМ состоит в построении последовательности шагов по схеме системы при корректно заданных логических граничных условиях с использованием логических шаблонов функций элементов, что обеспечивает логическое значение 1 всех параметров для всех сечений системы, т.е. ее полную определенность.

Проследим по шагам процесс логического моделирования на точечной матрице (табл. 3) нелинейной системы, в которую включены участки прогонки, обозначенные знаком  $\otimes$ , и прямоугольные области, вложенность которых соответствует вложенности итерационных циклов. Рассматриваемая схема воздушной системы состоит из двух линий, соединенных между собой валом турбовентиляторного агрегата (рис. 1). Рабочее тело обеих линий — воздух. Граничные условия для четырех узлов заданы списком известных параметров. Турбина охлаждает воздух своей линией и отдает полученную энергию по валу на колесо вентилятора, который прокачивает воздух по второй линии. Таким образом, вентилятор загружает турбину.

Программная разработка выполнена для экспериментальной проверки концепции логического моделирования распространенного класса технических систем на представительном числе их традиционных и новейших схемных решений. Программа создана на языке логического программирования PDC Visual Prolog [3] с использованием визуальной технологии для построения схемы системы. Экранная форма программы представлена на рис. 2. Логическая программа выполняет построение шагового моделирующего алгоритма по введенной схеме системы с учетом структуры ГУ. Кроме отображения на экране в графическом интерфейсе алгоритм фиксируется в базе данных и выводится отдельным файлом для расчетной программы.

## Выводы

Предложенный способ позволяет автоматически формировать моделирующий алгоритм посредством логического вывода из формального логического описания схемы и конструктивных данных объекта моделирования на основе системы правил. В правилах зафиксированы в общем виде условия основных физических законов сохранения массы и энергии, непрерывности среды, а также общие характеристики основных рабочих процессов. Это делает систему моделирования инвариантной к конструктивным решениям объекта и способной самостоятельно настраиваться на изменения схемы и граничных условий системы. Пользователь работает только с описанием схемы и ее граничных условий. Корректность данных и ход решения задачи контролируются при построении и работе моделирующих алгоритмов.

Предложенный метод с математической точки зрения является нелинейным аналогом метода определяющих переменных с их автоматическим выбором, который работает непосредственно на схеме системы без построения общей системы нелинейных уравнений и без какого-либо математического представления задачи.

The author describes the general approaches and principles of automatic construction of modeling algorithms for solution of the problems at the project analysis stage of a certain class of technical systems based on the methods of artificial intelligence. The proposed method can be mathematically defined as the non-linear analogue method of defining variables with their automatic choice.

1. Кондращенко В. Я., Винничук С. Д., Федоров М. Ю. Моделирование газовых и жидкостных распределительных систем. — Киев : Наук. думка, 1990. — 184 с.
2. Кондращенко В. Я. Логическая модель, как механизм построения моделирующих алгоритмов. // Сб. тр. конф. «Моделирование-2008». 14—16 мая 2008 г. Т. 1. — Киев: Ин-т проблем моделирования в энергетике, 2008. — С. 88—93.
3. Адаменко А. Н., Кучуков А. М. Логическое программирование и Visual Prolog. — С-Пб. : БХВ-Петербург, 2003. — 992 с.

Поступила 13.06.12

*КОНДРАЩЕНКО Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, профессор, зав. отделом Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины. В 1964 г. окончил Московский авиационный ин-т. Область научных исследований — моделирование объектов проектирования в САПР, методы и модели в системах поддержки принятия оперативных решений, логическое программирование в проектировании.*

