

## МЕТОД СИНТЕЗА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А. А. Яковлев, к.т.н., доц. кафедры  
автоматизации производственных процессов Волг.ГТУ

В статье описан новый метод поискового конструирования двигателей внутреннего сгорания, в основе которого лежит графовая модель физического принципа действия, основанная на термодинамическом описании процессов взаимного преобразования видов энергии. Рассмотрен пример получения множества технических решений дизельного двигателя из наборов функционально-совместимых альтернатив.

Качество конструкторских разработок ДВС, во многом определяется средней производительностью труда проектировщиков на начальных, творческих стадиях проектирования. На этих этапах осуществляется постановка задачи, структурный синтез нового объекта и поиск концептуальных технических решений в рамках заданной структуры. Поэтому разработка методов, позволяющих повысить эффективность труда конструктора на начальных стадиях проектирования, является актуальной задачей.

Для решения подобных задач существует ряд подходов. В основе их лежат графовые модели, которые отражают физические процессы, происходящие в технических системах. Одним из подходов является функционально-физический метод поискового конструирования [1, 2]. Модель его физического принципа действия (ФПД) представляется в виде ориентированного графа:

$$L = (X, U), \quad (1)$$

где  $X \neq \emptyset$  — множество вершин, являющихся наименованиями физических объектов, обеспечивающих преобразование входных и выходных потоков (факторов);  $U = A \cup C$  — множество ребер, в качестве которых выступают множество  $A \subset U$  входных и  $C \subset U$  выходных потоков вещества, энергии или сигналов.

Для описания физических процессов, осуществляемых в ДВС, требуется уточнить модель (1), поскольку в ней не отражается очередность взаимодействий и маршруты перемещения рабочего тела. Кроме того, следует уточнить семантическую нагрузку вершин и ребер графа для данного класса устройств. С этой

целью используется понятийный аппарат феноменологической термодинамики, поскольку на ее основе дается описание работы большинства ДВС.

В предлагаемой модели ФПД *вершинами обозначаются места (так называемые характерные точки), где рабочее тело ДВС испытывает взаимодействие*, для которых в термодинамике дается единая формула аналитического выражения обобщенной работы

$$dQ = P dE, \quad (2)$$

где  $P$  — обобщенная сила или *интенсил*, под которым понимаются такие физические величины, как сила, скорость, давление, абсолютная температура, разность электрических потенциалов, химический потенциал и т. п.;  $E$  — обобщенная координата или *экстенсор*, под которым понимаются такие величины, как перемещение, количество движения, объем, энтропия, электрический заряд, масса вещества и т. п.

Семантика ребер определяется следующими соображениями. Любые взаимодействия рабочего тела всегда связаны с изменением экстенсора  $E$  (2), то есть условно сопоставляются с процессом переноса через контрольную поверхность термодинамической системы определенного количества  $dE$ . Для каждого взаимодействия существует характерный параметр  $E$ , который однозначно определяет с качественной и количественной стороны физические свойства рабочего тела (табл. 1) в той мере, в какой они связаны с данным взаимодействием [3].

Взаимодействия рабочего тела ДВС *представляются на графе ФПД ребрами с обозначением экстенсоров*, сопряженными с данными взаимодействиями. Кроме того, в процессе функционирования вещество рабочего тела ДВС может перемещаться внутри устройства, что обуславливает необходимость *введения* ребер второго типа — *маршрутных*, связывающих характерные точки.

Для многих процессов преобразования энергии в ДВС характерна периодичность взаимодействий и перемещения рабочего тела. *Граф ФПД в этом случае необходимо дополнять циклограммой для периодических взаимодействий и перемещений рабочего тела.*

Термодинамические взаимодействия рабочего тела

Взаимодействие	Наименование экстенсора	Обозначение
Механическое-объемное	Объем ( $V$ ), м <sup>3</sup>	$E_{\text{мех}}$
Термическое	Энтропия ( $S$ ), Дж/К	$E_{\text{тер}}$
Гидродинамическое	Объем ( $V$ ), м <sup>3</sup>	$E_{\text{гид}}$
Химическое	Химическая масса ( $m$ ), кг	$E_{\text{хим}}$
Электрическое	Электрический заряд ( $\psi$ ), Кл	$E_{\text{эл}}$
Перемещательное	Перемещение ( $X$ ), м	$E_{\text{пер}}$
Вращательное	Угол поворота ( $\phi$ ), рад	$E_{\text{вр}}$
Кинетическое перемещение	Количество движения ( $K$ ), Н·с	$E_{\text{кп}}$
Диффузионное	Диффузионная масса ( $m$ ), кг	$E_{\text{диф}}$

При разработке модели ФПД определяются характерные точки ДВС, последовательность и виды взаимодействий в этих точках, а также очередность прохождения их рабочим телом. Для всех элементов графа вводятся следующие обозначения.

Вершины помечаются литерой  $V$  с верхним и нижним индексами. Индексы обозначают состояние рабочего тела и порядковый номер характерной точки соответственно. Если рабочее тело последовательно проходит несколько состояний в одной характерной точке, то она может иметь составное обозначение. Ребра — взаимодействия помечаются литерой  $E$  с верхним и нижним индексами, которые обозначают род взаимодействия (табл. 1) и его порядковый номер. Ребра — потоки рабочего тела помечаются литерой  $I$ , которая имеет верхний и нижний индексы, обозначающие компоненты рабочего тела и порядковый номер ребра.

На рис. 1 с помощью данной модели представлены процессы взаимного преобразования энергии, происходящие в одном цилиндре четырехтактного дизельного двигателя. Для периодически осуществляемых взаимодействий и потоков рабочего тела составлена циклограмма (рис. 2).

Модель ФПД сосредотачивает внимание конструктора на особенностях физических процессов, которые определяют морфологию ДВС. С каждым ее элементом связаны конструктивные функции, выявленные на основе анализа таких абстракций термодинамики, как «термодинамическая система», «контрольная поверхность», «внешние» и «внутренние степени свободы» [4] (см. табл. 2).

Функция изменения направления потока разделена для одно-, двух- и трехмерного потоков ( $f_9^1, f_9^2, f_9^3$ ). Таким же образом разделена функция изменения поперечного сечения потока

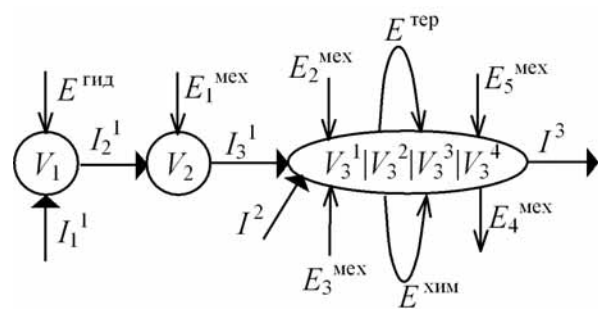


Рис. 1. Модель ФПД дизельного двигателя

$I^1$  — жидкое топливо;  $I^2$  — воздух;  $I^3$  — продукты сгорания;  $V_1$  — топливо в топливopодкачивающeм насосе;  $V_2$  — топливо в топливном насосе высокого давления;  $V_3^1$  — воздух во время такта всасывания;  $V_3^2$  — воздух во время такта сжатия;  $V_3^3$  — смесь воздуха с жидким топливом во время рабочего хода;  $V_3^4$  — вытaлкиваемые продукты сгорания

	$a-1$	1-2	2-3	3-4	4-b
$E_2^{\text{мех}}, I^2$					
$E_3^{\text{мех}}$					
$E_1^{\text{мех}}, I_3^1$					
$E_{\text{хим}}$					
$E_{\text{тер}}$					
$E_4^{\text{мех}}$					
$E_5^{\text{мех}}, I^3$					

Рис. 2. Циклограмма периодических взаимодействий и потоков рабочего тела

( $f_{11}^1, f_{11}^2, f_{11}^3$ ). Функция изменения сопротивления разделена на шесть групп:  $f_{10}^1$  — одно конкретное значение сопротивления;  $f_{10}^2$  — несколько значений, в том числе нулевое и равное бесконечности;  $f_{10}^3$  — изменение сопротивления от нуля до бесконечности;  $f_{10}^4$  — от нуля до некоторого значения;  $f_{10}^5$  — от одного некоторого

значения до другого;  $f_{10}^6$  — от некоторого значения до бесконечности. Кроме того, каждый род взаимодействия обладает специфическими особенностями, что обуславливает необходимость деления на группы функцию  $f_{12}$ .

При разработке технического решения с вершинами и ребрами модели ФПД сопоставляются наборы соответствующих им конструктивных функций. В табл. 3 приведены функции, связанные с вершинами, а в табл. 4 — с ребрами модели ФПД (см. рис. 1).

Поиск описаний конструктивных элементов для технического решения ДВС осуществляется в патентном фонде и других источниках научно-технической информации. Для элементов определяются наборы выполняемых конструктивных функций и описывается достигаемый результат. Фрагмент таблицы с описанием альтернативных элементов для рассматриваемого примера приведен в табл. 5.

По результатам этого этапа заполняется таблица технических решений (табл. 6), в которой атрибутами являются наименования элементарных функций из табл. 3 и 4. В качестве первичного ключа используется атрибут «альтернативы» из табл. 5. Каждая строка таблицы соответствует одному альтернативному элементу. Поля таблицы содержат значения предикатной функции  $P(f_i)$ , которая принимает истинное или ложное значение в зависимости от выполнения данным альтернативным элементом соответствующей функции  $f_i$ , специфицированной в заголовке таблицы.

В большинстве случаев конструктивные элементы выполняют разные наборы функций. Технические решения ДВС получаются путем комбинирования элементов так, чтобы получить из них наборы, выполняющие все специфицированные функции. Один из вариантов технических решений  $\{A_6^1, A_4^3, A_2^1, A_8^3, A_8^5, A_1^2, A_3^2, A_5^5, A_5^3, A_9^2, A_7^2, A_{11}^3\}$  выделен в табл. 6 штриховкой.

Таблица 2

### Элементарные функции конструктивных элементов

Элементарная функция	Элемент графа ФПД	Обозначение
<b>Обеспечение процесса преобразования</b>		
1. Обеспечение внутренних степеней свободы рабочего тела	Вершина (рабочее тело)	$f_1$
2. Обеспечение внутренней изоляции рабочего тела от нежелательных взаимодействий	То же	$f_2$
3. Обеспечение внешних степеней свободы рабочего тела	Вершина (контрольная поверхность)	$f_3$
4. Обеспечение необходимой внешней изоляции рабочего тела от нежелательных взаимодействий	То же	$f_4$
5. Обеспечение внутренней степени свободы для проводимого экстенсора	Ребро	$f_5$
6. Обеспечение внешней изоляции проводника экстенсора от нежелательных взаимодействий	То же	$f_6$
7. Объединение потоков	Ребро (гипердуга)	$f_7$
8. Разделение потоков	То же	$f_8$
<b>Управление процессом преобразования</b>		
9. Изменение направления потока	Ребро	$f_9^1, f_9^2, f_9^3$
10. Изменение сопротивления потоку	То же	$f_{10}^1, f_{10}^2, f_{10}^3, f_{10}^4, f_{10}^5, f_{10}^6$
11. Изменение поперечного сечения проводящей среды	— " —	$f_{11}^1, f_{11}^2, f_{11}^3$
12. Изменение специфических характеристик потока	— " —	$f_{12}$

Таблица 3

Список функций  $f_3$  и  $f_4$ 

№ п/п	Вершина	Взаимодействие	Описание функции	Обозначение
1	$V_3$	$E_4^{\text{мех}}$	Совершение полезной работы во время такта расширения (рабочий ход)	$1f_3(V_3)$
2	$V_3$	$E_3^{\text{мех}}$	Сжатие воздуха в цилиндре	$2f_3(V_3)$
3	$V_3$	$E_2^{\text{мех}}$	Впуск воздуха в цилиндр	$3f_3(V_3)$
4	$V_3$	$E_5^{\text{мех}}$	Выпуск отработавших газов	$4f_3(V_3)$
5	$V_2$	$E_1^{\text{мех}}$	Подача необходимой порции топлива через форсунку в камеру сгорания	$f_3(V_2)$
6	$V_1$	$E_1^{\text{гид}}$	Автоматическая подача топлива через фильтры к насосам высокого давления	$1f_3(V_1)$
7	$V_1$	$E_2^{\text{гид}}$	Ручная подача топлива	$2f_3(V_1)$
8	$V_3$	Гидродинамическое	Не допущение проникновения масла из картера в камеру сгорания	$1f_4(V_3)$
9	$V_3$	Гидродинамическое	Не допущение прорыва газов через зазоры между поршнем и цилиндром	$2f_4(V_3)$

Таблица 4

Список функций управления  $f_5 \dots f_{12}$ 

№ п/п	Ребро	Описание функции	Обозначение
10	$I_1^1$	Функция фильтра грубой очистки	$f_{12}(I_1^1)$
11	$I_1^1$	Функция впускного клапана топливного насоса	$f_{10}(I_1^1)$
12	$I_2^1$	Функция выпускного клапана топливного насоса	$f_{10}(I_2^1)$
13	$I_2^1$	Функция фильтра тонкой очистки	$f_{12}(I_2^1)$
14	$I_3^1$	Функция нагнетательного клапана	$1f_{10}(I_3^1)$
15	$I_3^1$	Функция иглы распылителя	$2f_{10}(I_3^1)$
16	$I_3^1$	Функция распылителя форсунки	$f_{11}(I_3^1)$
17	$I^2$	Функция забора воздуха	$f_{11}(I^2)$
18	$I^2$	Очистка воздуха	$f_{12}(I^2)$
19	$I^2$	Функция впускного клапана рабочего цилиндра	$f_{10}(I^2)$
20	$I^3$	Функция выпускного клапана рабочего цилиндра	$f_{10}(I^3)$
21	$I^3$	Уменьшение давления и скорости газа	$f_{12}(I^3)$

Таблица альтернатив

Альтернативы	Наименование	Источник информации	Функции	Технический результат
A11	Фильтр грубой очистки	RU № 2057383F02M 37/22	$F_{12}(I_1^1)$	Повышение эффективности очистки топлива
A12	Фильтр грубой очистки	RU № 2073471F02M 37/22	$F_{12}(I_1^1)$	Повышение надежности работы
A21	Топливо-подкачивающий насос поршневого типа	RU № 2083866F02M 59/30	$1F_3(V_3^5),$ $2F_3(V_3^5),$ $F_{10}(I_1^1),$ $F_{10}(I_2^1)$	Повышение надежности насоса
A22	Ручной насос	RU № 2176749F04B 9/14	$2F_3(V_3^5)$	Повышение надежности насоса
A31	Фильтрующий материал для жидких топлив	RU № 2195992B01D 39/10	$F_{12}(I_2^1)$	Снижение токсичности выхлопа автомобиля
A32	Топливный фильтр и способ его получения	RU № 2177073F02M 37/22	$F_{12}(I_2^1)$	Повышение эффективности очистки топлива
A33	Способ обработки дизельного топлива	RU № 2163979F02M 37/22	$F_{12}(I_2^1)$	Повышение эксплуатационных свойств дизельного топлива
A41	Топливный насос высокого давления	RU № 2164309F02M 41/00	$F_3(V_2^3),$ $1F_{10}(I_3^1)$	Повышение надежности насоса

Количество элементов в техническом решении ДВС может быть различным, что отличает данный метод от морфологического. В частном случае, когда элементы выполняют одинаковые наборы функций, данная таблица вырождается в морфологическую.

#### Выводы

Предлагаемый метод может использоваться, когда элементы выполняют разные наборы конструктивных функций, то есть когда разработка морфологических таблиц затруднена или невозможна. Это обуславливается тем, что модель физического принципа действия позволяет сформировать таблицу (см. табл. 6), из которой технические решения ДВС получают путем

стыковки функционально совместимых элементов.

Процесс разработки модели физического принципа действия, определения множества конструктивных функций и составления таблицы технических решений осуществляется по жестким правилам и практически не зависит от интуиции человека. Поэтому он по силам инженеру средней квалификации.

Метод может применяться как средство, повышающее эффективность труда конструктора на начальных этапах проектирования за счет снижения трудозатрат при выборе концепции ДВС, а также в качестве методического обеспечения для разработки систем автоматизированного проектирования.

Таблица технических решений

Альтернатива	Порядковый номер конструктивной функции																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$A_1^1$																					
$A_1^2$																					
$A_2^1$																					
$A_2^2$																					
$A_3^1$																					
$A_3^2$																					
$A_3^3$																					
$A_4^1$																					
$A_4^2$																					
$A_4^3$																					
$A_4^4$																					
$A_5^1$																					
$A_5^2$																					
$A_5^3$																					
$A_5^4$																					
$A_5^5$																					
$A_5^6$																					
$A_6^1$																					
$A_6^2$																					
$A_7^1$																					
$A_7^2$																					
$A_7^3$																					
$A_7^4$																					
$A_7^5$																					
$A_8^1$																					
$A_8^2$																					
$A_8^3$																					
$A_8^4$																					
$A_8^5$																					
$A_8^6$																					
$A_9^1$																					
$A_9^2$																					
$A_{10}^1$																					
$A_{10}^2$																					
$A_{10}^3$																					
$A_{10}^4$																					
$A_{11}^1$																					
$A_{11}^2$																					
$A_{11}^3$																					
$A_{11}^4$																					
$A_{11}^5$																					

Литература

1. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / Под ред. А. И. Половинкина. — М.: Радио и связь, 1981. — 344 с.  
 2. Koller R. Konstruktionsmethode fur den Maschinen, - Gerate - und Appa-rateban. — Berlin, Heidelberg, New York, 1976. — 430 p.

3. Вейник А. И. Термодинамика реальных процессов. — Минск: Навука і тэхніка, 1991. — 576 с.  
 4. Яковлев А. А. Инженерно-физический метод синтеза концептуальных технических решений преобразователей энергии: монография. — Волгоград: Гос. техн. ун-т. — 2004. — 160 с.