

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 658.512.2

*В. А. Воробьева, Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников*

### ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНОСТИ СИНТЕЗИРУЕМЫХ СТРУКТУР ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ\*

**Волгоградский государственный технический университет**

vassasennuyer@gmail.com, dkorobkin80@mail.ru, saf@vstu.ru, sk375@bk.ru

Данная работа посвящена автоматизации процесса синтеза физического принципа действия (ФПД) с целью повышения эффективности работы инженера, изобретателя, научного сотрудника и получения новых, оригинальных технических решений. Представлены методы оценки синтезируемых структур, т.е. способы определения их физической реализуемости и степени соответствия возможных конструктивных реализаций решаемой задаче, на основе использования теории графов, математического аппарата сетей Петри и сети Байеса.

*Ключевые слова:* физический принцип действия, физический эффект, сети Петри, сети Байеса.

*V. A. Vorobyeva, D. M. Korobkin, S. A. Fomenkov, S. G. Kolesnikov*

### REVIEW OF THE ASSESSMENT METHODS OF THE PHYSICAL PRINCIPLE OF TECHNICAL SYSTEMS OPTIMALITY

**Volgograd State Technical University**

This work is devoted to Automating a process of synthesis the physical principle of action (PF) in order to increase the efficiency of the engineer, inventor, researcher and obtain new interesting technical solutions. Presented evaluation methods synthesized structures, methods for determining their physical feasibility and the extent possible design implementations through the use of graph theory, the mathematical formalism of Petri nets and Bayesian network.

*Keywords:* the physical principle of action, physical effect, Petri nets, Bayesian network.

#### Введение

В современных условиях повышение эффективности, продуктивности творческого труда в сфере науки и техники предполагает обязательное усиление информационной составляющей этого труда (наряду с факторами материально-технического, организационного характера). Общемировой тенденцией становится перемещение все большей доли труда из области переработки вещества и энергии в область добывания, хранения, переработки и передачи информации. Поэтому проблема удовлетворения потребности в информации ученых-исследователей из фундаментальных и прикладных наук, специалистов-практиков (инженеров) из различных отраслей экономики чрезвычайно актуальна.

Известен ряд подходов к реализации начальных этапов проектирования технических систем (ТС), среди них одним из наиболее пер-

спективных является подход, связанный с привлечением структурированных физических знаний в форме физических эффектов (ФЭ) для автоматизированного формирования и выбора физического принципа действия (ФПД) разрабатываемой ТС. Успешное решение задачи выбора ФПД дает большой экономический эффект, вызывает более заметный технический прогресс в рассматриваемой области и обеспечивает разработку изделий с большим сроком морального старения по сравнению с результатами, полученными на этапах выбора технического решения или параметров ТС.

Алгоритмы реализации автоматизированного синтеза ФПД на основе данных моделей описания ФЭ представлены в [1–5], где под физическим принципом действия ТС понимается структура совместимых и объединенных ФЭ, обеспечивающих преобразование заданного начального входного воздействия  $A_1$  в заданный конечный результат (выход)  $C_n$ . Выделяют элементарные структуры ФПД, которые основаны

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-07-97032 р\_поволжье).

на одном ФЭ. Под ФПД понимают ориентированный граф, вершинами которого являются наименования физических эффектов, а ребрами входные  $A$  и выходные  $C$  потоки вещества, энергии и сигналов. Большинство ФПД изделий имеют сложную структуру, в которой используется одновременно несколько различных ФЭ. Синтез таких структур основывается на следующем понятии совместимости ФЭ. Два последовательно расположенных ФЭ ( $A_i, B_i, C_i$ ), ( $A_{i+1}, B_{i+1}, C_{i+1}$ ) считаются совместимыми, если результат воздействия  $C_i$  предыдущего ФЭ эквивалентен входному воздействию  $A_{i+1}$  последующего ФЭ. Два совместимых ФЭ могут быть объединены, при этом входное воздействие  $A_i$  будет вызывать результат  $C_{i+1}$ . Под эквивалентностью воздействий понимается: 1) качественная совместимость по совпадению наименований входов и выходов; 2) качественная совместимость по совпадению качественных характеристик входов и выходов; 3) количественная совместимость по совпадению значений (диапазонов) физических величин.

Анализ работ, связанных с использованием структурированных физических знаний [6–10] в виде физических эффектов (ФЭ) на начальных этапах проектирования технических систем (ТС), показал ряд проблем, тормозящих эффективное применение и широкое внедрение данных методов:

- сильные ограничения на типы получаемых структур, определяемые простотой алгоритмов синтеза ФПД;
- несовершенство методов и средств представления результатов синтеза;
- сложность оценки адекватности синтезированных структур ФПД решаемой задаче.

Важной задачей является представление результатов синтеза структур ФПД. Наиболее распространена выдача цепочек ФЭ в порядке их получения. Актуальной проблемой автоматизации выбора ФПД ТС [4] является разработка методов оценки синтезируемых структур, то есть способов определения их физической реализуемости и степени соответствия их возможных конструктивных реализаций решаемой задаче.

#### Методы исследования

Проблему оценки оптимальности сетевых структур физических принципов действия предлагается решать посредством построения множества критериев на структурах ФПД (необходимо ввести дополнительное поле ФЭ – критерий, отражающий оптимальность исполь-

зования в цепочке ФПД данного ФЭ). На основе этой характеристики ФЭ будут присваиваться коэффициенты (веса) [7]. В таком случае задача выбора наиболее оптимальных ФПД сводится к задаче комбинаторной оптимизации (чем меньше суммарный вес полученного ФПД, тем ближе к оптимальности данная цепочка ФПД). Значение критерия веса может быть получено из знаний о стоимости объекта, с помощью которого реализуется ФЭ, а также его сложности или частоты встречаемости в реализациях. В данной работе исходим из двух предположений:

- 1) веса получены и используются их дискретные значения для нахождения оптимальной цепочки ФПД среди имеющегося множества ФПД;
- 2) веса ФЭ необходимо получить.

В рамках решения поставленной задачи было принято решение использовать теорию графов, математический аппарат сетей Петри и сети Байеса.

#### Использование теории графов

Если известны веса каждого ФЭ, то тогда задача нахождения оптимальной цепочки ФПД сводится к решению задачи нахождения кратчайшего пути на взвешенном графе. Задача нахождения кратчайшего пути или задача коммивояжера имеет множество алгоритмов решения, многие из которых реализованы в различных программных пакетах.

Однако данные алгоритмы имеют некоторый недостаток применительно к поставленной задаче. Допустим, имеются две цепочки ФПД, связывающих заданные вход и выход, одинакового веса. Возникает вопрос: как определить, какая из цепочек ФПД является наиболее оптимальной? Будем считать оптимальной цепочку ФПД с наименьшим количеством вершин. Для выбора оптимальной цепочки ФПД из двух и более равных по весу и по количеству вершин цепочек введем понятие «равномерности»:

- 1) возьмем среднее арифметическое значений весовых коэффициентов каждого ребра найденного кратчайшего пути;
- 2) найдем разницу между значениями весовых коэффициентов и среднего арифметического;
- 3) сложим сумму полученных значений. Данную сумму назовем коэффициентом равномерности.

Таким образом, при выборе из двух ФПД одинаковой длины и веса будем учитывать данный коэффициент равномерности. Чем меньше коэффициент равномерности, тем ближе к оптимальному полученный кратчайший путь или ФПД.

Для реализации данного функционала можно использовать программный пакет Graphviz (<http://www.graphviz.org/>). Этот пакет используется для автоматического построения графов, а также содержит необходимые библиотеки для поиска кратчайшего пути.

Программы из пакета Graphviz, отображающие графы, получают описания графов в виде текста на простом языке и создают диаграммы в нескольких форматах (Graphviz также поддерживает формат GXL-диалект XML).

Этот пакет используется для автоматического рисования графов, что может оказаться важным в инженерии программ, базах данных и веб-дизайне, для создания сетей, а также для создания визуальных интерфейсов во многих других областях. В Graphviz есть множество полезных возможностей, доступных при построении конкретных диаграмм, например, можно выбрать цвет, шрифты, расположения узлов, стиль линий, гиперссылки и задать формы используемых элементов графа.

Также в пакете Graphviz содержатся необходимые библиотеки для поиска кратчайшего пути: libagraph поддерживает программирование операций с графами, предоставляя для этого средства работы с графами в памяти и средства чтения и записи файлов, содержащих графы. Для графов, узлов и ребер можно указывать атрибуты, которые может определять программист, и пары строк имя-значение. Графы состоят из узлов, ребер и вложенных подграфов. Библиотека libpathplan содержит функции поиска кратчайшего пути между двумя точками в простом многоугольнике.

### Использование сетей Петри

Другим возможным вариантом решения задачи нахождения оптимального пути (оптимальной цепочки ФПД) является использование сетей Петри. Использование сетей Петри актуально, так как существующие пакеты реализации сетей Петри (в частности, пакет CPN Tools <http://cpntools.org/>) содержат необходимый функционал для моделирования и анализа созданных сетей.

Анализ сложных систем на базе сетей Петри можно выполнять посредством имитационного моделирования систем массового обслуживания (СМО), представленных моделями сетей Петри. При этом задаются входные потоки заявок и определяется соответствующая реакция системы. Выходные параметры СМО рас-

считывают путем обработки накопленного при моделировании статистического материала.

Возможен и другой подход к использованию сетей Петри для анализа объектов, исследуемых на системном уровне. Он не связан с имитацией процессов и основан на исследовании таких свойств сетей Петри, как ограниченность, безопасность, сохраняемость, достижимость, живость. Достижимость характеризуется возможностью достижения маркировки  $M_j$  из состояния сети, характеризуемого маркировкой  $M_k$ .

В сетях Петри существует понятие графа достижимости. Предположим, что сетевую цепочку ФПД можно представить в виде сетей Петри и что построенный граф достижимости для данной сетевой цепочки позволит выводить все возможные достижимые (т. е. в принципе возможные, а также оптимальные и имеющие практическое применение) линейные цепочки. Дерево достижимости можно использовать для поиска всех возможных путей от заданного входа ФЭ до заданного выхода ФЭ.

В сетях Петри вводятся объекты двух типов: динамические – изображаются фишками (маркерами) внутри позиций – и статические – им соответствуют вершины и дуги сети Петри. Отображение взаимодействия элементов системы во времени и пространстве осуществляется в виде движения маркеров через позиции и переходы сети Петри [11]. Потенциально в сетях Петри существует механизм задания весов для решения задачи нахождения оптимальной цепочки ФПД из множества найденных.

Для решения поставленной задачи необходимо определить применяемый тип сети Петри. Временной сетью Петри будем называть пятерку  $N = (P, T, F, W, D)$ , где  $P = \{p\}$  – конечное множество позиций;  $T = \{t\}$  – конечное множество переходов;  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  – конечное множество дуг;  $W : F \rightarrow N$  кратность дуг;  $D : T \rightarrow N$  времена срабатывания переходов;  $N$  – множество натуральных чисел [11]. Таким образом, временная сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, дополненный характеристиками дуг и вершин, представленными натуральными числами. Данную временную характеристику можно использовать как вес, и тогда для нахождения оптимальной ФПД необходимо свести задачу к нахождению самой быстрой цепочки, т. е. пути с наименьшей суммарной временной характеристикой. В CPN Tools существует библиотека, реализующая данный функционал.

Однако вопрос нахождения оптимальной цепочки ФПД из найденных равновесных (в данном случае равных путей по времени срабатывания) остается открытым.

### Использование сети Байеса

Для нахождения значений весов ФЭ предлагается применение наивного байесовского классификатора. Байесовские сети представляют собой графовые модели вероятностных и причинно-следственных отношений между переменными в статистическом информационном моделировании. В машинном обучении под классификацией понимают задачу определения категории, к которой принадлежит ранее не встречавшийся образец, на основании обучающего множества, для элементов которого эти категории известны. Таким образом, можно отнести имеющуюся цепочку ФПД к некоторой категории сложности или оптимальности. Обучающая выборка получается на основе экспертных оценок.

Главным инструментом машинного обучения является теорема Байеса:

$$p(\theta|D) = \frac{p(\theta)p(D|\theta)}{p(D)},$$

где  $D$  – обучающая выборка (данные);  $\theta$  – параметры модели для обучения (в нашем случае  $D$  – оценки, выставленные экспертами полученным ФПД;  $\theta$  – ФЭ);  $p(\theta|D)$  – распределение вероятностей параметров модели после обучения (апостериорная вероятность);  $p(D|\theta)$  – вероятность данных при условии зафиксированных параметров модели [12, 13].

Так как элементы ФЭ в цепочке ФПД не влияют друг на друга, то можно использовать одномерную независимую Байесовскую модель, а именно наивный байесовский классификатор. За счет предположения независимости параметры каждого атрибута могут быть обучены отдельно, и это значительно упрощает обучение (особенно когда количество атрибутов велико).

Если ввести несколько классов оптимальности ФПД (или обратное – несколько классов сложности ФПД), то можно обучить модель разделять массив ФЭ по принадлежности к данным классам.

Обучение: пусть задан набор ФПД, которые уже распределены (вероятностно распределены) по классам  $C_j$ , задан массив ФЭ. Для обучения такого классификатора необходимо настроить вероятности  $p(W_t|C_j)$ , где  $W_t$  – физиче-

ский эффект;  $C_j$  – класс, т. е. подсчитать оценки вероятностей того, что тот или иной ФЭ относится к тому или иному классу оптимальности.

Для реализации Байесовской сети и ее обучения можно использовать пакет `bnlearn`. Пакет позиционируется как инструмент работы с байесовскими сетями и предоставляет возможности настройки параметров. Основная ценность `bnlearn` – настройка структуры. Пакет `bnlearn` содержит набор алгоритмов. Каждый алгоритм имеет собственную R-функцию, название которой соответствует указанному в скобках. Все алгоритмы работают только в случае, когда либо все переменные дискретны (представлены факторами в R), либо все переменные вещественны (представлены числовыми массивами). На вход алгоритму обучения следует подавать наборы значений переменных на обучающей выборке в виде фрейма данных (`data frame`).

### Выводы

Был проведен анализ подходов к оценке синтезируемых структур физического принципа действия технических систем на основе использования теории графов, математического аппарата сетей Петри и сети Байеса. Указаны преимущества каждого из подходов, программные средства, позволяющие решить поставленную проблему, и сложности, возникающие в результате использования предложенных методов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдов, Д. А. Автоматизированное проектирование линейных структур физических принципов действия технических систем / Д. А. Давыдов, С. А. Фоменков // *Машиностроитель*. – 2002. – № 2. – С. 33–35.
2. Яровенко В. А., Фоменков С. А. Формирование интегрированной системы обработки структурированных физических знаний с применением мультиагентного подхода // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2009. Т. 12. № 7. С. 126–128.
3. Фоменков, С. А. Программный комплекс представления и использования структурированных физических знаний / С. А. Фоменков, Д. М. Коробкин, А. М. Дворянкин // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2012. – № 11. – С. 24–28.
4. Коробкин, Д. М. Программный комплекс поддержки процесса формирования информационного обеспечения фонда физических эффектов / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2009. – № 87. – С. 306–310.
5. Сальникова Н. А. Структурирование физических знаний в поисковом конструировании технических систем // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2013. Т. 17. № 14(117). С. 118–122.
6. Фоменков, С. А. Автоматизированный информационный поиск физических эффектов / С. А. Фоменков,

Д. А. Давыдов, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 7. – С. 30–34.

7. *Коробкин, Д. М.* Модель представления структурированной предметной информации в виде физических эффектов в тексте на естественном русском языке / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 7. – С. 17–21.

8. *Фоменков, С. А.* Информационное наполнение баз данных по физическим эффектам / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 6. – С. 60–62.

9. *Фоменков, С. А.* Автоматизация процедур формирования информационного обеспечения для систем концептуального проектирования, использующих структурированные физические знания в форме физических эффек-

тов / С. А. Фоменков, А. В. Петрухин, С. Г. Колесников // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 1. – С. 26–29.

10. Фоменков С. А., Колесников С. Г., Коробкин Д. М. Формирование и структура баз данных по физическим эффектам // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 18. № 22 (125). С. 153–157.

11. *Кириличев, Б. В.* Моделирование систем : учеб. пособие / Б. В. Кириличев. – М. : МГИУ, 2009. – С. 134–135.

12. *Гмурман, В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшее образование, 2005 с.

13. *Гнеденко, Б. В.* Курс теории вероятностей : учебник / Б. В. Гнеденко. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – С. 386–387.