

Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, И. А. Кобликов, М. А. Фоменкова
**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ
СИНТЕЗИРУЕМОГО ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ***

Волгоградский государственный технический университет
dkorobkin80@mail.ru

Проведен анализ подходов к оценке синтезируемых структур физического принципа действия (ФПД) технических систем на основе использования теории графов, математического аппарата сетей Байеса и Петри, позволяющих отобрать из всего множества полученных цепочек ФПД наиболее эффективные с точки зрения их практической реализуемости.

Ключевые слова: физический эффект, физический принцип действия, теория графов, сеть Байеса, сети Петри.

D. M. Korobkin, S. A. Fomenkov, I. A. Koblikov, M. A. Fomenkova
**METHODS OF EVALUATE THE PRACTICAL IMPLEMENTATION
OF SYNTHESIZED PHYSICAL OPERATION PRINCIPLE**

Volgograd State Technical University

The application of the approaches presented in this paper as to evaluation of the synthesized structures of the physical operating principle (POP) of the designing technical systems on the basis of use of the graph theory and the mathematical tools of has shown the increase in the designer performance as compared to the use of the existing systems of the POP synthesis due to ignoring the knowingly unrealizable POP structures.

Keywords: физический эффект, physical operating principle, graph theory, Petri nets, Bayesian networks.

© Коробкин Д. М., Фоменков С. А., Кобликов И. А., Фоменкова М. А., 2015

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-09142-а); РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 15-47-02383 р_поволжье_а).

Введение

В настоящее время одной из важнейших задач является создание новых высокоэффективных технических систем (ТС). Известен ряд подходов к реализации начальных этапов проектирования ТС, среди них одним из наиболее перспективных является подход, связанный с привлечением структурированных физических знаний в форме физических эффектов (ФЭ) [1, 2] для автоматизированного формирования и выбора физического принципа действия (ФПД) [3–5] разрабатываемой ТС.

Анализ работ [6–9], связанных с использованием физических эффектов на начальных этапах проектирования ТС, показал ряд проблем, тормозящих эффективное и широкое внедрение данных методов, в том числе проблему оценки синтезируемых структур, то есть способов определения их физической реализуемости.

Таким образом, актуальной проблемой автоматизации выбора ФПД ТС является разработка методов оценки синтезируемых структур, то есть способов определения их физической реализуемости и степени соответствия их возможных конструктивных реализаций решаемой задаче.

Алгоритм синтеза структур ФПД

Под физическим принципом действия понимается структура совместимых и объединенных ФЭ, обеспечивающих преобразование заданного входного(ых) воздействия(ий) в заданное выходное, при этом два последовательно расположенных ФЭ $W_i = (A_i, B_i, C_i)$ и $W_{i+1} = (A_{i+1}, B_{i+1}, C_{i+1})$ считаются совместимыми относительно базовой модели описания ФЭ, если выходное воздействие некоторого ФЭ цепочки C_i эквивалентно входному воздействию последующего ФЭ A_{i+1} , то есть [10]:

характер выхода C_i совпадает с характером входа A_{i+1} ;

наименование выхода C_i совпадает с наименованием входа A_{i+1} ;

качественные характеристики выхода C_i совпадают с качественными характеристиками входа A_{i+1} . При этом совпадение осуществляется путем наложения И–ИЛИ дерева входного воздействия на И–ИЛИ дерево выходного воздействия;

если выход C_i и вход A_{i+1} – параметрические, то совпадают физические величины, характеризующие C_i и A_{i+1} .

Перечисленные условия совместимости входного и выходного воздействий реализованы

в виде правил сравнения вектора кодировки выхода C_i и вектора кодировки входа A_{i+1} .

Кроме того, используется следующее правило определения совместимости ФЭ: в случае, когда $(i+1)$ ФЭ имеет несколько входов (A_{i+1}), совмещение выхода C_i происходит с любым из входов A_{i+1} , удовлетворяющим условию эквивалентности с C_i .

Методы синтеза и оценки физической реализуемости ФПД

Проблему оценки реализуемости предлагается решать посредством построения множества критериев на структурах ФПД (необходимо ввести дополнительное поле ФЭ – критерий, отражающий практическую реализуемость данного ФЭ). На основе этой характеристики будут присваиваться коэффициенты (веса) ФЭ. В таком случае задача выбора наиболее оптимальных ФПД сводится к задаче комбинаторной оптимизации (оценка суммарного веса: чем меньше суммарный вес полученного ФПД, тем проще реализуема, а значит оптимальнее 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 [11, 12]. В данной работе исходим из предположения, что веса получены и используются их дискретные значения для нахождения оптимальной цепочки ФПД среди имеющегося множества ФПД.

В рамках решения поставленной задачи было принято решение использовать теорию графов [13], математический аппарат сетей Байеса [14] и сетей Петри [15, 16].

Теория графов

Рассмотрим математическую постановку задачи качественного синтеза ФПД. Пусть имеется некоторое конечное множество $W = \{W_i | i = 1, \dots, N\}$ физических эффектов базы данных по ФЭ. Сопоставим этому множеству с ориентированным графом [13]:

$$G(V, E), \quad (1)$$

где V – конечное непустое множество вершин графа; E – множество дуг графа.

Ребро e_{ij} существует тогда и только тогда, когда эффект W_i совместим с W_j ($1 \leq i, j \leq N$).

ФПД – это путь $v_1, e_{1,2}, v_2, e_{2,3}, \dots, e_{k-1,k}, v_k$ (так как все ребра графа G имеют кратность 1, допустимо обозначение $v_1, v_2, v_3, \dots, v_k$) в гра-

фе G длины $k-1$ (k – налагаемое пользователем ограничение на длину искомого ФПД). Путь $v_1, v_2, v_3, \dots, v_k$ определяется заданием начального воздействия A_1 (воздействие A_1 эквивалентно входному воздействию эффекта W_1) и результирующего воздействия C_k (выход эффекта W_k эквивалентен воздействию C_k). Задача синтеза ФПД изделий состоит в нахождении всех таких путей в графе G , удовлетворяющих заданным ограничениям.

Словесное описание предлагаемой методики построения линейных структур ФПД можно представить следующим образом:

1) загружаются векторы смежности возможных переходов. Набор векторов формируется на основе условий совместимости физических эффектов и перестраивается при изменении состава эффектов в БД или при изменении компонент одного из ФЭ;

2) задается длина цепочки синтеза ФПД;

3) задаются критерии начального воздействия A_1 и критерии результирующего воздействия C_k ;

4) на основании векторов смежности строится структура ФПД.

Далее для выбора наиболее оптимальной цепочки ФПД из всего множества полученных предлагается использовать следующий алгоритм: если известны веса каждого ФЭ, отражающие соответствующую оптимальность 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, имеется две цепочки ФПД, связывающих заданные вход и выход, одинакового веса. Возникает вопрос: как определить, какая из цепочек ФПД является наиболее оптимальной? Будем считать наиболее оптимальной цепочку ФПД с наименьшим количеством вершин. Для выбора наиболее оптимальной цепочки ФПД из двух и более равных по весу и по количеству вершин цепочек введем понятие «равномерности»:

$$\text{Вес всех ФПД} \quad w(y) = \sum_{i=1}^{n-1} w(v_i, v_{i+1}), \quad (2)$$

где $\langle v_1, v_2, \dots, v_i \rangle$ – последовательность вершин в цепочке ФПД; $l(y)$ – длина цепочки ФПД (количество ФЭ в цепочке).

Для всех ФПД с одинаковым весом:

$$\text{if } l(y) < l(POP_{\min}) \text{ then } POP_{\min} = y, \quad (3)$$

где POP_{\min} – наиболее оптимальная цепочка ФПД.

Для всех ФПД с одинаковым весом и длиной:

1) возьмем среднее арифметическое значений весовых коэффициентов каждого ребра найденного кратчайшего пути:

$$A(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} w(v_i, v_{i+1})}{n}; \quad (4)$$

2) найдем разницу между значениями весовых коэффициентов и среднего арифметического:

$$R(y) = \sum_{i=1}^{n-1} w(v_i) - A(y); \quad (5)$$

3) сложим сумму полученных значений. Данную сумму назовем коэффициентом равномерности:

$$\text{if } R(y) < R(POP_{\min}) \text{ then } POP_{\min} = y. \quad (6)$$

Таким образом, при выборе из двух ФПД одинаковой длины и веса будем учитывать данный коэффициент равномерности. Чем меньше коэффициент равномерности, тем оптимальнее полученный кратчайший путь (ФПД).

Сети Байеса

Для нахождения значений весов ФЭ предлагается применение наивного байесовского классификатора. Байесовские сети [14] 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:

$$p(\theta / D) = \frac{p(\theta)p(D / \theta)}{p(D)}, \quad (7)$$

где D – обучающая выборка (данные); θ – параметры модели для обучения (в нашем случае D – оценки, выставленные экспертами полу-

ченным ФПД; θ – ФЭ); $p(\theta/D)$ – распределение вероятностей параметров модели после обучения (апостериорная вероятность); $p(D/\theta)$ – вероятность данных при условии зафиксированных параметров модели.

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 обучить вероятности $p(W_i|C_j)$, где W_i – физический эффект; C_j – класс, то есть подсчитать оптимальные оценки вероятностей того, что тот или иной ФЭ относится к тому или иному классу оптимальности.

Сети Петри

Установим соответствие между моделью представления ФЭ и процесса синтеза ФПД,

с одной стороны, и аналогичной моделью, созданной на основе сетей Петри.

Представим процесс синтеза ФПД в виде цветных сетей Петри [15]:

множество маркеров – множество ФЭ;

множество позиций – условия, которым соответствуют ФЭ;

условия срабатывания перехода – соответствие выходной характеристике маркера множеству цветов позиции.

Физический эффект представлен сложным составным типом `phe`, который состоит из входного и выходного воздействия (`voz`), качественных характеристик входных и выходных воздействий (`kachv`), номера физического эффекта (`numfe`), физических величин (`vozf`), «веса» физического эффекта (`weight`). Поле `plist` представляет собой список; в данной модели он используется для сохранения номеров ФЭ, попавших в цепочку ФПД. На выходе данной программной модели получаем множество маркеров, представляющих собой ФЭ, завершающих цепочку ФПД. Каждый такой маркер проходит весь путь синтеза, от начального этапа и до выхода из модели, и содержит на каждом этапе моделирования информацию о текущем (добавленном) ФЭ в ФПД, а также список всех используемых в данной структуре ФПД физических эффектов. Описания множеств цветов (`colset`), используемые в программной модели в среде CPN Tools [16], представлены на рис. 1.

```
▼ colset voz = with voz1|voz2|voz3|voz4|voz5|voz6|voz7|voz8|voz9|voz10|voz11|voz12|voz13;
▼ colset vozf = with fizvel1|fizvel2|fizvel3|fizvel4;
▼ colset kachv = with vrem1|vrem2|vrem3;
▼ colset napr = with vnutr|vnesh|vnutr|vnesh;
▼ colset spec = with spec1|spec2|spec3|spec4|spec5|spec6|spec7;
▼ colset pros = with proc1|proc2|proc3|proc4|proc5|proc6|proc7|proc8;
▼ colset numfe = INT;
▼ colset plist = list INT;
▼ colset weight = INT;
▼ colset phe = product voz*kachv*vozf*voz*kachv*vozf*numfe*weight*plist;
```

Рис. 1. Описания множеств цветов

Модель синтеза ФПД на основе сетей Петри приведена на рис. 2. Модель синтеза является иерархической моделью, что означает вложенную конструкцию: сеть внутри сети. Элементами построенной модели являются подмодель “Synthesis”, переход “p”, отбирающий из всего множества маркеров (ФЭ) входные маркеры ФПД, переход “check length”, проверяющий условия останова процесса синтеза.

Подстановка перехода (Synthesis) представлена прямоугольником с двойной граничной линией. Переход сети верхнего уровня логиче-

ски заменяется сетью более низкого уровня. Переход (Synthesis) заменяется сетью (Synthesis).

Позиции сети нижнего уровня, которые используются для связи с сетями верхнего уровня, называются контактными позициями или портами и выделены специальными тэгами (I/O, In, Out). Соответствующие позиции сетей верхнего уровня называются сокетами. В данном случае сокетами являются `inpPHE` и `outPHE` на рис. 2 и портами – `inpPHE` и `outPHE` на странице Synthesis (рис. 5).

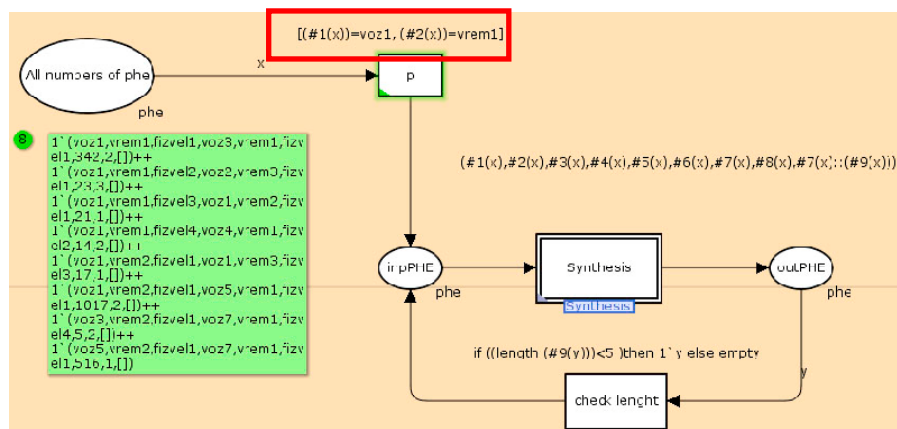


Рис. 2. Начальный этап синтеза ФПД

В процессе синтеза необходимо получить цепочку ФПД с заданным входным (выходным) воздействиями, и не больше заданной длины. Процесс синтеза начинается в позиции (All numbers of PHE). Здесь находятся маркеры, представляющие собой все множество ФЭ. Конкретизация маркера, находящегося в данной позиции, определяется инициализирующим выражением начальной разметки или формируется в результате правильного выполнения шага итерации сети Петри.

Маркеры перемещаются по позициям через переходы. Переход может сработать (т. е. переместить маркер из входной позиции в выходную для данного перехода), если во всех входных позициях для данного перехода присутствует хотя бы один маркер и выполнено логическое выражение, ограничивающее переход.

Переход "р" срабатывает только в том случае, если первое поле маркера из позиции "All numbers of phe" соответствует заданному входному воздействию искомой ФПД. Таким образом, в позиции inrPHE мы имеем множество маркеров (множество ФЭ), входное воздействие которых соответствует входным воздействиям искомой ФПД, то есть данные ФЭ могут быть начальными в цепочке ФПД.

Выражение выходной дуги перехода "р" представляет собой конструктор для создания новых маркеров (рис. 3). В данном случае он изменяет последнее поле маркера – в него записывается номер текущего ФЭ, так как впоследствии маркер будет изменен и будет представлять собой следующий элемент (следующий ФЭ в цепочке ФПД). "История преобразований", т. е. вся цепочка до текущего элемента хранится в поле "plist" маркера.

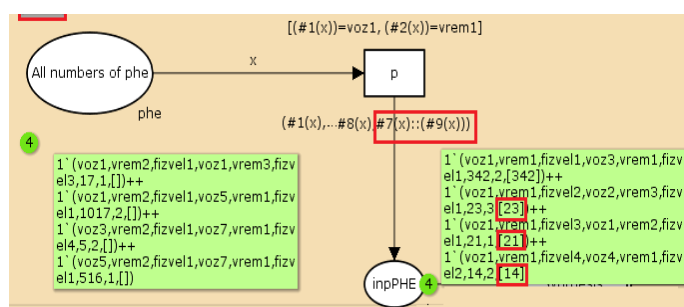


Рис. 3. Второй этап синтеза ФПД

В переход "р1" (см. рис. 4) из всего множества маркеров позиции "All", представляющих собой все множество ФЭ, переходят только те маркеры, для каждого из которых выполняется условие: входное воздействие переходящего маркера должно быть равно выходному воздействию маркера из позиции "inrPHE". Та-

ким образом, на данном этапе к i-му ФЭ(i) "прикрепляется" ФЭ(i+1). Вес всех ФЭ в ФПД суммируется и сохраняется в "weight", а вся цепочка до текущего элемента сохраняется в поле "plist".

Условие перехода "р2" является условием выхода из процесса синтеза ФПД. В позицию

Начальные условия:
Вход: электрическое поле (voz1), постоянное (vrem1).
Выход: магнитное поле (voz2)
Длина пути: 5.



“ResultPOP” (рис. 5) попадают маркеры, поле выходного воздействия которых соответствует выходному воздействию искомой цепочки ФПД. Такие маркеры представляют собой последний элемент (ФЭ) цепочки ФПД; во всех полях такого маркера содержится информация о последнем завершающем элементе ФПД;

в поле “weight” находится значение веса всей цепочки ФПД; в поле “plist” перечислены номера всех ФЭ данной цепочки ФПД. В позицию “outPHE” помещаются все маркеры, не удовлетворяющие данному условию, т. е. недостоверные цепочки, и возвращаются в позицию “inpPHE” для продолжения поиска.

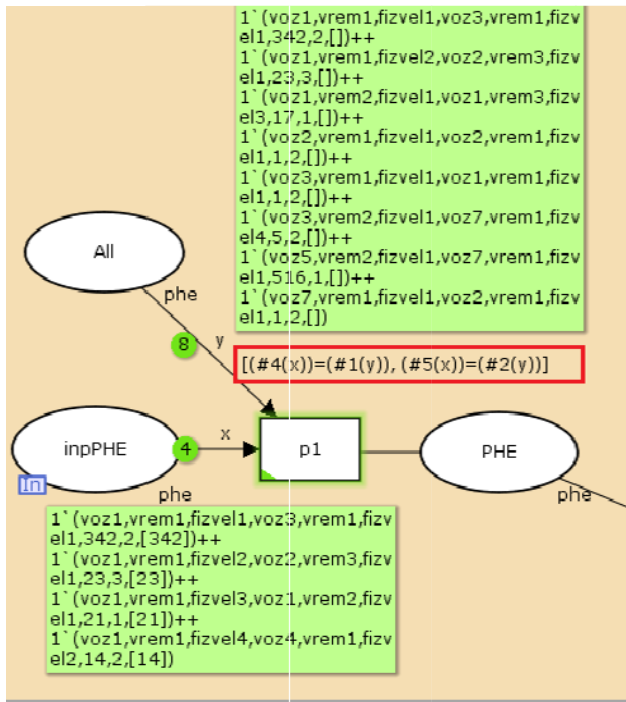


Рис. 4. Этап синтеза ФПД

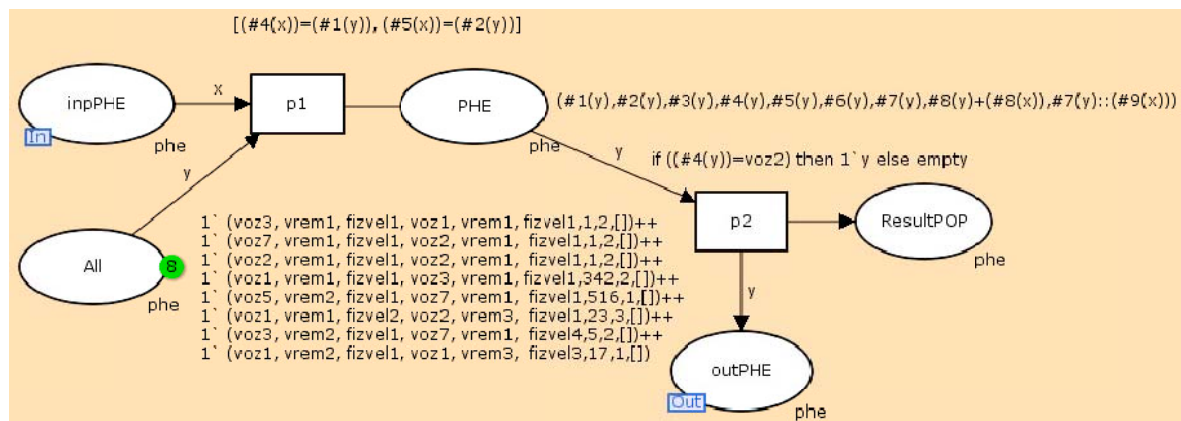
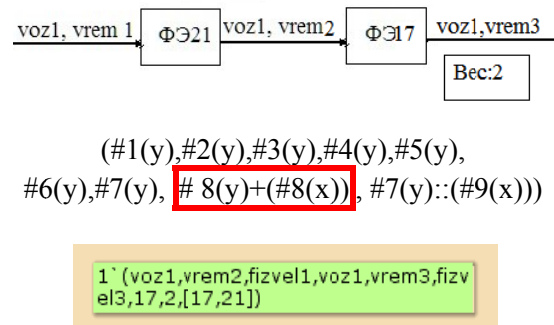


Рис. 5. Подсеть “Synthesis”

Отметим, что использование иерархических сетей упрощает разработку моделей. Во-первых, это позволяет скрыть детали и управлять сложностью модели и, во-вторых, – повторно использовать подмодели. Модель, представленная на рис. 5, разделена на уровни ие-

рархии, что позволяет использовать основную часть элементов повторно (в цикле).

Выводы

Был проведен анализ подходов к оценке синтезируемых структур физического принци-

па действия технических систем на основе использования теории графов, математического аппарата сетей Байеса и Петри.

Разработанные алгоритмы оценки синтезируемых структур физического принципа действия на основе теории графов, сетей Байеса и Петри, будучи внедренными в программу синтеза физического принципа действия, позволят отобрать из всего множества полученных цепочек ФПД наиболее эффективные с точки зрения их практической реализуемости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. Петрухин, А. В. Использование физических знаний при решении задач концептуального проектирования технических объектов / А. В. Петрухин, С. А. Фоменков, В. А. Камаев // Известия вузов. Машиностроение. 1997. № 3. С. 29–33.
4. Петрухин, А. В. Архитектура автоматизированной системы концептуального проектирования технических объектов и технологий с использованием структурированного описания физической информации (СОФИ) для сетевых приложений / А. В. Петрухин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Известия вузов. Машиностроение. – 1998. – № 4–6. – С. 52–56.
5. Гопта, Е. А., Фоменков, С. А., Карачунова, Г. А. Автоматизация процесса линейного синтеза физического принципа действия // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 9. № 11(71). С. 129–133.
6. Korobkin D.M., Fomenkov S.A., Kolesnikov S.G., Voronin Y.F. System of Physical Effects Extraction from Natural Language Text in the Internet. //World Applied Sciences Journal, 2013, v.24 (Information Technologies in Modern Industry, Education & Society), pp. 55–61.
7. Коробкин, Д. М., Фоменков, С. А. Автоматизированная методика извлечения структурированных физических знаний в виде физических эффектов из текстов на естественном английском языке // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т. 10. № 3(76). С. 116–120.
8. Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Orlova Y. A. A Multi-Stage Algorithm for Text Documents Filtering Based on Physical Knowledge. //World Applied Sciences Journal, 2013, v.24 (Information Technologies in Modern Industry, Education & Society), pp. 91–97.
9. Крапивина, Н. В., Коробкин Д. М., Фоменков С. А. Автоматизация фильтрации электронных первоисточников по признаку знаний о нанотехнологиях и выявление описаний нанотехнологий // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т. 14. № 10(97). С. 161–166.
10. Герасимов, А. М. Автоматизированная система поиска физических эффектов «Полезный эффект» / А. М. Герасимов, П. А. Колчин, С. А. Фоменков // Программные продукты и системы. – 2007. № 4. С. 7.
11. Попов, М. Ю. Предметно-ориентированный анализ текстовых документов на примере системы поиска описаний физических эффектов / М. Ю. Попов, Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 6. С. 20–24.
12. Коробкин, Д. М. Поиск и выделение структурированной физической информации в виде физических эффектов из текстов первичных источников / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 87. С. 282–287.
13. Diestel R. Graph Theory, Electronic Edition. – NY: Springer-Verlag, 2005. – С. 422.
14. Jensen Finn V. Bayesian Networks and Decision Graphs. – Springer, 2001.
15. K. Jensen and L.M. Kristensen. Coloured Petri Nets -- Modeling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag Berlin, 2009.
16. CPN Tools [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://cpntools.org/documentation/start>.