

Программная инженерия

Том 7
№ 7
2016
Пр
ИН

Учредитель: Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Издается с сентября 2010 г.

DOI 10.17587/issn.2220-3397

ISSN 2220-3397

Редакционный совет

Садовничий В.А., акад. РАН
(председатель)
Бетелин В.Б., акад. РАН
Васильев В.Н., чл.-корр. РАН
Жижченко А.Б., акад. РАН
Макаров В.Л., акад. РАН
Панченко В.Я., акад. РАН
Стемпковский А.Л., акад. РАН
Ухлинов Л.М., д.т.н.
Федоров И.Б., акад. РАН
Четверушкин Б.Н., акад. РАН

Главный редактор

Васенин В.А., д.ф.-м.н., проф.

Редколлегия

Антонов Б.И.
Афонин С.А., к.ф.-м.н.
Бурдонов И.Б., д.ф.-м.н., проф.
Борзовс Ю., проф. (Латвия)
Гаврилов А.В., к.т.н.
Галатенко А.В., к.ф.-м.н.
Корнеев В.В., д.т.н., проф.
Костюхин К.А., к.ф.-м.н.
Махортов С.Д., д.ф.-м.н., доц.
Манцивода А.В., д.ф.-м.н., доц.
Назирова Р.Р., д.т.н., проф.
Нечаев В.В., д.т.н., проф.
Новиков Б.А., д.ф.-м.н., проф.
Павлов В.Л. (США)
Пальчунов Д.Е., д.ф.-м.н., доц.
Петренко А.К., д.ф.-м.н., проф.
Позднеев Б.М., д.т.н., проф.
Позин Б.А., д.т.н., проф.
Серебряков В.А., д.ф.-м.н., проф.
Сорокин А.В., к.т.н., доц.
Терехов А.Н., д.ф.-м.н., проф.
Филимонов Н.Б., д.т.н., проф.
Шапченко К.А., к.ф.-м.н.
Шундеев А.С., к.ф.-м.н.
Щур Л.Н., д.ф.-м.н., проф.
Язов Ю.К., д.т.н., проф.
Якобсон И., проф. (Швейцария)

Редакция

Лысенко А.В., Чугунова А.В.

Журнал издается при поддержке Отделения математических наук РАН, Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, МГТУ имени Н.Э. Баумана

СОДЕРЖАНИЕ

- Артёмов А. А.** Эксперимент по моделированию процесса эволюции содержания информационного пространства социума (с применением мем-грамм-модели) 291
- Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Автоматизация контроля колориметрических сдвигов при проектировании и производстве бортовых систем индикации 307
- Швецова-Шиловская Т. Н., Громова Т. В., Иванов Д. Е., Полехина О. В., Афанасьева А. А., Назаренко Д. И., Викентьева М. А.** Программно-аналитический комплекс для оценки показателей надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования опасных производственных объектов на всех этапах жизненного цикла 312
- Махортов С. Д.** Продукционно-логические уравнения в распределенной LP-структуре 324
- Шмарин А. Н.** О реализации приближения числа слоев без циклов в задаче нечеткого LP-вывода 330

Журнал зарегистрирован

в Федеральной службе

по надзору в сфере связи,

информационных технологий

и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-38590 от 24 декабря 2009 г.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс: по каталогу агентства "Роспечать" — 22765, по Объединенному каталогу "Пресса России" — 39795) или непосредственно в редакции.

Тел.: (499) 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

Http://novtex.ru/prin/rus E-mail: prin@novtex.ru

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

© Издательство "Новые технологии", "Программная инженерия", 2016

SOFTWARE ENGINEERING

PROGRAMMNAYA INGENERIA

Vol. 7

N 7

2016

Published since September 2010

DOI 10.17587/issn.2220-3397

ISSN 2220-3397

Editorial Council:

SADOVNICHY V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS (*Head*)
BETELIN V. B., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad. RAS
VASIL'EV V. N., Dr. Sci. (Tech.), Cor.-Mem. RAS
ZHIZHCHEKNO A. B., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS
MAKAROV V. L., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acad.
RAS
PANCHENKO V. YA., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS
STEMPKOVSKY A. L., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS
UKHLINOV L. M., Dr. Sci. (Tech.)
FEDOROV I. B., Dr. Sci. (Tech.), Acad. RAS
CHETVERTUSHKIN B. N., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Acad. RAS

Editor-in-Chief:

VASENIN V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.)

Editorial Board:

ANTONOV B.I.
AFONIN S.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
BURDONOV I.B., Dr. Sci. (Phys.-Math)
BORZOV JURIS, Dr. Sci. (Comp. Sci), Latvia
GALATENKO A.V., Cand. Sci. (Phys.-Math)
GAVRILOV A.V., Cand. Sci. (Tech)
JACOBSON IVAR, Dr. Sci. (Philos., Comp. Sci.),
Switzerland
KORNEEV V.V., Dr. Sci. (Tech)
KOSTYUKHIN K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
MAKHORTOV S.D., Dr. Sci. (Phys.-Math)
MANCIVODA A.V., Dr. Sci. (Phys.-Math)
NAZIROV R.R., Dr. Sci. (Tech)
NECHAEV V.V., Cand. Sci. (Tech)
NOVIKOV B.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)
PAVLOV V.L., USA
PAL'CHUNOV D.E., Dr. Sci. (Phys.-Math)
PETRENKO A.K., Dr. Sci. (Phys.-Math)
POZDNEEV B.M., Dr. Sci. (Tech)
POZIN B.A., Dr. Sci. (Tech)
SEREBRJKOV V.A., Dr. Sci. (Phys.-Math)
SOROKIN A.V., Cand. Sci. (Tech)
TEREKHOV A.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)
FILIMONOV N.B., Dr. Sci. (Tech)
SHAPCHENKO K.A., Cand. Sci. (Phys.-Math)
SHUNDEEV A.S., Cand. Sci. (Phys.-Math)
SHCHUR L.N., Dr. Sci. (Phys.-Math)
YAZOV Yu. K., Dr. Sci. (Tech)

Editors: LYSENKO A.V., CHUGUNOVA A.V.

CONTENTS

- Artemov A. A.** An Experiment of Simulation of the Process of Society's Information Space Content Evolution (Using the Meme-Gram-Model) 291
- Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Automation Control of Colorimetric Shifts in the Design and Manufacture of On-Board Display Systems . . 307
- Shvetsova-Shilovskaya T. N., Gromova T. V., Ivanov D. E., Polekhina O. V., Afanasyeva A. A., Nazarenko D. I., Vikentyeva M. A.** Program and Analytical Complex for an Assessment of Indicators of Reliability, Readiness And Maintainability of the Equipment of Hazardous Production Facilities at All Stages of Life Cycle 312
- Makhortov S. D.** Production-Logical Equations in the Distributed LP-Structure 324
- Shmarin A. N.** About Implementation of Approximation the Number of Layers without Cycles in the Fuzzy LP-Inference Problem 330

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/prin/eng> e-mail: prin@novtex.ru

А. А. Артёмов, инженер, соискатель, e-mail: artemsince2@yandex.ru,
МГУ имени М. В. Ломоносова

Эксперимент по моделированию процесса эволюции содержания информационного пространства социума (с применением мем-грамм-модели)

Представлены результаты экспериментальных исследований с использованием математического моделирования, направленных на анализ эффективности применения аппарата мем-грамм-модели, для описания процесса (эволюционного и революционного) изменения содержания информационного пространства социально-телекоммуникационной системы. В качестве исходных данных были использованы 3000 русскоязычных публикаций СМИ за июль — август 2014 г., которые обсуждались в социальных сетях. В результате исследования подтверждена возможность применения мем-грамм-модели для выявления факта появления нового содержания (мутации), для количественной оценки (силы) информационного воздействия и установления сопровождающих такое воздействие закономерностей в процессе изменения состава элементов наследственности содержания (цифрового) информационного пространства социума.

Ключевые слова: мем-грамм-модель, социально-телекоммуникационная система, меметический алгоритм, стэнфордская модель MemeTracker, MAV-модель эволюции культуры, языковая модель, информационное пространство социума, мем, сила информационного воздействия, агрессивность мема, приспособленность мема, мутация мема, наследственность, Медиаметрикс, публикации СМИ, публикации в социальных сетях, n-грамма, NTLK, Яндекс-mystem

Введение

Процесс коммуникации как форма организации взаимодействия людей в обществе рассматривается в современной науке в качестве одной из системообразующих составляющих его жизнедеятельности [1]. Результаты исследования этого процесса позволяют получить новые возможности для измерения отдельных его характеристик и прогнозирования влияния на поведение отдельных индивидов и социальных групп общества. Согласно исследованию М. Хилберта [2], опубликованному в журнале Science в 2011 г., более 90 % информации в обществе передается в цифровом виде, и не менее 95 % этой информации передается через средства массовой коммуникации (в том числе через средства массовой информации (СМИ) в их традиционном понимании). Таким образом, подавляющая часть информации о жизнедеятельности людей находится в удобном для исследования цифровом виде. Совокупность всей оцифрованной информации представляет в настоящее время большую часть информационного пространства (ИП) общества. Управление данным ИП осуществляется через средства массовой коммуникации.

Согласно работам У. Липпмана [3] и Э. Ноэль-Нойман [4] массовая информация, распространяемая

через СМИ (в результате процесса коммуникации), формирует четкие контуры моделей мира¹ в обществе. Модели мира [1, 5] как средства познания, в свою очередь, определяют логику суждений и поведения каждого отдельного индивида. И наоборот, в соответствии с подходом Н. Лумена [1], совокупность индивидов со схожими моделями мира образует социальные общности (далее — социум). В то же время, опираясь на работы Т. Куна [6] и В. В. Налимова [7], изменения моделей мира социума могут быть изучены через изменения естественного языка.

В работе С. П. Расторгуева [8] показано, как полярные модели мира создают конфликты социумов. Процесс использования таких моделей в тех или иных целях является одним из ключевых факторов управления данными конфликтами. В связи с этим возможность математического описания изменений содержания ИП социума будет способствовать созданию научно-практической базы по управлению ИП социума в целях предотвращения эскалации социальных конфликтов.

¹ Уникальная репрезентация мира, основанная на обобщении нашего опыта. Совокупность принципов деятельности человека [Краткий толковый психолого-психиатрический словарь].

1. Базовые понятия мем-грамм-модели

Для исследования ИП социума в контексте подхода, предлагаемого в настоящей статье, появилась необходимость определить минимальную структурную единицу содержания ИП. Автор пришел к заключению о целесообразности применения (с адаптацией под решаемую задачу) для этого понятия и объекта, который именуется **мемом** и используется в качестве единицы культурной информации в меметике (научном направлении, изучающем культурную эволюцию социума). Для описания эволюционных процессов с использованием мемов применяют так называемые **меметические алгоритмы** — алгоритмы культурной эволюции популяции. Такой алгоритм состоит из трех главных компонентов: популяционного пространства; пространства знаний (верований, в терминах меметики); протокола, описывающего, как происходит обмен знаниями между первыми двумя компонентами. Таким образом, меметический алгоритм (МА) — это алгоритм с системой двойной наследственности — знаний и численности популяции. Шаблон МА может быть представлен следующей последовательностью действий [9].

Алгоритм 1. Шаблон меметического алгоритма

1. **Вход:** W // исходная популяция
2. **Выход:** m^* / объекты, определяющие наследственность популяции
3. $W = \text{PopGeneration}$ // эволюционирующая популяция
4. $\text{PopEvaluation}(W)$ // оценка изменения приспособленности ($fitness$) каждого представителя популяции
5. $m^* = \text{лучший}(W)$ // представители популяции из числа лучших (наследственность)
6. $F^* = F(m^*)$ // параметры приспособленности у лучших элементов наследственности
7. **While** StopCondition не выполнено **do**
8. $(w_1 \dots w_k) = \text{ParentsSelection}(W)$ // $k \geq 2$, выбор родителей
9. $m' = \text{Recombination}(w_1 \dots w_k)$ // получение представителей потомства
10. $m = \text{OffspringImprovement}(m')$ // улучшение потомства, обычно путем локального поиска
11. $W = \text{PopulationUpdate}(m, W)$ // популяция обновляется в соответствии с правилом разнообразия (k примеру, пропорции наследственности и изменчивости)
12. $(m^*, f^*) = \text{BestSolutionUpdate}(m^*, f^*, w)$ // выбор наилучшего решения и запись его характеристик ($fitness$)
13. **End while**

В представленном шаблоне МА: наследственность (*heredity*) — качественно-количественная характеристика, идентифицирующая индивидуальные особенности наиболее приспособленных особей (объектов, представителей вида); изменчивость (*variation*) — противоположность наследственности (характеристика остальных, неприспособленных особей); популяция

(*population*) — мультимножество объектов с заданной наследственностью; родитель (*parent*) — объект, передающий свою наследственность другому объекту; потомство (*offspring*) — особь, полученная путем объединения наследственностей родителей с учетом мутации; мутация (*mutation*) — оператор незначительного изменения наследственности; приспособленность (*fitness*) — оценка соответствия наследственности потомства заданным условиям.

Описания эволюционных процессов в ИП потребовало разработки нового МА (на базе представленного шаблона), позволяющего учитывать как лингвистические особенности содержания сообщений, так и социальную природу массовых коммуникации для задач ретроспективного и перспективного прогноза содержания ИП социума. В частности, при разработке МА для мем-грамм-модели были учтены результаты следующих работ: работы [9], где представлена практика применения меметических алгоритмов; работы [10], в которой рассмотрена модель для отслеживания изменения мемов (*meme tracker*, стэнфордская модель); работы [11], где описана компьютерная модель процесса эволюции культуры (*memes and variations*, MAV).

В работе [12] изложен понятийный аппарат и некоторые общие положения предлагаемой мем-грамм-модели. В целях более детального и математически точного описания этой модели автор усовершенствовал ее математический аппарат, с использованием которого и был проведен эксперимент по описанию процесса эволюции информационного пространства социума. Определим базовые атрибуты, характеризующие процесс эволюции, которые использовались при проведении эксперимента.

Социально-телекоммуникационная система (СТС) — субъект управления информационным пространством, конечная совокупность представитель социумов, использующих средства массовой коммуникации для передачи и получения информационных сообщений.

Информационное пространство СТС — мультимножество слов, сформированное из совокупности текстовых сообщений, циркулирующих в СТС:

$$T_{l_0} \{T_1, T_2, \dots, T_l\} \Rightarrow W_{l_0} \{w_1, w_2, \dots, w_k\},$$

где $T_l = \{w_1, w_2, \dots, w_p\}$; T_l — мультимножество слов w текста l (слова могут повторяться); $W_{l_0} \{w_1, w_2, \dots, w_k\} | w_k \in T_{l_0}; l, k, p \in \mathbb{N}$; W — мультимножество слов w всех подлежащих анализу текстов. Под словами понимаются n -граммы или набор слов, используемые для создания языковых моделей. Их подробное описание представлено в работах [13—15]. В текущей мем-грамм-модели используются n -граммы фиксированной длины, т. е. их "граммность" (число униграмм в n -грамме) ограничена и должна быть определена до проведения математических операций. Причин такого ограничения две. Во-первых, оно позволяет решать задачу описания изменения содержания наследственности ИП в первом приближении (подневной фиксации фактов появ-

ления или исчезновения мемов среди миллионов n -грамм) даже при использовании небольших вычислительных ресурсов (200...250 Гфлопс). При таком подходе (в терминах МА) каждая n -грамма длиной $n - 1$ рассматривается как уникальный родитель, а n -грамма длиной n — как наследственность (потомство) от двух таких родителей. Во-вторых, для перехода к произвольной (вариативной) длине n -грамм (как возможных элементов наследственности) необходимо учитывать вероятность мутации — появления n -граммы длины n , составленной из сочетания n -грамм длины, меньшей n . В таком случае можно отобрать наиболее вероятных (по так называемому в терминах МА локальному оптимуму приспособленности) родителей из числа n -грамм. Однако решение данной задачи ресурсозатратно и выходит за рамки целей настоящего исследования.

Наследственность содержания ИП — общее в содержании ИП за разные последовательно следующие друг за другом интервалы времени.

Мем — минимальная структурно-функциональная единица наследственности содержания ИП, представляющая собой слово, принадлежащее двум мультимножествам слов текстов сообщений, зафиксированных в СТС в последовательные интервалы времени. Определим изменяющуюся во времени совокупность мемов в виде:

- множества M :

$$M_{t_0-(n-1)\Delta t} \{m_1, m_2, \dots, m_i\} = W_{t_0-n\Delta t} \cap W_{t_0-(n-1)\Delta t},$$

где t_0 — начальный момент времени; Δt — дискретный интервал времени; n — число рассматриваемых интервалов времени Δt ; $n, i \in \mathbb{N}$;

- количественной оценки для каждого элемента этого множества:

$$N_{t_0-(n-1)\Delta t}^{m_i} = \sum_{j=1}^k C(m_i, w_j),$$

где $N_{t_0-(n-1)\Delta t}^{m_i}$ — число копий мема m_i в заданный момент времени; $C(m_i, w_j)$ — бинарный признак наличия в мультимножестве $W_{t_0-(n-1)\Delta t}$ слова $w_j \in W_{t_0-(n-1)\Delta t} \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$, являющегося мемом m_i ;

$$C(m_i, w_j) = \begin{cases} 0, & \forall m_i \neq w_j \\ 1, & \forall m_i = w_j \end{cases}.$$

Агрессивность мема A — числовая величина, определяющая коэффициент скорости изменения веса мема в ИП за дискретный интервал времени:

$$A_t^{m_i} = \frac{\Delta G_{\Delta t}^{m_i}}{G_{t-\Delta t}^{m_i}},$$

где $G_{t-\Delta t}^{m_i} = \frac{N_{t-\Delta t}^{m_i}}{|W_{t-\Delta t}|}$ — вес мема, число копий мема относительно всех элементов ИП в рассматриваемый момент времени ($0 \leq \sum_i G_{t-\Delta t}^{m_i} \leq 1$); $\Delta G_{\Delta t}^{m_i}$ — изменение веса мема в ИП за дискретный интервал Δt .

На рис. 1 в иллюстративной форме изображен общий подход, применяемый в мем-грамм-модели, для описания изменения ИП. Информационное пространство представлено изменяющимся набором элементов w (n -грамм) в последовательные моменты времени с интервалом време-

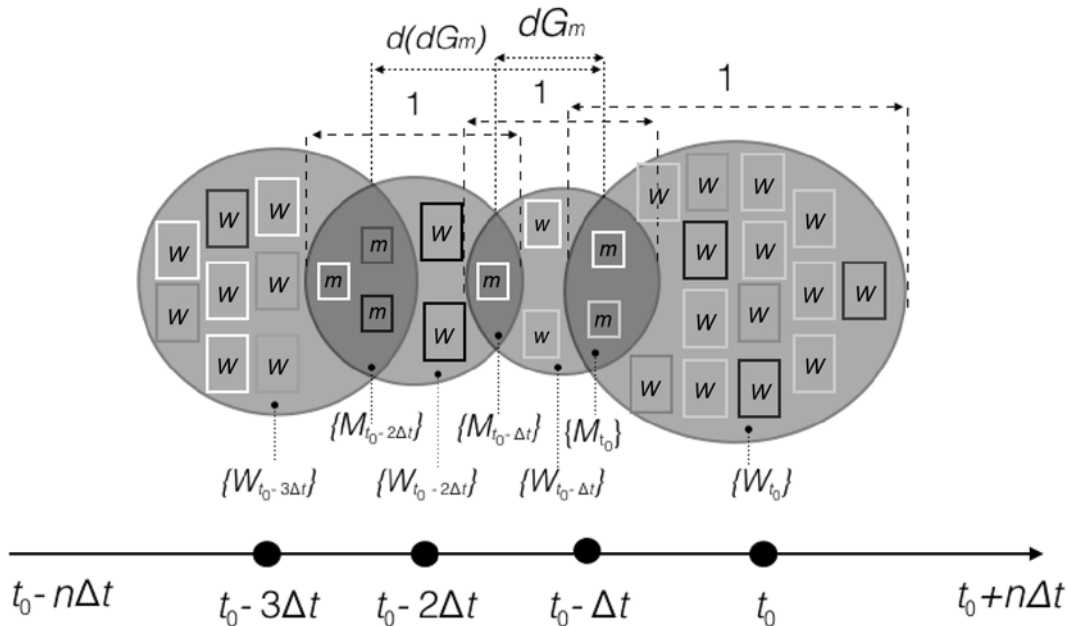


Рис. 1. Изменение состава ИП, описанного в терминах мем-грамм-модели:

dGm и $d(dGm)$ — скорость и ускорение изменения веса за единичный интервал времени соответственно

мени Δt . Общие n -граммы, обозначенные буквой m , именуются мем-граммами или, для краткости, просто мемами. Ключевой особенностью мем-грамм-модели (в сравнении с n -грамм-моделью) является тот факт, что вычисляемые характеристики определяются только для объектов, называемых мемами, а не для каждой n -граммы. Таким образом, в мем-грамм-модели качественно-количественное описание изменения содержания ИП ведется относительно мем-грамм.

Сила информационного воздействия (СИВ) — числовая величина, определяющая меру воздействия на единичную копию мема, изменяющая его единицу веса за единицу времени. Единица такого воздействия имеет следующую размерность:

$$\text{Ед. СИВ} = \text{ед. копия мема} \cdot \frac{\text{ед. веса мема}}{\text{ед. времени}^2}.$$

Сила информационного воздействия относительно выбранной единицы наследственности (мема) за единичный интервал времени может быть определена как

$$F_{t,\Delta t}^{m_i} = N_t^{m_i} \cdot \frac{\Delta v_{\Delta t,t}^{m_i}}{\Delta t},$$

где $N_t^{m_i}$ — число копий мема в ИП в момент времени t ; $\Delta v_{\Delta t,t}^{m_i}$ — ускорение изменения веса мема в ИП за дискретный единичный интервал времени.

Тройка $\langle N, G, A \rangle$ является характеристикой (именуемой в терминах меметических и эволюционных алгоритмов приспособленностью [9]) мема в мем-грамм-модели. Значения функции $F(N, \Delta v)$ могут быть вычислены с помощью функции $F(N, G_0, A)$ в каждый дискретный момент времени, поскольку $\Delta v_{\Delta t,t}^{m_i}$ может быть выражена через начальный вес G_0 и текущую агрессию A . Отсюда можно сделать вывод, что $F(N, \Delta v)$ является универсальной интегральной оценкой характеристики мема, которую будем называть приспособленностью.

Оценка изменения содержания ИП — числовая величина, определенная как сумма всех сил информационного воздействия:

$$\alpha_t^{\text{ИП}} = F_t^{\text{ИП}+} + F_t^{\text{ИП}-},$$

где $F_t^{\text{ИП}+}$ — сила создания элементов наследственности (сила наследственности); $F_t^{\text{ИП}+} = \sum_i F_t^{m_i} | \forall F_t^{m_i} \geq 0$; $F_t^{\text{ИП}-}$ — сила уничтожения элементов наследственности (сила изменчивости), $F_t^{\text{ИП}-} = \sum_i F_t^{m_i} | \forall F_t^{m_i} < 0$.

Таким образом, для качественного описания и последующего количественного измерения изменения содержания ИП СТС необходимо:

- собрать сообщения СТС за разные последовательные интервалы времени и декомпозировать их содержание в соответствии с заранее выбранной единицей содержания;
- определить известное ранее и новое содержание, а также актуальное и понятное содержание (наследственность);
- провести количественный анализ изменения состава актуального и понятного содержания (наследственности содержания) ИП СТС.

Схематично такой алгоритм представлен на рис. 2.

Шаг 1. Элементарная декомпозиция информации (на рис. 2 обозначено буквой И) в сообщениях, которые распространяются в СТС.

Шаг 2. Определение известного содержания X , нового содержания Y и наследственного содержания M в совокупности информации сообщений, формирующих ИП СТС.

Шаг 3. Анализ изменения во времени наследственности содержания M ИП СТС.

С учетом меметического алгоритма 1 представим общий меметический алгоритм (алгоритм 2), который применяется в мем-грамм-модели для описания наследственности содержания ИП социумов в ретроспективе и перспективе.

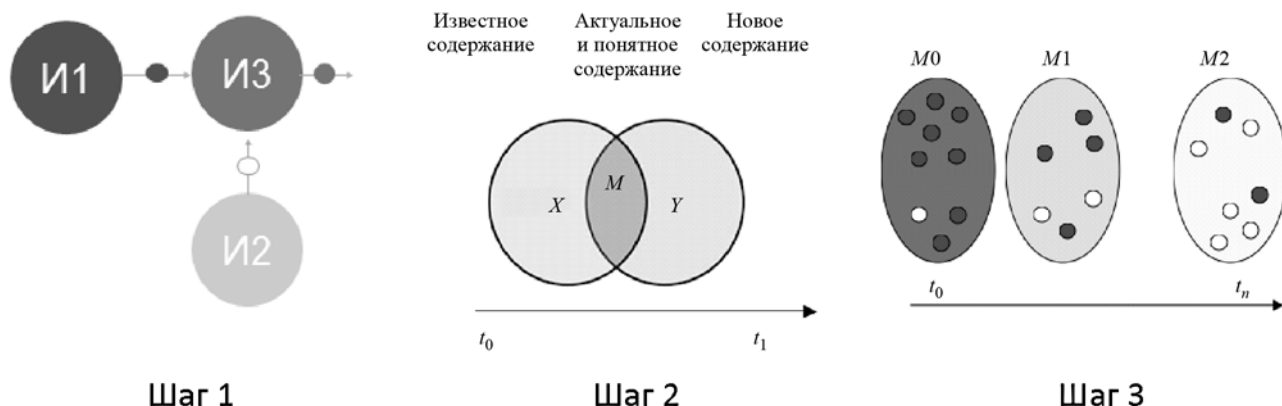


Рис. 2. Алгоритм измерения процесса изменения содержания ИП

Алгоритм 2. Меметический алгоритм мем-грамм-модели

1. **Вход:** $T_{t_0-n\Delta t}$ // тексты публикации за n предыдущих дискретных интервалов времени

2. **Выход:** $M_{t_0+z\Delta t}$ // наследственность содержания ИП через z дискретных интервалов времени (знак зависит от рассмотрения в перспективе или ретроспективе относительно выбранного t , $z > n$)

3. $T \Rightarrow W$ // формирование мультимножества n -грамм W из слов текстов T

4. $T \Rightarrow M$ // определение мемов из мультимножества n -грамм

5. $\langle N_m, G_m, A_m \rangle$ // оценка характеристик приспособленности мема

6. $F = F_m(G, A(t))$ // оценка силы информационного воздействия на мем

7. $m^* = \text{лучший } m$ // выбор мемов с лучшими характеристиками $\langle N, G, A \rangle$ через $t \mp z\Delta t$

8. $F^* = F(m^*)$ // параметры приспособленности у лучших элементов наследственности

9. **While** StopCondition не выполнено **do**

10. $(m_1 \dots m_k) = \text{ParentsSelection}(W)$ // $k \geq 2$, выбор родителей

11. $m' = \text{Recombination}(m_1 \dots m_k)$ // получение представителей потомства

12. $m = \text{OffspringImprovement}(m')$ // улучшение потомства, обычно путем локального поиска

13. $W = \text{PopulationUpdate}(m, W)$ // популяция обновляется в соответствии с правилом разнообразия (к примеру, пропорции наследственности и изменчивости)

14. $\alpha_t^{\text{ИП}}(m^*, f^*) = \text{BestSolutionUpdate}(m^*, f^*, w)$ // выбор наилучшего решения и запись его значения

15. **End while**

2. Результаты тестовых испытаний программной реализации мем-грамм-модели

Проверка адекватности (валидация) программной реализации мем-грамм-модели реализовывалась на примере оценки процесса изменения содержания множества русскоязычных публикаций в СМИ в течение трех месяцев 2014 г. Совокупность всех публикаций (сообщений) за некоторый период времени рассматривалась как все содержание русскоязычного сегмента ИП СТС данного периода. Подобное приближение может быть оправданно, если выборка, представленная публикациями, будет достаточна велика по отношению ко всей совокупности публикаций в СТС; рассматриваемые публикации получили массовое распространение в СТС. Для отбора публикаций, соответствующих этим критериям, был использован сервис Медиаметрикс (mediametrics.ru). Сервис проводит мониторинг публикаций большинства русскоязычных СМИ и оценивает их с позиции наибольшего массового распространения среди пользователей сайтов и социальных сетей (субъектов СТС). В ходе эксперимента, кроме задач подтверж-

дения возможности выявления мемов, оценки на их основе изменения содержания ИП, также решались задачи по проверке справедливости перечисленных далее гипотез, которые могут оказаться важными для дальнейших исследований.

Гипотеза 1. Чем выше сила информационного воздействия на ИП СТС относительно мемов, содержащихся в сообщении, тем актуальнее для социума данное сообщение.

Эта гипотеза позволяет подтвердить возможность оценки числа коммуникационных контактов с сообщением, основываясь на сумме сил информационного воздействия всех входящих в сообщение мемов. В настоящее время для оценки числа контактов с сообщением применяют различные интегрируемые в изучаемое сообщение метки. Такие метки считываются специальными программными и техническими устройствами на стороне источника сообщения (например, скрипт счетчика на сайте или "телевизионный пиплметр"). Оценка числа коммуникационных контактов, определяемая через силу информационного воздействия, не требует доступа к счетчикам на стороне источника сообщения. Кроме того, она может быть проведена применительно как к оценке перспективы развития изменений (числа контактов), так и к их ретроспективе. Технологическая реализация такой оценки должна быть менее ресурсозатратной при соответствующем типовым решениям результате.

Будем считать данную гипотезу состоятельной, если будут установлены: сильная зависимость между числом коммуникаций с сообщением и числом мемов, представленных в сообщении; возможность определения события по набору мемов, в том числе даты события и степени его влияния на основе оценки изменения содержания ИП.

Гипотеза 2. Существуют типовые минимальные интервалы времени, в которых происходят максимальные изменения ИП СТС (эффективные интервалы).

Интерес к данной гипотезе связан с предпосылками о цикличности эволюционных макропроцессов развития социумов (понятие техноукладов, циклы Кондратьева и т. д.). В таком случае наличие эффективных интервалов будет свидетельствовать о цикличности подобных микропроцессов в ИП, а именно — о цикличности изменения содержания ИП социума, а, значит и цикличности изменения моделей знаний социумов. Кроме этого, использование эффективных интервалов позволит выверить оценку изменений ИП СТС по единой временной шкале.

Будем считать данную гипотезу состоятельной, если удастся установить примеры таких дискретных интервалов, в которых значение оценки изменения ИП будем максимальным:

$$\arg \max_{\Delta t_3 \in \{\Delta t_i\}} \alpha_{t+z\Delta t_3}^{\text{ИП}} \in \left\{ \Delta t_3 \mid \forall \Delta t_i : \alpha_{t+z\Delta t_i}^{\text{ИП}} < \alpha_{t+z\Delta t_3}^{\text{ИП}} \right\},$$

где $\alpha_{t+z\Delta t}^{\text{ИП}}$ — оценка изменения содержания ИП; Δt_3 — эффективный дискретный интервал, так что $\Delta t_3 \in \{\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_j\}$; Δt_i — дискретный интервал из

множества рассматриваемых дискретных интервалов; $i \in \mathbb{N}$.

Подтверждение данных гипотез можно рассматривать как доказательство перспектив использования мем-грамм-модели для более широкого применения при изучении вопросов, связанных с механизмами управления ИП социумов. Одной из таких ближайших перспектив является возможность создания программного обеспечения "Мемоскоп" для автоматизации процессов выявления мемов в потоке сообщений.

2.1. Подготовка исходного массива n -грамм, выявление и расчет характеристик мемов

В качестве информационной базы для исследования были приняты статьи, опубликованные в русскоязычном сегменте ИП СТС с июня по август 2014 г.²

Для составления словаря использовались наиболее популярные по версии сервиса mediametrics.ru статьи, которые заинтересовали пользователей социальных сетей. Исходные данные содержали ссылку на статью, дату публикации, число просмотров и название страны источника публикации. Подготовка исходного массива n -грамм, выявление и расчет характеристик мемов проводились на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-3770 ЦПУ 3.40 GHz, оперативная память 16 Гбайт на базе операционной системой Centos (UNIX) с применением разработанного с участием автора прикладного ПО, состоящего из перечисленных далее программных компонентов.

• Модуль сбора и первичной обработки данных.

Основная часть модуля была реализована на скриптовом языке PHP (Hypertext Preprocessor) версии 5.4. Она выполняет перечисленные далее функции.

♦ Выгрузка архивов со слепками данных³ из <http://mediametrics.ru/data/archive/day/> и сохранение их в базу данных на сервере. Исходные данные в архиве имеют следующую структуру: URL, Title, Visitors, Delta, Shift, Id, Numbers, Timestamp, где URL — адрес страницы новости; Title — заголовок новости; Visitors — число посетителей за выбранный период; Delta — разница в числе посетителей с момента предыдущей генерации рейтинга (раз в 10 и 30 с); Shift — условный показатель движения новости по позициям рейтинга вверх (положительное значение) или вниз (отрицательное значение); Id — внутренний идентификатор новости, целое число; Numbers — общее число новостей в списке; Timestamp — время обновления рейтинга в виде так называемого unix timestamp (число секунд с 1 января 1970 г.).

♦ Процедуры импорта (получения) полных текстов публикации по ссылке, указанной для публикации. Для этого использовался интерфейс прикладного программирования (*application programming*

interface, API) сервиса diffbot.com. Разработанный интерфейс процедуры импорта (доступен по адресу <http://obraz.comstrategy.org/api/v1>) принимает запросы, переданные методом POST, и возвращает полный текст новости в ответе. Синтаксис запроса иллюстрирует следующий пример.

Запрос:

```
{
  "jsonrpc": "2.0",
  "token": "123",
  "method": "getTextData",
  "params": {
    "url": "https://slon.ru/posts/60181"
  },
  "id": 1
}
```

В результате обработки запроса модуль импорта через интерфейс предоставит ответ с полным текстом статьи (без элементов кода HTML) по адресу <https://slon.ru/posts/60181>:

```
{
  "TextData": "Россия готова выделить Ирану экспортный кредит на $5 млрд. Об этом президент страны Владимир Путин заявил в ходе совместной встречи с президентом Ирана Хасаном Роухани..."
}
```

♦ "Нарезка" на n -граммы. Сначала проводится подготовка текста, а именно — все символы из текста публикации преобразовываются в нижний регистр, удаляется пунктуация, лишние пробелы и табуляции, удаляются стоп-слова (100 наиболее высококачественных слов русского языка)⁴. Далее осуществляется лемматизация слов текста с помощью API-утилиты Яндекс mystem⁵ посредством получения лексем для каждого слова в следующем виде:

```
{"text": "жизни", "analysis": [{"lex": "жизнь", "gr": "S, жен, неод = (вин, мн|под, ед|им, мн)", "qual": "life"}]}
```

Первые 15 лексем текста, полученного по ссылке <https://slon.ru/posts/60181>, выглядят следующим образом: *сообщать риа новость отбирать приоритетный проект сфера энергетика строительство морской терминал электрификация железный дорога далее*.

Лемматизированный текст статей разбивался на n -граммы (униграммы, биграмы, триграммы), и вычислялось их общее число с использованием модуля NTLK (<http://www.nlk.org/>), написанного на языке Python.

² Исходные данные и результаты их обработки автором можно получить по адресу <https://yadi.sk/d/-Z2nNVWZkq3JW>

³ <http://mediametrics.ru/info/developers.html>

⁴ Национальный корпус русского языка: <http://www.ruscorpora.ru/lgrams.top.html>

⁵ Программа mystem проводит морфологический анализ текста на русском языке <https://tech.yandex.ru/mystem/>

Исходные данные публикаций (фрагмент)

Id	URL	Title	Article_id	Date
1	gazeta.ru/politics/news/2014/04/09/n_6071597.shtml	Ким Чен Ын сжег из огнемета министра общественной безопасности КНДР	43178138	15.09.14 21:29
2	vesti.ru/doc.html?id=1461162	Ким Чен Ын сжег из огнемета высокопоставленного чиновника	52751562	15.09.14 21:29
3	echo.msk.ru/blog/azar_i/1296782-echo/	«Это полная махновщина». Репортаж из Донецка	35160183	15.09.14 21:29
4	kp.ru/daily/26218.3/3101144/	Ванга: «То, что объединялось, — рассыплется на кусочки. Это будет рядом с Россией»	46890504	15.09.14 21:29

Пример команд в NTLK⁶:

- для разбиения текста на триграммы:
`classmethod from_words(words, window_size = 3)[source]`
- для подсчета числа заданных биграмм в тексте:
`score_ngram(score_fn, w1, w2)[source]`

Ниже представлен набор 12 биграмм, составленных из лексем⁷, выделенных в тексте, полученном по ссылке <https://slon.ru/posts/60181>: *россия выделять, выделять иран, иран экспортный, экспортный кредит, кредит млрд, млрд ноябрь, ноябрь просмотр, просмотр россия, россия готовый, готовый выделять, выделять иран, иран экспортный, экспортный кредит.*

В результате модуль сбора данных формировал массив вида {*n*-грамма, дата публикации, тип *n*-граммы, страна источника публикации} для каждой публикации. Повторные *n*-граммы в публикации не учитывались. Результат записывался в базу данных.

• **База данных.** База данных, необходимая для хранения импортированных первичных и обработанных впоследствии данных, была реализована с применением ПО MySQL DataBase. Она представляет собой структуру из перечисленных далее таблиц.

♦ **Articles** — MySQL-таблица с данными по публикациям: уникальный присвоенный номер (Article_id), источник (URL), заголовок (Title) и дата публикации (Date). Фрагмент такой таблицы представлен в табл. 1.

♦ **URLs** — MySQL-таблица с данными по посещаемости (число просмотров) сохраненных публикаций. Фрагмент такой таблицы представлен в табл. 2.

♦ **N-grams**-таблица MySQL с данными по выявленным *n*-граммам в сохраненных публикациях. Пример содержания такой таблицы представлен в табл. 3.

• **Модуль анализа данных.** Программный модуль для анализа первичных данных был реализован на

⁶ Подробное руководство доступно по адресу <http://www.nltk.org/api/nltk.html>

⁷ Протестировать часть разработанного ПО для лемматизации текстов и "нарезки" на биграммы можно по адресу <http://obraz.comstrategy.org/text/grab>

Таблица 2

Данные о просмотрах публикаций (фрагмент)

Id	URL_id	Visitors_delta	Date	Language
1	1	725426	10.04.14	ru
2	2	673018	10.04.14	ru
3	3	610335	10.04.14	ru

Таблица 3

N-граммы, полученные из публикации (фрагмент)

URL_id	N-gramm	Counts	Gramm_type
166897	авто кредит	1	bi
166897	авто часто	1	bi
166897	автовокзал сторона	1	bi

Примечание: *Counts* — счетчик числа вхождений *n*-граммы во всех публикациях; *Gramm_type* — тип *n*-граммы

скриптовом языке PHP версии 5.4. Данный модуль выполняет три основные функции:

1) определение мемов, т. е. *n*-грамм с агрессивностью не менее 1;

2) расчет силы информационного воздействия для каждого мема; фрагмент таблицы с результатами анализа (функций 1 и 2) представлен в табл. 4;

3) выгрузку агрегированных данных в виде csv-файла, как представлено на примере в табл. 5.

Дополнительный анализ и визуализацию данных проводили с использованием возможностей, которые представляет ПО Microsoft Excel. При выделении мемов применялось ограничение по числу *n*-грамм, а именно *не менее* двух копий в рассматриваемый интервал времени (условие $N_1 \geq 2$). Такое ограничение позволяет исключить случайные появления редко встречающихся *n*-грамм (например, случаи, когда нет ни одной копии или имеется только единичная).

Таблица 4

Характеристики мемов, представленных в публикациях (фрагмент)

Id	Meme	A	F	N1	N2	G1	G2	Date
1	украинский армия	4,085	0,0013318	22	54	0,0000593	0,0003014	20.06.14
2	украинский армия	5,67	0,0013099	18	60	0,0000513	0,0003424	21.06.14
3	петр порошенко	3,143	0,0012195	24	48	0,0000647	0,0002679	20.06.14

Таким образом, повышалась статистическая надежность определения мемов. Дополнительный расчет показал, если снизить порог с 2 до 1 (условие $N_1 \geq 1$), то мемов становится значительно больше (около 30 000). Однако, как показал последующий анализ, большинство из них представляют устойчивые словосочетания, не связанные со смысловыми событиями в ИП. В случае использования условия $N_1 \geq 3$

было определено всего 105 мемов, которые в большинстве своем представлены устойчивыми словосочетаниями, подверженными сильным флуктуациям. К их числу относятся, например, "Владимир Путин", "Президент США". Использование только таких сочетаний слов сильно сужает разнообразие представления ими любого содержания. Это обстоятельство приводит к неразличимости содержаний сообщений

Таблица 5

Набор данных, используемых для моделирования эволюции ИП (фрагмент)

URL_id	Date*	Number of views (число просмотров)	Number of memes (число мемов)	Force F (суммарная сила мемов)	Memes (список мемов)	Domen	URL
63488	48	44401	17	$6,88 \cdot 10^{-3}$	пассажир член; крушение малайзийский; пассажир член экипаж; сбивать самолет; член экипаж; зенитноракетный комплекс; комплекс бук; служба безопасность; пассажирский самолет; зенитноракетный комплекс бук; обращать внимание; украина сообщать; воздушный пространство; ужесточить санкция против; украинский власть; самолет сбивать; ужесточить санкция;	rian.com.ua	rian.com.ua/view/20140718/355057047.html
96199	48	649931	4	$3,81 \cdot 10^{-3}$	пассажир член; погибать пассажир; украина сообщать; донецкий область;	lenta.ru	lenta.ru/news/2014/07/18/missile/
96949	48	388894	11	$6,44 \cdot 10^{-3}$	пассажир член; пассажир член экипаж; сбивать самолет; член экипаж; комплекс бук; служба безопасность; безопасность украина; обращать внимание; служба безопасность украина; донецкий область; тот факт;	interfax.ru	interfax.ru/world/386472

* Date — число суток начиная с 01.06.2014 г.

и росту ошибок количественного описания изменения ИП СТС.

Таким образом, в качестве оптимального условия в дальнейших расчетах использовали $N_1 \geq 2$. Среди всех n -грамм исходного массива было выявлено 1 038 779 уникальных n -грамм. Подавляющее большинство уникальных n -грамм встречались в статьях очень редко — лишь несколько раз (1–5) за весь 92-дневный анализируемый период. Для того чтобы обоснованно исключить из дальнейшего анализа редко встречающиеся n -граммы, была построена зависимость числа уникальных n -грамм N_n , которые встречались не менее N_{\min} раз на исследуемом интервале времени от величины N_{\min} (рис. 3).

Судя по виду графика $N_n(N_{\min})$, существует некоторое пороговое значение N_{\min} (ориентировочно $N_{\min} = 10$), которое разбивает график на две части с принципиально различным характером изменения. С увеличением N_{\min} от 0 до 10 происходит резкий (близкий к экспоненциальному) спад числа уникальных n -грамм. По-видимому, это происходит за счет исключения редко встречающихся последовательностей слов, которые не распространяются в ИП. Однако при дальнейшем увеличении N_{\min} от 10 до 40...50 число уникальных n -грамм практически не изменяется и составляет 7000...15 000. Эти n -граммы, повторяющиеся не менее 10 раз за трехмесячный период, могут представлять собой как устойчивые словосочетания, так и актуальные в данный период времени n -граммы, многие из которых могут быть мемами. По этой причине для дальнейшего анализа были выбраны только часто встречающиеся n -граммы. С некоторым запасом по N_n были выбраны 37 716 n -грамм, которые встречались за рассматриваемый период не менее 5 раз. Такой четырехкратный запас по N_n обеспечивал снижение N_{\min} с 10 до 5, что позволяло в дальнейшем выделить даже нетипичные мемы, например, с очень малым временем существования.

В результате обработки 3000 публикаций были получены следующие результаты:

- число слов — 1,3 млн ед.;
- число n -грамм (биграмм и триграмм) — 3 млн ед.;
- число статистически значимых n -грамм — 1 млн ед.;

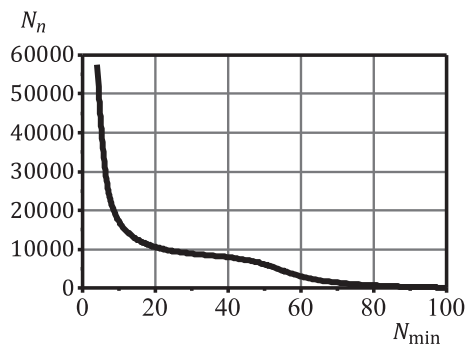


Рис. 3. Зависимость числа уникальных n -грамм N_n от минимального числа их копий N_{\min} за период июнь — август 2014 г.

- число n -грамм, подходящих под категорию мемов, — 38 тыс. ед.

Сравним вычислительные ресурсы, которые необходимы для работы с n -грамм-моделью и мем-грамм-моделью. Во-первых, расчеты даже первого параметра для n -грамм требуют в 70 раз больше ресурсов, чем использование мемов, по причине кратной разницы в их числе (n -грамм больше). Во-вторых, выявленные n -граммы или мемы в дальнейшем используются для описания ИП СТС более сложными конструкциями — моделями знаний. Поскольку в моделях знаний важна последовательность элементов (синтаксис), то число комбинаций попарных связей из n элементов можно посчитать по формуле числа размещений с повторениями:

$$\tilde{A}_n^2 = n^2.$$

В результате численного эксперимента получим следующие оценки числа необходимых для получения результата вычислительных операций:

- для n -грамм

$$\tilde{A}_{1\,000\,000}^2 (n\text{-граммы}) = 1\,000\,000^2 = 10^{12};$$

- для мемов⁸

$$\tilde{A}_{38\,000}^2 (\text{мемы}) = 38\,000^2 = 3,8 \cdot 10^7.$$

Отсюда следует, что эффективность модели (EF) на единицу рассчитываемого параметра для собранных данных на основе 3000 текстов

$$EF = \frac{\tilde{A}_{1\,000\,000}^2 (n\text{-граммы})}{\tilde{A}_{38\,000}^2 (\text{мемы})} = 2,6 \cdot 10^4.$$

Таким образом, даже на этапе предварительной обработки рассматриваемой коллекции данных можно сделать следующий вывод: даже принимая во внимание тот факт, что качество описания процесса изменения содержания ИП СТС с использованием мем-грамм-модели будет не хуже, чем с использованием n -грамм-модели [13], это позволит существенно (в десятки тысяч раз!) сократить вычислительные ресурсы для анализа содержания ИП СТС. Подобная оптимизация очень важна, особенно для систем, работающих с большими потоками данных в реальном времени.

2.2. Результаты экспериментов

В 3000 статей, опубликованных за три месяца, содержится около **3 млн n -грамм**, среди которых около 38 000 уникальных (биграмм и триграмм) повторяются не менее 5 раз и могут содержать уникальные n -граммы, подходящие под категорию мемы (мем-граммы). Наибольшая агрессивность мемов, определенных на интервале времени в одни сутки, составляет 5,61, что почти в 6 раз выше пороговой агрессивности ($A = 1$), необходимой для определения

⁸ Уникальных n -грамм, подходящих под категорию мемов

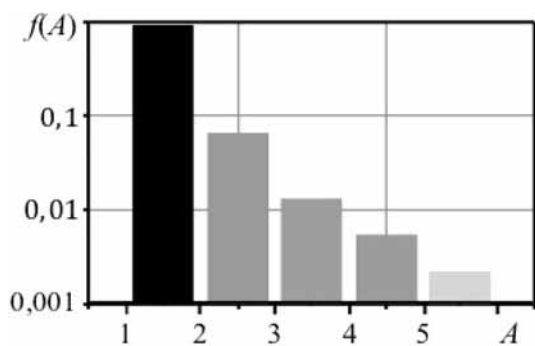


Рис. 4. Распределение числа копий мемов в зависимости от агрессивности мемов

мема. Распределение мемов по агрессивности, как видно на рис. 4, близко к логарифмическому нормальному. Большинство мемов (около 90%), согласно рис. 4, имеют сравнительно низкую агрессивность от 1 до 2 ед.

Дата появления большинства наиболее агрессивных мемов 17 и 18 июля 2014 г. соответствует дате падения малайзийского Боинга-777 (17 июля 2014 г.). Как будет показано далее, одним из преимуществ мем-грамм-модели перед n -грамм-моделью является возможность определять дату появления языковой единицы, а не дату наибольшего обсуждения языковой единицы, которая может существенно запаздывать.

Разработанный алгоритм в качестве мемов определил n -граммы, частично совпадающие между собой и имеющие одинаковые характеристики A (агрессивности) и F (силы). Например, "иностранное дело" и "министр иностранное дело", "США барак" и "США барак обамба". В дальнейшем целесообразно скорректировать алгоритм выделения мемов для исключения таких случаев частичного дублирования.

Преимущество мем-грамм-модели перед n -грамм-моделью можно проиллюстрировать на графике зависимости среднего числа просмотров статьи $N_{\text{пр.с.}}$ от числа n -грамм в публикации $N_{n/c}$ (рис. 5). Если n -грамма представляет собой мем и встречается в статье более 4 раз, то число просмотров статьи на

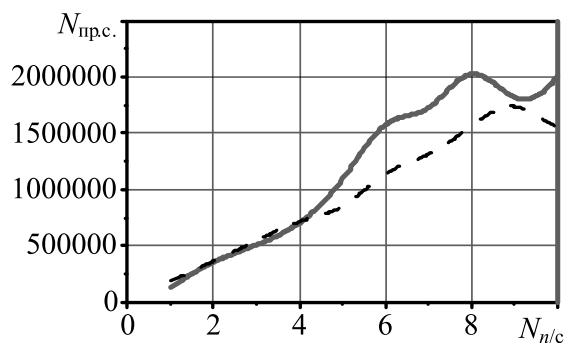


Рис. 5. Зависимость числа просмотров публикации, содержащей мемы и n -граммы, от числа копий, соответствующих представленным в ИП СТС мемам (сплошная линия) и n -граммам (штриховая линия)

20...30% выше, чем в случае, если повторяющаяся n -грамма не является мемом. Напомним, что уже при $N_1 \geq 3$ для описания содержания ИП остаются только устойчивые словосочетания, поэтому мемы с $N_1 \geq 4$ не пригодны для выявления нового содержания. Сравнение зависимостей $N_{\text{пр.с.}}(N_{n/c})$ для мемов и n -грамм использовалось также для обоснования целесообразности принятия условия $N_1 \geq 2$, так как в интервале $2 \leq N_1 \leq 3$ на рис. 5 графики для мемов и n -грамм практически совпадают.

Таким образом, предложенный математический формализм позволяет выделить значительное число мемов (942 за три месяца). Если с учетом отмеченной выше оптимизации пересчитать показатель эффективности мем-грамм-модели EF на единицу операции, получим:

$$EF = \frac{\tilde{A}_{1000000}^2 (n\text{-граммы})}{\tilde{A}_{942}^2 (\text{мемы})} = 1,1 \cdot 10^8.$$

Первые оценки показывают преимущества мем-грамм-модели перед n -грамм-моделью в определении даты появления языковой единицы и связи с числом просмотров статей. По каждому из 942 мемов был проведен расчет основных параметров мем-грамм-модели (A , F , N , G) в последовательные моменты времени с шагом в 1 день. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Сопоставим реальные события со значениями оценок изменения ИП с применением мем-грамм-модели (метрика — сила) и n -грамм-модели (метрика — число n -грамм). Как видно на диаграмме, представленной на рис. 6, по пикам силы изменения ИП (рис. 6, а) легко выявляется наличие значимого информационного события, в то время как по n -граммам выявлять такие события нельзя (рис. 6, б).

В табл. 7—9 продемонстрированы результаты работы n -грамм- и мем-грамм-моделей на базе выявленных наиболее вероятных элементов содержания ИП, рассматриваемых за разные интервалы времени.

Если агрегировать изменяющиеся элементы описания плана содержания ИП (мемы и n -граммы), можно получить представленный в табл. 10 результат.

Таким образом, n -граммы, отобранные по принципу высокой частоты их появления, приводят к тому, что описание содержания ИП СТС за различные интервалы времени повторяется. Этот факт приводит к более субъективному отображению состояния дел. Напротив, использование мемов позволяет зафиксировать динамику изменения описания события.

Рассмотрим динамические характеристики параметров мемов. Спектр сигнала отдельного мема m (изменение числа копий мема во времени) не представляет интереса, так как обладает высокой статистической ошибкой в силу малого числа копий мемов N_m (5...50 для большинства мемов) на интервале наблюдений. Поэтому рассчитывался спектр (полученный с применением преобразования

Таблица 6

Расчет характеристик для дальнейшего анализа, $\Delta t = 30$ дней

Мем	A	F	N (t1)	N (t2)	G (t1)	G (t2)	Date
санкция против	1,08200	0,00071	39,00000	112,00000	0,00007	0,00014	20.06.14
санкция против	1,34600	0,00069	34,00000	113,00000	0,00006	0,00014	19.06.14
санкция против	2,02300	0,00069	27,00000	119,00000	0,00005	0,00015	18.06.14
санкция против	2,71800	0,00060	21,00000	124,00000	0,00004	0,00016	17.06.14
санкция против	2,69300	0,00054	19,00000	123,00000	0,00004	0,00016	16.06.14
гуманитарный помощь	1,02800	0,00049	37,00000	97,00000	0,00005	0,00010	27.06.14
санкция против	2,11900	0,00048	19,00000	118,00000	0,00005	0,00015	15.06.14
гуманитарный помощь	1,02100	0,00047	36,00000	95,00000	0,00005	0,00010	26.06.14
санкция против	1,85700	0,00044	19,00000	113,00000	0,00005	0,00014	14.06.14
санкция против	1,85000	0,00039	17,00000	111,00000	0,00005	0,00014	13.06.14
санкция против	1,79300	0,00033	15,00000	108,00000	0,00005	0,00014	12.06.14
барак Обама	1,26100	0,00031	22,00000	79,00000	0,00004	0,00010	17.06.14
санкция против	1,38500	0,00028	15,00000	104,00000	0,00005	0,00013	11.06.14
барак Обама	1,11900	0,00027	21,00000	78,00000	0,00005	0,00010	16.06.14
президент США	1,00900	0,00022	21,00000	67,00000	0,00004	0,00008	17.06.14
вводить санкция	2,57500	0,00021	14,00000	71,00000	0,00002	0,00008	21.06.14
член экипаж	1,18800	0,00021	20,00000	62,00000	0,00004	0,00008	19.06.14
вводить санкция	1,53100	0,00021	19,00000	66,00000	0,00003	0,00007	24.06.14
член экипаж	1,60800	0,00021	14,00000	76,00000	0,00004	0,00010	14.06.14
вводить санкция	3,34900	0,00021	12,00000	72,00000	0,00002	0,00009	20.06.14

Таблица 7

Сравнительный анализ мемов и n-грамм, $\Delta t = 1$ день

ТОП 15 мемов		ТОП 15 n-грамм	
Мем	F, СИВ	n-грамма	Число копий
донецкая область	0,00039	член экипаж	23
риа новость	0,00037	амстердам куалалумпур	19
июнь риа	0,00033	донецкий область	19
июнь риа новость	0,00033	крушение малайзийский	19
член экипаж	0,00026	пассажирский самолет	18
зона ато	0,00026	украинский армия	18
народный республика	0,00026	российский войско	17
сбивать самолет	0,00025	установка бук	17
самый дело	0,00024	пассажир член	16
украинский военный	0,00021	самолет сбивать	16
местный житель	0,00021	малайзийский авиалиния	16
крушение самолет	0,00021	сбивать самолет	16
владимир путин	0,00020	крушение самолет	15
сей пора	0,00019	небо над	15
министр внутренний	0,00015	посольство киев	15

Полужирным шрифтом выделены n-граммы, которые повторяются в разные интервалы времени

20 июня

мемы: луганский республика, верховный рада, сторона украина, факт обстрел, ростовский область, июнь риа, сообщать риа

18 июля

мемы: крушение малазийский, пассажир член экипаж, сбивать самолет, погибать пассажир, зенитноракетный комплекс

18 августа

мемы: министр иностранный дело, дело украина, местный житель, ангел меркель, принимать участие, владимир владимирович

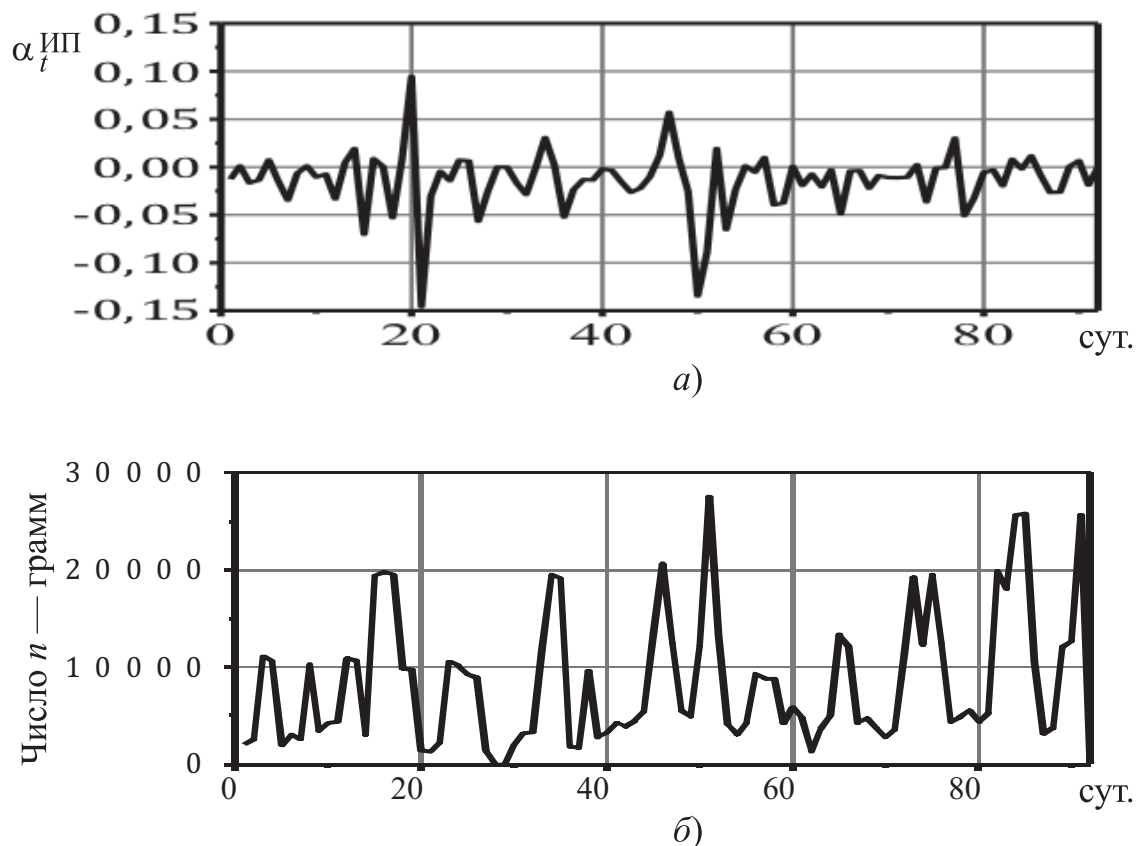


Рис. 6. Сравнения мем-грамм-модели и n -грамм-модели:

a — изменения информационного пространства ($\alpha_t^{ИП}$); мем-грамм-модель; b — изменение информационного пространства (число n -грамм); n -грамм-модель

Фурье), усредненный по всем мемам согласно формуле

$$F^m(1/T_i) = \frac{k_1}{n_m} \sqrt{\left(\sum_i N_{\Delta_i}^m \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} i\right) \right)^2 + \left(\sum_i N_{\Delta_i}^m \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} i\right) \right)^2},$$

где n_m — число уникальных мемов за рассматриваемый период времени.

В ходе расчетов частота $1/T_i$ разбивалась (дискретизировалась) на 100 уровней: $i = 1...100$, при этом $1/T_i$ изменялась, соответственно, в диапазоне $0,005...0,50 \text{ сут}^{-1}$, а периоды изменялись в диапазоне $2...200 \text{ сут}$. Нормировка коэффициентом k_1 для задач данной работы не несла смысловой нагрузки, поэтому было принято $k_1 = 1$. Для сравнительного анализа рассчитаны три варианта усредненных спектров для трех вариантов, представленных на рис. 7 и 8.

Набор периодических процессов для мемов существенно отличается (рис. 8, б). Для мемов ярко выражен пик I при $1/T = 0,232 \text{ сут}^{-1}$ (частота появления), соответствующий периоду $T = 4,31 \text{ сут}$. Если привязать данный период к дням недели, по-видимому, интерес к мемам, проявившимся в понедельник во второй половине дня, повторяется в пятницу в первую половину дня. Пик I выражен как для агрессивных, так и для неагрессивных мемов. Таким образом, многие мемы развиваются циклически с периодом 4,31 сут.

Для наиболее агрессивных мемов ($A > 2$), кроме пика I, явно выражен пик II (рис. 8, в) при частоте $1/T = 0,161 \text{ сут}^{-1}$, что соответствует периоду $T = 6,21 \text{ сут}$. Таким образом, наиболее агрессивные мемы заполняют информационное пространство социума с периодичностью 4,31 и 6,21 сут. По-видимому, после начального появления мема ($t = 0$)

Таблица 8

Сравнительный анализ мемов и *n*-грамм, $\Delta t = 4$ дня

ТОП 15 мемов		ТОП 15 <i>n</i> -грамм	
Мем	<i>F</i> , СИВ	<i>n</i> -грамма	Число копий
вооруженный сила	0,00073	тот кто	548
донецкий область	0,00070	вооруженный сила	535
vladimir putin	0,00065	местный житель	474
петр порошенко	0,00063	июль риа	459
сей пора	0,00058	зона ато	458
крушение малайзийский	0,00057	крушение малайзийский	452
член экипаж	0,00053	украинский силовик	426
тот кто	0,00050	июль риа новость	412
народный республика	0,00049	донецкий область	399
риа новость	0,00049	сила украина	378
восток украина	0,00048	амстердам куалалумпур	375
боевой действие	0,00045	член экипаж	359
территория украина	0,00044	пассажирский самолет	339
президент США	0,00044	малайзийский авиалиния	325
президент украина	0,00043	антитеррористический операция	318

Полужирным шрифтом выделены *n*-граммы, которые повторяются в разные интервалы времени

Таблица 9

Сравнительный анализ мемов и *n*-грамм, $\Delta t = 30$ дней

ТОП 15 мемов		ТОП 15 <i>n</i> -грамм	
Мем	<i>F</i> , СИВ	<i>n</i> -грамма	Число копий
санкция против	0,00073	вооруженный сила	3880
гуманитарный помощь	0,00070	тот кто	3229
барак обама	0,00065	местный житель	2439
президент США	0,00063	украинский силовик	2260
член экипаж	0,00058	июль риа	2092
гуманитарный конвой	0,00057	вооруженный сила украина	2048
вводить санкция	0,00053	сила украина	1887
крушение малайзийский	0,00050	сей пора	1763
зона ато	0,00049	зона ато	1753
советский союз	0,00049	июль риа новость	1678
добровольческий батальон	0,00048	антитеррористический операция	1667
самолет сбивать	0,00045	донецкий область	1426
июль риа	0,00044	украинский армия	1354
санкционный список	0,00044	про тот	1347
гуманитарный груз	0,00043	крушение малайзийский	1313

Полужирным шрифтом выделены *n*-граммы, которые повторяются в разные интервалы времени

ТОП 15 n -грамм и мемов

Список ТОП 15 n -грамм, описывающих содержание ИП за июнь — август 2014 г.	Список ТОП 15 мемов, описывающих содержание ИП за июнь—август 2014 г.
амстердам куалалумпур, антитеррористический операция, вооруженный сила, вооруженный сила украина, донецкий область, зона ато, июль риа, июль риа новость, комплекс бук, крушение малайзийский, крушение самолет, малайзийский авиалиния, местный житель, небо над, область украина, пассажир член, пассажирский самолет, посольство киев, про тот, российский войско, самолет сбивать, сбивать самолет, сей пора, сила украина, тот кто, украинский армия, украинский силовик, установка бук, член экипаж (всего 29)	барак обاما, боевой действие, вводить санкция, владимир путин, вооруженный сила, восток украина, гуманитарный груз, гуманитарный конвой, гуманитарный помощь, добровольческий батальон, донецкий область, зона ато, июль риа, риа новость, крушение малайзийский, крушение, самолет, луганский область, местный житель, министр внутренний, народный республика, петр порошенко, президент США, президент украина, самолет сбивать, самый дело, санкционный список, санкция против, сбивать самолет, сей пора, советский союз, территория украина, тот кто, украинский военный, член экипаж (всего 35)

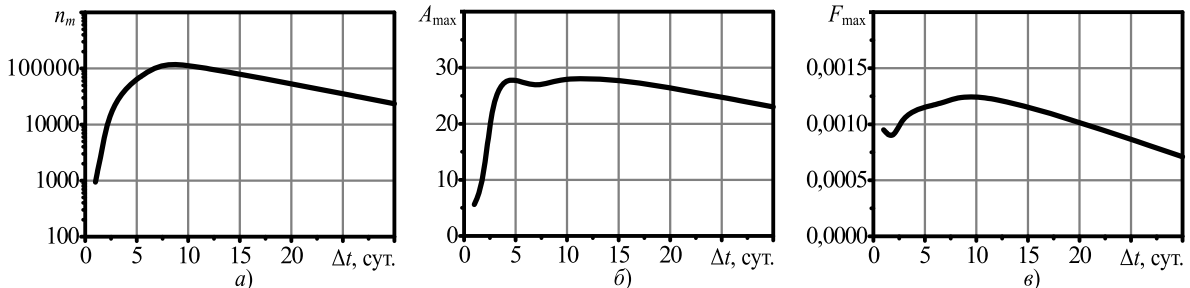
интерес к нему спадает, и следующий всплеск интереса появляется через четверо суток ($t = 4,31$ сут), потом снова спадает, и некоторый интерес снова проявляется еще через двое суток ($t = 6,21$ сут).

Третий пик (III на рис. 8) из наиболее выраженных на спектрах, по всей вероятности, является кратным пику I (соответствует периоду 8,20 сут, что близко к значению, равному $2 \times 4,31$), поэтому отдельной смысловой нагрузки не несет.

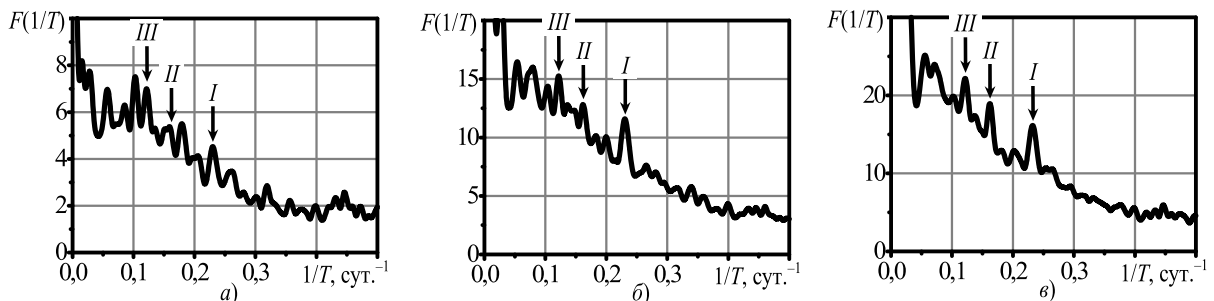
Обнаруженная периодичность в развитии мемов позволяет использовать найденные периоды для прогнозирования развития мемов, а также уточнять для произвольной n -граммы, является она мемом, или

нет. Дополнительно приведем сравнение спектров для всех n -грамм и n -грамм с агрессивностью менее 1 (т. е. не мемов по определению).

Спектры, представленные на рис. 9, практически одинаковы. Это соответствует ожиданиям, так как мемов лишь 2,5 % от всех n -грамм и их вклад в общий спектр очень мал. Отличие этих двух спектров лишь в том, что пики I и III без мемов становятся немного ниже. Это подтверждает пригодность использования мемов для изучения изменения содержания ИП. Доля n -грамм с агрессивностью менее 1 составляет 97,5 % от всего числа n -грамм. Таким образом, доля единиц наследственности (мемов)

Рис. 7. Влияние ширины интервала Δt :

a — на число найденных мемов n_m ; b — на максимальную агрессивность A_{\max} ; e — на максимальную силу F_{\max}

Рис. 8. Спектры $F(1/T)$ временных зависимостей $N(t)$ копий n -грамм:

a — всех исследуемых n -грамм (37716 ед.); b — мемов (942 n -граммы с $A > 1$); e — наиболее агрессивных мемов (79 n -грамм с $A > 2$)

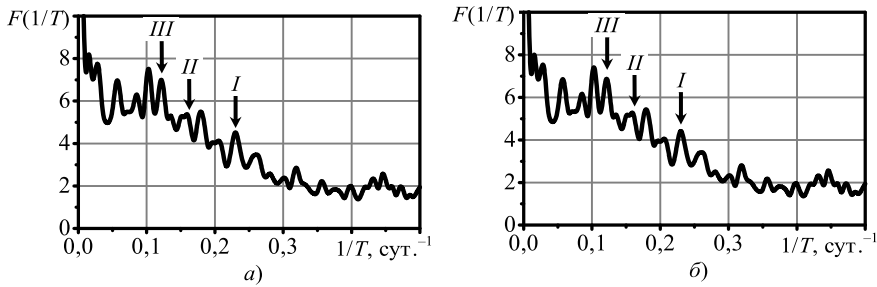


Рис. 9. Спектры $F(1/T)$ временных зависимостей $N(T)$ копий n -грамм: *a* — всех исследуемых n -грамм (37 716 единиц); *b* — для не мемов (36 774 n -граммы с $A < 1$)

в исследуемом ИП СТС за июнь — август 2014 г, составила всего 2,5 %.

Заключение

Проведенное исследование позволило сформулировать следующие выводы.

- В 3000 статей (суммарным объемом 1,3 млн слов), опубликованных за три месяца (июнь — август 2014 г.) в русскоязычном сегменте ИП СТС, содержится около 3 млн n -грамм, среди которых около 38 000 уникальных n -грамм повторяются не менее 5 раз и могут содержать мемы.

- Предложенный математический аппарат позволяет выделить значительное число мемов (942 за три месяца), и первые оценки показывают преимущества мем-грамм-модели перед n -грамм-моделью в определении даты появления языковой единицы и связи с числом просмотров статей.

- N -граммы, отобранные по принципу высокой частоты появления в ИП СТС, приводят к повторяемости описания его содержания, что в итоге приводит к неполному описанию с позиции изучения динамики его изменения. Использование мемов позволяет зафиксировать более детально динамику изменения содержания ИП СТС.

- Недостатком характеристики "число копий n -граммы" является ее интегральный характер. Она описывает рассматриваемый период усредненно и позволяет определить наиболее обсуждаемые тематики за данный период. Преимущество мемов заключается в их дифференциальном характере. Они позволяют определить новые значимые события, появившиеся за рассматриваемый период времени, определить дату широкого распространения информации, оценить силу воздействия, спрогнозировать дальнейшее развитие мема, выявить вызовы информационных угроз содержанию ИП и оценить необходимую силу информационного воздействия для их нейтрализации.

- Информационное пространство целесообразно характеризовать не просто набором мемов, а мультиинтервальным набором мемов. При этом мемы на разных интервалах времени отражают характерную длительность сохранения ключевого понятия в ИП, а также регулярность его появления.

- **Гипотеза 1 частично подтверждается.** Анализ зависимостей изменения во времени сил информационного воздействия на мемы позволяет с высокой надежностью определять ключевые события и дату их появления в исследуемом ИП. В то же время связь между значением суммы сил мемов в сообщении и числом просмотров сообщения имеет нелинейный (сложный) характер. Поэтому необходимо выявление дополнительных факторов, влияющих на число просмотров (охват) сообщения в зависимости от силы мемов сообщения.

- **Гипотеза 2 подтверждается полностью.** Агрессивность мема в пределах 1...10 ед. является ключевым признаком, позволяющим отличить мем от устойчивого выражения (так называемой культурной языковой константы). Применение усредненного (по всем мемам) преобразования Фурье позволило выявить два эффективных дискретных интервала: наиболее агрессивные мемы (с агрессивностью 1...10 ед.) заполняют ИП социума с периодичностью **4,31** и **6,21** сут.

- Использование мем-грамм-модели позволяет существенно сократить вычислительные ресурсы (10^4 — 10^8 раз на единицу вычислительной операции, в сравнении с n -грамм моделью), необходимые для обработки публикации на естественном языке, в целях изучения и моделирования процесса изменения содержания ИП социума.

Автор выражает благодарность научному руководителю д-ру физ.-мат. наук, проф. МГУ имени М. В. Ломоносова В. А. Васенину, а также канд. физ.-мат наук, ст. науч. сотр. МГУ имени М. В. Ломоносова А. В. Галатенко за помощь в разработке мем-грамм-модели, формировании выводов по результатам испытаний ее программной реализации и в подготовке к публикации данной статьи.

Список литературы

1. Луман Н. Общество как социальная система. М.: Логос, 2004. 232 с.
2. Hilbert M., López P. The world's technological capacity to store, communicate, and compute information // Science. 2011. Vol. 332, N 6025. P. 60—65.
3. Липпман У. Общественное мнение. М.: Институт Фонда "Общественное мнение", 2004. 384 с.
4. Ноэль-Нойман Э. Общественное мнение: Открытие спирали молчания: пер. с нем. М.: Прогресс-Академия, Весь мир, 1996. 352 с.
5. Шарков Ф. И. Основы теории коммуникации. М.: Социальные отношения, 2003.
6. Kuhn T. S. The structure of scientific revolutions. University of Chicago press, 2012.
7. Налимов В. В. Вероятностная модель языка. О соотношении естественных и искусственных языков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1979. 303 с.
8. Расторгуев С. П. Информационная война. М.: Радио и связь, 1998. 416 с.
9. Krasnogor N., Smith J. A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues // Evolutionary Computation, IEEE Transactions on. 2005. Vol. 9, N 5. P. 474—488.

10. Leskovec J., Backstrom L., Kleinberg J. Meme-tracking and the dynamics of the news cycle // Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2009. P. 497–506.

11. Gabora L. Meme and Variations: A computer model of cultural evolution // Lectures in Complex Systems. 1993. P. 471–486.

12. Артёмов А. А. Модель оценки уровня угроз информационных вызовов плану содержания информационного пространства социально-телекоммуникационной системы // Информационные войны. 2015. № 3. С. 83–97.

13. Ramisch C. N-gram models for language detection. URL: <http://ru.scribd.com/doc/244210124/N-gram-Models-for-Language-Detection#>

14. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient estimation of word representation in vector space. URL: <http://arxiv.org/pdf/1301.3781.pdf>

15. Будников Е. А. Обзор некоторых статистических моделей естественных языков // Машинное обучение и анализ данных. 2011. Т. 1, № 2. С. 243–248.

An Experiment of Simulation of the Process of Society's Information Space Content Evolution (Using the Meme-gram-model)

A. A. Artemov, artemsinc@gmail.com, MSU, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author:

Artemov Artem A., Engineer, MSU, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: artemsinc@gmail.com

Received on March 01, 2016

Accepted on April 21, 2016

In this paper is presented the research of a mathematical model describing the process of modification of the information space of social-telecommunication system due to the focused information exposure. The contemporary system of mass communications is viewed by the author as a complexly structured social-telecommunication system where social groups of people are integrated with telecommunication systems in the multichannel informational paradigm. The author presents a hypothesis that the information space of contemporary society can be described by the dynamics of the changing of informational messages which are spread by the means of mass communication technologies. The problem of identification of the optimal structural elements of the content of a message, units of their measurement and evaluation of the quantitative and qualitative characteristics of the information space is solved by the author with the help of synthesizing the methods of structural and corpus linguistics based on *n*-grams, the approaches of cultural evolution — memetics, the model of language probability, theory of informational confrontation and the theory of system-cognitive analysis. The author defines the metric of the heredity content of the information space, introduces the term "power of information exposure" based on the evaluation of the changing content of the information space. The meme-gram model to describe the evolution of the content of the information space, developed by the author, is proposed.

Keywords: Meme-gram-model, Socio-Telecommunications System, information space of society, meme, memetics algorithm, Stanford's MemeTracker, MAV model Evolution of Culture, language model, the force of information influence, aggression of meme, meme fitness, meme mutation, heredity, Mediametrics, media publications, publications in social networks, *n*-gram, NTLK, Yandex mystem

For citation:

Artemov A. A. An Experiment of Simulation of the Process of Society's Information Space Content Evolution (Using the Meme-Gram-Model), *Programmnyaya Ingeneria*, 2016, vol. 7, no. 7, pp. 291–306.

DOI: 10.17587/prin.7.291-306

References

1. Luman N. *Obshchestvo kak social'naya sistema* (Society as a social system), Moscow, Logos, 2004. 232 p. (in Russian).

2. Hilbert M., López P. The world's technological capacity to store, communicate, and compute information, *Science*, 2011, vol. 332, no. 6025, pp. 60–65.

3. Lippman U. *Obshchestvennoe mnenie* (Public opinion), Moscow, Institut Fonda "Obshchestvennoe mnenie", 2004, 384 p. (in Russian).

4. Noeh'Nojman E. H. *Obshchestvennoe mnenie: Otkrytie spirali molchaniya: per. s nem* (Public opinion: discovery of the spiral of silence), Moscow, Progress-Akademiya, Ves' mir, 1996, 352 p. (in Russian).

5. Sharkov F. I. *Osnovy teorii kommunikacii* (Basic theory of communication), Moscow, Social'nye otnosheniya, 2003 (in Russian).

6. Kuhn T. S. *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago press, 2012.

7. Nalimov V. V. *Veroyatnostnaya model' yazyka. O sootnoshenii estestvennykh i iskusstvennykh yazykov* (A probabilistic model of language, the relation between natural and artificial languages), 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Nauka, 1979, 303 p. (in Russian).

8. Rastorguev S. P. *Informacionnaya vojna* (Information warfare), Moscow, Radio i svyaz', 1998, 416 p. (in Russian).

9. Krasnogor N., Smith J. A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 9, no. 5, pp. 474–488.

10. Leskovec J., Backstrom L., Kleinberg J. Meme-tracking and the dynamics of the news cycle, *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, ACM, 2009, pp. 497–506.

11. Gabora L. Meme and Variations: A computer model of cultural evolution, *Lectures in Complex Systems*, 1993, pp. 471–486.

12. Artemov A. A. Model' ocenki urovnya ugroz informacionnykh vyzovov planu soderzhaniya informacionnogo prostranstva social'no-telekommunikacionnoj sistemy (Technique of the assessing level of information threats of challenges to the content plan of infospace of socio-telecommunication system), *Informacionnye vojny*, 2015, no. 3, pp. 83–97 (in Russian).

13. Ramisch C. N-gram models for language detection, available at: <http://ru.scribd.com/doc/244210124/N-gram-Models-for-Language-Detection#>

14. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient estimation of world representation in vector space, available at: <http://arxiv.org/pdf/1301.3781.pdf>

15. Budnikov E. A. Obzor nekotorykh statisticheskikh modelej estestvennykh yazykov (A review of some statistical models of natural languages), *Mashinnoe Obuchenie i Analiz Danykh*, 2011, vol. 1, no. 2. pp. 243–248 (in Russian).

И. О. Жаринов, д-р техн. наук, доц., зав. каф., e-mail: igor_rabota@pisem.net, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), АО "ОКБ "Электроавтоматика",
О. О. Жаринов, канд. техн. наук, доц., e-mail: zharinov73@hotmail.ru, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Автоматизация контроля колориметрических сдвигов при проектировании и производстве бортовых систем индикации

Рассмотрена задача разработки специализированного программного обеспечения, позволяющего оценивать колориметрические сдвиги, возникающие при проектировании и производстве бортовых систем индикации. Колориметрический сдвиг представляет собой смещение координат цветности изображения, заданного в различных цветовых моделях. Колориметрический сдвиг обусловлен несоответствием цветовых охватов различных цветовых моделей. Приведены графики цветовых тел различных цветовых моделей, применяемых на этапах проектирования и производства средств индикации. На примере одного цвета, заданного цветовыми координатами, показаны общие правила конвертации параметров цветовых моделей, актуальных для авиационного приборостроения. Математический аппарат, связывающий цветовые координаты в различных цветовых моделях, составляет основу предлагаемого программного обеспечения. Приведена схема технологического цикла проектирования и производства средств индикации. Схема учитывает этап структурного проектирования изделия, этапы аппаратной и программной реализации изделия, этап технологической подготовки производства, изготовления изделия и его испытаний. Показано соответствие цветовых моделей физическим процессам, свойственным различным этапам проектирования и производства систем индикации.

Ключевые слова: цветовые модели, проектирование, производство, технологический цикл, колориметрический сдвиг, авионика

Введение

Современное промышленное производство неразрывно связано с созданием продукции, обладающей цветовым наполнением. Наглядными примерами являются: цвет текстиля при изготовлении одежды; цвет автомобиля или дорожной разметки, цвет дорожных знаков, зданий и сооружений при изготовлении лакокрасочных покрытий; цвет отображаемых элементов человеко-машинного интерфейса в компьютерных программах или цвет параметров на экране дисплеев информационно-измерительных и управляющих систем.

Наличие цвета придает промышленной продукции важнейшие потребительские качества, но и порождает ряд процедурных вопросов, связанных с документальным подтверждением соответствия наблюдаемого цвета заявленному в технической документации. В основе процедуры подтверждения

цвета лежат колориметрические стандарты, атласы цветов и контрольно-измерительная аппаратура, регистрирующая распределение мощности излучения оптического диапазона в пределах видимых длин волн, а также физические процессы цветовоспроизведения в рамках конкретной предметной области.

Преобразования цветовых моделей [1, 2], т. е. переход от цветовых координат одной цветовой модели к цветовым координатам другой цветовой модели, актуальны для предметных областей, в которых для цветовоспроизведения в едином технологическом цикле применяются различные физические процессы. Такой предметной областью, в частности, является авиационное приборостроение, в рамках которого разработчики создают и сертифицируют образцы бортовых систем индикации, программные средства автоматизации проектирования, технологии производства, техническую документацию и пр.

Очевидно, что для программирования графического контроллера [3], осуществляющего подготовку изображения в видеопамати для его отображения на экране средства индикации, должны использоваться одни цветовые модели, а для создания бумажных оттисков индикационных кадров авионики, приводимых в технических условиях, руководствах по эксплуатации и инструкциях (по занесению данных; по проверке, настройке и регулировке и пр.), — другие; при моделировании оптических схем на инструментальных средствах проектирования автоматизированных рабочих мест, подробно рассмотренных в работе [4], — третьи.

При этом идентичные цвета, представленные в различных цветовых моделях и на различных физических носителях, специфичных по отношению к реальному физическому процессу цветовоспроизведения, должны передаваться без видимых искажений. В связи с этим актуальной является задача разработки программного средства, позволяющего оценивать и прогнозировать возникновение колориметрических сдвигов в технологическом цикле "проектирование — производство" при создании авиационной продукции.

1. Цветовая модель как способ цветоопределения

В традиционном понимании цвет определяется с помощью общепринятых терминов, которые получили название имен цветов: красный цвет, желтый цвет, пурпурный цвет и т. д. Для точного задания цвета в колориметрии применяют цветовые эталоны, цветовые шкалы и атласы цветов.

Однако вследствие ограниченного числа наименований цветов и единства наименования цвета для его различных, но близких цветовых оттенков, задание цвета на уровне наименования (например, серо-буро-малиновый цвет) является малоприменимым для использования в авиационном приборостроении. В связи с этим разработчиками авионики применяется [5] различный математический аппарат, позволяющий строго определить правила задания цветов и цветовых оттенков (правила цветоопределения) в рамках различных цветовых моделей.

Цветовая модель — это модель задания цвета, математически определенная в виде набора чисел (цветовых координат) и геометрически определенная в виде цветового тела в пространстве цветовых координат.

Цветовые модели используются для математического описания определенных цветовых областей спектра, а сам цвет в академическом смысле представляет собой [2] качественную субъективную характеристику электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемую на основе возникающего зрительного ощущения и зависящую от ряда физических, физиологических и психологических факторов.

2. Преобразование цветовых моделей

Для математического описания технологических процессов воспроизведения цвета разработаны [1, 2] различные цветовые модели, в каждой из которых любой цвет может быть представлен в виде точки (рис. 1), принадлежащей цветовому телу в многомерном цветовом пространстве, оси которого определены цветовыми координатами.

В цветовых моделях, получивших [6—8] наибольшее практическое применение в авиационном приборостроении, цветовые координаты определяют либо базовые цвета, из которых формируется наблюдаемый цвет на различных физических носителях, либо светлоту, насыщенность и цветовой тон — свойства, согласующиеся с психологией восприятия наблюдателя.

Упрощенный принцип классификации позволяет разделить все актуальные для авиационного приборостроения цветовые модели на три самостоятельные группы:

- аппаратно-зависимые, т. е. такие цветовые модели (*RGB, CMY, YIQ, YCbCr*), в которых цветовоспроизведение определяется особенностями реализации аппаратной платформы применяемых устройств и технологического оборудования;

- аппаратно-независимые, т. е. такие цветовые модели (*XYZ, Yxy, Yuv, Lab, Luv*), в которых представление цвета не зависит от применяемой бортовой и технологической аппаратуры и определяется исключительно абстрактным математическим описанием колориметрических характеристик цвета в теоретическом пространстве цветовых координат;

- перцепционные, т. е. такие цветовые модели (*HSI, HSL, HSV*), в которых представление цвета основано на интуитивно понятных характеристиках цвета (цветовой тон, насыщенность, светлота), согласованных с психологическими особенностями цветовосприятия стандартного колориметрического наблюдателя.

Для воспроизведения цвета в пределах аппаратно-зависимых цветовых моделей в авиационном приборостроении используются два типа объектов — самосветящиеся оптические устройства (жидкокристаллические или светодиодные экраны средств отображения информации и пр.) и несамосветящиеся объекты, отражающие падающий на них свет (например, бумажные носители индикационных кадров авионики, представленные в технической документации). Для самосветящихся устройств в аппаратно-зависимых цветовых моделях используется аддитивный принцип описания цветовоспроизведения, основанный на сложении базовых цветов. Цвет изображений, представленных на бумажном носителе, формируется по субтрактивному принципу, основанному на вычитании базовых цветовых координат. Аппаратно-зависимые цветовые модели в авиационном приборостроении используют на этапе проектирования и производства аппаратуры и документации.

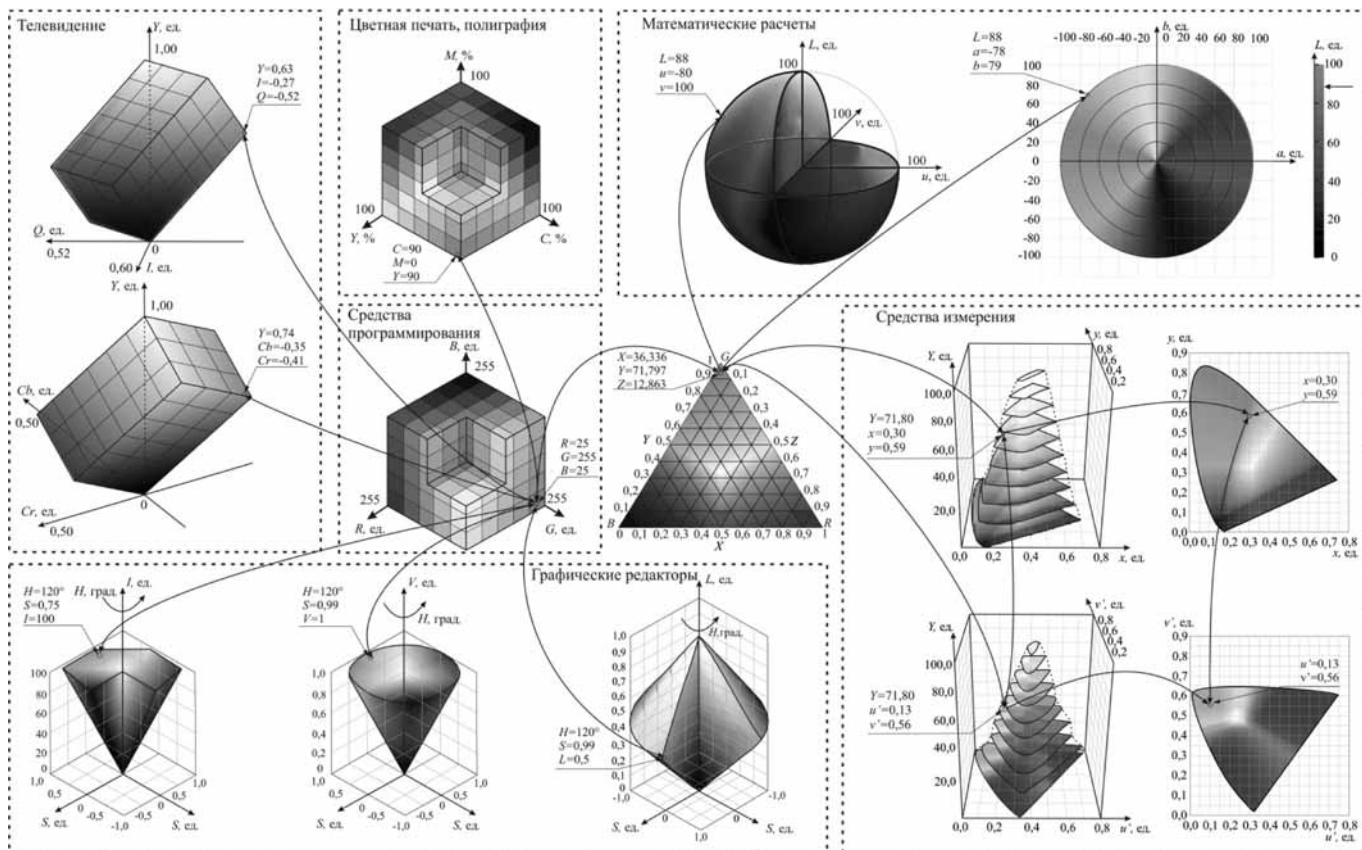


Рис. 1. Правила преобразования цветовых моделей, актуальных для авиационного приборостроения

Аппаратно-независимые цветовые модели применяют в авиационном приборостроении на этапе проектирования для проведения теоретических исследований и колориметрических расчетов при моделировании оптических схем на инструментальных средствах проектирования автоматизированных рабочих мест [4] разработчиков авионики.

Перцепционные цветовые модели основаны на использовании в качестве цветовых координат некоторых свойств наблюдаемых цветов, заданных в интуитивно понятных категориях. По существу, цвет в перцепционных моделях задается как смесь заданного оттенка цвета, белого и черного цветов. Перцепционные цветовые модели используют на этапе проектирования бортовой аппаратуры и технической документации.

3. Применение цветовых моделей

Математический аппарат, связывающий цветовые координаты в различных цветовых моделях, составляет основу разработанного специализированного программного средства, позволяющего оценивать и прогнозировать возникновение колориметрических сдвигов в технологическом цикле "проектирование — производство" при создании авиационной продукции (рис. 2).

Программное средство написано на языке MATLAB и функционирует на инструментальной ЭВМ Acer Aspire E15, модель E5-573G-P4AX, со следующими характеристиками: операционная система Windows 10, двухъядерный процессор Intel Pentium 3556 (1,7 ГГц, кэш 2 Мбайта), ОЗУ 6 Гбайт, дискретная видеокарта NVIDIA GeForce 920M (видеопамять 2 Гбайта).

Принцип прогнозирования колориметрических сдвигов основан на анализе применяемых технологических процессов и последовательной конвертации цветовых координат с использованием профилей устройств, задействованных при выполнении каждой технологической операции. Большинство таких профилей устройств стандартизовано и утверждено Международным консорциумом по цвету для каждого типа технологического оборудования.

В частности, для описания процесса отображения цветовой информации на экране средства индикации адекватным является использование на этапе программной реализации изделия аддитивной цветовой модели *RGB*. Для описания процесса цветовоспроизведения при выводе индикационного кадра авионики на цветном печатающем устройстве (изготовление документации) задействуется субтрактивная цветовая модель *CMY*.

Результаты колориметрических экспериментов, получаемые в процессе контрольных испытаний

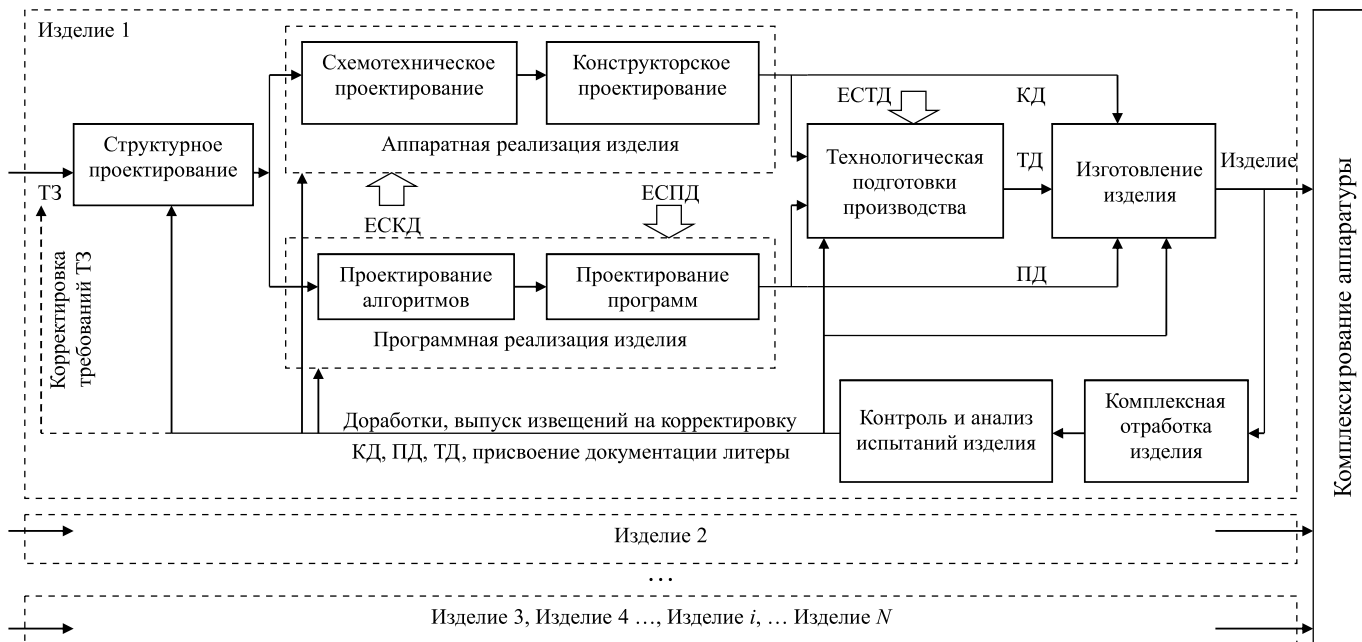


Рис. 2. Технологический цикл "проектирование — производство" аппаратуры:

КД — конструкторская документация; ТД — технологическая документация; ПД — программная документация; ЕСКД — единая система конструкторской документации; ЕSTD — единая система технологической документации; ЕСПД — единая система программной документации; ТЗ — техническое задание

изделий, или результаты теоретических расчетов, получаемые на этапе структурного проектирования, однозначно задаются в параметрах моделей XYZ , Y_xu , Y_{uv} , Lab . Для описания процессов передачи телевизионного изображения, обрабатываемых на этапе комплексирования бортовой аппаратуры, применяют цветовые модели YIQ , $YCbCr$ и их разновидности, позволяющие эффективно кодировать информацию о цвете и яркости изображения в канале связи.

Перцепционные цветовые модели HSI , HSV , HSL используют для цветоопределения в пакетах прикладных компьютерных программ (в графических редакторах) при создании векторных и растровых изображений индикационных кадров авионики (конструкторская документация), которые по колориметрическим свойствам должны соответствовать наблюдаемому на экране бортового индикатора изображению или тому же изображению, напечатанному на бумажном носителе в технических условиях или инструкциях.

Заключение

Потребность в переходе между параметрами цветовых моделей (перенос цвета из одной цветовой модели в другую) возникает, когда разработчикам авионики необходимо описать сложные производственные процессы, основанные на совокупности различных физических эффектов в едином технологическом цикле. Такой переход между параметрами цветовых моделей может привести к искажению информации о цвете (колориметрическому сдвигу), что вызвано несоответствием цветовых охватов раз-

личных цветовых моделей, применяемых для описания цветовоспроизведения в конкретных технологических операциях.

Цветовая модель имеет свой цветовой охват. Цветовой охват модели характеризует спектральный состав цветов, который может описать модель. Аппаратная зависимость цветовой модели является причиной сужения ее цветового охвата.

Очевидно, конвертация цвета в пределах различных цветовых моделей должна проводиться через стандартизованные цветовые модели, обладающие максимально широким цветовым охватом, например XYZ . В этом случае можно получить "идеальное" преобразование, поскольку оно дает точное отображение цветовых координат в различных цветовых моделях. В противном случае цвет, представленный цветовыми координатами в одной цветовой модели, будет отличаться от цвета, представленного эквивалентными цветовыми координатами в другой цветовой модели. Физически такое отличие обусловлено переносом цвета, находящегося за границами цветового охвата "принимающей" цветовой модели, к границе ее воспроизводимого цветового спектра.

Список литературы

1. Ibraheem N. A., Hasan M. M., Khan R. Z., Mishra P. K. Understanding color models: a review // ARPN Journal of science and technology. 2012. Vol. 2, N. 3. P. 265—275.
2. Hunt R. W. The reproduction of color. Harrow: Kodak Limited, 2004. 887 p.
3. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: учеб. пособие. Информационно-управляющие системы. СПб: ГУАП, 2005. 144 с.

4. **Жаринов И. О., Жаринов О. О.** Исследование распределения оценки разрешающей способности преобразования Грассмана в системах кодирования цвета, применяемых в авионике // Программная инженерия. 2014. № 8. С. 40—47.
5. **Barber S.** et al. US Patent 7,417,641 B1: Aeronautical chart display apparatus and method, Aug. 26, 2008.
6. **Gatchin Y. A., Zharinov I. O., Korobeynikov A. G., Zharinov O. O.** Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, N. 5. P. 197—210.

7. **Aleksanin S. A., Zharinov I. O., Korobeynikov A. G., Perezyabov O. A., Zharinov O. O.** Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10, N. 17. P. 7494—7501.
8. **Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O.** The research of redundancy in avionics color palette for on-board indication equipment // Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON—2015), Omsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, Russia, Omsk. May 21—23, 2015, art. 7147313.

Automation Control of Colorimetric Shifts in the Design and Manufacture of On-board Display Systems

I. O. Zharinov, igor_rabota@pisem.net, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Design Bureau "Electroavtomatika", Saint Petersburg, 198095, Russian Federation,
O. O. Zharinov, zharinov73@hotmail.ru, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Corresponding author:

Zharinov Igor O., Chef of Department, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), 197101, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: igor_rabota@pisem.net

Received on April 11, 2016

Accepted on April 21, 2016

The problem of the development of specialized software, allowing evaluate colorimetric shifts arising in the design and production of onboard display systems, is presented. Colorimetric shift represents the chromaticity coordinates of the image set in various color models. Colorimetric shift is due to the mismatch of color gamut of various color models. The figures of color bodies of various color models used during the design and production of display equipment, are presented. Based on an example of specified chromaticity coordinates, are shown, the general rules of conversion options of color models that are relevant to aviation instrument. The mathematical equations which connect the chromaticity coordinates in a variety of color models, forms the base of the software. The scheme of the technological cycle of designing and manufacturing of the display means, is presented. The scheme takes into account the stage of product structural design, the stages of hardware and software products implementation, stage of technological preparation of production, manufacture and test products. Results of matching of color models physical processes inherent in various stages of design and production of display systems, are shown.

Keywords: color models, design, production, production cycle, colorimetric shift, avionics

For citation:

Zharinov I. O., Zharinov O. O. Automation Control of Colorimetric Shifts in the Design and Manufacture of On-board Display Systems, *Programmная Ingeneria*, 2016, vol. 7, no. 7, pp. 307—311.

DOI: 10.17587/prin.7.307-311

References

1. **Ibraheem N. A., Hasan M. M., Khan R. Z., Mishra P. K.** Understanding color models: a review, *ARPN Journal of science and technology*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 265—275.
2. **Hunt R. W.** *The reproduction of color*, Harrow, Kodak Limited, 2004, 887 p.
3. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** *Bortovye sredstva otobrazheniya informacii na ploskikh zhidkokristallicheskih paneljah* (On-board Display on Flat Liquid Crystal Panels), Saint Petersburg, Informaciono-upravljajushhie sistemy, 2005, 144 p. (in Russian).
4. **Zharinov I. O., Zharinov O. O.** Issledovanie raspredelenija ocenki razreshajushhej sposobnosti preobrazovaniya Grassmana v sistemah kodirovaniya cveta, primenjaemyh v avionike (Research of properties of an assessment of the resolution of Grassmann's transformation in chromaticity coding systems, applied in avionic equipment), *Programmная Ingeneria*, 2014, no. 8, pp. 40—47 (in Russian).

5. **Barber S.**, et al. Aeronautical chart display apparatus and method, US Patent 7, 417, 641 B1, Aug. 26, 2008.
6. **Gatchin Y. A., Zharinov I. O., Korobeynikov A. G., Zharinov O. O.** Theoretical estimation of Grassmann's transformation resolution in avionics color coding systems, *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 197—210.
7. **Aleksanin S. A., Zharinov I. O., Korobeynikov A. G., Perezyabov O. A., Zharinov O. O.** Evaluation of chromaticity coordinate shifts for visually perceived image in terms of exposure to external illuminance, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol. 10, no. 17, pp. 7494—7501.
8. **Zharinov I. O., Zharinov O. O., Kostishin M. O.** The research of redundancy in avionics color palette for on-board indication equipment, *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON—2015)*, Omsk, The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, Russia, Omsk, May 21—23, 2015, art. 7147313.

Т. Н. Швецова-Шиловская, д-р техн. наук, проф., нач. отделения,
Т. В. Громова, д-р техн. наук, нач. отдела, Д. Е. Иванов, ст. науч. сотр.,
О. В. Полехина, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,
А. А. Афанасьева, канд. техн. наук, нач. отдела,
Д. И. Назаренко, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., М. А. Викентьева, науч. сотр.,
Федеральное государственное унитарное предприятие "Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии", г. Москва, e-mail: dir@gosniiookht.ru

Программно-аналитический комплекс для оценки показателей надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования опасных производственных объектов на всех этапах жизненного цикла

Представлено описание разработанного программного комплекса для оценки показателей надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования опасных производственных объектов на всех этапах жизненного цикла. Приведен пример использования этого программного комплекса для оценки показателей надежности работы оборудования опытно-промышленной установки производства катализаторов K-18 и K-18А на этапе ее проектирования.

Ключевые слова: оборудование, показатели надежности, оценка готовности и ремонтпригодности, программно-аналитический комплекс

Введение

Производственные объекты включают сложные технологические процессы, различающиеся количеством и разнотипностью оборудования, сложностью алгоритмов управления. Надежность и безопасность реализации любого технологического процесса зависят от надежности работы оборудования, в котором осуществляется процесс, а также от надежности управления данным процессом. Проблема обеспечения безопасности и надежности оборудования промышленных производственных объектов является комплексной, охватывает все этапы жизненного цикла оборудования.

Применение программно-аналитических комплексов на любом этапе жизненного цикла производственного объекта позволяет без существенных материальных и временных затрат проводить исследования процессов, учитывать влияние внешних факторов (например, изменение состава сырья, вида оборудования, требований к конечным и промежуточным продуктам) на показатели действующих производств.

К наиболее важным преимуществам компьютерного моделирования технологических процессов относят: расчетные исследования и анализ результатов для выбора оптимального варианта аппаратурного оформления технологического процесса; определение оптимальных режимов работы оборудования для получения его желаемой производительности; учет влияния характеристик сырья, сбоев в работе и остановки оборудования на безопасность и надежность процесса производства.

Основные отечественные и зарубежные программные комплексы для анализа показателей надежности оборудования производственных объектов

Сначала рассмотрим характеристики наиболее известных отечественных программных комплексов. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем — АРБИТР [1] предназначен для автоматизированного математического моделирования и расчета вероятностных

характеристик надежности и безопасности структурно-сложных систем производственных объектов использования атомной энергии. Теоретической основой комплекса АРБИТР является общий логико-вероятностный метод анализа структурно-сложных системных объектов и процессов различных видов, классов и назначения [2]. Существуют некоторые ограничения, существенно сужающие возможные области применения АРБИТР, в том числе: вероятно-временные показатели надежности и/или безопасности систем рассчитываются только для прямых монотонных логико-вероятностных моделей исследуемой системы; приемлемой является гипотеза о независимости отказов всех элементов и неограниченности их восстановлений. Основным и очень существенным недостатком данного программного комплекса — отсутствие встроенной базы данных по характеристикам надежности оборудования производственных объектов. Данные по надежности элементов анализируемой сложной системы пользователь должен находить в разных источниках и вручную вводить в программу, что существенно затрудняет пользование этим комплексом при анализе надежности систем сложной структуры.

Автоматизированная система расчета надежности обеспечивает: расчеты надежности электрорадиоизделий и радиоэлектронной аппаратуры объективно и достоверно; выбор номенклатуры, режимов и условий их применения, соответствующих заданным требованиям надежности; возможность стыковки с системой автоматизированного проектирования [3]. В системе реализованы методы расчета надежности изделий без резервирования, что существенно ограничивает возможность ее использования для расчета надежности сложных химико-технологических систем, в которых имеется резервирование и эксплуатируется восстанавливаемое оборудование.

Программный комплекс АСОНИКА-К [4] предназначен для обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры, ориентирован на анализ надежности изделий электронной промышленности и включает базу данных по надежности элементов. С помощью комплекса АСОНИКА-К можно проводить расчеты надежности с учетом резервирования, восстановлений. Сетевые возможности программного комплекса позволяют выполнять расчеты надежности одного изделия одновременно несколькими пользователями. Архив позволяет использовать результаты ранее проведенных расчетов, модифицировать исходные данные для новых условий и режимов работы изделий. Программный комплекс ориентирован на изделия электронной техники и не может быть использован для анализа надежности оборудования производственных объектов, за исключением, может быть, оборудования, используемого в автоматизированных системах управления технологическими процессами.

Программно-вычислительный комплекс Анализ Надежности Режимов Электрических Систем (АНАРЭС) — это мощный и современный, с

точки зрения пользовательского интерфейса, технологии и перечня решаемых прикладных задач, программный продукт. Он предназначен для оперативных расчетов, анализа и планирования режимов электроэнергетических систем любой сложности и любых классов напряжений (<http://www.anares.ru>). Комплекс АНАРЭС построен по модульному принципу. Основные приложения в среде Windows можно выполнять как совместно, так и независимо. Все приложения обмениваются управляющими командами через специальный сервер. Благодаря этому сочетаются преимущества многозадачных операционных систем и единства комплекса.

Следует отметить еще несколько программных комплексов по анализу надежности систем, например, программный комплекс численного анализа надежности и риска для сложной системы на основе деревьев отказов [5]. Форма исходной структурной схемы — дерево отказов. Комплекс позволяет вычислять вероятность безотказной работы, коэффициент готовности системы и оптимизировать надежность системы по критерию суммарных затрат.

Программный комплекс BUNKER [6] предназначен для моделирования и расчетов надежности и производительности многофазных, многопоточных технических систем с накопителями. Форма исходной структурной схемы — дерево отказов. Комплекс BUNKER позволяет вычислять коэффициент готовности, математическое ожидание производительности, среднюю наработку на отказ, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы системы. Структура анализируемой системы задается в интерактивном режиме с помощью встроенного в комплекс графического редактора.

Исходные характеристики надежности (интенсивности отказов и восстановления обрабатывающих устройств и накопителей) могут задаваться пользователем вручную или извлекаться из библиотек зарубежного программного комплекса Relex. Сопряжение программного комплекса BUNKER с Relex осуществляется на основе подхода с использованием СОМ-технологии.

Программный комплекс RAY [6] предназначен для логико-вероятностного моделирования и расчетов надежности и безопасности систем. Форма исходной структурной схемы — граф связности. Программный комплекс позволяет вычислять коэффициент готовности, параметр потока отказов, вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа с учетом полноты контроля и периодической профилактики.

Программный комплекс УНИВЕРСАЛ [7] использует полумарковские модели и методы расчета надежности систем. Ограничение применения комплекса УНИВЕРСАЛ связано с проблемой большой размерности, которая возникает при анализе надежности реальных систем, и реализацией численных методов получения значений показателей надежности. Этот комплекс позволяет вычислять как интервальные,

так и дифференциальные показатели надежности за счет реализации общего метода моделирования полумарковскими процессами.

Интегрированная система анализа надежности техники ISANT [8] построена по модульному принципу и представляет собой комплекс программных модулей, работающих независимо, но использующих общий библиотечный модуль. В этой системе реализован большой набор методов анализа надежности сложных восстанавливаемых систем. Однако ее главным недостатком является тот факт, что она не "привязана" к какой-либо предметной области и включает базу данных по характеристикам надежности отдельных элементов.

В основе практических всех перечисленных выше отечественных программных комплексов анализа надежности лежат логико-вероятностные методы, имеющие высокую степень формализации, что позволяет автоматизировать процессы построения моделей систем. Для отечественных программных средств характерна специализация по виду отрасли, методам исследования или по элементной базе оборудования. Исключением является программный комплекс АСОНИКА-К, в котором реализованы как методы расчета интенсивностей отказов электронной аппаратуры, так и методы оценки надежности технических систем. Однако в настоящее время программные комплексы для оценки показателей надежности химико-технологического оборудования, готовые к применению, отсутствуют.

Зарубежные программные комплексы обладают широкими возможностями по реализации методов прогноза надежности и обработки статистических данных по отказам. Они, как правило, включают различные методы анализа надежности, содержат обширные базы данных по характеристикам надежности изделий, имеют развитый интерфейс пользователя, хорошо документированы, имеют как локальную, так и сетевую конфигурацию, сопрягаемы по импорту-экспорту с базами данных, текстовыми редакторами, электронными таблицами, системами автоматизированного проектирования [9].

К числу основных зарубежных программных комплексов можно отнести Relex, Isograph, ITEM iQRAS, Risk Spectrum [10, 11]. С их помощью реализуются все основные методы анализа надежности: логико-вероятностные (деревья отказов, деревья событий, блок-схемы надежности), марковские, статистическое моделирование.

Программный комплекс Risk Spectrum [11] для вероятностного анализа надежности и безопасности систем использует форму исходной структурной схемы системы в виде дерева отказов. Основное применение Risk Spectrum получил при вероятностном анализе безопасности объектов атомной энергетики. Его использование рекомендовано МАГАТЭ, он нашел применение в организациях Атомэнергопроекта России.

В программном комплексе Relex модели надежности сложных систем строятся на основе блок-схемы надежности (модуль Relex RBD). В программах CAFTA, RAM Commander, ITEM iQRAS, Isograph,

Risk Spectrum задача построения модели надежности сложной системы может быть решена только с помощью аппарата деревьев отказов.

В программных комплексах Isograph и ITEM iQRAS реализованы несовершенные алгоритмы обработки блок-схем, закликивающиеся при обработке схем с перекрестными связями.

Блок-схемы надежности в RAM Commander ограничены только последовательно-параллельными структурами [10].

Комбинация логико-вероятностных методов и статистического моделирования, реализованная в программных комплексах Relex, Isograph, ITEM iQRAS, RAM Commander, позволяет при построении модели надежности системы учитывать разные виды зависимостей, скользящее резервирование, резервирование замещением с учетом переключателей и контроля. В программных комплексах Relex, Isograph и ITEM iQRAS возможно построение любых моделей, созданных пользователем на основе марковских процессов.

Все зарубежные программные комплексы в той или иной мере содержат FMEA (анализ видов и последствий отказов) и FMECA (анализ видов, последствий и критичности отказов). Они позволяют проводить оценку риска, строить диаграммы уровней риска и матрицы критичности видов отказов, осуществлять автоматическое предварительное построение деревьев отказов. Эти программные комплексы имеют встроенные базы данных по видам отказов электронного и механического оборудования. Зарубежные программные комплексы обеспечивают быстрый доступ к часто используемым файлам, возможности ранжирования видов отказов (с одинаковыми последствиями) и т. д.

Зарубежные программные комплексы содержат модули прогнозирования безотказности и прогнозирования ремонтпригодности. Специально следует отметить обязательное наличие встроенных в программные комплексы развитых графических редакторов, позволяющих в интерактивном режиме на экране компьютера порождать визуальное представление перечисленных моделей (блок-схемы, марковские графы, деревья отказов, деревья событий).

Программные комплексы Relex, Isograph, ITEM iQRAS могут выполнять импорт практически всех типов исходных данных из форматов электронных таблиц (*.xls), баз данных (*.mdb, db, dbf), текстовых, логистических (LSAR), BOM-файлов. Они позволяют осуществлять экспорт в файлы форматов Access, Excel следующих данных: результаты вычислений показателей надежности, безопасности, эффективности; расчетные параметры моделей; структурные свойства, определяющие иерархию и связь компонентов моделей; визуальные и описательные свойства графического представления компонентов моделей.

Практически все зарубежные программные средства предоставляют возможности не только генерации отчетов во внутренних форматах, но и сохранения электронных копий отчетов в форматах документов Web (*.htm), MS Word (*.doc), Adobe (*.pdf). В отечественных программных продуктах подобные механизмы и сервисы отсутствуют.

В целом отечественные программные комплексы уступают зарубежным по многим позициям, в частности: по уровню сложности реализуемых моделей надежности и количеству вычисляемых показателей надежности; по обеспеченности исходными данными (наличие встроенных баз данных); по возможности сопряжения с другими программными средствами и базами данных.

Отечественные программные комплексы не поддерживают анализа видов, последствий и критичности отказов. Интерфейс пользователя, наличие баз исходных данных для расчета надежности недостаточно развиты. По точности расчетов на применяемых моделях надежности отечественные программы не уступают их западным аналогам. Однако уступают в объеме реализованных методов и решаемых задач.

Патентный поиск по вопросам анализа и оценки надежности оборудования опасных производственных объектов, по данным Всероссийской Патентно-технической Библиотеки (ВПТБ) при комитете Российской Федерации по патентам и товарным знакам (Роспатент), показал следующее. Все исследования направлены на решение прикладных задач для нефте-, газо- и продуктопроводов, конкретных типов оборудования, для отдельных месторождений и производственных установок топливно-энергетического комплекса. Значимых отечественных исследований и разработок по анализу безопасности, надежности технологического оборудования производственных объектов, в частности химико-технологических, выявлено не было.

В соответствии с изложенными выше положениями, создание программно-аналитических комплексов для оценки показателей надежности производственных объектов является актуальной задачей.

Программный комплекс для оценки показателей надежности оборудования опасных производственных объектов

Специалистами ФГУП "ГосНИИОХТ" разработан программно-аналитический комплекс для оценки показателей надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования опасных производственных объектов, диагностики и прогноза остаточного ресурса (ПАК НГР) [12, 13]. Этот программный комплекс ориентирован на специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией технологического оборудования, а также обеспечением промышленной безопасности на опасных производственных объектах.

Программно-аналитический комплекс по исследованию надежности, готовности и ремонтпригодности типового оборудования опасных производственных объектов (ОПО) на этапе проектирования разработан с учетом специфики технологических процессов, осуществляемых на ОПО, их типовых схем построения, а также нормативных требований [14–18].

Комплекс ПАК НГР позволяет осуществлять прогнозирование надежности технических систем на стадии проектирования в целях определения показателей надежности оборудования проектируемого варианта технологической схемы и сопоставления

прогнозируемых показателей надежности с требуемыми значениями [11].

Комплекс разработан с учетом специфики технологических процессов, осуществляемых на ОПО, их типовых схем построения, а также нормативных требований. Он позволяет оценивать показатели надежности и остаточного ресурса оборудования, планирования ремонтно-восстановительных работ и повышения надежности оборудования на стадии эксплуатации [19–21].

В комплексе ПАК НГР реализованы методики по оценке надежности, готовности и ремонтпригодности химико-технологического оборудования на стадиях проектирования и эксплуатации [12, 13].

Комплекс ПАК НГР включает технологии сопряжения информационно-аналитической системы с аналогичными зарубежными и отечественными программными комплексами. С зарубежным программным комплексом Relex сопряжение реализовано на основе использования внешних источников данных, таких как Microsoft Office Excel (xls), Microsoft Office Access (mdb), Extensible Markup Language (xml). Сопряжение с отечественным программным комплексом АРБИТР возможно в форме СУБД MS Access, MS Excel при наличии у этого комплекса баз данных по химико-технологическому оборудованию.

ФГУП "ГосНИИОХТ" обратился в Федеральную службу по экологическому, технологическому и атомному надзору (письмо от 15 ноября 2012 г. № 1548) для рассмотрения и согласования:

- методики по оценке надежности, готовности и ремонтпригодности химико-технологического оборудования на стадии проектирования;
- методики по оценке надежности, готовности и ремонтпригодности химико-технологического оборудования на стадии эксплуатации;
- программно-аналитического комплекса по оценке показателей надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования опасных химических объектов, диагностики и прогноза остаточного ресурса (ПАК НГР).

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору считает возможным согласовать их применение для указанных целей (письмо от 23 ноября 2012 г. № 08-00-11/3934): методики и программно-аналитический комплекс могут применяться (использоваться), в том числе, как составные части систем управления промышленной безопасностью на опасных производственных объектах, на которых эксплуатируется химико-технологическое оборудование, по решению эксплуатирующих его организаций, с учетом специфики технологий и оборудования конкретных объектов.

С архитектурных позиций ПАК НГР состоит из трех перечисленных далее подсистем.

1. Информационно-аналитическая система по надежности, готовности, ремонтпригодности оборудования опасных производственных объектов (ИАС НГР), которая включает:

- информационную базу данных по надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования ОПО;

- информационно-аналитическую систему сбора, анализа и обработки эксплуатационной информации о надежности, готовности и ремонтпригодности типового оборудования ОПО.

2. Программно-аналитический комплекс по исследованию надежности, готовности и ремонтпригодности типового оборудования опасных производственных объектов на этапах проектирования и эксплуатации (ПК НГР).

3. Программно-аналитическая система диагностики и оценки надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования опасных производственных объектов и прогноза его остаточного ресурса на этапе эксплуатации (ПАС НГР).

Комплекс ПАК НГР разработан в среде Embarcadero Delphi (Borland Delphi), базы данных разработаны в СУБД MS Access. Программный комплекс ПАК НГР в соответствии с действиями пользователя осуществляет переключение (передачу управления) между независимыми подпрограммами ИАС НГР, ПАС НГР и ПК НГР. Завершение работы любой из подпрограмм возвращает управление ПАК НГР. В целом ПАК НГР состоит из 32 модулей. На рис. 1 показана структурная схема ПАК НГР:

- `upakngr` — главный модуль (главная форма), он обеспечивает функционирование приложения, распределение команд подчиненным модулям, обработку исключительных ситуаций;

- `uselddb` — модуль управления подключением к базе данных программы;

- `uabout` — модуль информационного окна программы.

Механизмы ПАК НГР позволяют осуществлять переключение (передачу управления) между пользователями (ИАС НГР, ПАС НГР и ПК НГР).

В состав ИАС НГР входят следующие программные модули:

- аналитический модуль, содержащий комплекс математических моделей по оценке НГР типового оборудования ОПО на этапе проектирования — мо-

дуль анализа надежности оборудования ОПО по априорным (литературным и справочным) данным, по данным изделий-аналогов или экспертным оценкам специалистов при отсутствии экспериментальных или эксплуатационных данных;

- модуль построения технологической блок-схемы (ТБС);

- аналитический модуль анализа и обработки информации;

- модуль формирования отчетной документации;

- модуль управления базами данных.

Входящая в состав ИАС НГР реляционная база данных позволяет накапливать в структурированном виде следующую информацию: справочники типовых элементов оборудования, отдельных аппаратов и простых устройств, эксплуатируемых на ОПО; характеристики надежности элементов оборудования; эксплуатационные характеристики элементов оборудования; перечень видов отказов элементов оборудования и возможные последствия отказов для подсистем, содержащих данный элемент; сведения об источниках представленной информации.

Информационные массивы по типовому оборудованию химико-технологических объектов основываются на классификации оборудования и элементной базы по конструктивным признакам и назначению оборудования.

База данных характеристик НГР типового оборудования ОПО содержит: проектную информацию об НГР типового оборудования ОПО, необходимую и достаточную для проведения прогноза их характеристик; сведения по типам отказов и их последствиям для проведения анализа видов и последствий отказов (АВОП) и анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО); эксплуатационную информацию о надежности, готовности и ремонтпригодности типового оборудования ОПО.

На рис. 2 показан вид главного окна программы. Главная форма разделена на три функциональные области: главное меню; записи базы данных (по НГР оборудования ОПО); панель фильтрации записей.

Предусмотрена возможность фильтрации. Сначала выбирается тип оборудования (гидромеханические аппараты, массообменные аппараты, теплообменные аппараты, емкостное оборудование и т. д.), а затем, в соответствии с выбранным типом оборудования, формируется список типов элементов (насосы, компрессоры, абсорберы, адсорберы, емкостное оборудование и пр.).

База данных по НГР оборудования ОПО состоит из двух частей: литературные данные и данные заводов-изготовителей. На рис. 3 показано окно работы с базой данных (БД) по эксплуатации типового оборудования ОПО. При добавлении/удалении типового оборудования, для которого осуществляется оценка параметров надежности, используется контекстное меню на области 1 (рис. 3).

Для добавления отказов оборудования необходимо в верхней части окна выбрать из списка конкретное оборудование, а в нижней части (область 2 на

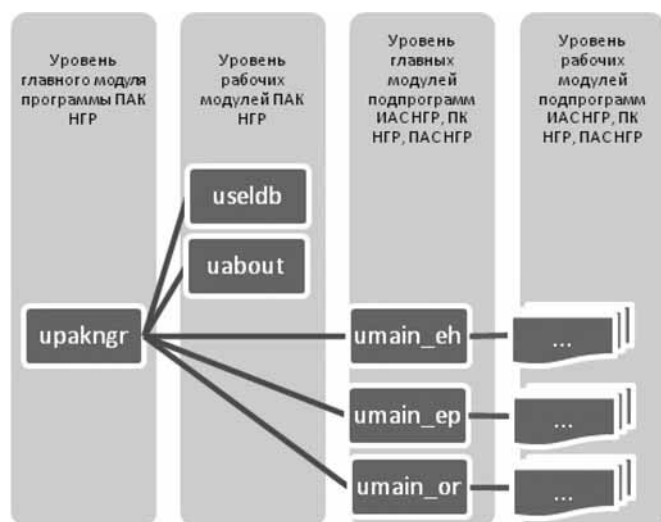


Рис. 1. Структура ПАК НГР: `umain_ep`, `umain_eh`, `umain_or` — программные модули подпрограмм

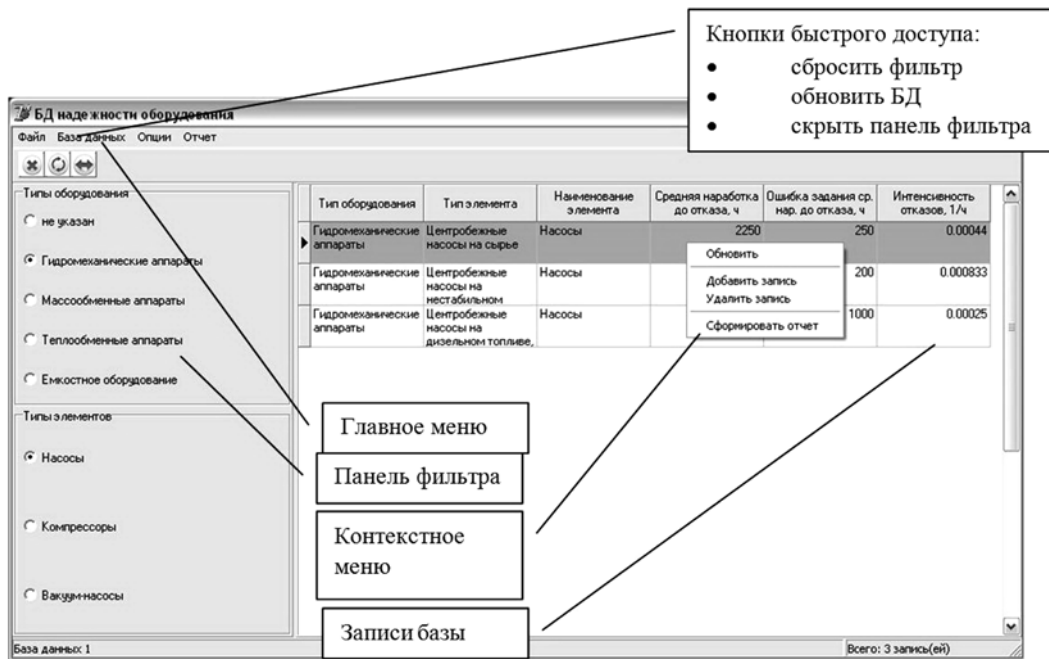


Рис. 2. Главная форма подпрограммы ИАС НГР

рис. 3) с помощью контекстного меню добавить отказ и его характеристики. После добавления отказа и его характеристик происходит пересчет параметров надежности оборудования (область 3 на рис. 3). Область 4 на рис. 3 предназначена для сохранения нужной текстовой информации.

Программный комплекс включает БД АВОП и АВПКО [12].

В состав ПАС НГР входят перечисленные далее программные модули.

- Аналитический модуль, содержащий комплекс математических моделей по интегрированной оценке показателей надежности технологического оборудования в ходе эксплуатации и прогноза остаточного ресурса оборудования. Прогноз остаточного ресурса оборудования выполняется по результатам диагностирования оборудования методами неразрушающего контроля в соответствии с требованиями нормативно-технической документации и предложенными математическими моделями.

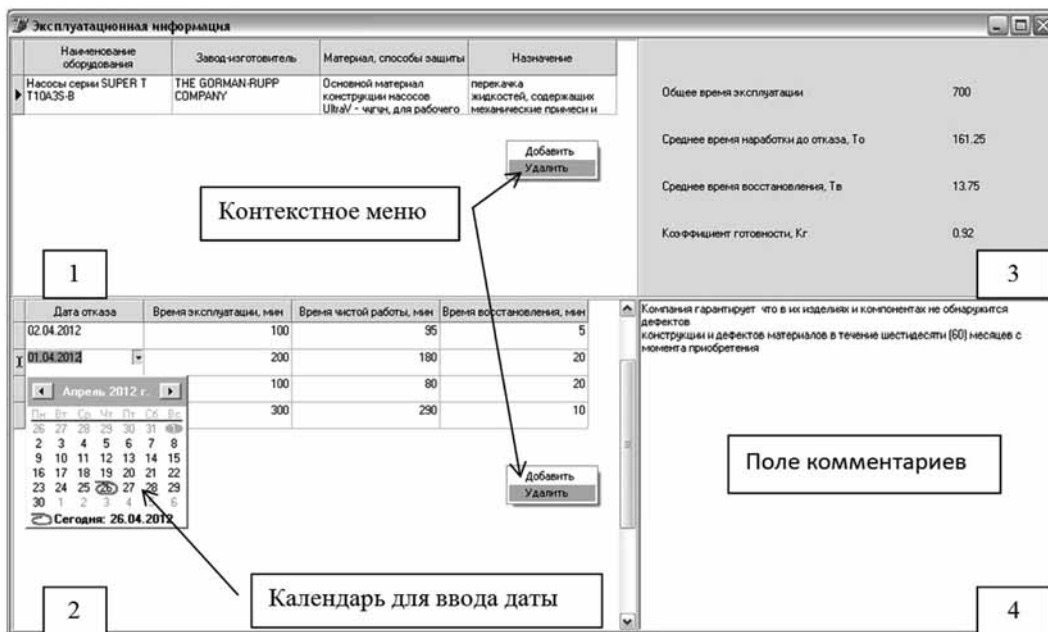


Рис. 3. Окно базы данных по эксплуатации

- Модуль построения эскиза аппарата для визуализации результатов обследования емкостного оборудования методами неразрушающего контроля.
- Модуль статистической обработки результатов измерений, полученных методами неразрушающего контроля.
- Модуль формирования отчетной документации.
- Модуль управления базой данных.

Входящая в состав ПАС НГР база данных позволяет накапливать информацию об оборудовании, подлежащем обследованию и контролю, включая характеристики оборудования; сведения о контролируемых участках оборудования; графики проводимых замеров; результаты замеров.

Механизмы ПАС НГР позволяют автоматизировать процесс прогнозирования остаточного ресурса с учетом статистической обработки результатов измерений и последующего расчета остаточного среднего и гарантированного ресурса. Это позволяет выделить результаты измерений, содержащих ошибочные данные, или определить участки аппарата, требующие дополнительного контроля.

На основе статистического анализа результатов измерений можно определить параметры функции распределения глубин разрушения и оценить, с требуемой достоверностью, максимальные глубины разрушения стенок или покрытий обследуемого оборудования при минимальном объеме измерений.

На рис. 4 показан вид главного окна подпрограммы ПАС НГР. Главное окно программы разделено на три части: перечень технологического оборудования, перечень контролируемых участков выбранного технологического оборудования, перечень графиков замеров выбранного участка.

На рис. 5 представлены виды окон при добавлении нового графика замеров и статистической обработки. Пользователь должен отметить на эскизе

участка аппарата позиции, в которых были проведены измерения, а также результаты этих измерений.

По результатам проведения расчетов ПАС НГР предоставляет возможность сформировать отчет, отвечающий нормативным требованиям. Применение ПАС НГР позволяет получать реальную информацию о состоянии технологического оборудования, периодичности его обследований, планировать работы по ремонту и замене оборудования.

Входящая в состав ПК НГР база данных содержит исчерпывающую проектную и эксплуатационную информацию об оборудовании: иерархически представленный перечень типового химико-технологического оборудования ОПО; показатели НГР, полученные от предприятий химико-технологического комплекса; показатели НГР заводов-изготовителей оборудования.

Комплекс ПК НГР позволяет осуществить прогнозирование надежности технических систем при проектировании в целях определения показателей надежности проектируемого варианта технологической схемы оборудования и сопоставления прогнозируемых показателей надежности с требуемыми значениями.

Исходной информацией для прогнозирования надежности технологического оборудования являются: конструкторская документация на различных стадиях разработки изделий (рабочие чертежи, пояснительные записки и др.); БД элементов технологического оборудования, в том числе по изделиям-аналогам; БД об испытаниях элементов; сведения об условиях эксплуатации и технического обслуживания.

Комплекс ПК НГР позволяет сформировать отчет, содержащий технологическую схему, заданные характеристики надежности блоков, результаты оценки надежности технологического оборудования.

Применение ПК НГР позволяет определить, достижимы ли заданные уровни надежности, эффек-

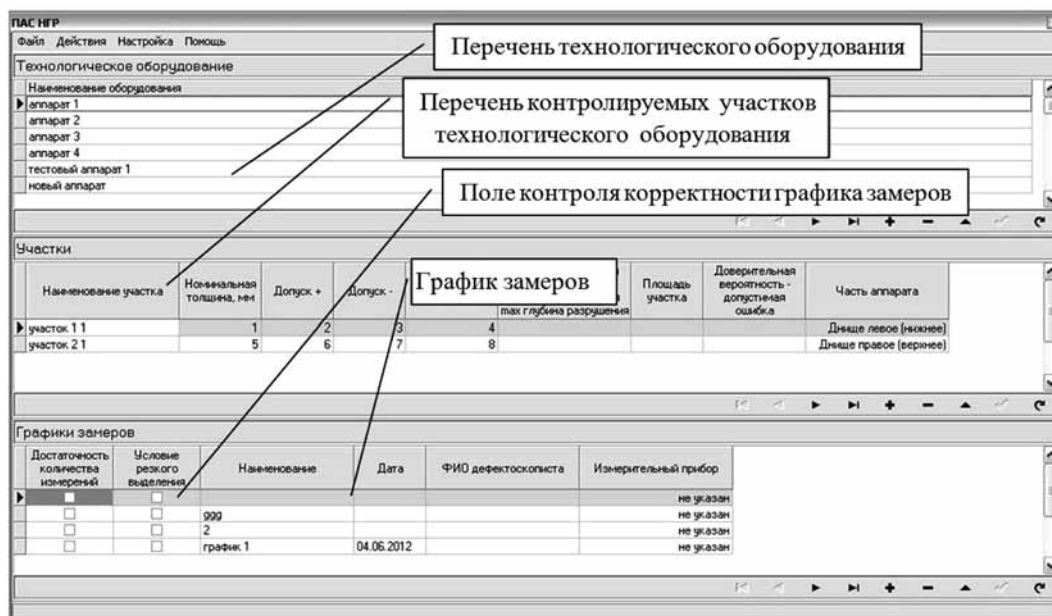


Рис. 4. Главное окно подпрограммы ПАС НГР

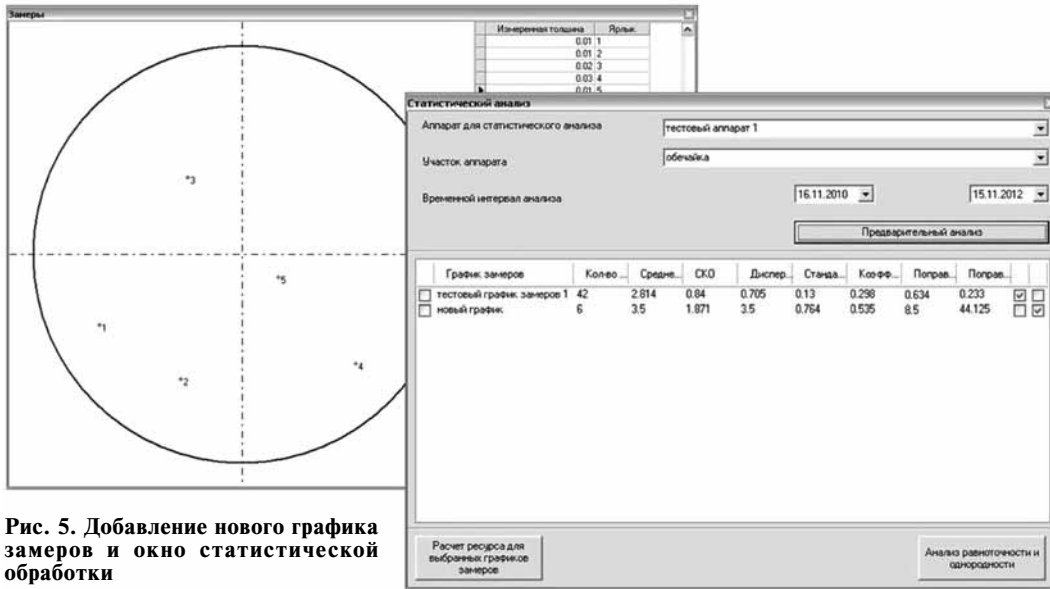


Рис. 5. Добавление нового графика замеров и окно статистической обработки

тивности и безопасности, разработать пути повышения надежности системы, сделать выбор между различными вариантами технологических систем.

На рис. 6 показан вид главного окна подпрограммы ПК НГР.

Пользователю необходимо ввести число аппаратов в блоке, тип их соединения и их характеристики

надежности. По окончании ввода данных необходимо нажать кнопку "Сохранить изменения", при этом будет перерисован эскиз технологической схемы. Для проведения расчета необходимо сформировать технологическую схему оборудования, сохранить проведенные изменения и выбрать в главном меню пункт "Расчет".

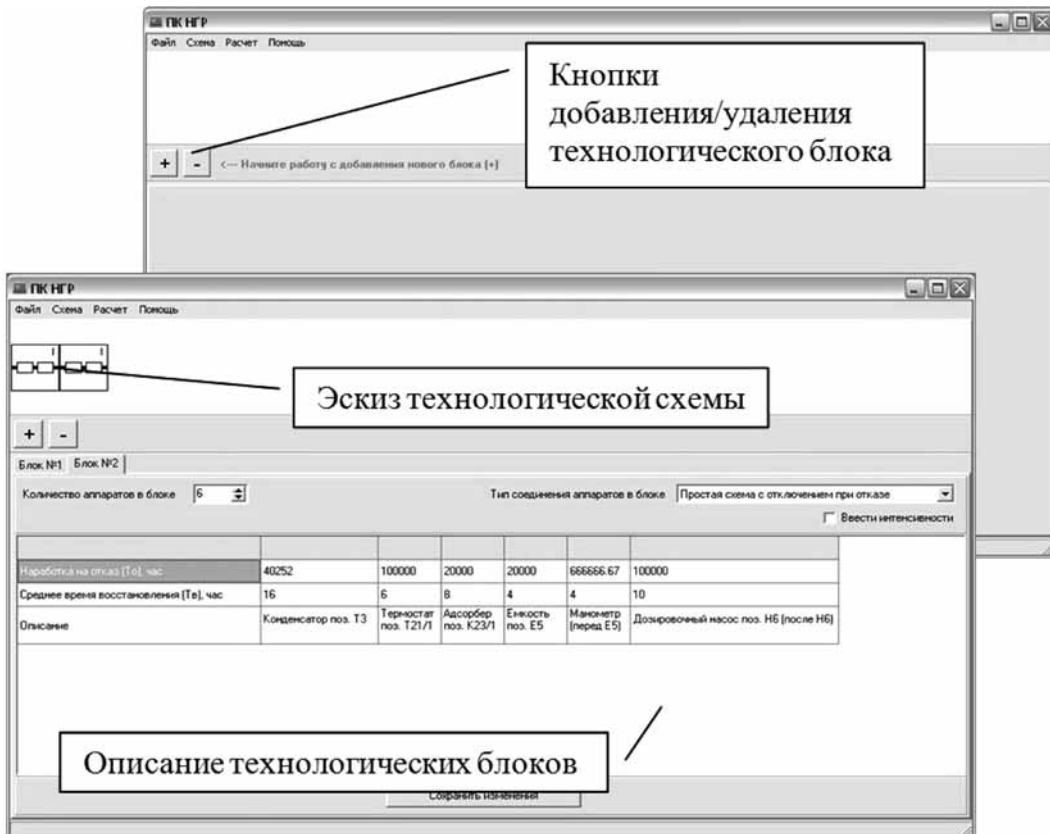


Рис. 6. Главное окно подпрограммы ПК НГР

Применение ПАК НГР для оценки показателей надежности оборудования опытно-промышленной установки производства катализаторов К-18 и К-18А на этапе ее проектирования

Катализатор К-18 применяется в качестве вулканизирующего агента для изготовления отверждающегося при комнатной температуре компаунда "Виксинт К-18", герметика "У-1-18", пеногерметиков ВПГ, а также антиадгезионных покрытий на основе полиметилалюмосилоксанов.

Катализатор К-18А предназначен для использования в качестве вулканизирующего агента для изготовления при комнатной температуре антиадгезионных покрытий на основе низкомолекулярного каучука АС-300.

Катализаторы К-18 и К-18А представляют собой растворы диэтилдикаприлата олова в этилсиликате-32.

Стоит отметить, что установка производства катализаторов К-18 и К-18А является опытно-промышленной и большая часть оборудования выполнена из стекла. Емкостное и реакторное оборудование используется на нескольких стадиях.

Анализ проектной документации технологического процесса позволяет рассматривать технологическую блок-схему надежности опытной установки как последовательное соединение элементов и узлов [13].

На рис. 7 в качестве примера показан фрагмент работы программного комплекса для оценки показателей оборудования стадии 1 процесса. На рис. 8 представлены результаты оценки показателей надежности оборудования опытной установки производства катализаторов К-18 и К-18А в целом.

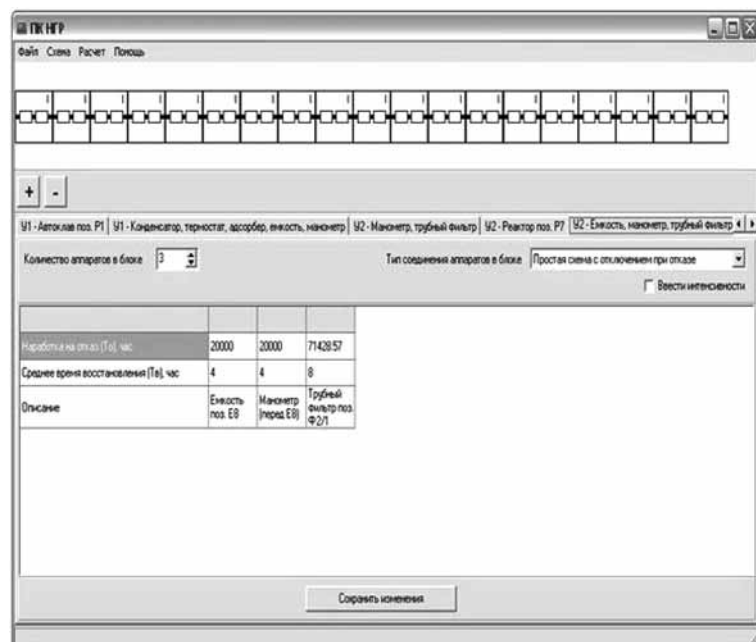


Рис. 7. Оценка показателей надежности для автоклава

Параметр	Значение
Наработка на отказ (T _o), ч	165.11
Среднее время восстановления (T _v), ч	9.887
Коэффициент готовности (K _г)	0.944

Рис. 8. Результаты оценки показателей надежности оборудования опытной установки производства катализаторов К-18 и К-18А

Анализ коэффициента готовности опытной установки осуществлялся по формуле

$$K_g = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} \right)^{-1},$$

где λ — интенсивность отказов ($ч^{-1}$); μ — интенсивность восстановления ($ч^{-1}$).

Коэффициент готовности работы установки составил $K_g = 0,9436$.

В таблице (см. третью сторону обложки) приведен фрагмент результатов расчета показателей надежности отдельных элементов оборудования опытной установки производства катализаторов К-18 и К-18А (для первых двух стадий).

Для оценки производительности с использованием полученных при проектной оценке показателей надежности оборудования опытной установки производства катализаторов К-18 и К-18А исходили из следующих показателей режима работы объекта.

Годовая производительность установки $\Pi^y = 3000$ кг; число рабочих смен в сутки $n = 2$; продолжительность смены $t^c = 6$ ч; производительность одной операции $\Pi^o = 42,54$ кг; время одной операции $t^o = 36...42$ ч; число операций $N = 70$; число рабочих дней в году $m = 250$.

Исходя из приведенных выше данных определяется время работы установки в течение года:

$$V^y = n \times t^c \times m = 2 \times 6 \times 250 = 3000 \text{ ч/год.}$$

Учитывая принятый интервал по времени одной операции ($t_1^o = 36$ ч, $t_2^o = 42$ ч; 1, 2 относятся к К-18 и К-18А соответственно), можно получить необходимое число операций:

$$N_1 = \frac{V^y}{t_1^o} = \frac{3000}{36} = 83, (3); \quad N_2 = \frac{V^y}{t_2^o} = \frac{3000}{42} = 71, 43.$$

Умножая полученные значения на производительность одной операции Π^o , получаем расчетную производительность установки:

$$P_{p1}^Y = N_1 \times P^O = 3545,0 \text{ кг}; P_{p2}^Y = N_2 \times P^O = 3038.$$

Расчетная производительность с учетом коэффициента готовности работы установки:

$$P_1^Y = K_T \times P_{p1}^Y = 3345; P_2^Y = K_T \times P_{p2}^Y = 2867.$$

Из полученных значений видно, что при времени операции $t^O = 42$ ч добиться заданной производительности установки с учетом готовности оборудования не удастся.

Проведенные исследования показывают, что для достижения заданной годовой производительности установки $P^Y = 3000$ кг необходимо принять число операций $N = 76$ при времени одной операции $t^O = 42$ ч и внести соответствующие изменения в технологический регламент.

Выполненные исследования по оценке надежности оборудования опытной установки производства катализаторов К-18 и К-18А позволили скорректировать рабочую и эксплуатационную документацию на этапе ее проектирования.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены программные комплексы, которые используются для анализа надежности и безопасности оборудования опасных производственных объектов. Отмечено, что существующие отечественные и зарубежные программные комплексы, как правило, не включают базы данных по характеристикам надежности оборудования производственных объектов, технологии сопряжения с другими программными продуктами и позволяют оценивать показатели надежности и остаточный ресурс оборудования.

Дано краткое описание разработанного программно-аналитического комплекса для оценки показателей надежности, готовности и ремонтпригодности, диагностики и прогноза остаточного ресурса оборудования опасных производственных объектов — ПАК НГР. ПАК НГР включает базы данных по характеристикам надежности оборудования производственных объектов, технологии сопряжения с аналогичными зарубежными и отечественными программными комплексами и рекомендован Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору для оценки характеристик надежности сложных технических систем опасных производственных объектов.

Приведен пример использования разработанного ПАК НГР для оценки показателей надежности работы оборудования опытно-промышленной установки производства катализаторов К-18 и К-18А. Проведенные исследования показывают, что для достижения заданной годовой производительности установки $P^Y = 3000$ кг необходимо принять число операций $N = 76$ при времени одной операции $t^O = 42$ ч и внести соответствующие изменения в технологический регламент.

Практический опыт использования ПАК НГР показал, что программный комплекс обеспечивает согласованность данных для моделирования химических процессов и их инженерных расчетов. Он

способствует сокращению времени на реализацию проекта, делает процесс проектирования более удобным и может быть рекомендован к использованию на практике.

Список литературы

1. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования (ПК АСМ СЗМА). [Электронный ресурс]. Автор: Можаяев А. С. СВИДЕТЕЛЬСТВО № 2003611101 об официальной регистрации программ. Правообладатель: ОАО "СПИК СЗМА". М.: Роспатент РФ, 2003. URL: <http://www.szma.com>
2. Можаяев А. С., Громов В. Н. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем СПб.: ВИТ, 2000. 144 с.
3. АО "РНИИ "Электронстандарт". URL: <http://www.elstandart.spb.ru/>
4. Автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры. URL: <http://www.asonika-k.ru/>
5. Проурзин В. А. Алгоритмы численного анализа надежности и риска для сложной системы на основе деревьев отказов // Труды Международной Научной Школы "Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах" (МА БРК — 2001). СПб.: НПО "Омега", 2001. С. 263—268.
6. Викторова В. С., Степанянц А. С. Комплекс программ для анализа надежности, безопасности и эффективности технических систем // Приборы и системы управления. 1998. № 6. С. 11—17.
7. Розенберг Е. Н., Шубинский И. Б. Графовый полумарковский метод моментов расчета функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и связи // Труды Российского научно-исследовательского института управления на железнодорожном транспорте. М.: ВНИИУП МПС России. 2002. С. 79—86.
8. Половко А. М., Гуров С. М. Основы теории надежности. Практикум. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 560 с.
9. SAE ARP 4761 — Guidelines and Methods for conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne System and Equipment. URL: <http://www.savive.com.au/library/index.html>
10. Relex — программа анализа надежности, безопасности, рисков. Компания Relex Software Corporation (США). URL: <http://pts-russia.com/products/windchill-quality-solutions/relex-windchill-quality.html>
11. Программный комплекс Risk Spectrum вероятностного анализа надежности и безопасности систем. URL: <http://www.riskspectrum.com>
12. Иванов Д. Е., Швецова-Шиловская Т. Н., Гамзина Т. В., Громова Т. В., Поlechina О. В., Афанасьева А. А., Назаренко Д. И., Викентьева М. А. Программно-аналитический комплекс по оценке показателей надежности, готовности и ремонтпригодности оборудования опасных производственных объектов, диагностики и прогноза остаточного ресурса (ПАК НГР). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613601 от 11.04.2013 г. Федеральная служба по интеллектуальной собственности.
13. Швецова-Шиловская Т. Н., Горский В. Г., Громова Т. В. и др. Совершенствование системы диагностики и оценки надежности, готовности, ремонтпригодности и остаточного ресурса оборудования на опасных химических объектах. Шифр "Надежность" с приложениями. Этап 5, инв. № 6289: промежуточный научно-технический отчет. М.: ФГУП "ГосНИИОХТ", 2012. 419 с.
14. ГОСТ Р 27.001—2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения.
15. ГОСТ 27.301—95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
16. ГОСТ 27.203—83. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности.
17. ГОСТ 27.310—95 (МЭК 60812:1985). Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.

18. ГОСТ Р 51901.15—2005 (МЭК 61165:1995). Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Применение Марковских методов.

19. Технический регламент "О безопасности машин и оборудования", утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 15 сентября 2009 г. № 753.

20. РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов.

21. ГОСТ Р 27.601—2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Управление надежностью. Техническое обслуживание и его обеспечение.

Program and Analytical Complex for an Assessment of Indicators of Reliability, Readiness and Maintainability of the Equipment of Hazardous Production Facilities at All Stages of Life Cycle

T. N. Shvetsova-Shilovskaya, tn56@narod.ru, T. V. Gromova, gromova_t@list.ru, D. E. Ivanov, indebox@yandex.ru, O. V. Polekhina, A. A. Afanasyeva, alex.afanaseva@mail.ru, D. I. Nazarenko, den_0626@mail.ru, M. A. Vikentyeva, vik-maran@yandex.ru, Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology" (FGUP "GosNIIOKhT"), Moscow, 111024, Russian Federation

Corresponding author:

Gromova Tatyana V., Head of Department, Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology" (FGUP "GosNIIOKhT"), Moscow, 111024, Russian Federation, e-mail: gromova_t@list.ru

Received on April 15, 2016

Accepted on May 04, 2016

The goal of our work was creating a software analytical system to evaluate the reliability, readiness and maintainability and to predict the remaining resource of the technological equipment used on the dangerous chemical industrial facilities. We have developed the methods to evaluate the reliability, readiness and maintainability during both development stage and operation stage. In these methods we have implemented the models for predicting the reliability of various complex systems used in the chemical technology equipment. The algorithms to evaluate the equipment reliability based on the statistical data about equipment faults have also been developed.

The developed models and algorithms are implemented in the software analytical complex which allows one to predict the reliability of technical systems at the development stage, and evaluate the reliability and the remaining resource at the operation stage.

The database included in the complex provides the comprehensive information about the project and about the operation of the equipment used on the dangerous industrial facilities.

The complex was developed with taking into account the technological processes used on the dangerous industrial facilities, the typical schemes of building them, and the requirements of the technical documentation. It can be used by the chemical industries in the Russian Federation in order to improve the reliability of the used systems.

The methods to predict the reliability and the complex have been coordinated with the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service.

Keywords: hazardous production facilities, chemical-technological equipment, reliability, availability and maintainability, program and analytical complex

For citation

Shvetsova-Shilovskaya T. N., Gromova T. V., Ivanov D. E., Polekhina O. V., Afanasyeva A. A., Nazarenko D. I., Vikentyeva M. A. Program and Analytical Complex for an Assessment of Indicators of Reliability, Readiness and Maintainability of the Equipment of Hazardous Production Facilities at All Stages of Life Cycle, *Programmnaya Ingeneria*, 2016, vol. 7, no. 7, pp. 312—323.

DOI: 10.17587/prin.7.312-323

References

1. **A program** complex of the automated structural and logical modeling and calculation of reliability and safety of the PCS at a design stage (ASM SZMA personal computer) (An electronic resource) / Mozhaev A. S. SVIDETEL'STVO No 2003611101 ob oficial'noj registracii programm. Pravoobladatel': OAO "SPIK SZMA". Moscow, Rospatent RF, 2003, available at: <http://www.szma.com> (in Russian).
2. **Mozhaev A. S., Gromov V. N.** *Teoreticheskie osnovy obshchego logiko-verojatnostnogo metoda avtomatizirovannogo modelirovaniya sistem* (Theoretical bases of the general logiko-probabilistic method of the automated modeling of systems), Saint Petersburg, VIT, 2000, 144 p. (in Russian).
3. <http://www.elstandart.spb.ru> (An electronic resource).
4. <http://www.asonika-k.ru/> (An electronic resource).
5. **Prouzin V. A.** Algoritmy chislennogo analiza nadezhnosti i riska dlja slozhnoj sistemy na osnove derev'ev otkazov (Algorithms of the numerical analysis of reliability and risk for difficult system on the basis of trees of refusals), *Trudy Mezhdunarodnoj Nauchnoj Shkoly "Modelirovanie i analiz bezopasnosti, riska i kachestva v slozhnyh sistemah"* (MA BRK — 2001), Saint Petersburg, NPO "Omega", 2001, pp. 263—268 (in Russian).
6. **Viktorova V. S., Stepanjanc A. S.** Kompleks programm dlja analiza nadezhnosti, bezopasnosti i jeffektivnosti tehniceskijh sistem (Complex of programs for the analysis of reliability, safety and efficiency of technical systems), *Pribory i Sistemy Upravlenija*, 1998, no. 6, pp. 11—17 (in Russian).
7. **Rosenberg E. N., Shubinsky I. B.** Grafovyj polumarkovskij metod momentov rascheta funkcional'noj bezopasnosti sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i svjazi, *Trudy Rossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta upravlenija na zheleznodorozhnom transporte (A graph semi-Markov method of the moments of calculation of functional safety of systems of railway automatic equipment and communications)*, Moscow, VNIUP of Ministry of Railways Russia, 2002, pp. 79—86 (in Russian).
8. **Polovko A. V., Gurov S. M.** *Osnovy teorii nadezhnosti. Praktikum* (Bases theoretical reliability), Saint Petersburg, BCHV-Petersburg, 2006, 560 p. (in Russian).
9. **SAE ARP 4761** — Guidelines and Methods for conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne System and Equipment, available at: <http://standards.sae.org/arp4761/>.
10. <http://pts-russia.com/products/windchill-quality-solutions/relex-windchill-quality.html> (An electronic resource).
11. <http://www.riskspectrum.com> (An electronic resource).
12. **Ivanov D. E., Shvecova-Shilovskaja T. N., Gamzina T. V., Gromova T. V., Polehina O. V., Afanas'eva A. A., Nazarenko D. I., Vikent'eva M. A.** Programmno-analiticheskij kompleks po ocenke pokazatelej nadezhnosti, gotovnosti i remontoprigradnosti oborudovaniya opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov, diagnostiki i prognoza ostatochnogo resursa (PAK NGR). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm y JeVM no. 2013613601. Federal'naja sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti. (Program and analytical complex according to indicators of reliability, readiness and maintainability of the equipment of hazardous production facilities, diagnostics and the forecast of a residual resource (PAK NGR)) (in Russian).
13. **Shvetsova-Shilovskaya T. N., Gorsky V. G., Gromova T. V., Polekhina O. V., Ivanov D. E., Afanas'eva A. A., Nazarenko D. I. etc.** Sovershenstvovanie sistemy diagnostiki i ocenki nadezhnosti, gotovnosti, remontoprigradnosti i ostatochnogo resursa oborudovaniya na opasnyh himicheskijh ob#ektah. Shifr "Nadezhnost'" s prilozhenijami. Jetap 5, inv. № 6289: promezhutochny j nauchno-tehniceskij otchet (Improvement of system of diagnostics and an assessment of reliability, readiness, maintainability and a residual service life on dangerous chemical objects), Moscow, FGUP "GosNIIOHT", 2012, 419 p. (in Russian).
14. **GOST R 27.001—2009.** *Nacional'ny j standart Rossijskoj Federacii. Nadezhnost' v tehnike. Sistema upravlenija nadezhnost'ju. Osnovnye polozenija* (National standard of the Russian Federation. Reliability in equipment. Control system of reliability. Basic provisions) (in Russian).
15. **GOST 27.310—95.** *Mezhgosudarstvennyj standart. Nadjozhnost' v tehnike. Analizvidov, posledstvij i kritichnosti otkazov. Osnovnye polozenija* (Interstate standard. Reliability in equipment. Analysis of types, consequences and criticality of refusals. Basic provisions) (in Russian).
16. **GOST 27.203—83.** *Mezhgosudarstvenny jstandart. Nadezhnost' v tehnike. Tehnologicheskie sistemy. Obshhie trebovanija k metodam ocenki nadezhnosti* (Interstate standard. Reliability in equipment. Technological systems. General requirements to reliability assessment methods) (in Russian).
17. **GOST 27.310—95.** (MEK 60812:1985). *Mezhgosudarstvennyj standart. Nadezhnost' v tehnike. Analiz vidov, posledstviji kritichnosti otkazov. Osnovnye polozenija* (Interstate standard. Reliability in equipment. Analysis of types, consequences and criticality of refusals. Basic provisions) (in Russian).
18. **GOST R 51901.15—2005** (MEK 61165:1995). *Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Menedzhment riska. Primenenie Markovskijh metodov* (National standard of the Russian Federation. Management of risk. Application of Markov methods) (in Russian).
19. **Tehniceskij** reglament "Obezopasnosti mashin i oborudovaniya", utv. Postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 15 sentjabrja 2009 g no. 753 (Technical regulations "About safety of cars and the equipment", app. The resolution of the government of the Russian Federation of September 15, 2009. No. 753) (in Russian).
20. **RD 03-421—01.** *Metodicheskie ukazaniya po provedeniju diagnostirovaniya tehniceskogo sostojanija I opredelenij u ostatochnogo sroka sluzhby sudov i apparatov* (Methodical instructions on carrying out diagnosing of technical condition and definition of residual service life of vessels and devices) (in Russian).
21. **GOST R 27.601—2011.** *Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Upravlenie nadezhnost'ju. Tehniceskoe obsluzhivanie i ego obespechenie* (National standard of the Russian Federation. Management of reliability. Maintenance and its providing) (in Russian).

С. Д. Махортов, д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф., e-mail: makhortov@amm.vsu.ru,
Воронежский государственный университет

Продукционно-логические уравнения в распределенной LP-структуре

Одно из достижений теории LP-структур — метод релевантного обратного вывода, существенно снижающий число обращений к внешним источникам информации. В его основе лежит аппарат продукционно-логических уравнений. В статье вводится и исследуется расширенный класс таких уравнений для алгебраической модели, выразительные возможности которой охватывают распределенные интеллектуальные системы. В результате открываются новые возможности оптимизации разрабатываемых распределенных систем.

Ключевые слова: распределенная продукционная система, релевантный обратный вывод, алгебраическая модель, LP-структура, продукционно-логическое уравнение

Введение

Алгебраические методы представляют эффективное средство формального построения и исследования моделей информационных систем широкого спектра, в том числе интеллектуальных [1, 2]. Это положение в полной мере относится и к широко распространенным на практике логическим системам продукционного типа [3].

В последнее десятилетие автором и его учениками разрабатывается алгебраическая теория LP-структур [4, 5], обеспечивающая эффективное решение ряда важных задач, связанных с продукционными системами. К таковым относятся задачи эквивалентных преобразований, верификации, минимизации баз знаний, а также ускорения логического вывода. Созданы программные продукты, демонстрирующие практическую значимость теории [6], которая оказалась применимой и для описания систем, ранее не считавшихся продукционными [7].

В то же время бурный прогресс информационных технологий приводит к кардинальному увеличению масштабов и сложности решаемых задач. Компьютерные системы становятся большими и распределенными [8], что требует качественных продвижений в методах их построения и исследования.

В статье [9] был сделан очередной шаг в развитии теории LP-структур — предложена алгебраическая модель, выразительные возможности которой охватывают распределенные продукционно-логические системы. Для нового понятия распределенной LP-структуры рассмотрен стандартный круг вопросов, а именно — о замыкании, эквивалентных преобразованиях, канонической форме, логической редукции. Настоящая работа дополняет эту модель определением и исследованием аппарата продукционно-логических уравнений. В результате создается теоретическая основа для оптимизации *распределенного логического вывода*.

Статья состоит из следующих основных разделов. В разд. 1 введены необходимые базовые понятия и

обозначения, в качестве отправной точки сформулированы имеющиеся математические результаты. В разд. 2 введен аппарат продукционно-логических уравнений в распределенной LP-структуре, установлены их основные свойства и предложены методы решения. В разд. 3 изложены основные идеи практического применения продукционно-логических уравнений для ускорения распределенного обратного вывода (релевантного LP-вывода). В Заключении подведены итоги исследования и указаны некоторые перспективы.

1. Основные понятия теории LP-структур

Обозначения и определения, необходимые для дальнейшего изложения, подробно описаны в работах [4, 9]. Напомним некоторые основные из них.

Бинарное отношение R на множестве F называется:

- рефлексивным, если для любого $a \in F$ справедливо $(a, a) \in R$;
- транзитивным, если для любых $a, b, c \in F$ из $(a, b), (b, c) \in R$ следует $(a, c) \in R$.

Известно [10], что существует замыкание R^* произвольного отношения R относительно свойств рефлексивности и транзитивности (рефлексивно-транзитивное замыкание). Обратная задача — нахождение транзитивной редукции: по данному R вычисляется минимальное отношение R' , такое, что его транзитивное замыкание совпадает с R^* . Здесь уместно напомнить, что для частично упорядоченных множеств различаются понятия минимального элемента (для него нет меньшего элемента) и наименьшего элемента (он меньше всех) [11]. В работе [10] обоснован алгоритм построения транзитивной редукции ориентированных графов. Показано, что эта задача вычислительно эквивалентна построению транзитивного замыкания, а также доказана единственность транзитивной редукции ациклического графа.

Базовые сведения о математических решетках содержатся в работе [11]. Решеткой называется множество с частичным порядком \leq ("не больше", "содержится"),

где для любой пары элементов определены операции \wedge (пересечение) — точная нижняя грань этой пары и \vee (объединение) — ее точная верхняя грань. Решетка \mathbb{F} называется ограниченной, если она содержит общие нижнюю и верхнюю грани, а именно — такие два элемента O, I , что $O \leq a \leq I$ для любого $a \in \mathbb{F}$. Атомом ограниченной (снизу) решетки \mathbb{F} называется минимальный элемент ее подмножества $\mathbb{F} \setminus \{O\}$. Решетка называется атомно-порожденной, если каждый ее элемент разложим в виде объединения атомов.

Под *LP-структурой* подразумевается алгебраическая система, образованная решеткой \mathbb{F} , на которой задано дополнительное бинарное отношение R , обладающее некоторыми (продукционно-логическими) свойствами. Решетка \mathbb{F} в контексте данного определения рассматривается в широком смысле, и ее тип может уточняться в конкретных моделях и приложениях.

Отношение R на решетке представляет совокупность правил (продукций) интеллектуальной системы. Элементы решетки соответствуют предпосылкам и заключениям этих правил, содержащим элементарные факты базы знаний и выражения над ними.

Отношение R называют *продукционно-логическим*, если оно обладает рефлексивностью, т. е. содержит все пары вида (a, a) , транзитивностью и другими свойствами, которые определяются конкретной моделью. Одно из таких свойств — *дистрибутивность*. Неформально дистрибутивность отношения означает возможность логического вывода по частям и совмещения его результатов на основе решеточных операций \wedge и \vee . Отношение R называется:

- \wedge -дистрибутивным, если из $(a, b_1), (a, b_2) \in R$ следует $(a, b_1 \wedge b_2) \in R$;
- \vee -дистрибутивным, если из $(a_1, b), (a_2, b) \in R$ следует $(a_1 \vee a_2, b) \in R$.

В общем случае отношение называется *дистрибутивным* при наличии обоих указанных свойств.

Для упрощения изложения далее в качестве основы LP-структуры рассматриваются решетки с семантикой подмножеств — $\lambda(F)$ (множество конечных подмножеств универсума F). Поэтому вместо символов \leq, \geq, \wedge и \vee используются знаки теоретико-множественных операций $\subseteq, \supseteq, \cap$ и \cup , а элементы решетки обозначаются, как правило, большими буквами. Исключение составляют атомы, обозначаемые маленькими буквами. Атомами здесь являются все подмножества, состоящие ровно из одного элемента универсума.

В упрощенной модели под дистрибутивностью отношения подразумевают лишь второе из двух указанных выше свойств. В такой нотации \cup -дистрибутивность трактуется в следующем смысле: из $(A, B_1), (A, B_2) \in R$ следует $(A, B_1 \cup B_2) \in R$.

Перейдем к определению распределенной LP-структуры. Каждому атому решетки и каждой паре отношения R необходимо поставить в соответствие множество узлов "вычислительной сети", на которых "хранится" этот атом и эта пара.

Пусть N — множество узлов вычислительной сети, \mathbb{N} — порожденный им булеан, т. е. множество всех его

подмножеств. Атомы решетки \mathbb{F} и пары отношения R будут помечаться элементами решетки \mathbb{N} как атрибутами.

Итак, на решетке \mathbb{F} определено отображение $Nodes()$, ставящее в соответствие каждому атому $a \in \mathbb{F}$ единственный непустой элемент $X \in \mathbb{N}$ ($Nodes(a) = X, X \neq \emptyset$). Кроме того, каждой паре $(A, B) \in R$ также ставится в соответствие непустой элемент $Y \in \mathbb{N}$ ($Nodes(A, B) = Y, Y \neq \emptyset$). При заданном отображении $Nodes()$ решетка \mathbb{F} и отношение R считаются *распределенными*.

Описанная выше алгебраическая система называется *распределенной LP-структурой* [9].

Распределенное бинарное отношение R на распределенной решетке \mathbb{F} называется *продукционно-логическим*, если оно рефлексивно, транзитивно и дистрибутивно, причем для каждой пары $(A, B) \in R$ справедливо $Nodes(A, B) = N$. *Логическим замыканием* отношения R называется наименьшее продукционно-логическое отношение, содержащее R .

В работе [9] показано, что для произвольного распределенного бинарного отношения R на распределенной решетке существует логическое замыкание $R^L = \frac{R}{\rightarrow}$.

Два распределенных отношения R_1, R_2 на распределенной решетке \mathbb{F} называют *эквивалентными* ($R_1 \sim R_2$), если их логические замыкания совпадают. *Эквивалентным преобразованием* данного отношения называют замену подмножества его пар, приводящую к эквивалентному отношению.

Цель построения алгебраической модели распределенной продукционной системы состоит в том, чтобы с ее помощью решать задачи управления знаниями, а также оптимизировать их хранение для снижения сетевого трафика в процессе логического вывода. Поэтому рассматривают некоторые признаки "хорошего" распределения информации по узлам. В частности, считается целесообразным хранение на узле всех правил, в которых используются факты этого же узла. Для формализации такого требования в LP-структуре наряду с функцией $Nodes()$ вводятся еще два отображения, действующих из \mathbb{F} в \mathbb{N} . Поскольку решетка \mathbb{F} атомно-порожденная, для любого ее элемента A существует представление $A = \bigcup_i a_i$ в виде объединения атомов. Обозначим

$$NodesMeet(A) = \bigcap_i Nodes(a_i) \text{ и } NodesJoin(A) = \bigcup_i Nodes(a_i).$$

Очевидно, что отображение $NodesMeet()$ определяет узлы, каждый из которых содержит все атомы элемента A . Отображение $NodesJoin()$ выдает все узлы, хранящие хотя бы один из таких атомов.

Распределенное бинарное отношение R на распределенной решетке \mathbb{F} называется *релевантно-корректным*, если для любой пары $(A, B) \in R$ справедливо

$$Nodes(A, B) \supseteq NodesJoin(A) \cup NodesJoin(B),$$

и *релевантно-нормализованным*, если для любой пары $(A, B) \in R$ справедливо

$$Nodes(A, B) = NodesJoin(A) \cup NodesJoin(B).$$

Распределенное отношение R на распределенной решетке \mathbb{F} называется *каноническим*, если оно релевантно-нормализовано и задано множеством пар вида (A, a) , где $A \in \mathbb{F}$, a — атом в \mathbb{F} .

В работе [9] показано, что для любого распределенного отношения на распределенной решетке существует эквивалентное ему каноническое отношение.

2. Продукционно-логические уравнения на распределенной решетке

В этом разделе введен связанный с распределенными LP-структурами класс реляционных уравнений. Рассмотрены вопросы о разрешимости и количестве решений этих уравнений, а также методы их решения. Нахождение решения соответствует обратному логическому выводу на распределенной решетке.

Пусть дано распределенное отношение R на распределенной решетке \mathbb{F} и имеет место $A \xrightarrow{R} B$. Тогда B является образом A , а A — прообразом B при отношении \xrightarrow{R} . Очевидно, что каждый элемент решетки может иметь много образов и прообразов.

Для данного $B \in \mathbb{F}$ *минимальным прообразом* при отношении \xrightarrow{R} называется такой элемент $A \in \mathbb{F}$, что $A \xrightarrow{R} B$ и A является минимальным, в том смысле, что не содержит никакого другого $A_1 \in \mathbb{F}$, для которого $A_1 \xrightarrow{R} B$.

Напомним, что в настоящей работе рассматриваются атомно-порожденные решетки. Многие из формулируемых ниже определений и результатов имеют аналоги в работе [4], однако здесь они относятся к распределенным LP-структурам и, соответственно, являются новыми.

Определение 1. Атом $x \in \mathbb{F}$ называется *начальным* при распределенном отношении R , если в R нет ни одной пары (A, B) , такой, что x содержится в B и не содержится в A . Элемент X называется *начальным*, если все его атомы являются начальными. Подмножество $\mathbb{F}_0(R)$ (будем обозначать \mathbb{F}_0), состоящее из всех начальных элементов \mathbb{F} , называется *начальным множеством* решетки \mathbb{F} .

Очевидно, начальное множество \mathbb{F}_0 образует распределенную подрешетку в \mathbb{F} . Рассмотрим уравнение

$$R^L(X) = B, \quad (1)$$

где $B \in \mathbb{F}$ — заданный элемент; $X \in \mathbb{F}$ — неизвестный элемент.

Определение 2. Частным (распределенным) решением уравнения (1) называется любой минимальный прообраз элемента B в \mathbb{F}_0 . Приближенным решением уравнения (1) называется любой прообраз элемента B в \mathbb{F}_0 . Общим решением уравнения (1) называется совокупность всех его частных решений $\{X_s\}$, $s \in S$.

Частное распределенное решение X называется *локализованным*, если $\text{NodesMeet}(X) \neq \emptyset$.

Уравнения вида (1) будем называть *продукционно-логическими уравнениями* на распределенной решетке.

Согласно [4] решается вопрос об изменении общего решения уравнений вида (1) при объединении их правых частей. С этой целью рассматривается уравнение

$$R^L(X) = B_1 \cup B_2. \quad (2)$$

Справедлива следующая теорема, доказательство которой существенно не отличается от ее аналога в работе [4].

Теорема 1. Пусть $\{X_s\}$, $s \in S_1$ — общее решение уравнения вида (1) с правой частью B_1 , а $\{Y_p\}$, $p \in S_2$ — общее решение уравнения того же вида с правой частью B_2 . Тогда общее решение уравнения (2) представляет собой множество всех элементов вида $X_s \cup Y_p$, из которого исключены элементы, содержащие другие элементы этого же множества.

Рассмотрим методы решения распределенных уравнений вида (1). Далее в этом разделе будем предполагать, что R является конечным каноническим распределенным отношением на распределенной решетке \mathbb{F} , не содержащим пар отношения \supseteq , а правая часть B уравнения (1) представляет собой конечное объединение атомов.

Введем расслоение исходного распределенного отношения R на виртуальные слои $\{R_t \mid t \in T\}$. Его цель — упростить исследование свойств логического замыкания \xrightarrow{R} . Кроме этого, в отдельных слоях упрощается построение и исследование алгоритмов, связанных с решением продукционно-логических уравнений.

Разобьем R на непересекающиеся подмножества, каждое из которых образовано парами вида (A, x_p) с одним и тем же атомом x_p в качестве правой части. Такое разбиение возможно, поскольку R является каноническим. Обозначим эти подмножества R^p по их атому x_p , $p \in P$.

Определение 3. Слоем R_t в распределенном отношении R называется подмножество R , образованное упорядоченными парами, взятыми по одной из каждого непустого R^p , $p \in P$.

Для расслоения распределенного отношения сохраняется ряд полезных свойств, аналогичных описанным в работе [4].

Замечание 1. Каждый слой содержит максимально возможное подмножество пар из R с уникальными правыми частями. Добавление к слою еще одной пары нарушило бы это условие.

Замечание 2. Любое подмножество пар в R с уникальными правыми частями принадлежит некоторому слою.

Замечание 3. В общем случае слои имеют непустые пересечения. Объединение всех слоев равно R .

Замечание 4. Общее число слоев M определяется равенством $M = \prod_{p \in P} M_p$, где M_p — мощность подмножества пар отношения R с правой частью x_p .

Следствие 1. Логическое замыкание канонического распределенного отношения R на распределенной решетке \mathbb{F} равно объединению логических замыканий его слоев, т. е. $R^L = \bigcup_{t \in T} R_t^L$.

Это следствие доказывается на основе доказательства аналогичного следствия в работе [4], с дополнительным контролем свойств релевантно-нормализованных отношений (см. разд. 1).

Будем констатировать, что решение X уравнения (1) (точное или приближенное) порождается в R некоторым слоем R_r , если $X \xrightarrow{R_r} B$.

Замечание 5. Аналогично [4] можно показать, что любое частное решение уравнения (1) порождается некоторым слоем R_r .

Замечание 6. Из следствия 1 вытекает, что для нахождения решения уравнения (1) в некотором слое R_r достаточно вместо (1) решить аналогичное уравнение с отношением R_r .

Последние замечания не гарантируют, что два различных слоя не могут порождать одного и того же решения. Кроме того, могут существовать слои, дающие частное решение для R_r , но приближенное для R . Некоторые слои могут вообще не давать решений. Однако справедливо утверждение о том, что один слой не может порождать более одного точного решения.

Следствие 2. Один слой не может содержать двух различных частных решений уравнения (1).

Доказательство этого утверждения существенно опирается на исследование структуры продукционно-логических связей в рамках отдельного слоя распределенного отношения R .

Из сформулированных выше следствий 1 и 2 непосредственно вытекает следующая теорема.

Теорема 2. Для нахождения общего решения распределенного уравнения (1) достаточно найти частное решение X_r в каждом слое R_r , где оно существует. Далее из полученного множества решений необходимо исключить элементы, содержащие другие элементы этого же множества.

Следствие 3. Число частных решений распределенного уравнения (1) оценивается сверху выражением $M = \prod_{p \in P} M_p$, где M_p — мощность подмножества

пар отношения R с правой частью x_p , а P определяет все такие подмножества (см. замечание 4).

Теорема 2 и замечание 6 (аналогично [4]) позволяют свести задачу решения уравнения (1) к нахождению частного решения распределенного уравнения

$$R_r^L(X) = B, \quad (3)$$

где B — не начальный элемент распределенной решетки \mathbb{F} ; R_r — произвольный слой в R .

Согласно следствию 2 обратное к $\xrightarrow{R_r}$ отношение является однозначным отображением $f_r: \mathbb{F} \rightarrow \mathbb{F}$ с некоторой областью определения $D(f_r) \subseteq \mathbb{F}$. Рассмотрим некоторые его свойства. Они доказываются аналогично [4], с незначительными изменениями.

Лемма 1. Отображение f_r является решеточным \cup -гомоморфизмом [11], т. е. $f_r(B_1 \cup B_2) = f_r(B_1) \cup f_r(B_2)$, $\forall B_1, B_2 \in D(f_r)$.

Следствие 4. Отображение f_r является изотонным [11]. Это означает, что если $B_1 \supseteq B_2$, то $f_r(B_1) \supseteq f_r(B_2)$.

Таким образом, основываясь на лемме 1, для решения распределенного уравнения (3) достаточно решить уравнение с каждым атомом элемента B в качестве правой части. Поэтому рассмотрим задачу нахождения частного решения следующего уравнения:

$$R_r^L(X) = b, \quad (4)$$

где b — не начальный атом распределенной решетки \mathbb{F} ; R_r — произвольный слой в R .

Изложим метод решения этой задачи, обобщающий аналогичный метод в работе [4]. Она эквивалентна задаче перечисления всех входных вершин распределенного ориентированного графа, из которых достижима данная вершина.

Такой граф G_R строится следующим образом. Каждому атому распределенной решетки \mathbb{F} , участвующему в отношении R , ставят в соответствие вершину графа. Далее для каждой пары (A, a) фиксированного слоя R_r строят дуги, ведущие из всех вершин, соответствующих атомам A , в вершину, соответствующую данному a . Для краткости изложения можно отождествлять атомы решетки и соответствующие им вершины в графе.

В полученном графе G_R выберем вершину b . Рассмотрим подграф $G_{R,b} \subseteq G_R$, содержащий все вершины, из которых достижима вершина b (включая саму b), и все дуги, соединяющие такие вершины.

Лемма 2. Если подграф $G_{R,b}$ не содержит ориентированных циклов, то множество всех его входных вершин соответствует частному решению уравнения (4).

Лемма 3. Если в графе $G_{R,b}$ есть ориентированный цикл, то уравнение (4) не имеет решений.

Доказательства этих лемм аналогичны доказательствам соответствующих лемм в работе [4] с небольшими уточнениями, связанными с распределенным "хранением" рассматриваемых графов.

Объединяя утверждения лемм 2 и 3, можно сформулировать следующую теорему, завершающую обоснование пошагового процесса решения исходного продукционно-логического уравнения (1).

Теорема 3. Уравнение (4) имеет не более одного решения. Если распределенный граф $G_{R,b}$ не содержит циклов, то единственное решение уравнения состоит из всех атомов, соответствующих входным вершинам графа. Если $G_{R,b}$ содержит хотя бы один цикл, то уравнение решений в слое не имеет.

3. О распределенном LP-выводе и показателях релевантности

Изложим некоторые идеи практического применения аппарата продукционно-логических уравнений для оптимизации распределенного обратного вывода (релевантного LP-вывода).

Как известно [5], стратегия релевантного вывода направлена на минимизацию числа медленно выполняемых запросов (к базе данных или интерактивно-пользователю). Запросы по возможности должны соответствовать тем фактам, которые действительно

Заключение

необходимы при выводе. Отрицательный ответ на единственный запрос исключает последующие запросы об элементах связанного подмножества фактов. Кроме того, при LP-выводе предпочтение отдается тестированию множеств фактов минимальной мощности.

Обратный вывод на основе решения уравнений начинается с построения всех минимальных начальных прообразов в LP-структуре для атомов, соответствующих значениям объекта экспертизы. Далее в построенном множестве достаточно найти тот прообраз, который содержит лишь истинные факты, после чего сразу можно сделать заключение о соответствующем значении объекта экспертизы.

Самый простой путь в этом направлении — просматривать прообразы последовательно, задавая пользователю вопросы о соответствующих начальных фактах (или обращаясь к базе данных за этими фактами). Этот подход дает некоторые преимущества — исследуются лишь минимальные прообразы. Также предварительно можно исключить из процесса "противоречивые" прообразы, т. е. содержащие одновременно альтернативные значения одного и того же объекта.

Однако существует более эффективный способ — приоритетный просмотр прообразов, содержащих значения наиболее релевантных объектов. Таковыми в первую очередь считаются объекты, чьи значения присутствуют в максимальном числе построенных прообразов. Тогда единственный отрицательный ответ на заданный вопрос исключает из рассмотрения сразу большое число прообразов, что, соответственно, ускоряет исследование. Вторым показателем релевантности тестируемого объекта — присутствие его значений в прообразах минимальной мощности. Таким образом, предпочтение отдается тем прообразам, проверка истинности которых потребует меньшего числа вопросов пользователю (или обращений к базе данных).

Сочетая указанные два показателя релевантности, можно достичь результатов, по эффективности существенно превышающих возможности стандартной машины вывода. Как показывают эксперименты [5], применяя релевантный LP-вывод, можно достичь снижения числа выполняемых медленных запросов в среднем на 15...20 %.

Распределенный характер интеллектуальной системы создает дополнительные трудности реализации эффективного логического вывода. Одной из целей моделирования подобной системы является снижение трафика между узлами вычислительной сети в процессе вывода. Таким образом, при разработке стратегии распределенного релевантного LP-вывода, наряду с упомянутыми выше двумя характеристиками, необходимо учитывать дополнительные показатели релевантности. Они связаны с атрибутами хранения фактов и правил, которые описываются введенными в разд. 1 настоящей работы отображениями *Nodes()*, *NodesMeet()*, *NodesJoin()*. Данное обстоятельство усложняет задачу оптимизации вывода и делает ее значительно более интересной.

В настоящей работе определен и исследован аппарат продукционно-логических уравнений в обобщенной LP-структуре, расширяющей область применения этой алгебраической теории до распределенных интеллектуальных систем продукционного типа.

Рассмотрены вопросы о разрешимости и количестве решений этих уравнений, а также предложены методы их решения. Нахождение решения продукционно-логического уравнения соответствует обратному логическому выводу на распределенной решетке. Представленные теоремы имеют несложные доказательства, однако создают теоретическую основу для дальнейших продвижений в области оптимизации распределенного логического вывода.

В частности, следующим шагом исследований на рассматриваемом направлении является разработка стратегий применения новых показателей релевантности LP-вывода, связанных с распределенным характером интеллектуальных систем.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-07-05341.

Список литературы

1. **Oles F. J.** An Application of Lattice Theory to Knowledge Representation // *Theor. Comput. Sci.* 2000. Vol. 249, Issue 1. P. 163–196.
2. **Бениаминов Е. М.** Алгебраические методы в теории баз данных и представлении знаний. М.: Научный мир, 2003. 184 с.
3. **Жожикашвили А. В., Стефанюк В. Л.** Алгебраическая теория продукционных систем // VIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2002 (7–12 октября 2002, г. Коломна): Труды конференции. Т. 1. М.: Физматлит, 2002. С. 428–436.
4. **Махортов С. Д.** Математические основы искусственного интеллекта: теория LP-структур для построения и исследования моделей знаний продукционного типа / Под ред. В. А. Васенина. М.: Изд-во МЦНМО, 2009. 304 с.
5. **Болотова С. Ю., Махортов С. Д.** Алгоритмы релевантного обратного вывода, основанные на решении продукционно-логических уравнений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 2. С. 40–50.
6. **Махортов С. Д.** Интегрированная среда логического программирования LPExpert // Информационные технологии. 2009. № 12. С. 65–66.
7. **Махортов С. Д.** Основанный на решетках подход к исследованию и оптимизации множества правил условной системы переписывания термов // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2009. Т. 13. С. 51–68.
8. **Васенин В. А., Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Роганов В. А., Трифонов И. А.** Средства суперкомпьютерных систем для работы с агент-ориентированными моделями // Программная инженерия. 2011. № 3. С. 2–14.
9. **Махортов С. Д.** Алгебраическая модель распределенной логической системы продукционного типа // Программная инженерия. 2015. № 12. С. 32–38.
10. **Aho A. V., Garey M. R., Ullman J. D.** The transitive reduction of a directed graph // *SIAM J. Computing* 1972. N 1 (2). P. 131–137.
11. **Биркгоф Г.** Теория решеток: пер. с англ. М.: Наука, 1984. 568 с.

Production-Logical Equations in the Distributed LP-Structure

S. D. Makhortov, e-mail: sd@expert.vrn.ru, Voronezh State University, Voronezh, 394006, Russian Federation

Corresponding author:

Makhortov Sergey D., Head Of Department, Voronezh State University, Voronezh, 394006, Russian Federation, e-mail: sd@expert.vrn.ru.

Received on March 18, 2016

Accepted on March 31, 2016

Algebraic methods are an effective tool for the formal construction and research of a wide range of information systems models, including intellectual systems. This also can be applied to the logical systems of production type.

In the last decade the author and his students developed an algebraic theory of the LP structures, which provides an effective solution to the problems of equivalent transformations, verification, knowledge bases minimization and speeding-up the logical inference. It is implemented in a number of software products that demonstrate its practical significance. This theory can also be used to describe other systems, that were not considered as the production systems before.

Meanwhile, fast-moving progress in the information technologies increases the complexity of the solving problems. Computer systems become massive and distributed, which requires significant advance in the techniques of their construction and research.

The previous article formulates an extended algebraic model which has a number of significant capabilities that cover the distributed production-logical systems. It considers closures, equivalent transformations, canonical form and logical reduction problems for the new distributed LP-structure concept. Current work complements this model by introducing the notion of the production-logic equations and researching them. The results of this work can serve as the theoretical basis for the distributed inference optimization.

Keywords: distributed production system, the relevant backward inference, algebraic model, the LP-structure, production-logical equation

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project nos. 15-07-05341.

For citation:

Makhortov S. D. Production-Logical Equations in the Distributed LP-Structure, *Programmnyaya Ingeneria*, 2016, vol. 7, no 7, pp. 324–329.

DOI: 10.17587/prin.7.324-329

References

1. **Oles F. J.** An Application of Lattice Theory to Knowledge Representation. *Theor. Comput. Sci.* 2000, vol. 249, issue 1, pp. 163–196.

2. **Beniaminov E. M.** Algebraic methods in the theory of databases and knowledge representation (*Algebraicheskie metody v teorii baz dannyh i predstavlenii znaniy*) Moscow, Nauchnyy mir, 2003, 184 p. (in Russian).

3. **Zhozhikashvili A. V., Stefanjuk V. L.** Algebraic theory of production systems (Algebraicheskaja teorija produkcijnyh sistem), *VIII nacional'naja konferencija po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2002*, Kolomna, October 7–12, 2002, Trudy konferencii, T. 1. Fizmatlit, 2002, pp. 428–436 (in Russian).

4. **Makhortov S. D.** *Mathematical Foundations of Artificial Intelligence: The LP structures theory for the knowledge models of production type construction and research* (Matematicheskie osnovy iskusstvennogo intellekta: teorija LP-struktur dlja postroenija i issledovanija modelej znaniy produkcijnogo tipa) / Ed. by V. A. Vasenin. Moscow, MCCME, 2009, 304 p. (in Russian).

5. **Bolotova S.Yu., Makhortov S. D.** Algorithms of the relevant backward inference that is based on production-logic equations solving (Algoritmy relevantnogo obratnogo vyvoda, osnovannye na resh-

enii produkcijno-logicheskijh uravnenij), *Iskusstvennyy Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2011, no. 2, pp. 40–50. (in Russian).

6. **Makhortov S. D.** LPEXpert: Integrated development environment for logical programming (Integrirovannaja sreda logicheskogo programirovanija LPEXpert), *Informacionny'e Texnologii*, 2009, no. 12, pp. 65–66 (in Russian).

7. **Makhortov S. D.** Research and optimization of a set of rules in a conditional term rewriting system using approach based on the lattices (Osnovannyj na reshetkah podhod k issledovaniju i optimizacii mnozhestva pravil uslovnoj sistemy perepisyvanija termov), *Intellektualnye Sistemy*, 2009, no. 13, pp. 51–68 (in Russian).

8. **Vasenin, V. A. Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Roganov V. A., Trifonov I. A.** Supercomputer system tools for working with an agent-based model (Sredstva superkomp'juternyh sistem dlja raboty s agent-orientirovannymi modeljami), *Programmnyaya Ingeneria*, 2011, no. 3, pp. 2–14 (in Russian).

9. **Makhortov S. D.** The algebraic model of the distributed logical system of the production type (Algebraicheskaja model' raspredelennoj logicheskijh sistemy produkcijnogo tipa), *Programmnyaya Ingeneria*, 2015, no. 12, pp. 32–38 (in Russian).

10. **Aho A. V., Garey M. R., Ulman J. D.** The transitive reduction of a directed graph. *SIAM J. Computing*, 1972, no 1: 2, pp. 131–137.

11. **Birkhoff G.** *Lattice Theory*, Rhode Island, 1995. 420 p.

А. Н. Шмарин, аспирант, e-mail: tim-shr@mail.ru, Воронежский государственный университет

О реализации приближения числа слоев без циклов в задаче нечеткого LP-вывода

Представлен способ вычисления числа слоев без циклов в LP-структуре на основе мощностей классов эквивалентности специального фактор-множества. Исследованы вопросы алгоритмической реализации соответствующих компонентов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки интеллектуальных программных систем, минимизирующих число трудоемких запросов о состоянии предметной области при работе с базами знаний большого объема.

Ключевые слова: LP-вывод, бинарное отношение, фактор-множество, базис циклов, NP-трудность, алгоритмы, Python

Введение

С увеличением объемов и сложности обрабатываемой информации все более актуальным становится использование систем искусственного интеллекта. При этом одной из наиболее распространенных моделей представления знаний является производственная модель [1]. Алгоритмы поиска решения в таких системах основаны на механизме логического вывода. На практике существует большое число задач, для которых получение информации о состоянии предметной области является ресурсоемкой операцией. Таковыми, например, могут быть запросы к СУБД, анализ медицинских данных или другая сложная последовательность вычислений. Зачастую в подобных задачах решение (либо множество возможных решений) ищут, зная лишь часть информации о состоянии предметной области. В силу данного обстоятельства требуется оптимально использовать ограниченные ресурсы.

Существуют задачи управления сложными объектами со случайными процессами (управление рисками, социально-экономическими системами), в которых управление основано на нечеткой модели представления знаний. Для них результат управляющего воздействия можно предсказать лишь с некоторой вероятностью. Кроме того, процесс получения информации, необходимой для принятия решения о том или ином управляющем воздействии, может быть сложным. В таких ситуациях необходимо поддерживать или приводить систему в заданное состояние, затрачивая как можно меньше ресурсов на трудоемкие операции получения необходимой информации, учитывая при этом нечеткость логических связей между знаниями.

С фактором ресурсоемкости операций получения данных, необходимых для принятия решения, также связана задача минимизации числа запросов о состоянии предметной области в ходе логического вы-

вода. Данная задача является NP-трудной [2, 3]. Для достижения глобальной минимизации существует общий метод LP-вывода [4], к сожалению, обладающий экспоненциальной вычислительной сложностью относительно числа атомарных фактов в базе знаний. Идея кластерно-релевантного LP-вывода [5, 6] основана на вычислении специфических оценок (показателей релевантности) для ограниченного подмножества продукции и на обобщении полученных оценок на все множество продукции.

Ранее [7] были рассмотрены структурные свойства разбиения бинарного отношения, на основании которых можно выбирать для анализа такое подмножество продукции, которое наиболее существенно влияет на показатель релевантности. В настоящей работе продолжено исследование структурных свойств разбиения бинарного отношения на слои, а также рассмотрены вопросы алгоритмической и программной реализации метода вычисления приближенной оценки числа слоев без циклов в задаче нечеткого LP-вывода [8].

Основные определения

Пусть задано конечное множество $F = \{f\}$. На его основе определим атомно-порожденную ограниченную алгебраическую решетку $L = \lambda(F)$, где λ — функция-булеан [9]. На решетке зададим бинарное отношение R , являющееся каноническим [6], т. е. $R = \{r = (\tau, f): \tau \in L, f \in F\}$.

Применительно к производственным системам такое отношение R соответствует множеству продукции, F (множество атомов решетки) соответствует элементарным фактам производственной системы, а сама решетка L соответствует множеству предположений и заключений продукции.

Обозначим символом A фактор-множество — разбиение бинарного отношения R на классы эквива-

лентности относительно уникальных правых частей его элементов, т. е. $A = \{\alpha_f = \{r = (\tau, f) : r \in R\} : f \in F\}$.

Рассматриваемое фактор-множество служит основой для структурного расслоения [4] исходного отношения R на виртуальные слои (частичные отношения). Рассмотрим ряд вспомогательных функций.

Отображения $in(\alpha, f) = \{(\tau, g) \in \alpha : f \in \tau\}$ и $\bar{in}(\alpha, f) = \{(\tau, g) \in \alpha : f \notin \tau\}$ переводят класс эквивалентности α в множество пар, которые соответственно содержат либо не содержат в своих левых частях атом f . Следует заметить, что $in(\alpha, f) = \alpha \setminus \bar{in}(\alpha, f)$ и $\bar{in}(\alpha, f) = \alpha \setminus in(\alpha, f)$.

Функции in и \bar{in} можно обобщить на все фактор-множество A :

$$in(A, f) = \left\{ \bigcup_{\alpha \in A} in(\alpha, f) \right\}, \quad \bar{in}(A, f) = \left\{ \bigcup_{\alpha \in A} \bar{in}(\alpha, f) \right\}.$$

Отображение

$$\lambda(X, k, i) : X \rightarrow \lambda(X), \quad k = \overline{1, |X|}, \quad i = 1, \binom{|X|}{k}$$

переводит множество X в i -й элемент множества всех его k -элементных подмножеств.

Определение 1. $A_f = \{\alpha \in A \mid \exists (\tau, g) \in \alpha : f \in \tau\} = \{\alpha \in A : in(\alpha, f) \neq \emptyset\}$ — отображение, переводящее фактор-множество A в такое подмножество его классов эквивалентности, что каждый элемент подмножества включает в себя хотя бы одну пару, содержащую f в левой части.

Используя введенные обозначения, можно переписать определенную в работе [7] функцию вычисления общего числа слоев для заданного атома f в виде

$$W(A, f, i) =$$

$$= \sum_i^{\binom{|A_f|}{i}} \left(\prod_{\beta \in in(\lambda(A_f, i, s), f)} |\beta| \prod_{\gamma \in \bar{in}(A \setminus \lambda(A_f, i, s), f)} |\gamma| \right).$$

В данном выражении левое произведение выполняется по мощностям элементов s -й выборки по i элементов из фактор-множества A . Они были прорежены до множеств, содержащих только пары, включающие атом f в своей левой части. При этом A_f исключает из произведения пустые множества. Правое же произведение выполняется по мощностям таких элементов A , которые не задействованы для вычисления левого произведения. Эти элементы прорежены до множеств, не содержащих пары, включающие атом f в левой части.

В работе [7] наглядно показано, что значение $W(A, f, i)$ тем больше, чем больше элементов в $\lambda(A_f, i, s)$, т. е. чем больше значение биномиального коэффициента

$$\binom{|A_f|}{i}.$$

О программной реализации структур, соответствующих основным определениям

Для оптимизации последующей работы с бинарным отношением R целесообразно иметь возможность доступа к классам эквивалентности, входящим в A , по атому решетки или по его индексу: $A[f] = \alpha_f, f \in F, A[i] = \alpha_{f_i}, f_i \in F, i = \overline{1, |F|}$. Сам же класс эквивалентности $\alpha \in A$ можно определить в виде вектора, содержащего индексы соответствующих пар в отношении. Если размер отношения позволяет сохранить его многократно в оперативной памяти как битовый вектор, то целесообразно классы эквивалентности определять в виде битовых векторов. Однако при таком определении необходимо сохранять возможность быстрого получения мощности соответствующего множества.

Результатами выполнения функций in и \bar{in} являются классы эквивалентности, поэтому они должны представляться так же, как и классы эквивалентности $\alpha \in A$. Отображения A_f можно найти один раз для всех f в виде вектора списков индексов классов эквивалентности и хранить их в памяти в процессе работы метода.

Для генерации перестановок необходимо реализовать (или задействовать существующий) итерированный генератор всех элементных подмножеств заданного множества. Также должна быть возможность использования сгенерированного множества несколькими объектами.

Процесс вычисления общего количества слоев можно попытаться оптимизировать путем кэширования компонентов произведений, состоящих из общих множителей.

Вычисление количества слоев без циклов

Ранее [7] было показано, что количество слоев без циклов для заданного атома решетки имеет смысл вычислять как разность количества всех слоев и слоев, содержащих циклы.

Общее количество слоев для атома f вычисляется как сумма $\sum_{i=1}^{|A_f|} W(A, f, i)$. Число слоев с циклами так-

же целесообразно вычислять на основе суммы значений функции W , которой в качестве аргумента передаются фактор-множества, построенные специальным образом на основе исходного фактор-множества A и дополнительных данных о структурных свойствах бинарного отношения R .

Как показано в работе [7], для построения таких фактор-множеств можно использовать специальным образом сгенерированную фундаментальную систему (базис) циклов [10], на основе которой определяется новая структура — фундаментальная система циклов канонического бинарного отношения. Ее определение дано в работе [7]. Далее приведен алгоритм ее построения.

Алгоритм построения фундаментальной системы циклов канонического бинарного отношения

Шаг 1. На основе бинарного отношения R построить граф $G = \{v\}$:

$$v \in G, v = (f, g), f, g \in F \Leftrightarrow \exists (\tau, g) \in R: f \in \tau.$$

input: R

output: G

$G \leftarrow \emptyset$

foreach $r = (\tau, g) \in R$ **do**

foreach $f \in \tau$ **do**

if $v \notin (f, g)$ **then**

$G \leftarrow G \cup \{v\}$

end

end

end

Шаг 2. По графу G , используя один из известных математических методов, построить фундаментальную систему циклов $S = \{s : s \subseteq G\}$.

Шаг 3. На основе отношения R и полученной фундаментальной системы циклов S построить E — фундаментальную систему циклов канонического бинарного отношения.

Построение заключается в том, что на основе дуг $v = (f, g), f, g \in F$, образующих элементы фундаментальной системы циклов $S = \{s\}$, строится множество

$E = \{e_1 \dots e_{|S|}\}$, состоящее из подмножеств отношения R , таких, что $\forall S_i = \{v = (f, g) \in G\} : e_i = \{(\tau, g) \in R : f \in \tau\}$.

input: A, S

output: E

$E \leftarrow \emptyset$

foreach $s \in S$ **do**

foreach $v = (f, g) \in s$ **do**

$e \leftarrow \emptyset$

найти все такие r , левая часть которых

содержит f ,

а правая равна $g : r = (\tau, g) : f \in \tau$

foreach $r = (\tau, g) \in A[g]$ **do**

if $f \in \tau$ **then**

$e \leftarrow e \cup \{r\}$

end

end

$E \leftarrow E \cup \{e\}$

end

end

Для единообразия операций хранения элементов E в машинной памяти целесообразно выполнять тем же способом, который используется для хранения классов эквивалентности фактор-множества A .

Вычисление количества всех слоев с циклами

Построения, приведенные далее, основаны на следующей идее. Из основного фактор-множества A можно выделить подмножество, описывающее все

слои, содержащие все циклы из некоторого заданного множества фундаментальных циклов. Число таких слоев можно посчитать за линейное время как произведение мощностей его классов эквивалентности. На основе этого вычисления можно построить математическую структуру, описывающую число слоев, которые содержат циклы из заданного множества.

Пусть $\varepsilon \subseteq E, \varepsilon = \{e \in E\}$ — подмножество фундаментальных циклов канонического бинарного отношения $R, \dot{\varepsilon}(\varepsilon) = \bigcup_{e \in \varepsilon} r$ — объединение всех пар

бинарного отношения, формирующих элементы данного подмножества.

Определение 2. Сужение фактор-множества A , описывающее всевозможные слои, которые содержат только фундаментальные циклы из множества ε , определяется следующим отображением:

$$\theta(\alpha, \varepsilon) = \begin{cases} \alpha \cap \dot{\varepsilon}(\varepsilon), & \text{если } \alpha \cap \dot{\varepsilon}(\varepsilon) \neq \emptyset \\ \alpha & \text{иначе} \end{cases},$$

$$\Theta(A, \varepsilon) = \{\theta(\alpha_1, \varepsilon), \dots, \theta(\alpha_{|A|}, \varepsilon)\}.$$

При таком построении имеем:

- $\Theta(A, \{e\}), e \in E$ — описывает все слои, включающие в себя цикл e ;

- $\Theta(A, \{e, g\}), e, g \in E$ — описывает все слои, включающие в себя одновременно цикл e и цикл g ; такой эффект достигается за счет неравенства $|e \cup g| > \max(|e|, |g|)$, благодаря чему α_i сужаются сильнее.

Для исследования структурных свойств данного отображения необходимо ввести дополнительные обозначения.

Определение 3. $S(A): A \rightarrow \lambda(R)$ — отображение, переводящее фактор-множество $A = \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ в множество всех слоев, которые A описывает:

$$S(A) = \left\{ \{r_1, \dots, r_{|A|}\} \mid r_i \in \alpha_i, i = \overline{1, |A|} \right\} = \\ = \bigcup_{(r_1, \dots, r_{|A|}) \in \alpha_1 \times \dots \times \alpha_{|A|}} \{r_1, \dots, r_{|A|}\}.$$

Если фактор-множество A состоит из классов эквивалентности $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, то число всевозможных слоев, которые можно построить на основе A , равно числу всевозможных выборок из каждого класса эквивалентности по одному элементу, т. е. $|S(A)| = |\alpha_1| \cdot \dots \cdot |\alpha_n|$.

Определение 4. $S_{all}(A, \Theta, \varepsilon)$ — множество всевозможных слоев, включающих в себя все циклы из множества $\varepsilon \subseteq E$. При этом выполняется:

$$S_{all}(A, \Theta, \varepsilon) = S(\Theta(A, \varepsilon)), \varepsilon \subseteq E;$$

$$|S_{all}(A, \Theta, \varepsilon)| = |\theta(\alpha_1, \varepsilon)| \cdot \dots \cdot |\theta(\alpha_{|A|}, \varepsilon)|, A = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{|A|}\}.$$

Замечание 1. Следует обратить внимание, что если $\varepsilon \neq E$, то слои из $S_{all}(A, \Theta, \varepsilon)$ могут включать в себя не только циклы из множества ε , но и циклы из множества $E \setminus \varepsilon$. То есть из того, что слой включает в себя не-

которое известное подмножество циклов, не следует, что слой не включает в себя какие-либо еще циклы.

Есть единственный случай, когда исходя из определения можно утверждать, что слой не включает в себя иных циклов, кроме заданных. Это случай, когда слой включает в себя все циклы (из $\varepsilon = E$ следует, что $E \setminus \varepsilon = \emptyset$).

Определение 5. $S_{subsets}(A, \Theta, \varepsilon)$ — множество всевозможных слоев, включающих в себя произвольное подмножество циклов из множества $\varepsilon \subseteq E$.

Замечание 2. Из определения S_{all} следует, что

$$\forall \varepsilon \subseteq E, \forall e \in \varepsilon : S_{all}(A, \Theta, \varepsilon) \subseteq S_{all}(A, \Theta, \{e\}).$$

Таким образом, $S_{subsets}$ можно выразить через S_{all} :

$$S_{subsets}(A, \Theta, \{x_1, \dots, x_l\}) = \bigcup_{k=1}^l S_{all}(A, \Theta, \{x_k\}).$$

Определение 6. $S_{only}(A, \Theta, \varepsilon, E)$ — множество всевозможных слоев, которые включают в себя все циклы из ε и не включают циклов из $E \setminus \varepsilon$, т. е.

$$S_{only}(A, \Theta, \varepsilon, E) = \{l \in S(A) \mid (\forall e \in \varepsilon : e \subseteq l) \wedge \wedge (\nexists g \in E \setminus \varepsilon : g \subseteq l \wedge g \neq \emptyset)\}.$$

Рассмотрим свойства данного определения.

Утверждение 1. $\forall e_1, e_2, E : e_1 \subseteq E, e_2 \subseteq E, e_1 \neq e_2$ выполняется следующее: $S_{only}(A, \Theta, \{e_1\}, E) \cap S_{only}(A, \Theta, \{e_2\}, E) = \emptyset$.

Доказательство. Для $e_1 \cap e_2 = \emptyset$ доказательство вытекает из определения. Рассмотрим случай $e_1 \cap e_2 \neq \emptyset$.

Предположим противное:

$$S_{only}(A, \Theta, \{e_1\}, E) \cap S_{only}(A, \Theta, \{e_2\}, E) \neq \emptyset.$$

Тогда

$$\exists l : l \in S_{only}(A, \Theta, \{e_1\}, E) \wedge l \in S_{only}(A, \Theta, \{e_2\}, E).$$

Следовательно, $e_1 \subseteq l \wedge e_2 \subseteq l$. Но из того, что $e_1 \neq e_2$, следует $(E \setminus \{e_1\}) \cap \{e_2\} \neq \emptyset \wedge (E \setminus \{e_1\}) \cap \{e_2\} \subseteq l$, а это невозможно по определению.

Утверждение 2.

$\forall \varepsilon \subseteq E, \varepsilon \neq \emptyset : S_{only}(A, \Theta, \varepsilon, \varepsilon) = S_{all}(A, \Theta, \varepsilon)$. Очевидно, что $\varepsilon \setminus \varepsilon = \emptyset$. Кроме того, по определению слои из множества $S_{only}(A, \Theta, \varepsilon, \varepsilon)$ не включают в себя никаких иных циклов, кроме тех, что принадлежат ε . А это соответствует определению $S_{all}(A, \Theta, \varepsilon)$.

Замечание 3. Если $\varepsilon \subseteq E, \varepsilon \neq \emptyset$, то, чтобы получить множество всех слоев, которые включают в себя все циклы из ε и не включают в себя никаких циклов из $E \setminus \varepsilon$, нужно из $S_{all}(A, \Theta, \varepsilon)$ — множества всех слоев, включающих в себя все циклы из множества ε , удалить все слои, включающие в себя циклы из множества $E \setminus \varepsilon$. Таким образом, имеет место следующее соотношение:

$$S_{only}(A, \Theta, \varepsilon, E) = S_{all}(A, \Theta, \varepsilon) \setminus \left(\bigcup_{k=1}^{|E \setminus \varepsilon|} \bigcup_{j=1}^{\binom{|E \setminus \varepsilon|}{k}} S_{only}(A, \Theta, \varepsilon \cup \lambda(E \setminus \varepsilon, k, j), E) \right).$$

Теперь, используя введенные обозначения, можно выразить значение общего числа слоев с циклами $|S_{subsets}(A, \Theta, E)|$ в терминах мощностей множеств S_{all} и S_{only} :

$$\begin{aligned} S_{subsets}(A, \Theta, E) &= \bigcup_{\varepsilon \subseteq E} S_{only}(A, \Theta, \varepsilon, E) = \\ &= \bigcup_{k=1}^{|E|} \bigcup_{i=1}^{\binom{|E|}{k}} S_{only}(A, \Theta, \lambda(E, k, i), E); \\ |S_{subsets}(A, \Theta, E)| &= \sum_{\varepsilon \subseteq E} |S_{only}(A, \Theta, \varepsilon, E)| = \\ &= \sum_{k=1}^{|E|} \sum_{i=1}^{\binom{|E|}{k}} |S_{only}(A, \Theta, \lambda(E, k, i), E)|. \end{aligned}$$

Для практического исследования полученных соотношений будет использован скрипт на языке Python. На основе рекуррентного соотношения, определяемого утверждением 2 и замечанием 3, по заданному множеству циклов генерируется сокращенное выражение $|S_{subsets}(A, \Theta, E)|$ в виде сумм $|S_{all}(A, \Theta, E)|, \varepsilon \subseteq E$.

```
#!/usr/bin/env python3.4
```

```
from sympy import Symbol
from itertools import combinations

def s_all(eps): return Symbol("".join(sorted(eps)))

def s_only(eps, E):
    if len(eps) == len(E):
        return s_all(eps)
    else:
        l, sdiff = [], sorted(set(E) - eps)
        for i in range(1, len(sdiff) + 1):
            l += [s_only(eps | set(perm), E)
                  for perm in combinations(sdiff, i)]
        return s_all(eps) - (sum(l))

def s_subsets(E):
    E, l = sorted(E), []
    for i in range(1, len(E) + 1):
        l += [s_only(set(perm), E)
              for perm in combinations(E, i)]
    return sum(l)

if __name__ == "__main__":
    for i in ["ab", "abc", "abcd"]:
        print("{0:5}: {1}".format(i, str(s_subsets(i))))
```

Далее приведены соответствующие результаты генерации для систем из двух, трех и четырех циклов.

- $|S_{subsets}(A, \Theta, \{a, b\})| = |S_{all}(A, \Theta, \{a\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{b\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{a, b\})|;$

- $|S_{subsets}(A, \Theta, \{a, b, c\})| = |S_{all}(A, \Theta, \{a\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{b\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{c\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{a, b\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{a, c\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{b, c\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{a, b, c\})|;$
- $|S_{subsets}(A, \Theta, \{a, b, c, d\})| = |S_{all}(A, \Theta, \{a\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{b\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{c\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{d\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{a, b\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{a, c\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{a, d\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{b, c\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{b, d\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{c, d\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{a, b, c\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{a, b, d\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{a, c, d\})| + |S_{all}(A, \Theta, \{b, c, d\})| - |S_{all}(A, \Theta, \{a, b, c, d\})|.$

В полученных выражениях видна закономерность, которую можно обобщить на произвольное число циклов.

Утверждение 3. Для произвольной фундаментальной системы циклов $E = \{x_1, \dots, x_l\}$ канонического бинарного отношения число всевозможных слоев с циклами вычисляется по формуле

$$|S_{subsets}(A, \Theta, E)| = \sum_{x_1 \in E} |S_{all}(A, \Theta, \{x_1\})| - \sum_{\substack{\{x_1, x_2\} \subset E \\ x_1 \neq x_2}} |S_{all}(A, \Theta, \{x_1, x_2\})| + \dots \\ \dots + (-1)^{l+1} |S_{all}(A, \Theta, \{x_1, \dots, x_l\})| = \\ = \sum_{k=1}^l (-1)^{k+1} \sum_{i=1}^k |S_{all}(A, \Theta, \{\lambda(E, k, i)\})|.$$

Корректность утверждения на небольших размерах данных (ограниченных производительностью компьютера) можно проверить с помощью приведенного скрипта. Формальное доказательство корректности утверждения для произвольных объемов является пока открытым вопросом и не рассматривается в данной работе.

Далее выполним построение, описывающее число всех слоев с циклами, которые i раз содержат заданный атом f решетки L .

Определение 7. Будем говорить, что сужение θ корректно для A_1 и ε , если выполняются следующие условия:

$$S(\Theta(A_1, \varepsilon)) \subseteq S(A); \quad (1)$$

$$\forall l \in S(\Theta(A_1, \varepsilon)) \exists e \in \varepsilon : e \subseteq l; \quad (2)$$

$$\forall e \in \varepsilon \exists l \in S(\Theta(A_1, \varepsilon)) : e \subseteq l. \quad (3)$$

Пусть задано некоторое фактор-множество A_1 , для которого выполняется $S(A_1) \subseteq S(A)$, и некоторое ε такое, что $\varepsilon \subseteq E$, причем сужение Θ не обязательно корректно для A_1 и ε .

Определение 8. $F(A_1, \Theta, \varepsilon) : \lambda(E) \rightarrow \lambda(E)$ — отображение, переводящее множество циклов ε в такое его подмножество, что сужение Θ корректно для A_1 и $F(A_1, \Theta, \varepsilon)$, т. е. $F(A_1, \Theta, \varepsilon) = \{e \in \varepsilon | \exists l \in S(\Theta(A_1, \varepsilon)) : e \subseteq l\}$.

При таком построении условия (1) и (2) выполняются по определению отображения Θ , а условие (3) выполняется по определению отображения F .

Для практического применения необходимо переписать данное определение в терминах фактор-множеств:

$$F(A_1, \Theta, \varepsilon) = \{e \in \varepsilon | \forall \alpha_e \in e / \sim \exists \alpha_{A_1} \in A_1 / \sim : \alpha_e \subseteq \alpha_{A_1}\}.$$

Теперь можно определить формулу для вычисления точного количества слоев без циклов. Для этого введем вспомогательное отображение

$$\tilde{A}(i, s, f) = in(\lambda(A_f, i, s), f) \cup \overline{in}(\lambda(A_f, i, s), f).$$

Кроме того, целесообразно переписать в более кратком виде определение функции для нахождения количества всех слоев:

$$W(A, f, i) = \sum_{s=1}^{|A_f|} \prod_{\beta \in \tilde{A}(i, s, f)} |\beta|.$$

Таким образом, используя введенные обозначения, можно построить функцию, возвращающую количество таких слоев с циклами, что каждый слой содержит ровно i пар с атомом f , включенным в левую часть:

$$W_{loops}(A, f, i) = \sum_{s=1}^{|A_f|} |S_{subsets}(\tilde{A}(i, s, f), \Theta, F(\tilde{A}(i, s, f), \Theta, \varepsilon))|.$$

По аналогии с предыдущими рассуждениями количество всех слоев, которые содержат циклы для заданного атома f , можно найти в виде суммы

$$W_{loops}(A, f) = \sum_{i=1}^{|A_f|} W_{loops}(A, f, i).$$

Для нахождения числа слоев без циклов достаточно из общего числа слоев вычесть число слоев с циклами:

$$W_{nloops}(A, f) = W(A, f) - W_{loops}(A, f);$$

$$W_{nloops}(A, f) = \sum_{i=1}^{|A_f|} \sum_{s=1}^{|A_f|} \left(\prod_{\beta \in \tilde{A}(i, s, f)} |\beta| - |S_{subsets}(\tilde{A}(i, s, f), \Theta, F(\tilde{A}(i, s, f), \Theta, \varepsilon))| \right).$$

О реализации вычисления приближенного значения числа слоев без циклов

Можно заметить наличие некоторых закономерностей, полезных для вычисления приближенного значения количества слоев без циклов.

Значения $W(A, f, i)$ и $W_{loops}(A, f, i)$ тем больше, чем больше значение биномиального коэффициента $\binom{|A_f|}{i}$. Известно, что наибольшее значение всегда

имеет коэффициент $\binom{|A_f|}{\lfloor |A_f|/2 \rfloor}$ и, если $|A_f|$ — не-

четное число, коэффициент $\binom{|A_f|}{\lfloor |A_f|/2 \rfloor + 1}$. Однако

данные значения растут экспоненциально относительно $|A_f|$. Этот факт означает, что для достаточно больших значений $|A_f|$ не получится найти точные значения функций при i , близких к $\lfloor |A_f|/2 \rfloor$. Однако данный факт можно использовать для ранжирования атомов по степени их релевантности, а приближенные значения W и W_{loops} находить для больших биномиальных коэффициентов.

Значение $|S_{all}(A, \Theta, \varepsilon)|$ тем больше, чем меньше пар с уникальными правыми частями содержится в ε

(т. е. чем меньше $|\bigcup_{e \in \varepsilon} e/\sim|$) и чем больше элементов отношения R присутствует в элементах ε . Такая закономерность имеет место в силу особенностей отображения Θ , которое прореживает элементы фактормножества A до пересечения с множеством $\bigcup_{e \in \varepsilon} e$, если такое пересечение не пусто.

Для приближенного подсчета $|S_{subsets}(A, \Theta, \varepsilon)|$ целесообразно в первую очередь выбирать те ε , что содержат меньшее число элементов, и среди таких ε в первую очередь при подсчете учитывать те, которые содержат большее число пар отношения R , т. е. имеют большее значение $|\bigcup_{e \in \varepsilon} e|$.

Кроме того, при реализации приближения функции W_{nloops} целесообразно считать компоненты

суммы, дающие наибольшие значения при наименьшем числе суммируемых членов, и выполнять за шаг приближение по всем f .

Заключение

Исследованы вопросы приближенного вычисления первого показателя релевантности LP-вывода — числа прообразов, содержащих заданный атом решетки. Формализован подход, позволяющий при нахождении приближенной оценки учитывать в первую очередь наиболее количественно значимые структурные особенности бинарного отношения на решетке.

Данный подход может быть применен для ускорения обратного вывода в интеллектуальных системах продукционного типа. Он может быть распространен и на более сложные логические системы в информатике [11].

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-07-05341.

Список литературы

1. Davis R., King J. An overview of production systems // Machine Intelligence. 1977. Vol 8. P. 300–332.
2. Махортов С. Д., Шмарин А. Н. Нечеткий LP-вывод и его программная реализация // Программная инженерия. 2013. № 12. С. 34–38.
3. Махортов С. Д., Шмарин А. Н. Оптимизация метода LP-вывода // Нейрокомпьютеры. Разработка, применение. 2013. № 9. С. 59–63.
4. Махортов С. Д. Основанный на решетках подход к исследованию и оптимизации множества правил условной системы переписывания термов // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2009. Т. 13. С. 51–68.
5. Махортов С. Д. Интегрированная среда логического программирования LPExpert // Информационные технологии. 2009. № 12. С. 65–66.
6. Болотова С. Ю., Махортов С. Д. Алгоритмы релевантного обратного вывода, основанные на решении продукционно-логических уравнений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 2. С. 40–50.
7. Шмарин А. Н., Махортов С. Д. О приближенных оценках количества слоев без циклов в задаче нечеткого LP-вывода // Нейрокомпьютеры. Разработка, применение. 2015. № 12. С. 44–51.
8. Shmarin A. N. Using Confidence Coefficients in the LP Inference // Modern informatization problems in simulation and social technologies: Proceedings of the XX-th International Open Science Conference. Yelm, WA, USA, January 1–10, 2015 / Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O. Ja. Kravets. Yelm: Science Book Publishing House LLC, 2015. P. 196–201.
9. Салий В. Н., Богомолов В. А. Алгебраические основы теории дискретных систем. М.: Физматлит, 1997. 368 с.
10. Харари Ф. Теория графов: пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 296 с.
11. Чечкин А. В. Нейрокомпьютерная парадигма информатики // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2011. № 7. С. 3–9.

About Implementation of Approximation the Number of Layers without Cycles in the Fuzzy LP-Inference Problem

A. N. Shmarin, e-mail: tim-shr@mail.ru, Voronezh State University, Voronezh, 394006, Russian Federation,

Corresponding author: Shmarin Artem N., Postgraduate Student, Voronezh State University, Voronezh, 394006, Russian Federation, e-mail: tim-shr@mail.ru

Received on April 08, 2016

Accepted on April 19, 2016

The increase in the volumes and complexity of processed information makes the use of artificial intelligence systems more and more actual. In such systems, one of the most widespread knowledge representation models is the

production model and search algorithms are based on the inference engine. In practice, obtaining information about the subject area status is time-consuming operation for many problems. The examples are the requests to the DBMS, the analysis of medical data or other complex sequences of calculations can be those. Often in such problems, the search for solution (or set of possible solutions) is performed in the absence of part of information about the subject area status. This circumstance requires optimal use of limited resources.

There are tasks of control of complex objects with random processes (risk management, socio-economic systems), in which the control process is based on fuzzy knowledge representation model. For them, the result of the controlling influence can be predicted only with some probability. In addition, process of obtaining information that is necessary for making decision about the control action can be time-consuming operation. In such situations it is necessary to maintain or to bring the system to the predetermined state, spending as little as possible resources for time-consuming operations of obtaining the necessary information, taking into account at the same time the fuzziness of the relationship between knowledge.

The complexity of the operations of data acquisition necessary for decision-making, leads to the problem of minimizing the number of requests for information about the subject area status during inference. This problem is NP-hard. To achieve global minimization there is the general method of LP-inference with exponential computational complexity relative to the number of atomic facts in the knowledge base. However, some of its heuristic modifications have polynomial complexity. The goal of the provided research is development of the approximating method to better minimize the number of requests performed in the inference.

Earlier, the structural properties of partition of the binary relation were considered, based on which it is possible to select for the analysis such subset of production, that most significantly changes the rate of relevancy.

This paper presents the method for calculating the value of the exact number of layers without cycles based on capacities of quotient set equivalence classes that builds as the partition of binary relations by unique right parts. In addition, this paper considers questions of the algorithmic implementation of components that are necessary to calculate the approximate value of the number of layers without cycles.

The presented approach can be applied to accelerate the reverse inference in production type systems of artificial intelligence. It can be extended also to more complex logical systems in computer science.

Keywords: LP-inference, quotient set, binary relation, cycle basis, NP-hardness, algorithms, python

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project nos. 15-07-05341.

For citation:

Shmarin A. N. About Implementation of Approximation the Number of Layers without Cycles in the Fuzzy LP-Inference Problem, *Programmnaya Ingeneria*, 2016, vol. 7, no. 7, pp. 330–336.

DOI: 10.17587/prin.7.330-336

References

1. Davis R., King J. An overview of production systems, *Machine Intelligence*, 1977, vol. 8, pp. 300–332.
2. Makhortov S. D., Shmarin A. N. Nechetkij LP-vyvod i ego programmnaja realizacija (Fuzzy LP-inference and its software implementation), *Programmnaya Ingeneria*, 2013, no. 12, pp. 34–38 (in Russian).
3. Makhortov S. D., Shmarin A. N. Optimizacija metoda LP-vyvoda (Optimizing LP-inference method), *Nejrokomputery. Razrabotka, primenenie*, 2013, no. 9, pp. 59–63 (in Russian).
4. Makhortov S. D. Osnovannyj na reshetkah podhod k issledovaniju i optimizacii mnozhestva pravil uslovnoj sistemy perepisyvanija termov (Research and optimization of a set of rules in a conditional term rewriting system using approach based on the lattices), *Intellektualnye Sistemy*, 2009, no. 13, pp. 51–68 (in Russian).
5. Makhortov S. D. Integrirovannaja sreda logicheskogo programirovanija LPExpert (LPExpert: Integrated development environment for logical programming), *Informacionnyje Teknologii*, 2009, no. 12, pp. 65–66 (in Russian).
6. Bolotova S.Yu., Makhortov, S. D. Algoritmy relevantnogo obratnogo vyvoda, osnovannye na reshenii produkcionno-logicheskikh uravnenij (Algorithms of the relevant backward inference that is based on production-logic equations solving), *Iskusstvennyj Intellekt i Prinyatie Reshenij*, 2011, no. 2, pp. 40–50 (in Russian).
7. Shmarin A. N., Makhortov S. D. O priblizhennykh ocenках kolichestva sloev bez ciklov v zadache nechetkogo LP-vyvoda (About approximate estimates of the number of layers without cycles in the fuzzy LP-inference), *Nejrokomputery. Razrabotka, primenenie*, 2015, no. 12, pp. 44–51 (in Russian).
8. Shmarin A. N. Using confidence coefficients in the LP-inference, *Modern Informatization Problems in the Technological and Telecommunication Systems Analysis and Synthesis: Proceedings of the XX-th International Open Science Conference*, Yelm, WA, USA, January 1–10, 2015/ Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O. Ja. Kravets, 2015, pp. 196–202.
9. Salij V. N., Bogomolov V. A. *Algebraicheskie osnovy teorii diskretnyh sistem* (Algebraic foundations of the theory of discrete systems), Moscow, Fizmatlit, 1997, 368 p. (in Russian).
10. Harari F. *Teorija grafov*: Per. s angl. (Graph theory: Trans. from engl.) SPb.: BHV-Peterburg, 2003, 296 p. (in Russian).
11. Chechkin A. V. Nejrokomputernaja paradigma informatiki (Neurocomputing paradigm of informatics), *Nejrokomputery: Razrabotka, Primenenie*, 2011, no. 7, pp. 3–9 (in Russian).

ООО "Издательство "Новые технологии". 107076, Москва, Стромьинский пер., 4
Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор З. В. Наумова

Сдано в набор 10.05.2016 г. Подписано в печать 20.06.2016 г. Формат 60×88 1/8. Заказ Р1716
Цена свободная.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru