

Cloud of Science



Электронный журнал
<http://CloudofScience.ru>

Электронный журнал **Cloud of Science**

Том 1. № 1

Тематика журнала: Информатика, Автоматика и вычислительная техника, Математическое моделирование, Использование пакетов прикладных программ для решения инженерных и экономических задач, Компьютерное моделирование в естественных науках.

Издатель: Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский технологический институт «ВТУ», Свидетельство о регистрации электронного СМИ: Эл № ФС77-54920 от 26.07.2013 г.

Периодичность: 4 номера в год

Статьи проходят обязательное рецензирование.

**Статьи индексируются в базе данных РИНЦ
(Российский индекс научного цитирования)**

Статьи принимаются в формате MS Word по электронной почте
e_nikulchev@mti.edu.ru.

Приветствуются статьи с приложением в виде текстов программ, запускаемых программных модулей, роликов, анимации. Все приложения размещаются на странице номера журнала в сети Интернет и направлены на повышение восприятия материала и обоснованности выводов.

Статьи проходят независимое рецензирование двумя экспертами. Максимальное время экспертизы — один месяц с даты регистрации. Статья считается зарегистрированной после направления письма автору с указанием регистрационного номера. Статьи могут быть не приняты к публикации в журнале в случае отрицательных рецензий обоих рецензентов или при несоответствии тематике журнала. Отсутствие «научной новизны» не может являться основанием для отклонения рукописи.

Редакционная коллегия

Главный редактор

Никульчев Е.В., д.т.н., профессор
проректор, НОУ ВПО Московский технологический
институт «ВТУ» (Россия, Москва)

Члены редколлегии

Андрейчикова О.Н., д.т.н., профессор
в.н.с., Центральный экономико-математический инсти-
тут РАН (Россия, Москва)

Барахнин В.Б., д.т.н., доцент
с.н.с., Институт вычислительных технологий СО РАН
(Россия, Новосибирск)

Барановский Н.В., к.ф.-м.н.
доцент, Энергетический институт Национальный ис-
следовательский Томский политехнический универси-
тет (Россия, Томск)

Белов В.В., д.т.н., профессор
профессор, Рязанский государственный радиотехниче-
ский университет (Россия, Рязань)

Бубнов Г.Г., д.э.н., профессор
ректор, НОУ ВПО Московский технологический ин-
ститут «ВТУ» (Россия, Москва)

Веремей Е.И., д.ф.-м.н., профессор
зав. каф. факультет ПМ-ПУ, Санкт-Петербургский
государственный университет (Россия, Санкт-
Петербург)

Винокур А.И., д.т.н., профессор
директор института, Московский государственный
университет печати имени Ивана Федорова (Россия,
Москва)

Горяшко А.П., д.т.н., профессор
профессор, НОУ ВПО Московский технологический
институт «ВТУ» (Россия, Москва)

Иглин С.П., к.т.н., профессор
профессор, Харьковский политехнический институт
(Украина, Харьков)

Карпов А.С. к.т.н.
декан НОУ ВПО Московский технологический инсти-
тут «ВТУ» (Россия, Москва)

Карпухин А. В., к.т.н., доцент
в.н.с., Харьковский национальный университет радио-
электроники (Украина, Харьков)

Ковшов Е.Е., д.т.н., профессор
профессор, Московский государственный технологи-
ческий университет «СТАНКИН» (Россия, Москва)

Куанг Чинь Лыонг, к.ф.-м.н.
профессор, Университет Бинь Зыонг (СРВ, Хошимин)

Ландэ Д.В. д.т.н., с.н.с.
Зав. отделом, Институт проблем регистрации инфор-
мации НАН Украины, профессор, НТУУ «Киевский
политехнический институт» (Украина, Киев)

Лушников Б.В. к.т.н., доцент
доцент, Юго-Западный государственный университет
(Россия, Курск)

Майков К.А., д.т.н., профессор
профессор, Московский государственный технический
университет имени К.Э. Баумана (Россия, Москва)

Мокрицкая Т.П., к.г.н., доцент
доцент, Днепропетровский национальный университет
им. Олеся Гончара, (Украина, Днепропетровск)

Очков В.Ф., д.т.н., профессор
профессор, НИУ Московский энергетический институт
(Россия, Москва)

Плужник Е.В., ДВА
первый проректор НОУ ВПО Московский технологи-
ческий институт «ВТУ» (Россия, Москва)

Подольнец Л.А., д.э.н., профессор
зав. каф., Санкт-Петербургский университет сервиса и
экономики (Россия, Санкт-Петербург)

Пылькин А.Н., д.т.н., профессор
декан, зав. каф., Рязанский государственный радиотех-
нический университет (Россия, Рязань)

Рогачев Г.Н., к.т.н., профессор
доцент, Самарский государственный технический
университет (Россия, Самара)

Солдаткин В.И., д.ф.н., профессор
вице-президент НОУ ВПО Московский технологи-
ческий институт «ВТУ» (Россия, Москва)

Сухомлин В.А., д.т.н., профессор
зав. лаб. Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова (Россия, Москва)

Тарасевич Ю.Ю., д.ф.-м.н., профессор
зав. каф. Астраханский государственный университет
(Россия, Астрахань)

Тютиков В.В., д.т.н., профессор
проректор, Ивановский государственный энергетиче-
ский университет (Россия, Иваново)

Титов С.А., к.э.н., доцент
декан НОУ ВПО Московский технологический инсти-
тут «ВТУ» (Россия, Москва)

Федотов А.М., чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.,
профессор
декан, Новосибирский государственный
университет, Институт вычислительных технологий
СО РАН (Россия, Новосибирск)

Хранилов В.П., д.т.н., доцент
зам. директора ИРИТ, Нижегородский государствен-
ный технологический университет имени
Р. Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород)

Хо Дак Лок, PhD, prof.
ректор, Хошиминский Технологический Институт
(СРВ, Хошимин)

Штейнберг В. PhD, prof.
профессор, Научный институт имени Х. Вейцмана
(Реховот, Израиль)

Черных И.В., д.т.н., доцент
зав. каф. Уральский федеральный университет им. Б.Н.
Ельцина (Россия, Екатеринбург)

Содержание

ПАКЕТЫ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

- В. Ф. Очков, Чжо Ко Ко**
Облачные функции — новый этап информационной поддержки науки и техники..... 5
- Г. Н. Рогачев**
Продукционный метод описания, анализа и синтеза автоматических регуляторов
непрерывно-дискретных систем управления 17

МЕТОДЫ. АЛГОРИТМЫ. ПРОГРАММЫ

- V. V. Belov, M. V. Naumovich**
Extended Task Representation Model in Personal Task Managers and New Methods of
Task Processing for User Advanced Interaction Organization 41
- Е. С. Кузнецов**
Особенности прогнозирования в условиях структурной неопределенности
исследуемых объектов 49
- Б. В. Лушников, Е. Н. Политов, Е. С. Тарасова, К. Г. Казарян** Бионический
плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов
в гидросфере 61
- Е. В. Плужник, Е. В. Никульчев, С. В. Паян**
Лабораторный экспериментальный стенд облачных и сетевых технологий 78
- А. В. Пруцков**
Алгебраическое представление модели формообразования естественных языков.... 88
- Д. М. Цыбулько**
Принципы проектирования приложений с помощью
проблемно-ориентированного объектного программирования 98
- Д. А. Шевляков**
Исследование эффективности многопорогового декодера в беспроводных каналах
связи..... 106

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭКОНОМИКЕ

- А. П. Горяшко**
Теория игр: от анализа к синтезу. Обзор результатов проектирования рынков..... 112
- С. А. Титов**
Исследование масштабов использования проектно-ориентированных
форм организации хозяйственной деятельности в высокотехнологических
секторах экономики..... 155

УДК 004.75

Облачные функции — новый этап информационной поддержки науки и техники

В. Ф. Очков, Чжо Ко Ко

*Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д 14
e-mail: ochkov@twf.mpei.ac.ru, kyawko48@gmail.com*

Аннотация. В статье рассмотрена новая информационная технология, связанная с размещением функций по свойствам веществ в Интернете для «облачных» ссылок на них и/или для скачивания и встраивания в свой программный расчетный проект. Рассмотрены типичные примеры расчетов с опорой на «облачные» функции.

Ключевые слова: «облачные» функции, свойства веществ, Mathcad, Excel.

ГРНТИ 20.15.05; 50.07.03

Научно-технические и инженерные расчеты на компьютере немалымы без константной¹ поддержки — без знания свойств материалов и рабочих тел процессов, аппаратов и технологий, по которым ведутся расчеты и проектирование. Если говорить, например, о тепловых электрических станциях, то их расчет и проектирование требуют знания теплофизических свойств рабочих тел (вода, водяной пар паротурбинных блоков, воздух, дымовые газы газовых турбин и котлоагрегатов), а также свойств металлов, из которых сделаны котлы, турбины, насосы и другое основное и вспомогательное оборудование электростанций.

Можно выделить три этапа в технологии «вставки» знаний о свойствах рабочих тел и материалов в расчетные компьютерные программы:

1. В процессе расчета компьютер прерывал свою работу и требовал от пользователя некой справки по свойствам веществ: компьютер выдавал, например, значения температуры и давления и просил пользователя ввести значение, например, плотности водяного пара. Пользователь открывал нужный справочник (бумажный или электронный) с соответствующей таблицей свойств воды и водяного пара, искал в нем по значениям температуры и давления значение плотности и вводил его в компьютер. Эта технология во многом повторяла технологию «ручных» расче-

¹ Правильнее говорить — «функциональная поддержка». Дело в том, что многие константы, приводимые в справочниках, являются по своей сути не константами, а функциями. Плотность материалов, например, зависит от внешних условий. Для твердых и жидких материалов это, как минимум, температура. На свойства газов влияет и давление. Истинных физических констант мало — скорость света в вакууме, различные именные константы (Планка, Больцмана и т. д.).

тов — расчетов без использования компьютерных программ. В наше время за подобной справкой все чаще и чаще обращаются к Интернету.

2. Компьютерные расчетные программы стали дооборудовать модулями, процедурами и функциями, связывающими текущие параметры расчета (например, температуру и давление (п. 1)) с требуемым свойством того или иного вещества. Если говорить о свойствах рабочих тел энергетики, то одним из подобных встроенных средств является программа WaterSteamPro (см. www.wsp.ru и [1]), которую через механизм DLL можно прикрепить ко всем популярным расчетным программам — Excel, Mathcad, MATLAB, Maple, языки программирования и др.

3. Размещение программ по свойствам веществ на внешних серверах — в «облаках», куда можно сделать некую *ссылку* и получить нужное значение: числовое, лингвистическое и прочее. Об этой новой технологии и пойдет речь в данной статье.

В настоящее время почти все компьютеры, на которых ведутся инженерные и научно-технические расчеты, подключены к Интернету. Более того, если компьютер почему-либо отключен от Интернета, то это вызывает некий дискомфорт, даже в том случае, если Интернет в данный момент не нужен или даже вреден — отвлекает, например, от выполнения срочной работы. При отключенном Интернете возникает чувство, что тебя заперли в комнате, ты не можешь выйти из нее и все время оглядываешься на закрытую дверь, дергаешь ее...

В связи с этим и по ряду других причин представляется возможным и целесообразным «держат» все свойства всех веществ и другую справочную информацию не на рабочей станции, а в «облаках» и обращаться к этим свойствам посредством «облачных» ссылок.

Данная технология последние несколько лет развивается в Национальном исследовательском университете «Московский энергетический институт» (www.mpei.ru) и в Объединенном институте высоких температур РАН (www.jiht.ru) [4].

Рассмотрим эту технологию относительно воды и водяного пара — самого, наверно, распространенного на Земле теплоносителя, рабочего тела, растворителя и прочее, и прочее.

Изучением и стандартизацией свойств этой важной субстанции занимается Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара (www.iapws.org), в которой работает первый автор этих строк². В «облаках», на сервере этой организации публикуются так называемые *формуляции* — набор утвержденных формул и правил их использования в процессе создания соответствующих компьютерных программ или просто при ручном счете. До недавнего времени эти формуляции публиковались в виде «мертвых» PDF-документов или даже сканов машинописных страниц. Но сейчас по инициативе первого автора этих строк данные формуляции стали публиковаться в виде «живых» расчетных документов, где можно изменить

² В июне 2014 г. очередная ежегодная встреча Исполкома и Рабочих групп этой организации проводится в Москве.

исходные данные: параметры воды и водяного пара (например, температуру и давление) и получить не только итоговый ответ (значение удельной энтальпии, удельной энтропии, плотности, теплопроводности, вязкости, теплоемкости и т. д.), но и все промежуточные результаты расчетов по формулам. А это очень важно. Ведь формуляции разрабатываются и утверждаются для того, чтобы по ним создавались соответствующие компьютерные программы расчетов (см. п. 2, выше по тексту). Промежуточные данные в «живой» формуляции будут крайне полезны при отладке таких программ — нахождении ошибок в них. Но и сами по себе «живые» формуляции могут быть просто источником справочной информации для более сложных технологических расчетов (см. п. 1, выше по тексту).

На рис. 1 показана одна из страниц сайта Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара с информацией о термодинамических свойствах этого вещества.

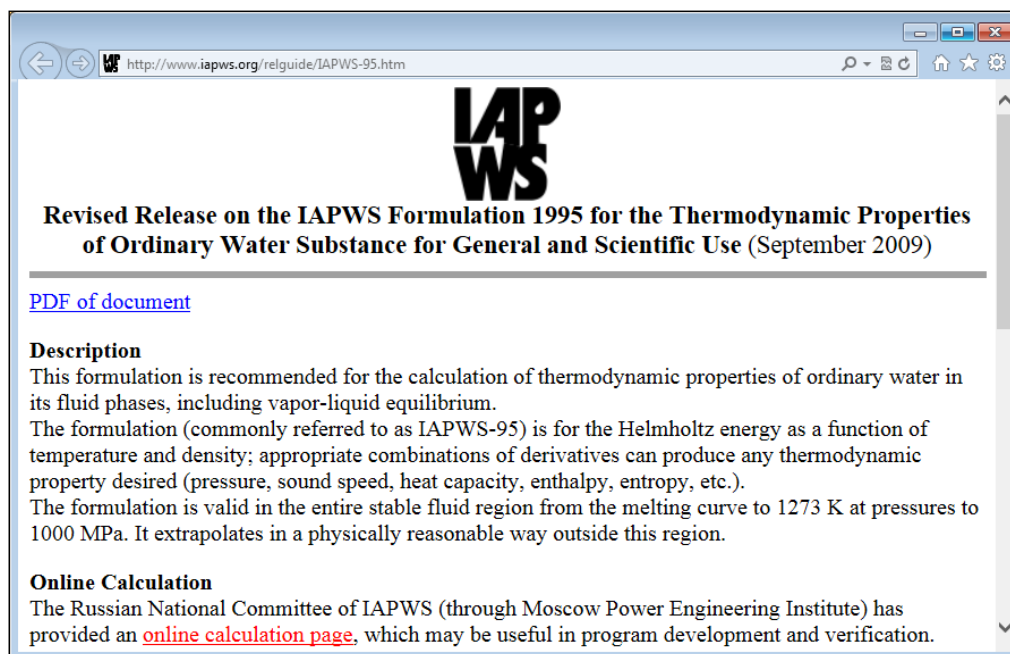


Рисунок 1. Страница сайта Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара

На странице Интернета, показанной на рис. 1, есть две ссылки:

- **PDF of document** — ссылка на «мертвую» формуляцию в виде pdf-файла.
- **Online calculation page** — ссылка на сетевой интерактивный открытый расчетный документ, который показан на рис. 2.

В расчете, показанном на рис. 2, нужно ввести значения температуры и плотности воды или водяного пара. Далее будет создана функциональная зависимость

безразмерной свободной энергии Геймгольца, а по ней через взятия частных производных будут рассчитаны искомые значения термодинамических величин: давление, удельная внутренняя энергия, удельная энтальпия, удельная энтропия, удельная теплоемкость (изобарная и изохорная) и скорость звука.

Formulation [IAPWS-95](#) $T := 500$ K $p := 838.025$ kg/m³ [Recalculate](#)

$T_C := 647.096$ K $\tau := T_C / T = 1.294192$ $\rho_C := 322$ kg/m³ $\delta := p / \rho_C = 2.6025621118012423$

The ideal-gas part of the dimensionless Helmholtz free energy (coefficients [>>>](#)):

$$\phi_0(\delta, \tau) := \ln(\delta) + n_{00} + n_{01} \cdot \tau + n_{02} \cdot \ln(\tau) + \sum_{i=3}^7 \left(n_{0i} \cdot \ln(1 - e^{-\gamma_{0i}\tau}) \right) = 2.047977334795938$$

The residual part of the dimensionless Helmholtz free energy:

$$\phi_r(\delta, \tau) := \sum_{i=0}^6 \left(n_i \cdot \delta^{d_i} \cdot \tau^{t_i} \right) + \sum_{i=7}^{50} \left(n_i \cdot \delta^{d_i} \cdot \tau^{t_i} \cdot e^{-\delta^{q_i}} \right) \dots = -3.4269320568155894$$

$$+ \sum_{i=53}^{55} \left[n_i \cdot \delta^{d_i} \cdot \tau^{t_i} \cdot e^{-\alpha_i(\delta-\varepsilon_i)^2 - \beta_i(\tau-\gamma_i)^2} \right] \dots$$

$$+ \sum_{i=54}^{55} \left[n_i \cdot \left[(1-\tau) + A_i \cdot [(\delta-1)^2]^{2\beta_i} \right] + B_i \cdot [(\delta-1)^2]^{a_i} \right] \delta \cdot e^{-C_i(\delta-1)^2 - D_i(\tau-1)^2} \right]$$

The dimensionless Helmholtz free energy: $\phi(\delta, \tau) := \phi_0(\delta, \tau) + \phi_r(\delta, \tau) = -1.3789547220196514$

$R = 0.46151805$ kJ/(kg K)

[Pressure](#) $p := p \cdot R \cdot T \cdot \left(1 + \delta \cdot \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} \right) = 10.0003858008$ MPa

[Specific internal energy](#) $u := R \cdot T \cdot \tau \cdot \left(\frac{\partial \phi_0(\delta, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \tau} \right) = 965.2483455$ kJ/kg

[Specific entropy](#) $s := R \cdot \left[\tau \cdot \left(\frac{\partial \phi_0(\delta, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \tau} \right) - \phi_0(\delta, \tau) - \phi_r(\delta, \tau) \right] = 2.5669092$ kJ/(kg K)

[Specific enthalpy](#) $h := R \cdot T \cdot \left[1 + \tau \cdot \left(\frac{\partial \phi_0(\delta, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \tau} \right) + \delta \cdot \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} \right] = 977.1816241$ kJ/kg

[Specific isochoric heat capacity](#) $c_v := -R \cdot \tau^2 \cdot \left(\frac{d^2 \phi_0(\delta, \tau)}{d\tau^2} + \frac{d^2 \phi_r(\delta, \tau)}{d\tau^2} \right) = 3.2210622$ kJ/(kg K)

[Specific isobaric heat capacity](#) $c_p := R \cdot \left[\frac{\left(\delta \cdot \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} - \tau \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta \partial \tau} \right)^2}{2\delta \cdot \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} + \delta^2 \cdot \frac{d^2 \phi_r(\delta, \tau)}{d\delta^2}} - \tau^2 \cdot \frac{d^2 \phi_r(\delta, \tau)}{d\tau^2} \right] = 4.60222448$ kJ/(kg K)

[Sound velocity](#) $w := \sqrt{R \cdot T \cdot \left[\frac{\left(\delta \cdot \frac{\partial \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} - \tau \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 \phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta \partial \tau} \right)^2}{\tau^2 \cdot \frac{d^2 \phi_r(\delta, \tau)}{d\tau^2}} \right]} = 1271.284409$ m/s

Рис. 2. Сетевой интерактивный открытый расчет
свойств воды и водяного пара

В документе, показанном на рис. 2, есть ссылки на Интернет-ресурсы, где дано описание сути этих физических величин, а также ссылка на страницу Интернета, где хранятся коэффициенты полинома 56-й степени (!), полученные после обработки экспериментальных данных и по которым через аппроксимацию рассчитывается свободная энергия Геймгольца воды и водяного пара в зависимости от температуры и плотности. На сайте справочника [1] есть ссылки на расчетные документы по свойствам воды и/или водяного пара без показа формул, но с графическим отображением свойств. На рис. 3 в качестве примера показана одна из термодинамических поверхностей воды и водяного пара — зависимость удельной изобарной теплоемкости от давления и температуры.

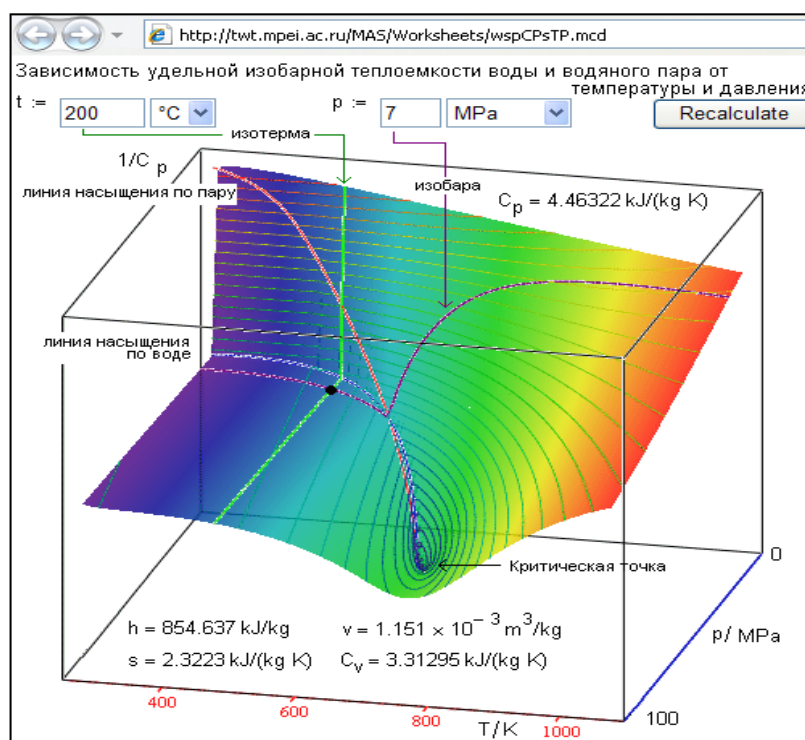


Рисунок 3. «Живая» термодинамическая поверхность воды и водяного пара

Посетитель страницы Интернета, показанной на рис. 3, может изменить значения температуры и/или давления, используя различные единицы измерения, нажать на кнопку Recalculate и получить не только требуемое значение удельной изобарной теплоемкости воды, но и имеет возможность видеть свою точку на поверхности — на пересечении заданных изобары и изотермы.

Современные возможности Интернета и программных средств, установленных на компьютере, позволяют работать не только по технологии Интернет-справки, отображенной на рис. 2 и 3, но и по технологии «облачных» функций.

Так, в среде инженерного офиса Mathcad [1], [3], [7] есть команда **Ссылка** (**Reference** — рис. 4) на Mathcad-документ, расположенный на рабочей станции пользователя, в локальной компьютерной сети или в Интернете.

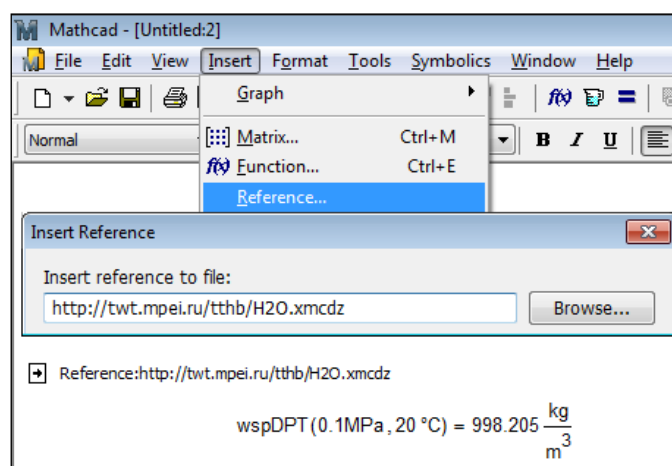


Рисунок 4. Ссылка на облачные функции
по свойствам воды и водяного пара

На рис. 4 показано, что ссылка на Mathcad-документ с именем H2O.xmcdz делает *видимой* в рабочем Mathcad-документе функцию двух аргументов с именем wspDPT, возвращающую плотность воды и/или в зависимости от давления и температуры. В файле H2O.xmcdz хранятся и другие аналогичные функции, позволяющие вести довольно сложные теплотехнические расчеты [6].

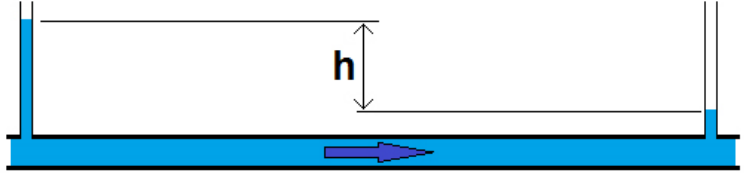
На Интернет-портале НИУ МЭИ и ОИВТ РАН собрано порядка десяти тысяч сетевых расчетов, использующих функции по свойствам различных веществ. Как показано на рис. 4, на эти функции можно делать ссылки из рабочих документов. Так, на рис. 5 в качестве примера показан расчет потери давления при прокачке по трубопроводу водного раствора хлористого натрия.

Расчет, показанный на рис. 5, несложный, базирующийся на использовании довольно простых формул. Главное при проведении такого расчета — это знание свойств прокачиваемой жидкости. В расчете на рис. 5 сделаны ссылки на «облачные» ресурсы, которые делают видимыми в рабочем документе функции, возвращающие плотность и вязкость раствора NaCl. Кроме того, сделана еще одна ссылка, вводящая в расчет формулу, по которой рассчитывается коэффициент трения жидкости в трубе в зависимости от шероховатости внутренней поверхности трубы и условий течения жидкости (числа Рейнольдса).

Ссылка на «облачные» функции — это уникальная возможность Mathcad 15. Другие расчетные программы (Excel, Matlab, языки программирования и др.) такого инструмента пока не имеют. Да и в последней версии Mathcad — в Mathcad Prime этот оператор был заглушен. Это связано с тем, что многие рабочие станции,

особенно те, которые установлены на «режимных» предприятиях, отключены от Интернета по соображениям безопасности и по другим причинам. В связи с этим «облачные» функции, на которые можно делать ссылки из расчета Mathcad 15, дополнены файлами, доступными в расчетах через обычное скачивание. На «режимных» предприятиях это может сделать системный администратор. Он затем проверит скачанный файл на отсутствие вирусов и «троянов» и разместит его в локальной сети в виде шаблона.

Calculation of the pressure loss in a horizontal pipeline, filled with water solution of NaCl



Input data

Inner diameter of the pipe: $d := 20 \text{ mm}$ Pipe length: $L := 150 \text{ m}$

The relative roughness of the inner surface of the pipe: $\Delta := 0.0005$

Temperature of the NaCl solution: $t := -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Flow rate of the NaCl solution: $Q := 30 \frac{\text{liter}}{\text{min}}$

NaCl solution concentration: $\omega := 21\%$

Solution of the problem using references to the "cloud" functions

Cross-section of the pipe: $F := \pi \frac{d^2}{4} = 3.142 \text{ cm}^2$ Speed of the NaCl solution in the pipe: $v := \frac{Q}{F} = 1.59 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Density of the NaCl solution: ☐ Reference: <http://twi.mpei.ru/rbtp/wspDT01MPaNaCl-Water-Solution.xmcdz>

$\rho := \rho_{\text{NaCl}}(t, \omega) = 1140.175 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Dynamic viscosity of the NaCl solution: ☐ Reference: <http://twi.mpei.ru/rbtp/wspViscT01MPaNaCl-Water-Solution.xmcdz>

$\mu := \mu_{\text{NaCl}}(t, \omega) = 5.085 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Kynematic viscosity of the NaCl solution: $\nu := \frac{\mu}{\rho} = 4.46 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Reynolds number: $Re := \frac{v \cdot d}{\nu} = 7137$

Coefficient of friction as a function of the relative roughness Δ and Reynolds number Re

☐ Reference: <http://twi.mpei.ru/GDHB/La-De-Re-formulas.xmcdz>

$\lambda := \lambda_{\text{friction}}(\Delta, Re) = 0.03442$ Head loss: $h := \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 33.34 \text{ m}$

Pressure loss: $\Delta p := \rho \cdot g \cdot h = 3.68 \text{ atm}$

Рисунок 5. Расчет потери давления в трубопроводе с ссылками на облачные функции

На рис. 6 можно видеть сайт Интернета, на котором хранятся термодинамические свойства индивидуальных веществ, которые опубликованы в виде бумажного

справочника и отдельным программным продуктом ИвтанТермо (<http://www.chem.msu.su/rus/handbook/ivtan>).



Рисунок 6. Сайт с термодинамическими свойствами индивидуальных веществ

На сайте, показанном на рис. 6, можно найти:

- таблицу свойств вещества, скопированную из опубликованного бумажного справочника;
- online расчет свойств данного индивидуального вещества с отображением соответствующих графических зависимостей;
- Mathcad 15 файл для ссылки на него (см. выше) или традиционного скачивания;
- файл в формате пакета Mathcad Prime;
- файл в формате пакета Mathcad Express (бесплатная укороченная версия Mathcad Prime);
- файл в формате пакета SMath (русский аналог Mathcad);
- Excel-таблицу с расчетом свойств веществ.

Несколько слов о пакетах Mathcad Prime, Mathcad Express и SMath. Mathcad Prime позиционируется разработчиками — фирмой PTC (www.ptc.com) как дальнейшее развитие популярной программы Mathcad, последняя версия которой имеет 15-й номер. Mathcad Prime адресован в первую очередь тем, кто только начинает работать с этой математической программой и считает традиционный Mathcad 15 несколько архаичным по своему интерфейсу и по другим параметрам. Пользователи же «традиционного» Mathcad 15 сразу же заметили в Mathcad Prime отсутствие многих «старых добрых» инструментов. По этому поводу в Интернете даже возникла бурная дискуссия: «Что мне нужно в первую очередь в новой версии Mathcad из старой версии» — <http://communities.ptc.com/polls/1134>. Но Mathcad Prime имеет свои неоспоримые преимущества по сравнению со старой версией. Это, во-первых,

современный интерфейс, повторяющий интерфейс всех популярных офисных приложений («лента меню» и прочее). Кроме того, в Mathcad Prime существенно повысилась документированность расчетов, степень использования в расчетах единиц измерения физических величин и др.

Mathcad Express — это укороченная версия Mathcad Prime. Будущий пользователь скачивает Mathcad Prime с сайта <http://www.ptc.com/product/mathcad/free-trial>, месяц использует программу в полную силу, а затем она превращается в Mathcad Express. Вернуться к полной версии программы можно, естественно, за деньги. Но и Mathcad Express позволяет вести довольно сложные расчеты. Поэтому-то для него и были разработаны функции (см. рис. 6), не использующие специфические инструменты полной версии Mathcad.

Программа SMath (www.smath.info) создавалась как некий клон Mathcad с его специфическим «маткадовским» интерфейсом, ориентированным на режим WYSIWYG, и маткадовским набором функций и операторов. Но по мере развития программа SMath стала все больше и больше отходить от программы Mathcad и становиться самостоятельным программным продуктом. Основное преимущество программы SMath — ее бесплатность (как у Mathcad Express), мощность и многоязычность (почти как у Mathcad 15).

Инженерно-технические и научные работники, как это не покажется странным, по-прежнему широко используют «бухгалтерские» электронные таблицы в своих вычислениях.

На рис. 7 показан пример Excel-таблицы с расчетом термодинамических свойств индивидуального вещества — газообразного озона. Таблица Excel удобна тем, что в ней расчетные формулы прописаны в текстовом виде (см. строку редактирования формул на рис. 7) и их несложно перенести в различные языки программирования.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Из справочника "Термодинамические свойства индивидуальных веществ" под ред. В.П. Глушко, Л.В. Гурвич, Г.А. Бергман, И.В. Вейц, В.А. Медведев, Г.А. Хачкурузов, В.С. Юнгман										
2	М.: Наука, 1978, Том 1, Книга 2, 327 с., Таблица 8, с. 24										
3											
4	From the directory "Thermodynamic properties of individual substances", ed. V.P. Glushko, L.V. Gurvich, G.A. Bergman, I.V. Weitz, V.A. Medvedev, G.A. Hachkuruzov, V.S. Jungman										
5	Moscow, Nauka Publishing House, 1978, Volume 1, Book 2, 327 pages, Table 8, p. 24										
6											
7	Озон O ₃ (г)	Интервал температур 500 К - 6 000 К									
8	Ozone O ₃ (g)	Temperature range 500 K - 6 000 K									
9											
10	Молярная масса	47,9982	г/моль								
11											
12	Коэффициенты аппроксимации	f0	f	f22	f11	f1	f2	f3			
13		353,2271	42,4371	0,017374	-0,46608	-25,6741	237,302	-183,754			
14											
15	Температура, К	Приведенная энергия Гиббса F°(T)	338,147	Дж/(моль К)							
16	4500	Теплоемкость C _p °(T)	106,889	Дж/(моль К)							
17		Энтропия S°(T)	415,768	Дж/(моль К)							
18		Изменение энтальпии ΔH°(T)	349,237	кДж/моль							

Рисунок 7. Таблица Excel с термодинамическими свойствами индивидуального вещества

Выводы. Размещение функций по свойствам веществ на внешних серверах — это новый этап константной (функциональной) поддержки расчетов на компьютере в динамическом режиме [7]. Эта новейшая технология позволяет непрерывно совершенствовать данные функции без «нагружения» пользователей обязанностью периодического скачивания и установки на компьютерах дополнительных программ и модулей.

Можно также сформулировать новые требования к современным базам данных:

1. Использование единиц измерения физических величин в функциях и процедурах (некий программистский ренессанс).
2. Работа с облачными функциями и шаблонами, а также инструментами их быстрого поиска в Интернете и подключения к прикладным расчетам.
3. Дополнение баз данных примерами их использования в инженерно-технических и научных расчетах.

Эти современные требования к базам данных по свойствам веществ конкретизированы и дополнены примерами в [9].

Литература

- [1] Александров А. А., Орлов К. А., Очков В. Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. — М. : Издательский дом МЭИ, 2009. (Электронный вариант: <http://twf.mpei.ac.ru/rbtp/index.html>).
- [1] Korobov V. I., Ochkov V. F. Chemical Kinetics with Mathcad and Maple.— 1st Edition. — Springer, 2011, XI. (Электронный вариант: <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/New-Chem-Kin/En-Ru-book.html>).
- [2] Коробов В. И., Очков В. Ф. Химические расчеты в среде Mathcad. — Днепропетровск : Из-во Днепропетровского национального ун-та, 2012. (Электронный вариант: http://www.exponenta.ru/educat/news/ochkov/book_ochkov11.asp).
- [3] Коробов В. И., Очков В. Ф. Химическая кинетика: введение с Mathcad/Maple/MCS. — М.: Горячая линия–Телеком, 2009. (Электронный вариант: <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/New-Chem-Kin/En-Ru-book.html>).
- [4] Очков В. Ф. Орлов К. А., Знаменский В. Е. Теплотехнические расчеты с опорой на Интернет-функции по свойствам рабочих веществ теплоэнергетики // Новое в российской электроэнергетике. 2011. № 6. С. 40–49. (Электронный вариант: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Ochkov-Znamensky-Web-Rankine.html>).
- [5] Очков В. Ф. «Облачный» сервис по свойствам рабочих тел и материалов атомной энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2012. № 3. С. 4–8. (Электронный вариант: <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/npp/RefBookNPP.pdf>).
- [6] Очков В. Ф. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет.— СПб. : БХВ-Петербург, 2014. (Электронный вариант: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/ТТМІ>).

- [7] *Pluzhnik E., Nikulchev E.* Use of Dynamical Systems Modeling to Hybrid Cloud Database // *Int'l J. of Communications, Network and System Sciences*, 2013. Vol. 6. No. 12. P. 505–512. (doi:10.4236/ijcns.2013.612054).
- [8] *Solodov A., Ochkov V.* Differential Models. An Introduction with Mathcad.— Springer-Verlag, 2004. (Электронный вариант: http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/Diff_MC/index1.htm).

Авторы:

Очков Валерий Федорович, д.т.н., профессор, первый заместитель заведующего кафедрой технологии воды и топлива НИУ «Московский энергетический институт»;

Чжо Ко Ко, аспирант, НИУ «Московский энергетический институт».

Cloud Function – a New Stage of Informational Support of Science and Technology

V. F. Ochkov, Chzho Ko Ko

National Research University Moscow Power Engineering Institute
14, Krasnokazarmennay street, Moscow, 111250

Abstract. The article describes a new information technology associated with the placement of functions on the properties of materials on the Internet for the «cloud» references to them and / or to download and embed into your software project settlement. Consider a typical example calculations relying on the cloud function.

Key words: cloud function, substance properties, Mathcad, Excel

Reference

- [1] Aleksandrov A. A., Orlov K. A., Ochkov V.F. Teplofizicheskie svoystva rabochih veshhestv teplojenergetiki: Internet-spravochnik. — M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2009. (<http://twi.mpei.ac.ru/rbtpp/index.html>).
- [2] Korobov V. I., Ochkov V. F. Chemical Kinetics with Mathcad and Maple.— 1st Edition. — Springer, 2011, XI. (<http://twi.mpei.ac.ru/TTHB/New-Chem-Kin/En-Ru-book.html>).
- [3] Korobov V. I., Ochkov V. F. Himicheskie raschety v srede Mathcad. — Dnepropetrovsk: Iz-vo Dnepropetrovskogo Nach. Unv, 2012. (http://www.exponenta.ru/educat/news/ochkov/book_ochkov11.asp).
- [4] Korobov V. I., Ochkov V. F. Himicheskaja kinetika: vvedenie s Mathcad/Maple/MCS. — M.: Gorjachaja linija–Telekom, 2009. (<http://twi.mpei.ac.ru/TTHB/New-Chem-Kin/En-Ru-book.html>).
- [5] Ochkov V. F., Orlov K. A., Znamenskij V. E. Teplotehnicheskie raschety s oporoj na Internet-funkcii po svoystvam rabochih veshhestv teplojenergetiki // Novoe v rossijskoj jelektroenergetike. 2011. No 6. P. 40–49. (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/Ochkov-Znamensky-Web-Rankine.html>).
- [6] Ochkov V. F. «Oblachnyj» servis po svoystvam rabochih tel i materialov atomnoj jenergetiki // Avtomatizacija i IT v jenergetike. 2012. No. 3. P. 4–8. (<http://twi.mpei.ac.ru/TTHB/npp/RefBookNPP.pdf>).
- [7] Ochkov V. F. Teplotehnicheskie jetjudy s Excel, Mathcad i Internet.— SPb.: BHV-Peterburg, 2014. (<http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/TTMI>).
- [8] Pluzhnik E., Nikulchev E. Use of Dynamical Systems Modeling to Hybrid Cloud Database // Int'l J. of Communications, Network and System Sciences, 2013. Vol. 6. No. 12. P. 505–512. (doi:10.4236/ijcns.2013.612054).
- [9] Solodov A., Ochkov V. Differential Models. An Introduction with Mathcad.— Springer-Verlag, 2004. (http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/Diff_MC/index1.htm).

УДК 519.71

Продукционный метод описания, анализа и синтеза автоматических регуляторов непрерывно-дискретных систем управления¹

Г. Н. Рогачев

*ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244
e-mail: grogachev@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается продукционный метод описания автоматических регуляторов в гибридных системах цифрового управления непрерывными объектами. Моделью устройства управления служит алгоритм его работы в виде системы продукций как набора правил вида «условие–действие». Демонстрируются преимущества такого подхода в задачах анализа и синтеза гибридных непрерывно-дискретных систем управления.

Ключевые слова. Система продукций, автоматический регулятор, гибридная система, цифровое управление.

ГРНТИ 50.03.03

Введение

Одним из важных направлений современного этапа развития теории управления является исследование гибридных непрерывно-дискретных систем управления (ГНДСУ). В таких системах компоненты с непрерывными сигналами отражают физические законы, технологические или технические принципы, которым подчинено функционирование объектов управления, а дискретные элементы моделируют работу цифровых управляющих устройств. К гибридным относится широкий круг систем управления, охватывающий как традиционные, так и новейшие технологии в самых различных областях техники. Практическая реализация таких технологий с требуемыми качественными показателями невозможна без построения соответствующих алгоритмов автоматического управления, что и явилось главным стимулом к созданию теории и методов управления ГНДСУ.

Задачи управления гибридными системами непосредственно относятся к сформулированной в Программе фундаментальных научных исследований Российской академии наук проблеме создания единой теории управления, вычислений и

¹ К статье прилагаются файлы на web-странице номера.

сетевых связей, разработки методов автоматического синтеза алгоритмов управления с одновременными их верификацией и валидацией на базе технических устройств, самостоятельно генерирующих свое программное обеспечение. На этом пути возникает ряд представляющих самостоятельный теоретический и практический интерес задач по разработке новых способов синтеза оптимальных по принятым критериям эффективности алгоритмов и программ работы цифровых устройств управления для ГНДСУ в условиях учета целого комплекса разнообразных возмущающих воздействий и ресурсных ограничений, характерных для цифровых и сетевых систем управления.

В статье рассматривается один из возможных подходов к указанному кругу задач — применение продукционного метода описания регуляторов в задачах анализа и оптимального синтеза гибридных непрерывно-дискретных систем управления. Метод базируется на математической модели системы цифрового управления непрерывным объектом, динамическая часть которой, моделирующая функционирование объекта управления, описывается дифференциальными уравнениями, а дискретная часть, моделирующая работу устройства управления, — специальным численным алгоритмом его работы в виде системы продукций (набора правил вида «условие–действие»), структура и содержание которой автоматически формируются в процессе поиска оптимальных решений.

1. Продукционный метод описания регуляторов систем автоматического управления

В когнитивной науке, исследующей процессы познания, существует деление знаний на декларативные и императивные [1]. Их различие в том, что декларативные знания — это правила связи, а императивные — это правила преобразования. Знание об объекте декларативно, если оно описывает, каков он, а не как его создать (добыть, получить). Эти знания представляют собой утверждения об объектах, их свойствах и отношениях между ними. По сути дела — это факты из предметной области, фактические знания. Однако знание может быть представлено не только в форме статичных структур — декларативного знания, но и в форме операций (императивное или процедурное знание). Такие знания имеют активную природу. Они определяют представления о средствах и путях как получения новых знаний, так и проверки существующих. Императивные (процедурные) знания описывают правила преобразования объектов предметной области. Это могут быть рецепты, алгоритмы, методики, инструкции, стратегии принятия решений. Примером императивного знания являются системы продукций, т. е. наборы пар типа «условие» — «действие». Если на вход системы продукций попадает одно из «условий», то оно автоматически приводит к соответствующему «действию».

В теории управления традиционно используется один из декларативных способов представления знания об управляющем устройстве. Например, указывается тип регулятора (П, ПИ, ПИД), описывающее его динамику дифференциальное или разностное уравнение, передаточная функция. Для дискретных линейных систем

используют описание с помощью разностных уравнений, z -преобразований, модифицированных z -преобразований. Если регулятор нелинеен, применяют модели в виде нелинейных дифференциальных уравнений, с нелинейностью, заданной аналитически или графически. Императивная форма используется довольно редко, в основном в регуляторах, основанных на логике (булевой или нечеткой). Имеющееся разнообразие способов описания регуляторов порождает множество различных методов их анализа и синтеза, единый подход к решению этого круга задач отсутствует. Конструктивным способом преодоления этой проблемы может стать более широкое использование императивного метода описания регуляторов систем управления. В качестве императивной формы задания регулятора выберем систему продукций, набор правил вида «условие–действие». Условная (если, IF) часть каждого правила — антецедент (antecedens) — определяет, когда регулятор должен использовать данное правило. Вторая часть (то, THEN) — консеквент (consequens) — описывает соответствующее действие.

Императивный подход сводит задачу описания регулятора вне зависимости от его формы к заданию системы продукций как одного или нескольких правил вида «условие–действие». Под условием понимается логическое высказывание. Оно определяет правило перехода регулятора от фазы ожидания к фазе реагирования. В свою очередь, «действие» — правило (алгоритм) вычисления реакции системы управления на стимул и применения (видоизменения) этой реакции в течение следующей фазы ожидания. Такой метод описания регуляторов можно назвать продукционным.

2. Примеры использования продукционного метода в задачах моделирования регуляторов систем автоматического управления

Пример 1. Продукционная модель регулятора цифровой САУ с законами управления: П, ПИ, ПИД.

Пусть в системе управления используется цифровой ПИ-регулятор, имеющий стабильный временной шаг срабатывания Δ . Тогда условие перехода регулятора от фазы ожидания к фазе реагирования имеет вид $[t = t(k-1) + \Delta]$, где t — текущее время, $t(k-1)$ — момент предыдущего $(k-1)$ -го срабатывания. Очередной момент срабатывания регулятора определяется временем (time-based control). Действие регулятора будет заключаться в смене сигнала управления с $u(k-1)$ на

$$u(k) = u(k-1) + a_{1PI}e(k) + a_{2PI}e(k-1),$$

где $u(i)$ и $e(i)$ соответственно управление и ошибка в i -й момент времени, a_{1PI} и a_{2PI} — параметры регулятора. В этом случае система продукции содержит единственную пару «условие–действие» вида

$$\text{«если } [t = t(k-1) + \Delta] \text{ то } u(k) = u(k-1) + a_{1PI}e(k) + a_{2PI}e(k-1)\text{»}.$$

Не меняя условие перехода, а изменив лишь действие, получим П-регулятор, в случае $u(k) = a_p e(k)$ или ПИД-регулятор [6], при

$$u(k) = u(k-1) + a_{1PID}e(k) + a_{2PID}e(k-1) + a_{3PID}e(k-2).$$

Пример 2. Продукционная модель регулятора нелинейной системы управления с гистерезисной характеристикой релейного элемента.

Если используется релейный регулятор с гистерезисной характеристикой, то действие регулятора состоит в изменении управляющего сигнала с $u_{\max}$ на $u_{\min}$ или обратно. Если для описания действия использовать функцию

$$iF(\arg_1, \arg_2, \arg_3) = \begin{cases} \arg_2, & \text{если } \arg_1 < 0, \\ \arg_3, & \text{если } \arg_1 \geq 0, \end{cases}$$

то действие можно выразить соотношением $u = iF(u - u_{\max}, u_{\max}, u_{\min})$. Условие перехода регулятора от фазы ожидания к фазе реагирования задается логическим выражением

$$((y \geq y_+) \text{ AND } (\dot{y} > 0)) \text{ OR } ((y \leq y_-) \text{ AND } (\dot{y} < 0)),$$

где y и $\dot{y}$ — входной сигнал и его производная по времени. Здесь очередной момент срабатывания регулятора определяется уровнем и динамикой изменения сигнала на его входе (*event-based control*). Продукционная форма описания такого релейного регулятора будет содержать пару «условие–действие» вида

«если $((y \geq y_+) \text{ AND } (\dot{y} > 0)) \text{ OR } ((y \leq y_-) \text{ AND } (\dot{y} < 0))$ то $u = iF(u - u_{\max}, u_{\max}, u_{\min})$ ».

Пример 3. Продукционная форма описания оптимальной по быстродействию системы управления объектом второго порядка.

Изменив по сравнению с примером 2 лишь часть «условие», и не меняя часть «действие», получим регулятор оптимальной по быстродействию системы управления объектом второго порядка. Эта система переводит объект в виде двойного интегратора

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = u, \end{cases}$$

из заданного начального состояния

$$\begin{cases} x_1(0) = x_{10}, \\ x_2(0) = x_{20}, \end{cases}$$

за минимальное время

$$J = \int_0^{t_F} 1 \cdot dt \rightarrow \min,$$

в начало координат

$$\begin{cases} x_1(t_F) = 0, \\ x_2(t_F) = 0, \end{cases}$$

при действии ограничения на управляющее воздействие u вида $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$. Известно, что для обеспечения оптимального быстрогодействия момент срабатывания регулятора должен наступить при достижении фазовой траекторией объекта линии переключения вида $x_1 = -x_2 |x_2|/2$, чем и определяется условие перехода [10]. Действие перехода, как и для релейного регулятора с гистерезисной характеристикой, состоит в изменении управляющего сигнала с $u_{\max}$ на $u_{\min}$ или обратно. Следовательно, в первом приближении продукционная форма описания оптимального регулятора имеет вид

$$\text{«если } x_1 = -x_2 |x_2|/2 \text{ то } u = iF(u - u_{\max}, u_{\max}, u_{\min})\text{»}.$$

Пример 4. Продукционная модель нечеткого регулятора.

При использовании нечеткого регулятора с базой правил системы нечеткого вывода вида²:

«если $y = N$ и $\dot{y} = N$ то $u = PB$ », «если $y = N$ и $\dot{y} = Z$ то $u = P$ »,
«если $y = N$ и $\dot{y} = P$ то $u = Z$ », «если $y = Z$ и $\dot{y} = N$ то $u = P$ »,
«если $y = Z$ и $\dot{y} = Z$ то $u = Z$ », «если $y = Z$ и $\dot{y} = P$ то $u = N$ »,
«если $y = P$ и $\dot{y} = N$ то $u = Z$ », «если $y = P$ и $\dot{y} = Z$ то $u = N$ »,
«если $y = P$ и $\dot{y} = P$ то $u = NB$ »,

она и будет служить продукционной формой описания этого регулятора.

Пример 5. Продукционная форма описания системы пространственно-временного управления процессом индукционной пайки.

Рассмотрим систему управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек на базе трехканального КСП³ со встроенными релейными регуляторами [11]. Схематично эта система представлена на рис. 1.

Изделие помещается внутрь индукционного нагревателя, состоящего из индуктора, питающегося от источника переменного тока, и теплоизоляции — футеровки. Температура нагрева контролируется термопарами в трех точках, разнесенных по длине нагреваемого тела (выходные сигналы y_1, y_2, y_3).

Температурное поле на завершающей стадии процесса, когда собственно и происходит пайка, должно достаточно продолжительное время быть равномерным на уровне $y_1, y_2, y_3 \in [y_{\text{зад}} - \varepsilon, y_{\text{зад}} + \varepsilon]$, т. е. отклоняться от заданной температуры $y_{\text{зад}}$ не более чем на ε . Это требование обеспечивают три управляющих воздействия: u_1, u_2, u_3 . Основной канал управления $u_1 \in \{u_{\min}, u_{\max}\}$ — регулируемая двухпозиционным релейным регулятором КСП мощность питающего индуктор источ-

² Сокращения для значений основных термов являются общепринятыми и означают NB — отрицательное большое; N — отрицательное; Z — близкое к нулю; P — положительное; PB — положительное большое.

³ Автоматические показывающие регулирующие и регистрирующие потенциометры типа КСП предназначены для измерения, записи и регулирования (при наличии регулирующего устройства) температуры и других величин, изменения значений которых могут быть преобразованы в изменение напряжения постоянного тока.

ника. Этот канал позволяет воздействовать на среднюю температуру изделия, нагретого до температур, сравнимых с $y_{\text{зад}}$ (средняя температура при этом растет, если $u_1 = u_{\text{max}}$ и снижается, если $u_1 = u_{\text{min}}$), но не в состоянии существенно изменять закон распределения температуры по длине изделия. Для обеспечения требуемой равномерности нагрева индуктор снабжен дополнительными витками. В разомкнутом состоянии ($u_i = 0, i = 2, 3$) витки не оказывают влияния на процесс нагрева. При замыкании витка ($u_i = 1$), в нем наводится противо-ЭДС. Это вызывает локальное снижение мощности нагрева в зоне размещения витка, что способствует выравниванию температуры в нагреваемом изделии.

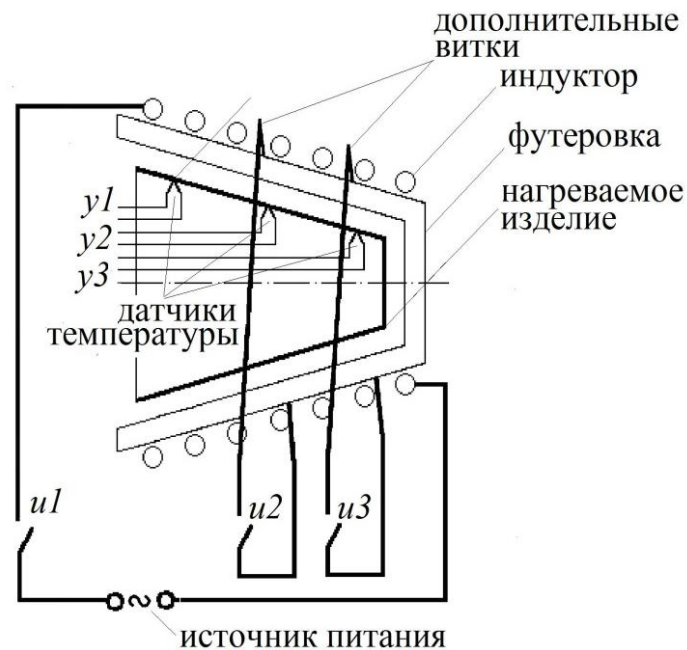


Рисунок 1. Система управления индукционной пайкой тонкостенных оболочек

С учетом разделения во времени работы трех каналов КСП удобнее использовать в продукционном описании этой системы три отдельных правила, каждое из которых действует в соответствующие интервалы времени. Логическое условие выполнения первого правила будет выглядеть следующим образом:

$$(t \in [0, T] + 3nT) \text{AND} ((y_1 < y_{\text{зад}} - \varepsilon) \text{OR} (y_1 > y_{\text{зад}} + \varepsilon)),$$

где T — длительность работы каждого канала, а $n = 0, 1, 2, \dots$.

Для второго и третьего правил эти условия будут иметь соответственно вид:

$$(t \in [T, 2T] + 3nT) \text{AND} (y_2 > y_{\text{зад}} + \varepsilon) \text{ и } (t \in [2T, 3T] + 3nT) \text{AND} (y_3 > y_{\text{зад}} + \varepsilon).$$

Действия регулятора можно описать при помощи функции iF . Действие первого правила

$$u_1 = iF(y_1 - (y_{\text{зад}} - \varepsilon), u_{\text{max}}, 1) \cdot iF(y_1 - (y_{\text{зад}} + \varepsilon), 1, u_{\text{min}}),$$

действие второго правила

$$u_2 = iF(y_2 - (y_{\text{зад}} + \varepsilon), 0, 1),$$

действие третьего правила

$$u_3 = iF(y_3 - (y_{\text{зад}} + \varepsilon), 0, 1).$$

Пример 6. Продукционная форма описания системы пространственно-временного управления.

Как альтернатива предыдущему варианту с сосредоточенным (т. е. зависящим лишь от времени) векторным вариантом управления может быть использована система распределенного управления как функции и времени и пространственной координаты. Приведем продукционное описание регулятора для нескольких представленных на рис. 2 вариантов релейного распределенного управления с кусочно-постоянным вариантом аппроксимации линий переключения. Для чисто временного трехинтервального управления (рис. 2а) логика работы регулятора задается следующей системой продукций:

«если $(t \in [0, t_1]) \text{ OR } (t \in [t_2, T])$ то $u = u_{\text{max}}$ », «если $t \in (t_1, t_2)$ то $u = 0$ ».

В случае чисто пространственного трехинтервального управления (рис. 2б) желаемый режим работы индукционного нагревателя приобретает вид

«если $(x \in [0, x_1]) \text{ OR } (x \in [x_2, X])$ то $u = u_{\text{max}}$ », «если $x \in (x_1, x_2)$ то $u = 0$ ».

При пространственно-временном управлении (рисунок 2в) продукционная форма описания регулятора может быть задана выражениями

«если $(t \in [0, t_1]) \text{ OR } (t \in (t_1, T) \text{ AND } x \in [x_1, X])$ то $u = u_{\text{max}}$ »,

«если $t \in (t_1, T) \text{ AND } x \in [0, x_1]$ то $u = 0$ ».

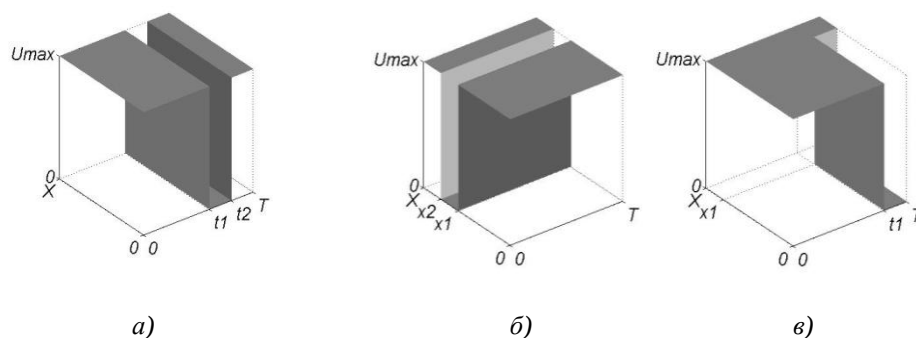


Рисунок 2. Варианты управления при кусочно-постоянной аппроксимации линий переключения распределенного управляющего воздействия

3. Преимущества продукционного метода моделирования регуляторов

Продукционный метод моделирования регуляторов, описывающий регулятор как систему правил вида «условие–действие», потенциально обладает рядом преимуществ по сравнению с альтернативной декларативной формой. Вот лишь некоторые из достоинств продукционного метода описания регуляторов, не полностью используемых в известных автору работах.

Такой подход может быть достаточно универсальным единым методом описания широкого спектра разнообразных регулирующих устройств. Действительно, при разных способах реализации системы управления переход от фазы ожидания к фазе реагирования может выполняться различными способами. «Условие» перехода может включать время (что справедливо для систем с дискретным временем, к которым можно отнести все компьютерные системы управления), состояние (в случае систем с дискретными событиями, релейных и проч.), пространственные координаты (для систем с распределенными управляющими параметрами) или их комбинацию. В качестве инициирующего переход события может выступать сигнал от оператора или другой системы (супервизорного управления, релейной защиты). «Действие» — вычисление управляющего воздействия — может осуществляться по различным алгоритмам, характерным для того или иного закона управления. Таким образом, граница между инвариантными во времени системами и системами с переменными параметрами и структурой, линейными и нелинейными системами, дискретными по уровню и дискретными по времени системами, оптимальными системами и системами стабилизации, присущая декларативному подходу, может быть стерта.

Движение к единой теории управления, вычислений и сетевых связей (Control + Communication + Computation = C³) — важная тенденция, обусловленная запросами практики и осознанная мировым научным сообществом. Частично это единство процессов обработки информации путем осуществления вычислительных процедур, процессов передачи информации посредством сетевых связей и процессов управления может быть отражено в предлагаемой продукционной модели.

Продукционное представление регулятора близко по форме к компьютерной программе на том или ином продукционном языке программирования, т. е. описывает задачу управления как построенную непосредственно на цифровом регуляторе в темпе с управляемым процессом вычислительную процедуру. При исследовании соответствующей модели регулятора будет одновременно подвергаться верификации алгоритм и программа его работы. Распространение такой формы описания будет способствовать открытости кода в области программного обеспечения промышленных регуляторов.

Продукционная форма представления регулятора позволит моделировать наличие различных возмущающих факторов, влияющих на качество работы системы управления. Так, в реальных системах управления передача управляющего воздействия может происходить с меняющимися по случайному закону временными

задержками⁴ и потерей части информации. На входные и выходные сигналы накладывается шумовая составляющая. Эти эффекты, особенно присущие распределенным сетевым системам управления, могут найти отражение в условиях и действиях системы продукции. Аналогично обстоит дело и с учетом эффекта квантования сигналов в системе по времени и по уровню.

С помощью продукционной формы представления может быть легко обеспечена требуемая степень детализации особенностей работы конкретной системы управления не только на программном, но и на аппаратном уровне. Видоизменяя пару «условие–действие», можно описать свойства используемого в САУ вычислительного устройства (его быстродействие, разрядность), особенности функционирования прочих технических средств САУ, таких как датчики, исполнительные устройства, средства передачи данных. При этом любая нестандартная ситуация может быть отображена достаточно точно, без чрезмерных упрощений, иногда принципиально искажающих картину происходящего и приводящих к неверным выводам.

Продукционная форма представления позволит произвести анализ влияния различных факторов на качество работы системы управления. Среди этих факторов можно назвать такие трудно поддающиеся анализу в рамках традиционных подходов, как нестабильность работы аппаратных средств (например, канала связи), нескоординированность внешних воздействий и реакций на них системы. Этот подход позволит применить традиционные методы анализа САУ во временной и частотной области к таким новым объектам, как реализуемые регуляторами вычислительные алгоритмы и компьютерные программы. Существенно, что одновременно с анализом САУ будет производиться анализ программы действий, реализуемой регулятором. Тем самым частично может быть решена проблема выявления содержащихся в программах синтаксических и семантических ошибок, являющихся важнейшей причиной аварийных нарушений и непредвиденных сбоев работы САУ.

Используя предлагаемую математическую модель системы цифрового управления непрерывным объектом, можно будет оценить влияние определяющего характера эффекта квантования сигналов по времени и по уровню на качественные показатели ГНДСУ; влияние и возможности использования в качестве управляющих воздействий целого комплекса сильнодействующих специфических возмущающих факторов, таких, в частности, как случайные временные задержки и частичные потери информации при передаче управляющих воздействий; осуществить учет комплекса шумовых составляющих сигналов в замкнутом контуре системы; оценить существенное (часто определяющее) влияние характеристик и свойств информационных каналов и сетевых связей на формирование управляющих алгоритмов; оценить возможности автоматического формирования и видоизменения в режиме реального времени алгоритмов управления на основе получаемой в процессе функционирования ГНДСУ рабочей информации о поведении системы и вытекаю-

⁴ Для описания явления нестабильности периода квантования в цифровых системах используется специальный термин — джиттер (от англ. jitter — дрожание).

щих отсюда требований к разработке вычислительных процедур, обеспечивающих реализацию этих алгоритмов с требуемой динамикой; осуществить учет ограничений со стороны аппаратных средств.

Наконец, продукционная форма описания позволит унифицировать и упростить задачу синтеза. Процедура синтеза регулятора может быть описана единообразно. Вне зависимости от конкретной задачи определению подлежит количество элементов системы продукции (пар типа «условие–действие») и ее наполнение. Вместо многоступенчатого синтеза, включающего выбор структуры регулятора, определение его параметров, разработку реализующих этот регулятор алгоритма и программного кода, можно будет использовать прямой синтез программы действий регулятора. Процесс синтеза можно организовать с использованием полученных эмпирически или аналитически правил, знаний экспертов. Задача синтеза может быть решена с использованием эволюционных вычислений, в частности, генетических алгоритмов и генетического программирования. При определении в процессе синтеза системы продукции можно заранее задать разрешенный набор составляющих ее компонентов (допустимый тезаурус элементов–«условий» и элементов–«действий»). Простота процедуры синтеза регуляторов и единообразие подходов являются залогом успешного решения задачи, поставленной перед мировым сообществом специалистов в области теории управления в коммюнике «Future Directions in Control in an Information-Rich World» («Будущие направления развития теории управления в информационном обществе») [6]. По мнению составителей коммюнике, в будущем технические системы должны будут самостоятельно генерировать программное обеспечение своих систем управления и при необходимости модернизировать его. Далее они говорят о необходимости создать средства, которые автоматизируют весь процесс проектирования систем управления от постановки задачи до моделирования работы САУ, включая проверку и ратификацию программного обеспечения.

Вычислительные возможности такой модели регулятора достаточно велики. Известно, что система продукции эквивалентна машине Тьюринга, т. е. в ней можно реализовать любую вычислимую функцию. Следовательно, системы продукции представляют собой мощное средство описания достаточно сложных вариантов поведения, что можно использовать при моделировании гибридных, антропоморфных и интеллектуальных систем управления. Тем не менее способ описания регуляторов как системы правил вида «условие–действие» использовался в основном в системах логического управления на базе классической или нечеткой логики. Рассматриваемый подход, который может быть назван также алгоритмическим, выглядит более органичным для регуляторов цифровых САУ, нежели традиционно используемый модельный, предполагающий описание регуляторов в виде дифференциальных или разностных уравнений либо передаточных функций. «В то время как Модель ... обычно используется лишь в качестве формального описания объекта вычислений, Алгоритм является базисом самой организации компьютерного процесса» [6]. Абсолютно доминирующее положение алгоритма «определилось с самого начала эпохи ЭВМ: использовать компьютер означает задать Программу, т. е.

Алгоритм. В подавляющем большинстве случаев указание машине, ЧТО за проблема решается, не имеет смысла, поскольку для ее работы необходимо определение того, КАК это выполнить» [8]. Продукционная форма описания если и не должна полностью заменить традиционную, декларативную или модельную форму, то, по крайней мере, может сосуществовать с ней.

Кроме того, очевидна связь предлагаемого подхода с тем, что используется в системах, основанных на знаниях. В [3] констатируется, что на современном этапе наиболее адекватными компонентами систем управления для реализации высокоинтеллектуальных функций являются системы, основанные на «знаниях» (СОЗ, Knowledge-Based Systems). «В общем случае СОЗ оперируют с более широкой информацией — логическими, объектно-ориентированными и другими моделями, основанными на знаниях экспертов. Вместе с тем СОЗ могут использовать и традиционные алгоритмы, базирующиеся, например, на уравнениях динамики. Поэтому ... класс решаемых задач принципиально расширяется по сравнению с традиционной проблематикой теории управления» [3]. К системам, основанные на «знаниях» относят системы, основанные на правилах (Rule-Based Reasoning). Примером таких систем являются системы продукционных правил (типа «если выполняются условия, то делай»). Нечеткие правила, формулируемые в удобных для человека качественных терминах, обычно также имеют семантику «условие–действие» и поэтому являются частным случаем продукционных правил. Однако, несмотря на очевидные достоинства, до настоящего времени потенциал продукционного метода описания регуляторов в виде системы правил вида «условие–действие» использовался не в полной мере. Причинами недостаточно широкого распространения этого подхода являются возникающие при этом проблемы.

Необходимы разработка и теоретическое обоснование продукционного (базирующегося на математической модели системы цифрового управления непрерывным объектом, динамическая часть которой, моделирующая функционирование объекта управления, описывается дифференциальными уравнениями, а дискретная часть, моделирующая работу устройства управления, — специальным численным алгоритмом его работы в виде системы продукций, структура и содержание которой автоматически формируются в процессе поиска оптимальных решений) метода описания регуляторов в задачах анализа и оптимального синтеза систем управления гибридными системами. Требуется разработка имитационной модели ГНДСУ с продукционной формой представления алгоритма функционирования цифрового регулятора. Необходимы построение и исследование методов, вычислительных алгоритмов и программных средств анализа влияния на качество работы ГНДСУ возмущающих факторов и эффектов квантования сигналов по времени и по уровню. За счет этого необходимо обеспечить учет принципиальных особенностей, обусловленных цифровым характером устройств управления и сетевым способом обмена информацией между ними. Актуальна задача разработки методов решения нового класса задач структурного и параметрического синтеза систем управления, отличающихся существенным расширением ресурсов алгоритма управления путем

формирования структуры и содержания продукционных правил функционирования регулятора в процессе поиска оптимальных решений.

4. Анализ ЦСАУ в условиях ограничений со стороны аппаратных средств и неустойчивости работы канала связи

Продукционная форма является чрезвычайно наглядной и удобной в вычислительном плане. Средством компьютерных экспериментов с ГНДСУ с продукционной формой задания регулятора может служить Stateflow® — надстройка над графической средой программирования Simulink® математического пакета MATLAB®. Продукционная форма описания регуляторов позволит осуществлять методом имитационного моделирования в MATLAB–Simulink–Stateflow анализ поведения систем управления, как во временной, так и в частотной области.

Иллюстрацией этого могут служить численные эксперименты с продукционной моделью ПД-регулятора в условиях неустойчивого шага квантования. Пусть δ_k — случайная вариация k -го шага квантования лежит в диапазоне $\delta_k \in [-0.1h; 0.1h]$. Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{1000}{s(s+1)},$$

передаточная функция регулятора

$$W_{\text{рег}}(z) = K \left(1 + \frac{T_d}{h} \frac{z-1}{z} \right),$$

где $K = 1.5$, $T_d = 0.035$, $h = 0.0025$ с, что соответствует продукционной форме описания регулятора

$$\text{«если } [t = kh + \delta_k] \text{ то } u(k) = a_{1PD}e(k) - a_{2PD}e(k-1)\text{»},$$

с изменяемой случайным образом в процессе моделирования частью «если» (антецедентом). Параметры системы продукции

$$a_{1PD} = K \cdot T_d / h + K = 27.7500, \quad a_{2PD} = K \cdot T_d / h = 26.2500$$

(постановка задачи заимствована из [5]). Имитационная модель системы представлена на рис. 3, 4.

В условиях, когда система работает преимущественно в переходных режимах, качество ее работы может оцениваться по критерию интегральной квадратичной ошибки (критерий ИКО):

$$J = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt.$$

Другим важным показателем качества является время регулирования $T_{\text{рег}}$.

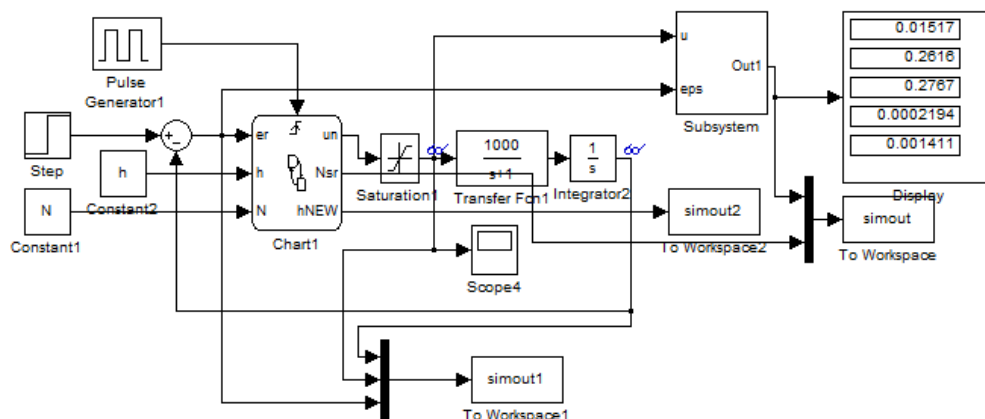


Рисунок 3. Simulink модель САУ с продукционной моделью ПД-регулятора

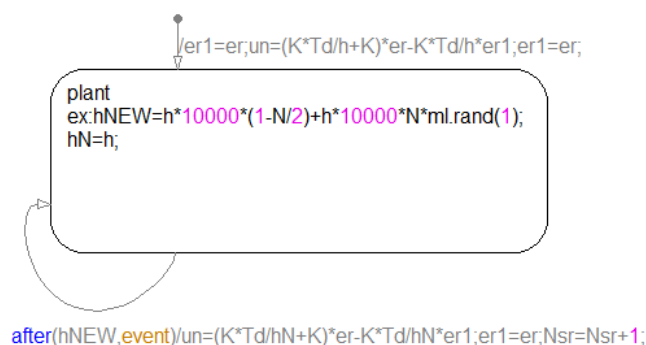


Рисунок 4. Stateflow модель ПД-регулятора с нестабильным шагом квантования

Выборка из 1000 модельных экспериментов с имитационной моделью, результаты которых в виде графиков переходных процессов и гистограмм представлены на рис. 5–8, дала следующие результаты. Имеет место преобладание экспериментов, в которых качество работы системы близко к тому, что демонстрирует система со стабильным шагом (т. е. $J = 0.0152$, $t_{\text{кон}} = 0.1289$ с), математическое ожидание равно 0.0158.

Однако значительная часть экспериментов (приблизительно 33%) дала существенное (до 6%) улучшение качества работы системы по критерию ИКО. Причем часть из них дали улучшение и в показателе качества $T_{\text{рег}}$ (таких было 13%). Число срабатываний регулятора за интервал времени 0.2 с при постоянном шаге квантования равно 81, при нестабильном шаге квантования число срабатываний было в диапазоне 81–85.

Анализ временных диаграмм работы регулятора (рис. 9) позволил установить причину бимодальности представленной на рис. 7 гистограммы качества работы ПД-регулятора с нестабильным шагом квантования (критерий — ИКО).

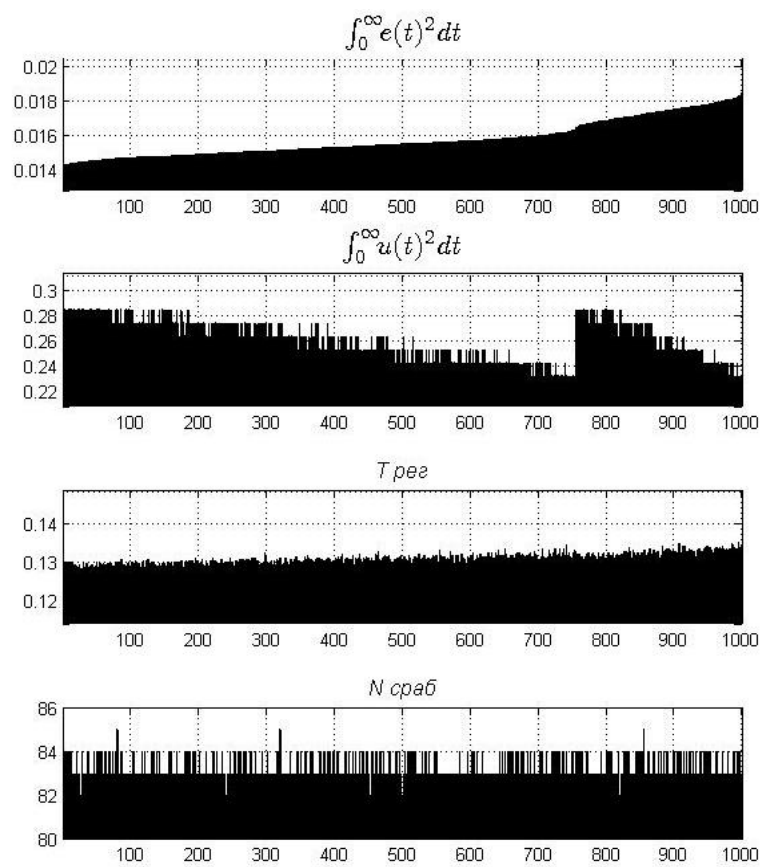


Рисунок 5. Качество работы САУ с ПД-регулятором при нестабильном шаге квантования

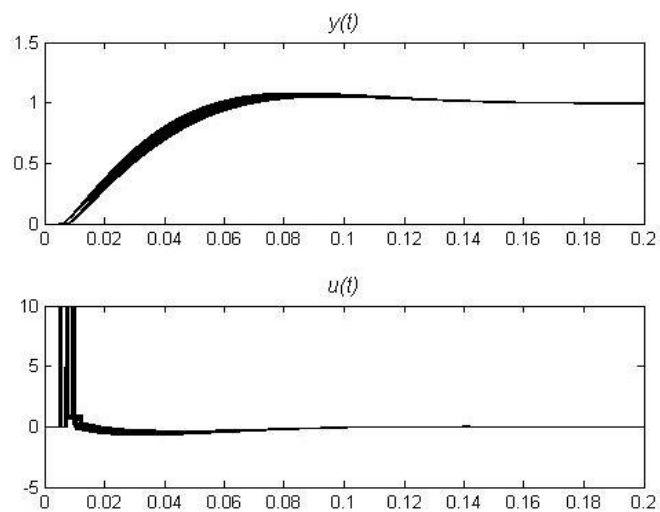


Рисунок 6. Переходные процессы в САУ с ПД-регулятором при нестабильном шаге квантования

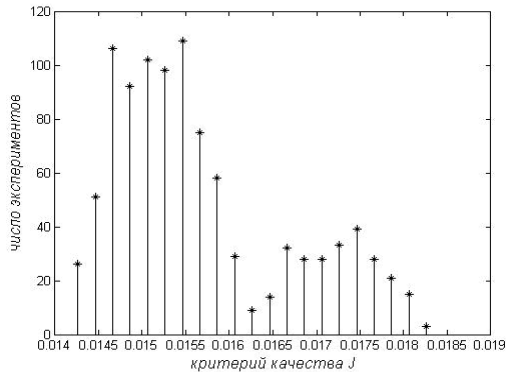


Рисунок 7. Качество работы
ПД-регулятора с нестабильным шагом
квантования (критерий — ИКО)

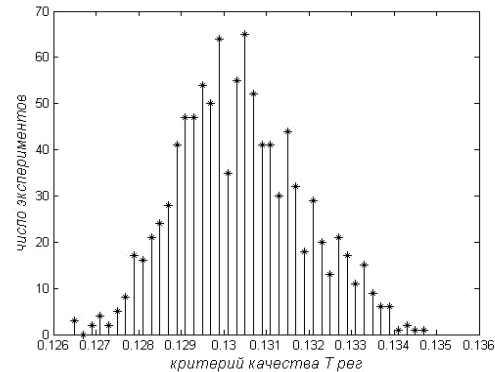


Рисунок 8. Качество работы
ПД-регулятора с нестабильным шагом
квантования (критерий — время
регулирования $t_{\text{кон}}$)

В худших вариантах сигнал задания приходит сразу после очередного момента срабатывания регулятора, т. е. сигнал ошибки держится на максимальном уровне в течение одного такта работы регулятора и «обработка» ошибки начинается только при наступлении следующего момента срабатывания регулятора. В лучших случаях сигнал задания приходит непосредственно перед очередным моментом срабатывания регулятора, т. е. сигнал ошибки начинает обрабатываться практически мгновенно. Синхронизация работы регулятора с моментами значительного изменения сигнала задания позволит избежать появления худших вариантов. Этот результат является еще одним доводом в пользу тезиса работы [1] о преимуществах основанных на событиях стратегий управления, по сравнению с основанными на времени стратегиями.

Были проведены исследования этой же системы для случая потери $N\%$ информации ($N = 12.5\%$), условие перехода при этом записывается так:

$$[(t = kh) \text{ AND } (r_k \geq N / 100)],$$

где r_k — значение равномерно распределенной в диапазоне $[0,1]$ случайной величины. Stateflow-нотация продукционной модели регулятора приведена на рис. 10. Выборка из 1000 модельных экспериментов, результаты которых в виде графиков переходных процессов и гистограмм представлены на рис. 11–13, дала следующие результаты: имеет место преобладание экспериментов, в которых качество работы системы близко к тому, что демонстрирует система со стабильным шагом (т. е. $J = 0.0152$, $t_{\text{кон}} = 0.1289$ с). Меньшая по сравнению с предыдущим случаем часть экспериментов (приблизительно 9%) дала улучшение качества работы системы по критерию ИКО в сравнении с системой со стабильным шагом. Однако предельное улучшение достигало 19%. Наблюдалось значительно большее количество случаев улучшения в показателе качества $T_{\text{рег}}$ (таких было 37%), по этому показателю каче-

ства улучшение было почти двукратным. Число срабатываний регулятора за время 0.2 с было в диапазоне 70–88.



Рисунок 9. Временные диаграммы работы регулятора: а — худший вариант; б — лучший вариант

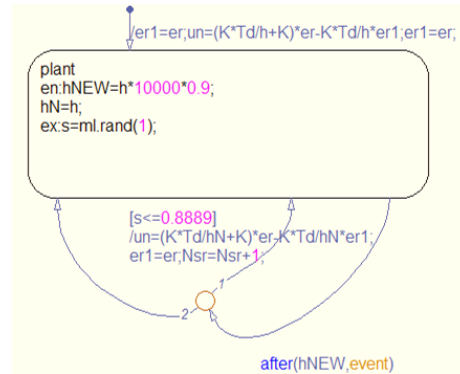


Рисунок 10. Stateflow модель ПД-регулятора, случай потери части информации

Другой эффект, выявленный в результате проведенных расчетов — наличие значительного числа экспериментов, в которых качество работы системы при нестабильном шаге квантования превосходило качество, демонстрируемое системой с постоянным шагом. Наличие этого свойства систем с изменяющимся шагом квантования позволяет сделать вывод о правомочности постановки задачи оптимального выбора последовательности моментов срабатывания регулятора при аритмичности его работы [2].

Simulink-модели исследуемых систем — файлы **JitterNo1.mdl** и **JitterNo2.mdl**. М-файлы — сценарии запуска процесса моделирования и построения гистограмм — файлы **jitter.m** и **plot_graph.m**.

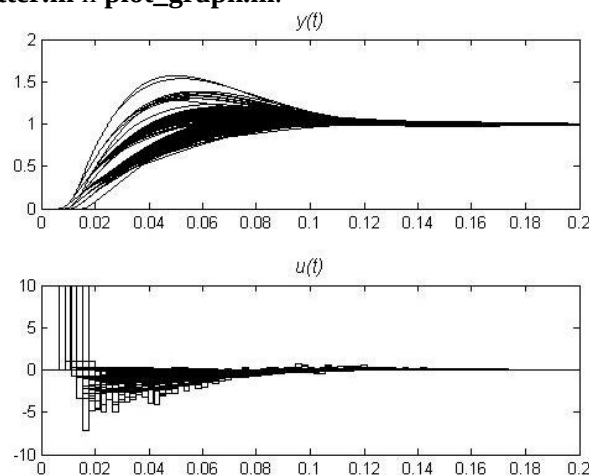


Рисунок 11. Переходные процессы в САУ с ПД-регулятором, случай потери части информации

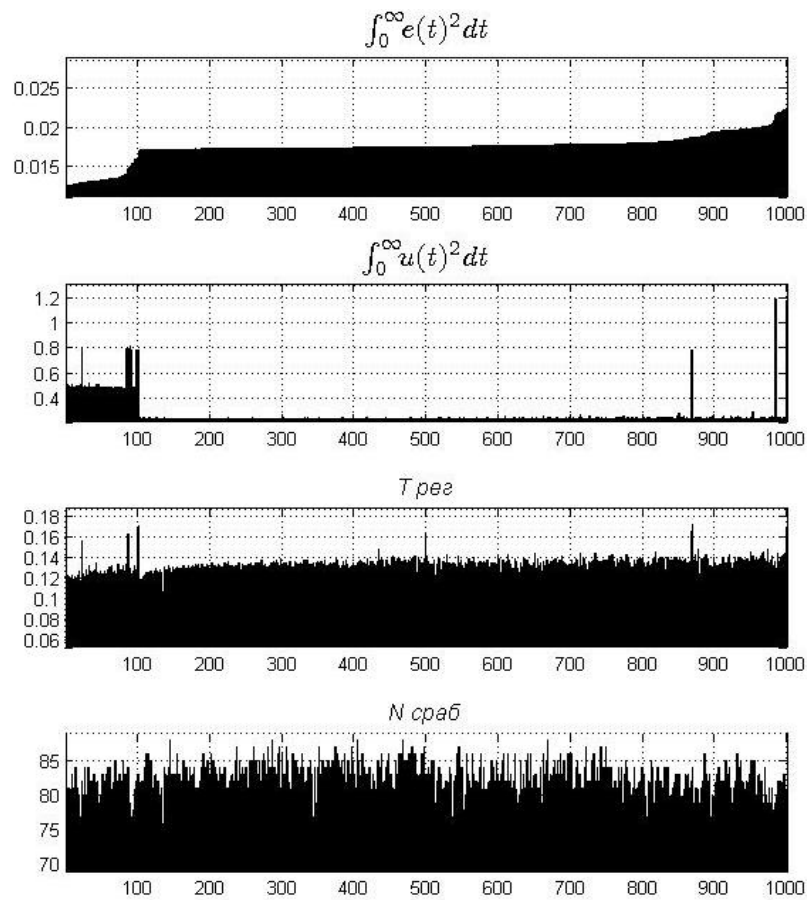


Рисунок 12. Качество работы САУ с ПД-регулятором, случай потери части информации

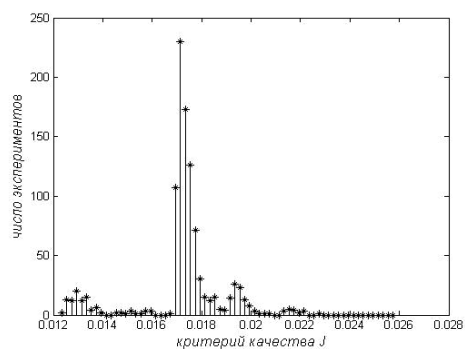


Рисунок 13. Качество работы ПД-регулятора, случай потери части информации (критерий — ИКО)

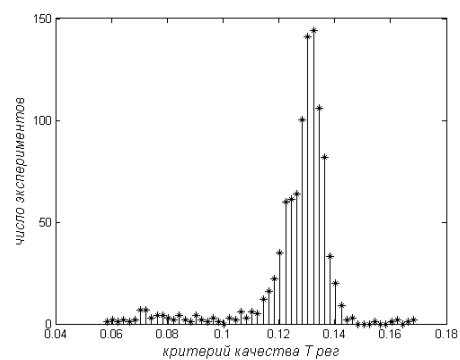


Рисунок 14. Качество работы ПД-регулятора, случай потери части информации (критерий — время регулирования $t_{кон}$)

5. Анализ и верификация алгоритма работы цифрового оптимального по быстродействию регулятора

В разделе 1 (Пример 3) рассмотрена оптимальная по быстродействию система управления объектом второго порядка типа «двойной интегратор». Сформирована система продукций как продукционная форма описания оптимального по быстродействию регулятора. На рис. 15 представлена гибридно-автоматная модель оптимальной по быстродействию системы. Предположим, что рассмотренный в примере 3 алгоритм реализован при помощи цифрового регулятора. Такие регуляторы отличается дискретный по времени характер работы. Организуем в Stateflow виртуальное вычислительное устройство и проанализируем качество работы гибридной системы, состоящей из непрерывного объекта управления и цифрового регулятора, осуществляя имитационное моделирование ее поведения.

График переходного процесса при

$$\begin{cases} x_{10} = 3, \\ x_{20} = 2, \end{cases}$$

показан на рис. 16. Из него видно, что предложенный в примере 3 алгоритм приводит к неверной работе системы управления. Причина — в некорректно сформулированном условии перехода как требовании выполнения равенства $x_1 = -x_2 |x_2|/2$.

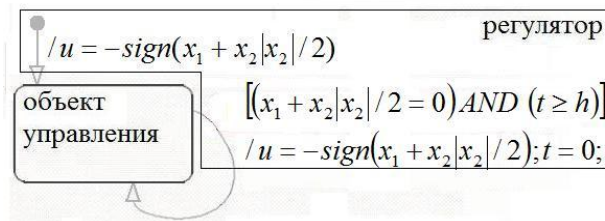


Рисунок 15. Гибридно-автоматная модель оптимальной системы

Дальнейший анализ показывает, что уменьшение шага квантования регулятора по времени не решает этой проблемы. Как следует из рис. 17, выполнение равенства $x_1 = -x_2 |x_2|/2$ не обеспечивается при любом шаге срабатываний регулятора $h \geq 0.001$ с.

Поскольку предложенный в примере 3, алгоритм несостоятелен, произведем его доработку. Изменим в системе продукций требование равенства $x_1 = -x_2 |x_2|/2$ на требование нестрогого неравенства вида $x_1 \leq -x_2 |x_2|/2 + e$, или, что эквивалентно, $x_1 + x_2 |x_2|/2 \leq e$, где e — некоторая малая величина. На рис. 18 представлена гибридно-автоматная модель оптимальной по быстродействию системы с уточненным вариантом алгоритма работы регулятора. График переходного процесса в этой системе представлен на рис. 19. В этом случае первое срабатывание регу-

лятора происходит в непосредственной близости от линии переключения. Однако после достижения объектом управления малой окрестности заданной точки фазового пространства начинаются высокочастотные колебания, что нежелательно.

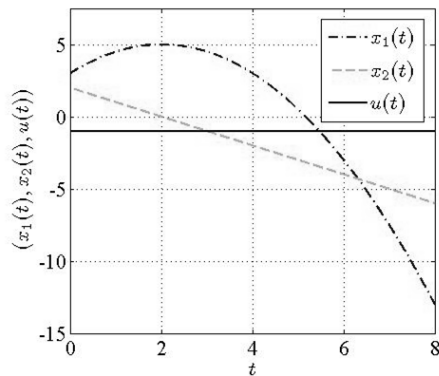


Рисунок 16. График переходного процесса в оптимальной по быстродействию системе с регулятором, реализующим алгоритм из раздела 1

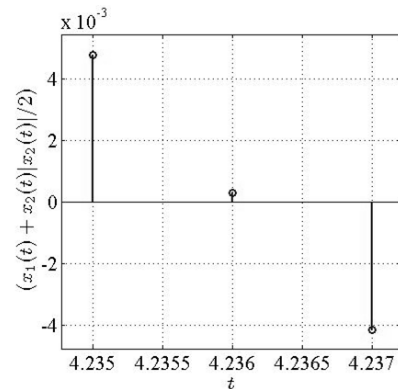


Рисунок 17. График изменения значения $x_1 + x_2 |x_2|/2$ в оптимальной по быстродействию системе при шаге срабатываний регулятора $h = 0.001$ с

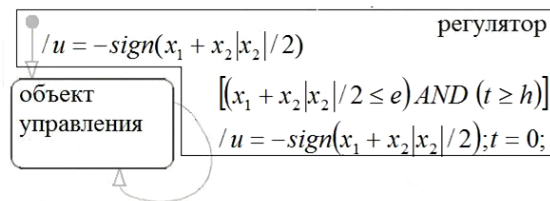


Рисунок 18. Гибридно-автоматная модель оптимальной системы с уточненным вариантом алгоритма работы регулятора

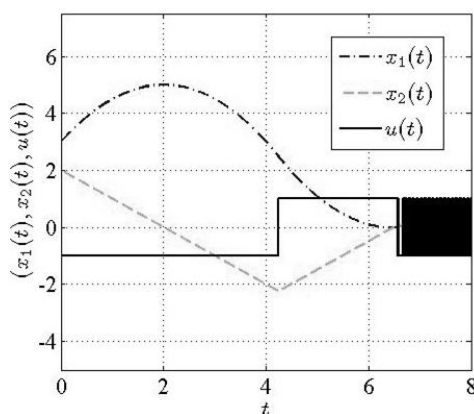


Рисунок 19. Переходный процесс в оптимальной по быстродействию системе с уточненным вариантом алгоритма работы регулятора, $e = 0.01$, $h = 0.001$ с

Доработаем алгоритм, дополнив систему продукций вторым правилом вида «если $x_1^2 + x_2^2 < \varepsilon$ то $u = -k(x_1 + x_2)$ ». Это обеспечит переключение закона управления с релейного на непрерывный вблизи заданной точки фазового пространства. На рис. 20 представлена гибридно-автоматная модель оптимальной по быстродействию системы с окончательным вариантом алгоритма работы регулятора.

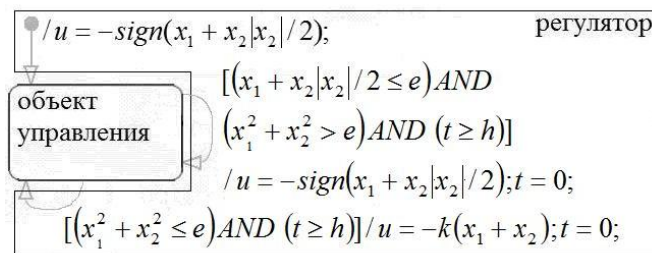


Рисунок 20. Окончательный вариант гибридно-автоматной модели оптимальной системы

Состоятельность этого варианта алгоритма работы регулятора в предположении достаточно высокой точности осуществляемых цифровым регулятором вычислений иллюстрируется представленным на рис. 21 графиком переходного процесса.

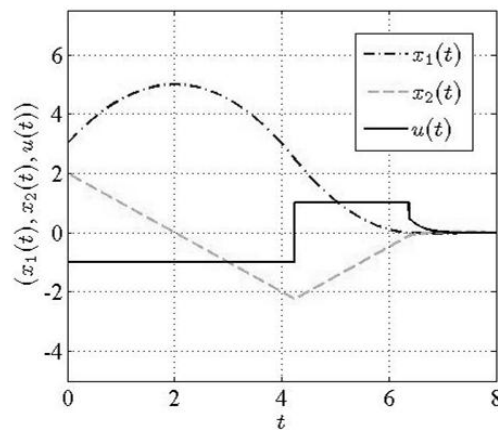


Рисунок 21. График переходного процесса в оптимальной по быстродействию системе с окончательным вариантом алгоритма работы регулятора

На рис. 22 представлена Simulink-модель оптимальной ЦСАУ с двойным интегратором. Блок «controller» Simulink-модели оптимальной ЦСАУ — это продукционная Stateflow-модель регулятора (рис. 23).

Другим ограничением при проектировании цифровых систем управления является конечная длина машинного слова [9]. Этот эффект известен как квантование по уровню, его влияние на качество работы системы также может быть учтено в

продукционной модели регулятора. Проанализируем, например, качество работы гибридной системы, состоящей из непрерывного объекта управления и рассмотренного ранее оптимального по быстродействию регулятора. Пусть формат представления чисел в регуляторе — с фиксированной точкой, причем R — длина дробной части числа. Stateflow-модель такого регулятора представлена на рис. 24.

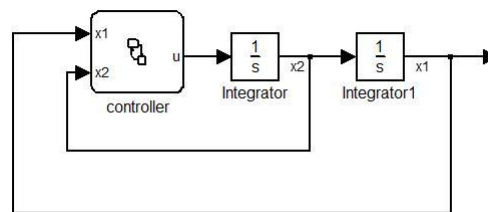


Рисунок 22. Simulink-модель оптимальной ЦСАУ с двойным интегратором

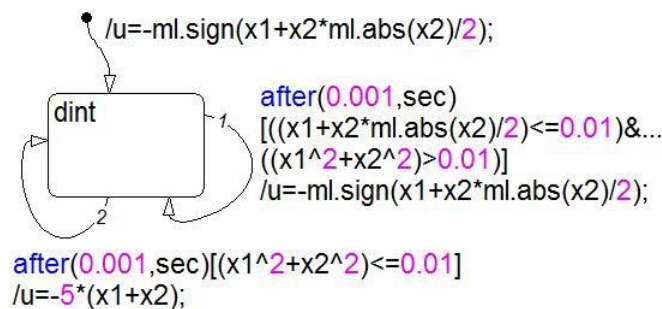


Рисунок 23. Stateflow-модель оптимального по быстродействию регулятора

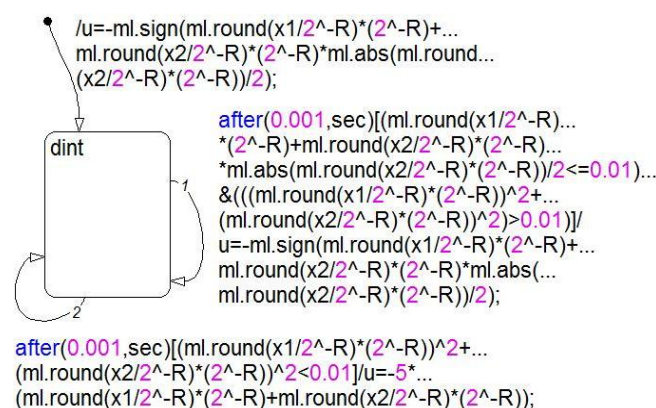


Рисунок 24. Stateflow-модель оптимального по быстродействию регулятора. Формат представления чисел — с фиксированной точкой; R — длина дробной части числа

На рис. 25, 26 представлены графики переходных процессов в оптимальной по быстродействию системе при использовании в регуляторе формата с фиксированной точкой.

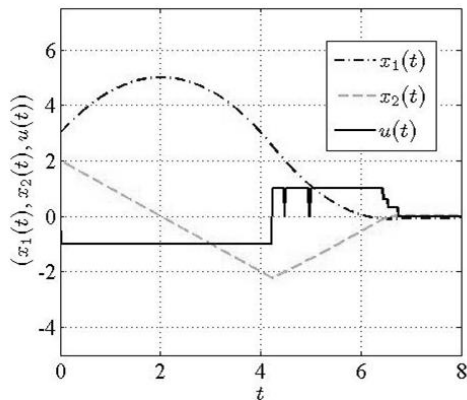


Рисунок 25. Переходный процесс в оптимальной по быстродействию системе при использовании в регуляторе формата с фиксированной точкой, $R = 4$

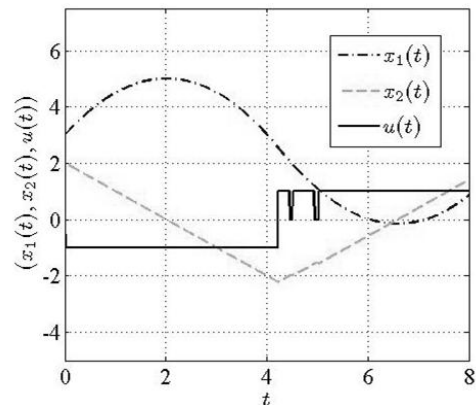


Рисунок 26. Переходный процесс в оптимальной по быстродействию системе при использовании в регуляторе формата с фиксированной точкой, $R = 3$

При длине дробной части числа $R = 4$ переходный процесс немногим отличается от представленного на рис. 21 переходного процесса в системе, регулятор которой использует формат с плавающей точкой. Однако при длине дробной части числа $R = 3$ (рис. 26) переходный процесс — расходящийся. В этом случае алгоритма работы регулятора становится несостоятельным и нуждается в дальнейшей доработке.

Simulink модели исследуемых систем — файл **DINT_MIN_TIME.mdl**.

Заключение

Рассмотрены методы, вычислительные алгоритмы и программные средства, позволяющие обеспечить анализ влияния на качество работы ГНДСУ возмущающих факторов и эффектов квантования сигналов по времени и по уровню, учет ресурсных ограничений, характерных для цифровых и сетевых систем управления, производить верификацию и валидацию алгоритма и программы работы цифрового регулятора.

В следующей статье будут рассмотрены продукционные методы синтеза автоматических регуляторов технических систем управления, базирующиеся на совместном использовании достаточных условий оптимальности и процедуры конечномерной оптимизации, результаты распространения предлагаемых методов оптимизации ГНДСУ на ряд актуальных задач оптимального управления непрерывными и непрерывно-дискретными, линейными и нелинейными технологическими про-

цессами. Будут рассмотрены интеллектуальные методы синтеза продукционных моделей автоматических регуляторов с использованием генетического алгоритма и генетического программирования, синтез системы правил работы регулятора в задачах управления с нечеткими целями и ограничениями.

Литература

- [1] *Arzen K.-E.* A Simple Event-based PID Controller // 14th World Congress of IFAC. 1999. Vol. 18. P. 423–428.
- [2] *Astrom K. J., Bernhardsson B. M.* Comparison of Riemann and Lebesgue sampling for first order stochastic systems // Proceedings of 41st IEEE Conference on Decision and Control. 2002. P. 2011–2016.
- [3] *Васильев С. Н.* От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению. Ч. 1 // Известия РАН. Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 5–22.
- [4] *Величковский Б. М.* Когнитивная наука: Основы психологии познания. В 2-х т. Т. 1. — М.: Смысл: Издательский центр Академия, 2006.
- [5] *Cervin A., Lincoln B.* Jitterbug 1.21. Reference Manual. — Dept. of Automatic Control, Lund University, 2006.
- [6] *Денисенко В. В.* ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 4. С. 86–97.
- [7] *Murray R. M., Åstrom K. J., Boyd S. P., Brockett R. G., Stein G.* Future Directions in Control in an Information-Rich // IEEE Control Systems Magazine. 2003. Vol. 23. No. 2. P. 20–33. (doi: 10.1109/MCS.2003.1188769).
- [8] *Нариньяни А. С.* Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии // Информационные технологии. 1997. № 4. С. 11–16.
- [9] *Острем, К., Виттенмарк Б.* Системы управления с ЭВМ.— М.: Мир, 1987.
- [10] *Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В.* Математическая теория оптимальных процессов.— М.: Наука, 1969.
- [11] *Рогачев Г. Н.* А.с. 1791965 СССР Индукционная нагревательная установка периодического действия / Г. Н. Рогачев.— № 4909970, заявл. 12.02.1991; опубл. 30.01.1993; Бюл. № 4.

Автор: Геннадий Николаевич Рогачев, к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах» Самарского государственного технического университета.

Production method of description, analysis and synthesis of automatic regulators of discrete-continuous control systems

Gennady N. Rogachev
Samara Technical University
244, Molodogvardeiskaya street, Samara, 443100

Abstract. The following article is centred around production method of describing digital automatic controllers for continuous objects in hybrid control systems. The controller algorithm is modeled in the form of production system as a set of rules «condition–action». Practical advantages of the proposed approach are demonstrated in tasks of analysis.

Keywords. Production system, automatic control, hybrid system, digital control

Reference

- [1] Arzen K.-E. A Simple Event-based PID Controller // 14th World Congress of IFAC. 1999. Vol. 18. P. 423–428.
- [2] Åström K. J., Bernhardsson B. M. Comparison of Riemann and Lebesgue sampling for first order stochastic systems // Proceedings of 41st IEEE Conference on Decision and Control. 2002. P. 2011–2016.
- [3] Vasilev S.N. Ot klassicheskikh zadach regulirovanija k intellektnomu upravleniju. Ch. 1 // Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija 2001. № 1. С. 5–22.
- [4] Belichkovskij B. M. Kognitivnaja nauka: Osnovy psihologii poznanija. Vol. 1.— М.: Smysl: Izdatel'skij centr Akademija, .2006.
- [5] Cervin A., Lincoln B. Jitterbug 1.21. Reference Manual. — Dept. of Automatic Control, Lund University, 2006.
- [6] Denisenko V. V. PID-reguljatory: voprosy realizacii // Sovremennye tehnologii avtomatizacii. 2007. № 4. С. 86–97.
- [7] Murray R. M., Åström K. J., Boyd S. P., Brockett R. G., Stein G. Future Directions in Control in an Information-Rich // IEEE Control Systems Magazine. 2003. Vol. 23. No. 2. P. 20-33. (doi: 10.1109/MCS.2003.1188769).
- [8] Narinjani A. S. Model' ili algoritm: novaja paradigma informacionnoj tehnologii // Informacionnye tehnologii. 1997. № 4. С. 11–16.
- [9] Ostrem, K., Vittenmark B. Sistemy upravlenija s EVM. — М.: Mir, 1987.
- [10] Pontrjagin L. S., Boltjanskij V. G., Gamkrelidze R. V. Matematicheskaja teorija optimal'nyh processov.— М.: Nauka, 1969.
- [11] Rogachev G. N. Patent 1791965. SSSR. Indukcionnaja nagrevatel'naja ustanovka periodicheskogo dejstvija / № 4909970, Publ. 30.01.1993.

УДК 004.89

Extended Task Representation Model in Personal Task Managers and New Methods of Task Processing for User Advanced Interaction Organization

V. V. Belov, M. V. Naumovich
Ryazan state radio engineering university
59/1, Gagarin St., Ryazan, Russia, 390005
e-mail: vvbeloff@yandex.ru, freddy.interpub@mail.ru

Abstract. On the basis of analysis of modern planners, their main drawbacks and ways to overcome them were identified. The notion of event with an uncertain timings is defined and algorithms of the dynamic planning with regard to events of this kind are proposed. K-diagram ontology of task managers with elements of artificial intelligence is submitted.

Key words: algorithm, data, event, planning, uncertainty, ontology.

ГРПТИ 28.23.01

In modern world people are always forced to handle large amount of diverse information. And then make decisions and schedule their time based on it. Task preplanning helps to increase efficiency in any sphere of activity as personal or professional one. Today the most popular tool of personal planning is task manager software that have replaced their paper analogues [7].

Based on made modern task managers analysis [4] it identifies its main disadvantages and methods of how to fix it.

Mainly electronic organizers deals with tasks that has start time only. In table 1 it shows task classification depends on its time conditions.

Table 1. Task time conditions classification

Kind	Task start time	Task end time
I	+	-
II	+	+
III	-	-

Mainly modern task managers can operate with kind I tasks. Such kind of tasks support is completely made in any task manager today. Graphic model of kind I tasks is shown at figure 1. Examples of such kind of events may be a phone call or eating.

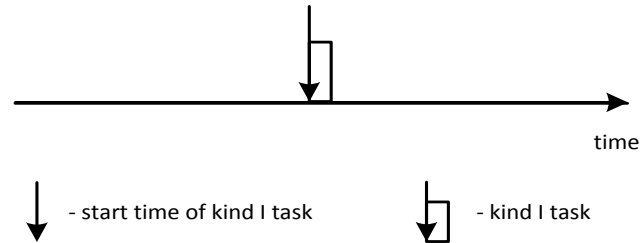


Figure 1. Graphic model of kind I tasks

Kind II tasks indirectly determine the duration Δt_i of time period during one task is made. This assumes that $\Delta t_i \leq t_{\text{fin}} - t_{\text{start}}$, where t_{start} — task planned start time; t_{fin} — time not later one task should be finished. Such kind of tasks widely available in modern task managers but it can't be handled because of lack of methods for its processing. So only few task managers allows user to use kind II tasks. Graphic model of kind II tasks is shown at fig. 2. Examples of such kind of events may be book reading or article writing.

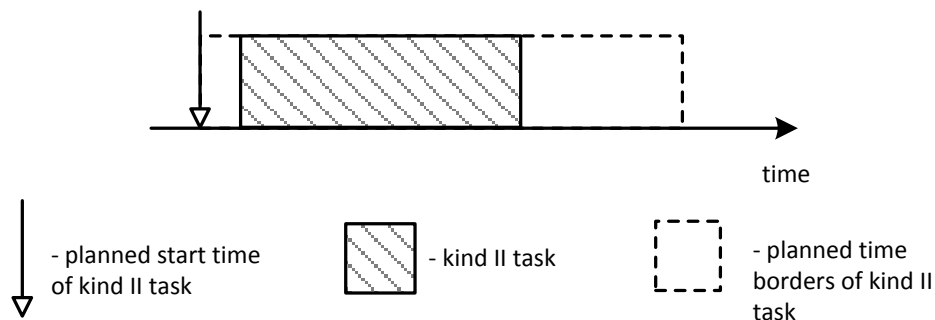


Figure 2. Graphic model of kind II tasks

Kind III task have no defined time borders. Normally all task managers have ability to represent it but no one can remind user about it because there is no basis for making notify. There is no task start time. In case of time borders lack the determining factor becomes situation context. It's task location, task category and task priority as well. Based on this data it can be defined time borders for such kind of task automatically during making user schedule. Graphic model of kind III tasks is shown at figure 3. Examples of such kind of events may be one of lamp's light bulb replacement or noncritical car fixing.

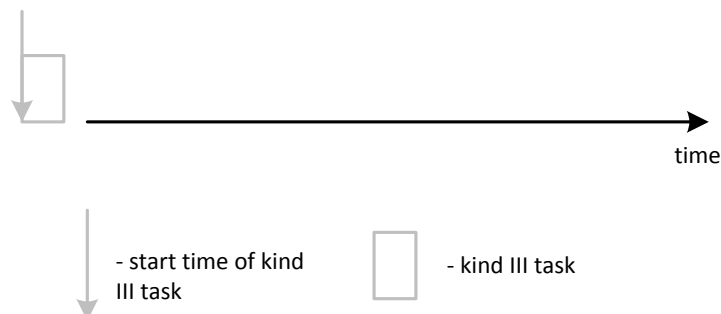


Figure 3. Graphic model of kind III tasks

It should be noticed that there is a case when task requires only end time defining. That kind of tasks can be described as kind II tasks there task start time is current time moment.

Location property often is very important in task definition. However only few modern task managers somehow support location representation by interacting with user. This process requires to be automatic that allows to make completely new notify system. Today we have everything that is required for making user continuous location tracking. All needed data can be collected from widespread GPS and GLONASS modules or local location tracking gears that use ultrasound and infrared radiation.

In most modern task managers task linking implemented very erratically or simplified. Meanwhile this feature requires well-organized data structure and convenient representation at user interface. E.g. it may be graph — a network with priority relations. Ordered set of works allows to make automatic planning of optimal schedule for end user.

Normally modern task managers have two task classes: task itself and to-do item there each class has its own properties. To improve task representation it should be reorganized all task classes in one unified class. It may improve and simplify schedule making process as well.

First step for implementing of proposed ideas is to make knowledge representation system for task manager with artificial intelligent elements.

Comparing research work of different knowledge representation models was done [6], [2]. Specialization of data representation in personal scheduling is simple enough to refuse of using neural networks [9] and frame-based models [8] in it. Changing task properties with time makes doubtfully to use fuzzy logic [5]. Thereby it was decided to take ontology model for data representation [5]. It has one of the most efficient model structures for our specialization and can be easily implemented as software as well. K-diagram of designed ontology is shown at fig. 4.

Most important things of defined representation becomes classes «Location», «Time», «User», «Task» and «History». To improve interaction efficiency between user and task manager task location coordinates should be used as one of major parameter automatic making of user schedule. Logically user should have location properties as well.

Thereby user location relatively to forward task locations gives task manager additional important information. To represent all described task kinds time condition class has 3 slots: start time, time duration and end time. To collect data about current situation context and to plans kind III tasks task manager uses history of completed tasks. In conclusion of ontology special features describing it should be noticed about low prevalence of embedded task representation in modern personal planning software. This is serious disadvantage because splitting one big task to chain of linked small tasks may increase the convenience of making scheduled tasks [1], [3]. Thereby it offers to use dependent on each other tasks scheme based on the nesting.

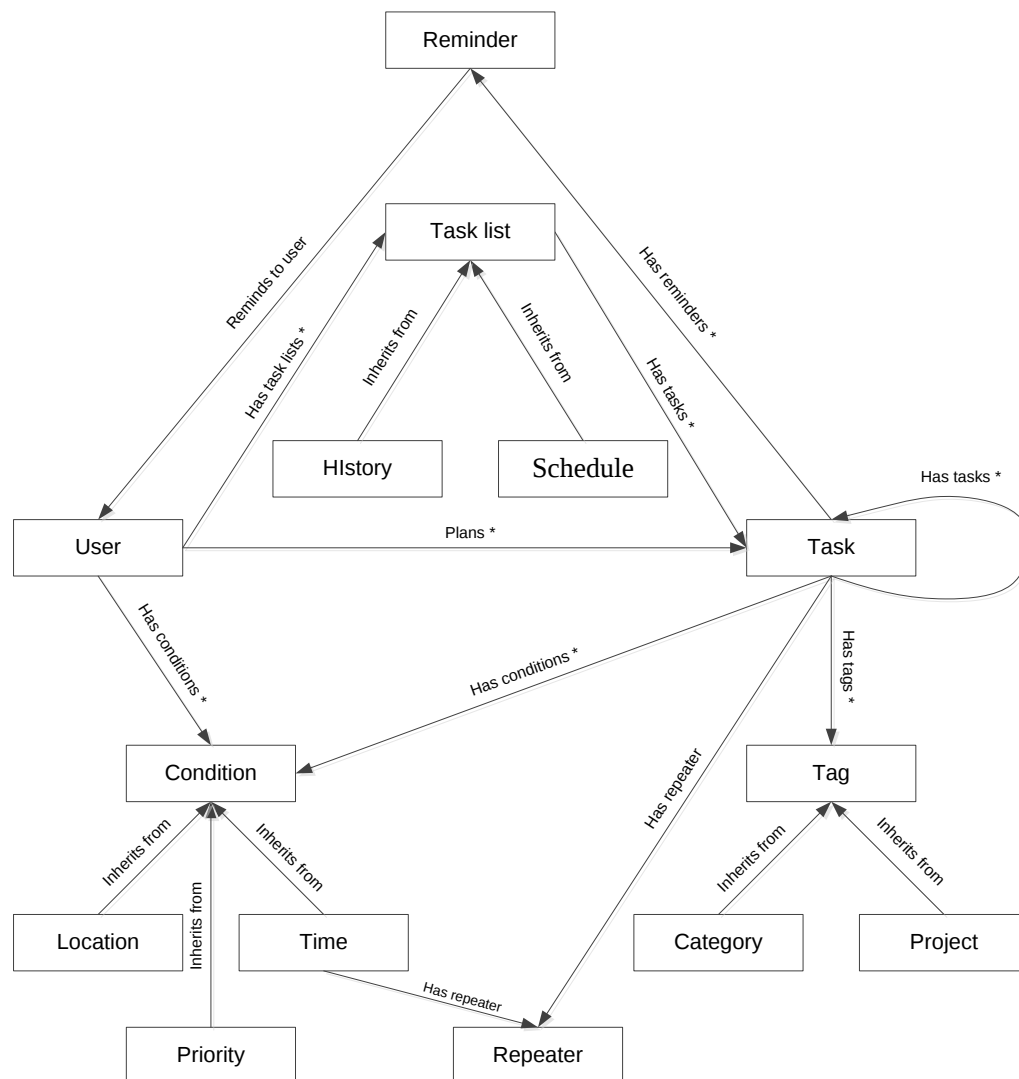


Figure 4. Ontology K-diagram of task manager with artificial intelligent elements.

The next step is to make planning algorithms for creating user schedule. The most simple and importance at same time becomes handling of kind I tasks because they are solid and defined by time borders. Thereby that kind of events originally included in user schedule so task manager no needs to calculate notify time, controls task breakdown and resolves conflicts itself. Only user can directly change task I time properties. The most important parameter in this case becomes current time that task manager compares with kind I task time properties. Such kind of algorithms already was well implemented and used in all modern task managers and allows to successfully operate with kind I task.

The singularity of kind II task is that its duration can be less than planned time borders. Because of that this task category has twofold characteristics. From the one hand user defines task time borders. And from the other hand task manager should controls task execution part by part. The strategy of kind II task planning bases on tracking how many time left before task end time. In the beginning task manager send task start notify to user as in kind I task case. When user interrupts (but not ends) task execution (e. g. for resting or executing other task) task manager notifies user at certain time intervals about to back to current kind II task. User can interrupt and back again to kind II task several times. When task duration time left will be equal to residual between task end time and current time task manager will notify user about it and then will ask about changing task end time. Because of kind II task can divided to several parts that overlap with kind I tasks is allowed during scheduling.

Kind III tasks are most problematic category today. Because modern task managers have no methods to handle it.

Task manager should make decision of including to schedule kind III tasks itself based on situation context:

- free space in schedule — space between end time of previous task and start time of next one kind I or II task. If task location is defined then time needed to reach it shouldn't exceed free schedule space plus time needed to arrive in next kind I or II task;
- location (s) — if user define task location then in other equal conditions the task with lower location distance should be included into schedule;
- category (c) — based on completed tasks history task manager should make decision of user preferences. That is task of what category user more prefers to make in current time period. Of cause preference for including in schedule should be given to task with most similar categories;
- priority (p) — in spite of time borders lack user can specifically define importance level for task. In other equal conditions It should give preference to task with most higher priority.

To calculate quantitative indicator of most suitable task for current situation the special index of suitability was invented. To calculate this index each context task parameter (except time) should be normalized and multiplied by user coefficient of importance:

$$I_i = k_s \frac{s_i}{s_{\max}} + k_c \frac{c_i}{c_{\max}} + k_p \frac{p_i}{p_{\max}},$$

There s_i — current task distance; $s_{\max}$ — maximum distance among all viewing tasks; c_i — current task counter of matches current task's tags with tags of previously completed in same time tasks; $c_{\max}$ — maximum of tag match counter among all viewing tasks; p_i — current task priority; $p_{\max}$ — maximum priority among all viewing tasks; k_s — coefficient of importance for task distance; k_c — coefficient of importance for tag match counter of task; k_p — coefficient of importance for task priority.

The algorithm of choosing most suitable task for plan including can be described in follow words. At first step free time space is calculated and based on that kind II tasks is selected by index described above. If task has no defined location it is included in list. Then index of suitability calculates for each task of selected ones. And if task has no location then normalized value becomes one and if task has no categories or priority then normalized value becomes zero. Onward tasks are ordered by descending index and user notifies about task with greatest index.

Kind III tasks can fill almost all unplanned time space in user schedule. Thereby using such kind of tasks we have maximized amount of time that will be spend for task executing. Undoubtedly it improves user working efficiency, increases amount of completed tasks and decreases user idle time. After all it saves user from necessity to carefully design task schedule every day and to dynamically correct it during execution.

Thereby described ontology of knowledge representation and methods of making user schedule for task manager with artificial intelligence have all features that need to fix disadvantages of modern organizers. Based on new ontology and planning methods new data structures, algorithms and logical rules can be done to bring artificial intelligence behavior to scheduling software. A well it definitely makes task manager capabilities closer to human secretaries. Therefore it increases user convenience of planning.

References

- [1] *Allen D.* Getting things done: The art of stress-free productivity.— Penguin books, 2001.
- [2] *Alty J. L., Coombs M. J.* Expert systems: concepts and examples.— Manchester : NCC Publications, 1984.
- [3] *Arhangelskiy G. A.* Taim-draiv: kak uspevat jit I rabotat [Time-drive: how to have time to live and to work].— SPb : Piter, 2008. (rus).
- [4] *Belov V. V., Naumovich M. V.* Problemy realizacii funkcionalnosti sobitij v programmnyh sredstvah individualnogo planirovaniya [Implementation problems of task functionality in personal task managing software]. Vestnik RGRTU (RSREU herald). 2011. No. 36. P. 43–51. (rus).
- [5] *Dubrovina A. D.* Intellectualnie informacionnye sistemi [Intelligent information systems].— M : MGUKI, 2008. V.1. (rus)

- [6] <http://www.aiportal.ru> // Portal iskusstvennogo intellekta [Artificial intelligence portal]. Available (rus).
- [7] Mobilnye planirovshiki [Portable task managers] // Chip. 2009. No. 11. P. 122–125 (rus).
- [8] *Waterman. D. A.* A guide to expert systems.— MA Reading, Addison-Wesley, 1986.
- [9] *Wuds W. A.* Important issues in knowledge representation // Proceedings of the IEEE. 1986. Vol. 74. No. 10. P. 32–47. (doi: 10.1109/PROC.1986.13634)

Авторы:

Владимир Викторович Белов, д. т. н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета.

Михаил Владимирович Наумович, аспирант кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета.

Модель расширенного представления событий в персональном планировщике и новые методы их обработки для организации интеллектуального взаимодействия с пользователем

В.В. Белов, М. В. Наумович

*Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1*

Аннотация. На основе анализа современных планировщиков выявлены их основные недостатки и определены пути их устранения. Определено понятие события с неопределенными временными характеристиками, предложены алгоритмы динамического планирования с учетом событий такого рода. Предложена К-диаграмма онтологии планировщика с элементами искусственного интеллекта.

Ключевые слова: алгоритм, данные, событие, планирование, неопределенность, онтология.

Литература

- [1] *Allen D.* Getting things done: The art of stress-free productivity.— Penguin books, 2001.
- [2] *Alty J. L., Coombs M. J.* Expert systems: concepts and examples.— Manchester: NCC Publications, 1984.
- [3] *Архангельский Г. А.* Тайм-драйв: как успевать жить и работать. — СПб.: Питер, 2008.
- [4] *Белов В. В., Наумович М. В.* Проблемы реализации функциональности событий в программных средствах индивидуального планирования // Вестник РГРТУ. 2011. Вып. 36. С. 43–51.
- [5] *Дубровин А.* Интеллектуальные информационные системы: учеб. пособие / Науч. ред. О. В. Шлыкова. Ч.1.— М.: МГУКИ, 2008.
- [6] <http://www.aiportal.ru> // Портал искусственного интеллекта.
- [7] Мобильные планировщики // *Chip* 2009. № 11. С. 122–125.
- [8] *Waterman. D.A.* A guide to expert systems.— MA Reading, Addison-Wesley, 1986.
- [9] *Wuds W. A.* Important issues in knowledge representation // Proceedings of the IEEE. 1986. Vol. 74. No. 10. P. 32–47. (doi: 10.1109/PROC.1986.13634)

УДК 004.942

Особенности прогнозирования в условиях структурной неопределенности исследуемых объектов

Е. С. Кузнецов

ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева
603950, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
e-mail: yegor_s@rambler.ru

Аннотация Рассмотрены особенности новой методики и алгоритмов прогнозирования, основанных на определении оптимальных базовых параметров процессов, оптимально дискретизированных по уровню и времени во временные ряды. Показано, что информационные системы прогнозирования, разработанные на основе этой методики, позволяют эффективно прогнозировать различные процессы.

Ключевые слова: модель исходных данных, оптимальная дискретизация данных, оптимальные базовые параметры данных, прогнозирующие операторы, прогнозирование, прогнозируемость.

ГРНТИ 28.29.00; 28.17.19

1. Введение

Развитие прогностики как науки в последние десятилетия привело к созданию множества методов, процедур, приемов прогнозирования. По оценкам зарубежных и отечественных систематиков прогностики [1], насчитывается свыше ста методов прогнозирования, в связи с чем перед исследователями возникает задача выбора метода, который давал бы адекватные прогнозы для изучаемых систем и связанных с ними процессов.

Опыт показывает, что собственную оценку сложности реализации конкретного метода можно выполнить, если иметь четкое математическое описание — математическую модель (ММ) конкретного метода, выраженную, например, в лингвистической форме в виде прогнозирующего оператора (ПО):

$$f(\{y_i\}; \{p_j\}) \rightarrow \{y_{sf}\}, \quad (1)$$

где $\{y_i\}$, $i \in [1, M]$ — исходный ряд данных длины M ; $\{p_j\}$, $p_j \in [p_1, \dots, p_n]$ — подбираемые параметры или оптимизируемые по выбранному критерию оптимальности; $\{y_{sf}\}$, $sf \in [1, 2, \dots, L]$ — прогнозируемые выборки ряда; f — прогнозирующий оператор, характеризующий каждый из известных методов.

В практических исследованиях в качестве модели ПО, в основном, используются следующие функции f : линейная (ARMA, ARIMA) [2], квадратичная, степенная, показательная, экспоненциальная (экспоненциального сглаживания), логистическая. При этом не все процессы удается прогнозировать такими моделями, хотя в ряде случаев их удается заменять линейной комбинацией гармонических или иных функций.

Выбор метода прогнозирования обычно определяется использованием априорной информации о процессе и об объекте, который его породил.

В последнее время набирают популярность методы прогнозирования, ориентированные на обучение по прецедентам (относящиеся к разделу машинного обучения) или индуктивное обучение, основанные на выявлении общих закономерностей по частным эмпирическим данным. В этом случае, если линейная модель регрессии представляется необоснованной и предложить адекватную нелинейную модель $f(\{y_i\}; \{p_j\}) \rightarrow \{y_{sf}\}$ также не удается, в качестве компромисса строится модель вида

$$f(\{y_i\}; \{p_j\}) = \sum_{j=1}^n \varphi_j f_j(\{y_i\}), \quad (2)$$

где φ_j — некоторые преобразования исходных признаков, в общем случае нелинейные. Задача состоит в том, чтобы подобрать неизвестные одномерные преобразования φ_j , при которых достигается минимум квадратичного функционала ошибок [3]. Поэтому чаще используются такие модели ПО, сложность идентификации параметров которых не сильно зависит от вида их нелинейностей.

Одной из главных задач в моделях прогнозирования является нахождение порядка n ПО, который определяется преимущественно числом ее параметров [2] $\{p_j\}$, $p_j \in [p_1, p_2, \dots, p_n]$ и определяет точность прогноза.

Заметим, что на практике иногда требуется прогнозировать непрерывные (аналоговые) процессы конечной длительности T . Во многих таких случаях частота дискретизации исходного сигнала f_d при дальнейших расчетах не меняется, что не соответствует строгой теореме В. А. Котельникова [9], [11]. Чаще она выбирается из соображений практики кратной секунде, минуте, часу и т. д., что свидетельствует о возможной потере необходимой информации в исходных данных уже на стадии дискретизации сигнала. Выбор f_d по Котельникову осложняется еще и тем, что не всегда просто указать верхнюю частоту f_d . В нашем случае, как увидим далее, модель ПО настраивается на оптимальную $f_d = 1 / \Delta t$, учитывающую минимум потерь исходной информации.

2. Метод прогнозирования на основе оптимальных базовых параметров

В известных, наиболее популярных методах определение (подбор) порядка модели и значений других параметров ПО, влияющих на точность прогнозирования модели, осуществляется независимыми между собой способами (только для n или только для Δt).

Поэтому нами выбрана такая модель ПО, при которой ее параметры были бы согласованы между собой и находились (идентифицировались) по единому критерию специально введенных оптимальных базовых параметров (ОБП) [4], [5], [6].

Модель основана на предварительной дискретизации исходных векторных процессов продолжительности T одновременно по времени, с периодом $\Delta t = T / M$, и по значению в q -уровневые временные ряды исходной длины M :

$$y = \begin{Bmatrix} y_0^1, ..., y_{n-1}^1, ..., y_{l-n+1}^1, ..., y_l^1, ..., y_{k-n+1}^1, ..., y_k^1, ..., y_{M-1}^1 \\ \\ y_0^r, ..., y_{n-1}^r, ..., y_{l-n+1}^r, ..., y_l^r, ..., y_{k-n+1}^r, ..., y_k^r, ..., y_{M-1}^r \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

имеющие ограничения по диапазону изменения параметров ММ — y_i и продолжительности:

$$-\infty < y_{\min}^v \leq y_i^v(k) \leq y_{\max}^v < \infty, \quad k \in [0, M-1], \quad v \in [1, r], \quad (4)$$

где r — количество компонент векторного процесса.

Определение значений ОБП заключается в нахождении такой «тройки» $\{\Delta t_{\text{опт}}, q_{\text{опт}}, n_{\text{опт}}\}$ или «пары» БП $\{q_{\text{опт}}, n_{\text{опт}}\}$ (если есть доверие к дискретизации исходных данных и $\Delta t_{\text{опт}} = \Delta t$), при которой энтропия (3) по БП временного ряда $\{y_k^v\}$ будет минимальна:

$$E_{v;\min} = \min(\log_2 N(\Delta t, q, n; y_k^v)) = \log_2 N_{v;\min} = n_{v;\text{opt}} \cdot \log_2 q_{v;\text{opt}}, \quad (5)$$

где

$$q \in [q_{\min}, q_{\max}], n \in [n_{\min}, n_{\max}], N_{v;\min} = q_{v;\text{opt}}^{n_{y;\text{opt}}} \quad (6)$$

При этом ПО на основе локализованных ОБП $\{\Delta t_{\text{opt}}, q_{\text{opt}}, n_{\text{opt}}\}$ представим в виде:

$$f(\{y_i^r\}, \{\Delta t_{\text{opt}}, q_{\text{opt}}, n_{\text{opt}}\}) \longrightarrow \{y_{sf}^r\}. \quad (7)$$

Если изначально дан дискретный процесс с фиксированным шагом Δt , то для прогнозирования определяются только q_{opt} и n_{opt} . Если же изначально имеется выборка из непрерывного процесса с неоптимальным и требующим уточнения шагом Δt , то по имеющимся M отсчетам сигнал методом сплайнов восстанавливается в «непрерывный». Затем образуются новые наборы выборок процессов с разными шагами дискретизации в интервале $T/M_{\text{max}} \leq \Delta t \leq T/M_{\text{min}}$, где T — длитель-

ность исходного процесса. Тот набор из упомянутых наборов БП будет иметь число компонент $M_{\text{opt}} = T / \Delta t_{\text{opt}}$, на котором параметры q, n дают среди всех наборов выборок процессов наименьшее значение энтропии (3). Так определяется вся тройка ОБП $\{\Delta t_{\text{opt}}, q_{\text{opt}}, n_{\text{opt}}\}$.

3. Построение прогнозирующего оператора при $k < M$

Предлагаемый метод прогнозирования, используя только динамические параметры исходных данных, позволяет построить по ряду (2) ПО для любого $k = n, n+1, \dots, M-1$ в виде q -значной логической функции с ОБП — $\{\Delta t, q, n\}$:

$$\begin{aligned} (y_{k+1}^1, \dots, y_{k+1}^r)^T = \\ = f\left((y_{k-n+1}^1, \dots, y_{k-n+1}^r)^T, (y_{k-n+2}^1, \dots, y_{k-n+2}^r)^T, \dots, (y_k^1, \dots, y_k^r)^T\right) \equiv f_k, \end{aligned} \quad (8)$$

или эквивалентной таблице истинности (ТИ), см. табл. 1 [8].

Таблица 1. Таблица истинности

Аргументы прогнозирующего оператора				Прогноз
$(y_0^1, \dots, y_0^r)^T$	$(y_1^1, \dots, y_1^r)^T$	...	$(y_{n-1}^1, \dots, y_{n-1}^r)^T$	$(y_n^1, \dots, y_n^r)^T$
$(y_1^1, \dots, y_1^r)^T$	$(y_2^1, \dots, y_2^r)^T$	...	$(y_n^1, \dots, y_n^r)^T$	$(y_{n+1}^1, \dots, y_{n+1}^r)^T$
...				...
$(y_{k-n+1}^1, \dots, y_{k-n+1}^r)^T$	$(y_{k-n+2}^1, \dots, y_{k-n+2}^r)^T$	...	$(y_k^1, \dots, y_k^r)^T$	$(y_{k+1}^1, \dots, y_{k+1}^r)^T$
...				...
$(y_{M-n-1}^1, \dots, y_{M-n-1}^r)^T$	$(y_{M-n}^1, \dots, y_{M-n}^r)^T$	...	$(y_{M-2}^1, \dots, y_{M-2}^r)^T$	$(y_{M-1}^1, \dots, y_{M-1}^r)^T$
$(y_{M-n}^1, \dots, y_{M-n}^r)^T$	$(y_{M-n+1}^1, \dots, y_{M-n+1}^r)^T$	...	$(y_{M-1}^1, \dots, y_{M-1}^r)^T$	—

Строки ТИ ПО строятся по всем идущим подряд n членам ряда отсчетов и следующего за ними отсчета, в качестве прогнозируемого ими значения. Величина n , является порядком математической модели ПО данных (2).

Порядок прогнозирующего оператора может определяться как минимальное n , при котором по одной и той же n -последовательности отсчетов прогнозируются одинаковые значения.

Когда числа n и q определяют ОБП, то ТИ оказывается непротиворечивой и ПО может допускать минимизацию в базисах функций q -значной алгебры логики.

4. Модификация прогнозирующего оператора прогнозирования при $k \geq M$

Для прогнозирования неизвестных выборок вне заданного ряда (3) при $k \geq M$ требуется модификации алгоритма (8).

Прогнозирование при $k \geq M$ заключается в пошаговом построении продолжения ТИ с $(M - n + 1)$ -й по $(M + sf)$ -ю строку, где $M + sf = 1, 2, \dots, L$; L — номер максимального шага прогнозирования или так называемого «прогнозного горизонта» для пополнения выборок данных (8), имеющихся в исходной ТИ.

Для определения y_{M+sf} используется последовательное сравнение $(M - n + sf)$ -й n -последовательности со всеми n -последовательностями, уже имеющимися в исходной таблице, рассматриваемыми как опорные («эталонные») по критерию «минимума расстояния» между ними [6].

$$y_{M+sf} = \arg \min_{y_k \in [y_{n+1}, y_{n+2}, \dots, y_{M+sf-1}]} d_k^{w_j}(sf), \quad (9)$$

где

$$d_k^i(s_f) = \sum_{j \in [1, n]} \sum_{l \in [1, r]} w_j^i \cdot |y_{k+1-j}^l - y_{M+sf-j}^l|^p, \\ k = n + 1, n + 2, \dots, M + sf - 1. \quad (10)$$

В критерии близости (9) используются весовые функции индекса $j = 1, 2, \dots, n$ с типом веса $i = \{c, l, e, h\}$:

$$w_j^{(c)} = 1, \quad w_j^{(l)} = 1 + (1 - j)/n, \quad w_j^{(e)} = e^{-j}, \quad w_j^{(h)} = j^{-1}. \quad (11)$$

Возможна модификация формулы (7) с учетом классов эквивалентности, каждому из которых соответствует одинаковое прогнозируемое значение исходного ряда [7].

5. Связь оптимальных базовых параметров с предсказуемостью и восстанавливаемостью

Из введенных обозначений и алгоритма прогнозирования (8) для векторного временного ряда (3), удовлетворяющего условиям (4), существует ММ ПО, который по n_{opt} начальным, следующим подряд с шагом $\Delta t_{\text{opt}} \equiv T / M_{\text{opt}}$, q_{opt} -значным выборкам исходного ряда (3) позволяет вычислить все оставшиеся $M - n_{\text{opt}}$ выборок. Исходя из этого, характеризуем «голографическое» свойство векторного M, q, n -процесса — «восстанавливаемость» (с точностью $1/q_{\text{opt}}$) с помощью прогнозирующего оператора (7) по n_{opt} известным, следующим подряд векторам-столбцам, последующих вектор-столбцов с любыми изменениями в них значений ряда. И это позволяет естественным образом ввести понятие «предсказуемость (прогнозируемость)» (Pr) поведения векторного ПО, как отношения энтропии

предсказываемой части векторных процессов к энтропии базовой (начальной части):

$$Pr = \left(\log_2 q_{\text{opt}}^{M-n_{\text{opt}}} / \log_2 q_{\text{opt}}^{n_{\text{opt}}} \right) + 1 = (M - n_{\text{opt}}) / n_{\text{opt}} + 1 = M / n_{\text{opt}} \leq M. \quad (12)$$

Предсказуемость (12) векторного ряда (3) обладает свойствами:

- зависит явно только от длины M и порядка n_{opt} ПО (8);
- не может превышать длины M векторного ряда;
- возрастает с ростом M , если — ряд M, q, n при своем продолжении сохраняет ОБП, т. е. при $\Delta M > 0$ остается стационарным « $M + \Delta M, q_{\text{opt}}, n_{\text{opt}}$ -рядом»;
- при $n_{\text{opt}} = 1$ предсказуемость Pr ряда максимальна и равна M .

Доказательство перечисленных свойств следует из возможности представления функции f ПО (5) в форме ТИ по тексту полной длины M [4].

6. Отличительные особенности предложенного метода

Предложен и проверен экспериментально на информационной системе прогнозирования метод, основанный на предварительной оптимальной дискретизации («оптимальном закруглении») исходных данных во временные ряды.

Используемые ОБП $\{\Delta t, q, n\}$ находятся одновременно по единому энтропийному критерию, а не по различным известным ранее критериям оптимальности каждого из параметров, например, Н. Akaike [1] и В. А. Котельникова [9].

Применяемый ПО един как для скалярных, так и для векторных процессов.

Метод позволяет уточнить частоту дискретизации исходных данных, если она была выбрана не оптимально.

Используемый ПО определяется в общем случае в виде нелинейной логической функции для любого прогнозируемого процесса.

Данный метод может быть применим в случае неизвестной функциональной зависимости прогнозируемого значения.

7. Методика экспериментов. Оценка точности прогнозирования

Механизм верификации [1] прогноза позволяет выполнить оценку достоверности и точности прогноза по участку эталонного временного ряда. В качестве оценки точности прогноза используется формула

$$Er(L) = \sqrt{\frac{1}{L-1} \cdot \sum_{sf=1}^L |y_{M+sf-1} - y'_{sf}|^2}, \quad (13)$$

где y' — исходный (реальный) процесс; s — шаг прогноза; L — длина прогноза. Сравниваются исходный ($y'(s), s \in [M-L, M-1]$) и спрогнозированный процессы

$(y(s), s \in [M-L, M-1])$ на основе исходного процесса с отброшенным концом $(y'(s), s \in [0, M-L-1])$. Поиск оптимальных базовых параметров и построение прогнозирующего оператора (12) осуществлялись на участке $k \in [0, M-L-1]$.

В качестве экспериментальных данных был выбран «классический» тестовый ряд *Ряд G-Series G* [2], представляющий месячные международные авиаперевозки (в тысячах) в течение 12 лет с 1949 по 1960 гг. Отличительной особенностью международных перевозок является наличие ярко выраженной сезонной составляющей. Ниже приведена таблица сравнения точности прогноза предложенного метода с наиболее популярными: метод экспоненциального сглаживания и ARIMA.

Таблица 2. Результаты прогнозирования международных авиаперевозок

$q_{\text{opt}} = 49, n_{\text{opt}} = 3, r = 1, M = 119; E = 16.84; Pr = 40$						
	$Er(L)$					
L	1	5	10	15	20	25
ОБП	3.65	19	24	26	34	34
Экспоненциальное сглаживание	17.5	14	24	23	30	35
ARIMA	7	23	33	37	53	57

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что предложенный метод при прогнозировании временных рядов с ярко выраженной сезонной компонентой уступает методу прогнозирования, основанному на экспоненциальном сглаживании. На рис. 1 изображен результат прогнозирования методом на основе оптимальных базовых параметров, выполненный с помощью программы Forecast [8], [12]. Синей линией изображен прогнозный ряд, красной — исходный ряд.

Но даже с учетом того, что прогнозирующий оператор не использует в явном виде информацию о сезонности, наличии и характеристик тренда, полученный прогноз является удовлетворительным. Если из исходного ряда вычленим тренд и сезонную компоненту, то будет получена псевдослучайная составляющая, показанная на рис. 2. Прогноз случайной составляющей показан на рис. 3. Синей линией изображен прогнозный ряд, красной — исходный ряд. В табл. 3 приведена таблица оценки точности прогноза предложенного метода.

Таблица 3. Точность прогнозирования случайной составляющей международных авиаперевозок

$q_{\text{opt}} = 32, n_{\text{opt}} = 3, r = 1, M = 119; Pr = 40$							
L	1	2	3	4	5	10	15
$Er(L)$	0.036	0.036	0.029	0.025	0.035	0.053	0.046

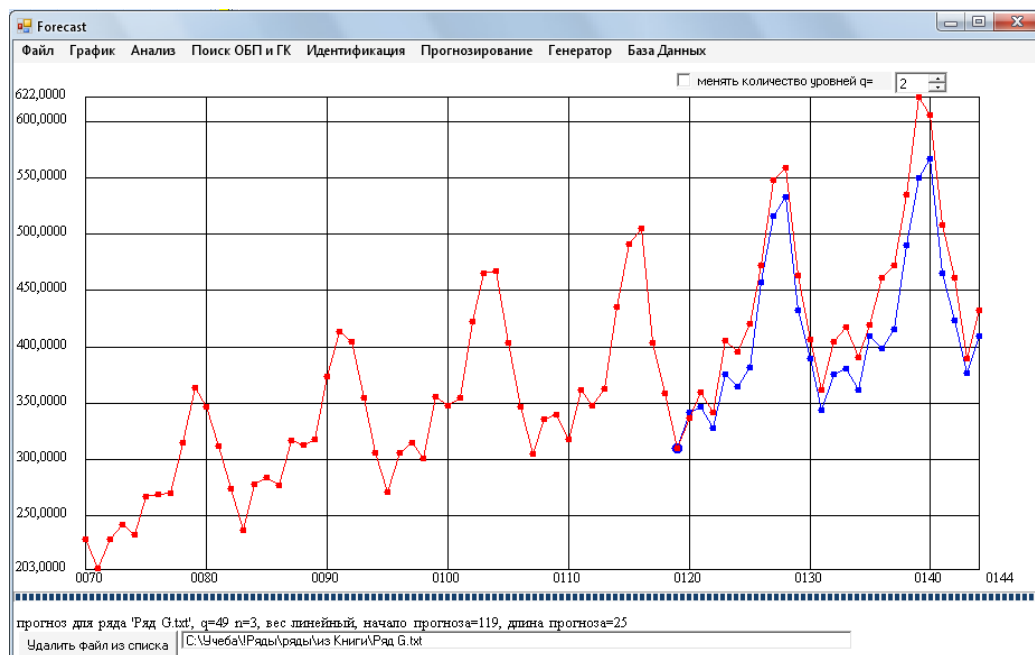


Рисунок 1. Прогноз международных перевозок

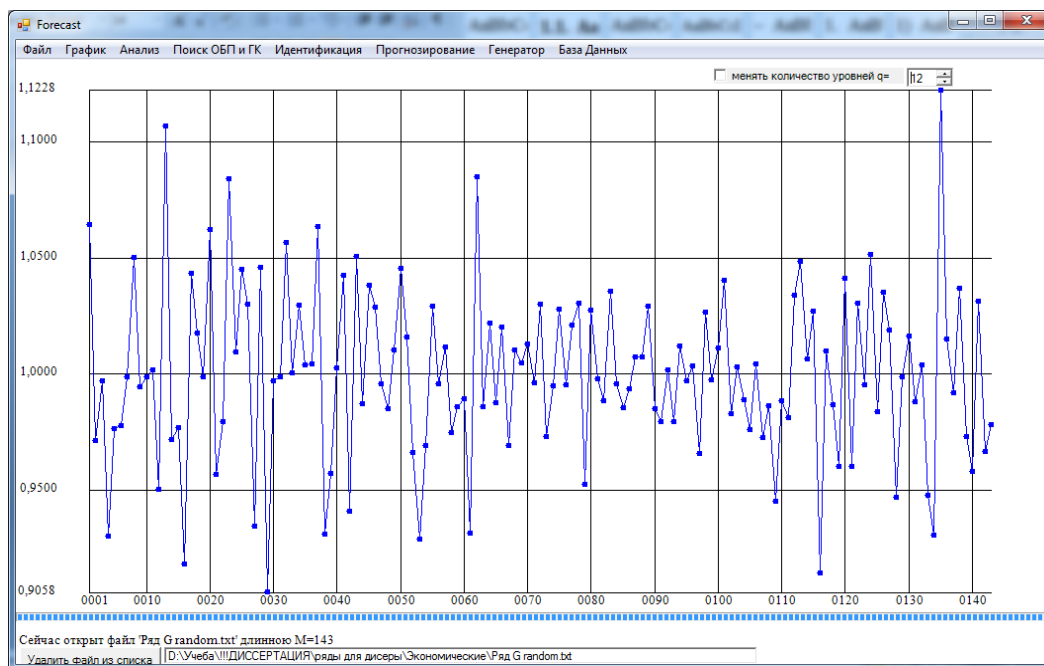


Рисунок 2. Случайная составляющей ряда международных перевозок

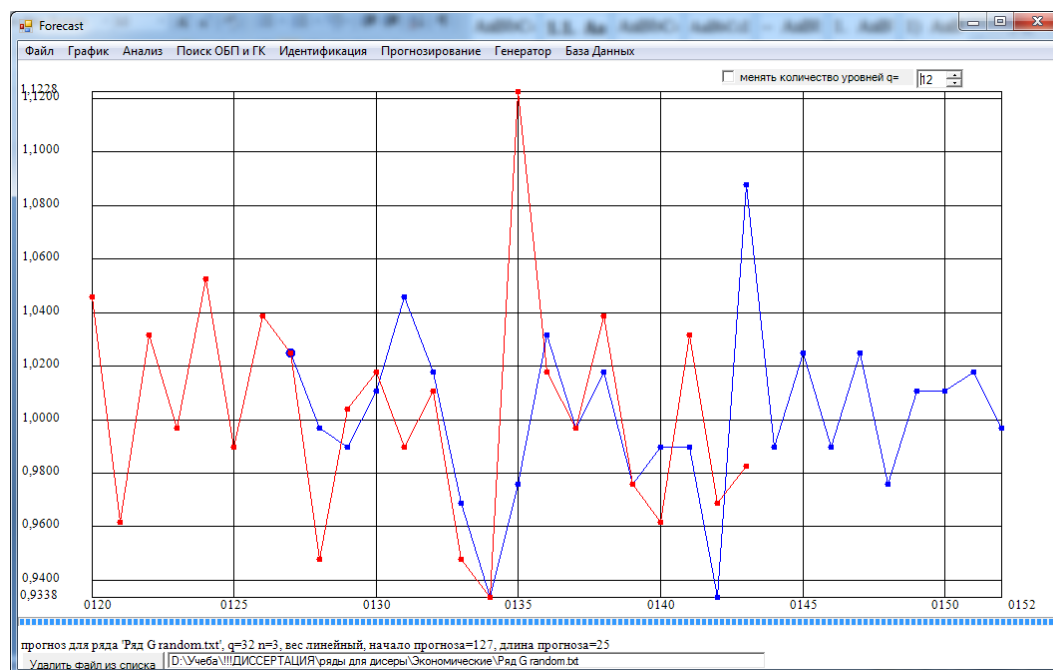


Рис. 3. Прогноз случайной составляющей ряда международных перевозок

8. Заключение

Таким образом, в статье предложен и проверен экспериментально новый метод прогнозирования временных рядов, основанный на предварительной оптимальной дискретизации («оптимальном закруглении») исходных данных во временные ряды. Данный метод зарекомендовал себя в задачах прогнозирования рядов, в которых априорная информация не позволяет сделать вывод о функциональной зависимости прогнозируемого значения от n предыдущих. В тех случаях, когда имеется априорная информация, например, информация о наличии сезонной компоненты, следует использовать гибридный двухуровневый подход: «классическими» методами прогнозируется регулярная часть модели (сезонность, линейность и т. п.), а остаток модели прогнозируется на основе предложенной структурной идентификации базовых параметров его источника.

Предложенный алгоритм может применяться при решении практических задач системного анализа, сводимых к задаче оптимальной дискретизации по уровню и по времени и к задаче прогнозирования временных рядов.

Литература

- [1] Akaike H. A new look at the statistical model identification. // Automatic Control, IEEE Transactions on. 1974 Vol. 19. No. 6. P. 716–723. (doi: 10.1109/TAC.1974.1100705).

- [2] Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление.— М. : Мир, 1974.
- [3] Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным.— М. : Наука, 1979.
- [4] Кирьянов К. Г. Выбор оптимальных базовых параметров источников экспериментальных данных при их идентификации // Идентификация систем и задачи управления: тр. 3-й междунар. конф.— М. : ИПУ РАН, 2004. С. 187–208.
- [5] Кирьянов К. Г. Идентификация динамических и информационных характеристик многоканальных систем на основе оптимальной дискретизации данных // Идентификация систем и задачи управления: тр. 9-й междунар. конф.— М. : ИПУ РАН, 2012. С. 252–265.
- [6] Кирьянов К. Г., Кузнецов Е. С. Особенности прогнозирования дискретных и аналоговых векторных процессов на основе идентификации их базовых параметров // Труды 14-й Научной конференции по радиофизике. — Н. Новгород : ННГУ, 2010. С. 278–279.
- [7] Кирьянов К. Г., Кузнецов Е. С. Модификация метода прогнозирования аналоговых и дискретных процессов в программе forecast 2 // Труды 12-й Научной конференции по радиофизике.— Н. Новгород : ННГУ, 2008. С. 271–273.
- [8] Кирьянов К. Г., Кузнецов Е. С. Информационная система прогнозирования векторных временных рядов // Информационные системы и технологии (ИСТ-2010): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф.— Н. Новгород : НГТУ, 2010. С. 158–159.
- [9] Конева Е. С. Выбор моделей для реальный временных рядов // Автоматика и телемеханика. 1988. № 6. С. 3–18.
- [10] Прогностика. Технология / под ред. В. И. Сифорова. — М. : Наука, 1990.
- [11] Романюк Ю. А. Основы цифровой обработки сигналов. В 3-х ч. Ч.1. Свойства и преобразования дискретных сигналов: учеб. пособие.— М. : МФТИ, 2005.
- [12] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2008611799 / Кирьянов К. Г., Кузнецов Е. С. 09.04.2008.

Автор: Егор Сергеевич Кузнецов, Институт радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева.

Forecasting Features in the Structural Uncertainty Investigated Objects

Ye. S. Kuznetsov

*Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev
24, Minin st., Nizhniy Novgorod, 603155*

Annotation Features of a new method and the algorithms of forecasting based on definition of optimum base parameters of processes and signals are considered, as well as optimum digitization of level and time in time numbers. The research demonstrates that information systems of forecasting, developed on the basis of this method, allows effective prediction of different processes.

Key words: Model of the initial data, optimum digitization of the data, optimum data base parameters, predicting operators, forecast

Reference

- [1] *Akaike H.* A new look at the statistical model identification. // Automatic Control, IEEE Transactions on. 1974 Vol. 19. No. 6. P. 716—723. (doi: 10.1109/TAC.1974.1100705).
- [2] *Boks D., Dzhenskis G.* Analiz vremennyh rjadov. Prognoz i upravlenie.— M.: Mir.
- [3] *Vapnik V. N.* Vosstanovlenie zavisimostej po jempiricheskim dannym.— M.: Nauka, 1979.
- [4] *Kirjanov K. G.* Vybor optimal'nyh bazovyh parametrov istochnikov jeksperimental'nyh dannyh pri ih identifikacii // Identifikacija sistem i zadachi upravlenija: tr. 3 mezhdunar. conf.— M.: IPU RAN, 2004. P. 187–208.
- [5] *Kirjanov K. G.* Identifikacija dinamicheskikh i informacionnyh harakteristik mnogokanal'nyh sistem na osnove optimal'noj diskretizacii dannyh // Identifikacija sistem i zadachi upravlenija: tr. 9-j mezhdunar. conf. — M.: IPU RAN, 2012. P. 252–265.
- [6] *Kirjanov K. G., Kuznetsov E. S.* Osobennosti prognozirovaniya diskretnyh i analogovyh vektornyh processov na osnove identifikacii ih bazovyh parametrov // Trudy 14-j Nauchnoj conf. po radiofizike. — N. Novgorod: NNGU, 2010. P. 278–279.
- [7] *Kirjanov K. G., Kuznetsov E. S.* Modifikacija metoda prognozirovaniya analogovyh i diskretnyh processov v programme forecast 2 // Trudy 12-j Nauchnoj konferencii po radiofizike.— N. Novgorod: NNGU, 2008. P. 271–273.
- [8] *Kirjanov K. G., Kuznetsov E. S.* Informacionnaja sistema prognozirovaniya vektornyh vremennyh rjadov // Informacionnye sistemy i tehnologii (IST-2010): tez. dokl. mezhdunar. nauch.-tehn. konf.— N. Novgorod: NGTU, 2010. P. 158–159.
- [9] *Koneva E. S.* Vybor modelej dlja real'nyh vremennyh rjadov // Avtomatika i telemekhanika. 1988. № 6. P. 3–18.
- [10] *Prognostika. Tehnologija / Siforova V. I. (ed.).— M.: Nauka, 1990.*

- [11] *Romanjuk Ju. A. Osnovy cifrovoj obrabotki signalov. Ch.1. Svojstva i preobrazovani-ja diskretnyh signalov: ucheb. posobie.*— М.: MFTI, 2005.
- [12] *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy EVM. №2008611799 / K. G. Kirjanov, E. S. Kuznetsov. 09.04.2008*

УДК 62-529

Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере

Б. В. Лушников, Е. Н. Политов, Е. С. Тарасова, К. Г. Казарян

*Юго-Западный государственный университет,
305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94
e-mail: bvl_61@inbox.ru, politovyevgeny@rambler.ru,
little_owl@mail.ru, teormeh@inbox.ru*

Аннотация. В статье рассмотрено математическое моделирование динамики движения бионического плавающего робота в горизонтальной плоскости, а также конструктивные особенности робота и его подсистем. Описаны некоторые результаты численных и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: бионический плавающий робот, мониторинг подводных объектов, гидросфера, экспериментальные исследования, математическое моделирование, оптимизация параметров.

ГРНТИ 50.03.03, 50.43.15

1. Введение

Во многих промышленно развитых странах интенсивно развиваются направления исследований в области создания миниатюрных мобильных подводных роботов, в том числе основанных на бионических принципах движения.

Особенно важной является проблема разработки устройств, использующих бионический принцип движения для перемещения под водой. В настоящее время ведутся активные исследования в области подводной робототехники, создаются устройства, способные работать под водой автономно. При этом традиционные движители, например винтовые, не всегда оказываются достаточно эффективными. Так, устройства, оснащенные винтовыми двигателями, оказывают значительное акустическое воздействие на окружающую среду и не обладают достаточной маневренностью для решения некоторых задач. Устройства, использующие бионические принципы движения, как правило, производят значительно меньше шума в процессе работы и обладают значительной маневренностью.

Разрабатываемые подводные микророботы, использующие принципы передвижения гидробионтов (гидробионты — морские или пресноводные организмы, постоянно обитающие в водной среде) или nekтонов (nekтон — (от греч. *nectos* — плавающий, плывущий) — совокупность водных активно плавающих животных,

способных противостоять силе течения), могут найти широкое применение для решения различного рода задач в гидросфере:

- проведение мониторинга в Мировом океане;
- проверка целостности подводных топливных трубопроводов, кабелей связи;
- обнаружение затонувших кораблей, затонувших и установленных донных мин;
- проверка качества воды и поиск источников ее загрязнения;
- разведка полезных ископаемых на дне морей;
- поддержка аварийно-спасательных и обзорно-поисковых работ;
- измерение скорости морских течений на различных глубинах;
- осмотр подводных конструкций портовых сооружений, а также морских судов и т. д.

На кафедре теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета (г. Курск) с 2000 г. ведутся научно-исследовательские работы по созданию новых принципов движения мини- и микророботов, взаимодействующих с окружающей средой. К таким мобильным устройствам относятся разработанные роботы для перемещения в трубах малого диаметра, змее- и червеподобные ползающие роботы, роботы на вакуумных присосках для перемещения по вертикальным поверхностям, мобильные роботы (летающие, сухопутные и плавающие), перемещающиеся за счет внутренних подвижных масс и др. Результаты этих работ отражены в отечественных и зарубежных публикациях, докладывались на Всероссийских и международных конференциях, экспериментальные образцы и модели неоднократно экспонировались на выставках и участвовали в различных конкурсах, о чем свидетельствуют дипломы различных степеней и достоинств.

Коллектив кафедры успешно сотрудничает в области мехатроники и робототехники с ведущими учеными и научными лабораториями российских вузов, учреждений Российской Академии Наук, а также с зарубежными учеными: Институтом проблем механики АН, МГТУ им. Н. В. Баумана, МГТУ «Станкин», университетом г. Кассино (Италия), Рижским техническим университетом (Латвия) и др.

Таким образом, задача исследования бионических принципов движения подводных гидробионтов и разработка автономного плавающего робота, основанного на бионических принципах движения и предназначенного для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере, является важной и актуальной [1], [3], [4], [5].

В течение 2010–2012 гг. на кафедре теоретической механики и мехатроники ЮЗГУ велись научно-исследовательские работы в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. по проекту «Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере» [6], [7], [8], [9], [10], [11].

В настоящей работе представлена схема и конструкция макета бионического плавающего робота, а также результаты математического моделирования и экспериментальных исследований опытного образца робота-рыбы.

2. Составление математической модели

В качестве расчетной схемы математической модели перемещения бионического плавающего робота в горизонтальной плоскости была принята трехзвенная кинематическая схема, представленная на рис 1.

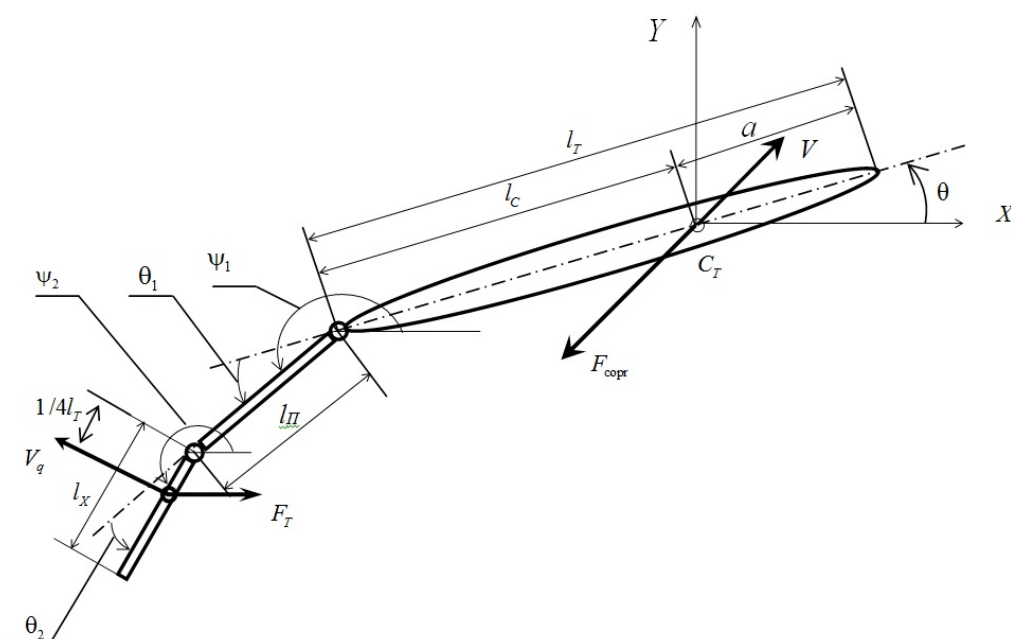


Рисунок 1. Расчетная схема бионического плавающего робота в горизонтальной плоскости: $X-Y$ — прямоугольная инерциальная система координат; l_T — длина «тела» робота; l_{Π} — длина хвостового стебля; l_T — длина хвостового плавника; C_T — точка, соответствующая центру масс «тела» робота; V — вектор абсолютной скорости центра масс; V_q — вектор линейной скорости точки хвостового плавника, отстоящей на расстоянии $1/4$ его длины от оси вращения; θ — угловая координата центральной продольной осевой линии тела робота; θ_1 и θ_2 — относительные углы поворота хвостового стебля и хвостового плавника соответственно вокруг своих осей вращения; ψ_1 и ψ_2 — абсолютные угловые координаты положения хвостового стебля и хвостового плавника соответственно; F_T — вектор силы тяги, возникающей при вращательном движении хвостового плавника; $F_{\text{сопр}}$ — вектор силы сопротивления движению тела робота

Система алгебро-дифференциальных уравнений, описывающих динамику рассматриваемой системы, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m_{tx} \ddot{X} = F_{TX}(X, Y, \theta, \psi_1, \psi_2, t) + F_{\text{sopr}}(\dot{X}); \\ m_{ty} \ddot{Y} = F_{TY}(X, Y, \theta, \psi_1, \psi_2, t) + F_{\text{sopr}}(\dot{Y}); \\ I_\theta \ddot{\theta} = M_C(F_T) + M_{\text{sopr}}(\dot{\theta}) + M_t(\dot{X}, \dot{Y}, \theta, \psi_1, \psi_2); \\ \psi_1(t) = \pi + \theta(t) + \theta_1(t); \\ \psi_2(t) = \psi_1(t) + \theta_2(t). \end{cases} \quad (1)$$

Используя положения аэродинамической теории крыла, подъемную (тяговую) силу, действующую на движущуюся плоскую пластину, можно определить согласно следующему выражению [3]:

$$\vec{F}_T = \pi \rho S (\vec{v}_q \times \vec{l}_e) \times \vec{v}_q, \quad (2)$$

где ρ — плотность среды (воды); S — площадь поверхности пластины; $\vec{v}_q$ — вектор скорости точки пластины, находящейся на расстоянии четверти ее длины от оси вращения; $\vec{l}_e$ — единичный вектор, расположенный в плоскости пластины и определяемый координатами:

$$l_e = [-\cos(\psi_2), -\sin(\psi_2), 0] \quad (3)$$

Координаты вектора скорости $\vec{v}_q$ определяются следующими выражениями:

$$V_{qx}(t) = V_X + L_{\text{сорт}} \cdot \sin(\theta(t)) d\theta(t) - L_p \cdot \sin(\psi_1(t)) d\psi_1(t) - \frac{L_t}{4} \cdot \sin(\psi_2(t)) d\psi_2(t), \quad (4)$$

$$V_{qy}(t) = V_Y + L_{\text{сорт}} \cdot \cos(\theta(t)) d\theta(t) - L_p \cdot \cos(\psi_1(t)) d\psi_1(t) - \frac{L_t}{4} \cdot \cos(\psi_2(t)) d\psi_2(t), \quad (5)$$

$$V_{qz}(t) = 0. \quad (6)$$

Тогда проекции вектора силы тяги F_T на оси X и Y будут иметь вид:

$$F_{TX}(t) := \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (V_{qx}(t) \cdot \sin(\psi_2(t)) - V_{qy}(t) \cdot \cos(\psi_2(t))) \cdot V_{qy}(t); \quad (7)$$

$$F_{TY}(t) := \pi \cdot \rho \cdot S \cdot (-V_{qx}(t) \cdot \sin(\psi_2(t)) + V_{qy}(t) \cdot \cos(\psi_2(t))) \cdot V_{qx}(t). \quad (8)$$

Помимо силы тяги на хвостовую пластину будет действовать момент, определяемый выражением:

$$M_t = -\pi \rho \frac{L_t^2}{4} \left(\dot{x}_m \dot{y}_m \cos(2\psi_2(t)) + \frac{1}{2} (\dot{y}_m^2 - \dot{x}_m^2) \sin(2\psi_2(t)) \right), \quad (9)$$

где $\dot{x}_m, \dot{y}_m$ — проекции вектора скорости средней точки хвостовой пластины на оси X и Y .

На тело робота-рыбы будут также действовать момент от вектора силы тяги, сила сопротивления жидкости и момент сил вязкого сопротивления. Для определения последних двух факторов необходимо интегрирование распределенных по по-

верхности тела робота-рыбы сил. Для предварительных расчетов будем считать эти силовые факторы пропорциональными соответствующим скоростям:

$$F_{\text{sopr } X} = \mu_X V_X; \quad (10)$$

$$F_{\text{sopr } Y} = \mu_Y V_Y; \quad (11)$$

$$M_{\text{sopr}} = \mu_\theta \dot{\theta}. \quad (12)$$

Момент, действующий на тело робота, от силы тяги относительно его центра масс определим в соответствии с векторным произведением

$$M_C(F_T) = [X_{cq}, Y_{cq}] \times [F_{TX}, F_{TY}], \quad (13)$$

где X_{cq}, Y_{cq} — координаты вектора, связывающего центр масс тела робота-рыбы C_T и точку приложения силы тяги на хвостовом плавнике.

В результате получим

$$M_C(F_T) = Y_{cq} F_{TX} - X_{cq} F_{TY}. \quad (14)$$

Для проведения численных исследований была разработана модель исследуемой системы в среде MATLAB/Simulink (рис. 2). Подробнее описание указанных на рис. 2 подсистем представлено в [7].

3. Результаты моделирования

В качестве примера рассмотрим задачу разворота корпуса робота-рыбы в процессе «прямолинейного» движения на 180° . С этой целью зададим закон изменения относительного угла поворота хвостового стебля в виде полуволны синусоиды, график которой представлен на рис. 3.

Траектория такого движения и разворота на 180° робота-рыбы за 80 секунд при значениях параметров $\alpha_2 = 0.3$ рад., $\theta_1(t) = \text{var}$, $\omega_2 = 1 \text{ c}^{-1}$ представлена на рис. 4. Как видно из анализа полученной траектории, разворот корпуса происходит с малым радиусом, без существенного заноса и искажения траектории.

Выбор численного метода компьютерного моделирования, его точности, интервала времени счета и других необходимых параметров осуществляется с помощью стандартных меню среды Simulink.

В ходе компьютерного имитационного моделирования было исследовано влияние параметров математической модели конструкции разрабатываемого робота-рыбы на его функциональные и динамические характеристики.

Одной из самых важных кинематических характеристик мобильного робота, с точки зрения оценки его динамической эффективности, является скорость плавания. Наибольшее влияние на скорость плавания оказывают частота колебаний хвостового плавника, масса робота и площадь боковой поверхности хвостового плавника: чем больше частота колебаний и площадь хвоста и меньше масса робота, тем больше скорость его поступательного движения в горизонтальной плоскости.

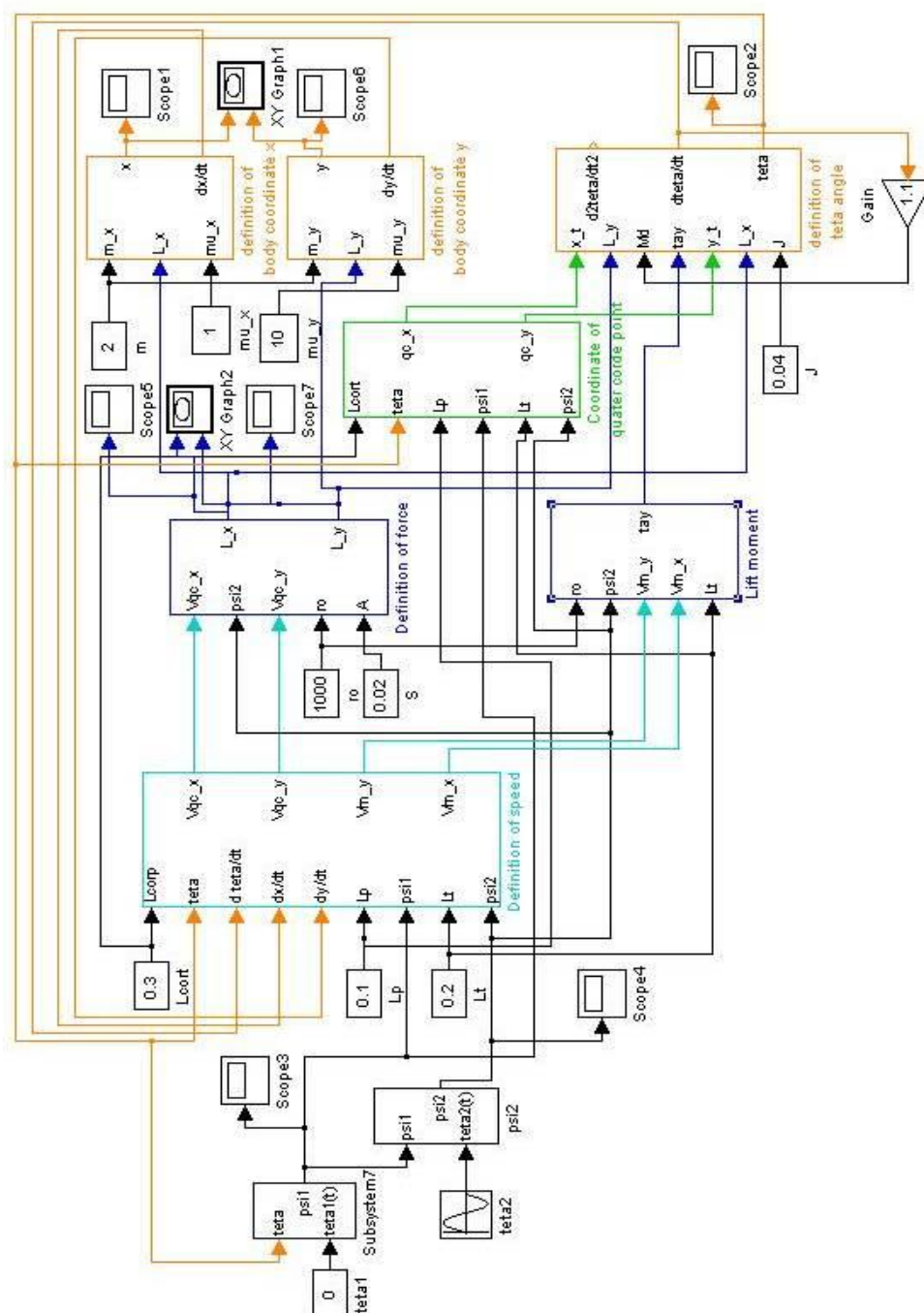


Рисунок 2. Simulink-модель компьютерного моделирования
динамики движения робота-рыбы

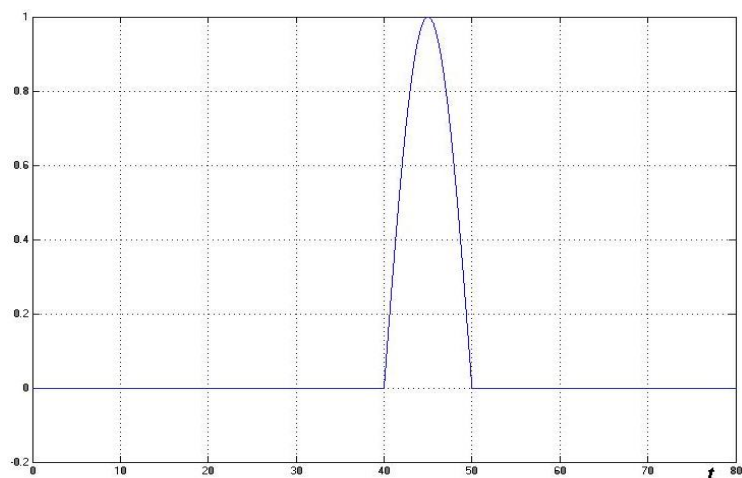


Рисунок 3. Закон изменения относительного угла поворота хвостового стебля в виде полуволны синусоиды

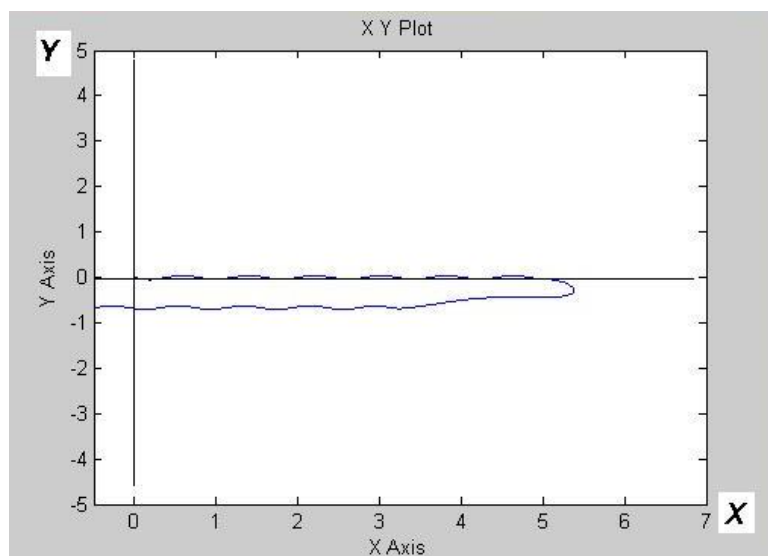


Рисунок 4. Полученная траектория робота при совершении разворота

Вместе с тем при движении робота желательно добиться наилучших условий для мониторинга окружающей среды, в частности, проведения видео- и фотосъемки, измерений физических свойств среды и т. п. С этой точки зрения важной задачей является минимизация бокового смещения центра масс робота и углового «виляния» тела робота относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести. В ходе проведения численных экспериментов установлено, что снижение указанных двух параметров возможно за счет увеличения частоты угловых колеба-

ний хвоста, уменьшения площади хвостового плавника при одновременном его удлинении и увеличении массы.

Таким образом, для увеличения эффективности робота (повышение быстроходности и улучшение устойчивости) желательно создавать колебания хвостового плавника с достаточно большой частотой (свыше 3–5 Гц). Однако возрастание частоты угловых колебаний хвоста приводит к существенному увеличению потребляемой мощности, ресурс которой, очевидно, ограничен.

Размеры хвоста и масса робота противоположно влияют на скорость и боковое «виляние», при увеличении площади хвоста и уменьшении массы тела скорость снижается, но при этом увеличивается и амплитуда боковых перемещений. Поэтому для комплексной оценки конструктивных параметров и получения оптимальных параметров с целью увеличения эффективности робота необходимо провести оптимизацию по известным методикам.

4. Конструкция робота

В соответствии с техническим заданием [8], в среде проектирования Solid-Works была разработана конструкция бионического робота. Трехмерная модель разработанной конструкции показана на рис. 5. Корпус робота изображен на рисунке прозрачным с целью показать внутреннее устройство.

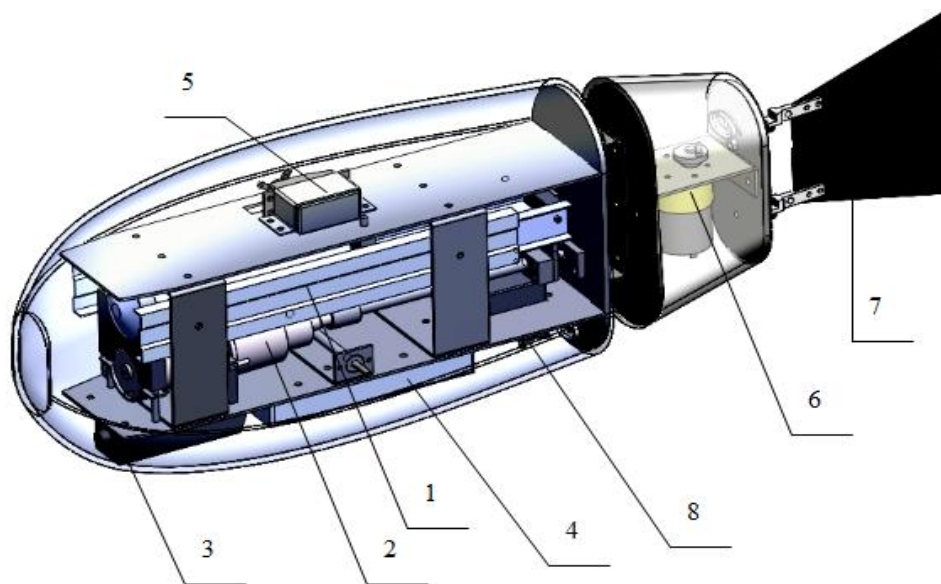


Рисунок 5. Трехмерная модель разработанной конструкции робота:
1 — система погружения робота; 2 — привод системы погружения; 3 — видеокамера;
4 — аккумуляторная батарея; 5 — привод системы управления плавниками;
6 — привод системы управления хвостом; 7 — хвост;
8 — привод системы управления предхвостьем

Бионический плавающий робот состоит из ряда подсистем, среди которых следует выделить следующие:

- привод хвостового плавника;
- привод предхвостья;
- подсистему динамического погружения и всплытия с приводом боковых плавников;
- подсистему вертикального погружения и всплытия;
- подсистему видеонаблюдения;
- подсистему освещения;
- подсистему электропитания;
- подсистему навигации.

В качестве приводов хвостового плавника и предхвостья использованы кривошипно-коромысловые механизмы, в которых вращение кривошипа обеспечивается сервоприводом. Данные приводы оснащены системой автоматического управления, обеспечивающей точное позиционирование. Управление производится путем изменения частоты подаваемого на привод сигнала. Напряжение питания составляет 6 В. Особенностью данных электроприводов является то, что они рассчитаны на поворот вала от 0° до 180° или непрерывное вращение. Этого достаточно для решения задачи управления плавниками робота.

Подсистема динамического погружения и всплытия также содержит сервопривод и обеспечивает управляемое вращательное движение парных боковых плавников на угол от 0° до 180° . Это позволит осуществлять перемещение робота в вертикальной плоскости, т. е. по глубине, за счет движения хвостового плавника и предхвостья, обеспечивающих перемещение в горизонтальной плоскости. Такое погружение или всплытие робота будем считать динамическим, в отличие от вертикального, когда горизонтальное движение будет отсутствовать.

Необходимость вертикального погружения (всплытия) продиктована возможной потребностью мониторинга вертикальных объектов в гидросфере (опорных колонн, свай, подводных бортов кораблей и т. д.), а также возможными ограничениями водного пространства. Подсистема вертикального погружения (всплытия) будет включать гидроцилиндр с приводом линейного движения для приема или вытеснения забортной воды, что позволит управлять величиной архимедовой силы. В качестве привода системы погружения мобильного робота используется привод постоянного тока. Данный привод позволяет системе погружения работать на глубине до 10 метров. В качестве датчика в цепи обратной связи используется оптический инкрементальный энкодер фирмы Bourgne. Данный датчик позволяет измерять угол поворота с достаточно большой точностью — до 1.4° . Энкодер является многооборотным, позволяет определять направление вращения.

Подсистема автономного электропитания будет включать основную аккумуляторную батарею, рассчитанную на бесперебойную работу всех приводов в штатном режиме (не менее 30 минут), а также аварийную аккумуляторную батарею, необходимую для аварийного всплытия робота-рыбы.

Разработанная система технического зрения робота также основана на современной элементной базе. Приведенная система технического зрения функционирует следующим образом. В корпусе робота устанавливается видеокамера, производящая съемку. Видеосигнал проходит предварительную обработку (преобразуется к виду, в котором его удобно передавать по радио). Далее передающее устройство, установленное на роботе, производит передачу сигнала на приемник, подключенный к внешнему вычислителю. В роли внешнего вычислителя будет использован IBM-совместимый компьютер. Внешний вычислитель производит преобразование видеоинформации и распознавание. Результаты работы вычислителя передаются оператору.

5. Испытания опытного образца

После сборки опытного образца бионического плавающего робота были проведены испытания устройства в открытом водоеме. Были испытаны дальность работы системы радиоуправления (измерено расстояние, на которое может быть передан сигнал с используемого передатчика), исследован характер движения робота при перемещении прямо, при повороте. Также были испытаны способности опытного образца осуществлять динамическое погружение. Следует отметить, что созданный опытный образец не был оснащен системой статического погружения.

Проведенные испытания подтвердили результаты математического моделирования, показав, что характер движения робота соответствует расчетному. Первые испытания изготовленного опытного образца подтвердили, что он может перемещаться в водной среде на расстояние до 150 м. Данное устройство позволяет исследовать влияние параметров конструкции (площадь и длина хвоста, частота и амплитуда колебаний хвоста) на динамические характеристики мобильного робота, в том числе на скорость плавания и маневренность.

6. Результаты экспериментальных исследований опытного образца

Экспериментальные исследования опытного образца собранного робота осуществлялись в трех видах водоемов: в двух видах бассейнов (мелководном и глубоководном) и в натуральных условиях на Курском водохранилище (рис. 6–9).

Количественной и качественной оценке подлежали:

- устойчивое положение робота во время плавания и погружения;
- герметичность корпуса;
- дальность управляемости в зависимости от глубины погружения;
- диапазон скоростей горизонтального движения в подводном положении;
- скорость динамического погружения и всплытия;
- радиус разворота в горизонтальной плоскости;
- скорость статического (вертикального) погружения и всплытия;

- глубина погружения, с которой возможно безаварийное всплытие робота;
- качество функционирования подсистем освещения, видеонаблюдения, питания.

На рис. 10 представлен график зависимости средней скорости V (м/с) горизонтального движения робота в полностью погруженном положении от частоты колебаний хвостового плавника f (Гц).

Как следует из анализа представленного графика, увеличение частоты колебаний хвостового плавника приводит к нелинейному росту средней скорости перемещения робота, причем форма графика имеет вид кривой «насыщения». Это вызвано ростом сопротивления движения робота в жидкости с увеличением скорости. Поэтому для экономичного режима движения робота следует использовать частоты колебаний хвостового плавника в интервале от 1 до 5 Гц, что соответствует диапазону скоростей 0.1...0.3 м/с, и удовлетворяет требованиям технического задания.

Радиус поворота робота в горизонтальной плоскости (радиус разворота), характеризующий маневренность, равен 0.45 м, что также удовлетворяет техническому заданию.

Скорость динамического погружения и всплытия зависит от скорости горизонтального движения робота и определяется углом отклонения боковых плавников. Максимальные значения скорости погружения (всплытия) при испытаниях достигали 0.08 м/с при максимальном угле атаки боковых плавников 45° .

Дальность работы системы радиоуправления достигала 80–100 м при глубине погружения до 1 м. При больших глубинах погружения необходимо использование плавающей антенны.



Рисунок 6. Испытания робота в бассейне

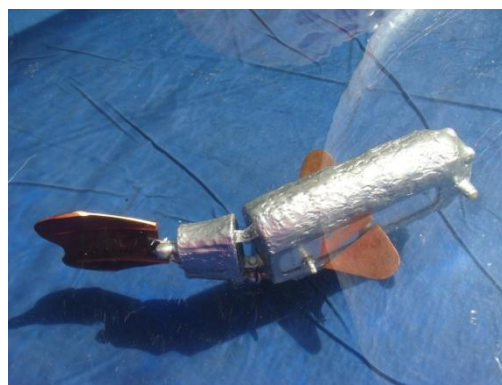


Рисунок 7. Движение робота в бассейне



Рисунок 8. Испытания робота
в глубоководном бассейне



Рисунок 9. Движение робота
в глубоководном бассейне

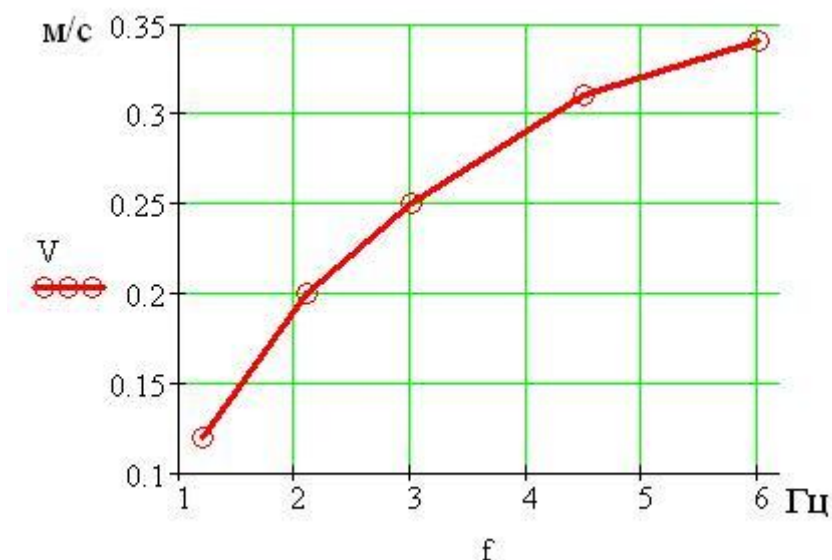


Рисунок 10. График зависимости средней скорости V (м/с) горизонтального движения робота от частоты колебаний хвостового плавника f (Гц)

Таким образом, проведенные натурные испытания опытного образца устройства бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере показали эффективную его работу и нормальное функционирование всех его подсистем. Технические характеристики разработанного робота-рыбы, зафиксированные в ходе испытаний, в основном соответствуют техническому заданию.

Основные технические характеристики разработанного опытного образца бионического плавающего робота и его математической модели представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики робота-рыбы

№ п/ п	Характеристика	Значение	
		Эксперименталь- ные	Модели- рование
1	Габариты (длина×высота×ширина), м	0.70×0.23×0.28	
2	Максимальная скорость горизонтального движения под водой, м/с	0.4	0.43
3	Минимальный радиус поворота, м	1.0	1.0
4	Максимальная скорость вертикального погружения (всплытия), м/с	0.05	
5	Угол размаха хвостового плавника, град.	0...30	30
6	Угол поворота предхвостия, град	0...25	0...25
7	Угол поворота боковых плавников, град.	-30...+30	
8	Частота колебаний хвостового плавника, Гц	0...5	1.9
9	Максимальное тяговое усилие, Н	70.8	

Анализ представленных графиков, а также целого ряда других, полученных в ходе вычислительных и натурных экспериментов, позволяет сделать следующие выводы:

1. Результаты математического моделирования достаточно адекватно подтверждаются натурными испытаниями разработанного и изготовленного опытного образца робота-рыбы.

2. Предложенная математическая модель и ее программная реализация в среде Simulink/MatLab, всесторонне протестированная при различных задаваемых законах управления, свидетельствуют об адекватном поведении исследуемой системы и подтверждают правильность разработанной математической модели и функционирования вычислительного программного комплекса для ее решения.

3. Разработанная математическая модель и ее программная реализация позволяет эффективно ставить и успешно решать задачи оптимизации конструкции и параметров управления бионического плавающего робота-рыбы.

4. Разработанная конструкция опытного образца робота-рыбы имеет скоростные характеристики движения, аналогичные лучшим моделям ведущих стран мира.

Заключение

Таким образом, разработана математическая модель динамического поведения трехсекционного плавающего робота с бионическими принципами движения и представлен вычислительный комплекс для компьютерного математического моделирования рассматриваемой системы в среде блочного имитационного моделиро-

вания Simulink/MatLab, имеющей ряд существенных преимуществ перед другими компьютерными вычислительными средствами.

Разработанная математическая модель и вычислительный программный комплекс позволяют решать задачи оптимизации параметров конструкции разрабатываемого робота и ее системы управления.

Сопоставление полученных в ходе выполнения НИР результатов с известными результатами исследований отечественных и зарубежных авторов [1], [12], [13], [14], [15], [16], [17] свидетельствует об адекватности предложенных методик и конструкторских решений.

Литература

- [1] Бочаров А. Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 36–52.
- [2] Лушников Б. В., Яцун С. Ф., Политов Е. Н. и др. Оптимизация параметров конструкции бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4(4). С. 1193–1196.
- [3] Лушников Б. В., Яцун С. Ф., Политов Е. Н., Тарасова Е. С. Компьютерное моделирование динамики бионического плавающего робота // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4(3). С. 562–567.
- [4] Лушников Б. В., Савин С. И., Казарян К. Г., Яцун А. С., Мальчиков А. В. Бионический плавающий робот для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. / С.Ф. Яцун (отв. ред.).— Курск : ЮЗГУ, 2012. Ч. 2. С. 107–111.
- [5] Лушников Б. В., Яцун С. Ф., Тарасова Е. С., Политов Е. Н. Компьютерное моделирование динамики движения бионического плавающего робота в горизонтальной плоскости // Управляемые вибрационные технологии и машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. / С.Ф. Яцун (отв. ред.).— Курск : ЮЗГУ, 2012. Ч. 2. С. 111–117.
- [6] Лушников Б. В. (рук.), Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Политов Е. Н., Емельянова О. В., Савин С. И., Хмелевской Д. В., Чубов В. Ю. Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Отчет о НИР (промежуточ.). — Курск : ЮЗГУ, 2010. № ГК П971. Инв. № 1.114.10Ф/1.
- [7] Лушников Б. В. (рук.), Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Политов Е. Н., Емельянова О. В., Тарасова Е. С., Яцун А. С., Савин С. И., Хмелевской Д. В., Чубов В. Ю. Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Отчет о НИР (промежуточ.). — Курск : ЮЗГУ, 2010. № ГК П971. Инв. № 1.114.10Ф/2.
- [8] Лушников Б. В. (рук.), Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Политов Е. Н., Тарасова Е. С., Яцун А. С., Казарян К. Г., Савин С. И. Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидро-

- сфере / Отчет о НИР (промежуточ.). — Курск: ЮЗГУ, 2011. № ГК П971. Инв. № 1.114.10Ф/3.
- [9] Лушников Б. В. (рук.), Яцун С. Ф., Мищенко В. Я., Политов Е. Н., Тарасова Е. С., Яцун А. С., Казарян К. Г., Савин С. И. Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Отчет о НИР (промежуточ.). — Курск : ЮЗГУ, 2011 № ГК П971. Инв. № 1.114.10Ф/4.
- [10] Лушников Б. В. (рук.), Яцун С. Ф., Политов Е. Н., Мальчиков А. В., Яцун А. С., Казарян К. Г., Савин С. И. Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Отчет о НИР (промежуточ.). — Курск : ЮЗГУ, 2012. № ГК П971. Инв. № 1.114.10Ф/5.
- [11] Лушников Б. В. (рук.), Яцун С. Ф., Политов Е. Н., Мальчиков А. В., Казарян К. Г., Гревцов А. В., Савин С. И. Разработка бионического плавающего робота для мониторинга природных и техногенных объектов в гидросфере / Отчет о НИР (финальный). — Курск : ЮЗГУ, 2012. № ГК П971. Инв. № 1.114.10Ф/6.
- [12] Kelly S. D., Mason R. J., Anhalt C. T., Murray R. M., Burdick J. W. Modeling and experimental investigation of carangiform locomotion for control // Proc. of the 1998 Amer. Cont. Conf., 1998. P. 1271–1276.
- [13] Mason R. J., Burdick W. Experiments in carangiform robotic fish locomotion // Proc. of the 2000 ICRA, 2000. P. 428–435.
- [14] Morgansen K. A., Duindam V., Mason R. J., Burdick J. W. Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. P. 427–434.
- [15] Kim E., Youm Y. Design and dynamic analysis of fish robot: PoTuna // Proc. IEEE International Conference Robotics and Automation ICRA'04. 2004. Vol. 5. P. 4887–4892.
- [16] Lachat D., Crespi A., Ijspeert A. J. BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator // The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob–2006. 2006. P. 643–648.
- [17] Wang L., Wang S., Cao Z., Tan M., Zhou C., Sang H., Shen Z. Motion control of a robot fish based on CPG // IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT2005. 2005. P. 1263–1268.

Авторы:

Борис Владимирович Лушников, к. т. н., доцент, доцент кафедры теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета.

Евгений Николаевич Политов, к. т. н., доцент кафедры теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета.

Елена Сергеевна Тарасова, к. т. н., старший преподаватель кафедры теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета.

Карен Геворкович Казарян, аспирант кафедры теоретической механики и мехатроники Юго-Западного государственного университета.

Bionic Floating Robot for Monitoring Natural and Industrial Objects in the Hydrosphere

B. V. Lushnikov, Y. N. Politov, E. S. Tarasova, K. G. Kazaryan
Southwest State University .
94, 50 let Oktyabrya street, Kursk, 305040

Abstract. Article describes mathematical modeling of dynamics of movement of the bionic floating robot on a horizontal plane, and designs features of the robot and its subsystems. Results of numerical and experimental studies are also described in the article.

Keywords: bionic floating robot, monitoring of underwater objects, hydrosphere, experimental research, mathematical modeling, optimization of parameters.

Reference

- [1] Bocharov A. Ju. Sovremennye tendencii v razvitii miniaturnykh podvodnykh apparatov i robotov za rubezhom // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2006. № 2. P. 36–52.
- [2] Lushnikov B. V., Jacun S. F., Politov E. N. etc. Optimizacija parametrov konstrukcii bionicheskogo plavajushhego robota dlja monitoringa prirodnykh i tehnogennykh ob#ektov v gidrosfere // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2011. Vol 13, No. 4(4). P. 1193–1196.
- [3] Lushnikov B. V., Jacun S. F., Politov E. N., Tarasova E. S. Kompjuternoe modelirovanie dinamiki bionicheskogo plavajushhego robota // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2010. Vol. 12, No. 4(3). P. 562–567.
- [4] Lushnikov B. V., Savin S. I., Kazarjan K. G., Jacun A. S., Malchikov A. V. Bionicheskij plavajushhij robot dlja monitoringa prirodnykh i tehnogennykh obektov v gidrosfere // Upravljaemye vibracionnye tehnologii i mashiny: sb. nauch. st. / S. F. Jacun (ed.).— Kursk: JuZGU, 2012. Ch. 2. P. 107–111.
- [5] Lushnikov B. V. Jacun S. F., Tarasova E. S., Politov E. N. Kompjuternoe modelirovanie dinamiki dvizhenija bionicheskogo plavajushhego robota v gorizontальной ploskosti // Upravljaemye vibracionnye tehnologii i mashiny: sb. nauch. st. / S. F. Jacun (ed.).— Kursk: JuZGU, 2012. Ch. 2. P. 111–117.
- [6] Lushnikov B. V. (ruk.), Jacun S. F., Mishhenko V. Ja., Politov E. N., Emeljanova O. V., Savin S. I., Hmelevskoj D. V., Chubov V. Ju. Razrabotka bionicheskogo plavajushhego robota dlja monitoringa prirodnykh i tehnogennykh obektov v gidrosfere / Otchet o NIR (promezhutoch.). — Kursk, 2010. № GK P971. Inv. № 1.114.10F/1.
- [7] Lushnikov B. V. (ruk.), Jacun S. F., Mishhenko V. Ja., Politov E. N., Emeljanova O. V., Tarasova E. S., Jacun A. S., Savin S. I., Hmelevskoj D. V., Chubov V. Ju. Razrabotka bionicheskogo plavajushhego robota dlja monitoringa prirodnykh i tehnogennykh obektov v gidrosfere / Otchet o NIR (promezhutoch.). — Kursk: JuZGF, 2010. № GK P971. Inv. № 1.114.10F/2.

- [8] Lushnikov B. V. (ruk.), Jacun S. F., Mishhenko V. Ja., Politov E. N., Tarasova E. S., Jacun A. S., Kazarjan K. G., Savin S. I. Razrabotka bionicheskogo plavajushhego robota dlja monitoringa prirodnyh i tehnogennyh obektov v gidrosfere / Otchet o NIR (promezhutoch.). — Kursk: JuZGU, 2011. № GK P971. Inv. №1.114.10F/3.
- [9] Lushnikov B. V. (ruk.), Jacun S. F., Mishhenko V. Ja., Politov E. N., Tarasova E. S., Jacun A. S., Kazarjan K. G., Savin S. I. Razrabotka bionicheskogo plavajushhego robota dlja monitoringa prirodnyh i tehnogennyh obektov v gidrosfere / Otchet o NIR (promezhutoch.). — Kursk: JuZGU, 2011 № GK P971. Inv. № 1.114.10F/4.
- [10] Lushnikov B. V. (ruk.), Jacun S. F., Politov E. N., Mal'chikov A. V., Jacun A. S., Kazarjan K. G., Savin S. I. Razrabotka bionicheskogo plavajushhego robota dlja monitoringa prirodnyh i tehnogennyh obektov v gidrosfere / Otchet o NIR (promezhutoch.). — Kursk: JuZGU, 2012. № GK P971. Inv. № 1.114.10F/5.
- [11] Lushnikov B. V. (ruk.), Jacun S. F., Politov E. N., Malchikov A. V., Kazarjan K. G., Grevcov A. V., Savin S. I. Razrabotka bionicheskogo plavajushhego robota dlja monitoringa prirodnyh i tehnogennyh obektov v gidrosfere / Otchet o NIR (final'nyj). — Kursk: JuZGU, 2012. № GK P971. Inv. №1.114.10F/6.
- [12] Kelly S. D., Mason R. J., Anhalt C. T., Murray R. M., Burdick J. W. Modeling and experimental investigation of carangiform locomotion for control // Proc. of the 1998 Amer. Cont. Conf., 1998. P. 1271–1276.
- [13] Mason R. J., Burdick W. Experiments in carangiform robotic fish locomotion // Proc. of the 2000 ICRA, 2000. P. 428–435.
- [14] Morgansen K. A., Duindam V., Mason R. J., Burdick J. W. Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. P. 427–434.
- [15] Kim E., Youm Y. Design and dynamic analysis of fish robot: PoTuna // Proc. IEEE International Conference Robotics and Automation ICRA'04. 2004. Vol. 5. P. 4887–4892.
- [16] Lachat D., Crespi A., Ijspeert A. J. BoxyBot: a swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator // The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob–2006. 2006. P. 643–648.
- [17] Wang L., Wang S., Cao Z., Tan M., Zhou C., Sang H., Shen Z. Motion control of a robot fish based on CPG // IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT2005. 2005. P. 1263–1268.

УДК 004.7

Лабораторный экспериментальный стенд облачных и сетевых технологий

Е. В. Плужник, Е. В. Никульчев, С. В. Паяин
НОУ ВПО Московский технологический институт «ВТУ»
119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38а
e-mail: e.pluzhnik@gmail.com, nikulchev@mail.ru, sadsema@gmail.com

Аннотация. В настоящее время имеется большой интерес к разработке информационных систем, функционирующих в облачных инфраструктурах. Актуальными, и, в целом, нерешенными остаются задачи оптимизации больших баз данных для работы в гибридной облачной инфраструктуре, обеспечения качества обслуживания (QoS) на различных уровнях облачных сервисов, динамического управления распределением облачных ресурсов в прикладных системах и многие другие. Научные исследования и разработка новых решений сильно ограничиваются, если использовать эмуляторы облака или международные коммерческие сервисы, ввиду закрытости архитектуры и ограниченности возможностей для экспериментов. Статья отвечает на вопросы о создании экспериментального облака, практически, «в домашних условиях», с возможностью регулирования ширины каналов и эмулирования задержек в передаче данных. Описывается архитектура и конфигурация экспериментального стенда. Предложенная модульная структура может быть расширена имеющимися в распоряжении вычислительными мощностями.

Ключевые слова: экспериментальный стенд, сети, виртуализация, облачные технологии.

ГРНТИ 50.39.19

1. Введение

Компьютерные сети и глобальная сеть Интернет в частности, разрастаются огромными темпами, появляется множество новых сервисов, увеличивается трафик, его типы и необходимое качество обслуживания, бурное развитие облачных технологий и пользователей. Такая тенденция требует увеличения пропускной способности и разработки новых принципов работы сети. Облачные ресурсы являются признанной неотъемлемой частью образовательных информационных систем, что особенно важно для обеспечения дистанционных технологий обучения [3].

Множество специалистов в области информационных технологий ведут разработки по созданию сети следующего поколения Next Generation Network [8]. Про-

водится множество разработок новых технологий, использующих облачные инфраструктуры [9], принципы управления и протоколов [6], [1].

Для проверки новых теоретических разработок исследователи используют программные эмуляторы сети такие как Cisco Packet Tracert, Dynamips, GNS3 и другие, дающие возможность создания разнообразных типов сетей и сервисов. Программные эмуляторы обладают рядом ограничений функционала: закрытость системы, ограниченный набор оборудования и сервисов, сложность встраивания разрабатываемых систем.

Для проведения экспериментальных исследований с облачными и сетевыми технологиями был разработан мультифункциональный экспериментальный стенд, позволяющий использовать реальные системы, исследовать поведение трафика и служб реальных систем.

Функционально испытательный стенд можно разделить на три основные группы, позволяющие создавать мультифункциональные системы под каждую исследуемую проблему (рис. 1).

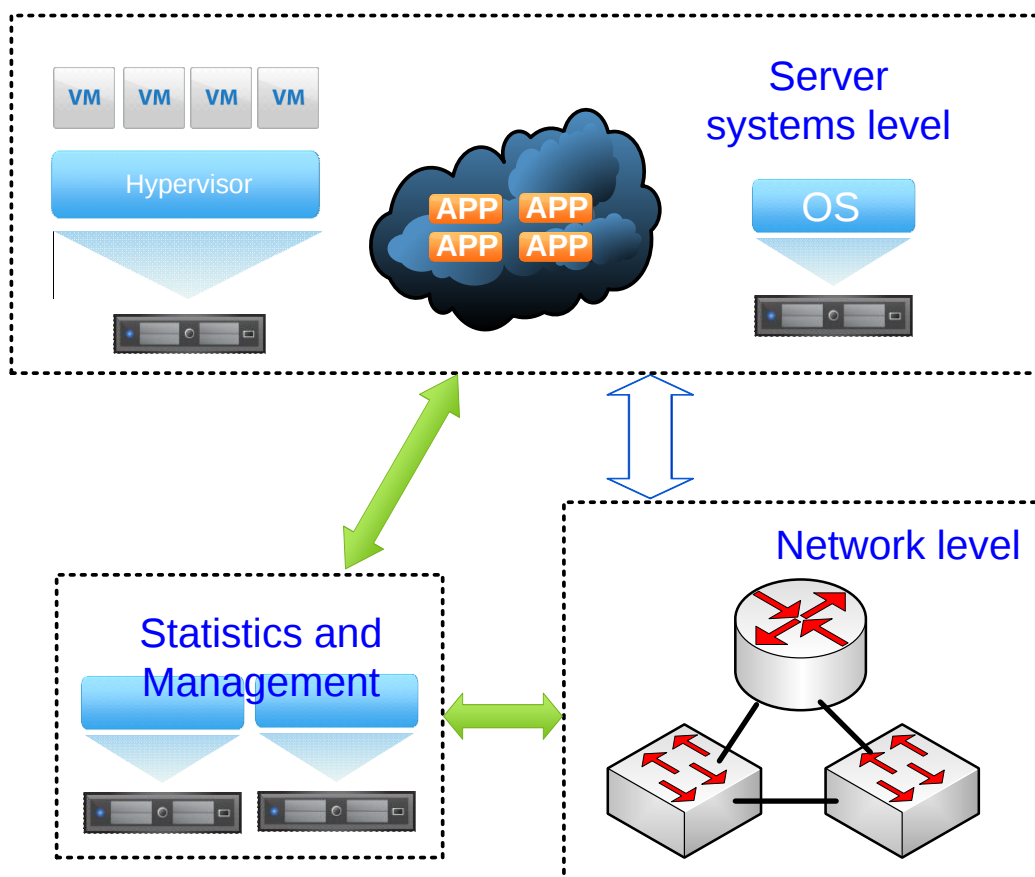


Рисунок 1. Функциональная схема экспериментального стенда

Группа управления и статистики состоит из системы сбора и хранения статистических данных, системы управления и системы генерации. В совокупности все три системы позволяют реализовывать на экспериментальном стенде полностью всю картину работы исследуемой реальной системы.

Система сбора статистики. Сбор статистики с сетевого оборудования производится сервером Paessler Router Traffic Grapher, с использованием протоколов SNMP, Nbar. В результате сбора статистики в базе данных может быть отражена информация:

- о загрузке канала связи или выделенного типа трафика;
- о размере очереди и количестве отброшенных пакетов;
- обо всех пакетах данных;
- об использовании вычислительной мощности и памяти.

Сбор статистики с серверов и виртуальных машин с использованием VM Stats и развернутых приложений позволяет получить информацию:

- о выделенной/используемой/зарезервированной процессорной мощности;
- о выделенном/используемом/зарезервированном объеме оперативной и физической памяти;
- о запросах к базам данных, поисковым системам, сервисам.

Полученная информация используется для анализа происходящих процессов, проверки сравнения работы систем, моделирования и для работы системы управления.

Система управления производит изменения параметров исследуемой системы путем отправки команд оборудованию и внесению изменений в конфигурационные файлы, в соответствии, с заданными параметрами.

Для создания последовательности работы исследуемой реальной системы, разработан метод генерации сетевого трафика и запросов к базам данных заданного вида, моделирующий интенсивность на заданном интервале. Данный метод реализован в виде программы, состоящей из двух модулей: «Генератор» и «Активатор» [1]. В модуле «Генератор» производится генерация файлов необходимого размера, определенного на основе анализа статистики реальной сети. В модуле «Активатор» производится симуляция на основе сгенерированных ранее данных в заданной последовательности через определенный интервал времени.

2. Вычислительные мощности

Группа вычислительных мощностей представляет собой набор серверов различных производителей, с разным количеством процессорных ядер, размером оперативной памяти и системами хранения, которые позволяют реализовывать, в зависимости от задачи, следующий функционал по типу организации.

Виртуализация серверов. Для проведения исследований на сервер SunFire X2200M2 установлена среда VMware ESXi, в качестве места установки использо-

вана флэш-память, настроен виртуальный коммутатор Cisco Nexus 1000 и развернуты 4 виртуальные машины на физических дисках сервера.

Физические сервера. На сервера HP Proliant DL320 установлены операционные системы Microsoft Windows и коллекторы сбора параметров работы системы.

Организация облака. Для организации облака используется семейство продуктов VMware vCloud, позволяющее организовывать облачные вычисления на всех трех уровнях. Для создания облака в экспериментальном стенде на двух серверах SunFire созданы хосты VMware ESXi, установлена система управления VCenter, установлено приложение VMware vCloud Director, с использованием базы данных MSSQL для управления облаком, в качестве vApp приложений используются созданные виртуальные сервера с установленными приложениями [10].

Внутри каждого типа организации возможны проверки новых разработок в следующих направлениях:

- анализ и управление запросами и работой баз данных;
- обработка, хранение и поиск информации;
- анализ и управление распределенными вычислениями, распределение и управление процессами и запросами;
- проверка и сравнение работы систем при различной организации вычислительных ресурсов.

В настоящее время для систем виртуализации используется вариант размещения виртуальных машин на одном физическом сервере, в дальнейшем планируется создание фермы виртуализации с использованием СХД, что позволит проводить экспериментальные исследования, связанные с миграцией виртуальных машин, балансировкой нагрузки и т. д.

В настоящий момент в работе стенда задействованы сервера HP и Sun различных моделей. Используется программное обеспечение VMware vCloud, VMWare vSphere, операционные системы и базы данных Microsoft, FreeBSD.

3. Конфигурирование сети передачи данных

Наличие более 15 физических коммутаторов Cisco 29 серии и маршрутизаторов 26 и 28 серии, а также виртуальных коммутаторов Nexus, функционала сетевого оборудования, использование протоколов динамической маршрутизации, технологий Vlan, trunk, Qos и прочих позволяет реализовать различные схемы сети для обширного круга задач [4][3].

Имеющийся функционал позволяет проводить исследования в следующих направлениях:

- исследования протоколов динамической маршрутизации;
- анализ трафика при маршрутизации и коммутации;
- динамическое управление загрузками каналов связи, приоритетами QoS;

- динамическая балансировка трафика и нагрузки, исследование систем резервирования;
- анализ узких и проблемных мест в сети в части аппаратного и программного обеспечения.

Некоторые варианты конфигураций сети представлены на рис. 2, 3.

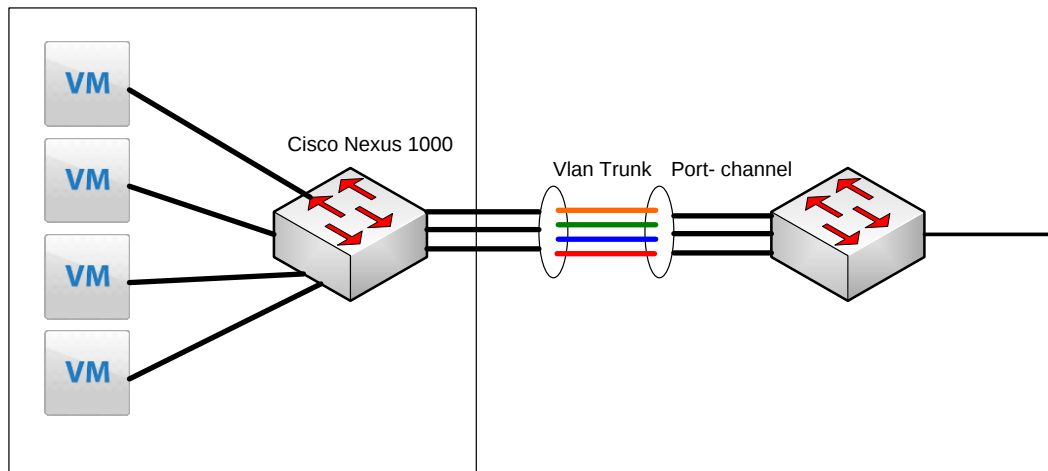


Рисунок 2. Организация подключения сервера виртуальных машин

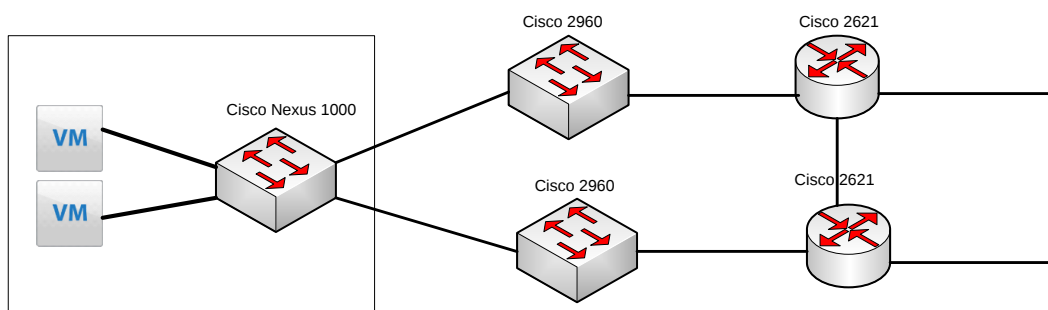


Рисунок 3. Организация подключения с системой дублирования

Для проверки работы систем хранения и обработки данных [4], [5] на физических и виртуальных системах сконфигурирован экспериментальный лабораторный стенд (рис. 4).

На сервере SunFire X2200M2 развернута среда виртуализации VMware ESXi, в качестве места установки использована флэш-память, пул памяти для виртуальных машин выделен из собранной в рейд жестких дисков сервера. Созданы две виртуальные машины. VM1_db с выделением 2 ядер процессорной мощности и 2Гб оперативной памяти, на которой установлена операционная система Windows Server 2008R2 и база данных MSSQL и VM1_file с выделением 1 ядра процессорной мощ-

ности и 1Гб оперативной памяти, на которой установлена операционная система Windows Server 2008R2. На физический сервер HP Proliant DL320 установлены операционные системы Microsoft Windows Server 2008R2 и коллекторы сбора параметров работы системы.

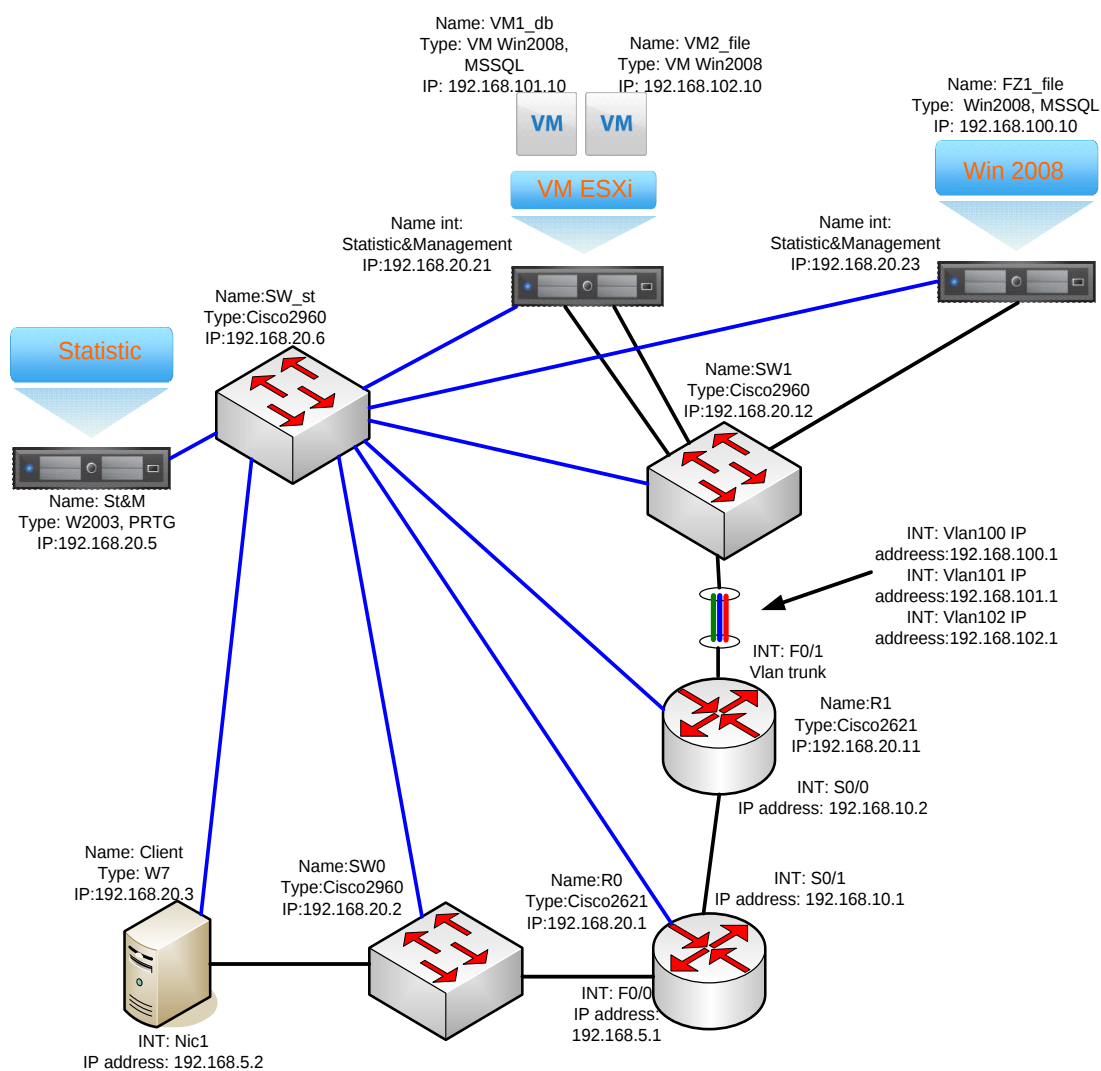


Рисунок 4. Схема экспериментального стенда

В качестве хоста источника запросов и файлов использован ПК с развернутой на нем системой генерации запросов и файлов заданной структуры.

Для связи хоста с серверами, собрана и сконфигурирована сеть, имитирующая передачу данных через сеть Интернет. Сконфигурированы адреса на интерфейсах

маршрутизаторов R0 и R1 и коммутаторах SW0, SW1 согласно схеме сети (рис. 3), настроены маршрутизация и проверена работоспособность данной схемы.

На участке связи маршрутизатора R1 и коммутатора SW1 были созданы Vlan для каждой исследуемой системы (рис. 5).

```
R1
    fast ethernet0/1.100
    encapsulation dot1q 100 native
    ip address 192.168.100.1.255.255.255.0

    fast ethernet0/1.101
    encapsulation dot1q 101
    ip address 192.168.101.1.255.255.255.0

    fast ethernet0/1.102
    encapsulation dot1q 102
    ip address 192.168.102.1.255.255.255.0

SW1
    interface FastEthernet0/1
    switchport trunk allowed vlan 100-102
    switchport mode trunk
```

Рисунок 5. Конфигурация маршрутизатора и коммутатора

На всех устройствах сконфигурирована система сбора статистики с использованием протокола SNMP. С использованием коммутатора SW_st, все устройства подключены к серверу сбора статистики отдельными каналами связи, который обеспечивает отделение трафика испытываемых систем от трафика для обработки данных и статистики. На сервере Statistic под управлением операционной системы Microsoft Windows Server 2003R2 установлен и сконфигурирован сервис Paessler Router Traffic Grapher, обеспечивающий сбор данных, и их представление в визуальном виде и базе данных.

Приведенная архитектура и конфигурация может быть легко масштабирована для любого количества ресурсов. Однако и в описанном минимальном виде лабораторный стенд позволяет проводить эксперименты для решения важных задач, связанных с обеспечением гарантированного качества обслуживания в облачных инфраструктурах.

Литература

- [1] Лазарев А. С., Лантев Н. В., Никульчев Е. В., Паяин С. В. Разработка системы динамического управления трафиком в вычислительных сетях // Известия вузов. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2010. № 5. С. 105–110.

- [2] *Mir U. M., Mir A. H., Bashir A., Chishti M. A.* DiffServ-aware Multi Protocol Label Switching based quality of service in Next Generation Networks // IEEE International Advance Computing Conference (IACC), 2014. P. 233–238 (doi: 10.1109/IAdCC.2014.6779326).
- [3] *Плужник Е. В.* Инновационное управление информационным обеспечением образовательной деятельности технологического института // Задачи системного анализа, управления и обработки информации : сб. научных трудов. Вып. 4. — М. : Изд. МТИ, 2014. С. 125–130.
- [4] *Плужник Е. В., Никульчев Е. В.* Слабоструктурированные базы данных в гибридной облачной инфраструктуре // Современные проблемы науки и образования, 2013. № 4. С. 95.
- [5] *Pluzhnik E. V., Nikulchev E. V.* Use of dynamical systems modeling to hybrid cloud database // International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2013. Vol. 6. No 12. С. 505–512.
- [6] *Pluzhnik E., Nikulchev E., Payain S.* Optimal Control of Applications for Hybrid Cloud Services // IEEE 10th World Congress on Services (SERVICES 2014), 2014.
- [7] *Pras A., Pavlou G.* Network and service management [Series Editorial] // IEEE Communications Magazine, 2014. Vol. 52. No. 1. P. 130-131 (doi: 10.1109/MCOM.2014.6710074)
- [8] *Pupatwibul P., Banjar A., Sabbagh A. A., Braun R.* An Intelligent Model for Distributed Systems in Next Generation Networks // Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence. Topics in Intelligent Engineering and Informatics. Vol. 6. — Springer, 2014. P. 315–334 (doi: 10.1007/978-3-319-01436-4_14).
- [9] *Singh D., Panda N., Mohanty A. K.* Next Generation Network: Collaboration of Grid and Cloud Computing, A Theoretical Approach // Int. Journal of Information Technology & Mechanical Engineering IJITME, 2014. Vol. 1. No. 1. P. 17–23.
- [10] vCloud Director Installation and Upgrade Guide [Электронный ресурс]. URL: https://pubs.vmware.com/vcd-55/topic/com.vmware.ICbase/PDF/vcd_55_install.pdf.

Авторы:

Евгений Владимирович Плужник, первый проректор НОУ ВПО Московский технологический институт «ВТУ»

Евгений Витальевич Никульчев, д. т. н., профессор, проректор по научной работе НОУ ВПО Московский технологический институт «ВТУ»

Семен Владимирович Паяин, к. т. н., зав. лабораторией сетевых и облачных технологий НОУ ВПО Московский технологический институт «ВТУ»

Cloud and Network Laboratory Test Bench

E. V. Pluzhnik, E. V. Nikulchev, S. V. Payain

Moscow Technological Institute

38A, Leninskiy prospect, Moscow, Russia, 119334

Abstract. There is currently great interest in the development of information systems that operate in the cloud infrastructures. Relevant, and, in general, remain unsolved tasks by optimization of large databases to work in a hybrid cloud infrastructure, quality of service (QoS) at different levels of cloud services, dynamic control of distribution of cloud resources in application systems and many others. Research and development of new solutions greatly limited if used emulators or international commercial cloud services, due to the closed architecture and limited opportunities for experimentation. Article answers questions about the establishment of a pilot cloud «at home» with the ability to adjust the width of the channel emulation and delays in data transmission. Here is describes the architecture and configuration of the experimental setup. The proposed modular structure can be expanded at the disposal of computing power.

Keywords: laboratory bench, networking, virtualization, cloud computing.

Reference

- [1] Lazarev A. S., Laptev N. V., Nikulchev E. V., Payain S. V. Razrabotka sistemy dinamicheskogo upravleniya trafikom v vychislitel'nyh setjah // Izvestiya vuzov. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela, 2010. No. 5. P. 105–110.
- [2] Mir U. M., Mir A. H., Bashir A., Chishti M. A. DiffServ-aware Multi Protocol Label Switching based quality of service in Next Generation Networks // IEEE International Advance Computing Conference (IACC), 2014. P. 233–238 (doi: 10.1109/IAdCC.2014.6779326).
- [3] Pluzhnik E. V. Innovacionnoe upravlenie informacionnym obespecheniem obrazovatel'noj dejatel'nosti tehnologicheskogo instituta // Zadachi sistemnogo analiza, upravlenija i obrabotki informacii : sb. nauchnyh trudov. Vyp. 4. — M. : MTI, 2014. P. 125–130.
- [4] Pluzhnik E. V., Nikulchev E. V. Slabostrukturirovannye bazy dannyh v gibridnoj oblachnoj infrastrukture // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya, 2013. No. 4. P. 95.
- [5] Pluzhnik E. V., Nikulchev E. V. Use of dynamical systems modeling to hybrid cloud database // International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2013. Vol. 6. No 12. C. 505–512.
- [6] Pluzhnik E., Nikulchev E., Payain S. Optimal Control of Applications for Hybrid Cloud Services // IEEE 10th World Congress on Services (SERVICES 2014), 2014.

- [7] *Pras A., Pavlou G.* Network and service management [Series Editorial] // *IEEE Communications Magazine*, 2014. Vol. 52. No. 1. P. 130-131 (doi: 10.1109/MCOM.2014.6710074)
- [8] *Pupatwibul P., Banjar A., Sabbagh A. A., Braun R.* An Intelligent Model for Distributed Systems in Next Generation Networks // *Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence. Topics in Intelligent Engineering and Informatics*. Vol. 6. — Springer, 2014. P. 315–334 (doi: 10.1007/978-3-319-01436-4_14).
- [9] *Singh D., Panda N., Mohanty A. K.* Next Generation Network: Collaboration of Grid and Cloud Computing, A Theoretical Approach // *Int. Journal of Information Technology & Mechanical Engineering IJITME*, 2014. Vol. 1. No. 1. P. 17–23.
- [10] *vCloud Director Installation and Upgrade Guide* [Электронный ресурс]. URL: https://pubs.vmware.com/vcd-55/topic/com.vmware.ICbase/PDF/vcd_55_install.pdf.

УДК 004.912

Алгебраическое представление модели формообразования естественных языков

А. В. Пруцков

*Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1
e-mail: mail@prutzkow.com*

Аннотация. Предложено алгебраическое представление модели формообразования, позволяющей описывать получение форм слов различных естественных языков из их основ. Модель используется в методе генерации и определения форм слов для решения задач морфологического синтеза и анализа текстов. Приведены примеры образования форм слов в терминологии модели.

Ключевые слова: морфологический анализ и синтез, алгебра, формообразование

ГРНТИ 20.19.27

1. Введение

Автоматическая обработка текстов (АОТ) заключается в преобразовании текстов с помощью ЭВМ. «По имеющимся в литературе оценкам, более 70 % ресурсов [знаний], накопленных в различных организациях, носит неструктурированный характер и образуется электронными текстовыми документами» [11]. Поэтому разработки в области АОТ являются актуальными.

АОТ ведется на трех уровнях:

- на семантическом уровне связываются слова, сочетания и их смысловое значение;
- на синтаксическом уровне определяется взаимосвязь слов в предложении;
- на морфологическом уровне связываются слова, предложения и их грамматические значения (падеж, время и т. п.).

С АОТ каждый из нас сталкивается практически каждый день. Примерами задач АОТ являются: машинный перевод; проверка правописания; анализ текстов и выявление в них знаний; общение ЭВМ с пользователем на естественном языке; анализ запросов в информационно-поисковых системах глобальных информационных сетей; преобразование «речь-смысл».

В каждой из перечисленных задач обработка текста осуществляется на морфологическом уровне, что определяет важность данного уровня АОТ.

На этапе морфологической обработки текстов решаются задачи генерации и определения форм слов.

Генерация формы слова (синтез, продукция) — процесс получения формы с использованием в качестве начальных параметров основы и грамматического значения (рис. 1).



Рисунок 1. Задача генерации форм слов

Определение формы слова (анализ, распознавание, интерпретация) — процесс, обратный генерации. Определение заключается в нахождении по данной словоформе ее нормальной формы (основы) и грамматического значения (рис. 2).

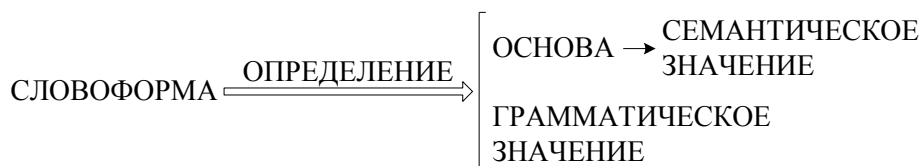


Рисунок 2. Задача определения форм слов

В современных условиях глобализации и повышения статуса языков национальных меньшинств на государственном и региональных уровнях требуется разработка многоязычных систем АОТ, а, следовательно, разработка универсальных методов для каждого уровня АОТ.

Существующие методы обработки текста на морфологическом уровне [4], [1], [5], [2] предназначены для одного или нескольких естественных языков. Для языков национальных меньшинств в России трудоемкость разработки морфологического анализатора сопоставима с написанием ключевой главы кандидатской диссертации (например, для татарского языка [3]) и работы в этом направлении продолжаются [6].

Автором статьи был предложен метод генерации и определения форм слов естественных языков различных семейств и групп [8]. В работе [7] была доказана универсальность предложенного метода. В основе предложенного метода лежит модель формообразования естественных языков.

В статье предложено использовать алгебраическое описание модели формообразования предложенного метода генерации и определения форм слов естественных языков.

2. Алгебраическое представление модели формообразования¹

Пусть $E = \{\Psi, \Omega\}$ — алгебра, где Ψ — множество слов естественного языка; Ω — множество операций над словами.

Множество $Y = S_M \cup F_M \cup \{\emptyset\}$, где S_M — множество нормальных форм слов; F_M — множество остальных форм слов; $S_M \cap F_M = \emptyset$; $\emptyset$ — пустое слово.

Пусть $x \in X, y \in Y, Z = X \times Y$. Обозначим через $\text{Im}(x, Y)$ — образ x в Y при соответствии Z и через $\text{pIm}(y, X)$ — прообраз y в X при соответствии Z .

Соответствие $L \subset S_M \times F_M$ обладает следующими свойствами:

- 1) $|\text{Im}(S, F_M)| \geq 0$, где $S \in S_M$;
- 2) $|\text{pIm}(F, S_M)| = 1$, где $F \in F_M$;
- 3) $\forall S_i, \forall S_j: (\text{Im}(S_i, F_M) \cap \text{Im}(S_j, F_M) = \emptyset)$, где $S_i, S_j \in S_M$; $i, j = \overline{1, N_S}$, $i \neq j$;

$N_S = |S_M|$.

Множество $\Omega = \Theta_M \cup \Theta'_M$, где Θ_M — множество прямых операций; Θ'_M — множество обратных операций; $\Theta_M \cap \Theta'_M = \emptyset$; $|\Theta_M| = |\Theta'_M| = N_\Theta$.

Множество $T = \{(\Theta_i, \Theta'_i) | i = 1, 2, \dots, N_\Theta\} \subset \Theta_M \times \Theta'_M$ — взаимно однозначное соответствие.

Пусть множество Θ_M включает основные операции:

1–2) добавление подстроки P к форме $A \in \Psi$ слева (префикс) (обозначается $P+$) или справа (постфикс) ($+P$);

3) замена в форме A первого слева вхождения подстроки H на подстроку P ($H \rightarrow P$).

Тогда множество Θ'_M включает операции, обратные основным:

1–2) отделение подстроки P от формы A слева ($P-$) или справа ($-S$);

3) обратная замена первой слева подстроки P на подстроку S ($H \leftarrow P$).

Множество Θ_M может быть расширено другими преобразованиями, специфичными для естественного языка.

Операции множества Ω в дальнейшем будем называть преобразованиями.

Пусть $Q \in \Omega$ — преобразование, а $Q' \in \Omega$ — преобразование, обратное данному. Пара преобразований Q и Q' обладает следующим свойством:

$$[(Q \times Q') \in T] \otimes [(Q' \times Q) \in T] = 1, \quad (1)$$

где $\otimes$ — логическая операция сложения по модулю 2 (исключающее или); 1 — логическая константа «истина».

¹ Формообразование — это образование грамматических форм слова.

Цепочка преобразований (прямая цепочка преобразований, комбинированное преобразование) — это конечная упорядоченная последовательность (вектор) преобразований:

$$R = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \in R_M,$$

где $Q_1, Q_2, \dots, Q_n \in \Omega$; $n \geq 1$; R_M — множество цепочек.

Обратная цепочка преобразований R' представляет собой обратную последовательность преобразований, обратных данным:

$$R' = (Q'_n, Q'_{n-1}, \dots, Q'_1) \in R_M \quad R' = (Q'_n, Q'_{n-1}, \dots, Q'_1) \in R_M,$$

где $Q'_n, Q'_{n-1}, \dots, Q'_1 \in \Omega$.

Все пары преобразований Q_i и Q'_i , где $i = \overline{1, n}$, в прямой и обратной цепочках обладают свойством (1).

Пусть $\mathfrak{R} \in R_M$. Обозначим применение к форме A цепочки $\mathfrak{R}$ как $A(\mathfrak{R})$. Результат этой операции $B = A(\mathfrak{R})$, где $B \in \Psi$, определяется следующим выражением:

$$B = \begin{cases} A(R), & \text{если } (\mathfrak{R} \text{ применима к } A) \text{ и } (A(\mathfrak{R}) \in \Psi), \\ \emptyset, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Цепочка $\mathfrak{R}$ применима к форме A , если возможно применение всех преобразований цепочки к форме. Например, невозможно отделить постфикс из-за его отсутствия в форме A или невозможно произвести замену подстроки из-за отсутствия исходной подстроки в форме A .

Назовем нулевой цепочкой $R_0 \in R_M$ цепочку, не изменяющую форму A :

$$A = A(R_0).$$

Нулевая цепочка может быть реализована разными способами, например:

$$R_0 = (+\emptyset) \text{ или } R_0 = (+B; -B).$$

Нулевая цепочка используется с неизменяемыми нормальными формами.

Таким образом, множество R_M включает прямые цепочки, в том числе и нулевые, и обратные им.

Прямая цепочка связывает форму S с формой $F \in Im(S, F_M)$ при L :

$$\forall F \exists S \exists R : (F = S(R)).$$

Обратная цепочка связывает форму F с формой $F \in pIm(F, S_M)$ при L :

$$\forall F \exists S \exists R : (S = F(R')).$$

Для решения задачи генерации форм слов необходимо найти такую цепочку R , что

$$A = S(R),$$

где $S \in S_M$; $(A \in Im(S, F_M) \text{ при } L) \text{ или } (A = S)$.

Решение задачи определения форм слов включает нахождение цепочки R' такой, что

$$S = A(R'),$$

где $(S \in \text{pIm}(A, S_M))$ при L или $(S = A)$.

Цепочка преобразований должна обладать следующими свойствами:

- 1) однозначность результата: цепочка всегда приводит к одному и тому же результату;
- 2) обратимость действия: применение к форме A прямой цепочки, а затем обратной цепочки не изменяет ее:

$$A = (A(R))(R').$$

Равенство $B = A(\mathfrak{R}) = \wp$ может быть верно в следующих случаях:

- $\mathfrak{R}$ — прямая цепочка, $A \in S_M$, но $B \notin \text{Im}(A, F_M)$ при L ;
- $\mathfrak{R}$ — обратная цепочка, $A \in F_M$, но $B \notin \text{pIm}(A, S_M)$ при L ;
- цепочка $\mathfrak{R}$ не обладает свойствами однозначности результата или обратимости действия.

Соотношение между мощностями множеств, как правило, имеет вид

$$|R_M|/2 < |S_M| \ll |F_M|.$$

3. Пояснения к алгебраическому представлению модели формообразования

I. Данная модель является открытой, к модели можно добавлять другие типы преобразований. Например, в языках с направлением письма справа налево (например, арабском и др.) необходима замена не первой слева, а первой справа подстроки H . Цепочки с новыми типами преобразований должны обладать свойствами однозначности результата и обратимости действия.

II. Примеры цепочек преобразований, не обладающих свойствами однозначности результата и обратимости действия.

Пример 1. Преобразование, заключающееся в удалении какой-нибудь подстроки H , не обладает свойством однозначности, например, в случае наличия нескольких подстрок H в форме S .

Преобразование, заключающееся в удалении всех вхождений подстроки H в форме S , не обладает свойством обратимости. Обратного преобразования к данному преобразованию не существует, так как невозможно восстановить позиции в форме S , куда необходимо вставить подстроку H .

Некоторые преобразования являются применимыми к любой форме F (всегда применимыми), например, добавление подстрок справа и слева. Однако обратные им преобразования, использующиеся в задаче определения форм слов, не являются всегда применимыми. Рекомендуется не использовать всегда применимые преобра-

зования в цепочках, особенно при решении задачи определения, так как это увеличивает трудоемкость.

III. Примеры описания формообразования различных естественных языков цепочками преобразований. В качестве нормальной формы S рассматривается ее основа.

Пример 2. Глагол немецкого языка *aufmachen* — «открывать, оформлять» в настоящем времени *das Präsens des Indikativs* имеет следующую схему спряжения:

<i>mache auf</i>	<i>machen auf</i>
<i>machst auf</i>	<i>macht auf</i>
<i>macht auf</i>	<i>machen auf</i> .

Для спряжения глагола *aufmachen* в 3-м лице единственном числе цепочка R будет состоять из трех преобразований:

Q_1 : отделить префикс «auf»: *auf-*;

Q_2 : добавить постфикс «t»: *+t*;

Q_3 : добавить пробел и префикс «auf» в качестве постфикса: *+_auf*,

и иметь вид

$$R = (Q_1, Q_2, Q_3) = (auf-, +t, +_auf).$$

Пусть необходимо получить форму 3-го лица единственного числа $F = \langle \text{macht auf} \rangle$ из основы неопределенной формы $S = \langle \text{aufmach} \rangle$. Для этого необходимо применить цепочку R к основе S :

1) отделить префикс «auf»: *aufmach* → *mach*;

2) добавить постфикс «t»: *mach* → *mach*t;

3) добавить пробел и префикс «auf» в качестве постфикса: *mach*t → *mach*t auf.

В результате применения цепочки R , состоящей из трех преобразований, из основы $S = \langle \text{aufmach} \rangle$ получена словоформа $F = \langle \text{macht auf} \rangle$.

Чтобы получить из словоформы $F = \langle \text{macht auf} \rangle$ основу $S = \langle \text{aufmach} \rangle$, необходимо применить обратную цепочку преобразований R' , состоящую из обратных преобразований цепочки R , выполненных в обратной последовательности:

Q'_3 : отделить пробел и постфикс «auf»: *-_auf*,

Q'_2 : отделить постфикс «t»: *-t*;

Q'_1 : добавить постфикс «auf» в качестве префикса: *auf+*;

и иметь вид

$$R' = (Q'_3, Q'_2, Q'_1) = (-_auf, -t, auf+).$$

Применим обратную цепочку R' к словоформе $F = \langle \text{macht auf} \rangle$:

1) отделим пробел и постфикс «auf»: *mach*t auf → *mach*t;

2) отделим постфикс «t»: *mach*t → *mach*;

3) добавим постфикс «auf» в качестве префикса: *mach* → *aufmach*.

В результате применения обратной цепочки R' , состоящей из трех преобразований, из словоформы $F = \langle \text{macht auf} \rangle$ получена основа $S = \langle \text{aufmach} \rangle$. □

Для глаголов многих естественных языков свойственны аналитические формы.

Пример 3. Глагол английского языка *wait* третьего лица в настоящем времени *Present Perfect Continuous* имеет форму *has been waiting*. Для получения данной формы необходимо применить к основе цепочку

$$R = (Q_1, Q_2, Q_3) = (+ing, been_+, has_+).$$

Применим прямую цепочку преобразований к основе $S = \langle wait \rangle$:

- 1) добавим постфикс *«ing»*: *wait* → *waiting*;
- 2) добавим префикс с пробелом *«been_»*: *waiting* → *been waiting*;
- 3) добавим префикс с пробелом *«has_»*: *been waiting* → *has been waiting*.

В результате применения цепочки из трех преобразований из основы $S = \langle wait \rangle$ получена словоформа $F = \langle has been waiting \rangle$.

Применим обратную цепочку преобразований к форме $F = \langle has been waiting \rangle$:

- 1) отделим *«has_»*: *has been waiting* → *been waiting*;
- 2) отделим *«been_»*: *been waiting* → *waiting*;
- 3) отделим *«ing»*: *waiting* → *wait*.

Результатом применения данной цепочки является основа $S = \langle wait \rangle$. □

IV. Минимальная длина цепочки равна одному преобразованию, максимальная длина цепочки на практике не превышает 5–6 преобразований. Цепочка преобразований конечна, так как основа и форма слова — это конечные последовательности символов, и последовательность операций (преобразований), которая позволяет преобразовать одну последовательность символов в другую последовательность символов, тоже конечна.

Цепочка преобразований представляет собой алгоритм преобразования — последовательность шагов, необходимых для получения из основы или одной формы слова другой формы слова. Таким образом, цепочка преобразований — это универсальный инструмент для описания формообразования.

V. Слова, имеющие одинаковые цепочки для получения словоформ, соответствующих одному грамматическому значению, объединяются в один тип формообразования. Слова, относящиеся к одному типу формообразования, имеют словоформы с одинаковыми грамматическими значениями, полученные одними и теми же цепочками преобразований.

Классификация слов русского языка по типам формообразования приведена в работе Г. Г. Белоногова и В. И. Богатырева [2]. Классификации слов других языков можно найти в специальной литературе или словарях, справочниках и учебниках. Существующие классификации слов по типам формообразования необходимо модифицировать в соответствии с предлагаемой моделью формообразования.

В настоящее время ведется разработка систем проверки знаний по морфологии естественных языков с динамической генерацией вариантов заданий [9], [10].

Литература

- [1] Goldsmith J. Unsupervised Learning of the Morphology of a Natural Language // The Last Phonological Rule / J. Goldsmith (ed.).— Chicago : University of Chicago Press, 1998. P. 173–194.
- [2] Белоногов Г. Г., Богатырев В. И. Автоматизированные информационные системы / под ред. К. В. Тараканова. — М. : Сов. радио, 1973.
- [3] Гильмуллин Р. А. Математическое моделирование в многоязыковых системах обработки данных на основе автоматов конечных состояний / Дисс. ... канд. физ.-мат. наук 05.13.11. — Казань : Казан. гос. ун-т им. В. И. Ульянова-Ленина, 2009.
- [4] Koskeniemi K. Two-level Morphology: A General Computational Model for Word-form Recognition and Production. Publications 11.— Helsinki: University of Helsinki, 1983.
- [5] Мальковский М. Г. Диалог с системой искусственного интеллекта. — М.: Изд-во МГУ, 1985.
- [6] Орехов Б. В., Слободян Е. А. Проблемы автоматической морфологии агглютинативных языков и парсер башкирского языка // Информационные технологии и письменное наследие: материалы межд. науч. конф. — Уфа; Ижевск : Вагант, 2010. С. 167–171.
- [7] Пруцков А. В. Генерация и определения форм слов естественных языков на основе их последовательных преобразований // Вестник РГРТУ. 2009. № 27. С. 51–58.
- [8] Пруцков А. В. Морфологический анализ и синтез текстов посредством преобразований форм слов // Вестник РГРТА. 2004. № 15. С. 70–75.
- [9] Пруцков А. В. Применение информационных ресурсов для автоматизации обучения и проверки знаний // Информационные ресурсы России. 2005. № 1. С. 18–20.
- [10] Пруцков А. В. Статический и динамический подходы к проектированию подсистем проверки знаний автоматизированных обучающих систем // Информационные ресурсы России. 2006. № 1. С. 27–29.
- [11] Фомичев В. А. Формализация проектирования лингвистических процессоров. — М. : Макс Пресс, 2005.

Автор: Александр Викторович Пруцков, к. т. н., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета

An Algebraic Representation of the Natural Language Wordform Building Mode

A. V. Prutzkov

Ryazan state radio engineering university
59/1, Gagarina street, Ryazan, 390005

Abstract. It proposed an algebraic representation of wordforming model for building different natural languages wordforms. Model can be used in the universal wordform generation and recognition method for morphological synthesis and analysis. It exemplified wordform building in the model terms.

Keywords: morphological analysis and synthesis, algebra, wordform building

Reference

- [1] Goldsmith J. Unsupervised Learning of the Morphology of a Natural Language // The Last Phonological Rule / J. Goldsmith (ed.).— Chicago: University of Chicago Press, 1998. P. 173–194.
- [2] Belonogov G. G., Bogatyrev V. I. Avtomatizirovannye informacionnye si-stemy / Pod red. K.V. Tarakanova. — M. : Sov. radio, 1973.
- [3] Gilmullin R. A. Matematicheskoe modelirovanie v mnogojazykovykh sistemah obrabotki dannyh na osnove avtomatov konechnykh sostojanij / Diss. ... kand. fiz.-mat. nauk: 05.13.11. — Kazan : Kazan. gos. un-t im. V. I. Uljanova-Lenina, 2009.
- [4] Koskenniemi K. Two-level Morphology: A General Computational Model for Wordform Recognition and Production. Publications 11.— Helsinki : University of Helsinki, 1983.
- [5] Malkovskij M. G. Dialog s sistemoj iskusstvennogo intellekta. — M. : Izd-vo MSU, 1985.
- [6] Orehov B. V., Slobodjan E. A. Problemy avtomaticheskoy morfologii aggljutivnykh jazykov i parser bashkirskogo jazyka // Informacionnye tehnologii i pis'mennoe nasledie: materialy mezhd. nauch. conf. — Ufa; Izhevsk : Vagant, 2010. P. 167–171.
- [7] Prutzkov A. V. Generacija i opredelenija form slov estestvennykh jazykov na osnove ih posledovatel'nyh preobrazovanij // Vestnik RGRTU. 2009. No. 27. P. 51–58.
- [8] Prutzkov A. V. Morfologicheskij analiz i sintez tekstov posredstvom preobrazovanij form slov // Vestnik RGRTU. 2004. No. 15. P. 70–75.
- [9] Prutzkov A. V. Primenenie informacionnykh resursov dlja avtomatizacii obuchenija i proverki znanij // Informacionnye resursy Rossii. 2005. No. 1. P. 18–20.

- [10] *Prutkov A. V.* Staticheskij i dinamicheskij podhody k proektirovaniju podsistem proverki znaniy avtomatizirovannyh obuchajushhih sistem // *Informacionnye resursy Rossii*. 2006. No. 1. P. 27–29.
- [11] *Fomichev V.A.* Formalizacija proektirovanija lingvisticheskikh processorov. — M. : Maks Press, 2005.

УДК 621.391

Принципы проектирования приложений с помощью проблемно-ориентированного объектного программирования

Д. М. Цыбулько

Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1
e-mail: vpm@rsreu.ru

Аннотация. Рассмотрены этапы проектирования приложений с помощью предложенного автором проблемно-ориентированного объектного программирования (ПООП). Приведен пример описания с помощью ПООП продукционных правил системы логического вывода.

Ключевые слова: предметно-ориентированные языки, объектно-ориентированное программирование.

ГРНТИ 50.05.13

В настоящее время существенно увеличилось количество сложных программ, разрабатываемых для персональных компьютеров. Многие из таких программ по причине изменений внешних условий со временем требуют изменений порядка своей работы. Существует два основных подхода к решению данной задачи. Одним из способов является изменение исходного кода программы. Код может изменяться разработчиком данной системы, который одновременно является и пользователем или вызывается пользователем для изменения кода по мере надобности. Вторым способом является добавление в систему поддержки макросов. Однако далеко не каждый пользователь способен освоить этот инструмент, требующий от него дополнительных знаний и навыков работы с языками программирования. Оба этих подхода требуют вмешательства программиста при каждом изменении или дополнительных знаний от пользователя. Поэтому для решения проблемы внесения изменений в программу был предложен подход, названный проблемно-ориентированным объектным программированием (ПООП) [5]. В основе данного подхода к программированию лежит разработанный язык программирования, который состоит всего из одной конструкции. Структура и описание конструкции ПООП также приведены в работе [5]. С помощью этой конструкции описываются объекты, составляющие сценарий работы программы для решения задачи из некоторой предметной области. ПООП позволяет существенно упростить процесс изменения порядка работы системы и сделать его более доступным для пользователей, знакомыми лишь с основами программирования.

Процесс разработки приложения с использованием ПООП можно разделить на следующие этапы:

- 1) анализ предметной области;
 - 2) выделение типов объектов, описание полей, условий и их действий;
 - 3) разработка программного кода, реализующего действия объектов.
- Данный процесс аналогичен процессу проектирования баз данных (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение этапов проектирования

База данных	Сценарий ПООП
Анализ предметной области	Анализ предметной области
Выделение типов объектов, описание полей, ограничений, связей между данными	Выделение типов объектов, описание полей, условий и их действий
Написание сценария, реализующего создание модели базы данных	Разработка программного кода, реализующего действия объектов

Основное отличие процесса разработки базы данных и приложения с использованием ПООП заключается в том, что при проектировании баз данных используется предметно-ориентированный подход, а при проектировании сценария ПООП — проблемно-ориентированный. При проектировании сценария, состоящего из конструкций ПООП, первичным будет являться решение самой проблемы, а не доскональное описание объектов предметной области. Данное отличие проявляется на третьем этапе, где разрабатывается программный код реализации действий объектов ПООП в данной предметной области.

Схема взаимодействия между программой ПООП и программными функциями системы представлена на рис. 1.

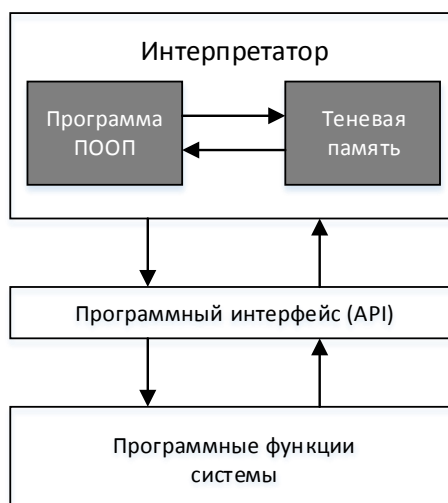


Рисунок 1. Схема взаимодействия между сценарием ПООП и функциями программы (системы)

Программа выполняется специальной программой (интерпретатором). Интерпретатор имеет собственную «теневую» память, с помощью которой объекты программы хранят и обмениваются данными. Интерпретатор сам не выполняет никаких операций с данными. Он, используя программный интерфейс (Application Programming Interface), лишь вызывает программные функции целевой программы, которые необходимы для решения поставленной задачи.

Рассмотрим пример сценария на ПООП. В статье [1] приведен пример классификации инвестиционных объектов на основе четырех критериев: конкурентоспособность проекта, актуальность и новизна проекта, социально-экономическая значимость проекта для города и области, финансовый уровень предприятия-заявителя. На основании этих критериев требуется принять решение об отнесении проекта к одному из четырех классов «Принять проект к реализации», «Принять проект к реализации при наличии средств», «Отложить рассмотрение проекта» и «Отклонить проект». В той же работе [1] приведены производственные правила для принятия решения. Обозначим их как R1, R2, ..., R10 и запишем их как объект типа **ControlCondition**, который имеет единственное поле

Condition — условие;

и две ветви:

iftrue (обозначается T) — выполнить команды, если условие истинно;

iffalse (F) — выполнить команды, если условие ложно.

Общий вид объекта типа **ControlCondition**:

```
C1 = ControlCondition
{
    Condition: <условие>
    iftrue
        call <объект 1>;
    iffalse
        call <объект 2>;
}
```

Правила R1, R2, ..., R10 будут описаны с помощью объекта типа **ControlCondition** следующим образом.

```
R1 = ControlCondition
{
    Condition:
        («конкурентоспособность проекта» = «очень высокая») AND
        («актуальность и новизна проекта» = «очень высокая») AND
        («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «очень высокая») AND
        («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «очень высокий»)
    iftrue
        call A;
    iffalse
        call R2;
}

R2 = ControlCondition
{
    Condition:
        («конкурентоспособность проекта» = «высокая») AND
        («актуальность и новизна проекта» = «очень высокая») AND
```

```

        («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «очень
высокая») AND
        («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «очень высокий»)
        iftrue
            call A;
        iffalse
            call R3;
    }

R3 = ControlCondition
{
    Condition:
        («конкурентоспособность проекта» = «выше средней») AND
        («актуальность и новизна проекта» = «выше средней») AND
        («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «высо-
кая») AND
        («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «высокий»)
        iftrue
            call B;
        iffalse
            call R4;
    }

R4 = ControlCondition
{
    Condition:
        («конкурентоспособность проекта» = «средняя») AND
        («актуальность и новизна проекта» = «средняя») AND
        («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «выше
средней») AND
        («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «средний»)
        iftrue
            call D;
        iffalse
            call R5;
    }

R5 = ControlCondition
{
    Condition:
        («конкурентоспособность проекта» = «ниже средней») AND
        («актуальность и новизна проекта» = «ниже средней») AND
        («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «сред-
няя») AND
        («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «средний»)
        iftrue
            call D;
        iffalse
            call R6;
    }

R6 = ControlCondition
{
    Condition:
        («конкурентоспособность проекта» = «ниже средней») AND
        («актуальность и новизна проекта» = «ниже средней») AND
        («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «ниже
средней») AND
        («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «ниже среднего»)
        iftrue
            call D;
        iffalse
            call R7;
    }

```

```

R7 = ControlCondition
{
    Condition:
    («конкурентоспособность проекта» = «низкая») AND
    («актуальность и новизна проекта» = «низкая») AND
    («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «очень
низкая») AND
    («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «очень низкий»)
    iftrue
        call J;
    iffalse
        call R8;
}

R8 = ControlCondition
{
    Condition:
    («конкурентоспособность проекта» = «очень низкая») AND
    («актуальность и новизна проекта» = «очень низкая») AND
    («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «низ-
кая») AND
    («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «низкий»)
    iftrue
        call J;
    iffalse
        call R9;
}

R9 = ControlCondition
{
    Condition:
    («конкурентоспособность проекта» = «низкая») AND
    («актуальность и новизна проекта» = «низкая») AND
    («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «низ-
кая») AND
    («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «низкий»)
    iftrue
        call J;
    iffalse
        call R10;
}

R10 = ControlCondition
{
    Condition:
    («конкурентоспособность проекта» = «очень низкая») AND
    («актуальность и новизна проекта» = «очень низкая») AND
    («социально-экономическая значимость проекта для города и области» = «очень
низкая») AND
    («финансовый уровень предприятия-заявителя» = «очень низкий»)
    iftrue
        call J;
    iffalse
        call I;
}

```

Определим классы, связанные с принятием решения о проектах, как объекты ПООП следующих типов:

- **ApproveBut** (B), выполняется при принятии проекта к реализации при наличии средств;

- **DeferProject (D)**, выполняется, если проект откладывается на неопределенный срок;
- **RejectProject (J)**, выполняется при отклонении проекта;
- **ImpossibleToDecide (I)**, выполняется, если решение по проекту не может быть принято.

Описание продукционных правил с помощью ПООП представляет собой алгоритм логического вывода новых знаний в продукционной модели (рис. 2, на примере из работы [2]).

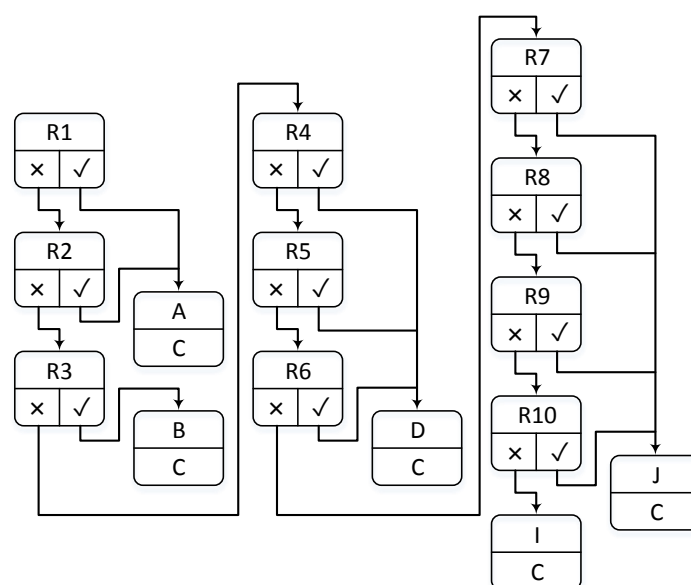


Рисунок 2. Сценарий логического вывода

Заключение. Использование концепции ПООП при разработке систем с изменяющимся поведением позволяет существенно упростить процесс внесения изменений в сценарий работы программы. Пользователю не требуется вносить изменения в исходный код программы, а всего лишь необходимо отредактировать файл сценария, причем для этого не требуется специальных знаний языков программирования. При этом концепция позволяет существенно сократить издержки на дальнейшую поддержку проекта за счет того, что вносить изменения в сценарий будет непосредственно сам пользователь, а не разработчик.

Планируется также использовать ПООП для реализации сценариев проверки знаний в Интернет-приложении для обработки количественных числительных естественных языков [4] и других автоматизированных обучающих систем, в том числе с использованием генерации и определения форм слов [3], а также алгоритмов работы систем адаптивной ускоренной маршрутизации в динамических корпоративных сетях [2].

Литература

- [1] Гусева М. В., Демидова Л. А. Классификация инвестиционных проектов на основе систем нечеткого вывода и мультимножеств // Вестник РГРТУ. 2006. № 19. С. 157–165.
- [2] Перепелкин Д. А., Перепелкин А. И. Алгоритм адаптивной ускоренной маршрутизации в условии динамически изменяющихся нагрузок на линиях связи в корпоративной сети // Информационные технологии. 2011. № 3. С. 2–7.
- [3] Пруцков А. В. Определение и генерация сложных форм слов естественных языков при морфологическом анализе и синтезе // Известия Таганрогского государственного радиотехнического университета. 2006. Т. 70. № 15. С. 10–14.
- [4] Пруцков А. В., Цыбулько Д. М. Интернет-приложение метода обработки количественных числительных естественных языков // Вестник РГРТУ. 2012. № 41. С. 70–74.
- [5] Пруцков А. В., Цыбулько Д. М. Проблемно-ориентированное объектное программирование // Вестник РГРТУ. 2013. № 45. С. 57–62.

Автор: Дмитрий Михайлович Цыбулько, магистрант кафедры электронных вычислительных машин Рязанского государственного радиотехнического университета.

The Principles of Application Design by means of Problem Driven Object Programming

D. M. Tsybulko

*Ryazan state radio engineering university
59/1, Gagarina street, Ryazan, 390005*

Abstract. Different steps of application design by using problem-driven object programming (PDOP) are considered in the article. The article brings an example of description by means of PDOP production rules in logical deduction system.

Keywords: domain-specific language, object-oriented programming

Reference

- [1] *Guseva M. V., Demidova L. A. Klassifikacija investicionnyh proektov na osnove sistem nechetkogo vyvoda i mul'timnozhestv // Vestnik RGRTU. 2006. No. 19. P. 157–165.*
- [2] *Perepelkin D. A., Perepelkin A. I. Algoritm adaptivnoj uskorennoj marshrutizacii v uslovii dinamicheski izmenjajushhihsja nagruzok na linijah svjazi v korporativnoj seti // Informacionnye tehnologii. 2011. No. 3. P. 2–7.*
- [3] *Prutzkov A. V. Opredelenie i generacija slozhnyh form slov estestvennyh jazykov pri morfologicheskom analize i sinteze // Izvestija Taganrogskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2006. Vol. 70. No. 15. P. 10–14.*
- [4] *Prutzkov A. V., Tsybulko D. M. Internet-prilozhenie metoda obrabotki kolichestvennyh chislitel'nyh estestvennyh jazykov // Vestnik RGRTU. 2012. No. 41. P. 70–74.*
- [5] *Prutzkov A. V., Tsybulko D. M. Problemno-orientirovannoe obektnoe programmirovanie // Vestnik RGRTU. 2013. No. 45. P. 57–62.*

УДК 621.391:519.72

Исследование эффективности многопорогового декодера в беспроводных каналах связи

Д. А. Шевляков

Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
e-mail: dima-shevlyakov@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с эффективностью декодирования многопороговых методов коррекции ошибок в типичных многолучевых каналах связи с замираниями. Проведено исследование характеристик при совместном использовании многопорогового декодера и OFDM с различными характеристиками. Показано, что многопороговые декодеры способны обеспечивать достаточно высокую достоверность передаваемых данных при большом количестве ошибок.

Ключевые слова: замирание сигнала, беспроводные системы передачи данных, помехоустойчивое кодирование, самоортогональные коды, многопороговые декодеры, достоверность передачи данных, компьютерное моделирование, межсимвольная интерференция.

ГРНТИ 49.13.15

1. Введение

Сегодняшнюю повседневную жизнь нельзя представить себе без передачи различного рода информации. Передача может осуществляться как проводными, так и беспроводными каналами связи. На сегодняшний день наиболее перспективными, востребованными и представляющими наибольший интерес, являются беспроводные каналы связи. Применение беспроводных каналов в составе цифровых систем передачи информации имеет много преимуществ в сравнении с проводными, но имеет один значительный недостаток — малую помехозащищенность. Для борьбы с упомянутым недостатком применяется помехоустойчивое кодирование. В настоящее время одним из лучших, по соотношению эффективности и сложности реализации, является метод многопорогового декодирования (МПД) самоортогональных кодов (СОК), характеризующийся значительным уровнем энергетического выигрыша и очень высоким быстродействием. Подробное описание и принцип работы МПД можно найти в [1], [2]. Следует отметить, что большая часть результатов исследований, представленных в публикациях по МПД, получена для каналов связи с аддитивным белым Гауссовским шумом (АБГШ), т. е. в каналах с независимыми ошибками без замираний и многолучевого распространения сигнала. В то же время

реальные каналы часто характеризуются более сложным характером ошибок, вызванным многолучевым распространением сигнала.

К основным эффектам многолучевого распространения сигнала относят замирание сигнала, возникающее из-за того, что множественные радиосигналы прибывают на приемник в одно и то же время и имеют разницу фаз в 180° и межсимвольную интерференцию (МСИ), которая появляется из-за разницы во времени между базовым сигналом и множественными отраженными копиями [4].

Для борьбы с замираниями и МСИ наилучшие результаты дает комплексное применение различных подходов, например, использование цифровой схемы модуляции, называемой OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing), и помехоустойчивого кодирования.

2. Результаты моделирования для каналов с релейевскими и райсовскими замираниями

При получении представленных далее характеристик использовались МПД для самоортогонального кода с кодовой скоростью $R = 1/2$, кодовым расстоянием $d = 17$ и длиной около $n = 32000$ битов, модуляция типа QPSK и демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно принятых битов. Результаты моделирования получены с помощью разработанных программных средств моделирования системы передачи данных.

На рис. 1 кривой 1 представлен пример зависимости вероятности ошибки декодирования (BER) МПД от уровня шума в канале (E_b / N_0) с АБГШ (замирания отсутствуют). С данной кривой в дальнейшем будем сравнивать результаты моделирования, полученные для каналов с замираниями [3].

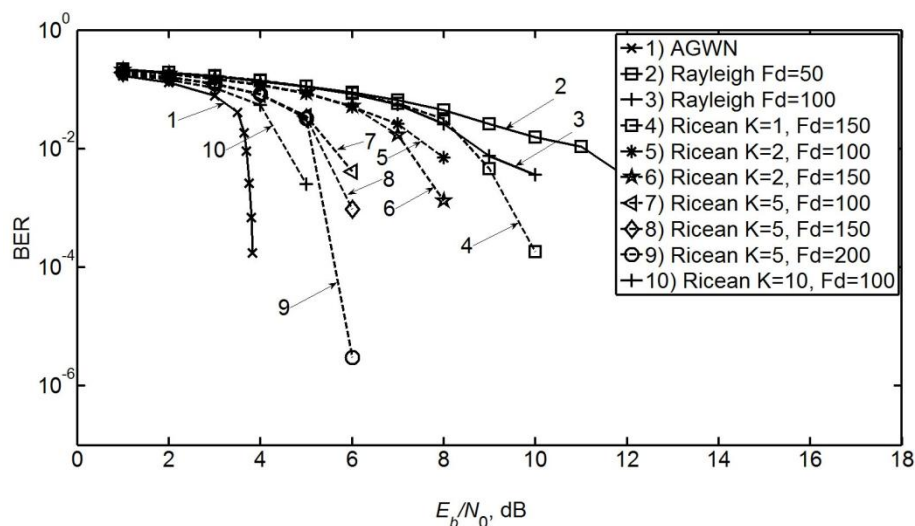


Рисунок 1. Характеристики МПД в канале с замираниями

Кривыми 2 и 3 на данном рисунке показаны характеристики МПД в канале с коррелированными релеевскими замираниями с доплеровской частотой $F_d = 50$ и 100 Гц соответственно. При этом в приемник от передатчика приходят только отраженные лучи, т. е. прямой видимости между ними нет. Заметим, что в данном случае наблюдается существенное ухудшение характеристик по сравнению с каналом с АБГШ. При этом с более быстрыми замираниями МПД справляется лучше. Это объясняется тем, что при медленных замираниях часто ошибочными оказываются достаточно длинные последовательности рядом лежащих битов, искажая значительную часть кодового блока. И с такой долей искаженных битов методы МПД как, впрочем, и любые другие методы коррекции ошибок, не справляются. Одним из возможных способов повышения эффективности МПД в таких условиях видится использование дополнительного перемежителя, длина которого должна составлять сотни тысяч битов.

Оставшиеся кривые соответствуют случаю работы МПД в канале с райсовскими замираниями, когда между передатчиком и приемником есть прямая видимость. Кривая 4 соответствует варианту с коэффициентом Райса $K = 1$ и доплеровской частотой $F_d = 150$ Гц. Канал при получении кривых 5 и 6 имел $K=2$ и $F_d = 100$ и 150 Гц. Кривым 7, 8 и 9 соответствуют значения коэффициента Райса $K=5$ и доплеровские частоты $F_d = 100, 150$ и 200 Гц соответственно. И, наконец, кривой 10 соответствуют $K=10$ и $F_d=100$ Гц. Сравнивая перечисленные графики между собой и с ранее рассмотренными графиками видно, что чем больше коэффициент Райса, т. е. чем больше мощность прямого луча, тем лучше обеспечиваемые характеристики помехоустойчивости. Но при этом даже при $K = 10$ (т. е. при десятикратном превосходстве мощности прямого луча над мощностью отраженных лучей) наблюдается потеря в энергетике около 2 дБ по сравнению с гауссовским каналом. Кроме этого видно, что и в данном случае МПД лучше справляется с более быстрыми замираниями, поскольку при этом меньше вероятность, что значительная часть кодового блока будет подвержена сильным замираниям.

Следует заметить, что рассмотренный вариант применения МПД позволяет успешно бороться только с частотно-неселективными замираниями, такими как: релеевские замирания и замирания райса. В том случае, если замирания частотно-селективные (т. е. присутствует межсимвольная интерференция), то для борьбы с ними необходимо использовать дополнительные средства. Одним из подобных средств является так называемое мультиплексирование с ортогональным частотным разделением или OFDM.

3. Результаты моделирования для многолучевого канала связи при различных параметрах OFDM

Опишем результаты моделирования МПД в многолучевом канале с различным числом несущих OFDM схемы мультиплексирования. При получении представленных далее характеристик использовались: МПД для одного из лучших самоортого-

нальных кодов с кодовой скоростью $R = 1/2$, кодовым расстоянием $d = 17$ и длиной около $n = 32000$ битов; модель шестилучевого канала связи с задержками лучей 0, 800, 1600, 3200, 4900 и 7300 нс. и профилем мощностей 0, -1, -9, -10, -15 и -30 дБ; модуляция типа 16APSK, поскольку ее характеристики занимают некоторое среднее положение среди существующих; демодулятор, формирующий только жесткие решения относительно принятых битов; длина защитного интервала 1/16 длины OFDM символа. Также предполагается, что в системе организовано перемежение данных на уровне OFDM символов [5]. Результаты моделирования получены с помощью разработанных программных средств моделирования системы передачи данных.

На рис. 2 кривыми 1–4 представлены характеристики с числом несущих 256, 512, 2048, 4096. Отметим, что меньшее число несущих OFDM символа приводит к некоторому улучшению характеристик, что может быть вызвано наличием перемежения на уровне OFDM символов.

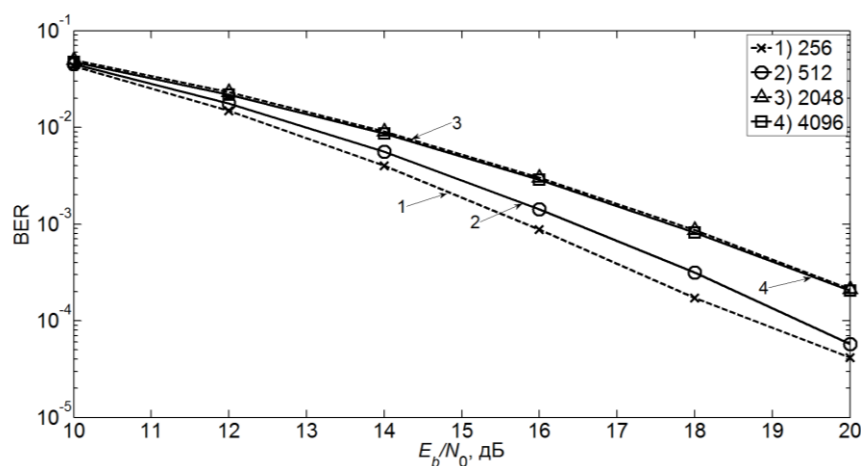


Рисунок 2. Характеристики МПД при различных видах модуляции

Из рисунка видно, что даже при таких сложных манипуляциях МПД способен обеспечивать высокую достоверность передачи данных при высоком уровне ошибок в канале. Следует отметить, что это первые результаты, полученные для совместного использования МПД и OFDM и необходимо решить еще ряд вопросов, связанных с оптимизацией исходных параметров обоих методов.

4. Выводы

Результаты, полученные в ходе исследования, показали, что МПД, обеспечивающие высокую эффективность в гауссовских каналах, оказываются способными бороться с ошибками и в значительно более сложных условиях применения, когда большинство других методов исправления ошибок оказываются бессильными. За-

метим, что эффект от применения помехоустойчивого кодирования в данных случаях многократно превышает эффект от применения кодирования в гауссовском канале, поскольку в каналах с замираниями без применения кодирования часто оказывается вообще невозможным обеспечить требуемую достоверность передачи данных даже при очень большой мощности излучаемого сигнала.

Большой объем научно-методических и учебно-демонстрационных материалов по МПД алгоритмов представлен на специализированном двуязычном веб-сайте www.mtdbest.ru. Представленные результаты получены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и гранта Президента Российской Федерации.

Литература

- [1] Золотарев В. В. Теория и алгоритмы многопорогового декодирования / под ред. чл.-корр. РАН Ю. Б. Зубарева. — М. : «Радио и связь», «Горячая линия—Телеком», 2006.
- [2] Золотарев В. В., Зубарев Ю. Б., Овечкин Г. В. Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 1. С. 2–11.
- [3] Овечкин Г. В., Пылькин А. Н., Шевляков Д. А. Исследование эффективности многопорогового декодера в каналах связи с замираниями // Материалы 6-й Международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». — Рязань : РГРТУ, 2013. С. 214–215.
- [4] Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. — М. : Советское радио, 1970.
- [5] Шевляков Д. А. Исследование эффективности многопорогового декодера в многолучевом канале связи с OFDM схемой модуляции // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвузовский сборник научных трудов — Рязань : РГРТУ, 2013. С. 106–110.

Автор: Дмитрий Александрович Шевляков, аспирант кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета.

Research of efficiency multithreshold decoder in wireless channel

D. A. Shevlyakov

*Ryazan state radio engineering university
59/1, Gagarina street, Ryazan, 390005*

Abstract. The problems related to the efficiency of multithreshold decoders in typical multipath fading channels are described in the article. A study of the characteristics of the use of shared multithreshold decoder and OFDM with different characteristics was implemented. The research demonstrates that multithreshold decoders are capable of providing a sufficiently high accuracy of the transmitted data with a large number of errors.

Keyword: fading, wireless communication system, error-correcting coding, self-orthogonal codes, multithreshold decoders, data transmission reliability, computer simulation, intersymbol interference.

Reference

- [1] Zolotarev V. V. Teorija i algoritmy mnogoporogovogo dekodirovanija // U. B. Zubarev (ed).— M. : Radio i svjaz, Gorjachaja linija–Telekom, 2006.
- [2] Zolotarjov V. V., Zubarev U. B., Ovechkin G. V. Obzor metodov pomehustojchivogo kodirovanija s ispolzovaniem mnogoporogovyh algoritmov // Cifrovaja obrabotka signalov. 2008. No. 1. P. 2–11.
- [3] Ovechkin G. V., Pylkin A. N., Shevlyakov D. A. Issledovanie jeffektivnosti mnogoporogovogo dekodera v kanalah svjazi s zamiranjami // Materialy 6-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Kosmonavtika. Radiojelektronika. Geoinformatika». — Ryazan : RSREU, 2013. P. 214–215.
- [4] Fink L. M. Teorija peredachi diskretnyh soobshhenij. — Sovetskoe radio, 1970.
- [5] Shevlyakov D. A. Issledovanie jeffektivnosti mnogoporogovogo dekodera v mnogoluchevom kanale svjazi s OFDM shemoj moduljacji // Matematicheskoe i programnoe obespechenie vychislitel'nyh sistem: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov — Ryazan : RSREU, 2013. P. 106–110.

УДК 519.83

Теория игр: от анализа к синтезу. Обзор результатов проектирования рынков

А. П. Горяшко

НОУ ВПО Московский технологический институт «ВТУ»
119334, Москва, Ленинский проспект, д. 38а
e-mail: petrovich4you@gmail.com

Аннотация. Настоящий обзор посвящен наиболее интригующим результатам математической теории игр, полученным, в основном, в последние десять лет. Это результаты, которые объясняют, как происходит взаимодействие большого числа лиц с различными интересами (так называемые некоалиционные или некооперативные игры) в современных глобальных технических системах, таких, например, как Интернет. В частности, одним из самых важных результатов следует считать то, что в таких системах общее благо часто достижимо без вмешательства единого органа управления («диктатора»). В обзоре также упомянут ряд существенных результатов последних лет, относящихся к относительно новому разделу теории, а именно к проектированию рынков, разделу, где впервые были получены результаты решения важных практических задач экономики.

Ключевые слова: некоалиционные игры, равновесие по Нэшу, алгоритмическая теория игр, дизайн механизмов, анализ конкурентоспособности, игры Блотто, цена анархии, цена стабильности.

ГРНТИ 28.29.05

Введение

Предлагаемый вниманию читателей обзор ни в коей мере не может претендовать на сколько-нибудь полное описание сегодняшнего состояния дел в теории игр. Достаточно заметить, что в книге «Алгоритмическая теория игр» [1], увидевшей свет в 2007 году, в 29 главах, на 750 страницах рассмотрены лишь наиболее интересные, с точки зрения теории сложности вычислений, задачи теории игр.

Алгоритмический подход к теоретико-игровой проблематике сегодня стал (заслуженно) чрезвычайно популярным. Но он не исчерпывает все многообразие проблем теории игр и авторы «Алгоритмической теории игр» лишь вкратце упомянули некоторые важные прикладные направления, например, *matching problems* и результаты работ А. Рота, за которые в 2012 г. он (вместе с Л. Шепли) был удостоен

Нобелевской премии по экономике или вовсе умолчали о таких направлениях, как, например, «игры полковника Блотто», переживающие сегодня второе рождение.

Задача автора настоящего обзора была скромна — среди огромного многообразия направлений выделить наиболее интересные и заведомо перспективные с прикладной точки зрения методы и результаты. Очевидно, решение подобной задачи может быть только субъективным, основанным на предыдущем опыте и предпочтениях выбирающего. В данном случае основную роль сыграли давние занятия автора обзора в области синтеза логических схем и автоматов. В этой области впечатляюще проявилась возможность принципиального уменьшения трудоемкости решения задачи за счет изменения постановки. Так, например, задача синтеза минимального обнаруживающего теста для достаточно общего класса неисправностей в заданной схеме, реализующей произвольный ограниченно-детерминированный оператор, является NP-полной. Но стоит позволить проектировщику выбирать метод синтеза схемы, реализующей тот же оператор, как у него появляется возможность — ценой небольшой избыточности — уменьшить трудоемкость задачи синтеза теста (в том же классе неисправностей) до константы. И здесь нет ничего сверхъестественного. По такому пути шли люди на протяжении всей истории цивилизации: когда задача представлялась неразрешимой, они находили способ взглянуть на нее «с другой стороны»: иначе говоря, меняли метод синтеза.

Потому для автора обзора наиболее близкими направлениями в современной теории игр оказались *design mechanisms* и *market design*. В них выявлен главный тренд последних десятилетий развития теории игр: переход от анализа процессов взаимодействия людей (зачастую вызывающий сомнение в разумности рода человеческого) к синтезу правил поведения, обеспечивающих (в идеале) построение нового, прекрасного мира игры.

Обзор построен следующим образом.

В первом разделе «О некоторых методологических проблемах в теории игр» очень бегло упомянуты те предположения классических работ теории игр, которые, позволив получить общие результаты, заметно ограничили возможности применения методов теории к решению практически интересных задач. Эти проблемы, с одной стороны, имели чисто алгоритмическую природу (трудоемкость методов нахождения равновесия в некоалиционных играх), с другой — были принципиального характера, например, отсутствие равновесия в чистых стратегиях. Попытки преодолеть перечисленные трудности как раз и привели к созданию многих новых, перспективных направлений, в частности синтеза механизма игры.

Второй раздел «Синтез как новая парадигма теории игр» посвящен, во-первых, рассмотрению основной идеологии синтеза механизмов (на примере аукционной торговли), и во-вторых, примерам того, насколько уместна методология этого подхода оказалась при рассмотрении тех новых классов задач, которые инициированы эрой Интернет-технологий.

В третьем разделе «Синтез сети как игра» сделана попытка объяснить, почему методология синтеза механизма может стать основой новых направлений в самом широком спектре научных исследований, от общественных наук, таких как полито-

логия, социология и вплоть до биологических, изучающих поведение в коллективах живых существ. Понятия «цены анархии» и «цены стабильности», возможно, станут в дальнейшем основными понятиями в теориях, которые объяснят, как муравьям или термитам без предварительных планов, иерархии начальников и даже отсутствия сколько-нибудь сложных механизмов общения удастся строить циклопические (учитывая их собственные размеры) и исправно функционирующие жилища с системами вентиляции.

Приведенные в этом разделе результаты, связанные в основном с изучением сетей Шепли, далеко не исчерпывают многообразие будущих исследований. Кстати говоря, синтез игры, это еще и способ обмануть соперника (если читатели помнят перипетии гоголевских игроков, то согласятся, что это подходящий пример выбора эффективной стратегии синтеза игры). Единственное, что мешает подобным приемам удостоиться упоминания в теории игр, это принципиальное отсутствие общности стратегий обмана. Хотя не исключено, что одним из направлений будущего изучения в теории игр станет синтез эвристических методов выбора стратегий игры, зависящих от генотипа противника.

Четвертый раздел «Задачи offline и online и синтез механизмов игры» посвящен еще одному «алгоритмическому» направлению в теории игр, начало которому было положено полстолетия назад решением математической «проблемы остановки». За эти годы формальная задача теории вероятностей приобрела облик прикладного исследования того, весьма многочисленного, класса проблем, в которых решение приходится принимать «на ходу», используя последовательно поступающую информацию от источника, вероятностные параметры которого практически неизвестны. По сути дела, это новый раздел робастных вычислений, в котором ищут оптимальные алгоритмы (точнее, *с-конкурентоспособные*) в случае весьма ограниченной информации о происходящих событиях, даже не пытаясь задавать вид вероятностных распределений источника информации. (В этом смысле подобный подход напоминает идеологию работ по методам робастной оптимизации [4]).

Завершает этот раздел формулировка результата относительно наличия *с-конкурентоспособного* алгоритма для игры полковника Блотто. Результат показывает, какой информацией о противнике достаточно располагать, чтобы *гарантировать* победу в чистых стратегиях.

Заключительные замечания посвящены, в первую очередь, короткому рассказу о перспективах направления по имени «проектирование рынков». Хотя эти работы не были разобраны в обзоре, но их нельзя не упомянуть уже хотя бы потому, что они больше чем какие-либо другие доказывают вступление теории игр в эпоху зрелости.

1. О некоторых методологических проблемах в теории игр

Классические работы математической теории игр Дж. Неймана [22] и Дж. Нэша [21] вызвали не только понятный интерес в математической среде, но и

энтузиазм в среде экономистов — в первую очередь, тех, кого в 60-е гг. прошлого века стали называть специалистами в математической экономике.

Напомню содержательную сторону основных результатов Дж. Неймана и Дж. Нэша.

Дж. Нейманом показано, что любая антагонистическая игра с постоянной суммой (в частности, нулевой) имеет решение (равновесие) в смешанных стратегиях. В частности, почти сразу же стало понятно, что это решение может быть получено как решение задачи линейного программирования (простое объяснение можно найти в [17], там же и ссылки на оригинальные работы).

Полученный результат означал, что антагонистическая игра с постоянной суммой является *tractable* проблемой (как это принято сегодня говорить), т. е. вычислительные трудности при решении таких проблем относительно невелики¹.

Дж. Нэш показал, что любая (точнее, выпуклая) некооперативная (некоалиционная) игра имеет, по крайней мере, одно равновесие в смешанных стратегиях — так называемое Нэш-равновесие (НР). Поиск этого равновесия *не сводится* к задаче линейного программирования, а впоследствии выяснилось, что эта задача в общем случае *untractable*.

Общность результатов Неймана и Нэша была впечатляющей, что, впрочем, не отменяло того обстоятельства, что практическое применение всей «игровой кухни» весьма проблематично. В то время как методы решения оптимальных задач (особенно задач линейного программирования) уже в 60-е гг. стали стандартным инструментом для практического использования в самых различных областях — труднее назвать такую область, где бы они не применялись, задачи теории игр оставались, в лучшем случае, инструментом моделирования самых простых экономических ситуаций, помогая экономистам высказывать некоторые гипотезы, численная проверка которых, как правило, была невозможна.

В чем же основная причина столь скромных успехов теории игр на практическом поприще? Казалось бы, теория «игры» много ближе человеку, чем решение условных экстремальных задач и потому легко найдет себе применение в его практической деятельности. Но именно эта «близость» оказалась основным препятствием: было очень непросто рассмотреть такие классы задач, которые, с одной стороны, были бы практически интересны, а с другой — могли быть описаны достаточно общей, да еще и вычислительно доступной математической моделью.

Комментарий. Оценить перспективность того или иного результата в потоке работ, последовавших за классическими результатами, никто даже не пытался. Лишь в конце прошлого столетия и первое десятилетие нынешнего стало понятно, сколь плодотворными оказались некоторые из работ 60-х–70-х гг. Свидетельством тому стало и присуждение Нобелевских премий по экономике Ауману, Гурвицу,

¹ Точное доказательство того, что для решения задач ЛП существует полиномиальный алгоритм, было получено лишь в 1980 г. Л. Г. Хачияном, а в 1982 г. Д. Б. Юдин, А. С. Немировский и Л. Г. Хачиян стали лауреатами премии Фалкersona за метод эллипсоидов в линейном программировании.

Гейлу и ряду других ученых за результаты, полученные еще в середине прошлого века.

Но почему в течение нескольких десятилетий математическая теория игр производила на практиков впечатление чисто математических штудий. Тому было несколько объективных причин. Укажем, на наш взгляд, основные.

Проблема 1. Динамический характер игр. Классические постановки рассматривали так называемую *one shot* модель: однократное взаимодействие игроков. Достаточно очевидно, что такая модель не является хорошим приближением к реальности. А дальнейшие исследования сразу же установили, что модели повторяющихся игр имеют существенно более сложный вычислительный характер.

Проблема 2. Предположение о полной и совершенной информации. Хотя для антагонистических игр с нулевой суммой это предположение могло быть не столь ограничивающим — было показано существование достаточно точных приближенных методов решения — в общем случае, неточное знание платежной матрицы не позволяло получать сколько-нибудь общие результаты о решениях. Понятно, что в любых реальных условиях говорить о том, что игроки имеют точное представление о платежах оппонентов, было бы большой натяжкой. Заметим, что байесовский подход (представление о равновесии Байеса-Нэша), когда знание о игроках выясняется в процессе игры, технически неприемлемо сложен и не применим в сколько-нибудь нетривиальных случаях.

Проблема 3. Предположение о смешанных стратегиях — краеугольный камень классической теории игр. Но то, что имеет смысл в статистических задачах, таких, например, как контроль качества, совершенно не годится в подавляющем большинстве ситуаций, которые описывают взаимодействия людей. Конечно, для всего можно отыскать пример: скажем, владельца магазина или ресторана интересует средний чек за месяц и в своих «играх» с покупателями он может рассчитывать на то, что реализация «смешанной стратегии» является осмысленной политикой. Но в конкурентной среде, где покупатель всегда имеет возможность *сменить* продавца, разорение может наступить раньше, нежели равновесие. Потому вопросы о возможности получения равновесия в чистых стратегиях для некоалиционных игр и о «качестве» такого равновесия становятся первостепенными, а решить их оказалось очень непросто.

Проблема 4. Это проблема того, насколько понятия «равновесие» и «решение» в теории игр можно полагать синонимами. Если этот вопрос не возникает в антагонистических играх, то уже в некоалиционных играх Нэша от него невозможно отмахнуться. Дело в том, что в самых простых моделях игр возможно существование множества (в принципе, бесконечного) Нэш-равновесий, и почти все такие равновесия с точки зрения здравого смысла — или эффективности по Парето — могут быть абсолютно вздорными.

Проблемы, перечисленные выше, чрезвычайно активизировали исследования в области теории игр. Были не только получены новые интересные результаты — произошло много *большее*. Сформировался ряд новых (и произошел возврат к забытым старым) направлений исследований, причем оказалось, что постиндустри-

альное общество вообще и, в частности, интернет-технологии последнего десятилетия становятся поставщиком совершенно новых моделей игр. Сегодня уже проглядывают контуры *практического* применения результатов теории и понимания реальной важности развития математической теории игр в жизненно важных для информационного общества вопросах.

Ограниченный объем обзора не позволяет представить сколько-нибудь полную картину происходящего в теории игр. Насколько нам известно, наиболее подробный разбор почти всего, что происходит сегодня в теории игр, можно найти в работе «Алгоритмическая теория игр» [1]. Здесь же будет рассказано о наиболее интересном, с точки зрения практика, направлении — дизайн механизма (*mechanism design*) — а также отмечены исследования, которые, по мнению автора, станут востребованными в ближайшие годы.

2. Синтез как новая парадигма теории игр

Мнение о том, что продвижение во всех, упомянутых выше проблемах теории игр, может быть обеспечено «всего лишь» сменой основной парадигмы теории, существовало чуть ли не с самых первых лет появления этой теории. Уже в начале шестидесятых появились работы о том, как *следует* проводить аукционы [30] — прежде других, работа В. Викри, а затем в 1972 г. была опубликована работа Л. Гурвица [14], в которой собственно и был предложен термин *mechanism design*. В 1996 г. В. Викри и Дж. Мирлес были удостоены Нобелевской премии по экономике, а в 2007 г. этой же чести были удостоены Л. Гурвиц, Э. Маскин и Р. Майерсон. Присуждение премии 2007 г. сопровождалось уже формулировкой за «*foundations of mechanism design theory*».

Таким образом, хотя идея перейти от анализа произвольной игры к синтезу «хороших» по структуре игр была как будто бы очевидна, превращение ее в полноценное научное направление потребовало серьезных усилий и времени. Зато и результаты оказались обнадеживающими.

2.1. Аукцион второй цены

Общеизвестна распространенность аукционной торговли: от торговли цветами до торговли радиочастотами. Очевидно, каждый участник аукционной торговли (как и любой другой торговли) стремится, во-первых, осуществить выгодную сделку и, во-вторых, к тому, чтобы результат был, по *его* мнению, справедлив. Поскольку все хотят справедливости², желательно понять, как ее добиться в условиях, когда каждый склонен понимать ее по-своему.

² В теории игр существует целый класс игр (наиболее известны игры «диктатор», «ультиматум»), анализ которых позволил многое понять о том, как люди представляют себе «справедливость». Ожидаемый результат этих исследований — понятия «справедливость» и «рациональное решение» имеют мало общего.

Определим вначале понятие «общественное благо», применительно к общей задаче выбора (это может быть выбор президента, выбор автомобиля в магазине и т. п.). Формально говоря, принято рассматривать множество альтернатив A и множество участников I , состоящее из N элементов, а также множество L линейных порядков на A . Каждая упорядоченность из L является антисимметричной и транзитивной.

Определение. 1. Функция

$$F : L^N \rightarrow L$$

называется функцией общественного блага (*social welfare*).

2. Функция

$$F : L^N \rightarrow A$$

называется функцией общественного выбора (*social choice*).

Таким образом, функция общественного блага агрегирует предпочтения *всех* участников в *общее* предпочтение. В случае голосования это означает общественное предпочтение упорядоченности для всех кандидатов, а функция общественного выбора — предпочтения всех голосующих в выборе единственного кандидата.

Напомним, что, в соответствии со знаменитой «теоремой невозможности» Эрроу [2], любая функция общественного блага, которая удовлетворяет условиям единогласия и независимости от нерелевантных альтернатив, при условии, что $|A| \geq 3$, оказывается *диктаторской*.

Однако нас, прежде всего, будет интересовать реализация функции общественного блага не с позиций настройки механизмов голосования, а с экономической точки зрения, как формальное обоснование той самой «невидимой руки рынка», которую провозгласил еще в середине XVIII века Адам Смит. Как неоднократно отмечалось, теория дизайна механизма как раз и предъявляет *доказательства* того, что, несмотря на эгоистические интересы и неполноту информации участников рынка, функция общественного блага в экономике *достижима*.

Рассмотрение этих доказательств начнем с изучения, так называемого аукциона второй цены или аукциона Викри. Для того чтобы была ясна логика аукционной торговли и предложение Викри, придется несколько подробнее рассмотреть поведение участников любого процесса торговли и, в частности, торгового аукциона.

Задача о торговле (*bargaining*) была одной из первых, рассмотренных Нэшем в его, ставшей уже классикой, работе [21]. С тех пор ситуацию любого торга принято описывать следующим образом. Пусть продавец S (*seller*) хочет продать некоторую вещь, которую он *оценивает* как $v_s \in [0, N]$ и *просит* за нее $s \in [0, N]$. Покупатель B (*buyer*) *оценивает* эту вещь как $v_b \in [0, N]$ и согласен заплатить за нее $b \in [0, N]$. S и B *одновременно* называют свои цены. (Одновременность является существенным обстоятельством, хотя во многих случаях рыночной торговли это условие не выполняется.) Для теории, цель которой найти равновесные стратегии, существенно, чтобы оба участника были *одинаково информированы*. Для рассматриваемого

процесса торговли это означает отсутствие информации о намерениях партнера³. Сделка состоится тогда и только тогда, когда $b \geq s$, и в этом случае каждый получает $p = (b + s) / 2$ денежных единиц. Тогда полезность сделки U_s для продавца равна $p - v_s$, а полезность сделки U_b для покупателя: $v_b - p$.

Теперь рассмотрим частный, но широко распространенный способ торговли — так называемую аукционную торговлю. Причина повышенного внимания теории игр к этому виду торговли объясняется точно заданными правилами проведения аукционов, что делает их более благодарным объектом для получения формальных результатов.

Лучше всего известен *аукцион с повышением цены*, так называемый английский аукцион. По правилам английского аукциона проходят, например, аукционные торги предметами искусства. На таких аукционах, аукционист объявляет начальную цену. Затем любой участник торгов в аукционном зале может предложить большую цену (минимальный шаг изменения цены задан заранее). Торговля заканчивается, когда никто не может предложить цену больше той, которая была предложена последней. Победитель платит аукционисту максимальную цену. Если никто не пожелает поднять стартовую цену, предмет снимается с торгов.

Один из главных недостатков такого аукциона — его открытость, вследствие чего тем, кто находится в зале аукционной торговли, известно от кого поступает очередное предложение, что может быть существенной информацией. Кроме того, открытые аукционы допускают возможность различных махинаций с ценами, в результате которых игрока, стремящегося к выигрышу, вынуждают поднимать цену.

Кардинальный способ борьбы с этими недостатками предоставляет *закрытый аукцион*. Участники торгов подают аукционисту запечатанные конверты с указанием цены, которую они готовы заплатить. Аукционист рассматривает заявки и объявляет победителя и сумму, которую тот должен заплатить. Но какой будет эта сумма? Справедливо ли платить максимальную сумму?

В соответствии со здравым смыслом, справедливой ситуация торга может быть лишь в том случае, когда торгуемый предмет получает тот, чья собственная *оценка* этого предмета максимальна. А добиться этого (в процессе аукционной торговли) можно лишь в том случае, когда каждому участнику *выгодно* указывать свою *истинную оценку* торгуемого предмета⁴. Необходимым условием для этого является закрытость аукциона — каждый участник *не должен* знать оценок других участников. Почему?

³ Но именно отсутствие информации у игроков (покупателей и продавца) о том, как остальные участники сделки на самом деле оценивают предмет сделки, делает торговлю одной из самых увлекательных игр.

⁴ Многократно доказано в истории, что обеспечить выполнение любых правил (в особенности в экономике) практически невозможно, если тем, кто должен их выполнять, это будет невыгодно. Даже религиозные законы работают только в случае, когда человек полагает их исполнение в определенном смысле «выгодным» — другое дело, что эта «выгода» не имеет материального эквивалента и для посторонних может выглядеть нелепо.

Логично исходить из того, что ни у одного из участников *нет истинной* оценки стоимости продаваемого предмета, но зато каждый имеет *собственную* оценку его стоимости. Будем полагать, что каждый участник точно знает, чему равна максимальная цена, которую он согласен заплатить (иными словами, когда он перестанет участвовать в торгах, потому что не захочет повышать цену).

Закрытый аукцион позволяет обеспечить информационное «равенство» всех участников: никто не может получить дополнительную информацию, глядя на поведение остальных и, выбирая стратегию поведения, должен исходить исключительно из собственной оценки стоимости торгуемого предмета.

Закрытость аукциона является необходимым, но не достаточным условием. Правила проведения аукциона должны быть таковы, чтобы всем участникам было *выгодно* писать в заявке именно ту цену, которую, по их мнению, стоит торгуемый предмет.

Оказалось, что это может обеспечить *аукцион второй цены*: такие правила, при которых выигрывает участник, предложивший *максимальную* цену, но платит он аукционеру вторую цену, т. е. предыдущую предложенную цену.

Объясняется это следующим образом. Поскольку ни один из покупателей не знает истинной цены торгуемого предмета, выгода покупки для него равна разности между *его оценкой* и той ценой, которую он *реально платит*. Иначе говоря, если покупатель i заявил в качестве цены свою *истинную* оценку v_i и победил (заявленное значение v_i оказалось максимальным), то *полезность* выигрыша будет для него равна $v_i - b^* > 0$, где b^* — максимальная цена среди всех цен, заявленных остальными игроками. Если же он будет платить заявленное значение v_i , то полезность покупки для него станет равной нулю. С другой стороны, если он (на всякий случай) заявит цену $v_i^* > v_i$, то все равно выиграет, но величина *полезности* для него ничуть не изменится — она ведь определяется *его истинной оценкой* v_i , а не заявленной ценой. Очевидно, для всех остальных игроков полезность будет равна нулю.

Поскольку это рассуждение справедливо для любого игрока, участвующего в аукционе, закрытый аукцион *второй* цены сподвигает всех игроков заявлять свою истинную оценку. Тем самым достигается желаемое *равновесие*: каждый игрок, действует в соответствии со своими эгоистическими интересами и получает справедливое вознаграждение. (Мы оставляем без внимания частный случай, когда несколько игроков заявили одинаковую максимальную цену; в этом случае выигрыш назначается с помощью жребия, что не меняет представления о справедливости полученного результата.)

Комментарий. Выше неявно предполагалось, что все участники аукциона нейтральны по отношению к риску, т. е. для них безразлично получить 1 единицу полезности наверняка или две единицы полезности с вероятностью $\frac{1}{2}$. Фактически, большая часть покупателей являются *risk-averse*, т. е. в вероятностной игре они будут участвовать только если ожидаемый выигрыш много больше гарантированного

выигрыша. Известно, что если все участники аукциона оказываются *risk-averse*, выручка аукциона первой цены выше, чем аукциона второй цены [20].

Но ведь в аукционе участвует еще и продавец, и дизайн механизма аукциона не может не учитывать «справедливость» аукциона по отношению к продавцу, которому совсем не безразлична полученная полезность. Поэтому дизайн механизма аукциона не обошел вниманием интересы продавца. Еще до появления всякой теории, аукционисты защищали свои интересы, вводя так называемую *резервационную цену*. Если победитель аукциона должен был заплатить меньше какой-то величины r , аукционист имел право снять вещь с аукциона. Величина r как раз и называлась резервационной ценой. Теория дизайна механизма аукциона позволила проанализировать, как именно следует выбирать резервационную цену, чтобы оптимизировать доход продавца. Ведь совершенно ясно, что слишком большое значение r уменьшит вероятность продажи, а слишком малое будет невыгодно аукционисту.

Рассмотрим простейшую ситуацию: два покупателя с заявками b_1 и b_2 и резервационная цена r . Какие здесь могут быть варианты?

Если $b_1 \leq b_2 < r$, то предмет снимается с аукциона.

Если $b_1 < r \leq b_2$, то второй покупатель приобретает предмет по цене r .

И, наконец, если $r < b_1 \leq b_2$, то второй покупатель приобретает предмет по цене b_1 .

Для того чтобы сказать нечто определенное о наилучшем выборе величины r , сделаем следующие уточнения: все цены принадлежат непрерывному интервалу $[0, 1]$ (денежная единица безгранично делима), в аукционе участвует N покупателей и всем покупателям выгодно указывать свою истинную оценку торгуемого предмета. Оказывается, что оптимальная резервационная цена — такая, которая принесет максимальный доход продавцу — находится в точности посередине интервала цен, т. е. $r^* = 1/2$. В этом случае максимальный доход R продавца определяется как

$$R = (N-1)/(N+1) + \varepsilon(N),$$

где $\varepsilon(N) \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$, причем экспоненциально быстро.

К числу неочевидных результатов можно отнести тот факт [7], что, в общем случае распределения оценок покупателей в интервале $[0, 1]$, увеличение числа покупателей на одного даст для продавца больший эффект, чем введение резервной цены.

Впечатляющим примером того, как различные правила аукционов могут сказаться на результатах, приведены в работе Клемперера [16]. В 2000–2001 гг. в девяти европейских странах прошли государственные аукционы по продаже частот на мобильную связь третьего поколения. Покупателями в этих аукционах были операторы мобильной связи, а продавцами — государства. Выручки, полученные в различных государствах, отличались разительно: выручка на одного потенциального абонента в Великобритании составляла 650 евро, в Швейцарии — 20 евро. Общие поступления в бюджет этих стран отличались более чем в 10 раз.

Автор работы, который консультировал организаторов аукциона в Великобритании, отмечал два наиболее важных элемента, которые следовало учесть организаторам. Первый — число покупателей. Чтобы их было больше, правила аукциона должны давать шансы на победу «слабым» покупателям. Иначе они вообще не примут решение об участии в аукционе, а это снизит конкуренцию для «сильных» игроков. Второй — правила аукциона должны затруднять возможность сговора между покупателями; т. е. аукцион должен проводиться так, чтобы покупатели не могли подавать своими заявками сигналы другим покупателям. Например, при наличии возможности приобретения одного лота одновременно несколькими покупателями, они могут продемонстрировать, за какой лот они готовы торговаться, а за какой — нет (если проводится открытый аукцион).

Отмечалось, что организаторы аукциона в Швейцарии допустили роковую ошибку, разрешив совместные заявки со стороны нескольких фирм. В результате совместных заявок число претендентов сократилось с 9 до 4, при наличии всего 4 лицензий! В итоге все лоты ушли по очень низкой резервационной цене.

2.2. Как купить путь в сети

Поиск справедливых правил в аукционной игре был напрашивающимся направлением, потому здесь и появились первые работы, которые с полным основанием можно отнести к синтезу механизма или синтеза рынка. Менее очевидным стало направление, в котором рассматривалось игровое взаимодействие в процессе некоторой совместной деятельности. Неформально говоря, проблема заключалась в следующем: некоторая группа «игроков» занята некоторой деятельностью, причем эффективность выбранной каждым игроком стратегии (доход, который принесет его деятельность) как-то зависит от того, что делают остальные. Все «игроки» чрезвычайные индивидуалисты и не согласны тратить свои ресурсы на поиски наилучшей кооперативной стратегии. Можно ли в таких условиях надеяться, что им всем удастся добиться в некотором точном смысле хорошего результата? Или, по крайней мере, результата не сильно отличающегося от оптимального? По существу это опять же вопрос о цене робастности вычислений, когда робастность предполагает отсутствие у каждого «игрока» детальной информации о деятельности и планах всех остальных «игроков». Как это не покажется удивительным, но оказалось, что во многих случаях взаимодействия исключительно эгоистичных «игроков» можно рассчитывать на положительные результаты. Для того чтобы это утверждение приобрело характер строгого результата, необходимо рассмотреть формальную модель взаимодействия «игроков».

Пусть некоторое количество игроков E объединяется для того, чтобы построить коммуникационную сеть передачи данных от пункта s до пункта t . Они действуют на свой страх и риск, не сговариваясь между собой и выстраивая свой маршрут от s к t . В результате появляется коммуникационная сеть, которую можно представить в виде ориентированного графа $G(N, E)$, где N — множество вершин графа (пункты s , t и промежуточные пункты, например, ретрансляторы), а E —

множество дуг графа (каналов связи). Владельцу канала связи (дуги e_{ij} между вершинами i и j) передача одной единицы объема сообщений по этому каналу стоит $c(e_{ij})$. В этой стоимости учтена и стоимость построения канала.

Любой потребитель услуг коммуникационной сети будет стараться минимизировать свои издержки, т. е. $\sum c(e_{ij})$, где суммирование происходит по всем выбранным дугам маршрута от вершины s до вершины t . Это значит, что он будет искать самый дешевый маршрут. Но где гарантия того, что владельцы указали свои истинные издержки? (Заметим, что эта ситуация в точности напоминает историю с ценами покупателей на аукционе.)

Задача дизайнера механизма ценообразования в этой сети будет состоять в создании такого алгоритма — так называемый побудительный механизм Викрея-Кларка-Гроуса — который вынудит (или, по крайней мере, стимулирует) владельцев сети указывать истинную цену своих издержек. Такой алгоритм существует и его основная особенность в том, что он поощряет дополнительным вознаграждением тех владельцев, которые предоставляют наиболее часто используемые (а значит наиболее дешевые) маршруты. Проще всего продемонстрировать работу такого алгоритма — его называют побудительно совместимым механизмом — на примере простой коммуникационной сети. На рис. 1 показана коммуникационная сеть с вершинами s, t, I_1, I_2 и пятью дугами указанной стоимости.

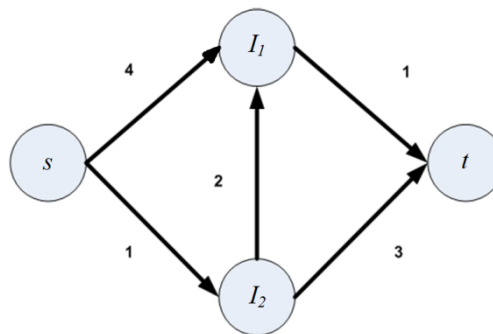


Рис. 1. Примере коммуникационной сети

Предположим, что владельцы указали истинную стоимость своих издержек. Легко заметить, что кратчайший маршрут sI_2t имеет стоимость $1 + 3 = 4$. Ясно, что пользователи будут ориентироваться лишь на этот маршрут и наш побудительный механизм будет платить лишь владельцам дуг (sI_2) и (I_2t) . Как минимум, они получат объявленную стоимость, но если их маршрут оказался дешевле всех альтернативных, они будут соответственно поощрены. Как определяется поощрение? Кратчайший путь st , который *не проходит* по дуге (sI_2) , это путь (I_1t) , стоимость

которого $4 + 1 = 5$. Поэтому владельцу (sI_2), в соответствии с побудительным механизмом, следует заплатить $1 + (5 - 4) = 2$. Кратчайший путь st , который *не проходит* по дуге (I_2t), это путь (sI_2I_1t), стоимость которого $1 + 2 + 1 = 4$. Поэтому владельцу (I_2t), в соответствии с побудительным механизмом, следует заплатить $3 + (4 - 4) = 3$. Было доказано, что такой способ ценообразования действительно стимулирует владельцев указывать истинную стоимость своих издержек.

2.3. Дизайн механизма социальных сетей

В 1999 г. в Интернете появился релиз системы *Napster*, в марте 2000 — системы *Gnutella*. Десятки миллионов людей получили возможность самоорганизовываться и обмениваться информацией: музыкальными произведениями, книгами и т. п.

Не прошло и полугодия после запуска системы *Gnutella*, как выяснилось, что не менее двух третей пользователей этой системы скачивают файлы, ничего не выкладывая взамен. Даже когда людям предоставили возможность делить всего лишь музыку или слова, они не смогли достичь такого «равновесия», когда большинство не старается «проехать зайцем».

Можно ли было ожидать иного? Этот вопрос незамедлительно приводит к следующему — а почему же не все стараются «проехать зайцем»?

Здесь необходимо вспомнить о результатах работ по итеративным, т. е. повторяющимся играм. В классических постановках теории игр повторяющиеся игры по сути дела не рассматривались вообще, ведь идея о смешанных стратегиях носит формально-статистический характер. Но уже в 70-ые гг. начинает активно исследоваться ситуация *стратегического равновесия* в играх, а именно такого равновесия, которое выгодно всем участвующим в игре. Объясняется это тем, что именно повторение игровых ситуаций может **вынудить** игроков играть *кооперативно*, т. е. с учетом не только собственных эгоистических интересов. Именно за цикл этих работ Р. Ауман и Т. Шеллинг в 2005 г. были удостоены Нобелевской премии по экономике.

Но если эти работы в основном опирались на исследование простых моделей итеративной игры двух лиц, то в XXI веке Интернет предоставил обширное поле исследований «суперигр», в которые играют десятки и сотни тысяч пользователей социальных сетей. Теперь уже не только таких систем, как *Napster* и *Gnutella*, но и множества файлообменных сетей типа *BitTorrent* и огромного количества сетей, обслуживающих Интернет-торговлю.

Появление Интернета как глобального способа обмена информацией кардинально изменило подходы к проектированию компьютерных архитектур. Наибольший интерес стала представлять система *peer-to-peer* (равное-к-равному), или *p2p*, в которой нет жестких структурных связей. Каждый элемент такой системы может *передавать* информацию любому другому (незанятому в этот момент) элементу или *получать* информацию от любого элемента.

До появления систем p2p техническая реализация интернет-соединений предполагала наличие *серверов* и *клиентов*. Клиенты посылали серверу запрос на соединение, сервер обрабатывал этот запрос и посылал его другому клиенту. Затем сервер возвращал ответ на запрос, который ему передал клиент. Ясно, что вычислительная мощность сервера должна быть много больше, чем у клиента.

В системе p2p *каждый* компьютер выполняет роль как сервера, так и клиента. Это, на первый взгляд, простое изменение структуры привело к кардинальному увеличению эффективности процессов обмена информацией, поскольку вычислительные ресурсы стали использоваться максимально полно. Сегодня на сети p2p приходится уже половина всего трафика Интернета, а создание сетей этого типа стало существенным продвижением в эволюции «информационного уравнения» людей. Широчайшее распространение сетей этого типа позволяет превратить их в действующую лабораторию по экспериментальному изучению работы механизмов поощрения кооперативного поведения.

Если представить пользователей сети p2p игроками, которые устанавливают связи (соединения) друг с другом, то основная стратегия их поведения может быть описана моделью однократной «дилеммы узника» (ДУ). Известно, что в таком случае доминантной стратегией является *некооперативное* поведение (в терминологии ДУ «обман»). Вынудить к кооперации в модели ДУ можно лишь в случае итеративной игры, прибегая к механизмам взаимных угроз, которые получили название «око за око» или *tit for tat*. Но общение игроков в сетях p2p больше похоже на *one-shot* модель, поскольку пользователи анонимны и могут рассчитывать на то, что их поведение сегодня не повлияет на отношение к ним завтра.

Опыты с файлообменными сетями, описанные в работе [3], свидетельствуют, что в сети из 120 пользователей уже к 400 раунду общения более 100 пользователей прибегали к стратегии «обманывать», не предоставляя другим своих ресурсов. Чем больше в сети пользователей, тем более явно прослеживается эта тенденция. Таким образом, доминантной стратегией становится «свободная езда» (*free riding*), когда игрок согласен загружаться, когда он «клиент», и отказывает в загрузке, когда он «сервер». Ясно, что достижение социальной справедливости невозможно без внедрения механизмов поощрения кооперации. Наиболее изученными и работающими оказались механизмы *репутации*, *бартерного обмена* и *денежного поощрения*.

Репутация. Репутационные механизмы прекрасно зарекомендовали себя как механизм, обеспечивающий кооперативное поведение в самых разных ситуациях от эволюционной биологии до онлайн-торговли. Неудивительна попытка их применения в любых системах p2p. Конкретных схем реализации этих механизмов множество, но общий принцип один: игрок, обладающий высокой репутацией, получает намного лучшие условия обслуживания от других игроков, нежели игрок с плохой (или отсутствующей) репутацией.

Конечно, для проявления репутационного эффекта должны выполняться определенные условия: игра должна повторяться, поскольку репутация не имеет *стратегической* ценности в одноразовой игре; ценность репутации для ее носителя должна быть больше, чем ценность того, чем он пожертвовал в любом раунде по-

вторяющейся игры. Из последнего следует, что игроки должны установить обязательства по уменьшению ценности в каждом раунде, так что искушение «обмануть» в каждом раунде никогда не стало достаточно высоким⁵. Нахождение оптимальных характеристик ценности репутации является нетривиальной задачей.

Наиболее серьезное внимание репутационным механизмам по необходимости пришлось уделять в системах электронной торговли (прежде всего, в *eBay*). Это и не удивительно, учитывая количество сделок, которое осуществляется в этой системе, анонимность продавцов и покупателей и широчайшие возможности обмана покупателей, которые неизбежно привлекают внимание кибермошенников. Поэтому репутация продавца (и покупателя) здесь чрезвычайно важна и созданию алгоритмов, позволяющих автоматически определять репутацию пользователей и динамически следить за ней, уделяется самое серьезное внимание. Разработка алгоритмов, которые позволяют по истории поведения пользователей в сети достоверно оценивать их репутацию, существенно затрудняется теми возможностями, которые предоставляет система *p2p* для противодействия любому слежению.

Основные способы противодействия построению достоверной репутационной системы состоят в следующем:

1. Отбеливание (*white washing*), когда пользователь меняет свой псевдоним и начинает жизнь «с чистого листа».
2. Неверная обратная связь, когда пользователь не устанавливает обратную связь или не честно отвечает на заданные вопросы.
3. Фантомная обратная связь, когда пользователь сообщает о взаимодействиях, которые никогда не имели места; при этом создаются фальшивые онлайн-личности, которые поддерживают и рекламируют репутацию истинной личности.

В результате таких атак на репутационные алгоритмы достоверность защиты с помощью оценки репутации может сильно снизиться, что заставляет искать новые механизмы защиты. Так, в *p2p* сетях происходит постоянная информационная война, в которой окончательная победа достижима лишь отказом от Интернет-услуг.

Бартер. Наиболее известный пример использования этого принципа демонстрирует известная сеть *BitTorrent*. Файлы, которыми обмениваются пользователи, разделяются на небольшие порции, каждая из которых может быть взята от разных пользователей и передана множеству других пользователей. В результате реализуется прямая взаимность — порция информации, полученная одним пользователем, может быть тут же передана другому без прямого участия каждого из них. (Заодно крайне сложно обвинить какого-то конкретного пользователя в нарушении авторских прав, поскольку вся информация ровным слоем «размазана» по миллионам пользователей и никто не передает целиком *все* произведение.) Подробное изучение протоколов сети *BitTorrent* выявило и в них такие возможности манипуляции, которые позволяют обходить механизмы бартерного обмена, так что вопрос о том,

⁵ Это довольно общая ситуация: например, участникам строительного проекта предпочтительно платить еженедельно или ежемесячно, чтобы у них не было соблазна уйти, получив значительную долю стоимости.

можно ли создать бартерную схему, свободную от манипуляций, остается открытым.

Валюта. В общем случае схема валютного поощрения выглядит просто: каждый *peer* зарабатывает какую-то валюту, вкладывая некий ресурс в систему и тратит валюту, получая некоторый ресурс. Так, в сети *Mojonation*⁶ пользователь зарабатывает *mojos*, вкладывая средства в других, и использует заработанную «валюту», чтобы получать некоторый сервис от другого пользователя. В подобных системах теория игр может помочь в определении таких параметров, как цена загрузки и разгрузки единицы информации и величиной дисконтирования для того, чтобы независимо действующие пользователи могли обеспечить в системе какое-то Нэш-равновесие [12].

2.4. Дилемма узника и Интернет-провайдеры

Уже упоминалось, что дилемма узника (ДУ) один из наиболее популярных примеров в теории игр, хотя ситуация, которую он описывает (единственное равновесие по Нэшу, которое не является оптимумом по Парето), нельзя назвать «типичной». Как бы то ни было, обойтись без этого примера в теории игр, кажется, еще не удавалось ни одному исследователю. Вот и в относительно новой области теории игр — игры маршрутизации при организации Интернет-трафика — этот пример оказался востребованным⁷.

Покажем, как ДУ может принять обличье Интернет-трафика. На рис. 2 изображены две области: область (ИП1) покрывает Интернет-провайдер 1, область (ИП2) — Интернет-провайдер 2. Эти провайдеры могут обмениваться трафиком только через точки *C* и *S* (так называемые *peering points*).

Пусть ИП1 должен послать сообщение из пункта s_1 в пункт t_1 , а ИП2 — из пункта s_2 в пункт t_2 , причем пункты t_1 и t_2 расположены очень близко к точке *S*. Эгоистическое поведение каждого игрока приводит к тому, что они оба посылают сообщения по самому короткому маршруту, который содержит одно ребро, переключая передачу длиной три единицы (три ребра) на партнера. В результате затраты каждого из провайдеров равны четырем единицам. Но, если бы они согласились действовать заодно, посылая сообщение через пункт соединения *S*, то каждый затратил только две единицы (расстояние от *S* до t_1 и t_2 настолько малы, что их можно считать равными 0).

На рис. 3 приведена платежная матрица для игроков ИП1 (выбирает столбцы) и ИП2 (выбирает строки). Здесь стратегия S_1 — эгоистическая, а S_2 — кооперативная.

⁶ Название взято из карточной игры *Illuminati* (1982), которая, в свою очередь, основана на известном романе R. A. Wilson и R. Shea *The Illuminatus! Trilogy* (1975).

⁷ Развитие информационных технологий в постиндустриальном обществе почему-то оказалось связано с необходимостью решения еще более изощренных «моральных» проблем, нежели классические проблемы и давно исследованные проблемы типа «воровать — не воровать».

Еще один пример того, как классические и давно исследованные модели теории игр, которые специально придумывались для иллюстрации некоторых теоретических положений, в эпоху информационных технологий приобрели новую жизнь.

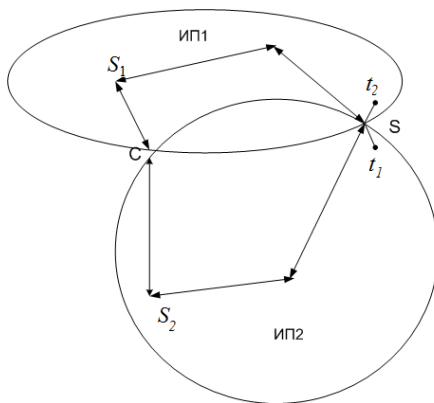


Рисунок 2. Дилемма узника в задаче с Интернет-трафиком

—	S_1	S_2
S_1	4, 4	5, 1
S_2	1, 5	2, 2

Рисунок 3. Платежная матрица

В экономике и социологии давно известна проблема, получившая название «трагедия общин», после одноименной статьи специалиста по теории игр Г. Хардина в журнале Science. Содержательный смысл проблемы прост: коллектив «игроков», каждый из которых, эксплуатируя некое общественное благо, действует лишь в собственных интересах, приходит к ситуации полного уничтожения этого блага. Пример Г. Хардина: игроки — владельцы отар овец, которые пасутся на общественном пастбище. Поскольку каждый старается увеличить число овец в своей отаре, чтобы увеличить полезность, пастбище полностью истощается и полезность каждого становится равной нулю.

Вот как эта ситуация выглядит в наше время.

Пусть некоторое количество N игроков могут совместно использовать канал передачи данных заданной пропускной способности, равной 1. (Предполагается, что пропускная способность канала безгранично делима.) Стратегию игрока i обозначим через x_i ($x_i \in [0, 1]$), где x_i есть доля пропускной способности канала, которую занял игрок i .

Основное ограничение — естественное с точки зрения теории связи — состоит в том, что качество передачи информации по каналу *уменьшается* по мере загрузки канала. Если суммарная загрузка $\sum x_j > 1$, то ни один из игроков не может получить никакой пользы от этого канала (канал будет не доступен). Если $\sum x_j < 1$, то польза от передачи по каналу для игрока i будет равна $x_i(1 - \sum x_j)$. В самом деле, для любого игрока польза тем больше, чем большую долю канала он занимает, но, с другой стороны, эта польза уменьшается пропорционально общей загрузке ка-

нала. Как уже было замечено, польза для игрока i , полученная при передаче по каналу, определяется, как $U(x_i) = x_i(1 - x_i - t)$, где $t = \sum x_j$, а суммирование происходит по всем $j \neq i$ и $\sum x_j < 1$. Максимум функции $U(x_i)$ достигается, когда $x_i = (1 - t) / 2$.

Пусть все игроки играют свои оптимальные эгоистические стратегии при известных стратегиях остальных игроков (это будет стабильное множество стратегий). В нашем примере это значит, что каждый игрок i выберет долю пропускной способности, как $x_i = (1 - \sum_{j \neq i} x_j) / 2$. Существует только один способ это сделать: каждый игрок i из общего числа N игроков выбирает одинаковую долю пропускной способности канала $x_i = 1 / (N + 1)$.

Из предыдущего ясно, что польза для каждого игрока i , если он выбирает долю пропускной способности как $1 / (N + 1)$ будет равна $1 / (N + 1)^2$. Значит, суммарная польза для всех N игроков равна примерно $1 / N$. Иными словами, с ростом числа пользователей канала (игроков) суммарная польза от канала стремится к нулю.

Попробуем не жадничать, максимально используя канал. Если по каким-либо причинам нельзя директивно ограничить эгоизм участников, можно директивно уменьшить для них доступную пропускную способность, чтобы стремление каждого захватить большую часть пропускной способности канала не смогло существенно испортить качество канала. Установим, что *доступная* пользователям пропускная способность канала равна половине его истинной пропускной способности.

Что произойдет? Суммарная загрузка канала $\sum x_j = 0.5$, а польза от передачи по каналу для игрока i будет равна $0.5x_i$. Иными словами, нам удалось освободить полезность от второго сомножителя, который как раз и делал систему сильно связанной или, как мог бы сказать физик, самосогласованной системой, где каждый участник влияет на каждого.

Если теперь игроки будут, как и раньше, равномерно использовать канал, то доля пропускной способности канала для каждого из N игроков будет не $1 / N$ как раньше, а $0.5 / N$ (пропускная способность канала для всех игроков уменьшилась вдвое). В результате, суммарная польза канала будет равна $0.5 \cdot (0.5 / N) \cdot N = 0.25$, т. е. по сравнению с той ситуацией, когда каждый из N пользователей действовал, не обращая внимания на других, результат стал лучше примерно в $N / 4$ раза. Выигрыш будет тем значительней, чем больше число пользователей, а при $N \leq 4$ этот способ не дает выигрыша. Но при малом числе участников и проблемы обычно не возникает.

3. Синтез сети как игра

Одним из наиболее известных и важных направлений в *computer science* в прошлом веке был синтез логических сетей — основной теоретический инструмент

разработчиков вычислительных устройств и информационно-вычислительных систем. В определенном смысле это была классическая для математики область — решение условной оптимизационной задачи, в которой показателем качества являлись одни характеристики проектируемой сети (например, число элементов), а ограничениями — другие (например, быстродействие). Появление и развитие Интернета, нового типа компьютерных сетей, которые не создавались по *единому* плану *одним* коллективом разработчиков, полностью изменило представление о том, какие проблемы проектирования являются наиболее важными и как достичь эффективности структуры таких сетей.

Приблизительной аналогией изменений, которые инициировал переход от классических задач синтеза логических сетей к задачам синтеза распределенных сетей многими проектировщиками одновременно, можно считать задачи, возникающие перед человеком, намеренным построить дом в безлюдной местности, и задачи, возникающие перед группой людей, которые решают жить в одном поселке, но каждый в своем доме и со своими представлениями о желательности соседей, размерах участка для дома и т. п.

Понятно, что оценка распределенной сети типа Интернета, кроме традиционных мер сложности (стоимость, быстродействие), требует показателей качества, которые вообще не фигурировали в традиционных постановках задач синтеза логических сетей. Эти показатели качества призваны для того, чтобы:

- оценить насколько «сложнее» стала сеть, построенная различными проектировщиками, которые преследовали собственные интересы, по сравнению с сетью, построенной по единому плану;
- оценить, как синтезировать сеть, которая будет максимально соблюдать как интересы каждого проектировщика, так и интересы пользователей этих сетей.

Итак, построение распределенной сети Интернет естественно представить игровой моделью, с тем отличием от классических моделей типа «дилеммы узника», что ее размерность предъявляет уже совершенно иные требования к методам анализа.

3.1. Цена анархии и цена стабильности

Ранее уже мельком упоминалось, что в некоалиционных играх достижение *равновесия* (точнее, Нэш-равновесия) и достижение *эффективности* вовсе не одно и то же. В случае некоалиционной ДУ величины полезности игроков (значение игры), соответствующие единственному состоянию равновесия, могут быть сколь угодно меньше оптимальных значений (в смысле меры Парето), которые реализуются в некоторой неравновесной выходной ситуации. Потому мерой *эффективности равновесия* естественно полагать отношение суммарной полезности в состоянии равновесия к наилучшему значению суммарной полезности среди всех возможных исходов. Иными словами, насколько эгоистичное поведение в игре рацио-

нальных игроков приводит к результату, хуже того, который может быть (в принципе) получен при централизованном управлении⁸.

Конечно, еще одна немаловажная проблема — сколь сложным оказывается достижение равновесного состояния, т. е. сколько времени (числа шагов) необходимо для достижения равновесия и какова сложность алгоритма обучения этому процессу. Некоторые соображения по этому поводу будут приведены в конце раздела 3.

Наиболее часто в виде целевых функций исхода игры используются так называемые социальные цены, которые максимизируют или суммарные платежи *всех* игроков (*утилитарная* целевая функция), или платежи *каждого* игрока в отдельности (*эгалитарная* целевая функция). Заметим еще раз, что в Нэш-равновесии не реализуется оптимальный исход ни в случае утилитарной, ни в случае эгалитарной целевой функции. В играх типа дилеммы узника исход игры будет оптимальным только при координационном поведении игроков, а именно, когда игроки тем или иным образом смогут договориться о совместных действиях.

Для понимания того, что может дать координационное поведение, вводится два показателя: *цена анархии* и *цена стабильности*.

Цена анархии определяется как отношение между **худшим** значением целевой функции в одном из равновесий (напомним, что состояний равновесия может быть множество) и оптимальным значением целевой функции.

Цена стабильности определяется как отношение между **лучшим** значением целевой функции в одном из равновесий и оптимальным значением целевой функции.

Цена стабильности — мера, предназначенная для различения тех случаев, когда *все* равновесия неэффективны, и тех, когда только некоторые из них неэффективны. Очевидно, в игре с единственным равновесием цена анархии и цена стабильности совпадают.

Для изучения общего состояния дел наиболее интересны крайние случаи: когда цена анархии близка к 1 и когда цена анархии очень высока. В первом случае нет особой необходимости в наличии внешнего механизма «наведения порядка». Игроки сами могут достигнуть равновесия, при котором их платежи будут близки к оптимальным. Во втором случае — когда цена анархии велика — отсутствие внешнего механизма может дорого обойтись всем игрокам.

3.2. Игры локальной связности

Играми локальной связности принято называть игры на графах, где вершины графа это игроки, которые платят за дуги, которыми они напрямую (инцидентно) связаны с другими вершинами. Стратегия игрока — это выбор инцидентных вершин. При этом он сталкивается с двумя противоречивыми требованиями: желательностью минимизировать платежи и одновременно иметь как можно более ко-

⁸ Понятно, что в самом общем виде эта задача о том, насколько и в каких ситуациях сообщество людей не может обойтись без образования государства.

роткий путь до каждой вершины графа. Какова будет в таком случае цена стабильности, т. е. какова плата за равновесие в лучшем случае?

Подобные игры интенсивно изучались ранее в экономической литературе при моделировании формирования социальных отношений [15]. Сети локальной связности также могут быть моделями формирования сетей р2р, например, для соединения пользователей, обменивающихся файлами. Модели локальной связности были впервые ведены в [10], где представлены первые количественные результаты, относящиеся к стоимости создания стабильных сетей.

В моделях игр локальной связности игроки являются вершинами некоторой сети (графа) G с n вершинами, где каждый игрок идентифицируется с вершиной. Любая вершина u может принять решение о построении дуг, соединяющих ее с любым подмножеством вершин сети. Каждый игрок (вершина) преследует две взаимно противоречивых цели: поскольку построение дуг не бесплатно, он желает минимизировать число построенных дуг; с другой стороны, ему желательно иметь такую сеть, в которой расстояние от него до всех других вершин будет минимальным. Предположим, каждый игрок действует, исходя исключительно из собственных интересов. Насколько неэффективен будет результат построения такой сети?

Цена стабильности и анархии. Введем некоторые обозначения. Стратегией игрока u является множество тех дуг, исходящих из u , которые были построены этим игроком. Обозначим через S множество всех стратегий, выбранных n игроками, а через $G(S)$, получившийся в результате граф. Пусть, как обычно в теории графов, $\text{dist}_S(u, v)$ есть расстояние между вершинами u, v в графе $G(S)$, которое определяется как путь с минимальным числом дуг в этом графе, а если вершины u и v не соединены, то $\text{dist}_S(u, v) = \infty$. Каждый игрок, желающий заплатить минимум, хотел бы сделать расстояние до всех вершин минимальным.

Пусть стоимость построения одной дуги равна α . Тогда цель любого игрока u — минимизировать стоимость

$$C_u = \alpha n_u + \sum_v \text{dist}(u, v),$$

где n_u — число всех дуг, «купленных» игроком, а сумма берется по всем вершинам v сети, к которым он «купил» соединения, т. е. дуги. Предполагается, что все дуги не направлены, и поэтому, когда u купил дугу (u, v) , ее может использовать игрок v для связи с u . Процесс построения сети окажется в равновесии тогда и только тогда, когда сеть будет связна, т. е. каждая вершина будет соединена некоторым путем с любой другой вершиной сети. В противном случае, стоимость $C(G(S))$ будет равна бесконечности.

Назовем сеть $G(V, E)$ стабильной для величины α , если существует стабильный вектор стратегии S , который формирует эту сеть.

Социальная стоимость сети G определяется как

$$SC(G) = \sum_{u \neq v} \text{dist}(u, v) + \alpha |E|,$$

где $|E|$ — общее число дуг в графе.

Будем говорить, что сеть оптимальна (эффективна), если она минимизирует социальную стоимость $SC(G)$. Справедливы следующие утверждения:

Лемма 1. Если $\alpha \geq 2$, то любая звезда является оптимальным решением и если $\alpha \leq 2$, то оптимальным решением будет полный граф (см., например, рис. 4a и 4b).

Лемма 2. Если $\alpha \geq 1$, то любая звезда является Нэш-равновесным решением и если $\alpha \leq 1$, то полный граф будет Нэш-равновесным решением.

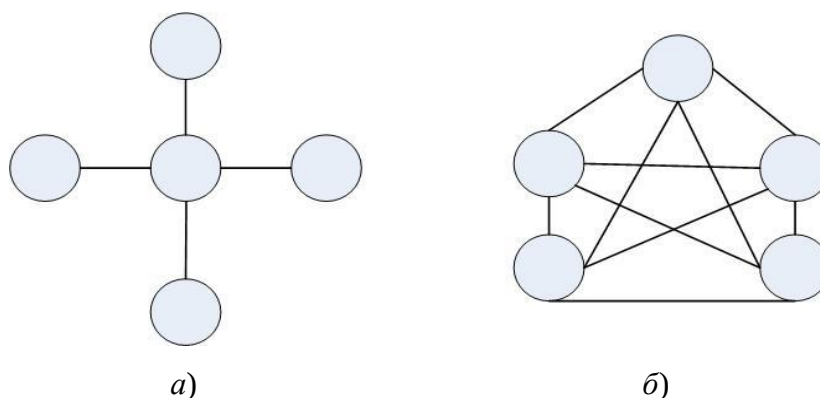


Рисунок 4. Пояснение к леммам 1, 2.

Эти утверждения позволяют сформулировать следующую теорему.

Теорема 1. Если $\alpha \geq 2$ или $\alpha \leq 1$, цена стабильности равна 1. Для $1 < \alpha < 2$ цена стабильности не превосходит $4/3$.

Комментарий. Остается открытым вопрос о равновесных решениях в случае, когда степень любой вершины ограничена константой, т. е. не зависит от общего числа вершин в графе. Это условие не выполняется ни для звезды, ни для полного графа, а между тем оно в практических ситуациях может быть определяющим.

Цена анархии. Для определения цены анархии необходимо, прежде всего, оценить сверху величину $SC(G)$ — социальную стоимость сети G . Эта оценка дается следующей леммой.

Лемма 3. Если Нэш-равновесный граф G имеет диаметр d , то социальная стоимость G превосходит минимальную стоимость сети не более чем в $\text{const} \cdot d$ раз.

На основании этой леммы доказывается.

Теорема 2. Так как диаметр Нэш-равновесного графа не превосходит $2\sqrt{\alpha}$, то и цена анархии не превосходит $O(\sqrt{\alpha})$.

Для доказательства этой теоремы необходимо установить границу для диаметра любого Нэш-равновесного графа, точнее говоря, показать, что для любой пары вершин u и v этого графа $\text{dist}(u, v) < 2\sqrt{\alpha}$. Для этого достаточно заметить [29], что в случае, когда для некоторых вершин u и v $\text{dist}(u, v) \geq 2k$ (k — некоторая положительная константа), то при добавлении дуги (u, v) вершина u должна заплатить α , но сократит сумму кратчайших путей ко всем вершинам между u и v на величину

$(2k-1) + (2k-3) + \dots + 1 = k^2$. Таким образом, если $\text{dist}(u, v) > 2\sqrt{\alpha}$, вершине u выгодно добавить дугу (u, v) , а значит, отклониться от рассматриваемого решения, что противоречит предположению о том, что рассматриваемый граф находится в Нэш-равновесии.

Теорема 2 дает оценку цены анархии только в зависимости от стоимости создания дуг в сети. Очевидно, что окончательная оценка не может не зависеть от общего числа вершин. Действительно, в [6] показано, что в общем случае граница цены анархии есть $O(1 + \alpha/\sqrt{n})$. Таким образом, если стоимость создания дуг в сети имеет порядок общего числа вершин, стоимость анархии будет расти с ростом n как $O(\sqrt{n})$.

Представляется, что если вопрос оценки величин анархии и стабильности возникнет при проектировании больших распределенных сетей, ответ может быть получен только численными методами. К счастью, есть основания полагать, что сложность алгоритмов, с помощью которых можно будет установить значения этих параметров при произвольных и различных значениях стоимости создания связей (дуг) и произвольном числе вершин, не будет превосходить $O(n^3)$.

3.3. Потенциальные игры

Хотя для многих (если не для большинства) практически интересных моделей теории игр достаточно просто доказать существование равновесия (стабильного состояния), однако алгоритмически поиск равновесия является крайне трудной процедурой. Точнее говоря, было установлено, что чаще всего эти процедуры являются *untractable*, что не позволяет (для задач большой размерности) надеяться на нахождение состояния равновесия в практически приемлемое время. А ведь сегодня, как можно понять из приведенных примеров, основной интерес представляют игры, число участников в которых может измеряться многими тысячами, если не миллионами.

Понятие «потенциальной игры», такой, где *намерение всех* игроков изменить их стратегию можно описать, используя единственную функцию, названную потенциальной, было впервые предложено в 70-ые гг. Р. Розенталем [25] (*Robert W. Rosenthal*). Но лишь спустя 20 лет становится ясно, насколько перспективным оказался предложенный им подход [19]. Дело в том, что потенциальные игры обладают уникальными свойствами: в них всегда существует чистое равновесие и динамический процесс получения лучших ответов гарантированно сходится⁹. Эти свойства, в свою очередь, обеспечивают возможность получения достаточно точных оценок цены стабильности в играх глобальной связности. Но прежде необходимо привести некоторые сведения о потенциальных играх.

⁹ В теории игр динамический процесс получения лучших ответов (*best response dynamics*) представляет собой класс правил обновления игровых стратегий, при котором стратегии игроков в следующем раунде определяются лучшими ответами некоторого подмножества всех игроков.

Потенциальные игры могут быть *ординальными* или *кардинальными*. В кардинальных (иначе говоря, точных потенциальных) играх разница в *индивидуальных платежах* каждого игрока, которая является результатом изменения его индивидуальной стратегии, должна быть в точности равна изменению значения самой потенциальной функции. Для ординальных игр только *знаки* этой разницы должны быть те же (если платеж уменьшился, то и значение потенциальной функции уменьшилось и наоборот).

Наличие потенциальной функции игры оказывается полезным и наглядным способом для анализа свойств равновесия, потому что намерение всех игроков отображено в поведении всего лишь одной функции. Несложно догадаться, что множество равновесных ситуаций игры как-то связано с наличием локальных оптимумов потенциальной функции. Более того, сходимость за конечное время к чистому Нэш-равновесию некоторой повторяющейся потенциальной игры также определяется видом потенциальной функции для этой игры.

В качестве простого примера потенциальной игры рассмотрим игру с экстерналиями (*externality*), т. е. такими внешними эффектами в процесс игры (чаще всего экономической), которые не учитываются непосредственно в структуре рыночных цен.

Примером положительной экстерналии может служить взаимодействие двух хозяйств: пасеки и фруктового сада. Владельцы этих хозяйств не вступают ни в какие рыночные отношения, но каждый получает выигрыш от соседства: пчелы, опыляя яблони, способствуют повышению урожайности, а яблони позволяют пчелам увеличить сбор пыльцы, а, значит, их владельцу увеличить сборы меда.

Положительная экстерналиа может быть результатом деятельности человека, озабоченного лишь собственными интересами: когда владелец одной из квартир размещает на лестничной площадке дополнительный светильник, он заботится о себе, но остальные его соседи по лестничной площадке бесплатно получают некоторую полезность.

Отрицательные экстерналии встречаются много чаще: это и автомобилисты, которые загрязняют воздух *всем* живущим в городе и создающие пробки, от которых страдают другие автомобилисты, и предприятия, загрязняющие воду и воздух, и лесозаготовители, деятельность которых губит еще не подросшие деревья, и множество других явлений, характерных для современной цивилизации.

Рассмотрим платежную матрицу на рис. 5.

	+1	-1
+1	$b_1 + w, \quad b_2 + w$	$b_1 - w, \quad -b_2 - w$
-1	$-b_1 - w, \quad b_2 - w$	$-b_1 + w, \quad -b_2 + w$

Рисунок 5. Платежная матрица

В этой игре каждый из двух игроков имеет две стратегии $(+1, -1)$, а индивидуальные платежи игроков задаются функцией $u_i(s_i, s_j) = b_i s_i + w s_i s_j$, где $s_i(s_j)$ — стратегии одного и другого игрока, а w есть величина положительной экстерналии при выборе соответствующей стратегии.

Игра, описанная платежной биматрицей является игрой с потенциальной функцией

$$P(s_1, s_2) = b_1 s_1 + b_2 s_2 + w s_1 s_2.$$

Проанализируем, что происходит в этой игре, когда игрок 1 меняет стратегию -1 на стратегию $+1$. Изменение величины платежа в соответствии с функцией $u_i(s_i, s_j)$ будет

$$\Delta u_1 = u_1(+1, s_2) - u_1(-1, s_2) = b_1 + b_2 s_2 + w s_2 - ((-1) b_1 + b_2 s_2 - w s_2) = 2 b_1 + 2 w s_2.$$

Теперь можно проверить, что соответствующее изменение в потенциальной функции в точности равно изменению величины платежа:

$$\Delta P = P(+1, s_2) - P(-1, s_2) = (b_1 + b_2 s_2 + w s_2) - (-b_1 + b_2 s_2 - w s_2) = 2 b_1 + 2 w s_2 = \Delta u_1.$$

Очевидно, что для второго игрока результат эквивалентен (изменение величины платежа равно изменению в значении потенциальной функции).

Пусть численные значения параметров выбраны следующим образом: $b_1 = 2$, $b_2 = -1$, $w = 3$. В этом случае платежная функция игры выглядит, как показано на рис. 6.

	+1	-1
+1	5, 2	-1, -2
-1	-5, -4	1, 4

Рисунок 6. Платежная матрица

Такая платежная матрица характерна для игры «семейный спор» или, как ее чаще называют, «битва полов». В этой игре муж и жена решают, как им совместно провести время: пойти на футбол $(+1, +1)$ или пойти на балет $(-1, -1)$.

В случае «семейного спора» имеют место два чистых Нэш-равновесия $(+1, +1)$ и $(-1, -1)$ и эта особенность сохраняется при любой величине экстерналии $w \geq 3$. Эта положительная экстерналия играет роль «семейного согласия», в результате которого семейная пара предпочитает координировать свои желания. Легко проверить, что если экстерналия станет отрицательной (например, в нашем примере $b_1 = 2$, $b_2 = -1$, $w = -3$) чистыми равновесиями по Нэшу станут действия $(+1, -1)$ и $(-1, 1)$, т. е. муж и жена будут стремиться противоречить друг другу.

Игра, показанная на рис. 6, описывается потенциальной функцией $P(s_1, s_2)$ вида, показанного на рис. 7, где ситуация $(1, 1)$ является глобальным максимумом выбранной потенциальной функции $P(s_1, s_2)$.

	+1	-1
+1	4	0
-1	-6	2

Рисунок 7. Платежная матрица

3.4. Игры глобальной связности

В отличие от сетей локальной связности, при изучении сетей глобальной связности *игрок* не ассоциируется с какой-то конкретной индивидуальной вершиной сети. Игрок преследует глобальную цель — достижение некоторой величины связности сети, для чего он имеет возможность вкладывать деньги в создание любого подмножества дуг этой сети. Полученная связность сети будет мерой качества этой сети. Но игроки в общем случае не стремятся к равномерной связности; каждый игрок интересуется лишь некоторым подмножеством вершин, связность которых он хочет обеспечить, но, конечно, минимально возможной ценой. В отличие от ситуаций локальных игр, в глобальной игре величина расстояния $dist(u, v)$ для произвольной пары вершин (u, v) не имеет значения, главное — соединить *выбранные терминальные* вершины. Но поскольку общим желанием является построение, как можно более дешевой, то, приписав каждой дуге e стоимость $c_e \geq 0$, будем предполагать, что *все* игроки, которые пользуются этой дугой, поровну делят между собой эту стоимость.

В качестве модели сети глобальной связности будем рассматривать ориентированный граф $G(V, E)$, где каждой дуге приписана неотрицательная стоимость c_e . Задано k игроков и для каждого игрок i определены вершина-исток s_i и вершина-сток t_i . Целью игрока i построить такую сеть, в которой вершина t_i будет достижима из s_i , причем затратив на это минимум возможного. Это значит, что стратегией игрока i будет путь P_i из s в t в графе G . Выбирая путь P_i , игрок участвует в построении всех дуг этого пути в окончательной структуре графа. При заданной стратегии каждого игрока спроектированная сеть (граф G) определяется как $\bigcup_i P_i$.

Как уже было замечено выше, мы предполагаем, что стоимость каждой дуги равномерно распределяется между всеми игроками, которые этой дугой пользуются. Точнее говоря, если k_e — количество игроков, путь которых содержит дугу e , то каждый игрок платит величину c_e / k_e . Таким образом, общая стоимость того, что должен заплатить игрок i при реализации стратегии S , определяется как $C_i(S) = \sum c_e / k_e$. Поэтому общая сумма, заплаченная всеми игроками в сети, в точности равна стоимости созданной ими сети. Ранее было показано, см. например, [11], что такая схема деления расходов между участниками удовлетворяет

набору естественных аксиом и является *справедливым* механизмом или *разделением стоимости по Шепли* (Shapley cost-sharing).

В качестве примеров сетей глобальной связности рассмотрим игровые задачи в транспортных сетях, так называемые игры в сетях Шепли (Shapley network design game). Для начала рассмотрим игру в простейшей сети Шепли, где стоимость верхней дуги k , нижней $1 + \epsilon$, где $\epsilon > 0$ произвольно малая величина и в игре принимает участие k игроков (рис. 8).

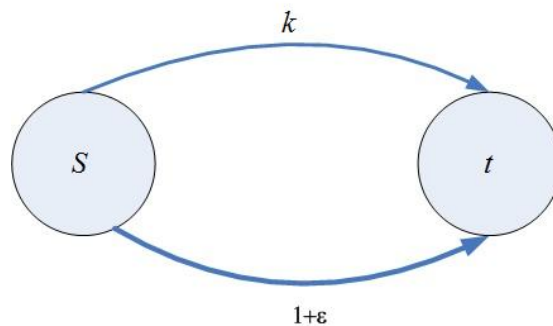


Рисунок 8

В этой сети k игроков используют одну и ту же вершину источника s и вершину назначения t . Какие стратегии игроков окажутся Нэш-равновесными (стабильными) в этой сети?

В этой игре множество равновесий и эти равновесия существенно отличаются по качеству.

Предположим, *каждый* игрок выбирает нижнюю дугу, стоимость которой $1 + \epsilon$. Полученный исход будет Нэш-равновесием, поскольку отклонение от него почти в k раз увеличит для каждого стоимость. С другой стороны, если *все* выберут правую дугу, то для каждого стоимость маршрута будет 1, т. е. меньше, чем по левой дуге, и потому каждому не будет иметь смысл отклоняться от такого маршрута. Это будет второе Нэш-равновесие.

Показатель качества рассматриваемой сети Шепли это суммарная стоимость всех выбранных игроками маршрутов в сети (такой показатель часто называют *социальной стоимостью*). Социальная стоимость сети это и есть оптимальная стоимость сети, поэтому, зная ее, можно установить коэффициенты анархии и стабильности для сети. Оптимальная стоимость сети на рис. 8 не превосходит 1. Стоимость для первого НР (по нижней дуге) равна 1, а второго — k . В результате, цена анархии будет равна числу игроков, а цена стабильности равна 1 (напомним, что цена стабильности определяется отношением *лучшего* значения стоимости в равновесии к оптимальной стоимости). Таким образом, два «одинаково равновесных» состояния оказываются качественно различными по стоимости, что говорит об ограниченности применения понятия «равновесие по Нэшу» для определения эффективности выбираемых стратегий поведения. Простой пример, рассмотренный здесь,

оказывается — с точки зрения цены анархии — худшим из возможных случаев. Можно показать, что это верхняя оценка для цены анархии, т. е. в *любой* сети Шепли цена анархии не может быть больше числа игроков.

Способ разделения стоимости общих дуг между игроками может стать существенным фактором с точки зрения цены анархии. В [6] показано, что чрезвычайно простой *Shapley cost-sharing* метод приводит к оценкам цены анархии очень далеким от оптимальных. Точнее говоря, в любом ненаправленном графе с одной вершиной стока для всех игроков существует такой способ разделения стоимости дуг, при котором цена анархии не будет превосходить 2. Важно, что нахождение такого способа производится с помощью такого алгоритма, трудоемкость которого всего лишь «слабо нелинейна», как по числу вершин, так и по числу дуг в графе.

Перейдем к оценкам цены стабильности. Цена в *лучшем* по стоимости состоянии равновесия также может быть больше социальной цены. Это видно из примера сети Шепли, показанной на рис. 9.

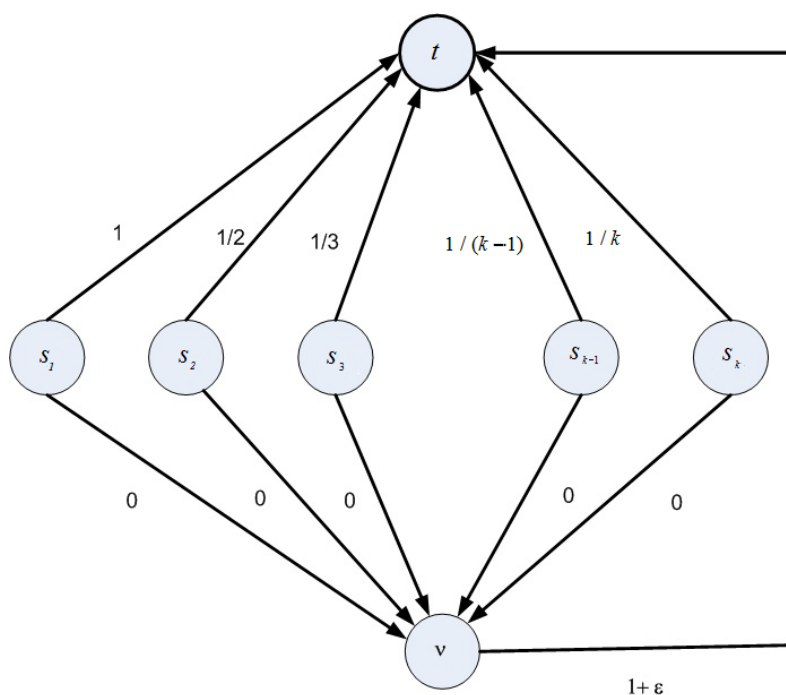


Рисунок 9

В этой игре k игроков, каждый из которых имеет *свою* вершину истока, и должен достичь одного и того же стока (пункта назначения) s . Для каждого игрока i , ($i \in [1, k]$) стоимость дуги равна $1/i$. Очевидно, оптимальная стоимость этой сети равна $1 + \varepsilon$, которая реализуется, если *все* игроки выбирают дугу (vt) . Однако такой способ *не является* равновесием, ведь каждому игроку i рационально двигаться по дуге от вершины s_i непосредственно к вершине t . Убедиться в этом можно, заме-

тив, что для игрока k не имеет смысла двигаться по дуге (vt) поскольку $(1 + \varepsilon) / k > (1 / k)$. Того же рода неравенство будет справедливо (по индукции) для игроков $k - 1, k - 2, \dots, 1$. Значит, прямой путь является доминантной стратегией для каждого игрока и Нэш-равновесие реализуется, когда все игроки выбирают прямой путь в вершину назначения. При этом стоимость Нэш-равновесия будет равна $H_k = \sum (1/i)$ по всем $i \in [1, k]$. H_k называется гармоническим числом, его величина примерно равна $\ln k$.

Приведенный пример свидетельствует, что даже цена стабильности может расти с ростом числа игроков, хотя и логарифмически. Это лишний раз указывает на то, что стремление к получению равновесных стратегий далеко не всегда эффективная стратегия, во всяком случае, если показателем качества является социальная стоимость, которая учитывает суммарные интересы *всех* игроков. Но может ли цена стабильности расти, как и цена анархии, пропорционально числу игроков?

Ответить на этот вопрос помогают потенциальные функции, о которых шла речь в предыдущем разделе. Было установлено, что все сети Шепли представляют собой потенциальные игры. Поэтому для всех таких сетей существуют равновесия в чистых стратегиях, что и позволяет установить общий результат о верхней оценке для цены стабильности. Оказалось, что цена стабильности в играх глобальной связности с k игроками никогда не бывает больше, чем гармоническое число H_k [6]. Таким образом, сеть Шепли на рис. 9 есть пример сети с максимально возможной ценой стабильности, пропорциональной логарифму числа игроков. Иными словами, k игроков, каждый из которых действует исключительно в собственных интересах, проиграют не более чем в $\log k$ раз в значении стоимости (по сравнению с оптимальным значением). Более того, было показано, что применение схем разделения стоимости, отличных от Shapley cost-sharing метода, не может улучшить эту оценку, как это было в случае с оценкой цены анархии.

Какой ценой могут быть достигнуты механизмы игр с оптимальными значениями цены стабильности — это уже совершенно отдельный вопрос. Во всяком случае, если говорить о цене получения чистого Нэш-равновесия, то было показано [10], что проблема нахождения такого равновесия в потенциальных играх относится к классу PLS-полных проблем (*Polynomial Local Search complete*).

3.5. Транспортные сети и «здоровый смысл»

Транспортные сети Шепли поставляют множество примеров игр в сети с неожиданными исходами. На рис. 10 показан пример, предложенный Пиго (Pigou).

Здесь две вершины s (начало маршрута) и t (конец маршрута). Для каждой из двух дуг заданы функции стоимости $c(x)$, где x — некоторая непрерывная переменная из интервала $[0, 1]$. Пусть переменная $x = 1$, это некоторый максимальный автомобильный поток. Для верхней дуги $c(x) = 1$, для нижней $c(x) = x$. Это означает, что стоимость проезда по нижней дуге тем меньше, чем меньше трафик, а стоимость по верхней дуге от трафика не зависит вовсе. Рациональные водители долж-

ны выбирать нижнюю дугу — это доминантная стратегия. В результате, когда x станет равным 1, для *каждого* водителя стоимость станет равной 1 и такой же будет средняя стоимость. Однако легко обнаружить, что это равновесное решение не является оптимальным. Если половина водителей выберет верхнюю дорогу, то средняя стоимость (социальная цена) будет равна $(\frac{1}{2})(\frac{1}{2}) + (\frac{1}{2}) = \frac{3}{4}$. Равновесие в этой игре одно, поэтому цена анархии и цена стабильности равны $\frac{4}{3}$.

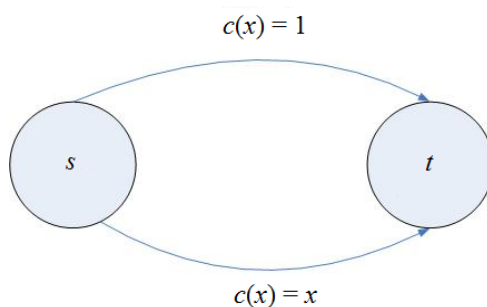


Рисунок 10. Пример Пиго.

Еще более удивительный пример получил в специальной литературе название парадокс Браесса (Braess's Paradox) [6].

На рис. 11а изображена сеть из четырех вершин: вершина начала маршрута s , вершина назначения t и две промежуточные вершины v и w . На дугах указаны стоимости (время в пути). По дугам sw и vt время в пути равно 45 мин., а по дугам sv и wt зависит от интенсивности движения как $T/100$, где T — количество автомобилей.

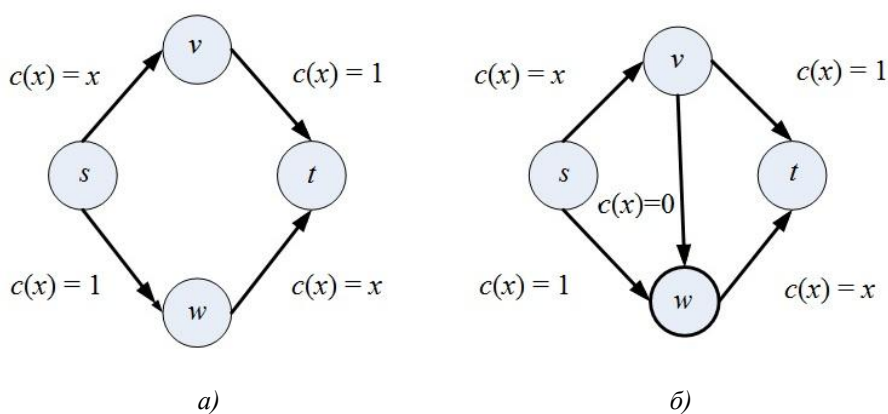


Рисунок 11. Парадокс Браесса.

В условиях равновесия транспортный поток разделяется на две равные части, поскольку время в пути равно по обоим маршрутам. В нашем случае это время в

равновесии будет $45 + T/200$. Пусть для определенности $T = 4000$. Тогда это время будет 65 мин. Предположим, что градоначальник, недовольный временем проезда из s в t , изыскал средства для построения новой дороги из вершины v в вершину w для разгрузки существующего трафика. Причем для того, чтобы новая сеть была наверняка лучше существующей, добились того, что стоимость проезда по маршруту vw была равна 0 (это вовсе не значит, что строительство этой дороги ничего не стоило, скорее наоборот).

Автомобилисты возрадовались и равновесие сместилось. Поскольку путь из s в v , в худшем случае, т. е. когда *все* по нему поедут, займет $4000/100 = 40$ мин., а путь sw займет 45 мин., весь поток направится по новому маршруту $swvt$. В этом случае каждый из сменивших маршрут будет ехать 80 мин. Так, в результате появления новой дороги и, как следствие, смещения равновесного поведения, среднее время в пути увеличилось почти на 20%.

Не следует думать, что описанный выше эффект проявляется лишь при выбранных нами числовых значениях. Будь это так, он не был бы парадоксом. В своей статье Браесс рассмотрел общий случай, показав, при каком виде функций стоимости это явление будет иметь место.

Удивительно, но парадокс Браесса оказался похож на некий ранее неизвестный «закон природы». Во-первых, выяснилось, что если рассматривать *произвольную* транспортную сеть (произвольный ориентированный граф) и добавлять в этот граф новые маршруты — не обязательно состоящие из одной дуги — то этот парадокс будет иметь место примерно в *половине* случаев. (Не удивительно, что в 1990 г. закрытие 42-й улицы в Нью-Йорке для движения заметно уменьшило количество заторов в этом районе. И это не единичный случай.)

Совсем неожиданным стало опубликование в 2012 г. работы международной команды физиков, из которой следует, что подобные парадоксы существуют на микроскопическом уровне. Так, в частности, при исследованиях свойств веществ на *мезоскопическом* уровне¹⁰ оказалось, что *добавление* путей для движения электронов *уменьшает* проводимость изучаемого образца.

* * *

Не следует думать, что задачи синтеза механизма игры ограничиваются теми моделями, которые были упомянуты в предыдущих разделах. Существует еще немало задач, для исследования которых используются примерно такие же методы и модели. В качестве примера можно указать проблему расположения оборудования (*facility problem*), необходимого множеству клиентов, наиболее выгодным для владельцев этого оборудования способом. Например, как расположить некоторое множество веб-серверов в сети, которая обслуживает множество пользователей. В подобной игре может быть три стадии: на первой стадии провайдеры решают задачу расположения оборудования, на второй — они устанавливают цены для пользователей, а на последней — пользователи выбирают того провайдера, чьи условия

¹⁰ Промежуточная область в физике, в которой изучаются свойства веществ в диапазоне между молекулярными размерами и размерами в десятки микрометров.

им кажутся наиболее приемлемыми. Выясняется [29], что это также потенциальная игра и, следовательно, в ней существует чистое равновесие, хотя оно может и не быть социально оптимальным (так же, как в ДУ). Кроме того, цена анархии в таких играх не превосходит 2, т. е. эгоистическое поведение незначительно ухудшает ситуацию по сравнению с централизованным.

4. Задачи *offline* и *online* и синтез механизмов игры

В алгоритмической теории игр, которая начала формироваться в последнее десятилетие, принят тот же подход к рассмотрению игровых постановок, что и в теории вычислений: изучение процессов *offline* и *online*. В первом случае предполагается, что все имеющиеся данные находятся в нашем распоряжении и с ними можно производить необходимые вычисления, во втором — данные появляются последовательно во времени и, как правило, закон появления этих данных во времени известен лишь частично. Хотя все классические постановки теории игр относятся к классу *offline*, множество классов *online* игр удивительно обширно. Вот только некоторые примеры:

- биржевые игроки, каждый из которых обладает некоторым капиталом и некоторыми представлениями о риске; наблюдая за биржевыми ценами, меняющимися во времени, игроки должны принять определенные финансовые решения: покупать ли опционы с заданными сроками, покупать или продавать ценные бумаги из своего портфеля, покупать или продавать фьючерсы с заданными сроками поставки и т. п.;
- задачи распределенных вычислений, когда разнотипные задачи пользователей необходимо распределить по различным серверам, причем интенсивность поступления задач и параметры этих задач меняются во времени по неизвестным законам (типичная ситуация, например, для создателей «облачных вычислителей»);
- онлайн-аукционы с набором торгуемых товаров и неизвестным количеством покупателей, меняющемся во времени — например, набор учащихся в платную спортивную школу по нескольким спортивным дисциплинам, когда приток желающих и их финансовые возможности неизвестны;
- всевозможные задачи поиска: поиск товаров наименьшей стоимости, поиск подходящей работы (для работника) или подходящего работника (для нанимателя).

Как можно заметить, во всех перечисленных случаях сложно или практически невозможно проведение предварительных маркетинговых исследований для получения информации о поведении «рынка».

Из приведенных примеров должна быть понятна общая картина: в каждом из этих случаев либо игроки в неизвестные моменты времени появляются и исчезают, либо последствия принятых решений в будущем априори неизвестны, либо оба этих фактора имеют место.

Так же, как и в классах online-вычислений, в online-играх существуют специальные методы классификации решений с точки зрения трудоемкости, и главное отличие состоит в том, что в игровых задачах имеют место свои показатели качества решения, в которых обычно учитываются интересы всех играющих (например, «аукционеров» и «покупателей»), которые в общем случае противоположны. Заведомо понятно, что такие методы дизайна, как механизм Викрея–Кларка–Гроуса, применительно к проведению online-аукционов оказываются неприменимы. Слишком велика неопределенность: прежде всего, неизвестны не только *типы* игроков, т. е. их истинные представления о ценности торгуемых предметов, но и точное количество игроков в каждый будущий момент времени, не говоря уж о том, что могут быть неизвестны параметры внешней среды, воздействующие на их поведение.

Комментарий. Изучение возможности решения онлайн-овых задач началось еще в 60-е гг. после появления неожиданных решений «проблемы секретаря» и одной из первых была работа Е. Б. Дынкина [8], опубликованная в 1963 г. Нетривиальность математических результатов и масса прикладных задач, для решения которых оказалось полезным изучение этой проблематики, привело к тому, что число опубликованных работ с той поры многократно возросло (см. подробнее, обзор [28] или en.wikipedia.org/wiki/Secretary_problem). В случае простейшей дискретной формулировки проблема состоит в том, чтобы выбрать лучшего претендента с помощью интервью из n соискателей, причем решение не может быть отложено, а должно приниматься сразу после интервью. Тогда наилучшим решением является интервью первых $t - 1$ соискателей и выбор первого из следующих, чьи достоинства превосходят любого из первых $t - 1$. При этом для больших n вероятность действительно выбрать лучшего быстро достигает величины, равной $1/e$, при том, что t/n также будет равно $1/e$.

4.1. Игры online и анализ конкурентоспособности

Объективная сложность рассматриваемых проблем потребовала некоторого ослабления требований к эффективности алгоритмов решения задач синтеза online-механизмов. В качестве основной идеологии принято получение верхних оценок сложности, т. е. синтез *наилучшего* по порядку величины показателя качества алгоритма в случае *наихудшей* внешней ситуации. В теории сложности алгоритмов о таком подходе принято говорить как об анализе конкурентоспособности (*competitive analysis*)¹¹. Учитывая тот факт, что у нас нет надежд на получение правдоподобной модели среды, в которой происходит изучаемый динамический процесс, единственное, что можно сделать, это сравнить качество предлагаемого решения с ситуацией, в которой мы бы располагали полной информацией о происходящем, т. е. ситуацией дизайна offline-механизмов.

¹¹ Предлагаемый подход (хотя и не получивший еще название competitive analysis) обязан своему происхождению работам 70-х гг. по алгоритмам аппроксимации для NP-полных проблем. Хотя по сути дела речь идет о стандартной минимаксной постановке — нахождении наилучшего алгоритма для реализации самого сложного объекта.

Наиболее понятной эта ситуация становится в случае поиска конкурентоспособных механизмов для online-решений финансовых проблем [22]. Пусть, например, трейдер на валютной бирже намерен в течение торгового дня обменять некоторое количество рублей на максимально возможное количество евро. Обменный курс меняется постоянно, но ему известны или конечный интервал цен $[m, M]$, или их отношение $\varphi = M / m$. Основываясь только на этой информации, он должен выбрать «наилучшую» цену, т. е. такой обменный курс, который будет для него наиболее выгоден. Пусть он предложил алгоритм Ω , который каждый день дает некоторое решение. Для оценки качества этого online-решения алгоритма Ω будем сравнивать его с гипотетическим случаем offline-торговли, тем алгоритмом Θ , который выбирает цену, *зная* всю последовательность цен, которая появляется в течение дня. Алгоритм Ω будем называть *c*-конкурентоспособным, если для *каждой* конечной последовательности цен $I = (i_1, i_2, \dots, i_n)$

$$c \cdot R(\Omega(I)) \geq R(\Theta(I)) + \alpha,$$

где $R(\Omega(I))$, $R(\Theta(I))$ — решение (суммарная величина полученных евро), «заработанных» алгоритмом $\Omega(\Theta)$; α — некоторая константа. Таким образом, *c*-конкурентоспособный online-алгоритм Ω хуже оптимального алгоритма Θ не более чем в *c* раз.

Подобный процесс биржевой торговли можно представить в виде антагонистической игры с нулевой суммой следующим образом. Первый игрок изобретает алгоритм Ω и сообщает его второму. Второй игрок (игрок offline) получает от первого описание алгоритма Ω и выбирает такую последовательность цен $I = (i_1, i_2, \dots, i_n)$, которая *максимизирует c*. Поскольку основной целью первого игрока является *минимизация c*, такая игра становится игрой с нулевой суммой.

4.2. Информированность и online-игры полковника Блотто

Остановимся подробнее на варианте online-игры, которая берет начало от хорошо известной игры полковника Блотто. Напомним, что игра полковника Блотто (*Colonel Blotto game*), предложенная в 1921 г. Э. Борелем [5], в последние десятилетия активно изучалась, см. обзор в Б. Роберсона [24] (B. Roberson). В этой игре каждый игрок имеет ограниченный ресурс, который он должен распределить на ограниченном количестве участков («полей боя»). Игрок, который на некотором участке разместил ресурс строго больший, нежели его противник на соответствующем участке, выигрывает этот участок (гарантированно или с некоторой вероятностью). Оба игрока стремятся максимизировать количество выигранных участков (или вероятность выигрыша заданного числа полей).

В наиболее изученном дискретном варианте этой игры решение о выигрыше для двух расстановок — каждая расстановка N -мерных векторов по основанию B , в котором сумма значений всех N координат равна B — осуществляется с помощью одновременного сравнения соответствующих координат этих векторов. Таким об-

разом, как только игроки выбрали расстановку своих ресурсов в каждом из полей, вопрос о победителе (или ничейном результате) предрешен.

В классической игре полковника Блотто очевидным образом отсутствует равновесие в чистых стратегиях, и основные усилия теоретиков были сосредоточены на поисках таких расстановок у противников, которые могут обеспечить равновесие в смешанных стратегиях. Окончательные результаты получил Б. Робертсон. Он, в частности, показал, в каком классе функций распределения ресурсов противники могут достигнуть равновесия в смешанных стратегиях при *любых* начальных соотношениях ресурсов у них.

Комментарий. Игра полковника Блотто по существу это усложненный вариант классической игры matching penny, антагонистической игры с нулевой суммой, в которой один игрок получает 1, а его противник -1 , когда показанные ими монеты соответствуют друг другу (оба игрока показывают орла или оба решку), а второй получает 1 (соответственно противник -1), когда монеты показаны противоположной стороной. В такой игре нет равновесия в чистых стратегиях, а есть единственное равновесие в смешанных стратегиях, когда игроки с одинаковой вероятностью показывают орел и решку. Конечно, цена игры будет равна нулю и примерно такая же ситуация будет в игре Блотто: в состоянии равновесия при условии одинаковых ресурсов у противников цена игры будет равна нулю и добиться этого можно, равномерно и независимо размещая ресурс на каждом поле.

Более или менее очевидно, что классическая постановка игры полковника Блотто допускает огромное количество обобщений и в последние годы интерес к этим возможностям постоянно растет [13]. В этой работе, в частности, содержится обширный перечень применений таких обобщенных моделей для военных приложений, политических баталий, спортивных событий, бизнеса, юстиции, организованной преступности и проблем образования.

В данном обзоре нет возможности сколько-нибудь подробно разобрать состояние дел во множестве современных работ, обобщающих классическую игру полковника Блотто, что уже сделало его *General Blotto*. Остановимся лишь на возможности изучения вопросов информированности противников в игре полковника, потому что это имеет прямое отношение как к проблемам полноты информации в играх (проблема 2 из первого раздела), так и к организации конкурентоспособной online-игры.

4.3. Задача об инсайде

Для понимания важности информированности игроков в игре полковника приведем простой пример. Пусть два игрока участвуют в тендере на получение концессии по разработке ряда участков, содержащих полезные ископаемые. Условия проведения конкурса таковы: месторождение разбито на N участков. Можно подать $R \leq N$ заявок. В каждой заявке указывается стоимость, которую участник готов заплатить за данный участок. Тот участник, который предложил большую стоимость не менее чем за $(N/2) + 1$ участок, объявляется победителем и получает пра-

ва на разработку всех N участков. При одинаковом числе выигранных участков объявляется новый конкурс. Если участник не обладает информацией о величине ресурсов соперника (максимальной сумме средств, которую он готов потратить), то при одинаковой величине ресурсов $B_1 = B_2 = B$ нельзя получить гарантированный результат, но можно «почти всегда» получить ничью в случае, когда ресурсы распределяются на всех N в соответствии с теоремой Роберсона. «Почти всегда» здесь означает, что отношение числа размещений соперника, при которых ему удастся выиграть, стремится к 0 при $N \rightarrow \infty$.

Предположим теперь, что участник имеет одному ему известную оценку полезности выигрыша тендера и рассматривает инсайдерское предложение за некоторую сумму β получить информацию о размещении ресурсов у соперника. Источник и потребитель информации имеют свои представления о стоимости сообщаемой информации, которыми они не собираются делиться. Потому налицо классическая задача выбора равновесной цены, которая удовлетворит и покупателя, и продавца. Решение подобной задачи возможно лишь в том случае, когда потребитель информации обладает ясным пониманием того, сколько ценна будет полученная информация, т. е. насколько больше шансов будет у него выиграть тендер, после того как он получит эту информацию. И, конечно, в идеале он стремится получить такую информацию, которая гарантирует ему победу.

Из этого примера должно быть понятно, что анализ информированности игроков о решениях противника (хотя бы и неполные сведения о том, как противник разместил ресурсы) в прикладных задачах, описываемых моделью полковника Блотто, может иметь первостепенное значение. Без получения таких оценок невозможен анализ конкурентоспособности предлагаемых алгоритмов игры полковника Блотто в режиме *online*.

На основании оценок ресурсов, необходимых и достаточных для гарантированной победы в случае различных предположений об информированности, можно показать, что если противники в игре полковника Блотто обладают одной и той же суммарной величиной ресурса B , размещенного на N полях, причем $B = O(N \log^2 N)$ и стоимость получения информации о ресурсе, размещенном на отдельном поле $\phi \leq \log B$, то существует c -конкурентоспособный алгоритм Ω , который *гарантированно* выигрывает более $N / 2$ полей у любого противника.

Таким образом, возможность (не бесплатная!) получать информацию о противнике может существенным образом повлиять на решение о выборе стратегии размещения ресурсов. Можно даже практически точно оценить получаемое преимущество в объеме ресурсов. А именно, в состоянии смешанного равновесия по Нэшу можно добиться почти гарантированного выигрыша более чем $N / 2$ полей лишь при условии двукратного перевеса по ресурсам, т. е. имея $2B$ ресурсов против B у противника. Цифровое моделирование убеждает, что, когда достигается смешанное равновесие по Нэшу при двукратном перевесе сил у одного из игроков, вероятность выиграть более $N / 2$ полей не меньше 0.999. Представляется интерес-

ным проверить ценность информированности игрока для конкретной прикладной ситуации, например, типа упомянутой ранее задачи об инсайте, осуществив моделирование на множестве правдоподобных значений всех параметров.

5. Заключительные замечания

В России (по крайней мере, во многих университетах) бытует представление о математической теории игр, как о специальном разделе теории исследования операций, в котором рассматриваются крайне простые модели задач принятия минимаксных решений (главным образом антагонистические игры с нулевой суммой), никакого отношения к реальным прикладным задачам не имеющие. Между тем, два предыдущих десятилетия стали временем превращения этой теории не только в *прикладной* инструмент проектирования рынков, но и метод исследования многих других важных проблем, например, алгоритмов обучения.

Присуждение в 2012 г. премии Шведского государственного банка по экономическим наукам памяти Альфреда Нобеля (в просторечии Нобелевской премии по экономике) Ллойд Шепли и Элвину Роту «за теорию стабильного распределения и практики устройства рынков» стало знаком окончательного признания теории игр как практически необходимого инструмента принятия решений в постиндустриальную эпоху. Характерно, что, насколько можно судить по опубликованным высказываниям некоторых известных российских ученых-экономистов, эта Нобелевская премия за «практику устройства рынков» вызвала у них недоумение. А ведь еще в 1999 г. Э. Рот замечал [26], что если раньше в проектировании рынков участвовали менеджеры и предприниматели, законодатели и судьи, современное развитие рынков привело к необходимости использования теоретиков в области теории игр. Именно эта теория есть та часть экономики, которая занимается исследованием и синтезом «правил игры», определяющих поведение рынка. Добавить к этому можно лишь то, что слово «экономика» может быть с не меньшим правом заменено словами «социология», «политология» и вообще любые научные исследования, которые не могут не учитывать взаимоотношения людей в процессе принятия решений.

Работы самого Рота и его соавторов относились к созданию рынков труда, в первую очередь, в медицинской сфере и начинались еще в 80-е гг. [27]. С тех пор появилось много новых примеров того, как изменилось классическое представление о рынках, как о площадке, на которой встречаются покупатели и продавцы и где регулирование осуществляет «невидимая рука рынка». Широко известен пример продажи радиочастот в Соединенных Штатах [17], когда Конгрессом было принято решение не раздавать лицензии на радиочастоты, а организовать аукцион. Причем целью было не только получить дополнительный доход, но, что важнее, добиться более эффективного использования каналов связи. Поэтому понадобилась серьезная работа по созданию правил проведения такого аукциона, которые должны были учитывать особенности использования радиочастот для разных районов, в частности, правила совместной продажи лицензий в различных районах. В резуль-

тате был спроектирован многораундовый аукцион, правила которого позволяли добиться выгодных условий не только для всех сторон, принимающих участие в аукционе, но и для пользователей услуг связи.

Особо имеет смысл отметить то обстоятельство, что создание эффективных методов проектирования рынков, как и всякая серьезная *техническая проблема*, требует большой лабораторной работы, ибо одних лишь теоретических результатов, без лабораторных экспериментов, явно недостаточно для получения практически пригодных результатов. (Ситуация в точности такая же, как и при создании эффективных вычислительных методов — лишь кропотливая и трудоемкая работа позволяет превратить некий оптимальный по порядку величины метод вычислений в численный алгоритм, который будет конкурентоспособен на практике с теоретически не оптимальными алгоритмами.)

Логика игрового подхода в последнее время стала применяться самым неожиданным образом. Примером могут служить работы по методам предсказаний (за подробностями можно обратиться к статье [22]). Грубо говоря, основная идея здесь состоит в том, что для качественного предсказания — особенно в случаях, когда все усилия создать правдоподобную модель явления оказались безрезультатными — следует довериться «коллективному разуму». Но не в виде каких-то опросов или сбора иных статистических материалов, а к тому, что чаще всего заставляет разум, в особенности «коллективный», работать, а именно к денежному вознаграждению. Пусть вас интересует значение среднегодовой температуры через пять лет. Выпустите ценную бумагу, которая будет выплачивать \$ x в случае, если через пять лет температура будет x , после чего выпустите эту бумагу в свободное обращение на рынок. Сторонники глобального потепления будут склонны покупать эту бумагу по цене, превосходящей среднегодовую температуру за прошлый год, скептики будут склонны продать такую бумагу. Таким образом, рынок найдет равновесную цену рациональных ожиданий.

Относительно эффективных рынков ценных бумаг и реализации рациональных ожиданий написаны горы книг и статей. Пока еще никому не удалось доказать безусловную полезность наблюдений за поведением рынка — «психика» рынка слишком неустойчива и подвержена множеству иррациональных влияний. Что, впрочем, не исключает того, что подобный подход к прогнозу в некоторых случаях может оказать пользу. Во всяком случае, сегодня ряд компаний — и не только стартапов таких, как *CrowdIQ*, *InklingMarkets*, *NewsFutures*, но и гранды *Google* и *Microsoft* экспериментируют с подобными методами прогноза в частном секторе. И уж конечно СМИ всячески раскручивают эту тему, хотя научная пресса также не остается в стороне — с 2006 г. издается научный журнал *Journal Prediction Markets*. Пройдет еще несколько лет, пыль рассеется и не исключено, что удастся описать те случаи, для которых подобные подходы действительно окажутся эффективны.

Литература

- [1] Algorithmic game theory / Ed.: N. Nisan. — Cambridge Univ. Press, 2007.
- [2] Arrow K. J. A difficulty in the concept of social welfare // Journal of Political Economy. 1950. Vol. 58. No. 4 (August). P. 328–346.
- [3] Babaioff M., Chuang J., Feldman M. Incentives in peer-to-peer systems // Algorithmic game theory / Ed.: N. Nisan et al. — Cambridge Univ. Press, 2007.
- [4] Ben-Tal A., Ghaoui L. El., Nemirovski A. Robust optimization.— Princeton University Press, 2009.
- [5] Borel E. La theorie du jeu les equations integrales a noyau symetrique // Comptes Rendus del Academie. 1921. Vol. 173. No.19. P. 1304–1308 (English translation by Savage L.: The Theory of Play and Integral Equations with Skew Symmetric Kernels // Econometrica, 1953. Vol. 21. No. 1. P. 97–100.
- [6] Braess D., Nagurney A., Wakolbinger T. On a paradox of traffic planning // Transportation science. 2005. Vol. 39. No. 4. P. 446–450.
- [7] Bulow J., Klemperer P. Auctions versus negotiations // The American Economic Review. 1996. Vol. 86. No. 1. P.180–194.
- [8] Дынкин Е. Б. Оптимальный выбор момента остановки марковского процесса // Докл. АН СССР. 1963. Т. 150. №. 2. С. 238–240.
- [9] El-Yaniv R. Competitive solutions for online financial problems // ACM Computing Surveys. 1998. Vol. 30. No. 1. P. 28–69. (doi: 10.1145/274440.274442)
- [10] Fabricant A. et al. On a network creation game // Proc. of the twenty-second annual symposium on Principles of distributed computing PODC'03. — NY: ACM, 2003. P. 347–351. (doi: 10.1145/872035.872088).
- [11] Feigenbaum J., Papadimitriou C. H., Shenker S. Sharing the cost of multicast transmissions // Journal of Computer and System Sciences. 2001. Vol. 63. No. 1. P. 21–41. (doi: 10.1006/jcss.2001.1754).
- [12] Friedman E. J., Halpern J. Y., Kash I. Efficiency and Nash equilibria in a scrip system for p2p network // Proc. 7th ACM conference on Electronic commerce. — NY: ACM, 2006. P.140–149. (doi: 10.1145/1134707.1134723).
- [13] Golman R., Page S. E. General Blotto: games of allocative strategic mismatch // Public Choice. 2009. Vol. 138. No. 3-4. P. 279–299. (doi: 10.1007/s11127-008-9359-x).
- [14] Hurwicz L. On informationally decentralized systems // Decision and optimization. Ed.: B. McGuire, B. Radner.— Amsterdam: North-Holland, 1972.
- [15] Jackson M., Wolinsky A. A strategic model of social and economic networks // Journal of Economic Theory. 1996. Vol. 71. No. 1. P. 44–74. (doi: 10.1006/jeth.1996.0108).
- [16] Klemperer P. Auctions: Theory and Practice.— Princeton University Press, 2004.
- [17] Мак-Кинси Дж. Введение в теорию игр.— М. : Физматлит., 1960.

- [18] *Milgrom P.* Game theory and the spectrum auctions // *European Economic Review*. 1998. Vol. 42. No. 3–5. P. 771–778. (doi: 10.1016/S0014-2921(97)00146-3).
- [19] *Monderer D., Shapley L.S.* Potential games // *Games and Economic Behavior*. 1996. No. 14. P. 124–143.
- [20] *Myerson R. B.* Optimal auction design // *Math. Oper. Res.* 1981. Vol. 6. No. 1. P.58–73.
- [21] *Nash J.* The bargaining problem // *Econometrica*. 1950. Vol. 18. No. 4. P.155–162.
- [22] *Нейман Дж. Моргенштерн О.* Теория игр и экономическое поведение.— М.: Физматлит, 1970 (J. von Neuman, O. Morgenshtern Theory of games and economic behavior. Princeton Univers. Press 1944, 2th ed. — 1947, 3th ed.— 1953).
- [23] *Pennock D. Sami R* Computational Aspects of Prediction Markets // *Algorithmic game theory* / Ed.: No. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, V. V. Vazirani. Chap 26.— Cambridge University Press, 2007. P. 651–676.
- [24] *Roberson B.* The Colonel Blotto game // *Economic Theory*. 2006. Vol. 29. No. 1. P. 1–24. (doi: 10.1007/s00199-005-0071-5)
- [25] *Rosental R. W.* A Class of games possessing Pure-Strategy Nash Equilibria // *Int. J. Game Theory*. 1973. No. 2. P. 65–67.
- [26] *Roth A. E.* Game Theory as a Tool for Market Design Game Practice // *Contributions from Applied Game Theory. Theory and Decision Library*. 2000. Vol. 23. P. 7–18. (doi: 10.1007/978-1-4615-4627-6_2).
- [27] *Roth A. E.* The Evolution of the labor market for medical interns and residents: A Case study in game theory // *Journal of Political Economy*. 1984. Vol. 92. No. 6. P. 991–1016.
- [28] *Sakaguchi M.* Optimal stopping games: A review // *Math. Japonica*. 1995. Vol. 42. No. 2. P. 343–351.
- [29] *Tardos E., Wexler T.* Network formation games and the potential function method // *Algorithmic game theory*. Eds.: N. Nisan, T. Roughgarden, É. Tardos, V. V. Vazirani. Chap. 19. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. P.487–516.
- [30] *Vickrey W.* Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders // *The Journal of Finance*, 1961. Vol. 16. No. 1. P. 8–37.

Автор: Александр Петрович Горяшко, д. т. н., профессор, профессор кафедры информатики и автоматизации Московского технологического института «ВТУ».

Game Theory: From Analysis to Synthesis (Survey of the Markets Design Results)

A. Goryashko

Moscow Technological Institute

38A, Leninskiy prospect, Moscow, Russia, 119334

Abstract. The article is centered around most intriguing results concerning algorithmic game theory and markets design. In particular, this survey is focused on large computer networks such as Internet which is used by a large number of diverse and competitive entities. The main challenge in the area of algorithmic game theory is to understand what principles of interaction make independent participants to form efficient networks. Another goal is to mention the original approach for competitive analysis problems for Colonel Blotto game. In particular, one of the most important results should consider the fact that in such systems common good is often achievable without the intervention of a single governing body ("dictator"). In the review a number of significant results in recent years related to a relatively new section of the theory are also mentioned, namely design of markets section where first results were obtained solutions to practical problems of the economy.

Keywords: noncooperative games; Nash equilibria; algorithmic game theory; untractable problems; design mechanisms; congestion games; Shapley cost-sharing, competitive analysis, Blotto game, price of anarchy; price of stability.

Reference

- [1] Algorithmic game theory / Ed.: N. Nisan. — Cambridge Univ. Press, 2007.
- [2] Arrow K. J. A difficulty in the concept of social welfare // Journal of Political Economy. 1950. Vol. 58. No. 4 (August). P. 328–346.
- [3] Babaioff M., Chuang J., Feldman M. Incentives in peer-to-peer systems // Algorithmic game theory / Ed.: N. Nisan et al. — Cambridge Univ. Press, 2007.
- [4] Ben-Tal A., Ghaoui L. El., Nemirovski A. Robust optimization.— Princeton University Press, 2009.
- [5] Borel E. La theorie du jeu les equations integrales a noyau symetrique // Comptes Rendus del Academie. 1921. Vol. 173. No.19. P. 1304–1308 (English translation by Savage L.: The Theory of Play and Integral Equations with Skew Symmetric Kernels // Econometrica, 1953. Vol. 21. No. 1. P. 97–100.
- [6] Braess D., Nagurney A., Wakolbinger T. On a paradox of traffic planning // Transportation science. 2005. Vol. 39. No. 4. P. 446–450.
- [7] Bulow J., Klemperer P. Auctions versus negotiations // The American Economic Review. 1996. Vol. 86. No. 1. P.180–194.
- [8] Dynkin E. B. Optimal'nyj vybor momenta ostanovki markovskogo processa // Dokl. AN SSSR. 1963. Vol. 150. No. 2. P. 238–240.

- [9] *El-Yaniv R.* Competitive solutions for online financial problems // *ACM Computing Surveys*. 1998. Vol. 30. No. 1. P. 28–69. (doi: 10.1145/274440.274442)
- [10] *Fabricant A. et al.* On a network creation game // *Proc. of the twenty-second annual symposium on Principles of distributed computing PODC'03*. — NY: ACM, 2003. P. 347–351. (doi: 10.1145/872035.872088).
- [11] *Feigenbaum J., Papadimitriou C. H., Shenker S.* Sharing the cost of multicast transmissions // *Journal of Computer and System Sciences*. 2001. Vol. 63. No. 1. P. 21–41. (doi: 10.1006/jcss.2001.1754).
- [12] *Friedman E. J., Halpern J. Y., Kash I.* Efficiency and Nash equilibria in a scrip system for p2p network // *Proc. 7th ACM conference on Electronic commerce*. — NY: ACM, 2006. P.140–149. (doi: 10.1145/1134707.1134723).
- [13] *Golman R., Page S. E.* General Blotto: games of allocative strategic mismatch // *Public Choice*. 2009. Vol. 138. No. 3-4. P. 279–299. (doi: 10.1007/s11127-008-9359-x).
- [14] *Hurwicz L.* On informationally decentralized systems // *Decision and optimization*. Ed.: B. McGuire, B. Radner.— Amsterdam: North-Holland, 1972.
- [15] *Jackson M., Wolinsky A.* A strategic model of social and economic networks // *Journal of Economic Theory*. 1996. Vol. 71. No. 1. P. 44–74. (doi: 10.1006/jeth.1996.0108).
- [16] *Klemperer P.* Auctions: Theory and Practice.— Princeton University Press, 2004.
- [17] *McKinsey J. C. C.* Introduction to the Theory of Games. — NY: McGraw-Hill, 1952.
- [18] *Milgrom P.* Game theory and the spectrum auctions // *European Economic Review*. 1998. Vol. 42. No. 3–5. P. 771–778. (doi: 10.1016/S0014-2921(97)00146-3).
- [19] *Monderer D., Shapley L.S.* Potential games // *Games and Economic Behavior*. 1996. No. 14. P. 124–143.
- [20] *Myerson R. B.* Optimal auction design // *Math. Oper. Res*. 1981. Vol. 6. No. 1. P.58–73.
- [21] *Nash J.* The bargaining problem // *Econometrica*. 1950. Vol. 18. No. 4. P.155–162.
- [22] *Neuman J., Morgenshtern O.* Theory of games and economic behavior. Princeton Univers. Press 1944.
- [23] *Pennock D. Sami R* Computational Aspects of Prediction Markets // *Algorithmic game theory* / Ed.: No. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, V. V. Vazirani. Chap 26.— Cambridge University Press, 2007. P. 651–676.
- [24] *Roberson B.* The Colonel Blotto game // *Economic Theory*. 2006. Vol. 29. No. 1. P. 1–24. (doi: 10.1007/s00199-005-0071-5)
- [25] *Rosental R. W.* A Class of games possessing Pure-Strategy Nash Equilibria // *Int. J. Game Theory*. 1973. No. 2. P. 65–67.
- [26] *Roth A. E.* Game Theory as a Tool for Market Design Game Practice // *Contributions from Applied Game Theory. Theory and Decision Library*. 2000. Vol. 23. P. 7–18. (doi: 10.1007/978-1-4615-4627-6_2).

- [27] *Roth A. E.* The Evolution of the labor market for medical interns and residents: A Case study in game theory // *Journal of Political Economy*. 1984. Vol. 92. No. 6. P. 991–1016.
- [28] *Sakaguchi M.* Optimal stopping games: A review // *Math. Japonica*. 1995. Vol. 42. No. 2. P. 343–351.
- [29] *Tardos E., Wexler T.* Network formation games and the potential function method // *Algorithmic game theory*. Eds.: N. Nisan, T. Roughgarden, É. Tardos, V. V. Vazirani. Chap. 19. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. P.487–516.
- [30] *Vickrey W.* Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders // *The Journal of Finance*, 1961. Vol. 16. No. 1. P. 8–37.

УДК 658

**Исследование масштабов использования
проектно-ориентированных форм
организации хозяйственной деятельности
в высокотехнологических секторах экономики**

С. А. Титов

НОУ ВПО Московский технологический институт «ВТУ»
119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38а
e-mail: s_titov@mti.edu.ru

Аннотация. Проекты и проектное управление используются в современной экономике для решения самых различных задач. В статье производится попытка оценить объемы хозяйственной деятельности, реализуемой в рамках проектов, программ и портфелей. Оценки базируются на статистическом анализе мнений менеджеров-практиков из самых различных компаний. Особенное внимание уделяется исследованию масштабов использования проектов в высокотехнологических отраслях экономики. В результате исследования определено, что проектно-ориентированная деятельность сегодня присутствует достаточно осязаемо практически во всех отраслях. Но при этом особенно важное место проекты и проектное управление занимают в высокотехнологических отраслях.

Ключевые слова: проект, управление проектами, проектное управление, высокотехнологические отрасли, инновации.

ГРНТИ 06.8.12, 06.71.02

Введение: управление проектами в современной экономике

В современном, постоянно и быстро меняющемся мире количество и масштабы проектов, реализуемых организациями и предприятиями, неуклонно растут. Одновременно с этим и расширяются области использования проектов и программ как особых форм организации деятельности и сферы применения методов и средств проектного управления. Проекты сегодня используются не только при разработке новых видов продукции или в строительстве, в двух областях традиционного использования проектного управления, но и для улучшения продукции самого различного назначения, разработки и внедрения сложных социально-технических систем, например, телекоммуникационных или информационно-технологических, создания или реинжиниринга процессов организации, проведения рекламных ком-

паний, обучения и развития человеческих ресурсов, стратегического репозиционирования корпораций и входящих в них бизнес-единиц и для многого другого [25]. Даже компании, работающие в стабильных отраслях, имеющих четкую процессную, а не проектную организацию внутренней деятельности (например, в страховании, банковской сфере, розничной торговле), вынуждены сегодня постоянно изменять спектр предоставляемых услуг и реализуемых процессов, что необходимо приводит к реализации огромного количества новых инициатив, которые невозможно реализовать кроме как посредством проектов и программ. По мнению Т. Питерса [23], деятельность современных компаний и корпораций все больше и больше начинает структурироваться в виде портфеля операционных и стратегических проектов и программ, а функциональные подразделения выступают в роли владельцев ресурсов и участников хозяйственной сети проектов.

Суждения по поводу существенного расширения области использования проектов и программ как особых форм организации хозяйственной деятельности и проектного управления как совокупности теоретических и практических знаний, применимых для управления данными формами организации, очень заметны как в научной, так и в публицистической литературе. Не претендуя на полный и систематичный охват высказываемых суждений, можно остановиться только на некоторых.

Чрезвычайно важная роль и большие масштабы использования проектов и проектного управления подчеркиваются практически в каждой из статей, вошедших в сборник под редакцией П. Морриса и Дж. Пинто [20]. Э. Экстедт, Р. Лундин, А. Седерхольм и Х. Вирдениус говорят о том, что использование проектно-ориентированных форм организации деятельности сегодня прослеживается в связи с повышением необходимости интенсивного использования интеллектуального капитала, высокой творческой активности и инновационности [6]. Данные исследователи даже говорят о становлении проектно-ориентированной экономики (в оригинале *project-intensive* — «проектно-интенсивная»), т. е. экономики, в которой проектно-ориентированные организационные формы становятся доминирующими. М. Хобдей отмечает, что современная экономика характеризуется тяготением к производству все более и более сложной продукции и комплексных систем. Он при этом показывает, что именно проектно-ориентированные организационные формы и проектное управление оказываются более востребованными в таких условиях [11]. К. Сильвер, Дж. Грабхер и Р. ДеФиллиппи говоря о широком распространении проектов и подчеркивают, что проектное управление предлагает эффективные и гибкие инструменты управления знаниями и организационным обучением [26], [25], [9], [5]. Использование проекта как организационной формы инновационной деятельности является общим местом, как в теории, так и в практике, инновационного менеджмента [1], [2], [22]. Новые отрасли экономики, характеризующиеся особенно высокой инновационной активностью, такие как программное обеспечение, телекоммуникации и сложные комплексные коммуникационные и информационные системы, реклама [10] и медийный бизнес [8], интеллектуальные услуги, биотехнологии [24] могут быть названы проектно-ориентированными, так

как компании данных отраслей структурируют свой бизнес в виде проектов [31], в том числе сгруппированных в программы или портфели [29], [30].

Перечень различных высказываний, указывающих на широкое распространение проектного управления в современной экономике, можно продолжать практически до бесконечности. Но даже краткий обзор такого рода высказываний позволяет сделать следующие выводы:

- в рамках проектно-ориентированных организационных форм и с использованием методов и инструментов проектного управления сегодня осуществляется действительно большая доля хозяйственной деятельности;
- есть определенное тяготение к большему использованию проектов и проектного управления в секторах, характеризующихся более высоким уровнем инновационности, технологичности, комплексности и интеллектуальной насыщенности деятельности;
- большинство исследователей формулируют свои суждения касательно использования проектно-ориентированных организационных форм чаще всего либо на основе исследования нескольких конкретных примеров, либо на основе наблюдений, концентрируя свое внимание больше на логическое объяснение того, почему проектное управление стало популярно в той или иной сфере деятельности;
- исследователи обходят стороной задачу конкретного определения масштабов использования проектно-ориентированных организационных форм в различных сферах хозяйственной деятельности.

Отсюда задача определения и формирования конкретных оценок масштабов использования проектов и проектного управления в практической хозяйственной деятельности в различных отраслях представляется достаточно важной. Это важно, во-первых, потому что общие суждения, касающиеся важности и актуальности проектного управления, не позволяют руководителям компаний и организаций конкретно определить, в какой мере им необходимо использование проектно-ориентированных форм. Во-вторых, распространение проектов и проектного управления в разных отраслях происходит по-разному, поэтому компаниям, работающим в различных отраслях, имеет смысл осваивать проектное управление в разной степени. И, наконец, самое важное обстоятельство состоит в том, что проектно-ориентированные формы организации деятельности предполагают использование иных принципов, методов и инструментов управления, нежели те, которые используются в более стабильных, процессно- и функционально-ориентированных организационных формах. Действительно, если бы для управления проектами и, условно говоря, «не-проектами» можно было бы успешно применять один и тот же инструментарий управления, то особой важности в вопросе, какая часть деятельности осуществляется в проектах, а какая в «не-проектах», не было бы.

В связи с этим имеет смысл остановиться на определенных существенных отличиях проектно-ориентированных организационных форм и проектного управле-

ния от того, что часто называется (в контексте исследований ключевых отличительных характеристик проектного управления) «традиционным управлением».

2. Ключевые отличительные характеристики проектного управления и проектно-ориентированных организационных форм

Активное первоначальное исследование проектно-ориентированных форм организации хозяйственной деятельности пришлось на середину — вторую половину 70-х гг. П. Лоуренс и Дж. Лорш [13] обратили внимание на повышение сегментированности товарного пространства и на ускорение изменений в хозяйственной деятельности, а также на то, что для повышения адаптивности компании активно начинают использовать не традиционные стабильные и иерархические организационные структуры, а проекты, программы и их различные модификации и «гибриды» с традиционными структурами (проектно-матричные структуры). Дж. Гэлбрейт [7] подробно описал феномен матричных организационных структур, как попытку соединить традиционные иерархические принципы с новыми проектно-ориентированными организационными формами. Он всячески подчеркивал, что принципы, методы и инструменты управления, сложившиеся в иерархических организационных структурах, не приемлемы для управления проектами и матричными структурами.

Глубоко и подробно характеристики и отличительные черты проектных форм организации хозяйственной деятельности были описаны в работах Д. Клиланда и В. Кинга [12], [4], Б. З. Мильнера, Л. И. Евенко, В. С. Раппопорта, Е. С. Шершнева [17] и Г. Минцберга [18], [19]. По состоянию на сегодня огромное количество исследователей подчеркивают существенные отличия принципов, методов и инструментов проектного управления от других направлений научного менеджмента.

Все авторы говорят о характеристиках проектных форм, которые существенно отличают их от традиционных организационных форм, предполагающих более высокий уровень формализации, иерархизации, стандартизации, построенной на принципах разделения труда. Наиболее подробное описание ключевых отличительных характеристик проектно-ориентированных организационных форм предложено скандинавскими исследователями М. Линдгреном и Й. Пакендорфом. Они обобщили результаты нескольких исследований различий между организацией деятельности в рамках организаций, которые можно было бы назвать традиционными, индустриальными или, как это сделали сами авторы, бюрократическими, и в рамках проектно-ориентированных форм организации [14]. Эти результаты показаны в табл. 1.

Таблица 1. Ключевые различия между традиционными бюрократическими и проектно-ориентированными формами организации хозяйственной деятельности (по М. Линдгрёну и Й. Пакендорфу [14])

Традиционные организации (названные у М. Линдгрёна и Й. Пакендорфа как бюрократические)	Проектно-ориентированные формы организации
Повторяющийся процесс или продукт, основа на сложившихся традициях и правилах действий	Новый процесс или продукт, активный анализ и планирование всех действий без каких-либо предустановленных алгоритмов
Наличие нескольких целей у различных функциональных структур, часто конфликтующих; фрагментация и субоптимизация	Стремление к единой цели, выступающей как механизм согласования разрозненных действий и как основной мотиватор
Режим существования на протяжении неопределенно долгого времени	Режим существования в рамках ограниченного времени
Создание однородных специализированных коллективов для решения сходных функциональных задач, требующих дальнейшей интеграции на уровне высшего менеджмента	Создание разнородных, мультидисциплинарных, кросс-функциональных команд, состоящих из специалистов и менеджеров, одновременно выполняющих и интегрирующих работы
Четко установленные процедуры и системы: разделение труда, области ответственности, бизнес-процессы и т. п.	Процедуры и системы создаются для конкретной деятельности и должны быть адаптированы к ее специфике, вырабатываются руководителем проекта как составная часть разработки проекта
Хорошая предсказуемость содержания, стоимости, сроков и результатов; активное использование предыдущего опыта и лучших практик	Высокий уровень операционного риска, связанного с содержанием, стоимостью, сроками и результатами; проекты разрабатываются практически с нуля и адаптируются к конкретному контексту
Постоянная организационная структура с определенными структурными единицами, распоряжающимися введенными ресурсами	Выполнение работ за рамками установленных структур; использование выделяемых ресурсов, принадлежащих более стабильным структурам
Использование известных знаний, навыков и опыта; инкрементальный характер прироста знаний	Постоянное изменение знаний, навыков и опыта; необходимость радикального изменения требуемых знаний; решение проблем путем выработки новых знаний
Поддержание status quo. Охрана существующего порядка деятельности	Нарушение существующего порядка; проект, не приводящий ни к каким изменениям, рассматривается как неудача

Оценка масштабов хозяйственной деятельности, реализуемой в рамках проектно-ориентированных организационных форм

Если рассматривать проект как определенного вида организацию хозяйственной, или в широком смысле общественной, деятельности [14], [15], то можно попытаться определить, какая доля хозяйственной деятельности реализуется в рамках проектов, программ, портфелей, т. е. в целом в рамках того, что можно было бы назвать проектно-ориентированными организационными формами. Из изложенных выше взглядов на роль проектов и проектного управления в современной экономике возникает ощущение, что значительная доля экономических, социальных и политических благ и результатов, сегодня создается не в рамках традиционных, названных М. Линдгреном и Й. Пакендорфом бюрократическими, организаций и их функциональных подразделений.

Данное утверждение, конечно, сложно подтвердить (или опровергнуть) эмпирически, так как учет хозяйственной деятельности сегодня ведется в разрезе юридических лиц, а не проектов и программ.

Далеко не во всех случаях для проекта создается специализированное юридическое лицо, но даже если это было бы во всех случаях, органы статистики не ставят перед собой задачи по раздельному учету деятельности, реализуемой в проектных организациях, от деятельности, реализуемой в традиционных организациях, имеющих процессную или функциональную структуру деятельности. В некоторых (далеко не во всех) организациях существуют специализированные подразделения, занимающиеся управлением проектами на постоянной основе, но бюджеты этих подразделений представляют собой закрытую информацию. Во многих случаях деятельность по проекту фиксируется в системах учета сразу нескольких организаций. Таким образом, показав, отталкиваясь от фактических данных об экономической деятельности, что в рамках проектов сегодня реализуется значительная часть (или хоть какая-то часть) хозяйственной активности проблематично.

К. Бредиллет [3] делает попытку оценить объемы проектно-ориентированной хозяйственной деятельности, опираясь на данные Всемирного банка. В одном из отчетов банка он находит сведения, что не менее 21% мирового ВВП приходится на воспроизводство и создание новых капитальных благ [32], и полагает, что данного рода деятельность всегда носит проектно-ориентированный характер. Но данная логика не выглядит особенно убедительной, так как огромное количество проектов реализуется для выпуска новых видов продукции, не относящихся к сфере капитальных благ, и поэтому оценка К. Бредиллетта выглядит хоть и основанной на официальной экономической информации, но явно заниженной.

Ввиду проблематичности оценить масштабы использования проектно-ориентированных организационных форм на основе первичной хозяйственной или обобщающей аналитической экономической информации в настоящей статье предлагается осуществить данную оценку путем опроса практикующих руководителей.

В рамках данного исследования в период с 2008 по 2012 гг. производился опрос студентов различных учебных программ (переподготовка, второе высшее, магистратура, MBA), реализованных Государственным университетом управления, Университетом Торонто (Канада) и Университетом Манчестера (Великобритания). Большинство учебных программ не имело явной специализации в сторону проектного управления, но дисциплина управления проектами в учебных планах всех программ присутствовала. Опрос проводился после изучения дисциплины управления проектами, так что у всех опрашиваемых были сформированы четкие представления об основных характеристиках проектно-ориентированных форм и методах проектного управления.

Опрос проводился либо в виде индивидуального интервьюирования, либо в виде анкетирования. В опросе приняло участие 606 человек из 12 стран мира. Все опрошенные являлись практикующими менеджерами из компаний, работающих в самых различных отраслях.

В рамках опроса респондентам задавался вопрос «Оцените в процентах долю хозяйственной деятельности Вашей компании, которая за последний год осуществлялась в рамках организационных форм, явно обладающих характеристиками проектно-ориентированных форм, и с применением принципов, методов и средств проектного управления».

Кроме того, респондентов просили идентифицировать отрасль своей компании в соответствии с классификацией отраслей по уровню технологичности. Данная классификация, предложенная Организацией международного сотрудничества и развития (ОЭСР) (OECD — Organization for Economic Co-operation and Development) [21], распределяет укрупненные отрасли по четырем группам, выделяемым в зависимости от затрат, направляемых компаниями в исследования и разработки. К высокотехнологическим относят такие отрасли, в рамках которых компании тратят более 5% от оборота. Так например, самыми высокотехнологическими можно назвать фармацевтику и самолето- ракетостроение. В этих отраслях годовые бюджеты на исследования и разработки превышают 10% годового оборота компаний. К средне-высокотехнологическим относят компании, которые тратят на исследования и разработки от 2,5 до 5%, к средне-низкотехнологическим — от 1 до 2,5%, и к низкотехнологическим — ниже 1%.

Для упрощения опроса ответы респондентов приводились к шкале от 0 до 100% с шагом в 5%. В табл. 2 представлены сведения о количестве респондентов, участвовавших в опросах, и о средних значениях объемов хозяйственной деятельности компаний, реализуемых в рамках проектов.

Из табл. 2 видно, что объемы деятельности, реализуемой в проектах (проектно-ориентированной деятельности), различаются как в различных отраслях, так и по группам отраслей, выделенным по их технологичности.

Таблица 2. Объемы хозяйственной деятельности,
реализуемой в проектах, по различным отраслям

Отрасли (условный код)	Количество опрошенных респондентов	Среднее значение объемов деятельности, реализуемой в проектах (в % от всех объемов деятельности)	Мода по объемам проектной деятельности	Медиана по объемам проектной деятельности
Высокотехнологические отрасли (4)	104	88.654		
Самолетостроение, ракетостроение, космические технологии (45)	6	83.333	90	82.5
Фармацевтика и биотехнологии (44)	12	85.417	85	85
Офисные, учетные и вычислительные системы (43)	37	93.243	95	95
Радио, телевидение и телекоммуникации (42)	31	87.742	90	90
Медицинские, точные и оптические инструменты и оборудование (41)	18	84.722	85	85
Средне-высокотехнологические отрасли (3)	43	65.116		
Электрооборудование и машины (35)	11	66.364	75	70
Автомобилестроение (34)	7	55.714	50	50
Химическое производство (33)	3	58.333	–	60
Оборудование для транспорта (32)	6	64.167	60	62.5
Машины и оборудование прочие (31)	16	70.000	70	70
Средне-низкотехнологические отрасли (2)	92	84.402		
Судостроение и судоремонт (25)	2	85.000	–	85
Продукция из резины и пластика (24)	3	31.667	–	30
Нефтепереработка, ядерное топливо (23)	11	50.455	40	45
Гражданское строительство (22)	74	92.838	95	95
Другие продукты из неметаллического сырья (21)	2	37.500	–	37.5
Продукция из металла и сплавов	–	–	–	–
Низкотехнологические отрасли (1)	64	17.422		
Обработка древесины, продукция из бумаги, полиграфия (14)	7	11.429	10	10
Пищевая продукция (13)	21	17.857	15	15
Текстиль, одежда, обувь (12)	19	21.579	20	20
Прочее производство, переработка (11)	17	14.706	15	15
Всего	606			

К числу самых проектно-ориентированных отраслей можно отнести «Самолетостроение, ракетостроение, космические технологии», «Фармацевтика и биотехнологии», «Офисные, учетные и вычислительные системы», «Радио, телевидение и телекоммуникации», «Медицинские, точные и оптические инструменты и оборудование», «Судостроение и судоремонт» и «Гражданское строительство». В этих отраслях доля деятельности, реализуемой посредством проектов и программ, составляет более 80%. Это говорит о том, что *в высокотехнологических отраслях, а также в традиционных проектно-ориентированных отраслях практически вся деятельность ведется в рамках проектов, программ и портфелей. Именно для этих отраслей управление проектом представляет чрезвычайно важную деятельность, обеспечивающую как операционные, так и стратегические конкурентные преимущества.*

Обращает на себя внимание то, что доля проектно-ориентированной деятельности внутри группы отраслей по технологичности не сильно отличается, но тот же показатель между группами отраслей — отличается существенно. Кроме этого, заметна зависимость объемов проектно-ориентированной деятельности от уровня технологичности. Чем выше уровень технологичности, тем выше доля проектно-ориентированной деятельности (за исключением «Судостроения» и «Гражданского строительства»). Так, высокотехнологические отрасли характеризуются долей проектно-ориентированной деятельности в диапазоне от 83 до 93%, средне-высокотехнологические отрасли — в диапазоне от 55 до 70%, средне-низкотехнологические — в диапазоне от 31 до 50% (если отбросить «Судостроение» и «Гражданское строительство», в которых проектно-ориентированная деятельность занимает от 85 до 92%), низко-технологические отрасли — в диапазоне от 11 до 21%.

Наблюдения, очевидные для невооруженного глаза, требуют проверки с помощью статистического анализа, так как за каждым из показателей, приведенным в табл. 2, стоят определенные массивы данных, разнообразие значений которых может иметь случайный характер, связанный не с какими-либо характеристиками внутри группы отраслей (внутренней вариативностью), а просто с разбросом оценок респондентов.

Для анализа того, насколько существенны отличия между группами отраслей, воспользуемся дисперсионным анализом (ANOVA), который можно использовать для исследования разницы между средними значениями какого-либо показателя с учетом вариативности распределения этого показателя [16]. На рис. 1 показаны результаты одностороннего дисперсионного анализа оценок объемов проектно-ориентированной деятельности внутри группы высокотехнологических отраслей, проведенного с помощью программы «MiniTab». В качестве исследуемой величины выступала «Деятельность в проектах», а в качестве фактора — «Отрасль (принадлежащая группе высокотехнологических отраслей, т. е. группе 4)». Каждая отрасль обозначалась двухзначным кодом (от 41 до 45) (см. табл. 2).

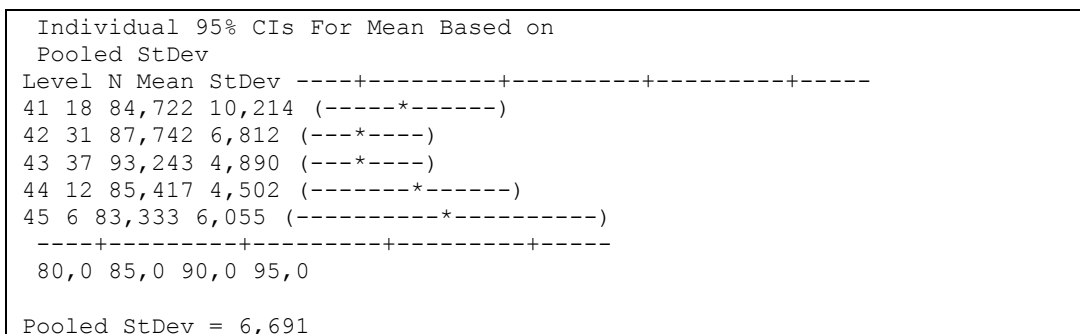


Рисунок 1. Дисперсионный анализ различий между оценками
объемов проектно-ориентированной деятельности внутри группы
высокотехнологических отраслей

Первый столбец на рис. 1 (Level) обозначает отрасль, входящую в группу высокотехнологических отраслей. Второй столбец (N) показывает количество оценок, полученных от респондентов. Третий столбец (Mean) содержит среднее арифметическое значений данных оценок. Четвертый столбец (StDev) отображает стандартное отклонение. Далее справа графически показаны 95% доверительные интервалы распределения оценок проектно-ориентированной деятельности в различных отраслях, входящих в группу высокотехнологических отраслей. Звездочками обозначены средние, а скобками — границы интервалов.

Можно увидеть, что показатели объемов проектно-ориентированной деятельности в отраслях «Самолетостроение, ракетостроение, космические технологии», «Фармацевтика и биотехнологии», «Радио, телевидение и телекоммуникации» и «Медицинские, точные и оптические инструменты и оборудование» отличаются друг от друга не существенно. Разница между средними объемами проектно-ориентированной деятельности может быть объяснена случайным разбросом в суждениях респондентов. На рис. 1 видно, что доверительные интервалы по этим отраслям пересекаются. А вот отрасль «Офисные, учетные и вычислительные системы» имеет существенно более высокий объем проектно-ориентированной деятельности, который нельзя объяснить только лишь случайными отклонениями в оценках респондентов. Можно сделать вывод, что компании, работающие в данной отрасли, действительно существенно больше используются проектно-ориентированные организационные формы, нежели компании из других отраслей данной группы.

На рис. 2 приведены результаты аналогичного анализа, проведенного для отраслей группы средне-высокотехнологических отраслей.

Из рис. 2 видно, что все интервалы отраслей пересекаются друг с другом. Это означает, что в этой группе отраслей различия между объемами проектно-ориентированной деятельности нельзя приписать каким-либо существенным характеристикам. Эти различия носят во многом случайный характер.

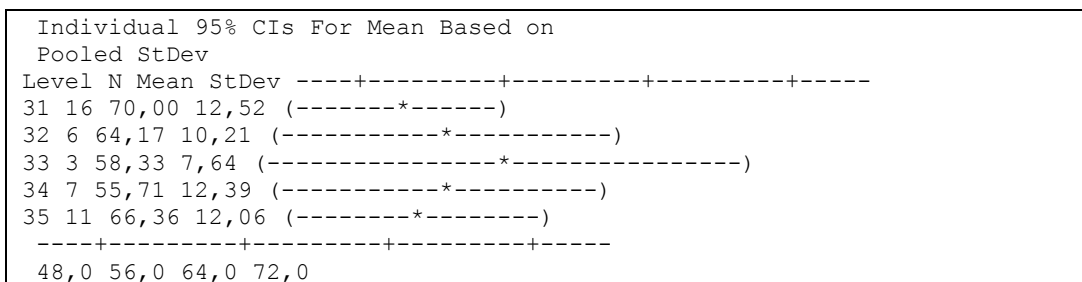


Рисунок 2. Дисперсионный анализ различий между оценками объемов проектно-ориентированной деятельности внутри группы средне-высоко-технологических отраслей

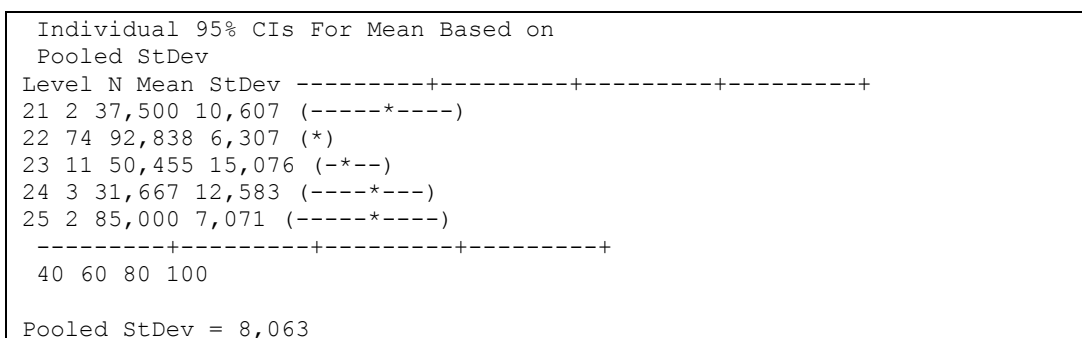


Рисунок 3. Дисперсионный анализ различий между оценками объемов проектно-ориентированной деятельности внутри группы средне-низкотехнологических отраслей

Из рис. 3 видно, что между средними объемами проектно-ориентированной деятельности в средне-низкотехнологических отраслях «Другие продукты из неметаллического сырья», «Нефтепереработка, ядерное топливо» и «Продукция из резины и пластика» разница не является статистически значимой. А вот отрасли «Судостроение и судоремонт» и «Гражданское строительство» отличаются от остальных существенно. Это объясняется тем, что эти две отрасли являются традиционными проектно-ориентированными отраслями.

На рис. 4 приведены результаты аналогичного анализа, проведенного для отраслей группы низкотехнологических отраслей.

Из рис. 4 видно, что статистически значимой разницы между показателями объемов проектно-ориентированной деятельности в отраслях, входящих в группу низкотехнологических отраслей, нет.

Таким образом, можно сделать вывод, что внутри групп (за исключением таких отраслей, как «Офисные, учетные и вычислительные системы», «Судостроение и судоремонт» и «Гражданское строительство») существенной разницы между объемами проектно-ориентированной деятельности не прослеживается.

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev					
Level	N	Mean	StDev		
11	17	14,706	7,800	(-----*-----)	
12	19	21,579	8,174	(-----*-----)	
13	21	17,857	10,905	(-----*-----)	
14	7	11,429	4,756	(-----*-----)	
-----+-----+-----+-----+-----					
	6,0	12,0	18,0	24,0	
Pooled StDev = 8,842					

Рисунок 4. Дисперсионный анализ различий между оценками
объемов проектно-ориентированной деятельности внутри группы
низкотехнологических отраслей

Прежде чем переходить к анализу разницы объемов проектно-ориентированной деятельности между группами отраслей, следует решить вопрос с отраслями-исключениями. «Судостроение и судоремонт» и «Гражданское строительство» выглядят явными исключениями в своей группе, что связано с их традиционной проектной ориентацией. По сути, для этих отраслей анализировать масштаб проектно-ориентированной деятельности не представляется актуальным, так как уже давно признано, что в этих отраслях проектные формы организации деятельности и системы проектного управления стали общепринятыми. Все это позволяет исключить данные отрасли из дальнейшего анализа. А отрасль «Офисные, учетные и вычислительные системы» имеет смысл оставить, несмотря на ее исключительное положение в своей группе. Эта исключительность не носит столь явного характера как в случае с отраслями «Судостроение и судоремонт» и «Гражданское строительство».

Для анализа значимости разницы объемов проектно-ориентированной деятельности использовался тот же метод одностороннего дисперсионного анализа с применением программного средства «MiniTab». На рис. 5 показаны результаты этого анализа. В первом столбце показаны коды групп отраслей по их технологичности.

Как видно из рис. 6, различия между группами отраслей с точки зрения объемов проектно-ориентированной деятельности имеют существенный, статистически значимый характер. Эти же различия можно визуализировать с помощью графиков, называемых «бокс-плот» (boxplot). Такие графики представляют собой достаточно удобный и наглядный инструмент для отображения распределения случайной величины и для сравнения различных величин друг с другом. Верхняя и нижняя граница прямоугольника отображают границы 1 и 3 квартиля. Горизонтальная линия внутри прямоугольника отображает медиану. Вертикальная черта соединяет значения верхней и нижней границы диапазона разброса величины (нижняя граница определяется как $Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1)$, а, верхняя как $Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1)$, где Q_1 и Q_3 первый и третий квартиль соответственно). На рис. 6 показаны «бокс-плоты» распре-

деления оценок объемов проектно-ориентированной деятельности в четырех различных группах отраслей.

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev					
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----	
1	64	17,422	9,258	(*)	
2	16	45,313	15,649	(--*-)	
3	43	65,116	12,464	(-*)	
4	104	88,654	7,512	(*)	
-----+-----+-----+-----					
		20	40	60	80

Рисунок 5. Результаты одностороннего дисперсионного анализа различий между объемами проектно-ориентированной деятельности в различных группах отраслей

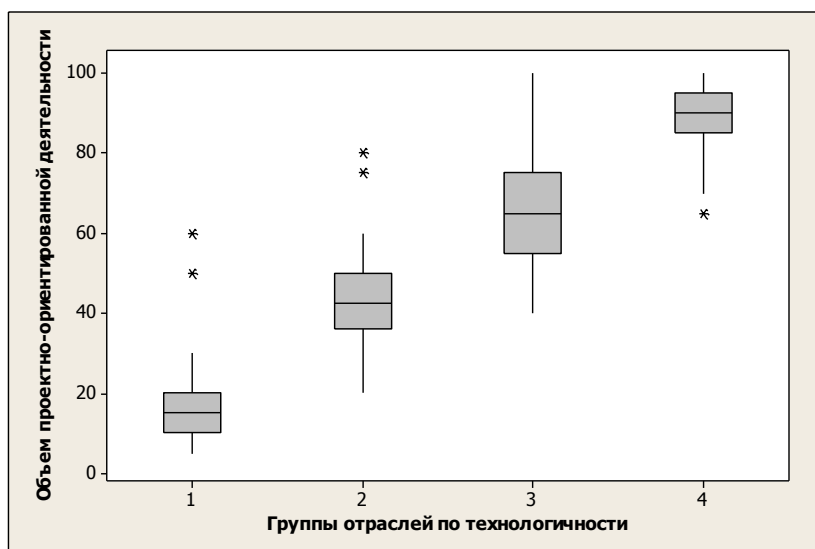


Рисунок 7. Графики «бокс-плот» распределения оценок объемов проектно-ориентированной деятельности в четырех различных группах отраслей

Данные на рис. 5 и рис. 6 позволяют сделать вывод о том, что степень использования проектных форм организации деятельности, методов и средств проектного управления в группах отраслей существенно различная. Можно сказать, что в низкотехнологичных отраслях в среднем проектно-ориентированная деятельность занимает 17,4%, в средне-низкотехнологичных — 45,3%, в средне-высоко-технологичных — 65,1%, а в высокотехнологичных — 88,7%. Данные цифры говорят о масштабах использования проектов, как особых организационных форм и методов и средств проектного управления в различных отраслях современной экономики.

Значения объемов проектно-ориентированной деятельности наводят на мысль о существовании связи между уровнем технологичности деятельности и объемом проектно-ориентированной деятельности. Невооруженным глазом видно, что объем проектно-ориентированной деятельности в высокотехнологических отраслях выше, чем в других, и планомерно убывает вместе со снижением уровня технологичности. Но такое визуальное наблюдение требует уточнения с помощью статистического анализа.

Для исследования наличия и степени тесноты связи между двумя показателями (объем проектно-ориентированной деятельности [Деятельность в проектах] и степень технологичности отрасли [Уровень технологичности]) можно воспользоваться корреляционно-регрессионным анализом. На рис. 7 показаны результаты корреляционно-регрессионного анализа, проведенного с помощью программного продукта «MiniTab». На рис. 8 показана диаграмма разброса оценок объемов проектно-ориентированной деятельности в зависимости от группы отраслей по технологичности с линией регрессии.

```
The regression equation is
Деятельность в проектах = - 5,58 + 23,6 Уровень технологичности

Predictor Coef SE Coef T P
Constant -5,584 1,582 -3,53 0,001
Уровень технологичности 23,6001 0,5107 46,21 0,000

S = 9,81006 R-Sq = 90,5% R-Sq(adj) = 90,4%
```

*Рисунок 7. Результаты корреляционно-регрессионного анализа
связи между показателями объемов проектно-ориентированной
деятельности и степени технологичности отрасли*

Коэффициент детерминации R-sq достаточно высок, более 90%, что говорит о большой тесноте связи или высокой силе связи между исследуемыми величинами.

Таким образом, можно сделать вывод, что масштабы использования проектно-ориентированных организационных форм и методов проектного управления коррелируют с уровнем технологичности различных отраслей. *Чем выше уровень технологичности, тем в большей степени используется проектное управление.*

3. Ограничения исследования

Следует обратить внимание на некоторые ограничения настоящего исследования. Во-первых, оценка масштабов проектно-ориентированной деятельности в отраслях производилась на основе суждений менеджеров отдельных компаний. К опросу привлекались менеджеры среднего звена, знание положения дел в компании и отрасли которых нельзя с уверенностью считать полным. Но, с другой сторо-

ны, менеджеры среднего звена определенным знанием деятельности в своей компании действительно обладают. При всем при этом положение дел в каждой конкретной компании (или даже группе компаний) может отличаться от ситуации по отрасли в целом. Во-вторых, по некоторым отраслям было получено слишком мало оценок для проведения статистических исследований. Например, по отрасли «Производство из металла и сплавов» не получено вообще ни одной оценки. По отраслям «Другие продукты из неметаллического сырья» и «Судоремонт и судостроение» было получено по 2 оценки и т.п. Но при этом анализ объемов проектно-ориентированной деятельности проводился в разрезе групп отраслей, что несколько смягчает данный недостаток. В-третьих, большинство респондентов являлись студентами, изучающими дисциплины по управлению проектами, что возможно могло приводить к искажению их оценок в сторону повышения важности данной дисциплины для деятельности их компаний. В-четвертых, полученные оценки не учитывают объемов деятельности, реализуемой внутри каждой отрасли. Было бы более правильным рассчитывать показатели по отраслям как средневзвешенные с учетом объемов деятельности в каждой отрасли. Но, полученные в ходе опроса оценки касаются отдельных компаний, и учет объемов деятельности, становится достаточно проблематичным. Равным образом проблематичным становится использование полученных оценок для определения доли проектно-ориентированной деятельности в денежных показателях.

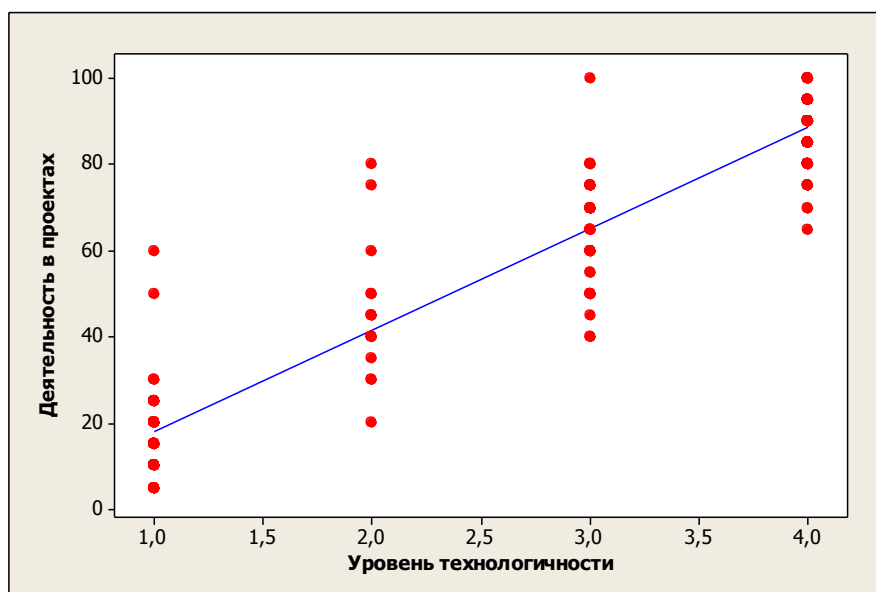


Рисунок 8. Диаграмма разброса и линия регрессии для анализа связи между объемом проектно-ориентированной деятельности и уровнем технологичности

При всех обозначенных ограничениях результаты исследования позволяют делать общие оценки масштабов деятельности, реализуемой в рамках проектно-ориентированных форм, и проводить сравнительный анализ распространенности проектного управления в различных отраслях.

4. Выводы: критическое переосмысление проектного управления

В рамках описанного в статье исследования была произведена оценка доли хозяйственной деятельности, реализуемой в рамках проектно-ориентированных организационных форм и с использованием принципов, методов и средств управления проектами. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно большой доле проектно-ориентированной деятельности в рамках современной экономики в целом. Даже наименьшая средняя оценка по отрасли (Обработка древесины, продукция из бумаги, полиграфия) составляет 11,43%, что говорит о заметном использовании проектно-ориентированных организационных форм. Для большинства же отраслей доля проектно-ориентированной деятельности составляет выше 50% и в среднем по всем отраслям доля проектно-ориентированной деятельности достигает уровня 63,9%. Это позволяет сделать вывод, что проектное управление действительно чрезвычайно распространено в экономике в целом.

Следует также обратить внимание на то, что доля проектно-ориентированной деятельности в различных отраслях разная. Но что самое интересное, отталкиваясь от результатов статистической обработки данных опроса практикующих руководителей, можно сделать вывод, что между объемом деятельности, реализуемой в рамках проектов, и уровнем технологичности есть тесная связь, которая проявляется в том, что чем выше уровень технологичности, тем больший объем деятельности реализуется в рамках проектов. Иными словами, *проектно-ориентированная деятельность и управление проектами имеют высокую значимость для высокотехнологичных отраслей и снижают свою значимость по мере снижения технологичности деятельности*. Проекты и проектное управление действительно имеют большое значение для компаний, ведущих высокотехнологичную и инновационную деятельность. Проекты и проектное управление играют меньшую роль для компаний, работающих в отраслях с меньшим уровнем технологичности и инновационности (за исключением традиционных проектно-ориентированных отраслей). Ввиду того, что именно высокотехнологические инновационные отрасли являются определяющими будущие тенденции развития экономики в целом, то и проекты, и проектное управление представляются чрезвычайно важными для развития экономики.

Полученные оценки доли проектно-ориентированной деятельности позволяют сформулировать также определенные выводы касательно направлений развития теории и практики проектного управления. Во-первых, для компаний высокотехнологических отраслей (и многих средне-высоко- и средне-низкотехнологи-

ческих отраслей) проектное управление становится основой для построения бизнеса и критически важной дисциплиной, без успешного использования которого сложно рассчитывать на успех даже в краткосрочной перспективе. Во-вторых, проектное управление, некогда востребованное только в определенных отраслях, становится сегодня важным (и часто необходимым) элементом системы управления компаний в практически всех отраслях. Это делает необходимым повышение адаптивности методов и средств проектного управления к специфике деятельности в конкретной отрасли. Сложившееся до последнего времени направление, делающее акцент на целесообразности использования формальных методологий управления проектами в различных отраслевых контекстах, требует критического переосмысления [27]. В-третьих, важно отметить, что проектное управление становится востребованным в совершенно новых отраслях, в отраслях, которые вовсе не существовали на период становления сегодняшнего корпуса знаний по проектному управлению (это приблизительно 1960-е–1970-е гг.). Данная тенденция делает необходимым критическое переосмысление не только подхода, ориентированного на формальные стандарты и методологии управления проектами, но и многих положений и инструментов традиционного проектного управления [28].

Литература

- [1] *Арчибальд Р. Д.* Управление высокотехнологичными программами и проектами.— М. : ДМК-Пресс, Компания АйТи, 2006.
- [2] *Баранчев В. П.* Управление инновационными проектами.— М. : Благовест-В, 2007.
- [3] *Bredillet C.* From the editor: Exploring research in project management: Nine schools of project management research (part 1) // *Project Management Journal*. 2007. Vol. 38. No. 2. P. 3-4.
- [4] *Cleland D. I., King W. R.* Systems analysis and project management.— NY : McGraw-Hill, 1975.
- [5] *DeFillippi R. J.* Introduction: project-based learning, reflective practices and learning outcomes // *Management Learning*. 2001. Vol. 32. No. 1. P. 5–10.
- [6] *Ekstedt E., Lundin R. A., Söderholm A., Wirdenius H.* Neo-industrial organising: Renewal by action and knowledge formation in a project-intensive economy.— London : Routledge, 1999.
- [7] *Galbraith J. R.* Matrix organizational design — how to combine functional and project forms // *Business Horizons*. 1974. Vol. 14. No. 1. P. 29–40.
- [8] *Gill R.* Cool, creative and egalitarian? exploring gender in project-based new media work in Europe // *Information, Communication & Society*. 2002. Vol. 5. No. 1. P. 70–89.
- [9] *Grabher G.* Temporary Architectures of Learning: Knowledge Governance in Project Ecologies // *Organization Studies*. 2004. Vol. 25. No. 9. P. 1491–514. (doi: 10.1177/0170840604047996).

- [10] *Grabher G.* The Project Ecology of Advertising: Tasks, Talents and Teams // *Regional Studies*. 2002. Vol. 36. No. 3. P. 245–262.
- [11] *Hobday M.* The project-based organisation: an ideal form for managing complex products and systems? // *Research Policy*. 2000. Vol. 29. No. 7–8. P. 871–893 (doi: 10.1016/S0048-7333(00)00110-4).
- [12] *Клиланд Д., Кинг В.* Системный анализ и целевое управление.— М. : Советское радио, 1974.
- [13] *Lawrence P. R., Lorsch J. W.* Organization and environment: Managing differentiation and integration.— Boston : Harvard Business School Press, 1967.
- [14] *Lindgren M., Packendorff, J.* Från projektarbete till projektintensivt arbete: människan och projektarbetets institutionalisering [From project work to project-based work: the individual and the institutionalization of projects] / T. Stjernberg, J. Söderlund and E. Wikström (eds).— *Projektliv : Villkor för uthållig projektverksamhet*. Lund: Studentlitteratur, 2008.
- [15] *Lundin R.A., Söderholm A.* A theory of the temporary organization // *Scandinavian Journal of Management*. 1995. Vol. 11. No. 4. P. 437–455.
- [16] *Menzefricke U.* Statistics for Managers. — Duxbury Press, 1995.
- [17] *Мильнер Б. З., Евенко Л. И., Раппопорт В. С., Шеринев Е. С.* Организационные структуры управления производством.— М. : Экономика, 1975.
- [18] *Минцберг Г.* Структура в кулаке. Создание эффективной организации.— СПб. : Питер, 2003.
- [19] *Mintzberg H.* The Structuring of Organization.— Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1979.
- [20] *Morris P. W. G., Pinto J. K.* (eds). The Wiley Guide to Managing Projects. — NY : Wiley, 2004.
- [21] *OECD Science, Technology and Industry Scoreboard*.— OECD, Paris, 2013 (doi: 10.1787/sti_scoreboard-2013-en).
- [22] *Первушин В.А.* Практика управления инновационными проектами.— М. : Дело АНХ, 2010.
- [23] *Питерс Т.* Проект. 50 верных способов превратить любое задание в грандиозный проект! — М. : Вильямс, 2006.
- [24] *Powell W.* Inter-Organizational collaboration in the biotechnology industry // *Journal of Institutional and Theoretical Economics*. 1996. Vol. 152. No. 1. P. 197–215.
- [25] *Разу М. Л., Якутин Ю. В., Разу Б. М., Бронникова Т. М., Титов С. А.* Управление проектом: Основы проектного управления / Под ред. Разу М. Л.— М. : Кнорус, 2010.
- [26] *Silver C.A.* Where technology and knowledge meet // *Journal of Business Strategy*. 2000. No. 21(Nov/Dec). P. 28–33.
- [27] *Титов С. А.* Инициатива по «переосмыслению проектного управления»: краткий анализ результатов // *Вестник Университета (ГГУ)*. 2014. № 1. С. 204–210.

- [28] *Титов С. А.* Проблемы использования формальных методологий проектного управления // Вестник Университета (ГУУ). 2011. № 8. С. 200–203.
- [29] *The Portfolio Management Standard.*— Pennsylvania : Project Management Institute, Inc. Newtown Square, 2006.
- [30] *The Program Management Standard.*— Pennsylvania : Project Management Institute, Inc. Newtown Square, 2006.
- [31] *Whitley R.* Project-based firms: new organizational form or variations on a theme? // *Industrial and Corporate Change*. 2006. Vol. 15. No. 1. P. 77–99.
- [32] *Word Bank.* Little Data Book.— Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank Development Data Group, 2005.

Автор: *Сергей Анатольевич Титов*, к. э. н., доцент, проректор по организационному развитию, декан факультета экономики и менеджмента Московского технологического институт «ВТУ»

Project and Project Management in the High-Tech Industries of the Modern Economy

S. A. Titov

Moscow Technological Institute
38A, Leninskiy prospect, Moscow, Russia, 119334

Abstract. Projects and project management are used widely in different sectors of the modern economy for various tasks. The article tries to estimate the scale of project usage in different industry with the help of statistical analysis of practitioners' opinions. The research shows that project-oriented economic activity plays significant role in almost all industries of modern economy. However, for the high-tech industries the project management has the most significant importance.

Keywords: Project, project management, high-tech industries, innovation

Reference

- [1] Archibald R. D. Upravlenie vysokotekhnologichnymi programmami i proektami.— M.: DMK-Press, Kompanija AjTi, 2006.
- [2] Barancheev V.P. Upravlenie innovacionnymi proektami.— M.: Blagovest-V, 2007.
- [3] Bredillet C. From the editor: Exploring research in project management: Nine schools of project management research (part 1) // Project Management Journal. 2007. Vol. 38. No. 2. P. 3-4.
- [4] Cleland D. I., King W. R. Systems analysis and project management.— NY: McGraw-Hill, 1975.
- [5] DeFillippi R. J. Introduction: project-based learning, reflective practices and learning outcomes // Management Learning. 2001. Vol. 32. No. 1. P. 5–10.
- [6] Ekstedt E., Lundin R.A., Söderholm A., Wirdenuis H. Neo-industrial organising: Renewal by action and knowledge formation in a project-intensive economy.— London: Routledge, 1999.
- [7] Galbraith J. R. Matrix organizational design — how to combine functional and project forms // Business Horizons. 1974. Vol. 14. No. 1. P. 29–40.
- [8] Gill R. Cool, creative and egalitarian? exploring gender in project-based new media work in Europe // Information, Communication & Society. 2002. Vol. 5. No. 1. P. 70–89.
- [9] Grabher G. Temporary Architectures of Learning: Knowledge Governance in Project Ecologies // Organization Studies. 2004. Vol. 25. No. 9. P. 1491–514. (doi: 10.1177/0170840604047996).
- [10] Grabher G. The Project Ecology of Advertising: Tasks, Talents and Teams // Regional Studies. 2002. Vol. 36. No. 3. P. 245-262.

- [11] *Hobday M.* The project-based organisation: an ideal form for managing complex products and systems? // *Research Policy*. 2000. Vol. 29. No. 7–8. P. 871–893 (doi: 10.1016/S0048-7333(00)00110-4).
- [12] *Kliland D., King V.* Sistemnyj analiz i celevoe upravlenie.— М.: Sovetskoe radio, 1974.
- [13] *Lawrence P. R., Lorsch J. W.* Organization and environment: Managing differentiation and integration.— Boston: Harvard Business School Press, 1967.
- [14] *Lindgren M., Packendorff, J.* Från projektarbete till projektintensivt arbete: människan och projektarbetets institutionalisering [From project work to project-based work: the individual and the institutionalization of projects] // Т. Stjernberg, J. Söderlund and E. Wikström (eds).— *Projektliv: Villkor för uthållig projektverksamhet*. Lund: Studentlitteratur, 2008.
- [15] *Lundin R.A., Söderholm A.* A theory of the temporary organization // *Scandinavian Journal of Management*. 1995. Vol. 11. No. 4. P. 437–455.
- [16] *Menzefricke U.* Statistics for Managers. — Duxbury Press, 1995.
- [17] *Milner B. Z., Evenko L. I., Rappoport V. S., Shershnev E.S.* Organizacionnye struktury upravleniya proizvodstvom.— М.: Jekonomika, 1975.
- [18] *Minzberg G.* Struktura v kulake. Sozdanie jeffektivnoj organizacii.— SPb.: Piter, 2003.
- [19] *Mintzberg H.* The Structuring of Organization.— Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1979.
- [20] *Morris P. W. G., Pinto J. K.* (eds). The Wiley Guide to Managing Projects. — NY: Wiley, 2004.
- [21] *OECD Science, Technology and Industry Scoreboard*.— OECD, Paris, 2013 (doi: 10.1787/sti_scoreboard-2013-en).
- [22] *Pervushin V.A.* Praktika upravleniya innovacionnymi proektami.— М.: Delo ANH, 2010.
- [23] *Piters T.* Proekt. 50 vernyh sposobov prevratit' ljuboe zadanie v grandioznyj proekt! — М.: Vil'jams, 2006.
- [24] *Powell W.* Inter-Organizational collaboration in the biotechnology industry // *Journal of Institutional and Theoretical Economics*. 1996. Vol. 152. No. 1. P. 197–215.
- [25] *Razu M. L., Jakutin Ju. V., Razu B. M., Bronnikova T. M., Titov S. A.* Upravlenie proektom: Osnovy proektnogo upravlenija / Razu M. L. (ed.). — М.: Knorus, 2010.
- [26] *Silver C.A.* Where technology and knowledge meet // *Journal of Business Strategy*. 2000. No. 21(Nov/Dec). P. 28–33.
- [27] *Titov S. A.* Iniciativa po «pereosmysleniju proektnogo upravlenija»: kratkij analiz rezultatov // *Vestnik Universiteta (GUU)*. 2014. No. 1. С. 204–210.
- [28] *Titov S. A.* Problemy ispolzovanija formalnyh metodologij proektnogo upravlenija // *Vestnik Universiteta (GUU)*. 2011. No. 8. С. 200–203.

- [29] The Portfolio Management Standard.— Pennsylvania: Project Management Institute, Inc. Newtown Square, 2006.
- [30] The Program Management Standard.— Pennsylvania: Project Management Institute, Inc. Newtown Square, 2006.
- [31] Whitley R. Project-based firms: new organizational form or variations on a theme? // Industrial and Corporate Change. 2006. Vol. 15. No. 1. P. 77-99.
- [32] Word Bank. Little Data Book.— Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank Development Data Group, 2005.