

Cloud of Science



Электронный журнал
<http://CloudofScience.ru>

12 +

Электронный журнал
Cloud of Science
Том 1. № 2

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

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

Никольчев Е. В., д. т. н., профессор
проректор, Московский технологический институт
(Россия, Москва)

Члены редколлегии

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

Барахнин В. Б., д. т. н., доцент
с. н. с., Институт вычислительных технологий СО РАН, зав. каф., Новосибирский государственный университет (Россия, Новосибирск)

Барановский Н. В., к. ф.-м. н.
доцент, Энергетический институт НИУ Томский политехнический университет (Россия, Томск)

Белов В. В., д. т. н., профессор
профессор, Рязанский государственный радиотехнический университет (Россия, Рязань)

Бубнов Г. Г., д. э. н., профессор
ректор, Московский технологический институт (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, Московский технологический институт (Россия, Москва)

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

Ковшов Е. Е., д. т. н., профессор
профессор, Московский государственный технологический 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 информации 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, Московский технологический институт (Россия, Москва)

Подольянец 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 радиотехнический университет (Россия, Рязань)

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

Солдаткин В. И., д. ф. н., профессор
вице-президент, Московский технологический институт (Россия, Москва)

Сухомлин В. А., д. т. н., профессор
зав. лаб., Московский государственный университет им. 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 энергетический университет (Россия, Иваново)

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

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

Хранилов В. П., д. т. н., доцент
зам. директора ИРИТ, Нижегородский государственный 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

Том 1 Номер 2

ОБЗОРЫ И ЛЕКЦИИ

А. С. Немировский. Основные концепции и результаты робастной оптимизации в применении к линейному программированию с неточными данными 180

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Х. М. Атиенсия Вильягомес, А. И. Дивеев. Метод сетевого оператора для синтеза интеллектуальной системы управления динамическим объектом.....191

Л. А. Демидова. Оценка качества моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора202

Т. А. Мотиенко. Иерархия регуляторов в задачах управления пространственным движением летательными аппаратами223

В. Н. Петрушин, Г. О. Рытиков. Формализация временного ряда методом двойного сглаживания230

Г. Н. Рогачев. Продукционный метод синтеза автоматических регуляторов непрерывно-дискретных систем управления239

ОБЛАЧНЫЕ И СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А. В. Карпунин, Л. О. Кириченко, Д. И. Грицив, А. А. Ткаченко. Применение методов нелинейной динамики и фрактального анализа для оценивания работы инфокоммуникационных систем с протоколом ТСП.....258

ПРИКЛАДНЫЕ ИТ-СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ

А. Ю. Громов, А. И. Баранчиков. Разработка программных средств апробации алгоритмов проектирования информационных структур272

Е. Е. Ковшов, Т. А. Завистовская. Система обработки движения губ человека для речевого ввода информации279

Д. В. Коробкина, Н. В. Барановский. Исследования процессов теплового воздействия лесных пожаров на ткани человека: перспективы создания медицинских информационных систем292

Д. А. Корнев, Е. Ю. Логинова. Исследование алгоритмов работы информационной системы с использованием математического аппарата сетей Петри.....318

Е. Р. Муратов, М. Е. Никифоров. Методы сокращения вычислительной сложности алгоритмов совмещения разнородных изображений327

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭКОНОМИКЕ

А. С. Семенов, Э. Б. Гостева. Основные детерминанты объема венчурных сделок в российские ИТ-компании337

УДК 519.85

Основные концепции и результаты робастной оптимизации в применении к линейному программированию с неточными данными

А. С. Немировский
Georgia Institute of Technology
North Avenue, Atlanta, GA 30332,
e-mail: nemirovs@isye.gatech.edu

Аннотация. Статья представляет собой обзорную лекцию по одному из современных направлений в прикладной математике, получившего название робастная оптимизация. Настоящее электронное издание включает публикуемое ниже предисловие, подробный список литературы, посвященный истории вопроса, а также видеозапись лекции и слайды, размещенные на странице номера журнала.

Ключевые слова: робастная оптимизация, линейное программирование, неточные данные.

В приложениях оптимизации «настоящие» численные данные задачи, которую должен решить пользователь, в момент решения задачи, как правило, известны лишь приближенно. Традиционно небольшие (измеряемые долями процента) неточности в данных просто игнорируются, и задача решается при номинальных данных (доступных пользователю оценках фактических данных), в надежде, что при небольших расхождениях между фактическими и номинальными данными оптимальное решение, построенное по номинальным данным («номинальное оптимальное решение»), окажется достаточно хорошим и при фактических данных. Оказывается, однако, что часто совсем небольшие расхождения между фактическими и номинальными данными приводят к тому, что номинальное решение при переходе от номинальных к фактическим данным начинает сильно нарушать ограничения задачи и тем самым становится практически бесполезным. Подобный эффект наблюдался, например, при тестировании задач линейного программирования из библиотеки NETLIB; в 13 из 90 протестированных задач возмущения «явно неточных» коэффициентов (вроде 0.946049 — трудно поверить, что в реальной жизни коэффициент такого вида можно и в самом деле оценить с 6 знаками точности) всего на 0.01% приводили к тому, что номинальное решение, при подстановке в задачу фактических данных, нарушало некоторые ограничения на более чем 50% от их правых частей; в одном из примеров (PILOT4, 411 ограничений на 1000 переменных) нарушения достигали 210 000% (!) от правых частей [3].

Таким образом, практические применения оптимизации нуждаются в методологии, способной заранее учесть неточность данных и получать «иммунизированные» к этим неточностям решения. Исторически единственной методологией такого рода было стохастическое программирование, предполагающее неточно известные данные случайными величинами с известным совместным распределением и требующие от допустимого решения удовлетворять ограничениям задачи (левые части которых становятся теперь случайными величинами с распределениями, зависящими, как от параметра, от подставляемого решения) с заданной и близкой к 1 вероятностью. Такой подход страдает от двух недостатков.

Во-первых, если в реальности «настоящие данные» и в самом деле выбираются по некоторому распределению (что не всегда так), идентифицировать это распределение обычно весьма трудно.

Во-вторых, стохастические формулировки оптимизационных задач, даже таких простых, как задачи линейного программирования, оказываются чрезвычайно трудоемкими в вычислительном отношении, не допускающими гарантированного отыскания приближенного решения высокой точности за разумное время.

Робастная оптимизация (РО) — это сформировавшаяся и ставшая популярной за последние две декады альтернативная к стохастическому программированию методология иммунизации решений оптимизационных задач к неопределенности в данных¹. В РО данные считаются меняющимися в заданной области неопределенности, а от решений требуется робастная допустимость — требуется, чтобы они оставались допустимыми при всех наборах данных из указанного множества неопределенности. Предполагая (что на самом деле не ограничивает общности), что данные, входящие в целевой функционал, известны точно, РО рекомендует использовать наилучшие по целевому функционалу среди робастно допустимых решений.

Оказывается, что оптимальное робастное решение во многих случаях можно найти эффективно. Это так, например, в задачах линейного программирования, в предположении, что множество неопределенности (которое становится теперь множеством в многомерном пространстве наборов коэффициентов матрицы ограничений, целевого функционала и правых частей ограничений) задано конечным числом линейных неравенств. В этом случае отыскание оптимального робастного решения сводится к решению явно выписываемой задачи обычного линейного программирования с размерами, сравнимыми с размерами исходной задачи плюс размеры описания множества неопределенности.

Литература

- [1] *Barmish B. R., Lagoa C. M.* The uniform distribution: a rigorous justification for the use in robustness analysis // *Math. Control, Signals, Systems*. 1997, 10. P. 203–222.

¹ Робастная оптимизация берет свое начало в статье Сойстера [94] 1973 г.; это направление, которое было полностью забыто в течение более чем 20 лет, «возродилось» — и получило с тех пор дальнейшее существенное развитие — в 1997 г.

- [2] *Bendsøe M.* Optimization of Structural Topology, Shape and Material.— Springer-Verlag, Heidelberg, 1995.
- [3] *Ben-Tal A., El Ghaoui L., Nemirovski A.* Robust Optimization. Princeton University Press, 2009. (sites.google.com/site/robustoptimization)
- [4] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Stable Truss Topology Design via Semidefinite Programming. // *SIAM J. on Optimization.* 1997, 7:4. P. 991–1016.
- [5] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Robust Convex Optimization // *Math. of Oper. Res.* 1998, 23:4. P. 769–805.
- [6] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Robust solutions of uncertain linear programs // *OR Letters.* 1999, 25. P. 1–13.
- [7] *Ben-Tal A., Kočvara M., Nemirovski A., Zowe J.* Free Material Design via Semidefinite Programming. The Multiload Case with Contact Conditions // *SIAM J. on Optimization.* 1999, 9 P. 813–832 // *SIAM Review.* 2000, 42. P. 695–715.
- [8] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data // *Math. Progr.* 2000, 88. P. 411–424.
- [9] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Lectures on Modern Convex Optimization: Analysis, Algorithms and Engineering Applications.— SIAM, Philadelphia, 2001.
- [10] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Robust Optimization — methodology and applications // *Math. Progr. Series B.* 2002, 92. P. 453–480.
- [11] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* On tractable approximations of uncertain linear matrix inequalities affected by interval uncertainty // *SIAM J. on Optimization.* 2002, 12. P. 811–833.
- [12] *Ben-Tal A., Nemirovski A., Roos C.* Robust solutions of uncertain quadratic and conicquadratic problems // *SIAM J. on Optimization.* 2002, 13. P. 535–560.
- [13] *Ben-Tal A., Nemirovski A., Roos C.* Extended matrix cube theorems with applications to μ -theory in control // *Math. of Oper. Res.* 2003, 28. P. 497–523.
- [14] *Ben-Tal A., Goryashko A., Guslitzer E., Nemirovski A.* Adjustable robust solutions of uncertain linear programs // *Math. Progr.* 2004, 99. P. 351–376.
- [15] *Ben-Tal A., Golany B., Nemirovski A., Vial J.-P.* Supplier-retailer flexible commitments contracts: A robust optimization approach // *Manufacturing & Service Operations Management.* 2005, 7:3. P. 248–271.
- [16] *Ben-Tal A., Boyd S., Nemirovski A.* Extending scope of robust optimization: Comprehensive robust counterparts of uncertain problems // *Math. Progr. Series B.* 2006, 107:1–2, P. 63–89.
- [17] *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Selected topics in robust convex optimization // *Math. Progr. Series B.* 2008, 112:1. P. 125–158.
- [18] *Ben-Tal A., Margalit T., Nemirovski A.* Robust modeling of multi-stage portfolio problems // *High Performance Optimization.* Eds.: H. Frenk, etc. — Kluwer Academic Publishers, 2000. P. 303–328.

- [19] *Ben-Tal A., El Ghaoui L., Nemirovski A.* Robust semidefinite programming // Handbook on Semidefinite Programming. Eds: R. Saigal, etc. — Kluwer Academic Publishers, 2000. P. 139–162.
- [20] *Ben-Tal A., Nemirovski A., Roos C.* Robust versions of convex quadratic and conic-quadratic problems // Proc. 5th International Conference on Optimization Techniques and Applications (ICOTA 2001). 2001, 4. P. 1818–1825.
- [21] *Ben-Tal A., Golany B., Shtern S.* Robust multi-echelon, multi-period inventory control. Submitted to Operations Research. 2008.
- [22] *Bernussou J., Peres P. L. D., Geromel J. C.* A linear-programming oriented procedure for quadratic stabilization of uncertain systems // Syst. Control Letters. 1989, 13. P. 65–72.
- [23] *Bertsimas D., Sim M.* Tractable approximations to robust conic optimization problems // Math. Progr. Series B. 2006, 107:1–2. P. 5–36.
- [24] *Bertsimas D., Pachmanova D., Sim M.* Robust linear optimization under general norms // OR Letters. 2004, 32:6. P. 510–516.
- [25] *Bertsimas D., Sim M.* The price of robustness // Oper. Res. 2004, 32:1. P. 35–53.
- [26] *Bertsimas D., Sim M.* Robust discrete optimization and network flows // Math. Progr. Series B. 2003, 98. P. 49–71.
- [27] *Bertsimas D., Popescu I.* Optimal inequalities in probability theory: A convex optimization approach // SIAM J. on Optimization. 2005, 15:3. P. 780–804.
- [28] *Bertsimas D., Popescu I., Sethuraman J.* Moment problems and semidefinite programming // Handbook on Semidefinite Programming, Eds.: H. Wolkovitz, R. Saigal.— Kluwer Academic Publishers, 2000. P. 469–509.
- [29] *Bertsimas D., Fertis A.* On the equivalence between robust optimization and regularization in statistics. — Submitted to Operations Research, 2008.
- [30] *Bertsimas D., Iancu D. A., Parrilo P.* Optimality of Affine Policies in Multi-stage Robust Optimization. — To appear in Math. of Oper. Res, 2008.
- [31] *Bhattacharyya C., Grate L., Mian S., El Ghaoui L., Jordan M.* Robust sparse hyperplane classifiers: Application to uncertain molecular profiling data // Journal of Computational Biology. 2003, 11:6. P. 1073–1089.
- [32] *Borell C.* The Brunn-Minkowski inequality in Gauss space // Inventiones Mathematicae. 1975, 30:2. P. 207–216.
- [33] *Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V.* Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory.— SIAM, Philadelphia, 1994.
- [34] *Boyd S., Vandenberghe L.* Convex Optimization.— Cambridge University Press, 2004.
- [35] *Calafiore G., Campi M. C.* Uncertain convex programs: Randomized solutions and confidence levels // Math. Progr. 2005, 102:1. P. 25–46.

- [36] *Calafiore G., Campi M. C.* Decision making in an uncertain environment: The scenariobased optimization approach // Multiple Participant Decision Making. Eds.: J. Andrysek etc.— Advanced Knowledge International, 2004. P. 99–111.
- [37] *Calafiore G., Topcu U., El Ghaoui L.* Parameter estimation with expected and residual-at-risk criteria. — To appear in Systems and Control Letters, 2009.
- [38] *Charnes A., Cooper W. W., Symonds G. H.* Cost horizons and certainty equivalents: An approach to stochastic programming of heating oil // Management Science. 1958, 4. P. 235–263.
- [39] *Dan Barb F., Ben-Tal A., Nemirovski A.* Robust dissipativity of interval uncertain system // SIAM J. Control and Optimization. 2003, 41. P. 1661–1695.
- [40] *De Farias V.P., Van Roy B.* On constraint sampling in the linear programming approach to approximate dynamic programming // Math. of Oper. Res. 2004, 29:3. P. 462–478.
- [41] *Dentcheva D., Prékopa A., Ruszczyński A.* Concavity and efficient points of discrete distributions in probabilistic programming // Mathematical Programming. 2000, 89. P. 55–77.
- [42] *Dhaene J., Denuit M., Goovaerts M. J., Kaas R., Vyncke D.* The concept of comonotonicity in actuarial science and finance: theory // Insurance: Mathematics and Economics. 2002, 31. P. 3–33.
- [43] *Diamond P., Stiglitz J. E.* Increases in risk and in risk aversion // Journal of Economic Theory. 1974, 8. P. 337–360.
- [44] *Eldar Y., Ben-Tal A., Nemirovski A.* Robust mean-squared error estimation in the presence of model uncertainties // IEEE Trans. on Signal Processing. 2005, 53:1. P. 168–181. (doi: 10.1109/TSP.2004.838933)
- [45] *El Ghaoui L., Lebret H.* Robust solution to least-squares problems with uncertain data // SIAM J. of Matrix Anal. Appl. 1997, 18. P. 1035–1064.
- [46] *El Ghaoui L., Oustry F., Lebret H.* Robust solutions to uncertain semidefinite programs // SIAM J. on Optimization. 1998, 9. P. 33–52.
- [47] *El Ghaoui L., Lanckriet G. R. G., Natsoulis G.* Robust classification with interval data. Technical Report # UCB/CSD-03-1279. — EECS Department, University of California, Berkeley, 2003. (www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2003/5772.html)
- [48] *Falk J. E.*, Exact solutions to inexact linear programs // Oper. Res. 1976, 24:4. P. 783–787.
- [49] *Genin Y., Hachez Y., Nesterov Yu., Van Dooren P.* Optimization problems over positive pseudopolynomial matrices // SIAM J. Matrix Anal. Appl. 2003, 25. P. 57–79.
- [50] *Lanckriet G. R. G., El Ghaoui L., Bhattacharyya C., Jordan M. I.* A robust minimax approach to classification // J. Mach. Learn. Res. 2003, 3. P. 555–582.
- [51] *Goulart P. J., Kerrigan E. C., Maciejowski J. M.* Optimization over state feedback policies for robust control with constraints // Automatica. 2006, 42:4. P. 523–533.

- [52] *Grotschel M., Lovasz L., Schrijver A.* Geometric Algorithms and Combinatorial Optimization.— Springer-Verlag, Berlin, 1987.
- [53] *Hadar J., Russell W.* Rules for ordering uncertain prospects // *American Economic Review*. 1969, 25. P. 59–34.
- [54] *Hanoch G., Levy H.* The efficiency analysis of choices involving risk // *Review of Economic Studies*. 1969, 36. P. 335–346.
- [55] *Håstad J.* Some optimal inapproximability results // *J. of the ACM*. 2001, 48: 4. P. 798–859. (doi: 10.1145/502090.502098)
- [56] *Hildebrand R.* An LMI description for the cone of Lorentz-positive maps // *Linear and Multilinear Algebra*. 2007, 55:6. P. 551–573. (doi: 10.1080/03081080701251249)
- [57] *Hildebrand R.* An LMI description for the cone of Lorentz-positive maps II // *Linear and Multilinear Algebra*. 2011, 59:7. P. 719–731. (doi: 10.1080/03081087.2010.486243)
- [58] *Huber P. J.* Robust Statistics.— John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [59] *Iyengar G., Erdogan E.* Ambiguous chance constrained problems and robust optimization // *Math. Progr. Series B*. 2006, 107:1–2. P. 37–61.
- [60] *Johnson W. B., Schechtman G.* Remarks on Talagrand’s deviation inequality for Rademacher functions // *Func. Analysis. Lecture Notes*. 1991, 1470. P. 72–77. (doi: 10.1007/BFb0090214)
- [61] *Khachiyan L. G.* The problem of calculating the volume of a polyhedron is enumerably hard // *Russian Math. Surveys*. 1989, 44. P. 199–200. (doi: 10.1070/RM1989v044n03ABEH002136)
- [62] *Kouvelis P., Yu G.* Robust Discrete Optimization and its Applications.— Kluwer Academic Publishers, London, 1997.
- [63] *Lagoa C. M., Li X., Sznaier M.* Probabilistically constrained linear programs and riskadjusted controller design // *SIAM J. on Optimization*. 2005, 15. P. 938–951.
- [64] *Lebret H., Boyd S.* Antenna array pattern synthesis via convex optimization // *IEEE Trans on Signal Processing*. 1997, 45:3. P. 526–532. (doi: 10.1109/78.558465)
- [65] *Lewis A. S.* Robust regularization. Technical Report. — Department of Mathematics, University of Waterloo, 2002.
- [66] *Love S.* Inventory Control.— McGraw-Hill, 1979.
- [67] *Miller L.B., Wagner H.* Chance-constrained programming with joint constraints // *Oper. Res.* 1965, 13. P. 930–945.
- [68] *Morari M., Zafiriou E.* Robust Process Control.— Prentice-Hall, 1989.
- [69] *Nemirovski A., Roos C., Terlaky T.* On maximization of quadratic form over intersection of ellipsoids with common center // *Math. Progr.* 1999, 86. P. 463–473.
- [70] *Nemirovski A.* On tractable approximations of randomly perturbed convex constraints // *Proc. 42nd IEEE Conference on Decision and Control Maui*, 2003. — P. 2419–2422. (doi: 10.1109/CDC.2003.1272982)

- [71] *Nemirovski A., Shapiro A.* Convex approximations of chance constrained programs // *SIAM J. on Optimization*. 2006, 17:4. P. 969–996.
- [72] *Nemirovski A., Shapiro A.* Scenario approximations of chance constraints // *Probabilistic and Randomized Methods for Design under Uncertainty*. Eds.: G. Calafiore, F. Dabbene.— Springer, 2006.
- [73] *Nemirovski A.* Sums of random symmetric matrices and quadratic optimization under orthogonality constraints // *Math. Progr. Series B*. 2007, 109. P. 283–317.
- [74] *Nemirovski A., Onn S., Rothblum U.* Accuracy certificates for computational problems with convex structure // *Mathematics of Operations Research*. 2010, 35:1, P. 52–78. (doi: 10.1287/moor.1090.0427)
- [75] *Nesterov Yu.* Squared functional systems and optimization problems // *High Performance Optimization*. Eds.: H. Frenk etc. — Kluwer, 1999. P. 405–439.
- [76] *Nesterov Yu.* Semidefinite relaxation and nonconvex quadratic optimization // *Optim. Methods and Software*. 1998, 9. P. 141–160.
- [77] *Nikulin Y.* Robustness in combinatorial optimization and scheduling theory: An extended annotated bibliography. Working paper.— Christian-Albrechts University in Kiel, Institute of Production and Logistics, 2006 ([www.optimization-online.org/DB HTML/2004/11/995.html](http://www.optimization-online.org/DB_HTML/2004/11/995.html))
- [78] *Nilim A., El Ghaoui L.* Robust control of Markov decision processes with uncertain transition matrices // *Oper. Res.* 2005, 53:5. P. 780–798.
- [79] *Packard A., Doyle J. C.* The complex structured singular value // *Automatica*. 1993, 29, P. 71–109.
- [80] *Pinter J.* Deterministic approximations of probability inequalities // *ZOR Methods and Models of Operations Research, Series Theory*. 1989, 33:4. P. 219–239. (doi: 10.1007/BF01423332)
- [81] *Pólik I., Terlaky T.* A survey of the S-Lemma // *SIAM Review*. 2007, 49:3. P. 371–418.
- [82] *Polyak B. T.* Convexity of quadratic transformations and its use in control and optimization // *J. on Optimization Theory and Applications*. 1998, 99. P. 553–583.
- [83] *Prékopa A.* On probabilistic constrained programming // *Proc. of the Princeton Symposium on Mathematical Programming*. Princeton University Press, 1970. P. 113–138.
- [84] *Prékopa A.* *Stochastic Programming*.— Kluwer, Dordrecht, 1995.
- [85] *Prékopa A., Vizvari B., Badics T.* Programming under probabilistic constraint with discrete random variables // *New Trends in Mathematical Programming*. Eds.: In: L. Grandinetti etc.— Kluwer, 1997. P. 235–257.
- [86] *Ringertz J.* On finding the optimal distribution of material properties // *Structural Optimization*. 1993, 5:4. P. 265–267. (doi: 10.1007/BF01743590)
- [87] *Rockafellar R. T.* *Convex Analysis*.— Princeton University Press, 1970.

- [88] *Rothschild M., Stiglitz J. E.* Increasing risk I: a definition // *Journal of Economic Theory*. 1970, 2:3. P. 225–243.
- [89] *Rothschild M., Stiglitz J. E.* Increasing Risk II: its economic consequences // *Journal of Economic Theory*. 1971, 3:1. P. 66–84.
- [90] *Shapiro A.* Stochastic programming approach to optimization under uncertainty // *Math. Program. Series B*. 2008, 112:1. P. 183–220. (doi: 10.1007/s10107-006-0090-4)
- [91] *Shivaswamy P. K., Bhattacharyya C., Smola A. J.* Second order cone programming approaches for handling missing and uncertain data // *Journal The Journal of Machine Learning Research*. 2006, 7. P. 1283–1314.
- [92] *Singh C.* Convex programming with set-inclusive constraints and its applications to generalized linear and fractional programming // *J. of Optimization Theory and Applications*. 1982, 38:1. P. 33–42.
- [93] *Stinstra E., den Hertog D.* Robust optimization using computer experiments // *European Journal of Operational Research*. 2008, 191:3. P. 816–837. (doi: 10.1016/j.ejor.2007.03.048)
- [94] *Soyster A. L.* Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming // *Oper. Res.* 1973, 21:5. P. 1154–1157. (doi: 10.1287/opre.21.5.1154)
- [95] Special Issue on Robust Optimization // *Math. Progr. Series B*. 2006, 107:1–2 (<http://link.springer.com/journal/10107/107/1/page/1>)
- [96] *Trafalis T. B., Gilbert R. C.* Robust classification and regression using support vector machines // *European Journal of Operational Research*. 2006, 173:3. P. 893–909. (doi: 10.1016/j.ejor.2005.07.024)
- [97] *Wolkowicz H., Saigal R., Vandenberghe L.* (eds). *Handbook of Semidefinite Programming*.— Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [98] *Xu H., Mannor S., Caramanis C.* Robustness, risk, and regularization in support vector machines // *The Journal of Machine Learning Research*. 2009, 10. P. 1485–1510. (dl.acm.org/citation.cfm?id=1755834)
- [99] *Youla D. C., Jabr H. A., Bongiorno J. J.* Modern WienerHopf design of optimal controllers — Part II: The multivariable case // *IEEE Trans. Automat. Control*. 1976, 21:3. P. 319–338. (doi: 10.1109/TAC.1976.1101223)

Приложение. Комментарий редакции

Аркадий Семенович Немировский любезно предоставил нашему журналу возможность опубликовать его лекцию, прочитанную в Москве. В лекции идет речь о подходе, ставшем популярным в последние 15 лет и получившим название «робастная оптимизация». Для нашей публикации А. С. Немировский написал предисловие, а также любезно предоставил слайды к данной лекции и список литературы (посвященный главным образом теории вопроса, поскольку список прикладных исследований в настоящее время практически необозрим). Желаям подробнее ознакомиться с предметом следует обратиться к книге А. Ben-Tal, L. El Ghaoui, A. Nemirovski, *Robust Optimization*, Princeton University Press, 2009 (в свободном доступе на <http://sites.google.com/site/robustoptimization>).

Полагаем уместным предварить публикацию некоторыми техническими объяснениями, которые, возможно, помогут читателю/слушателю более полно представить значение работы А. С. Немировского.

Когда в 60-х годах прошлого века в математике начала складываться новая дисциплина — теория сложности, основное внимание в ней было принято уделять изучению дискретных объектов (схемы, формулы, графы и т. п.) и получению оценок трудоемкости вычисления некоторых параметров этих объектов: числа шагов вычислений или объема требуемой для вычисления памяти. Даже когда исследователи обращались к непрерывным объектам (как, например, А. Г. Витушкин²) их интересовали те же дискретные меры — в случае работы Витушкина минимальное число бит для представления некоторого класса функций с заданной точностью.

А. С. Немировский, поставив перед собой задачу получения оценок сложности методов непрерывной оптимизации, следовал методологии, которая была предложена в работах Н. С. Бахвалова. Эта методология предполагала, что численный метод решения может быть связан с накоплением информации о решаемой задаче, путем задания оракулу «вопросов», например, каковы значение и производная минимизируемой функции в предъявленной оракулу точке. Минимальное количество вопросов, достаточных для того, чтобы сформировать решение с заданной точностью, как раз и оценивало «сложность» задачи. Такой подход предполагает, что метод решения применим к массовой задаче (как и в теории алгоритмов), а оракул способен поставлять лишь локальную информацию, как это и происходит в большинстве существующих методов непрерывной оптимизации.

Оказалось, что подобный подход чрезвычайно удобен для получения оценок сложности методов непрерывной оптимизации.

Здесь невозможно, да и нет необходимости, углубляться в детали полученных А.С. Немировских результатов (см. теорию³, и приложения⁴). Приведем формули-

²Витушкин А. Г. Оценка сложности задач табулирования.— М., 1959.

³Немировский А. С., Юдин Д. Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизации.— М., 1979.

⁴Юдин Д. Б., Горяшко А. П., Немировский А. С. Математические методы оптимизации устройств и алгоритмов АСУ (гл. 5–11).— М., 1982.

ровку одного общего результата. Было показано, что класс «всех вообще» выпуклых экстремальных задач на выпуклом компакте G размерности n имеет асимптотику сложности — при условии, что точность $\nu \rightarrow 0$ всего лишь $O(n \ln(1/\nu))$. А в общем случае справедливо

$$C_1 \leq N(\nu) / (1 + n \ln(1/\nu)) \leq C_2.$$

Если G — параллелепипед, то $N(\nu) \sim n \ln(1/\nu)$ при всех $\nu < 1/4$, а если G — эллипсоид, то с ростом n : $N(\nu) \sim 1/\nu^2$.

Довольно быстро (и неожиданно даже для автора) выяснилось, что один из новых методов оптимизации⁵ (современное название — метод эллипсоидов), предложенных в связи со сложностными исследованиями, позволяет, в частности, ответить на вопросы, которые довольно давно волновали исследователей. А именно, являются ли задачи линейного программирования NP-сложными или десятилетиями успешно работавший симплекс-метод вовсе не оптимален. Вопрос возник после того, как появилась работа⁶, авторы которой построили пример задачи линейного программирования, получение оптимального решения в которой не могло быть получено быстрее, чем за экспоненциально растущее (с ростом числа переменных в задаче) число шагов. Вслед за статьей Klee и Minty последовал шквал работ с различными примерами задач линейного программирования, для которых справедливы экспоненциальные нижние оценки сложности при условии, что задача решается симплекс-методом.

Так возникла странная ситуация — существуют задачи, на которых симплекс-метод не должен сходиться в реальное время, но почему-то на практике он всегда сходится достаточно быстро. Следовало понять, во-первых, как устроен класс задач ЛП: возможно доля сложных задач в нем чрезвычайно мала. Во-вторых, что еще более интересно, является этот класс задач NP сложным или симплекс-метод недостаточно хорош и существуют алгоритмы, которые любую задачу из этого класса могут решить за время, растущее не быстрее некоторого полинома?

Применение метода эллипсоидов позволило Л. Г. Хачияну построить алгоритм решения задач линейного программирования, который имеет полиномиальную оценку сложности по числу битовых операций. Точнее говоря, этот алгоритм позволяет любую задачу из класса задач линейного программирования с n переменными, m ограничениями и L битами, необходимыми для представления всех данных в задаче, гарантированно решить с полиномиальной по L трудоемкостью. При этом трудоемкость определяется так, как это принято в теории алгоритмической сложности, т. е. числом побитовых операций.

В 1982 году Mathematical Optimization Society and the American Mathematical Society наградило А. Немировского, Л. Хачияна и Д. Юдина премией Фалкерсона (Fulkerson Prize) за статьи, опубликованные в журналах «Экономика и математиче-

⁵ Немировский А. С., Юдин Д. Б. Сложность задач и эффективность методов оптимизации.— М., 1979.

⁶ Klee V., Minty G. J. How good is the simplex algorithm? Tech. report. No. TR-22.— Washington Univ Seattle Dept Of Mathematics, 1970.

ские методы» и «Доклады АН СССР», где содержались результаты, позволившие получить полиномиальный алгоритм для задач линейного программирования.

Высочайший математический уровень работ А. С. Немировского никогда не заслонял для него прикладные проблемы, которые в изобилии встречаются в практике применения методов оптимизации. Он автор одного из *toolboxes* в системе MATLAB, а диапазон прикладных оптимизационных проблем, для которых была продемонстрирована возможность применения метода эллипсоидов, включает в себя расчет строительных конструкций и расчет антенных систем, управление запасами и проектирование интегральных схем⁷. Одной из главных целей в проблематике робастной оптимизации, как отмечал А. Немировский, показать, как первоначальные постановки задач, «кажущиеся плохими» можно сформулировать в виде вычислительно доступных (*tractable*) и хорошо структурированных оптимизационных моделей. Как методы, развитые А. С. Немировским, решают эту задачу, можно проследить на примере⁸ — единственной за последние годы работе А. Немировского, опубликованной на русском языке.

В 1991 году *Mathematical Programming Society and the Society for Industrial and Applied Mathematics* наградило А. Немировского премией Данцига (*Dantzig Prize*), а в 2003 году, он был награжден *Institute for Operations Research and the Management Sciences* премией Дж. Неймана (*John von Neumann Theory Prize*), став единственным на тот момент математиком, получившим все три самые престижные премии в области оптимизации.

⁷ *Ben-Tal A., Nemirovski A. Lectures on Modern Convex Optimization Analysis, Algorithms and Engineering Applications.*— SIAM, Philadelphia, 2001.

⁸ *Горяшко А. П., Немировский А. С. Оптимизация стоимости энергии в системах водоснабжения в условиях неопределенности потребления // Автоматика и телемеханика. 2014, 10.*

УДК 519.618

Метод сетевого оператора для синтеза интеллектуальной системы управления динамическим объектом

Х. М. Атиенсия Вильягомес¹, А. И. Дивеев^{1, 2}

¹Российский университет дружбы народов
115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 3

²Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
Российской академии наук,
119333, Москва, ул. Вавилова, 40,
e-mail: ose_mav@yahoo.es, aidiveev@mail.ru

Аннотация. Рассматривается применение метода сетевого оператора для синтеза интеллектуальной системы управления динамическим объектом. В качестве динамического объекта рассматривается летающий робот типа квадродор. Для синтеза использовано два сетевых оператора, логический — для синтеза логического блока управления, и обычный арифметический оператор — для синтеза системы стабилизации относительно точки пространственной траектории. Приведен пример синтеза интеллектуального управления движением квадродора в окрестности пространственной траектории, построенной с учетом препятствий.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, сетевой оператор, квадродор.

1. Введение

Летающие роботы сегодня в большинстве случаев представляют собой беспилотные вертолеты с четырьмя симметричными винтами (рис. 1). В западной литературе такая схема управления называется квадродором (quadrotor).

Удобство управления квадродором заключается в том, что для поступательного движения не требуется шарниров, перемещающих вращающиеся конструкции. Движение вперед и назад, вправо и влево осуществляется за счет разности тяг двух противоположных винтов (рис. 2). В квадродоре нет необходимости в угле рыскания, так как движение по боковой оси абсолютно идентично движению по продольной оси по отношению к собственным осям симметрии. За счет вращения каждой пары винтов в противоположную сторону в квадродоре отсутствует реакция корпуса на общую тягу винтов, поэтому нет необходимости в компенсационном моменте, вырабатываемым в обычных вертолетах дополнительным хвостовым вин-

том. Квадротор может стоять неподвижно в пространстве, что также является дополнительным преимуществом, позволяющим использовать его в режиме робота.



Рисунок 1. Квадротор (Parrot AR. Drone 2.0)

Сегодня квадаторы широко используются и продаются по всему миру. На настоящем этапе развития основным направлением является их интеллектуализация. Большинство работающих квадаторов и практически всех беспилотных летающих аппаратов управляются человеком от пульта управления. Автономные режимы работы для летающих роботов встречаются крайне редко.

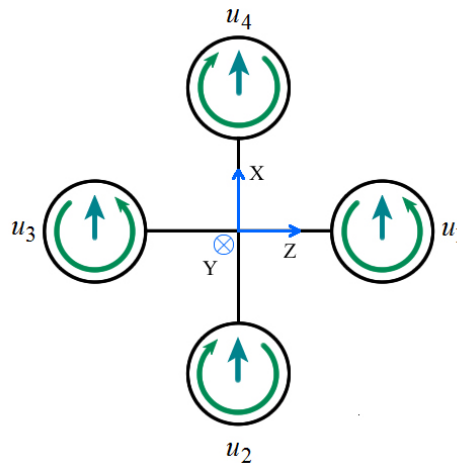


Рисунок 2. Схемы управления квадатором

Данное обстоятельство вызвано, прежде всего, сложностью реализации систем управления, которая, помимо обеспечения режима движения летающего робота, должна также выполнять функцию выбора. Достаточно сложно реализовать полностью автономную систему управления летающим роботом, которая бы обеспечила весь процесс полета.

Реально полет летающего робота должен включать несколько режимов управления, например, стабилизацию робота в пространстве, перемещение его в другую точку пространства, обнаружение и облет препятствий, обеспечение режима посадки. Перечисленные режимы движения могут быть легко реализованы достаточно несложными системами управления, но тогда при автономном режиме полета возникает дополнительная проблема выбора режима полета. Летающий робот должен автономно принять решение по выбору критерия, минимум которого ему необходимо обеспечивать. По критерию уже можно отобрать режим полета, хотя и при этом остается вопрос о том, что необходимо делать при ошибочном принятии решения.

Выбор решения формально описывается с помощью логических выражений, следовательно, система управления должна включать не только набор блоков управления, реализующих определенные режимы управления, но и блоки логического вывода, которые также по состоянию объекта должны определить выбор режима управления. Из сказанного следует, что для управления летающими роботами актуальна задача синтеза логико-функционального управления.

2. Задача синтеза интеллектуальной системы управления

Рассмотрим формальную постановку задачи синтеза интеллектуальной системы управления. Задана система дифференциальных уравнений, описывающая динамику объекта управления,

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где \mathbf{x} — вектор состояния объекта управления, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$; \mathbf{u} — вектор управления, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$. На управление наложены ограничения

$$\mathbf{u} \in U, \quad (2)$$

где U — ограниченное замкнутое множество.

Заданы начальные условия:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0. \quad (3)$$

Задан критерий качества управления в виде функционала

$$J = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где t_f — время окончания процесса управления.

Чтобы минимизировать значение функционала (4) необходимо найти управление в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{v}), \quad (5)$$

где \mathbf{v} — вектор логических переменных, $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_k]^T$; $v_i \in \{0, 1\}$; $i = \overline{1, k}$.

Логические переменные определяют выбор вариантов управления на основе предикатной функции, которую также необходимо найти:

$$\mathbf{v} = \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (6)$$

где

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}): \mathbb{R}^n \rightarrow \overbrace{\{0, 1\} \times \dots \times \{0, 1\}}^k.$$

Для решения задачи используем метод сетевого оператора [1–8]. Метод позволяет искать решения на множестве математических выражений, задаваемых целочисленной матрицей сетевого оператора. Поскольку в задаче необходимо, помимо обычного функционального управления (5), искать также логическое управление (6), то используем два сетевых оператора. Для синтеза предикатной функции (6) используем логический сетевой оператор [6].

Логическую функцию ищем с помощью метода логического сетевого оператора. Функцию дискретизации определяем на основе анализа конкретной задачи.

Для поиска решения используем генетический алгоритм, построенный на основе принципа базисного решения. Для определения сетевого оператора, к которому необходимо применить вариации, в генетическом алгоритме используем дополнительный бинарный вектор.

3. Численный пример

В качестве примера рассмотрим синтез интеллектуальной системы управления для беспилотного вертолета типа квадрантор.

Математическая модель квадрантора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= (-T/m_0) \cos(x_7) \sin(x_9), \\ \dot{x}_3 &= x_4, \\ \dot{x}_4 &= (T/m_0) \cos(x_7) \cos(x_9) - g_0, \\ \dot{x}_5 &= x_6, \\ \dot{x}_6 &= (T/m_0) \sin(x_7), \\ \dot{x}_7 &= x_8, \\ \dot{x}_8 &= (u_1 - u_3)l/I_1, \\ \dot{x}_9 &= x_{10}, \\ \dot{x}_{10} &= (u_2 - u_4)l/I_3, \end{aligned}$$

где x_1, x_3, x_5 — координаты центра масс; x_1 — продольная дальность; x_3 — высота; x_5 — боковая дальность; x_2, x_4, x_6 — соответствующие проекции вектора скорости движения центра масс; x_7, x_9 — углы поворота вокруг горизонтальной плос-

кости; x_8, x_{10} — соответствующие углы скорости; u_1, u_2, u_3, u_4 — тяги винтов; $T = u_1 + u_2 + u_3 + u_4$; l — расстояние между противоположными винтами; I_1, I_2 — моменты инерции относительно осей в горизонтальной плоскости; m_0 — масса квадрантора; g_0 — ускорение свободного падения.

На управление наложены ограничения

$$u^- \leq u_i \leq u^+, \quad i = 1, 4,$$

где u^- и u^+ — величины минимальной и максимальной тяг винтов.

Для того чтобы обеспечить отсутствие вращения вокруг вертикальной оси, тяги винтов должны удовлетворять соотношению

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 = 0.$$

Для управления движением квадрантора используем наклоны плоскости вращения винтов, которые определяются углами x_7 и x_9 . На величины углов наложены ограничения

$$x_7^- \leq x_7 \leq x_7^+,$$

$$x_9^- \leq x_9 \leq x_9^+.$$

Пространственная траектория задана набором точек

$$P = \left((x_1^0, x_3^0, x_5^0), \dots, (x_1^{M-1}, x_3^{M-1}, x_5^{M-1}) \right),$$

где M — количество точек пространственной траектории.

4. Критерии качества управления

Необходимо найти управление, чтобы минимизировать две целевые функции объекта управления. Первая функция определяет точность движения по траектории. Вторая функция определяет время прохождения траектории

$$J_1 = sB(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{M-1} \min_t \left\{ \sqrt{\sum_{\alpha} (x_{\alpha}(t) - x_{\alpha}^j)^2} \right\} \rightarrow \min,$$

$$J_2 = t_f \rightarrow \min.$$

Здесь t^+ — предельное максимальное время управления; s — коэффициент штрафа; $B(\mathbf{x})$ — предикатная функция для определения нарушения ограничений;

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{if } \sqrt{\sum_{\alpha} (x_{\alpha}(t) - x_{\alpha}^j)^2} < \varepsilon; \\ t^+, & \text{иначе,} \end{cases} \quad \alpha = 1, 3, 5.$$

Целью управления было движение квадрантора по пространственной траектории, которая должна была миновать препятствия, поэтому обе целевые функции штрафвались в случае не попадания квадрантора в окрестность какой-либо точки пространственной траектории и при попадании на область препятствия.

При расчетах использовалась математическая модель со следующими параметрами:

$$m_0 = 1; I_1/l = 0.03; I_3/l = 0.03; g_0 = 9.81; u^- = 1.5; u^+ = 4;$$

$$x_7^- = -0.5; x_7^+ = 0.5; x_9^- = -0.4; x_9^+ = 0.4; t^+ = 30.$$

Траектория движения содержала восемь точек

$$P = \left((1.5, 14, 5.5), (5.5, 12, 5.5), (5.5, 10, 9.3), (9.5, 8, 9.5), \right. \\ \left. (9.5, 6, 5.5), (5.5, 4, 5.5), (5.5, 2, 1.5), (0, 0, 0) \right).$$

Были также определены препятствия в виде набора угловых точек на горизонтальной плоскости:

$$C = \{C_1, \dots, C_K\},$$

где K — число препятствий; C_i — координаты углов:

$$C_i = \left((x_{1,1,i}^*, x_{5,1,i}^*), (x_{1,2,i}^*, x_{5,2,i}^*), (x_{1,3,i}^*, x_{5,3,i}^*), (x_{1,4,i}^*, x_{5,4,i}^*) \right).$$

Всего было рассмотрено четыре препятствия с координатами:

$$C_1 = f((2.2; 2), (5; 2.2), (4.8; 5), (2; 4.8)), C_2 = ((6.2; 2), (9; 2.2), (8.8; 5), (6; 4.8)), \\ C_3 = ((2.2; 6), (5; 6.2), (4.8; 9), (2; 8.8)), C_4 = ((6.2; 6), (9; 6.2), (8.8; 9), (6; 8.8)).$$

В результате синтеза были получены математические выражения, на основе которых вычисляются значения управляющих воздействий. Полученные математические выражения имеют следующий вид:

$$T = -q_{10}x_4 - q_9(x_3 - x_3^j) + g_0 + \arctan(x_4) + \sin(x_4)(q_6x_9)^2 - \operatorname{sgn}(x_3 - x_3^j)\sqrt{q_9(x_3 - x_3^j)};$$

$$u_2 - u_4 = -q_5x_{10} - q_6x_9 + q_7x_2 + q_8(x_1 - x_1^j);$$

$$u_1 - u_3 = -q_1x_8 - q_2x_7 - q_3x_6 - q_4(x_5 - x_5^j),$$

где $q_1 = 1.075$; $q_2 = 3$; $q_3 = 0.527$; $q_4 = 0.324$; $q_5 = 1.075$; $q_6 = 3$; $q_7 = 0.527$; $q_8 = 0.324$; $q_9 = 15.51$; $q_{10} = 15.19$.

Для управления, обеспечивающего переключения целевых точек, было получено следующее логическое выражение

$$v = y_1 \wedge y_3 \wedge y_5 \wedge z_1 \vee z_\varepsilon,$$

где

$$y_\alpha = \theta(d_\alpha - |x_\alpha - x_\alpha^j|), \quad z_1 = \theta((x_1^{j+1} - x_1)x_2),$$

$$z_\varepsilon = \theta\left(\varepsilon - \sqrt{\sum_\alpha (x_\alpha - x_\alpha^j)^2}\right), \quad \theta(A) = \begin{cases} 1, & \text{если } A \geq 0; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad d_\alpha = 0.5; \quad \alpha = 1, 3, 5; \quad \varepsilon = 0.2.$$

Решение двукритериальной задачи строится на основе множества Парето [9]. Множество Парето оптимального решения представлено на рис. 3.

5. Результаты моделирования

Результаты моделирования с одним из полученных логико-функциональных управлений приведены на рис. 4–11. На рисунках показаны квадратные точки пространственной траектории. На рис. 4 изображены учитываемые при синтезе области препятствий в форме прямоугольников. Для полученного управления мы имеем следующие значения критериев качества: $J_1 = 3.97$, $J_2 = 26.00$.

Задача логического управления заключалась в обеспечении переключения точек пространственной траектории. Для построения логического выражения на вход логического блока подавались отклонения состояния объекта от текущей целевой точки заданной траектории и следующей точки. Начальные значения для моделирования были нулевыми при высоте $x_3(0) = 15$ м.

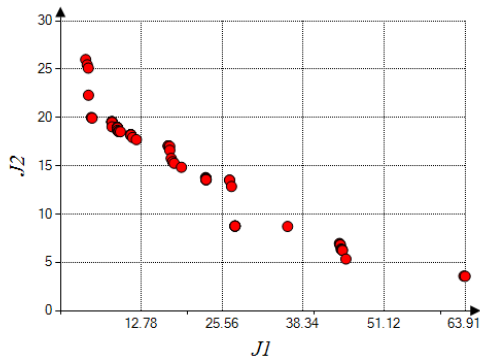


Рисунок 3. Множество Парето

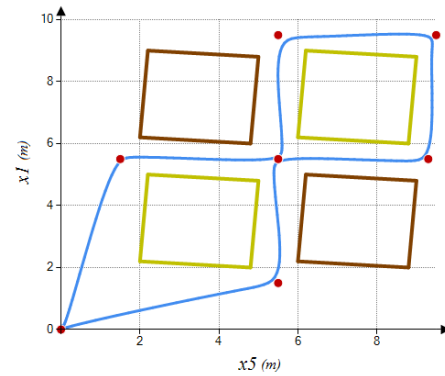


Рисунок 4. Проекция траектории на горизонтальную плоскость

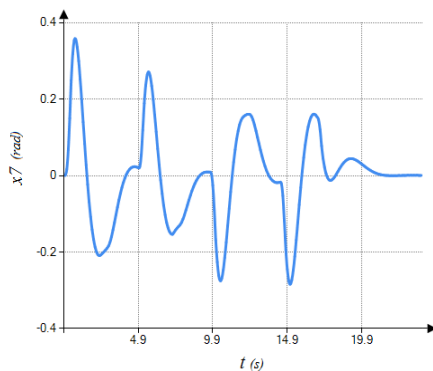


Рисунок 5. Изменение угла крена x_7

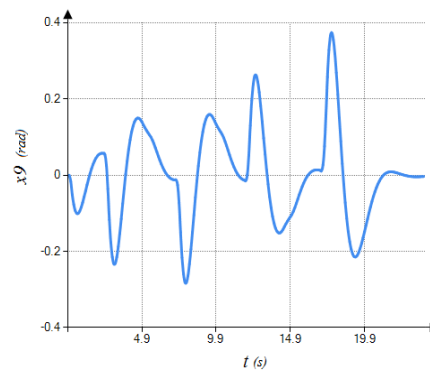


Рисунок 6. Изменение угла тангажа x_9

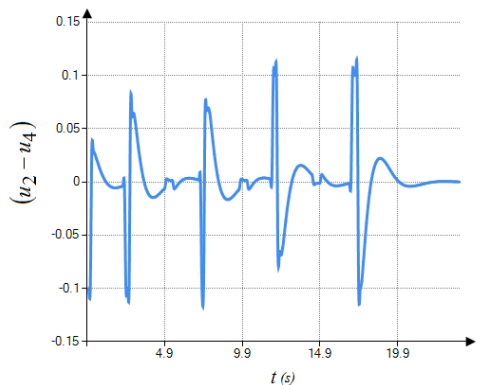


Рисунок 7. Изменение управления $(u_2 - u_4)$

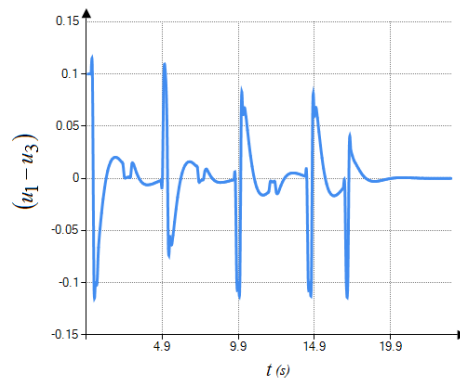


Рисунок 8. Изменение управления $(u_1 - u_3)$

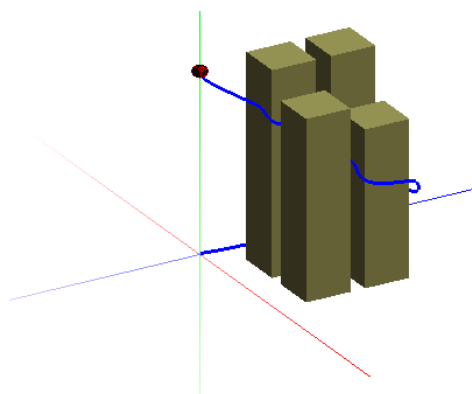


Рисунок 9. Исходное положение объекта управления

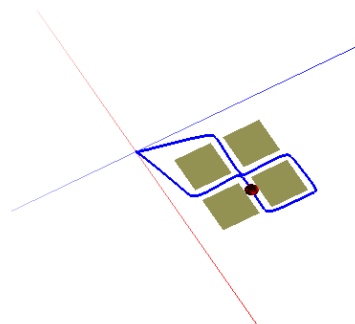


Рисунок 10. Вид сверху

Заключение

По результатам моделирования видно достаточно точное движение квадротора по заданным точкам траектории. Прохождение всей траектории составило 24 с., при этом квадротор не задел область препятствий.

Литература

- [1] Дивеев А. И. Метод сетевого оператора.— М. : Изд-во ВЦ РАН, 2010.
- [2] Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. Многокритериальный структурно-параметрический синтез системы управления спуском космического аппарата на основе метода сетевого оператора // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования (информационные технологии и управление). 2008. № 4. С. 86–93.

- [3] Дивеев А. И., Северцев Н. А., Софронова Е. А. Синтез системы управления метеорологической ракетой методом генетического программирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 5. С. 104–108.
- [4] Дивеев А. И., Северцев Н. А. Метод сетевого оператора для синтеза системы управления спуском космического аппарата при неопределенных начальных условиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 3. С. 85–91.
- [5] Diveyev A. I., Sofronova E. A. Application of network operator method for synthesis of optimal structure and parameters of automatic control system // Proc. of 17th IFAC World Congress. Seoul, 2008, P. 6106–6113.
- [6] Дивеев А. И., Софронова Е. А. Идентификация системы логического вывода методом сетевого оператора // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2010. № 4. С. 51–58.
- [7] Дивеев А.И. Синтез адаптивной системы управления методом сетевого оператора // Сб. статей: Вопросы теории безопасности и устойчивости систем.— М. : ВЦ РАН, 2010. Вып. 12. С. 41–55.
- [8] Atencia Villagomez J. M., Diveev A. I., Sofronova E. A. The Network Operator Method for Synthesis of Intelligent Control System // 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).— Singapore, 2012. P. 174–179. (doi: 10.1109/ICIEA.2012.6360718)
- [9] Никульчев Е. В. Многокритериальные системы принятия решений для задач управления // Автоматизация в промышленности. 2005. № 7. С. 45–46.

Авторы:

Хосе Мигель Атиенсия Вильягомес, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры кибернетики и мехатроники, Российский университет дружбы народов

Асхат Ибрагимович Дивеев, доктор технических наук, профессор, зав. сектором специальных кибернетических проблем Вычислительного центра им. А. А. Дородницына РАН

Network Operator Method for the Synthesis of the Intelligent Control System of the Dynamic Object

Jose Miguel Atencia Villagomez¹, Askhat Diveev^{1, 2}

¹Cybernetics and mechatronics department
Peoples' Friendship University of Russia
Ordjonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

²Dorodnicyn Computer Center of Russian Academy of Sciences
Vavilov str., 40, Moscow, Russia, 119333

e-mail: ose_mav@yahoo.es, aidiveev@mail.ru

Abstract. Application of the network operator method for the synthesis of the intelligent control system of the dynamic object. The flying robot of type quadrotor is considered as a dynamic object. For the synthesis were used two network operators, logical – for the synthesis of logic control unit and the ordinary arithmetic operator – for the synthesis of stabilizing system relative to the point of spatial trajectory.

There is given an example of the synthesis of the intelligent control traffic of the quadrotor in the neighborhood of the spatial trajectory constructed taking into account obstacles.

Key words: Intelligent system control, network operator, quadrotor.

Reference

- [1] Diveev A. I. (2010) Metod setevogo operatora. Moscow, VC RAN. (rus)
- [2] Diveev A. I., Shmalko E. J. (2008) Mnogokriterialnyj strukturno-parametricheskij sintez sistemy upravlenija spuskom kosmicheskogo apparata na os-nove metoda setevogo operatora. *Vestnik RUDN. Serija inzhenernye issledovanija (informacionnye tehnologii i upravlenie)*, 4, 86–93. (rus)
- [3] Diveev A. I., Severcev N. A., Sofronova E. A. (2008) Sintez sistemy upravlenija meteorologicheskij raketnoj metodom geneticheskogo programirovanija. *Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin*, 5, 104–108. (rus)
- [4] Diveev A. I., Severcev N. A. (2009) Metod setevogo operatora dlja sinteza sistemy upravlenija spuskom kosmicheskogo apparata pri neopredelennyh nachalnyh usloviyah. *Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin*, 3, 85–91. (rus)
- [5] Diveev A. I., Sofronova E. A. (2008) Application of network operator method for synthesis of optimal structure and parameters of automatic control system. *Proc. of 17-th IFAC World Congress*. Seoul, p. 6106–6113.
- [6] Diveev A. I., Sofronova E. A. (2010) Identifikacija sistemy logicheskogo vyvoda metodom setevogo operatora. *Vestnik RUDN. Serija Inzhenernye issledovanija*, 4, 51–58. (rus)

- [7] *Diveev A. I. (2010) Sintez adaptivnoj sistemy upravlenija metodom setevogo operatora, In.: Voprosy teorii bezopasnosti i ustojchivosti sistem. Moscow, VC RAN, p. 41–55. (rus)*
- [8] *Atienza Villagomez J. M., Diveev A. I., Sofronova E. A. (2012) The Network Operator Method for Synthesis of Intelligent Control System. 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapore, p. 174–179. (doi: 10.1109/ICIEA.2012.6360718)*
- [9] *Nikulchev E. V. (2005) Mnogokriterialnye sistemy prinjatija reshenij dlja zadach upravlenija. Avtomatizacija v promyshlennosti, 7, 45–46. (rus)*

УДК 681.518

Оценка качества моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора

Л. А. Демидова

*Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1
e-mail: liliya.demidova@rambler.ru*

Аннотация. Предложен подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора. Показана целесообразность одновременного учета значений средней относительной ошибки прогнозирования и показателя несовпадения тенденций при оценке качества моделей прогнозирования, определяемых при реализации модифицированного алгоритма клонального отбора с использованием аналитических зависимостей, формируемых на основе строго бинарных деревьев.

Ключевые слова: временной ряд, модель прогнозирования, строго бинарное дерево, модифицированный алгоритм клонального отбора, средняя относительная ошибка прогнозирования, показатель несовпадения тенденций, аффинитет.

1. Введение

Анализ временных рядов (ВР), описывающих процессы с короткой актуальной частью (порядка 20–30 значений), играет важную роль при решении многих практических задач, например, при решении задач, связанных с прогнозированием различных социально-экономических процессов. При этом все чаще при разработке моделей прогнозирования ВР с короткой актуальной частью (коротких ВР) используются различные технологии искусственного интеллекта, применение которых позволяет обеспечить получение адекватных оценок возможных изменений в поведении ВР на основе их известных значений и принятие соответствующих управленческих решений [1–9].

Одной из современных технологий, которая может быть использована при разработке моделей прогнозирования коротких ВР, является технология, реализующая применение искусственных иммунных систем (ИИС), основанных на принципах естественной иммунной системы и хорошо зарекомендовавших себя при решении широкого спектра прикладных задач [1, 10, 11]. Эффективность использования ап-

парата ИИС, в частности, алгоритма клонального отбора и механизмов супрессии антител при решении задач интерполяции, экстраполяции и прогнозирования, доказанная в работах зарубежных исследователей [10], подтверждает перспективность применения ИИС для решения задачи прогнозирования коротких ВР.

Успешный опыт использования моделей прогнозирования ВР, определяемых с применением аналитических зависимостей, формируемых на основе строго бинарных деревьев (СБД), полученных при реализации модифицированного алгоритма клонального отбора (МАКО), для прогнозирования социально-экономических процессов свидетельствует о целесообразности проведения дальнейших разработок в данном направлении [5–8].

Обычно качество моделей прогнозирования коротких ВР оценивается с применением какого-либо одного показателя, например, с применением средней относительной ошибки прогнозирования, значение которой должно быть минимизировано [1–8, 12, 13]. В то же время для коротких ВР может быть выполнен расчет и других показателей качества моделей прогнозирования, таких как коэффициент детерминации, среднеквадратическая ошибка прогнозирования, минимальное и максимальное значения ошибки прогнозирования, коэффициент несовпадения тенденций и т. п. [14–16]. Задача одновременного учета значений таких показателей при оценке качества модели прогнозирования представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, которая с той или иной долей успеха может быть решена только высококвалифицированным экспертом-аналитиком.

Однако одновременный учет даже каких-либо двух показателей качества моделей прогнозирования обеспечил бы существенное повышение точности прогнозирования коротких ВР. В частности, учет, наряду со значением средней относительной ошибки прогнозирования значения показателя несовпадения тенденций, позволил бы исключить из рассмотрения модели прогнозирования, имеющие малые значения средней относительной ошибки прогнозирования, но при этом характеризующиеся большими значениями показателя несовпадения тенденций.

Так как при реализации МАКО для оценки качества моделей прогнозирования на основе СБД с целью отбора «лучшей» модели применяется традиционный подход, основанный на минимизации значения средней относительной ошибки прогнозирования [5–8], то можно говорить об актуальности разработки нового подхода к оценке качества моделей прогнозирования на основе СБД, который позволил бы обеспечить одновременный учет значений средней относительной ошибки прогнозирования и показателя несовпадения тенденций.

2. Прогнозирование на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора

Для решения задачи прогнозирования коротких ВР $d(t)$ в [1, 5–8] предлагается использовать модели прогнозирования k -го порядка, получаемые при реализа-

ции МАКО, который позволяет при приемлемых временных затратах сформировать на основе СБД аналитическую зависимость, наилучшим образом описывающую известные значения ВР и обеспечивающую получение минимального значения аффинитета Aff (affinity) — средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ (Average Forecasting Error Rate):

$$AFER = \frac{\sum_{t=k+1}^m |(f(t) - d(t))/d(t)|}{m - k} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $f(t)$ и $d(t)$ — предсказанное и реальное значения ВР для t -го отсчета времени; m — количество значений ВР (количество отсчетов времени).

При этом возможные варианты аналитических зависимостей кодируются в виде антител Ab , которые должны осуществлять распознавание антигенов Ag — известных значений ВР. В качестве «лучшего» антитела выбирается антитело Ab , обеспечивающее минимальное значение аффинитета Aff [1, 5–8].

Антитело Ab представляет собой символьную строку, элементы которой выбираются из трех предварительно заданных символьных алфавитов [5–8]:

- алфавита арифметических операций $Operation = \{ '+', '-', '*', '/' \}$, т. е. операций сложения, вычитания, умножения и деления;
- алфавита функционалов $Functional = \{ 'S', 'C', 'Q', 'L', 'E', '_' \}$, в котором символы $'S', 'C', 'Q', 'L', 'E'$ соответствуют математическим функциям «синус», «косинус», «квадратный корень», «натуральный логарифм», «экспонента», а символ $'_'$ определяет отсутствие какой-либо математической функции;
- алфавита терминалов $Terminal = \{ 'a', 'b', \dots, 'z', '@' \}$, в котором символ $'@'$ определяет некоторую константу, а символы $'a', 'b', \dots, 'z'$ соответствуют аргументам искомой аналитической функции.

Предполагается, что арифметические операции являются двухместными, а применение функционала должно предшествовать применению арифметической операции [5, 6].

Применение трех символьных алфавитов обеспечивает при реализации МАКО корректное преобразование в аналитические зависимости случайным образом формируемых антител, структура которых может быть описана с помощью СБД [5–8], примеры которых приведены на рис. 1, где рядом с узлами показаны значения их уровней. При использовании почти полных СБД (ППСБД) [6, 8] (см. рис. 1б) удается сформировать более сложные аналитические зависимости, чем в случае применения просто СБД (см. рис. 1а) [5, 7], и, как следствие, обеспечить получение меньших значений средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ [4].

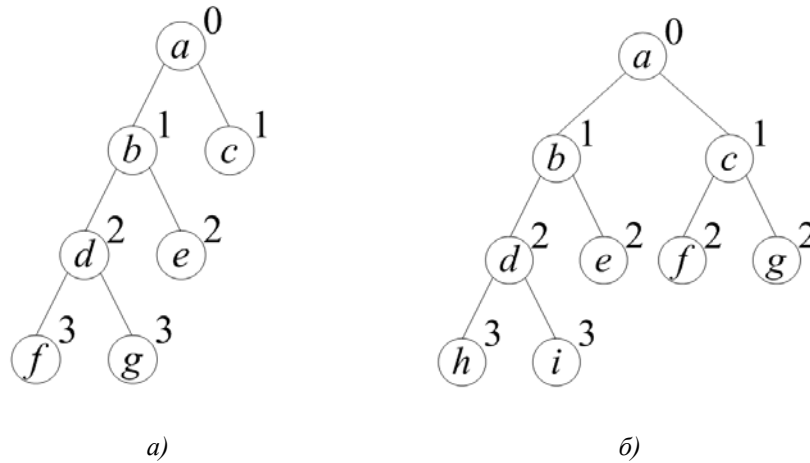


Рисунок 1. Примеры бинарных деревьев:
а) строгое бинарное дерево; б) почти полное строгое бинарное дерево

Количество терминальных позиций $Term$ в антители определяется максимально возможным порядком модели прогнозирования [5–8]. Если максимально возможный порядок равен K , то это означает, что при прогнозировании значения ВР $d(t)$ на момент времени t могут использоваться K значений ВР: $d(t-K)$, ..., $d(t-2)$, $d(t-1)$. При этом реальный и максимальный порядки модели прогнозирования k и K соответственно удовлетворяют условию: $k \leq K$ (ввиду возможного кратного вхождения некоторых терминальных символов в запись аналитической зависимости и возможного наличия константы).

Для антители на основе СБД (см. рис. 1а) при формировании аналитических зависимостей произвольного максимального возможного порядка K может быть использована рекурсивная процедура интерпретирования антители [6], заключающаяся в рекурсивном преобразовании СБД в символьную строку посредством последовательной записи всех узлов, начиная слева направо и снизу вверх. Терминальные узлы (листья) СБД могут содержать только символы из алфавита терминалов $Terminal$, а остальные узлы формируются из символов алфавита арифметических операций $Operation$ и алфавита функционалов $Functional$. При этом минимальный и максимальный номера позиций антители, в которых стоят терминальные символы, равны $2 \cdot Term$ и $4 \cdot Term - 2$ соответственно, а длина антители определяется максимальным номером позиции, в которой стоит терминальный символ.

Пример формирования антители на основе СБД для случая, когда $K = 3$ и алфавит терминалов имеет вид: $Terminal = \{ 'a', 'b', 'c', '@' \}$, приведен на рис. 2: в позициях 6, 8, 10 стоят символы из алфавита терминалов, в позициях 1, 3, 5, 7, 9 — из алфавита функционалов, а в позициях 2, 4 — из алфавита арифметических опера-

ций. Антитело Ab , сопоставляемое СБД, изображенному на рис. 2, и порожденная им аналитическая зависимость $F(b, c)$ имеют соответственно вид:

$$Ab = ('L' * 'C' - '_' '@' 'E' 'b' 'S' 'c');$$

$$F(b, c) = \ln(\cos(\sin(c) - \exp(b)) * const),$$

где $const$ — константа, соответствующая символу '@' и определяемая случайным образом.

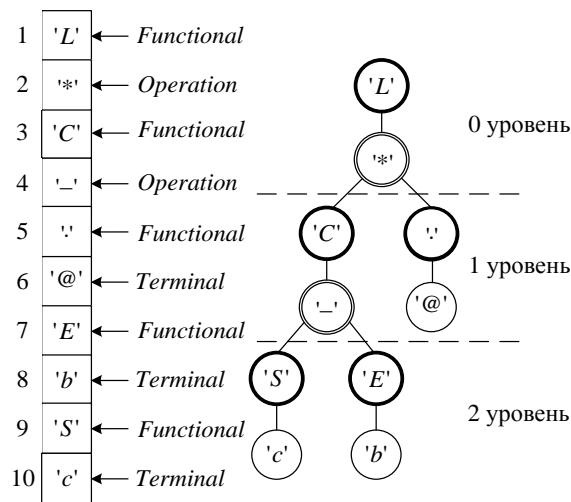


Рис. 2. Пример формирования антитела на основе СБД

Формирование антитела, соответствующего ППСБД (см. рис. 1б), должно осуществляться так, чтобы обеспечивать корректный результат интерпретирования антитела. В частности, для формирования антитела может использоваться [8]:

- способ, основанный на применении стандартного подхода к обходу вершин бинарного дерева и реализующий формирование упорядоченного списка символов, находящихся в вершинах ППСБД;
- способ, основанный на разбиении ППСБД на поддеревья и реализующий сначала с применением стандартного подхода к обходу вершин бинарного дерева для каждого поддерева формирование упорядоченных списков символов, находящихся в его вершинах, а затем — последовательное объединение этих списков.

В [8] показано, что применение при реализации МАКО способа формирования антител, основанного на разбиении ППСБД на поддеревья, обеспечивает минимизацию временных затрат на интерпретацию антител в аналитические зависимости. Для антител на основе ППСБД может быть использована рекурсивная процедура интерпретирования антител, но ее применение в этом случае имеет ряд особенностей [8]. Так как для антител на основе ППСБД максимально возможный поряд-

док K всегда является нечетным числом, то само ППСБД может быть представлено в виде композиции одного «левого» поддерева максимально возможного порядка $K_{\text{л}} = 3$ и некоторого количества n ($n \geq 1$) «правых» i -х ($i = \overline{1, n}$) поддеревьев максимально возможного порядка $K_{\text{п}}^i = 2$ ($K_{\text{л}} + \sum_{i=1}^n K_{\text{п}}^i = K$). Термин «правое» поддерево («левое» поддерево) используется для указания того, в какую ветвь (в правую или в левую) некоторого уровня ППСБД должно включаться новое поддерево.

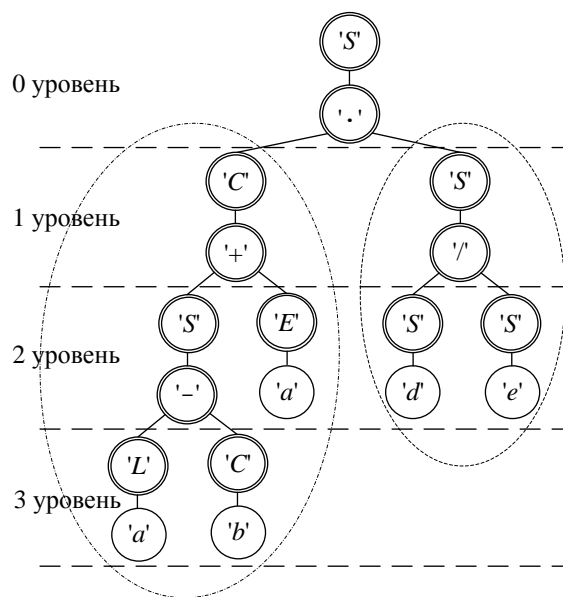


Рисунок 3. Пример ППСБД, используемого для формирования антитета

Количество терминальных позиций в «левом» и «правых» поддеревьях равно соответственно $Term_{\text{л}} = 3$ и $Term_{\text{п}}^i = 2$ ($i = \overline{1, n}$), а длина антитета равна $(4 \cdot Term_{\text{л}} - 2) + \sum_{i=1}^n (4 \cdot Term_{\text{п}}^i - 2) + 2 \cdot n$, т. е. $10 + 8 \cdot n$ [6, 8]. Процедура формирования антитета на основе ППСБД может быть реализована циклически в виде рекурсивного формирования частей антитета на основе соответствующих поддеревьев с последующей их композицией (слева направо и снизу вверх).

На рис. 3 приведен пример ППСБД для случая, когда $K = 5$ и алфавит терминалов имеет вид: $Terminal = \{ 'a', 'b', 'c', 'd', 'e', '@' \}$. Длина антитета в этом случае находится как сумма длин «левого» поддерева ($4 \cdot Term_{\text{л}} - 2 = 10$), «правого» поддерева ($4 \cdot Term_{\text{п}} - 2 = 6$) и количества символов композиции, равного 2, т. е. равна 18.

Обычно качество антителей и соответствующих им моделей прогнозирования, получаемых при реализации МАКО, оценивается по значению аффинитета Aff , в

роли которого выступает средняя относительная ошибка прогнозирования $AFER$ (1), которая должна быть минимизирована [5, 6, 8].

В то же время особое внимание при отборе «лучших» антител и соответствующих им моделей прогнозирования следует уделять анализу значений показателя несовпадения тенденций $Tendency$, который должен быть минимизирован:

$$Tendency = \frac{h}{m - k - 1}, \quad (2)$$

где h — количество отрицательных произведений $(f(t-1) - f(t)) \cdot (d(t-1) - d(t))$, при $t = \overline{k+2, m}$; $f(t)$ и $d(t)$ — предсказанное и реальное значения ВР для t -го отсчета времени; m — количество значений ВР (количество отсчетов времени); k — порядок модели; $(m - k - 1)$ — общее количество произведений $(f(t-1) - f(t)) \times (d(t-1) - d(t))$.

Для одновременного учета при оценке качества антител и соответствующих им моделей прогнозирования значения средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ и значения показателя несовпадения тенденций $Tendency$ предлагается вычислять аффинитет модели прогнозирования как:

$$Aff = AFER \cdot (1 + Tendency). \quad (3)$$

Представление формулы для вычисления аффинитета Aff в виде (3) позволит обеспечить при реализации МАКО совместную одновременную минимизацию значений средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ и показателя несовпадения тенденций $Tendency$.

Если для некоторой модели прогнозирования окажется, что $AFER = 0$, то этот факт будет свидетельствовать не только о том, значение средней относительной ошибки прогнозирования равно нулю, но и о полном совпадении тенденций ВР, при котором $Tendency = 0$. При этом значение аффинитета Aff , вычисленное по формуле (3), окажется минимально возможным. Если для некоторой модели прогнозирования окажется, что $Tendency = 0$, то этот факт будет свидетельствовать лишь о полном совпадении тенденций ВР. При этом значение средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ может оказаться существенно далеким от нулевого. В связи с этим при вычислении аффинитета Aff антитела в формуле (3) учет значения показателя несовпадения тенденций $Tendency$ реализован в виде множителя, представленного с помощью суммы $(1 + Tendency)$, что позволит при реализации МАКО в случае, когда $Tendency = 0$, продолжить поиск лучших вариантов моделей прогнозирования, имеющих меньшие значения средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$.

Модифицированный показатель несовпадения тенденций может быть записан как

$$Tendency^M = 1 + Tendency. \quad (4)$$

При реализации МАКО в ходе смены поколений предлагается считать, что антитело Ab_1 лучше антитела Ab_2 , если наряду с условием

$$Aff_1 < Aff_2, \quad (5)$$

выполняются условия:

$$AFER_1 \leq AFER_2 \text{ и } Tendency_1 < Tendency_2. \quad (6)$$

При использовании такого подхода при реализации МАКО в качестве «лучших» антител в новом поколении МАКО будут полагаться антитела, имеющие значение аффинитета Aff , не больше, чем у «лучшего» антитела предыдущего поколения МАКО, и, кроме того, характеризующиеся неувеличением значения показателя несовпадения тенденций $Tendency$ при одновременном неувеличении значения средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$.

Реализация МАКО для обоих описанных выше вариантов формирования антител (на основе просто СБД и ППСБД) осуществляется аналогичным образом. При реализации МАКО искомая аналитическая зависимость F кодируется в виде антитела Ab , которое должно обеспечивать распознавание антигенов Ag , т. е. элементов прогнозируемого ВР $d(t)$ ($t = \overline{1, m}$) таким образом, чтобы осуществлялась минимизация аффинитета Aff (3) при соблюдении условий (5) и (6).

МАКО включает в себя подготовительную и итерационную части [5, 6].

Целью подготовительной части МАКО является получение популяции случайным образом сформированных антител, «непохожих» друг на друга. В общем случае понятие «похожие» антитела предполагает совпадение некоторого количества символов в кодах сравниваемых антител. Процедура сравнения кодов двух антител, с использованием которой следует определять и уничтожать антитела, «похожие» на уже сформированные ранее, подробно описана в [6].

Пусть при сравнении кодов двух антител Ab_1 и Ab_2 количество совпадений пар символов не меньше, чем $S_d \leq S$, где S — длина антитела; S_d — порог самоуничтожения антитела (порог «естественной смерти»), определяющий количество совпадений при попарном сравнении символов в одинаковых позициях кодов антител, при котором антитело Ab_2 считается «похожим» на Ab_1 и должно быть уничтожено.

Начальная популяция размером P , сформированная с применением процедуры сравнения кодов антител при $S_d = S$, будет состоять из «непохожих» между собой антител. Одновременно с популяцией антител Ab формируется массив констант антител $Constant$, содержащий «значащие» константы, соответствующие символу '@' в коде антитела, и некоторые одинаковые «тривиальные» константы,

соответствующие терминальным символам, отличным от символа '@', в коде антитела. При этом количество строк в массиве констант антител *Constant* равно размеру популяции *P*, а количество столбцов равно максимально возможному порядку модели *K*.

Для обеспечения максимальной эффективности при использовании для вычисления аффинитета антител формулы (3), применяемой для совместной одновременной минимизации средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* и показателя несовпадения тенденций *Tendency*, предлагается при формировании начальной популяции антител, а также при генерации новых антител в ходе реализации МАКО рассмотреть еще одно условие, выполнение которого необходимо для признания случайным образом сгенерированного антитела «пригодным»: антитело считается «пригодным», если соответствующая ему модель прогнозирования обеспечивает совпадение менее половины тенденций ВР. В этом случае при реализации МАКО можно гарантировать, что в процессе смены поколений не увеличатся (и даже уменьшатся) как значение показателя несовпадения тенденций *Tendency*, так и значение средней относительной ошибки прогнозирования *AFER*. При этом удастся избежать скачков значений показателя несовпадения тенденций *Tendency*, как это было, когда при оценке аффинитета антител использовалась только средняя относительная ошибка прогнозирования *AFER* (1).

Далее более подробно рассмотрены шаги, выполняемые при реализации итерационной части МАКО [6].

Шаг 1. *Вычисление аффинитета и упорядочение антител.* Аффинитет *Aff* для каждого антитела вычисляется в соответствии с формулой (3), в которую подставляются данные имеющегося ВР $d(t)$ и значения $f(t)$, полученные с использованием аналитической зависимости F , определяемой этим антителом.

Так как некоторые математические функции не всегда могут быть применены к операндам, задаваемым в случайно сформированных антителах, то для исключения таких антител из популяции и поддержания ее «жизнеспособности» предлагается присваивать им максимально возможное значение аффинитета *Aff*, равное 200, которое будет соответствовать максимально возможному значению средней относительной ошибки прогнозирования $AFER = 100\%$ при полном несовпадении тенденций ВР: $Tendency = 1$.

При упорядочении антител по возрастанию аффинитета «лучшие» антитела *Ab*, имеющие меньшие значения аффинитета *Aff*, будут располагаться в начале списка упорядочения антител.

Вычисление аффинитета *Aff* для всех антител *Ab* реализуется только в первом поколении МАКО, в других поколениях вычисление аффинитета *Aff* реализуется лишь для добавленных новых антител [6].

Шаг 2. *Отбор и клонирование «лучших» антител.* Пусть pq — доля антител в популяции, подлежащих клонированию. Тогда количество «лучших» антител,

находящихся в начале списка и подлежащих клонированию, может быть вычислено по формуле [6]

$$Clone = round(pq \cdot P), \quad (7)$$

где $round(\cdot)$ — функция округления вещественного числа к ближайшему целому числу.

Количество клонов $W(i)$ для каждого i -го антитела Ab_i ($i = \overline{1, Clone}$) является уникальным и зависит от его аффинитета Aff_i : чем меньше аффинитет, тем большее количество клонов генерируется:

$$W(i) = round(Q \cdot P/i), \quad (8)$$

где Q — коэффициент размножения клонов, представляющий собой некоторое целое число (обычно $1 \leq Q \leq 30$).

Для антитела, содержащего в своих позициях хотя бы одну константу, предлагается производить дополнительную генерацию еще $W(i)$ клонов, чтобы предусмотреть большее количество вариантов констант в записи искомой аналитической зависимости.

Вместе с популяцией клонов Cl создается массив констант клонов $ClConstant$, при этом производится дублирование соответствующих строк из массива констант антител $Constant$.

Пусть общее количество полученных клонов Cl антител равно ClP .

Шаг 3. Гипермутация клонов антител. При реализации МАКО производится гипермутация символов в некоторых позициях «лучших» антител, выбранных для клонирования. Вероятность изменения каждого символа антитела задается с помощью коэффициента мутации pm , значение которого вычисляется для каждой генерации на основе двух величин: коэффициента гипермутации pgm и скорости гипермутации $pgmV$ ($pgm < 1$, $pgmV < 1$) [6].

Для первого поколения антител коэффициент мутации pm принимается равным pgm : $pm = pgm$. Далее в каждом следующем поколении значение коэффициента мутации pm уменьшается до некоторого порогового значения $pmMin$ (например, $pmMin = 0.1$) со скоростью $pgmV$: $pm = pm \cdot pgmV$. Если в некотором поколении оказывается, что $pm < pmMin$, то коэффициент мутации pm опять полагается равным $pm = pgm$.

Процедура гипермутации символов в клоне Cl антитела Ab производится следующим образом. Для каждого j -го символа клона Cl генерируется случайное вещественное равномерно распределенное число r_j из отрезка $[0, 1]$. Если выполняется условие $r_j \leq pm$, то реализуется мутация j -го символа клона Cl , при этом новый символ выбирается случайным образом из алфавитов арифметических операций, функционалов и терминалов (в зависимости от того, какому алфавиту при-

надлежит j -й символ), в противном случае, если выполняется условие $r_j \leq pm$, j -й символ не изменяется.

Если в процессе мутации символа в j -й позиции i -го клона ($i = \overline{1, ClP}$) производится замена «значащего» терминального символа на символ '@' (или замена символа '@' на символ '@'), то в массиве констант клонов $ClConstant$ в i -й строке выполняется замена соответствующей «значащей» (или «тривиальной») константы на новое случайно сгенерированное вещественное число $randConstant = Min + r \cdot Max$, где Min и Max — соответственно минимально и максимально возможные значения вещественной константы, задаваемые с учетом диапазона изменения значений BP , r — случайное вещественное равномерно распределенное число из отрезка $[0, 1]$. Если в процессе мутации символа в j -й позиции i -го клона ($i = \overline{1, ClP}$) производится замена символа '@' на «значащий» терминальный символ, то в массиве констант клонов $ClConstant$ в i -й строке выполняется замена соответствующей «значащей» константы на «тривиальную» константу [6].

Шаг 4. Самоуничтожение клонов антител. В популяции клонов Cl размером ClP , полученной в результате клонирования антител и их гипермутации, с применением рассмотренной выше процедуры сравнения кодов двух антител производится поэтапное выявление и удаление «похожих» клонов [6].

Первый этап самоуничтожения клонов Cl выполняется над исходной популяцией клонов размером ClP , при этом выполняется сравнение кодов клонов Cl между собой при заданном пороге самоуничтожения S_a (процедура сравнения «клон-клон» $Cl - Cl$) и уничтожение «похожих» клонов. Пусть размер популяции клонов Cl , полученной в результате первого этапа самоуничтожения клонов, равен $ClClP$.

На втором этапе самоуничтожения клонов Cl производится сравнение клонов Cl , оставшихся после применения процедуры $Cl - Cl$, с антителами Ab текущей популяции антител (процедура сравнения «клон-антитело» $Cl - Ab$) и уничтожаются клоны Cl , коды которых «похожи» на коды антител Ab . Пусть размер популяции клонов Cl , полученной в результате второго этапа самоуничтожения клонов, равен $ClAbP$.

Одновременно с удалением «похожих» клонов выполняется и удаление соответствующих им строк в массиве констант клонов $ClConstant$.

Шаг 5. Вычисление аффинитета клонов антител. Для популяции клонов Cl , полученной в результате самоуничтожения «похожих» клонов, вычисляются значения аффинитета Aff клонов [6].

Шаг 6. Формирование новой популяции антител. Текущая популяция антител размером P объединяется с популяцией клонов Cl размером $ClAbP$ и создается расширенная популяция антител размером $P + ClAbP$, которая упорядочивается по

возрастанию значений аффинитета Aff антител. Затем из расширенной популяции антител размером $P + ClAbP$ удаляются антитела с наибольшими значениями аффинитета Aff в количестве $ClAbP$, что в итоге дает новую популяцию антител с тем же размером P , что и исходная популяция антител [6].

Шаг 7. Супрессия популяции антител. Для антител популяции размером P вычисляется среднее значение аффинитета \overline{Aff} и выполняется процедура супрессии, позволяющая удалить из популяции часть антител, у которых значение аффинитета ниже порогового значения $S_s \cdot \overline{Aff}$, где S_s — коэффициент супрессии антител (например, $S_s = 0.98$), и поддержать таким образом максимально возможное разнообразие антител в популяции при одновременном сохранении в ней «лучшего» антитела с минимальным значением аффинитета Aff_{min} [6].

Пусть размер популяции антител, полученной в результате выполнения процедуры супрессии, равен AbP .

Шаг 8. Генерация новых антител и добавление их к текущей популяции антител. Если после выполнения процедуры супрессии выполняется условие $AbP < P$, то реализуется генерация новых случайным образом формируемых антител («непохожих» на уже имеющиеся антитела текущей популяции) в количестве $P - AbP$ и их добавление к популяции антител размером AbP . При формировании новых антител выполняется сравнение кодов антител между собой при заданном пороге самоуничтожения S_d (процедура сравнения «антитело-антитело» $Ab - Ab$) и уничтожение «похожих» антител [6].

Шаг 9. Проверка условия окончания МАКО. Проверка условия окончания МАКО осуществляется по количеству текущих поколений g . Если номер текущего поколения g равен заданному максимальному количеству поколений G , то работа МАКО завершается. В противном случае, если $g < G$, номер текущего поколения g увеличивается на единицу и осуществляется переход к шагу 1 итерационной части МАКО для реализации следующего поколения [6].

Экспериментальные исследования. Предлагаемый подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе СБД, реализующий оценку аффинитета антител с помощью формулы (3) при соблюдении условий (5) и (6), был использован при реализации МАКО в ходе решения задач прогнозирования тенденций рынка труда в России, в частности, для прогнозирования ВР, описывающего «экономически активное население» (в тыс. чел.). Кроме того, было выполнено построение моделей прогнозирования на основе СБД и МАКО с применением традиционно используемой для оценки аффинитета антител средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ (1). Программная реализация моделей прогнозирования была осуществлена в среде MATLAB R2012b.

При разработке моделей прогнозирования использовались 18 известных значений ВР $d(t)$ ($t = \overline{1, 18}$) с февраля 1999 года по август 2003 года для отсчетов време-

ни по месяцам: февраль, май, август и ноябрь [2], а оценка качества прогнозирования выполнялась для трех значений ВР (ноябрь 2003 года, февраль 2004 года и май 2004 года), т. е. на три шага вперед.

На рис. 4 приведены результаты прогнозирования на основе модели 4-го порядка, полученной при использовании предлагаемого (по формуле (3)) подхода к оценке качества моделей прогнозирования в процессе смены 2000 поколений антител.

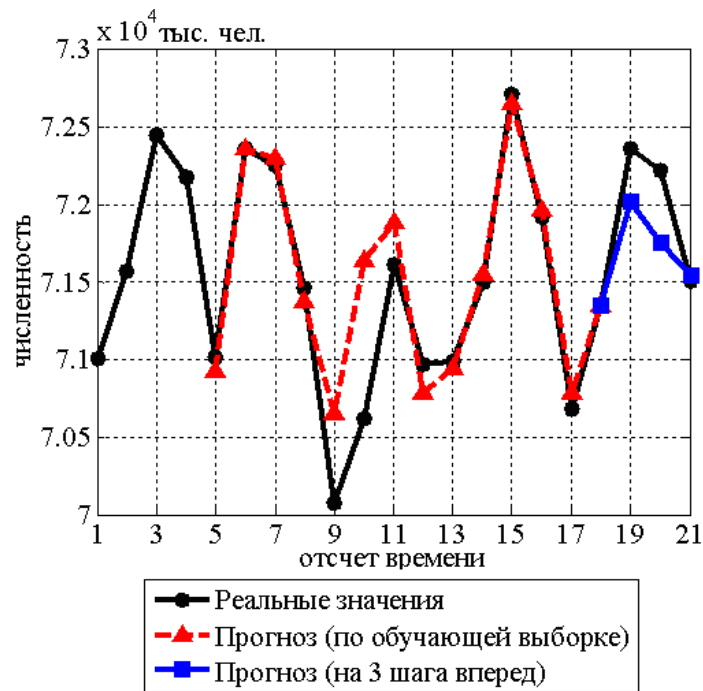


Рисунок 4. Результаты прогнозирования

Значения средних относительных ошибок прогнозирования $AFER$ и на три шага вперед составили соответственно 0.261 и 0.389, количество несовпадающих тенденций равно 0, как для 13 тенденций, используемых при построении модели прогнозирования, так и для тенденций при прогнозировании на три шага вперед, что свидетельствует о применимости разработанной модели для выполнения краткосрочного прогнозирования данного ВР.

При этом «лучшее» антитело имеет вид

$$+_ * S - Q * Q / C - _ cQ @ SfSdCgCfSc,$$

а аналитическая зависимость, определяющая модель прогнозирования 4-го порядка, записывается, соответственно, как

$$F(d(t-1), d(t-2), d(t-3), d(t-4)) = \sin(\sqrt{\sqrt{\cos(\sin(d(t-4))) - \cos(d(t-2))}} / \cos(d(t-1))) \cdot \sin(d(t-3)) - \sin(d(t-2)) \cdot \sqrt{1071900} + d(t-4).$$

Аналогичные результаты прогнозирования для рассматриваемого примера могут быть получены и при использовании традиционного (по формуле (1)) подхода к оценке качества моделей прогнозирования, однако их получение может сопровождаться хаотичными изменениями значений показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2), поскольку поиск будет вестись только в направлении убывания значений средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1). Использование предлагаемого подхода в ходе смены поколений МАКО позволяет сузить область поиска искомого решения.

Поскольку использование МАКО не гарантирует нахождение оптимальной модели прогнозирования, то особое внимание должно уделяться вопросу признания модели прогнозирования в качестве «приемлемой» («субоптимальной»).

На рис. 5 и 6 приведены, соответственно, графические зависимости для средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и модифицированного показателя несовпадения тенденций *Tendency^M* (4), а также для количества ошибочных тенденций «лучшего» антитела, полученные при использовании предлагаемого (по формуле (3)) подхода к оценке качества моделей прогнозирования в процессе смены 1000 поколений одной реализации МАКО.

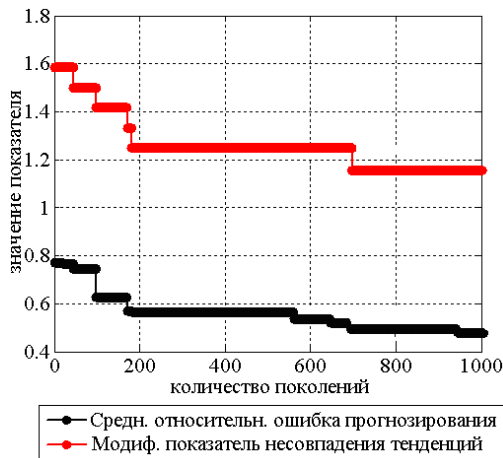


Рисунок 5. Графические зависимости для показателей оценивания качества моделей прогнозирования при использовании предлагаемого подхода

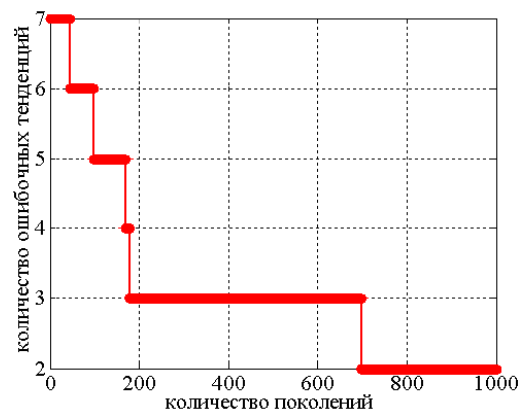


Рисунок 6. Графическая зависимость для количества ошибочно спрогнозированных тенденций при использовании предлагаемого подхода к оценке качества моделей прогнозирования

На рис. 7 и 8 приведены соответственно графические зависимости для средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и модифицированного показателя несовпадения тенденций *Tendency^M* (4), а также для количества ошибочных тенденций «лучшего» антитела, полученные при использовании традиционного (по

формуле (1)) подхода к оценке качества моделей прогнозирования в процессе смены 1000 поколений одной реализации МАКО.

В ходе реализации МАКО при использовании предлагаемого подхода к оценке качества моделей прогнозирования наблюдается, как видно из рис. 5 и 6, постепенное уменьшение значений показателя $Tendency^M$ и количества несовпадения тенденций «лучшего» антитела, в то время как при использовании традиционного подхода к оценке качества моделей прогнозирования возможно скачкообразное то уменьшение, то увеличение значений показателя $Tendency^M$ и количества несовпадения тенденций «лучшего» антитела (рис. 7 и 8). При этом в обоих случаях наблюдается постепенное уменьшение значений средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ «лучшего» антитела.

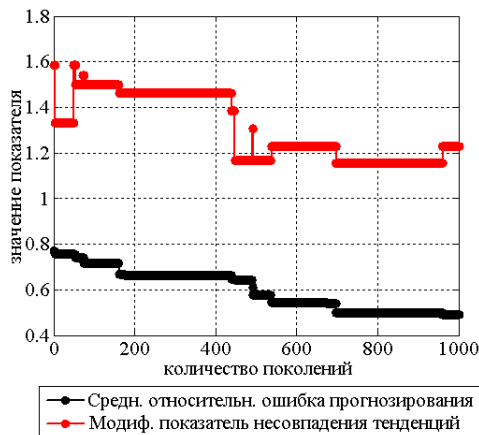


Рисунок 7. Графические зависимости для показателей оценивания качества моделей прогнозирования при использовании предлагаемого подхода

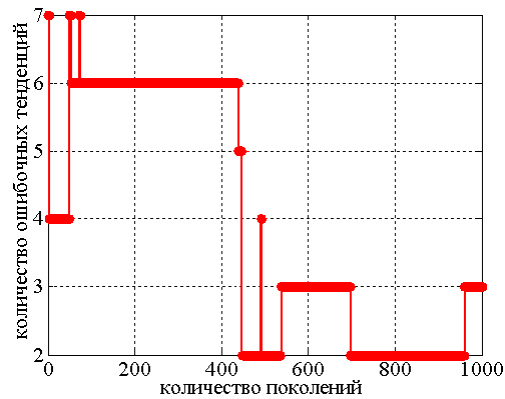


Рисунок 8. Графическая зависимость для количества ошибочно спрогнозированных тенденций при использовании традиционного подхода к оценке качества моделей прогнозирования

На рис. 9 приведены дополнительные примеры, демонстрирующие графические зависимости для значений средней относительной ошибки прогнозирования $AFER$ (1) и модифицированного показателя несовпадения тенденций $Tendency^M$ (4) при использовании традиционного (по формуле (1)) подхода к оценке качества моделей прогнозирования в процессе смены 1000 поколений для различных реализаций МАКО. При этом рисунки, пронумерованные как I-а и I-б, II-а и II-б, III-а и III-б, IV-а и IV-б, соответствуют одной реализации МАКО.

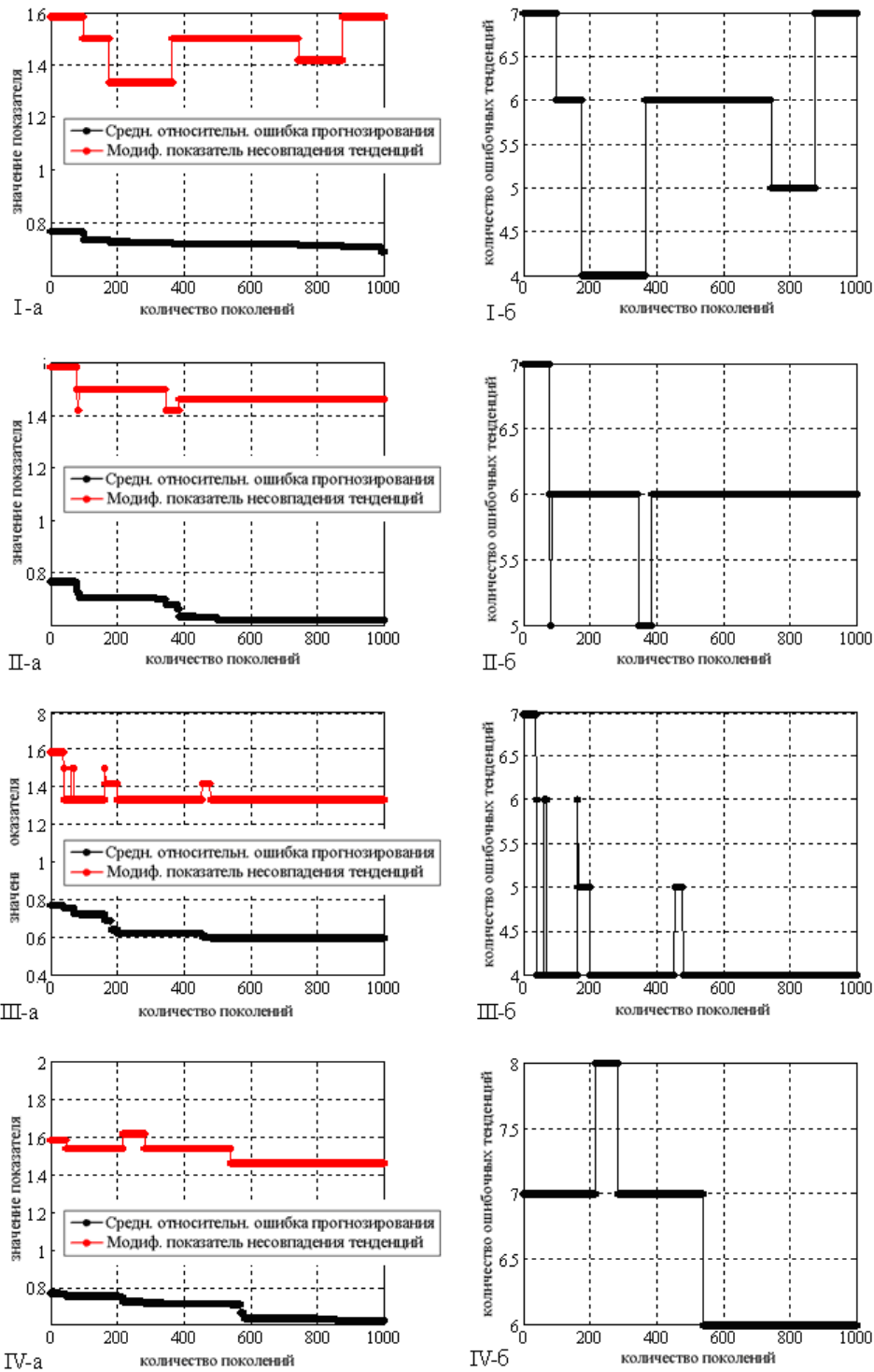


Рисунок 9. Графические зависимости для показателей оценивания

Следует отметить, что величина показателя несовпадений тенденций *Tendency* (см. рис. 5, 7 и 9 (I-а, II-а, III-а, IV-а)) определяется не только количеством ошибочно спрогнозированных тенденций (см. рис. 6, 8 и 9 (I-б, II-б, III-б, IV-б)), но и порядком модели прогнозирования k , что отражено в формуле (2). При этом в ходе смены поколений МАКО уменьшение величины показателя несовпадений тенденций *Tendency* (2) может происходить не только за счет уменьшения количества ошибочно спрогнозированных тенденций, но и за счет уменьшения порядка модели прогнозирования k . Данный факт хорошо продемонстрирован на рис. 9 (IV-а и IV-б) на интервале от 0 до 200 поколений.

Как показывает анализ, при применении традиционного подхода к оценке качества моделей прогнозирования «приемлемой» моделью может быть признана та, которая обладает меньшим значением средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1), но при этом «плохим» значением показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2).

Использование предлагаемого подхода к оценке качества моделей прогнозирования позволит сбалансировать значения средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2). При этом удастся в ходе смены поколений МАКО исключать из дальнейшего рассмотрения антитела (и соответствующие им модели прогнозирования) с худшими значениями показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2), поскольку в процессе смены поколений МАКО для антител будет запрещено увеличение значения показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2).

3. Заключение

Предлагаемый подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе СБД с применением МАКО обеспечивает совместный одновременный учет «лучших» значений средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2), позволяя при реализации МАКО исключить из рассмотрения модели прогнозирования, характеризующиеся большими значениями показателя несовпадения тенденций *Tendency*, и сузить область поиска искомого решения.

Модели прогнозирования на основе СБД и МАКО позволяют существенно сократить время подбора аналитической зависимости, наилучшим образом (с точки зрения одновременной минимизации средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* и показателя несовпадения тенденций *Tendency*) описывающей известные значения коротких ВР, и могут быть рекомендованы для решения задач краткосрочного прогнозирования (на 1–3 шага вперед).

Подход к оценке качества моделей прогнозирования, реализующий совместный одновременный учет «лучших» значений средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2), мо-

жет быть использован при разработке моделей прогнозирования, предполагающих применение тех или иных эволюционных алгоритмов, например, при разработке нечетких моделей прогнозирования с использованием генетических алгоритмов [2–4, 12, 13].

Литература

- [1] Бидюк П. И., Баклан И. В., Литвиненко В. И., Фефелов А. А. Алгоритм клонального отбора для прогнозирования нестационарных динамических систем // Штучний інтелект. 2004. № 4. С. 89–99.
- [2] Демидова Л. А. Разработка однофакторных нечетких моделей для анализа тенденций временных рядов с использованием генетического алгоритма // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. № 52(2). С. 156–164.
- [3] Демидова Л. А. Прогнозирование тенденций временных рядов на основе однофакторной нечеткой модели с использованием дискретных нечетких множеств второго типа и генетического алгоритма // Бизнес-информатика. 2008. № 4 (6). С. 46–53.
- [4] Демидова Л. А., Скворцова Т. С. Двухфакторная модель прогнозирования временных рядов с короткой длиной актуальной части с использованием генетического алгоритма // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 31. С. 7–12.
- [5] Демидова Л. А., Корячко А. В., Скворцова Т. С. Модифицированный алгоритм клонального отбора для анализа временных рядов с короткой длиной актуальной части // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т. 42. № 4.1. С. 131–136.
- [6] Демидова Л. А. Модели прогнозирования временных рядов с короткой актуальной частью на основе модифицированного алгоритма клонального отбора // Вестник РГРТУ. 2012. № 39–2. С. 64–71.
- [7] Демидова Л. А., Пылькин А. Н., Скворцов С. В., Скворцова Т. С. Гибридные модели прогнозирования коротких временных рядов.— М. : Горячая линия–Телеком, 2012.
- [8] Астахова Н. Н., Демидова Л. А. Использование почти полных строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора при разработке моделей прогнозирования временных рядов с короткой актуальной частью // Вестник РГРТУ. 2013. № 4-2 (46). С. 89–96.
- [9] Кравец О. Я. Перспективные подходы к исследованию технологий менеджмента в сложных системах управления // Экономика и менеджмент систем управления. 2014. Т. 1. № 1 (11). С. 093–100.
- [10] Искусственные иммунные системы и их применение / под ред. Д. Дасгупты. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006.

- [11] Демидова Л. А., Титов С. Б. Исследование влияния основных параметров алгоритма функционирования искусственной иммунной сети на качество кластеризации объектов // Вестник РГРТУ. 2012. № 40. С. 54–60.
- [12] Chen S. M. Forecasting enrollments based on high-order fuzzy time series // Cybernetic Systems. 2002. Vol. 33. № 1. P. 1–16. (doi: 10.1080/019697202753306479)
- [13] Hwang J.-R., Chen S.-M., Lee C.-H. Handling forecasting problems using fuzzy time series // Fuzzy Sets and Systems. 1998. Vol. 100. No. 1–3. P. 217–228. (doi: 10.1016/S0165-0114(97)00121-8)
- [14] Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. — М. : Юнити, 1998.
- [15] Белов В. В. Проблемы факторного прогнозирования социально-экономических показателей // Вестник МГУПИ. 2005. № 2. С. 116.
- [16] Терехов А. А. Идентификация статистического материала и консолидация временных рядов // Вестник РГРТУ. 2009. № 27. С. 62–70.

Автор:

Демидова Лилия Анатольевна — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета.

Assessment of the Quality Prediction Models Based of the Strict on Binary Trees and the Modified Clonal Selection Algorithm

Liliya A. Demidova

Ryazan state radio engineering university
390005, Gagarina Str, 59/1. Ryazan, Russia.
E-mail: liliya.demidova@rambler.ru

Abstract. Approach to quality estimation of forecasting models on the base of strict binary trees with application of modified clonal selection algorithm is offered. The expediency of values' simultaneous accounting of average forecasting error rate and tendencies' discrepancy indicator during modified clonal selection algorithm realization for quality estimation of forecasting models, defined by means of analytical dependences, formed on the base of strict binary trees, is shown.

Key words: time series; forecasting model; strictly binary tree; modified clonal selection algorithm; average forecasting error rate; tendencies' discrepancy indicator; affinity.

Reference

- [1] Bidjuk P. I., Baklan I. V., Litvinenko V. I., Fefelov A. A. (2004) Algoritm klonalnogo otbora dlja prognozirovaniya nestacionarnyh dinamicheskikh system. *Shtuchnij intellekt*, 4, 89–99. (rus)
- [2] Demidova L. A. (2007) Razrabotka odnofaktornyh nechetkih modelej dlja analiza tendencij vremennyh rjadov s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*, 52(2), 156–164. (rus)
- [3] Demidova L. A. (2008) Prognozirovanie tendencij vremennyh rjadov na osnove odnofaktornoj nechetkoj modeli s ispol'zovaniem diskretnyh nechetkih mnozhestv vtorogo tipa i geneticheskogo algoritma. *Biznes-informatika*, 4, 46–53. (rus)
- [4] Demidova L. A., Skvorcova T. S. (2010) Dvuhfaktornaja model prognozirovaniya vremennyh rjadov s korotkoj dlinoj aktualnoj chasti s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*, 31, 7–12. (rus)
- [5] Demidova L. A., Korjachko A. V., Skvorcova T. S. (2010) Modificirovannyj algoritm klonalnogo otbora dlja analiza vremennyh rjadov s korotkoj dlinoj aktualnoj chasti. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*, 42–1, 131–136. (rus)
- [6] Demidova L. A. (2012) Modeli prognozirovaniya vremennyh rjadov s korotkoj aktualnoj chastju na osnove modificirovannogo algoritma klonalnogo otbora, *Vestnik RGRTU*, 39–2, 64–71. (rus)
- [7] Demidova L. A., Pylkin A. N., Skvorcov S. V., Skvorcova T. S. (2012) Gibrnidnye modeli prognozirovaniya korotkih vremennyh rjadov. Moscow, Gorjachaja linija–Telekom. (rus)

- [8] *Astahova N. N., Demidova L. A.* (2013) Ispolzovanie pochni polnyh strogo binarnyh derevev i modifitsirovannogo algoritma klonalnogo otbora pri razrabotke modelej prognozirovaniya vremennyh rjadov s korotkoj aktualnoj chastju. *Vestnik RGRTU*, 4–2(46), 89–96. (rus)
- [9] *Kravec O. J.* (2014) Perspektivnye podhody k issledovaniju tehnologij menedzhmenta v slozhnyh sistemah upravlenija. *Jekonomika i menedzhment sistem upravlenija*, 1(11), 093–100. (rus)
- [10] *Dasgupty D.* (Ed.) (2006) *Iskusstvennye immunnnye sistemy i ih primenenie*. Moscow, FIZMATLIT. (rus)
- [11] *Demidova L. A., Titov S. B.* (2012) Issledovanie vlijanija osnovnyh parametrov algoritma funkcionirovaniya iskusstvennoj immunnnoj seti na kachestvo klasterizacii obektov. *Vestnik RGRTU*, 40, 54–60. (rus)
- [12] *Chen S. M.* (2002) Forecasting enrollments based on high-order fuzzy time series. *Cyber-netic Systems*, 33(1), 1–16. (doi: 10.1080/019697202753306479)
- [13] *Hwang J.-R., Chen S.-M., Lee C.-H.* (1998) Handling forecasting problems using fuzzy time series. *Fuzzy Sets and Systems*, 100(1–3), 217–228. (doi: 10.1016/S0165-0114(97)00121-8)
- [14] *Ajvazjan S. A., Mhitarjan V. S.* (1998) *Prikladnaja statistika i osnovy jekonometriki*. Moscow, Juniti. (rus)
- [15] *Belov V. V.* (2005) Problemy faktornogo prognozirovaniya social'no-jekonomicheskikh pokazatelej. *Vestnik MGUPI*, 2, 116.
- [16] *Terehov A. A.* (2009) Identifikacija statisticheskogo materiala i konsolidacija vremennyh rjadov. *Vestnik RGRTU*, 27, 62–70.

УДК 519.618

Иерархия регуляторов в задачах управления пространственным движением летательными аппаратами

Т. А. Мотиенко^{1, 2}

¹Технологический институт
Южного федерального университета в г. Таганроге
347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44

²Московский технологический институт,
119334, Москва, Ленинский проспект, 38А,
e-mail: tatyana@motienko.ru

Аннотация. Рассмотрен иерархический подход к формированию законов управления пространственным движением летательными аппаратами на основе нелинейных математических моделей. Приведен алгоритм иерархического разбиения задачи синтеза законов управления летательными аппаратами на три уровня. На верхнем уровне синтезируются базовые законы управления. На втором, промежуточном уровне, с помощью известных алгебраических уравнений связи, описывающих зависимость между обобщенными векторами сил и моментов сил и аэродинамическими коэффициентами и углами управления управляющих поверхностей для летательного аппарата определенной аэродинамической схемы, продемонстрирована технология конструирования законов управления «среднего уровня» на основе базовых обобщенных законов «верхнего уровня». Законы «среднего уровня» могут быть использованы в качестве установок для локальных систем управления приводами исполнительных механизмов летательных аппаратов.

Ключевые слова: синтез систем управления, иерархический подход, системы управления летательными аппаратами.

1. Иерархическая структура математических моделей движения летательных аппаратов

При решении задач синтеза законов управления столь сложными объектами, как летательные аппараты (ЛА), неизбежно приходится прибегать к различным видам допущений и упрощений или же декомпозировать исходную задачу на более простые подзадачи. При этом основной проблемой подобного подхода будет адекватный выбор такого рода допущений и упрощений, чтобы сконструированная на их основе математическая модель объекта могла с достаточной степенью точности

описывать поведение исследуемого объекта. В таких случаях часто прибегают к таким видам декомпозиции, как [1–3]:

- структурная, или объектная декомпозиция, в результате которой из исходной системы выделяются простые подсистемы, рассмотрение которых в отдельности может считаться допустимым при тех или иных условиях;
- функциональная, или же задачно-ориентированная декомпозиция, в результате которой возможно разбиение начальной задачи на частные задачи, взаимосвязанные между собой;
- временная декомпозиция, при осуществлении которой рассматриваются отдельные режимы работы исходной системы.

При анализе сложных систем наиболее часто используется именно первый тип декомпозиции, и в результате в полной мере проявляются общеизвестные недостатки традиционных методов синтеза нелинейных систем управления. Применительно к задачам, связанным с движением ЛА, структурная декомпозиция часто подразумевает отделение изолированных каналов управления, например, канал управления углом крена, канал поддержания вертикальной скорости полета и т. д. Такой тип декомпозиции допускает пренебрежение столь важными внутренними перекрестными связями между действующими каналами управления, а также линеаризацию исходной математической модели системы. Подобные «упрощения» помогают описать наиболее подробно все блоки, которые входят в контуры управления, но при синтезе векторных регуляторов использование наиболее полной нелинейной модели высокого порядка, описывающей все возможные технические средства управления полетом, приводит неизбежно к избыточному усложнению процедуры синтеза, а сам вид законов управления весьма сложен для технической реализации. Помимо этого, такой подход сам по себе не подразумевает универсальность и возможность дальнейшей модернизации, так как полученные результаты будут жестко связаны с каждым конкретным рассматриваемым ЛА.

Использование функциональной и временной декомпозиции может позволить создать более гибкие законы управления. Временная декомпозиция помогает выделить цели и приоритеты для определенных режимов работы, а задачно-ориентированная декомпозиция применяется при следующей иерархии управления движением ЛА [4] (рис. 1).

1. Нахождение законов изменения обобщенных сил и моментов. При этом полученные на верхнем уровне иерархии законы будут базовыми для всего класса подвижных объектов различных аэродинамических компоновок. На этом этапе ЛА рассматривается в пространстве просто как твердое тело.

2. На среднем уровне иерархии, в соответствии с компоновочной схемой, для каждого конкретного ЛА находятся законы, которые описывают зависимости отклонения рабочих органов управления в зависимости от конкретных поставленных задач. Полученные на этом уровне иерархии законы будут, в свою очередь, задающими воздействиями для исполнительных механизмов ЛА.

3. На нижнем уровне иерархии локальные регуляторы формируют управляющие команды для электрических, гидравлических и пневматических приводов рулевых машинок, реализующих отклонения управляющих поверхностей ЛА.



Рисунок 1. Функциональная декомпозиция задачи синтеза законов управления пространственным движением ЛА

Отдельно стоит отметить тот факт, что описанный выше вариант задачно-ориентированной декомпозиции в полной мере соответствует принципам «внутренних» и «внешних» управлений в рамках метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов [5]. Помимо этого, при использовании подобной декомпозиции рассматриваемые задачи управления движением ЛА в целом дополняются правилами взаимодействия отдельных подсистем, а также естественными ограничениями на управления, которые могут быть наложены на нижнем уровне иерархии на локальные регуляторы [6].

2. Процедура иерархического синтеза систем управления ЛА

Подобная методика построения иерархических систем управления движением ЛА основывается на принципах взаимосвязи уровней иерархии. Здесь на верхних уровнях системы происходит формирование решений, направленных, прежде всего, на достижение поставленных задач управления.

Эти задачи формируются в виде определенных требований к подсистемам нижнего уровня иерархии, где регуляторы, в свою очередь, формируют программы управления для электрических, гидравлических и пневматических приводов рулевых машинок. При этом учет остаточной динамики приводов, которые входят в подсистему нижнего уровня, существенно повышает эффективность и точность синтезируемой системы в целом. В самом общем случае методику построения по-

добной иерархической системы управления движением ЛА можно описать следующим образом.

Пусть поведение подсистем верхнего уровня описывается уравнениями вида

$$S_N : \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(x)x + B(x)D + H(x, f)f; \\ y &= C(x)x, \end{aligned}$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояния подсистем верхнего уровня; $y \in \mathbb{R}^n$ — вектор выхода; $D \in \mathbb{R}^{N-1}$ — вектор заданного угла отклонения рулевой поверхности для подсистем приводов; $f \in \mathbb{R}^9$ — вектор возмущающих сил; $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $H(x, f)$ — функциональные матрицы состояния, входа, выхода и возмущения.

Поведение каждой из подсистем приводов может быть описано в виде

$$S_j : \begin{aligned} \dot{z}(t) &= R(z)z + P(z)u + SM_j; \\ D_j &= d(z)z; \quad j = \overline{1, N-1}, \end{aligned}$$

где $z \in \mathbb{R}^{k-1}$ — вектор состояния j -й подсистемы приводов; D_j — выходная переменная (угол) j -й подсистемы приводов; $u \in \mathbb{R}^{k_j}$ — вектор управляющих воздействий j -й подсистемы; M_j — статический момент нагрузки; R и P — матрицы состояния входа и выхода.

На данном этапе синтеза сложной системы важно правильно определить множество целей для подсистем нижнего уровня. В эти цели должны входить технологические инварианты, направленные на обеспечение выполнения конечной цели управления, а также инварианты, задающие исполнение в синтезируемых системах управления подобъектами S_i , ($i = \overline{1, N-1}$), необходимых соотношений. При этом размерность подмножества Σ_j не должна превышать размерность вектора управления соответствующей подсистемы S_i , ($i = \overline{1, N-1}$).

Основываясь на сформированные подмножества, можно ввести совокупность инвариантных многообразий $\psi = 0$, которые должны удовлетворять решению однородных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{d\psi}{dt} + I\psi = 0.$$

При этом матрица I такова, что решение $\psi = 0$ является асимптотически устойчивым.

При попадании изображающей точки S_i , ($i = \overline{1, N-1}$) в окрестность пересечения многообразий вида $\psi = 0$ поведение подобъектов будет описываться декомпозированными системами уравнений более низкого порядка, так называемых уравнениями остаточной динамики:

$$\begin{aligned} S_j : \frac{\hat{z}}{dt} &= \hat{R}(\hat{z}, \varphi)\hat{z} + \hat{S}\hat{M}_j; \\ D_j &= d(\hat{z}, \varphi)\hat{z}; \quad j = \overline{1, N-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где φ — задающее воздействие для j -й подсистемы.

Декомпозированная модель приводов будет иметь пониженную размерность вектора, причем уравнение состояния можно записать в виде

$$\hat{z} = [\delta, \omega]^T,$$

где δ — угол поворота; ω — угловая частота.

Тогда декомпозированную модель объекта (1) удобнее будет записать в виде

$$\begin{aligned} S_j : \frac{d\delta_j}{dt} &= \omega_j; \\ \frac{d\omega_j}{dt} &= \hat{r}(\omega_j, \delta_j)\omega_j + \hat{s}M_j; \quad j = \overline{1, N-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения для моментов воздействия от подсистемы приводов будут выражать зависимость от угловых скоростей:

$$\frac{d\omega_j}{dt} = a(x)x + b(x)M_j + h(x, f)f.$$

Выразив из (2) момент статической нагрузки M_j , ($j = \overline{1, N-1}$) и подставив вместо соответствующего вектора $M = [M_1, M_2, \dots, M_{N-1}]^T$, получим

$$\frac{d\omega_j}{dt} = \hat{a}(x, \varphi) + h(x, f)f.$$

В этом случае расширенную модель подсистемы верхнего уровня записать как

$$\begin{aligned} S_N : \frac{dx}{dt} &= \hat{A}(x, \varphi) + H(x, f)f; \\ y &= C(x)x. \end{aligned} \quad (3)$$

Отдельно стоит отметить тот факт, что выражение (3) описывает поведение не только для подсистем регуляторов верхнего уровня, но и для подсистем приводов во всей области притяжения локальных аттракторов.

Далее при синтезе регуляторов верхнего уровня важно определить множество целей Σ_N , на основе которых будет вводиться совокупность многообразий $\psi = 0$, которые удовлетворяют решению дифференциальных уравнений вида

$$\frac{d\psi}{dt} + I\varphi = 0.$$

Матрица I такова, что решение $\psi = 0$ является асимптотически устойчивым.

В результате синтеза иерархической системы управления ЛА находятся уравнения регуляторов-исполнителей вида

$$u = u(z, \varphi), \quad j = \overline{1, N-1},$$

которые вырабатывают подмножество целей Σ_j , ($j = \overline{1, N-1}$) для подсистем нижнего уровня и обеспечивают подмножества решений Δ_j , ($j = \overline{1, N-1}$).

Помимо этого формируется координирующий регулятор

$$\varphi = \varphi(x),$$

который вырабатывает подмножество решений Δ_N , направленных на достижение подмножества целей Σ_N .

3. Заключение

Разработанная обобщенная методика построения иерархической системы управления движением ЛА показывает, что на верхних уровнях иерархической системы происходит формирование совокупности решений, направленных на достижение поставленной задачи управления. Эти задания формируются в виде требований к подсистемам нижнего уровня, где регуляторы формируют программы управления для электрических, гидравлических и пневматических приводов рулевых машинок, реализующие заданные отклонения управляющих поверхностей. Учет остаточной динамики приводов, входящих в подсистему нижнего уровня, существенно повышает эффективность синтезируемой системы в целом.

Литература

- [1] Буков В. Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. — М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
- [2] Nikylchev E. V., Kozlov O. V. Identification of Structural Model for Chaotic Systems // Journal of Modern Physics. 2013. Vol. 4. No. 10. P. 1381–1392. (doi: 10.4236/jmp.2013.410166).
- [3] Никульчев Е. В. Идентификация динамических систем на основе симметрий реконструированных аттракторов. — М. : МГУП, 2010.
- [4] Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. — СПб. : Наука, 2000.
- [5] Веселов Г. Е. Иерархическое управление многосвязными динамическими системами: синергетический подход. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.
- [6] Колесников А. А., Мушенико А. С. Синергетическое управление процессами пространственного движения летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 2. С. 38–45.

Автор: Мотиенко Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и автоматизации Московского технологического института

Hierarchy of the throttles in problems of the aircrafts' spatial motion control

T. A. Motienko

*Southern Federal University, Taganrog Institute of Technological
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia*

*Moscow Technological Institute,
38A, Leninckiy pr., Moscow, 119334
e-mail: tatyana@motienko.ru*

Abstract. In the paper we explore the hierarchical approach to aircraft motion, co-related control design, based on nonlinear mathematical model of rigid body motion. We provide the algorithm of deriving the design procedure into three stages. The top level provides the basic control laws. By using of known algebraic coupling equations describing dependence between united vector of forces and moments of forces and aerodynamic coefficients and control surface deflection angles for special aircrafts, we present the technique of control law design for middle-level control based on universal united control laws of top-level. The middle level laws may be used as desired values for local automation systems for aircraft actuators control.

Keywords: synthesis of control systems, hierarchical approach, the system upravleniya flying apparat

Reference

- [1] Bukov V. N. (1987) *Adaptivnye prognozirujushhie sistemy upravlenija poletom.* Moscow, Nauka.
- [2] Nikulchev E. V., Kozlov O. V. (2013) Identification of Structural Model for Chaotic Systems. *J. of Modern Physics.* 4(10), 1381–1392. (doi: 10.4236/jmp.2013.410166)
- [3] Nikulchev E. V. (2010) *Identifikacija dinamicheskikh sistem na osnove simmetrij rekonstruirovannykh attraktorov.* Moscow. (rus)
- [4] Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. (2000) *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami.* St. Petersburg, Nauka.
- [5] Veselov G. E. (2003) *Ierarhicheskoe upravlenie mnogosvjaznymi dinamicheskimi sistemami: sinergeticheskij podhod.* Taganrog.
- [6] Kolesnikov A. A., Mushenko A. S. (2004) *Sinergeticheskoe upravlenie processami pro-stranstvennogo dvizhenija letatel'nyh apparatov.* *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2, 38–45.

УДК 004.942

Формализация временного ряда методом двойного сглаживания¹

В. Н. Петрушин^{1,2}, Г. О. Рытиков²

¹Финансовый университета при Правительстве РФ
125993, Москва, Ленинградский проспект, 49

²Московский государственный университет печати имени Ивана Федорова
127550, Москва, ул. Прянишникова, 2А,
e-mail: petrushinov@mail.ru; GR-yandex@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются актуальные вопросы моделирования динамики валового продукта социально-экономических систем, не в полной мере поддающихся типовым эконометрическим методам статистического анализа. Приводится пример соответствующего временного ряда и схема его анализа, излагается концепция метода двойного сглаживания, описывается его применения к рассматриваемому примеру и обсуждается возможность его применения к моделированию динамики некоторых процессов в организационных системах.

Ключевые слова: управление социально-экономическими системами, методы экономико-статистического и эконометрического анализа временных рядов, сглаживание временных рядов.

1. Введение

Основным звеном современной рыночной экономики является производственное предприятие — сложная социально-экономическая система с элементами самоорганизации, результаты хозяйственной деятельности которой являются потребляемыми общественными благами. Целью управления социально-экономическими (так называемыми организационными [1]) системами является повышение эффективности управленческой деятельности, обеспечивающее улучшение качества или степень доступности соответствующего общественного блага. Комплекс методов достижения этой цели включает в себя построение прогноза развития исследуемой системы в целом или отдельных ее компонент.

В редчайших случаях подобные предсказания могут быть построены на основании изученных ранее формализованных законов развития исследуемых систем, однако в основном они носят вероятностный характер и являются результатами анализа исследуемого процесса методами прикладной математической статисти-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13–07–00516).

ки [3–5]. Организационные системы априори страдают большей неопределенностью, чем системы технические, так как результат их деятельности зависит не только от технических решений, но и от антропогенных, природных, биологических факторов, влияние которых известно, в лучшем случае, оценочно. Более того, даже точное количество факторов, влияющих на социально-экономическую систему, неизвестно: часть из них может находиться в так называемом «спящем состоянии», т. е. не оказывать существенного влияния на производственный процесс в одних условиях, но становиться определяющими в случае значительных изменений каких-либо внешних условий.

При экономическом анализе производства основной интерес представляет исследование динамики валового продукта [2]. Целью данной работы является выработка некоторых самых общих рекомендаций по статистическому моделированию динамики валового продукта в случаях, когда применение типовых эконометрических методов [3] оказывается недостаточным.

Как известно, для обеспечения наилучшей управляемости производственными процессами желательно минимизировать влияние случайных антропогенных и природных факторов на производственные процессы. Важнейшим направлением в решении этой задачи является повышение уровня автоматизации производства. Однако полное исключение влияния некоторых факторов внешней среды зачастую оказывается невозможным или экономически нецелесообразным. Таким образом, возникает необходимость построения математических моделей, учитывающих изменчивость значений факторов внешней среды и обеспечивающих возможность получения количественных прогнозов результатов производственных процессов. Чем выше уровень понимания производственного процесса, тем более точная математическая модель может быть построена [см., например, 6, 7], и тем более высоким оказывается уровень управляемости соответствующим процессом. Таким образом, необходимо учитывать специфику выбранной для моделирования системы, хотя применяемые при моделировании математические методы могут быть стандартизованы [2, 8].

2. Метод двойного сглаживания для прогнозирования временных рядов

Исходной информацией для построения прогностических закономерностей обычно являются временные ряды, которые представлены в виде упорядоченного множества точек многомерного пространства $\{x_1, x_2, \dots, x_n, y\}$, где x_i — аргументы исследуемой функции y , ($i = \overline{1, n}$). Дополнительные сложности при моделировании организационных систем возникают из-за того, что даже количество аргументов, от которых зависит исследуемая функция, известно лишь приблизительно. В качестве исходных данных для демонстрации проблем применения стандартных методов прикладной статистики был использован временной ряд, полученный в 80-е годы прошлого столетия одним из авторов статьи в рамках моделирования урожайности

крупных садоводческих хозяйств средней полосы России [5, 10]. На основании обработки результатов экспериментов им был произведен анализ производственных процессов отдельных компонент рассматриваемой системы (садов) и изучена зависимость динамики суммарной урожайности садоводческого хозяйства от агрометеорологических условий при фиксированных значениях агрохимических, агрофизических и агротехнических факторов. Все численные значения урожайностей садов были предоставлены кафедрой плодоводства Мичуринского госагроуниверситета, а данные агрометеорологических наблюдений — Мичуринской агрометеостанцией. Аргументами функции урожайности в рассматриваемом случае являлись: x_1 — сумма среднесуточных температур воздуха за все время развития репродуктивных органов; x_2 — сумма среднесуточных температур почвы на глубине 20 см, являющейся верхней границей корнеобитаемого слоя; x_3 — сумма среднедекадных запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы; x_4 — продолжительность развития репродуктивных органов в сутках от срока закладки цветковых почек до съема плодов, исключая период перезимовки; x_5 — суммарный приход фотосинтетически активной радиации; x_6 — сумма среднесуточных относительных влажностей воздуха; x_7 — урожайность предшествующего года; x_8 — возраст сада в годах.

Известно [11], что выбор конкретной функции, описывающей зависимость урожайности от агрометеорологических факторов, основывается на наличии у любого растения оптимального режима внешней среды и симметричности производственного процесса яблони относительно оптимальных значений агрометеорологических параметров. Зависимость урожая следующего года от урожая предшествующего года представляет собой убывающую функцию, что обусловлено конкуренцией роста плодов в текущем году и развитием цветковых почек урожая следующего года. Скорость нарастания урожайности сада с его взрослением превышает скорость спада в процессе старения. По мере роста садов их влияние на собственный микроклимат усиливается, особенно при большой плотности насаждений [9], т. е. присутствует эффект сглаживания резких колебаний агрометеорологических показателей.

Исходя из вышесказанного и учитывая мультипликативность воздействия факторов, при формализации производственной функции в [10] была выбрана следующая зависимость:

$$y_n = Af_1(x_8)f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)f_3(x_7),$$

$$f_1 = \frac{(x_8 - 1)^\alpha}{1 + a \cdot (x_8 - D)^\beta};$$

$$f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \exp\left(-\sum_{i=1}^6 k_i \cdot (x_i - x_{i0})^2\right);$$

$$f_3(x_7 = y_{n-1}) = \exp(-k_7 \cdot x_7),$$

где y_n — урожай текущего года; $y_0 = 0$; x_{i_0} — оптимальное значение параметра, $i = \overline{1, 6}$; α, β, A, a, D — константы. Коэффициенты α, β, a, D вычислялись по трендовой кривой, критерием построения которой являлась минимизация дисперсии для выбранной формы задания последовательности.

Построение подобного рода зависимостей требует либо наблюдения «длинных» временных рядов, либо наблюдения ансамбля «сдвинутых» во времени друг относительно друга аналогичных процессов. В рассматриваемом примере присутствовал второй вариант — наличие данных по урожайности и агрометеоусловиям для садов разных лет посадки. Проверка оценочной функции производства валовой продукции сада на независимых экспериментальных данных с учетом микроклиматических поправок дала хорошее совпадение с экспериментальными данными в пределах статистических ошибок оценок средних [10].

Применение относительно современных информационных технологий позволяет построить приблизительное описание динамики значений производственной функции для крупных предприятий аналогичного генезиса при наличии меньшего количества информации об исследуемых процессах. Например, для рассмотренного выше примера ценой небольшой потери качества аппроксимации возможен статистический анализ временного ряда без прямого учета влияния агрометеорологических факторов.

Для построения статистической вероятностной модели процесса сначала необходимо выделить главные компоненты — факторы или их комбинации, оказывающие определяющее воздействие на целевую функцию. Для садоводческой проблематики главными компонентами, сильно влияющими на плодоношение, оказываются генетически заложенные зависимости урожайности яблони от ее возраста и урожая предшествующего года. В общем случае для объема продаж любого продукта, характеризующегося относительно стабильным потреблением, с существенной долей вероятности главными компонентами окажутся, соответственно, количество отчетных периодов с момента начала продаж и суммарный объем продаж за период, предшествующий отчетному.

Рассмотрим, соответственно, временной ряд фактических ежегодных урожайностей, наблюдавшихся в исследованиях [9;10], приведенные в табл. 1.

Следующим этапом является построение тренда. Как видно из анализа экспериментальных данных (рис. 1), непосредственное построение тренда часто не может дать положительных результатов (табл. 2) — значения коэффициентов детерминации недостаточны для того, чтобы модель могла применяться на практике ($R^2 < 0.8$).

В подобных случаях предлагается осуществить первичное сглаживание — перейти от моделирования динамики объема годового валового продукта к моделированию динамики суммарного объема валового продукта за все годы, начиная с первого года реализации продукта. Для рассмотренного примера урожайность сада не является монотонно возрастающей, она весьма переменчива, а суммарный урожай за время плодоношения представляет собой монотонно возрастающую последова-

тельность, которая к тому же имеет предел в силу конечности жизни любого биологического субъекта. Для произвольного предприятия накопительный объем продаж также является монотонно возрастающей последовательностью, а наличие предела связано с конечностью потребительского интереса к почти любому виду продукции и с конечностью времени существования любого предприятия.

**Динамика ежегодной урожайности исследуемого
экспериментального хрзяйства**

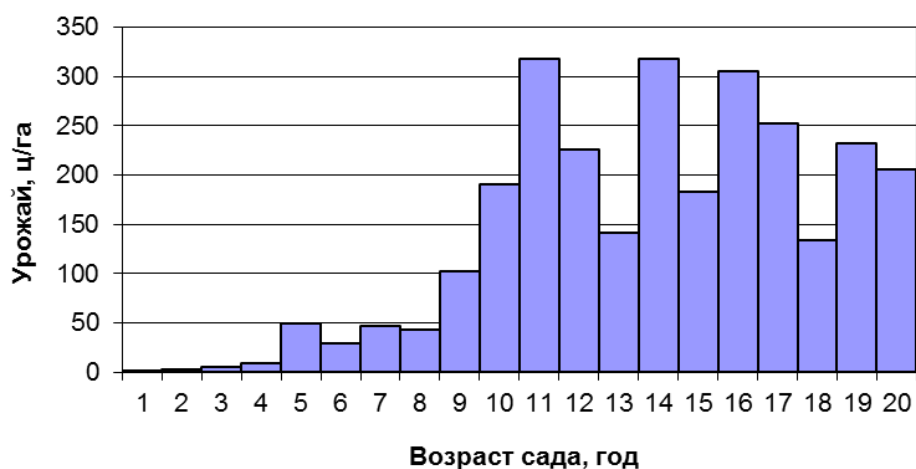


Рисунок 1. Динамика ежегодной урожайности

Таблица 1. Данные по ежегодной урожайности

<i>T</i> , год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>у_ф</i> , ц/га	1.7	2.9	5.2	8.5	49.1	29.1	46.6	43.3	101.6	190
<i>T</i> , год	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>у_ф</i> , ц/га	318.2	225.7	141.6	318.2	183.3	304.8	252.3	134	232.4	204.9

Таблица 2. Результаты аппроксимации ежегодной урожайности
типовыми трендами MS Excel

Название тренда	Формула	Коэффициент детерминации
Линейный	$y = 15.006x - 17.888$	0.6206
Квадратичный	$y = -0.9621x^2 + 35.21x - 91.973$	0.6879
Логарифмический	$y = 107.38 \ln(x) - 87.638$	0.5998
Экспоненциальный	$y = 5.4882e^{0.2386x}$	0.7313

Суммарная урожайность сада аппроксимируется и, следовательно, прогнозируется гораздо лучше (рис. 2, табл. 3).

Динамика накопительной урожайности
исследованного экспериментального хозяйства

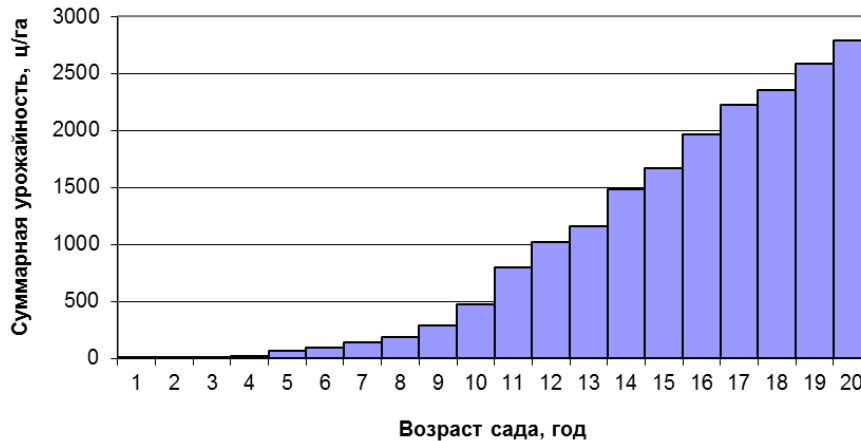


Рисунок 2. Динамика накопительной урожайности

Таблица 3. Результаты аппроксимации накопительной урожайности
типовыми трендами MS Excel

Название тренда	Формула	Коэффициент детерминации
Линейный	$y = 159.87x - 711.07$	0.9174
Квадратичный	$y = 8.7034x^2 - 22.898x - 40.907$	0.9891
Логарифмический	$y = 969.39\ln(x) - 1084.4$	0.6365
Экспоненциальный	$y = 5.9362e^{0.3651x}$	0.8926

Однако средняя относительная погрешность прогноза даже по лучшему из этих трендов (начиная с четвертого года наблюдений) составляет не менее 20%, в отличие от прогноза с учетом влияния агрометеорологических факторов, где средняя относительная погрешность прогноза, начиная со второго года наблюдения, не превышала 4%.

Для дальнейшего улучшения качества прогноза необходимо применить какую-либо из техник вторичного сглаживания. Пробная аппроксимация экспериментальных данных была произведена с помощью нескольких соответствующих нелинейных трендов с использованием программы Microcal Origin (<http://www.microcal.com>). Наилучшие результаты прогноза при допустимом снижении качества аппроксимации (средняя относительная погрешность прогноза ~6%, коэффициент детерминации $R^2 \sim 0,87$) были достигнуты с помощью обеспечивающей вторичное сглаживание, за счет операции

$$\sqrt[T]{y_T} = \sqrt[T]{\sum_{k=1}^T y_k},$$

показательно-степенной последовательности

$$y_T = \left(\frac{T^2 + A \cdot T + B}{T^2 + C \cdot T + D} \right)^T,$$

где y_T — суммарная урожайность сада возраста T за период времени T ; T — возраст насаждений в годах; A, B, C, D — коэффициенты, оцениваемые по экспериментальным данным стандартными эконометрическими методами.

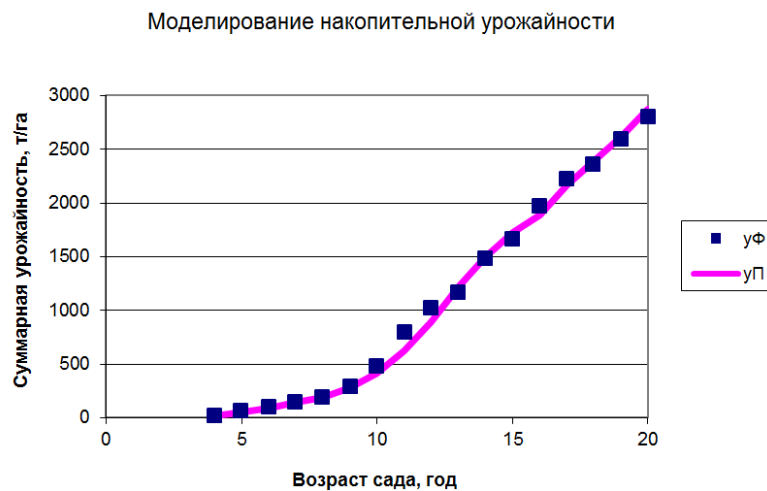


Рисунок 3. Моделирование накопительной урожайности

3. Заключение

За счет допустимого незначительного увеличения относительной погрешности прогноза (в данном случае с 4 до 6%) возможным оказывается прогнозирование урожайности без прямого учета агрометеорологических факторов (т. е. даже в условиях отсутствия штатной метеорологической службы). При этом качество полученной нелинейной статистической модели остается на уровне, обеспечивающем ее практическую применимость ($R^2 > 0.8$).

Яблоневый сад в данном случае является лишь примером, для которого осуществляется статистическое моделирование временных рядов. Производительность труда на конкретном рабочем месте, функция спроса потребителей промышленной продукции, количественно оцениваемый интерес населения к социальным явлениям, потребление человеком продовольствия, запросы на лекарства и т. д. обладают временными рядами, похожими на рассмотренный.

Первичное сглаживание (переход к интегральным характеристикам) позволяет применять для аппроксимации временных рядов монотонные функции или последовательности, хотя сам процесс монотонным не является. Ряд таких интегральных

характеристик заведомо обладает доминирующей главной компонентой, т. е. легко формализуется с помощью стандартных эконометрических методов, а повышение точности аппроксимации и прогноза может быть достигнуто с помощью процедур вторичного сглаживания («нелинейное» усреднение аппроксимируемых величин).

Литература

- [1] Бурков В. Н., Коргин Н. А., Новиков Д. А. Введение в теорию управления организационными системами.— М. : URSS, 2008.
- [2] Андреев М. Ю., Поспелов И. Г., Поспелова И. И., Хохлов М. А. Технология моделирования экономики и модель современной экономики России.— М. : МИФИ, 2007.
- [3] Елисеева И. И. Эконометрика.— М. : Финансы и статистика, 2003.
- [4] Голинков Ю. П. Экономико-математическое моделирование производственных систем полиграфии.— М. : МГУП, 2006.
- [5] Голинков Ю. П., Марголин Л. Н., Рудяк Ю. В. База данных эконометрического анализа книжного рынка // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2007. № 1. С. 181–189.
- [6] Рытикова А. М. Элементы моделирования металлографского формного процесса // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2007. № 2. С. 22–27.
- [7] Голинков Ю. П., Рудяк Ю. В. Оптимизация загрузки производственного оборудования // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2007. № 2. С. 111–116.
- [8] Александрова И. А., Гончаренко В. М., Денежкина И. Е., Киселев В. В., Набатова Д. С., Попов В. Ю., Шандра И. Г., Шаповал А. Б. Методы оптимальных решений в экономике и финансах.— М. : КНОРУС, 2013.
- [9] Чирков Ю. Н., Петрушин В. Н. // Метеорология и гидрология. 1987. № 8. С. 103–109.
- [10] Петрушин В. Н., Чирков Ю. Н. // Метеорология и гидрология. 1988. № 5. С. 103–111.
- [11] Потапов В. А., Завражнов А. И., Бобрович Л. В., Петрушин В. Н. Биометрия плодовых культур.— Мичуринск : МичГАУ, 2004.

Авторы:

Петрушин Владимир Николаевич — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Финансового университета при Правительстве России

Рытиков Георгий Олегович — кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики и моделирования систем Московского государственного университета печати имени Ивана Федорова

Double Smoothing in Time Series Formalization

V. N. Petrushin, G. O. Rytikov

Finance University under the Government of the Russian Federation,
49, Leningradsky avenue, Moscow, 125993

Moscow State University of printig atr,
2A, Prynishnikova st., Moscow, 127550

e-mail: petrushinon@mail.ru; GR-yandex@yandex.ru

Abstract. Relevant questions of social-economy systems, total product, non-trivial dynamics modeling are discussed. We give the description of the illustrative example and its analysis of typical procedures, and perform the concept of double smoothing and its application to organizational systems time series approximation.

Key words: social-economic systems management, methods of economic statistics, time series econometric analysis, time series smoothing.

Reference

- [1] *Burkov V. N., Korgin N. A., Novikov D. A. (2008) Vvedenie v teoriju upravlenija orga-nizacionnymi sistemami. Moscow, URSS. (rus)*
- [2] *Andreev M. J., Pospelov I. G., Pospelova I. I., Hohlov M. A. (2007) Tehnologija modelirovanija jekonomiki i model sovremennoj jekonomiki Rossii. Moscow, MIFI. (rus)*
- [3] *Eliseeva I. I. (2003) Jekonometrika. Moscow, Finansy i statistika. (rus)*
- [4] *Golinkov J. P. (2006) Jekonomiko-matematicheskoe modelirovanie proizvodstvennyh sistem poligrafii. Moscow: MGUP. (rus)*
- [5] *Golinkov J. P., Margolin L. N., Rudjak J. V. (2007) Baza dannyh jekonometricheskogo analiza knizhnogo rynka. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela, 1, 181–189. (rus)*
- [6] *Rytikova A. M. (2007) Jelementy modelirovanija metallografskogo formnogo processa. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela, 2, 22–27. (rus)*
- [7] *Golinkov J. P., Rudjak J. V. (2007) Optimizacija zagruzki proizvodstvennogo oborudovanija. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela, 2, 111–116. (rus)*
- [8] *Aleksandrova I. A., Goncharenko V. M., Denezhkina I. E., etc. (2013) Metody optimalnyh reshenij v jekonomike i finansah. Moscow, KNORUS. (rus)*
- [9] *Chirkov J. N., Petrushin V. N. (1987) Meteorologija i gidrologija, 8, 103–109. (rus)*
- [10] *Petrushin V. N., Chirkov J. N. (1988) Meteorologija i gidrologija, 5, 103–111. (rus)*
- [11] *Potapov V. A., Zavrazhnov A. I., Bobrovich L. V., Petrushin V. N. (2004) Biometrija plodovyh kultur. Michurinsk: MichGAU. (rus)*

УДК 519.714

Продукционный метод синтеза автоматических регуляторов непрерывно-дискретных систем управления¹

Г. Н. Рогачев

*Самарский государственный технический университет
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244,
e-mail: grogachev@mail.ru e-mail:*

Аннотация. Рассматривается применение продукционного метода в задачах синтеза гибридных непрерывно-дискретных систем управления. Предложен метод синтеза автоматических регуляторов систем управления, базирующийся на совместном использовании достаточных условий оптимальности и процедуры конечномерной оптимизации. Рассмотрены интеллектуальные методы синтеза продукционных моделей автоматических регуляторов с использованием эволюционных вычислений: генетического алгоритма и генетического программирования.

Ключевые слова: гибридная система управления, продукционный метод, задача синтеза, эволюционные вычисления.

1. Введение

В гибридных непрерывно-дискретных системах управления (ГНДСУ), 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. Задачи управления гибридными системам качественно сложнее аналогичных задач для непрерывных или дискретных систем ввиду целого ряда принципиальных особенностей гибридных систем, связанных с наличием в них существенным образом взаимодействующих непрерывных и дискретных подсистем, сочетанием непрерывной динамики управляемых процессов с дискретными процедурами получения информации о параметрах объекта, вычисления по этим данным управляющих воздействий и передачи их на исполнительные устройства. К такого рода особенностям прежде всего относятся:

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-08-00676) и Минобрнауки России в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «СамГТУ» (код проекта №1271).

- 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;
- необходимость учета комплекса шумовых составляющих сигналов в замкнутом контуре системы;
- существенное (часто определяющее) влияние характеристик и свойств информационных каналов и сетевых связей на формирование управляющих алгоритмов;
- возможности автоматического формирования и видоизменения в режиме реального времени алгоритмов управления на основе получаемой в процессе функционирования ГНДСУ рабочей информации о поведении системы и вытекающих отсюда требований к разработке вычислительных процедур, реализующих эти алгоритмы с требуемой динамикой;
- необходимость учета ограничений со стороны аппаратных средств.

Указанные задачи непосредственно относятся к сформулированной в Программе фундаментальных научных исследований Российской академии наук проблеме создания единой теории управления, вычислений и 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 синтеза гибридных непрерывно-дискретных систем управления. Метод базируется на рассмотренной в [1] 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 продукции (набора правил вида «условие-действие»), структура и содержание которой автоматически формируются в процессе поиска оптимальных решений. Рассмотрены продукционные методы синтеза автоматических регуляторов технических систем управления, базирующиеся на совместном использовании достаточных условий оптимальности и процедуры конечномерной оптимизации. Рассмотрены также интеллектуальные методы синтеза

продукционных моделей автоматических регуляторов с использованием генетического алгоритма и генетического программирования.

2. Общая характеристика предлагаемых методов синтеза регуляторов с продукционными алгоритмами функционирования

Известные методы формирования и использования продукционных вариантов описания регулятора (в частности, на основе четкой и нечеткой логики) не предполагают формирования алгоритма управления с учетом всего комплекса взаимосвязанных принципиальных особенностей, привносимых цифровым характером управляющих устройств, сетевым способом обмена информацией между ними и необходимостью построения вычислительной технологии с учетом указанных факторов. Кроме того, известные алгоритмы с фиксированной логикой не обеспечивают автоматического формирования алгоритма управления в темпе с управляемым процессом на основе рабочей информации о поведении объекта, получаемой по сигналам обратных связей.

Предложена постановка нового класса задач структурного и параметрического синтеза систем управления, отличающаяся тем, что алгоритм функционирования регулятора представлен в явной продукционной форме автоматически формируемых вычислительных операций, за счет чего обеспечивается учет принципиальных особенностей, привносимых цифровым характером устройств управления и сетевым способом обмена информацией между ними, а наполнение правил вида «условие-действие» работы регулятора и, возможно, их количество, подлежат определению в процессе синтеза.

Продукционная (алгоритмическая) форма описания регуляторов позволяет унифицировать задачу их синтеза. Действительно, 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 (рис. 1).

При этом вместо классической многоступенчатой процедуры синтеза системы продукции регулятора (рис. 2), включающей последовательность операций по выбору структуры регулятора, определению его параметров, разработке реализующих этот регулятор алгоритма и программного кода, используется прямой синтез (рис. 3) программы действий регулятора — системы правил, т. е. алгоритма его работы в виде псевдокода.

Элементами продукционной модели регулятора, изменяющимися в процессе поиска оптимальных решений и, возможно, изменяющимися в процессе работы регулятора, являются: количество n правил; antecedent A_i каждого i -го правила и consequent C_i каждого i -го правила.



Рисунок 1. Блок-схема системы управления с продукционной моделью регулятора

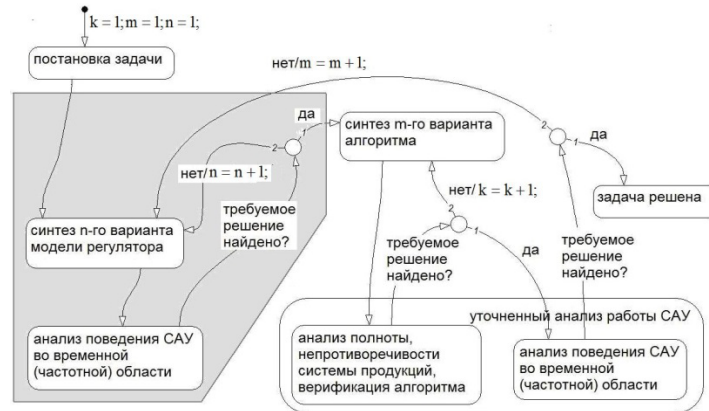


Рисунок 2. Блок-схема традиционного варианта синтеза регуляторов



Рисунок 3. Блок-схема продукционного варианта синтеза регуляторов

Существенной особенностью предлагаемого метода является допущение вариативности не только консеквентной части системы правил, но и antecedентной их части, условий срабатывания регулятора. Этим, наряду с непрерывно-дискретными системами с переключениями в заранее заданные тактовые моменты времени (time-based control), в число потенциальных решений включаются также логико-динамические системы с переключениями в произвольные (обусловленные наступлением некоторых событий) моменты времени (event-based control). А для непрерывно-дискретных систем допустимой становится аритмия, колебания шага квантования регулятора по времени вследствие изменений условий работы системы. Причем такие колебания могут быть следствием изменения времени вычисления и передачи информации по каналам связи и иметь негативные последствия либо обуславливаться алгоритмом управления, носить детерминированный характер и повышать качество работы системы управления. Классическая схема требует $k \cdot m \cdot n$ циклов итерационного процесса синтеза регулятора, в предлагаемом варианте необходимо лишь $k \cdot m$ циклов, исключается выделенный серым цветом на рис. 2 цикл выбора структуры регулятора.

Предельно универсальная форма описания обеспечивает полную свободу выбора структуры регулятора и закона управления. Любой иной подход предполагает, что мы заранее определяем вид регулятора. Как правило, решающим фактором при этом является то, какой метод решения задачи синтеза планируется использовать. Применение продукционного метода синтеза такое ограничение снимает. Выбор структуры регулятора и законов управления осуществляется в зависимости от поставленной задачи, а не от метода ее решения. Более того, в ходе синтеза структура регулятора и законы управления могут многократно меняться. При определении в процессе синтеза системы продукций можно заранее задать разрешенный набор составляющих ее компонентов (допустимый тезаурус элементов-«условий» и элементов-«действий»). Все это выгодно отличает рассматриваемый метод от известных.

Не исключено привнесение неформального творческого элемента в практику проектирования систем управления. Процесс синтеза можно организовать с использованием знаний эксперта. В качестве системы продукций могут использоваться правила, полученные эмпирически или аналитически.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что в настоящее время общий формализованный метод решения задачи синтеза регуляторов в продукционной форме отсутствует. Здесь можно пока указать лишь некоторые частные способы, базирующиеся на различных подходах к синтезу системы продукций (т. е. определению количества пар типа «условие-действие» и конкретного содержания каждого элемента-«условия» и каждого элемента-«действия»).

Поскольку большинство задач науки и техники относятся к обширному классу проблем поиска оптимальных решений, в основе обоих подходов к синтезу системы правил работы регулятора лежит процедура оптимизации. Необходимость обеспечить достижение предельно возможных технико-экономических показателей

работы промышленного оборудования требует разработки методов усовершенствования его конструктивных характеристик и соответствующей организации режимов функционирования, оптимальных по тем или иным критериям эффективности. При оптимизационном подходе искомые элементы проектируемой системы определяются в результате решения различных оптимизационных задач. При этом весь комплекс условий, требований и ограничений для проектируемой системы сводится к задаче поиска экстремума того или иного функционала на определенном допустимом множестве настраиваемых элементов.

Первый из подходов — процедура синтеза системы продукции с использованием необходимых (и/или достаточных) условий оптимальности. В основе оптимизационных задач — формализация представления о качестве функционирования систем управления. Подобная формализация предполагает построение некоторой системы количественных характеристик качества функционирования, величины которых зависят от принимаемых проектных решений. Не менее существенным представляется вопрос задания и обеспечения ограничений. В процедуре императивного синтеза регулятора необходимо, естественно, учесть традиционные виды ограничений на фазовые переменные, управляющие воздействия и время регулирования (т. е. на непрерывные состояния гибридного автомата). Однако помимо этого должна быть сформулирована система ограничений, выполнение которых обеспечит бездефектность системы продукции и корректность ее работы.

Второй подход — автоматизация процедуры синтеза системы продукции посредством эволюционных вычислений как стохастического метода глобальной оптимизации. Этот подход позволит в перспективе создавать технические устройства, которые будут самостоятельно генерировать программное обеспечение своих систем управления и при необходимости модернизировать его. На базе этого подхода можно будет создать программные средства, которые автоматизируют процесс проектирования систем управления, включая моделирование их работы и проверку программного обеспечения.

3. Численно-аналитическая процедура оптимального синтеза продукционной модели регулятора

Пусть поведение системы управления, структурная схема которой приведена на рис. 4, описывается совокупностью линейных дифференциальных и разностных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + F(t)y(t_k), t_k \leq t < t_{k+1}, \\ y(t_{k+1}) &= C_{k+1}y(t_k) + D_{k+1}v(t_{k+1}) + G_{k+1}x(t_{k+1}), k = \overline{0, N-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y — векторы состояния непрерывной и дискретной частей системы соответственно, $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^m$; u, v — векторы управления непрерывной и дискретной частями соответственно, $u \in U \subseteq \mathbb{R}^q$, $v \in V \subseteq \mathbb{R}^s$; U и V — заданные множества допустимых значений управления; t — время, $t \in T = [t_0, t_N)$, T — промежуток

времени функционирования системы, на котором выделены моменты t_k , $k = \overline{0, N-1}$, разбивающие множество T на непересекающиеся подинтервалы $T_k = [t_k, t_{k+1})$, $k = \overline{0, N-1}$; $f(t, x, y, u): T \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $x(t_N) = x(t_N - 0)$. Входящие в (1) матрицы $A(t)$, $B(t)$, $F(t)$ имеют соответственно размер $(n \times n)$, $(n \times q)$, $(n \times m)$, их элементы непрерывны; C_{k+1} , D_{k+1} , G_{k+1} — матрицы размера $(m \times q)$, $(m \times s)$, $(m \times n)$ соответственно; на управление ограничений не наложено, $u \in U = \mathbb{R}^q$, $v \in V = \mathbb{R}^s$.

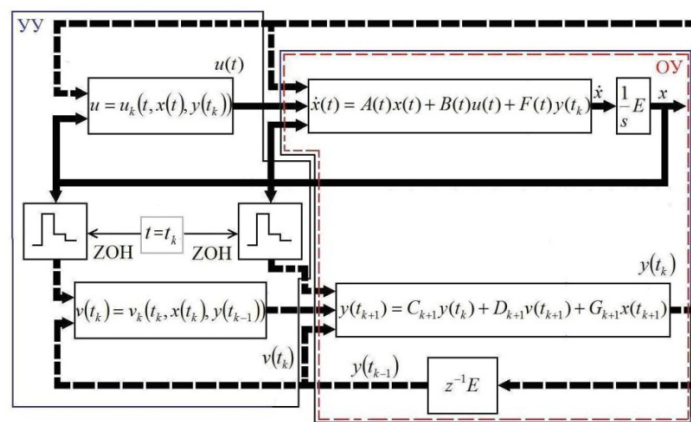


Рисунок 4. Структурная схема системы управления

Начальное состояние системы (1) задано:

$$x(t_0) = x_0 \in \mathbb{R}^n, y(t_0) = y_0 \in \mathbb{R}^m. \quad (2)$$

Конечное состояние $(x(t_N), y(t_N))$ системы произвольно. Предполагается, что при управлении используется информация о текущем времени и о векторе состояния (x, y) . Множество допустимых управлений с полной обратной связью U_n образуют функции $u(t, x, y): T \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow U$ и $v(t, x, y): (t_1, \dots, t_N) \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow V$, которые на траекториях системы (1) для различных начальных состояний (2) порождают допустимые процессы $d = (x^*(\cdot), y^*(\cdot), u^*(\cdot), v^*(\cdot)) \in D(t_0, x_0, y_0)$.

На множестве $D(t_0, x_0, y_0)$ задан функционал качества управления:

$$I = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[\frac{1}{2} x^T(t) S(t) x(t) + \frac{1}{2} u^T(t) Q(t) u(t) + x^T(t) \Phi(t) y(t_k) \right] dt + \frac{1}{2} y^T(t_k) R_{k+1} y(t_k) + \frac{1}{2} v^T(t_{k+1}) P_{k+1} v(t_{k+1}) + x^T(t_{k+1}) \Psi_{k+1} y(t_k) + \frac{1}{2} x^T(t_{k+1}) \Lambda_{k+1} x(t_{k+1}) \right\} + \frac{1}{2} x^T(t_N) \Lambda_{N+1} x(t_N) + \frac{1}{2} y^T(t_N) R_{N+1} y(t_N) + x^T(t_N) \Psi_{N+1} y(t_N), \quad (3)$$

где $S(t)$, R_{k+1} , Λ_{k+1} — неотрицательно определенные симметрические матрицы размера $(n \times n)$, $(m \times m)$, $(n \times n)$ соответственно; $Q(t)$, P_{k+1} — положительно определенные матрицы размера $(q \times q)$, $(s \times s)$ соответственно; $\Phi(t)$, Ψ_{k+1} — матрицы размера $(n \times m)$.

Определению подлежат моменты t_k ($k = \overline{0, N-1}$) разбиения промежутка времени функционирования системы T на непересекающиеся подинтервалы и действующий в пределах каждого подинтервала T_k локальный вариант закона оптимального управления $(u^*(t, x, y), v^*(t, x, y)) \in U_n$ с полной обратной связью, доставляющие минимум функционалу (3). В результате будет сформирована система продукций вида «если $t \in T_k$ то $u = u_k^*$, $v = v_k^*$ », ($k = \overline{0, N-1}$), определяющая порядок изменения алгоритма работы регулятора, последовательность смены и время действия каждого локального варианта управления.

Поставленная задача естественным образом разбивается на две подзадачи (рис. 5). Для определения моментов t_k ($k = \overline{0, N-1}$) как параметров режима работы регулятора (см. рис. 5а) используется один из численных методов глобальной оптимизации. Эта процедура является внешней по отношению к процессу вычисления предельно возможного значения критерия качества оптимального управления с полной обратной связью (см. рис. 5б), который должен выполняться на каждом шаге внешней процедуры при фиксированных значениях параметров регулятора.

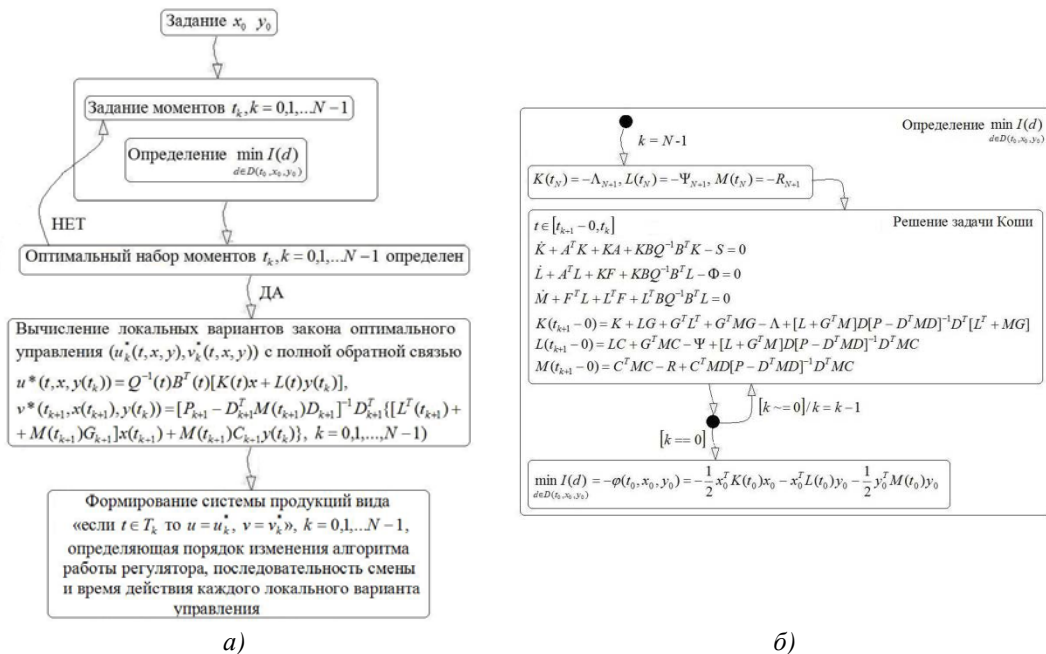


Рисунок 5. Численно-аналитический алгоритм оптимального синтеза продукционной модели регулятора

Внутренняя аналитическая процедура, подробно описанная в [2], базируется на достаточных условиях оптимальности позиционного закона управления с полной обратной связью и состоит в решении на каждом из временных подинтервалов задачи Коши для уравнения с частными производными первого порядка относительно функции Беллмана. Так, в линейном случае функция Беллмана $\varphi(t, x, y)$ ищется в виде

$$\varphi(t, x, y) = \frac{1}{2} xK(t)x^T + L(t)x^T y + \frac{1}{2} yM(t)y^T,$$

где $K(t)$, $L(t)$, $M(t)$ — неизвестные матрицы размера $(n \times n)$, $(n \times m)$, $(m \times m)$ соответственно, для нахождения которых используются дифференциальные уравнения

$$\begin{aligned} \dot{K} + A^T K + KA + KBQ^{-1}B^T K - S &= 0, \\ \dot{L} + A^T L + KF + KBQ^{-1}B^T L - \Phi &= 0, \\ \dot{M} + F^T L + L^T F + L^T BQ^{-1}B^T L &= 0, \\ t_k \leq t < t_{k+1}, \end{aligned} \quad (4)$$

условия перехода к следующему подинтервалу (условия скачка)

$$\begin{aligned} K(t_{k+1} - 0) &= K + LG + G^T L^T + G^T MG - \Lambda + [L + G^T M] D [P - D^T MD]^{-1} D^T [L^T + MG], \\ L(t_{k+1} - 0) &= LC + G^T MC - \Psi + [L + G^T M] D [P - D^T MD]^{-1} D^T MC, \\ M(t_{k+1} - 0) &= C^T MC - R + C^T MD [P - D^T MD]^{-1} D^T MC \end{aligned} \quad (5)$$

и конечные условия

$$K(t_N) = -\Lambda_{N+1}, \quad L(t_N) = -\Psi_{N+1}, \quad M(t_N) = -R_{N+1}. \quad (6)$$

В правых частях выражений (5) для вычисления $K(t_{k+1} - 0)$, $L(t_{k+1} - 0)$, $M(t_{k+1} - 0)$ матрицы $K(t)$, $L(t)$, $M(t)$ берутся в момент $t = t_{k+1}$, а матрицы P , R , Ψ , Λ , C , D , G имеют индексы $k+1$.

Оптимальное управление на каждом подинтервале вычисляется так:

$$\begin{aligned} u^*(t, x, y(t_k)) &= Q^{-1}(t)B^T(t)[K(t)x + L(t)y(t_k)], \\ v^*(t_{k+1}, x(t_{k+1}), y(t_k)) &= [P_{k+1} - D_{k+1}^T M(t_{k+1})D_{k+1}]^{-1} D_{k+1}^T \{ [L^T(t_{k+1}) + \\ &+ M(t_{k+1})G_{k+1}]x(t_{k+1}) + M(t_{k+1})C_{k+1}y(t_k) \}, \quad t_k \leq t < t_{k+1}, k = \overline{0, N-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Алгоритм вычисления оптимального управления состоит из следующей последовательности шагов:

1. Из конечного условия (6) определяются матрицы $K(t_{k+1})$, $L(t_{k+1})$, $M(t_{k+1})$ при $k = N - 1$.
2. По формуле (5) вычисляются матрицы $K(t_{k+1} - 0)$, $L(t_{k+1} - 0)$, $M(t_{k+1} - 0)$.

3. Решается система уравнений (4) от момента $t = t_{k+1} - 0$ до момента $t = t_k$ с конечными условиями, найденными на шаге 2. В результате находятся матрицы $K(t)$, $L(t)$, $M(t)$, $t \in [t_k, t_{k+1})$.

4. Выполняются шаги 2, 3 для $k = N - 2, N - 3, \dots, 1, 0$. В результате находятся матрицы $K(t)$, $L(t)$, $M(t)$ на всех подинтервалах T_k .

5. Подставляя найденные матрицы $K(t)$, $L(t)$, $M(t)$ в (7), получим искомое оптимальное управление с обратной связью.

Минимальное значение функционала (3) находится по формуле

$$\min_{d \in D(t_0, x_0, y_0)} I(d) = -\varphi(0, x_0, y_0) = -\frac{1}{2} x_0^T K(t_0) x_0 - x_0^T L(t_0) y_0 - \frac{1}{2} y_0^T M(t_0) y_0. \quad (8)$$

Выделим основные достоинства численно-аналитической процедуры:

- в соответствии со сформулированным в разделе 1 допущением для регуляторов непрерывно-дискретных систем аритмии как колебаний шага квантования регулятора по времени определению подлежат моменты t_k , ($k = \overline{0, N-1}$) разбиения промежутка времени функционирования системы T на непересекающиеся подинтервалы и действующий в пределах каждого подинтервала T_k локальный вариант закона оптимального управления $(u_k^*(t, x, y); v_k^*(t, x, y))$ с полной обратной связью, доставляющие минимум функционалу (3);
- численные методы оптимизации, используемые при определении моментов разбиения промежутка времени функционирования системы на непересекающиеся подинтервалы, позволяют выявлять глобально-оптимальные настройки и режим работы регулятора;
- для каждой комбинации моментов разбиения промежутка времени функционирования системы на непересекающиеся подинтервалы вычисляется свой набор вариантов локального закона оптимального управления с полной обратной связью, чем определяется точное решение задачи оптимального управления;
- критерий качества (3) весьма общего вида, позволяет решать разнообразные задачи;
- значение критерия качества может быть рассчитано по формуле (8) без определения оптимального управления, что позволяет снизить объем вычислений на промежуточных этапах поиска оптимальных настроек и режимов работы регулятора.

Помимо этого, такой подход позволяет поставить и решить ряд новых задач, а уже известные рассматривать с единых вычислительных позиций.

4. Процедура оптимального синтеза продукционной модели регулятора прямым методом — псевдоспектральным методом Гаусса

Рассмотренная в разделе 2 численно-аналитическая процедура оптимального синтеза продукционной модели регулятора основана на совместном использовании методов конечномерной оптимизации для поиска моментов срабатывания регулятора и числа срабатываний (т. е. количества правил системы продукции и части «условие» каждого из них) и базирующейся на достаточных условиях оптимальности аналитической процедуры поиска на каждом из временных интервалов закона управления с полной обратной связью (части «действие» каждого из правил). Такой метод позволяет решать задачи синтеза управления линейными объектами, оптимального по квадратичному критерию качества. Однако попытка использовать его для решения более широкого круга задач сопряжена с рядом проблем, подчас трудноразрешимых. Так, затруднен синтез системы продукции регулятора, управляющего нелинейным объектом. Причина — невозможность установления в этом случае аналитического выражения для функции Беллмана. Определенные трудности представляет синтез системы продукции регулятора при наличии ограничений на фазовые переменные и управляющие воздействия.

Частично снять эти проблемы можно при использовании альтернативного варианта, в основе которого — один из прямых методов решения задач оптимального управления, псевдоспектральный метод Гаусса [3, 4]. В этой разновидности метода коллокаций, применяя дискретизацию непрерывной задачи посредством аппроксимации переменных состояния и управляющих переменных интерполяционными полиномами, сводят ее к задаче нелинейного программирования, которая далее решается известными методами.

Таким способом может быть решена задача достаточно общего вида. А именно, пусть управляемый процесс состоит из P этапов с номерами $p = (1, \dots, P)$. Требуется минимизировать функционал

$$J = \sum_{p=1}^P J^{(p)} = \sum_{p=1}^P \left[\Phi^{(p)} \left(x^{(p)}(t_0), t_0, x^{(p)}(t_f), t_f, q^{(p)} \right) + \int_{t_0^{(p)}}^{t_f^{(p)}} L^{(p)} \left(x^{(p)}(t), u^{(p)}(t), t, q^{(p)} \right) dt \right]$$

с учетом динамических ограничений

$$\dot{x}^{(p)} = f^{(p)}(x^{(p)}, u^{(p)}, t, q^{(p)}),$$

граничных условий

$$\phi_{\min} \leq \varphi^{(p)} \left(x^{(p)}(t_0), t_0^{(p)}, x^{(p)}(t_f), t_f^{(p)}, q^{(p)} \right) \leq \phi_{\max},$$

ограничений в виде неравенств

$$C^{(p)} \left(x^{(p)}(t), u^{(p)}(t), t, q^{(p)} \right) \leq 0$$

и условий непрерывности фазовых переменных в точках «сочленения» этапов

$$P^{(s)} \left(x^{(p_i^s)}(t_f), t_f^{(p_i^s)}, q^{(p_i^s)}, x^{(p_u^s)}(t_0), t_0^{(p_u^s)}, q^{(p_u^s)} \right) = 0, \quad p_u^s, p_l^s \in [1 \dots L].$$

Здесь $x^{(p)}(t) \in \mathbb{R}^{n_p}$, $u^{(p)}(t) \in \mathbb{R}^{m_p}$, $q^{(p)}(t) \in \mathbb{R}^{q_p}$ и $t \in \mathbb{R}$ — соответственно состояние, управление, параметры и время на этапе $p \in [1, \dots, P]$; L — количество «сочлененных» этапов, $p_l^s \in [1, \dots, L]$ и $p_u^s \in [1, \dots, L]$ — номер «левого» и «правого» «сочлененных» этапов соответственно.

Эта «многоэтапная» задача разбивается на P связанных граничными условиями для непрерывных переменных подзадач. Каждая подзадача описывает условия общей задачи на одном из этапов и является непрерывной задачей Больца. Любой прямой подход к решению непрерывной задачи Больца предполагает сведение ее к задаче нелинейного программирования посредством дискретизации. Так, псевдоспектральный метод Гаусса основан на аппроксимации траектории состояний и управления интерполяционными полиномами. В результате решения задачи нелинейного программирования определяется набор оптимальных программных управлений $u^{(p)}(t) \in \mathbb{R}^{m_p}$, $p = (1, \dots, P)$. Структура этого управления определяет количество правил продукционной модели регулятора как число интервалов постоянства закона изменения оптимального управления.

5. Синтез продукционной формы регулятора с использованием генетического алгоритма

Эволюционные вычислительные методы [5, 6] — группа алгоритмов, использующих в своей основе идею эволюции Дарвин. Эти алгоритмы традиционно разделяют на генетические алгоритмы (ГА) и генетическое программирование (ГП). ГА [7, 8] в основном предназначены для поиска решения оптимизационных задач в виде набора параметров. Структуры данных (векторы вещественных или целых чисел), которыми они манипулируют, являются аналогами генов живых организмов. Алгоритм использует механизмы скрещивания, мутационной изменчивости и отбора для приспособления к условиям окружающей среды, критерием качества которого служит значение целевой функции исходной оптимизационной задачи. Этот алгоритм состоит из нескольких этапов (рис. 6): генерация случайным образом начальной популяции (набора решений), отбор родительских пар (особей с наилучшим значением критерия качества), их скрещивание и мутация (под скрещиванием понимается «обмен» родителей некоторой частью элементов массива, под мутацией — изменение случайным образом элементов массива какой-то особи). Если лучшее решение в популяции не удовлетворяет критериям поиска, то вновь повторяем процесс, иначе — заканчиваем вычисления.

Признанием эффективности генетического алгоритма как метода глобальной оптимизации явилось включение в состав пакета MATLAB средства GADS (Genetic Algorithm and Direct Search) Toolbox, который в последних версиях MATLAB получил название Global Optimization Toolbox. ГА — стохастический метод глобальной параметрической оптимизации — позволяет определять $\min_x J(x)$ в условиях дей-

ствия ограничений на вектор $x \in \mathbb{R}^n$ вида $g_i(x) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad h_i(x) = 0;$
 $i = m + 1, m + 2, \dots, k; \quad A \cdot x \leq a; \quad B \cdot x = b; \quad x_L \leq x \leq x_U.$

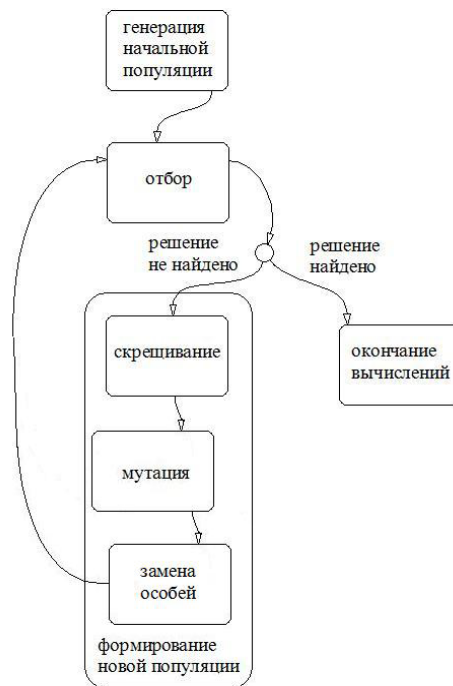


Рисунок 6. Блок-схема эволюционного алгоритма

Особенно эффективен этот подход в условиях неединственности экстремума целевой функции $J(x)$. В соответствии со сформулированным в разделе 1 допущением для регуляторов непрерывно-дискретных систем аритмии, колебаний шага квантования регулятора по времени, вычислению подлежат моменты $t_k, (k = \overline{1, N})$ разбиения промежутка T времени функционирования системы на непересекающиеся подинтервалы и действующий в пределах каждого подинтервала T_k определенный с точностью до набора параметров $p_{1k}, p_{2k}, \dots, p_{jk}$ локальный вариант закона управления u_k^* , доставляющие минимум функции $J(x)$. Тогда алгоритм работы регулятора задается вектором параметров $x = [t_1, \dots, t_N, p_{11}, \dots, p_{j1}, \dots, p_{1N}, \dots, p_{jN}]$, формирующим систему продукций вида «если $t \in T_k$ то $u = u_k^*$ », $(k = \overline{1, N})$ и, таким образом, задающим порядок изменения алгоритма работы регулятора, последовательность смены и время действия каждого локального варианта управления. Однако, поскольку в ГА требуется производить анализ большого числа альтернативных вариантов решения, время расчетов велико.

Для преодоления этого недостатка процедуру вычисления управляющих воздействий целесообразно совместить с процессом управления. Разработан эволюционный метод ускоренного решения задач оптимального синтеза системы production регулятора ГНДСУ как алгоритма с отсечением по времени [9]. Алгоритм с отсечением по времени (anytime algorithm) — итерационный вычислительный алгоритм, который способен в любое время выдать наилучшее на данный момент решение. При совместном применении алгоритма с отсечением по времени и эволюционного метода следует, не дожидаясь окончания вычислений, раз в несколько эпох выбирать наилучшее решение. Это решение используется некоторое время как текущее управляющее воздействие. Создано программное средство, автоматизирующее процесс проектирования систем управления, включая моделирование их работы и проверку программного обеспечения.

6. Синтез продукционной формы регулятора с использованием генетического программирования

Генетическое программирование [10] применяет теорию эволюции не к данным, а к программному коду. Эта область, считавшаяся бесперспективной вплоть до начала 90-х годов, теперь бурно развивается, в том числе для решения задач в области автоматизации [11, 12]. В генетическом программировании особи из популяции — это компьютерные программы. Удобно задавать эти программы в виде ветвей деревьев, где функции представлены внутренними узлами, к которым присоединены поддеревья, играющие роль входных параметров. Листьями такого дерева (терминалами) будут константы, входные параметры задачи или директивные команды программы. Так, на рис. 7 представлено дерево программы $F1(F2(T1, F3(T2, T3)), F4(F5(T4)))$.

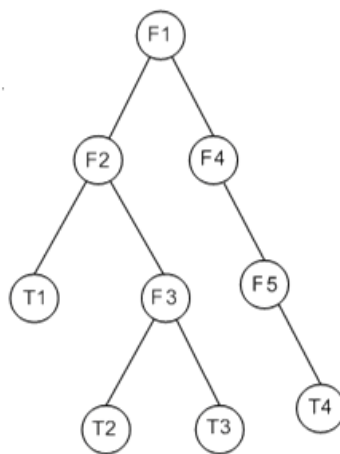


Рисунок 7. Дерево программы $F1(F2(T1, F3(T2, T3)), F4(F5(T4)))$

Пусть функция $F1$ — операция умножения, $F1 = \text{times}(\cdot, \cdot)$; $F2$ — операция сложения, $F2 = \text{sum}(\cdot, \cdot)$; $F3$ — операция деления, $F3 = \text{devide}(\cdot, \cdot)$; $F4$ — операция вычисления синуса, $F4 = \sin(\cdot)$; $F5$ — операция извлечения квадратного корня, $F5 = \text{sqrt}(\cdot)$. Пусть далее терминалы $T1$ и $T3$ — константы $T1 = 0.5$, $T3 = 3$, а терминалы $T2$ и $T4$ — некоторые переменные $T2 = X1$, $T4 = X2$. Тогда приведенное на рис. 7 дерево описывает программу вычисления выражения $(0.5 + X1/3) \times \sin(\sqrt{X2})$. Первый шаг в использовании ГП — задание множества терминалов и множества функций. Эти наборы представляют собой компоненты, из которых будет создаваться компьютерная программа для полного или частичного решения проблемы. В функциональном множестве могут быть применены арифметические, математические, булевы и другие функции. В терминальное множество могут войти переменные, константы или директивные команды.

Каждая компьютерная программа (т. е. дерево или эквивалентное ему математическое выражение) является композицией функций из множества функций и терминалов из терминального множества. Пространством поиска алгоритма ГП является множество всех возможных рекурсивных композиций функций, формируемых из этих множеств. «Скрещивание» двух программ будет заключаться в замене одного из поддеревьев первого предка на какое-либо поддерево второго предка. При «мутации» программы будет осуществляться случайное изменение случайно выбранного фрагмента дерева. Далее задается мера приспособленности (критерий качества), контролирующая эволюцию параметры и критерий останова эволюции. После этого можно запускать процесс вычисления лучшей особи. Легко заметить, что последовательность шагов ГП в общих чертах совпадает с той, что реализована в ГА (см. рис. 6), однако пространством поиска ГП является не пространство параметров, как в ГА, а множество $R(M)$ всех возможных композиций функций множества $M = F \cup T$, где $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ — функциональный базис — набор допустимых для планируемого к использованию регулятора функций, $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ — терминальное множество. Функциональное множество могут составлять арифметические, математические, булевы и другие функции. В терминальное множество могут войти время, наблюдаемые фазовые переменные, константы или директивные команды. Синтез продукционных правил работы регулятора с помощью ГП гарантирует реализуемость синтезированных законов управления на заданной цифровой платформе. Определяя композицию $u^* \in R(M)$, обеспечивающую $J(u^*) = \min J(u)$, получим оптимальную систему продукций вида «если $t \in [0, t_{FIN}]$ то $u = u^*$ ».

Программным средством, реализующим генетическое программирование, служит GPLAB (Genetic Programming Toolbox для MATLAB) [13]. Этот программный продукт не входит в поставляемый фирмой MathWorks набор дополнений пакета MATLAB, однако доступен для свободного скачивания. Основной его недо-

статок — скалярный характер искомого решения. Это не позволяет применять его в задачах с векторным решением, к которым относится задача продукционного синтеза регуляторов в общем случае. При участии автора была проведена переработка GPLAB с целью расширения его возможностей по одновременному поиску вектора решений [14, 15]. В таком варианте метод синтеза продукционной формы регулятора с использованием ГП может быть распространен на новый класс актуальных задач управления шагом срабатывания аритмического регулятора. В отличие от типичной задачи проектирования регулятора дискретного действия с постоянной скоростью срабатывания, которая сводится к выбору закона регулирования, обеспечивающего заданные показатели качества работы системы в условиях принятых ограничений, в ходе решения задачи синтеза аритмического регулятора определялись вместе с искомым законом регулирования и сами ограничения в форме оптимальных условия срабатывания регулятора. В этом случае дополнительно вычисляется функция $t_s \in R(M)$, обеспечивающая $J(t_s^*) = \min J(t_s)$ и формирующая оптимальную систему продукций вида «если $t = t_s^*$ то $u = u^*$ ».

Литература

- [1] Рогачев Г. Н. Продукционный метод описания, анализа и синтеза автоматических регуляторов непрерывно-дискретных систем управления // Cloud of science. 2014. Т. 1. № 1. С. 17–40.
- [2] Пантелеев А. В. Бортакровский А. В. Теория управления в примерах и задачах.— М. : Высшая школа, 2003.
- [3] Garg D., Hager W. W., Rao A.V. Pseudospectral Methods for Solving Infinite-Horizon Optimal Control Problems // Automatica. 2011. Vol. 47. No. 4. P. 829-837 (doi: 10.1016/j.automatica.2011.01.085).
- [4] Rao A. V., Benson D. A., Darby C. et al. Algorithm 902: GPOPS, A MATLAB Software for Solving Multiple-Phase Optimal Control Problems Using the Gauss Pseudospectral Method // ACM Transactions on Mathematical Software. 2010. Vol. 37. No. 2. P. 1–39. (doi: 10.1145/1731022.1731032)
- [5] Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования.— М. : Физматлит, 2003.
- [6] Рогачев Г. Н. Эволюционный алгоритм настройки обобщенного ПИД-регулятора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2005. № 39. С. 17–21.
- [7] Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning.— Addison-Wesley, 1989.
- [8] Рогачев Г. Н. Генетические алгоритмы в задачах параметрического синтеза оптимальных систем управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2005. № 33. С. 67–72.

- [9] *Рогачев Г. Н.* Использование генетического алгоритма с отсечением по времени в задаче синтеза программного регулятора для машины Дубинса // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 3 (31). С. 27–33.
- [10] *Koza J. R.* Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection.— MIT Press, 1992.
- [11] *Рогачев Г. Н.* Генетическое программирование в задачах поиска системотехнических решений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2006. № 40. С. 37–42.
- [12] *Данилов В. Р., Шальто А. А.* Методы генетического программирования для генерации автоматов, представленных деревьями решений // Сборник докладов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008).— СПб. : СПбГЭТУ, 2008. С. 248–251.
- [13] *Silva S., Almeida J.* GPLAB — A Genetic Programming Toolbox for MATLAB // Proc. of the Nordic MATLAB Conference (NMC–2003). 2003. P. 273–278.
- [14] *Егоров В. А., Рогачев Г. Н.* Особенности построения операторов мутации и кроссовера в векторном варианте генетического программирования // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 1 (29). С. 19–27.
- [15] *Егоров В. А., Рогачев Г. Н.* Методика и программное средство синтеза гибридно-автоматных систем управления техническими объектами // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. Труды IV Всероссийской научной конференции.— Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2009. С. 457–463.

Автор:

Геннадий Николаевич Рогачев, доктор технических наук, доцент кафедры автоматик и управления в технических системах Самарского государственного технического университета

Productional method for the of automatic controllers discrete-continuous control systems synthesis

Gennady N. Rogachev
Samara Technical University
244, Molodogvardeiskaya street, Samara, 443100
e-mail: grogachev@mail.ru e-mail:

Abstract. In the article application of a production method for synthesis of hybrid discrete-continuous control systems is being considered. The method of synthesis of automatic controllers control systems is based on the joint use of sufficient optimality conditions and procedures for the finite-dimensional optimization. Artificial intelligence methods for synthesis production models of automatic controllers using evolutionary computation: genetic algorithms and genetic programming are also being discussed in the article.

Key words: hybrid control system, a production method, the synthesis problem, evolutionary computation.

Reference

- [1] Rogachev G. N. (2014) Produkcionnyj metod opisanija, analiza i sinteza avtomaticheskikh reguljatorov nepreryvno-diskretnyh sistem upravlenija. *Cloud of science*, 1(1), 17–40. (rus)
- [2] Panteleev A. V. and Bortakovskij A. V. (2003) Teorija upravlenija v primerah i zadachah. Moscow : Vysshaja shkola. (rus)
- [3] Garg D., Hager W. W. and Rao A.V. (2011) Pseudospectral Methods for Solving Infinite-Horizon Optimal Control Problems. *Automatica*. 47(4), 829-837 (doi: 10.1016/j.automatica.2011.01.085).
- [4] Rao A. V., Benson D. A., Darby C. et al. (2010) Algorithm 902: GPOPS, A MATLAB Software for Solving Multiple-Phase Optimal Control Problems Using the Gauss Pseudospectral Method. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 37(2), 1–39. (doi: 10.1145/1731022.1731032)
- [5] Emeljanov V. V., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. (2003) Teorija i praktika jevoljucionnogo modelirovanija. Moscow : Fizmatlit. (rus)
- [6] Rogachev G. N. (2005) Jevojucionnyj algoritm nastrojki obobshhenogo PID-reguljatora. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskie nauki*, 39. 17–21. (rus)
- [7] Goldberg D. E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimzation & Machine Learning. Addison-Wesley.
- [8] Rogachev G. N. (2005) Geneticheskie algoritmy v zadachah parametricheskogo sinteza optimal'nyh sistem upravlenija. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskie nauki*, 33, 67–72.

- [9] Rogachev G. N. (2011) Ispolzovanie geneticheskogo algoritma s otsecheniem po vremeni v zadache sinteza programmnoho reguljatora dlja mashiny Dubinsa. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskie nauki*. 31, 27–33. (rus)
- [10] Koza J. R. (1992) Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection.
- [11] Rogachev G. N. (2006) Geneticheskoe programmirovanie v zadachah poiska sistemotehničeskikh reshenij. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskie nauki*, 40, 37–42. (rus)
- [12] Danilov V. R. and Shalyto A. A. (2008) Metody geneticheskogo programmirovaniya dlja generacii avtomatov, predstavlenykh derev'jami reshenij // Sbornik dokladov XI Mezhdunarodnoj konferencii po mjagkim vychislenijam i izmerenijam (SCM'2008). St. Petersburg. P. 248–251. (rus)
- [13] Silva S. and Almeida J. (2003) GPLAB — A Genetic Programming Toolbox for MATLAB // Proc. of the Nordic MATLAB Conference (NMC–2003). P. 273–278.
- [14] Egorov V. A. and Rogachev G. N. (2011) Osobennosti postroeniya operatorov mutacii i krossovera v vektornom variante geneticheskogo programmirovaniya. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskie nauki*, 29, 19–27.
- [15] Egorov V. A. and Rogachev G. N. (2009) Metodika i programmnoe sredstvo sinteza gibridno-avtomatnykh sistem upravleniya tehničeskimi obektami // Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozhenij v srede MATLAB. Trudy IV Vserossijskoj nauchnoj konferencii. Astrakhan. P. 457–463.

УДК 004.7

Применение методов нелинейной динамики и фрактального анализа для оценивания работы инфокоммуникационных систем с протоколом TCP

*А. В. Карпухин¹, Л. О. Кириченко¹,
Д. И. Грицив², А. А. Ткаченко³*

*¹Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
61166, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14,*

*²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
61022, Украина, г. Харьков, пл. Свободы, 4*

*³ПАО «Укртелеком» 61002, г. Харьков, Украина, ул. Иванова, 7/9,
e-mail: kav-102@yandex.ru, ludmila.kirichenko@gmail.com, dgritsiv@gmail.com*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы оценки поведения сетевого трафика, обладающего самоподобными свойствами и анализа полученных данных. Полученные результаты дают характеристику производительности работы компьютерной сети. Целью данного исследования было определение условия возникновения хаотических явлений в инфокоммуникационных системах и способы уменьшения их влияния на пропускную способность таких систем.

На данный момент протокол TCP является основным протоколом передачи данных, считающийся основной причиной самоподобия трафика, поскольку статистические характеристики такого трафика обладают свойством временной масштабной инвариантности (самоподобием). Этот факт был подтвержден многочисленными исследованиями процессов в глобальной сети Internet. В работе проведена оценка работы модельной компьютерной сети с помощью метода мультифрактального анализа и методов нелинейной динамики, которые используются для моделирования, анализа и контроля сложных систем в различных областях науки и техники. С ростом глобальной сети Internet увеличивается нагрузка на каналы связи, что в свою очередь накладывает более жесткие требования к качеству обслуживания (QoS). Поскольку сетевой трафик обладает самоподобием, то игнорирование подобных особенностей может привести к увеличению задержки в передаче данных, уменьшению пропускной способности компьютерной сети и даже к потерям пакетов. Это накладывает определенные ограничения на традиционные методы при проектировании современных компьютерных сетей.

В работе предложен метод анализа производительности компьютерных сетей, учитывающий особенности протекающих в них процессов. Дан-

ная методика дает возможность дальнейшего прогнозирования поведения сетевого трафика при изменении ключевых параметров, влияющих на работу сети, а также предотвращения сетевых перегрузок и минимизации хаотических явлений.

Ключевые слова: самоподобие, мультифрактальность, хаос, перегрузка, потеря пакетов, TCP/IP.

1. Введение

На сегодняшний день установлено, что сетевой трафик обладает свойством самоподобия. Считается, что основной причиной самоподобия трафика является TCP (основной транспортный протокол Internet), что подтвердилось многочисленными работами исследователей, в которых анализируются трафик и его статистические характеристики. Впервые на свойство самоподобия сетевого трафика обратили внимание после публикации результатов своей работы группа американских исследователей W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger и D. Wilson, которая существенно изменила существующие представления о процессах, происходящих в телекоммуникационных сетях [2]. Эти исследователи изучили трафик в информационной сети корпорации Bellcore и установили, что трафик такой сети обладает свойством самоподобия, которое подразумевает повторяемость распределения нагрузки во времени при различных масштабах. Более формальное математическое определение можно сформулировать следующим образом: если набор значений самоподобной функции разделить на равные группы, а затем просуммировать значения внутри групп, то набор сумм будет подчиняться той же самой корреляционной функции, что и исходные данные.

Особенности, о которых идет речь, проявляются в специфическом для этого случая профиле (форме) трафика: в реализации всегда присутствует некоторое количество достаточно сильных выбросов на фоне относительно низкого среднего уровня. Это явление значительно ухудшает характеристики при прохождении самоподобного трафика через сеть даже в тех случаях, когда средняя интенсивность трафика намного ниже потенциально достижимой скорости передачи в данном канале, что приводит к увеличению времени задержки, потере пакетов [3].

Вначале эту особенность удалось заметить в сетях Ethernet, а после того, как данный феномен был доказан, множество исследователей занялись проблемой самоподобия сетевого трафика. На данный момент показано, что самоподобной структурой обладает сетевой трафик в проводных сетях при работе широко распространенных протоколов Ethernet, VOIP, TCP и др., а также схожие аналогичные явления [4] были обнаружены в сотовых телефонных сетях с коммутацией пакетов.

Современные сети построены на основе принципа «усреднения». Согласно статистике, множество потоков данных со случайными вариациями плотностей дадут в результате некий усредненный трафик. К сожалению, этот подход не работает: сети, построенные на базе TCP/IP, склонны к проявлению мощных пиковых вы-

бросов (bursts). Такие своеобразные, локализованные во времени «заторы» (congestions) вызывают значительные потери пакетов, даже когда суммарная потребность всех потоков далека от максимально допустимых значений. Вышеупомянутые особенности сетевого трафика в сетях особенно сильно влияют на их работоспособность в некоторых областях науки и техники [9, 11].

2. Модельная сеть

Для исследования свойства самоподобия сетевого трафика была создана модельная сеть TCP/IP (рис. 1), в которой все хосты связаны с маршрутизаторами соединением типа точка-точка. Модельная сеть представляет собой ступенчатую структуру из четырех этажей, на каждом из которых устанавливались хосты и маршрутизатор.

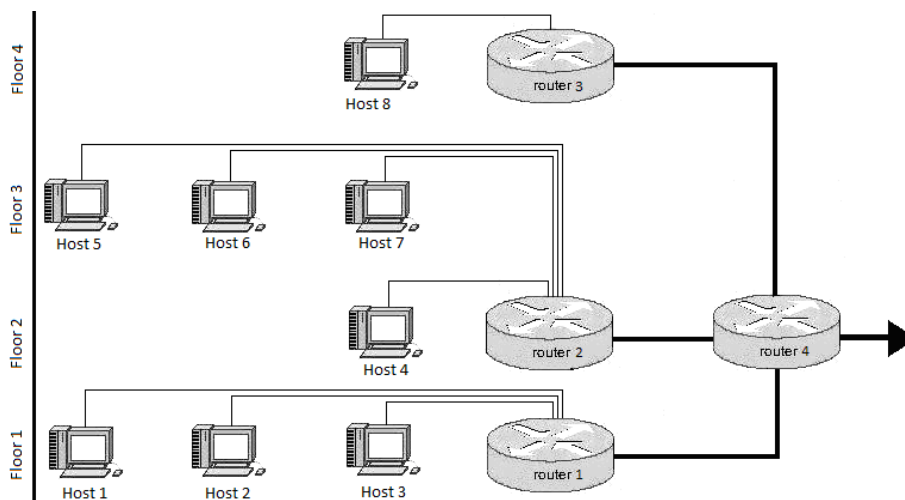


Рисунок 1. Топология модельной сети

Такая структура была выбрана, как одна из наиболее используемых для офисов или многоэтажных домов. На всех хостах устанавливалось специальное программное обеспечение, так называемый сниффер (wireshark), которое захватывало входящий и исходящий сетевой трафик и записывало данные в режиме реального времени. Для соединения хостов с маршрутизаторами (Cisco Catalyst 2960G-48) использовалась среда передачи данных — витая пара. Таким образом, максимальная пропускная способность данного участка сети $C_b = 100$ Mbps. В свою очередь, для соединения маршрутизаторов между собой использовалось оптоволокно. В результате установленное программное обеспечение создавало несколько дампов с данными на одном хосте. Это было сделано для того, чтобы оценить степень нагрузки на модельную сеть в разное время активности пользователей. Время захвата сетевого трафика на хостах составляло 11 000 секунд (около 3 часов), что, по нашему

мнению, достаточно для комплексного анализа данной части сети. Сохраненные отчеты с данными затем передавались на удаленный компьютер для дальнейшей обработки.

3. Методика обработки трафика

В качестве инструмента для захвата сетевого трафика в модельной сети был выбран анализатор сетевого трафика Wireshark [14]. Его задача состоит в том, чтобы перехватывать сетевой трафик и отображать его в детальном виде. Анализатор сетевого трафика можно сравнить с измерительным устройством, которое используется для просмотра того, что происходит внутри сетевого кабеля. В прошлом такие инструменты были очень дорогостоящими и проприетарными. Однако с момента появления такого инструмента, как Wireshark ситуация изменилась. Wireshark является одним из лучших и доступных анализаторов сетевого трафика на сегодняшний момент, так как обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами. Он работает на большинстве современных ОС (Microsoft Windows, Mac OS X, UNIX) и является продуктом с открытым исходным кодом, распространяемый на основании лицензии GPL. Анализатор обладает множеством декодировщиков таких протоколов, как: TELNET, FTP, POP, RLOGIN, ICQ, SMB, MySQL, HTTP, NNTP, X11, NAPSTER, IRC, RIP, BGP, SOCKS 5, IMAP 4, VNC, LDAP, NFS, SNMP, MSN, YMSG и др. Перехват трафика сетевого интерфейса осуществляется в режиме реального времени. Также есть возможность отфильтровать захваченные пакеты по множеству критериев и создавать разнообразную статистику. Wireshark работает на основе библиотеки pcap (Packet Capture), которая позволяет анализировать сетевые данные, поступающие на сетевую карту компьютера. Перехват трафика анализатором предоставляет следующие возможности: перехват трафика различных видов сетевого оборудования (Ethernet, Token Ring, ATM и другие). Прекращение перехвата происходит на основе разных событий: размер перехваченных данных, продолжительность перехвата по времени, количество перехваченных пакетов. Поддерживается показ декодированных пакетов во время перехвата и фильтрация пакетов с целью уменьшить размер перехваченной информации, а также запись дампов в несколько файлов, если перехват продолжается долго.

В процессе захвата трафика в сети отслеживалось значение множества переменных для каждого хоста, поэтому полученные отчеты с данными фильтровались по следующим критериям: IP адрес хоста и TCP протокол передачи данных. Затем отчет сохранялся в формате

%время% %TCP трафик%,

где время отсчитывалось с момента запуска захвата трафика, а в качестве единиц измерения для времени использовались секунды и байты для трафика.

Для дальнейшего анализа временных рядов необходимо было преобразовать исходные ряды $\psi = \{\psi(t_1), \psi(t_2), \dots, \psi(t_n)\}$ в эквидистантные, которые обладают постоянным шагом Δt по оси времени. Такую величину Δt можно обозначить как степень агрегации. Для этого был сформирован новый ряд, полученный при помо-

щи операции суммирования каждых исходных значений информации (TCP трафик) в соответствии к заданному временному интервалу Δt . Таким образом, агрегированные значения преобразованного ряда можно представить в таком виде:

$$X_N = \sum_{i=1+(N-1)\Delta t}^{N\Delta t} \psi(t_i). \quad (1)$$

В результате работы алгоритма получается агрегированная эквидистантная реализация трафика $X = \{X(\Delta t), X(2\Delta t), \dots, X(N\Delta t)\}$, содержащая N элементов [12]. Физическим смыслом каждого ее элемента является суммарная скорость (байт/сек) на соответствующем интервале Δt . В процессе агрегации временных рядов выбирались разные временные интервалы $\Delta t = 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10$. Ниже приведены графики на рис. 2 и 3 агрегированного трафика для одинакового уровня агрегации $\Delta t = 0.1$ и $\Delta t = 1$, для различных сессий работы модельной сети. Примечательно, что структура полученных рядов для любого уровня агрегации подобна по структуре между собой.

Как можно видеть на рис. 2, 3, наблюдается периодичность работы TCP протокола, так называемые режимы on/off в модельной сети. Как и ожидалось, сетевой трафик имеет взрывной характер на разных временных участках, а также при разном шаге агрегирования временной ряд сохраняет свойство инвариантности.

4. Фрактальная размерность и показатель Херста

Фракталы — это структуры, которые при разных масштабах выглядят примерно одинаково [1, 10, 14]. Мультифракталы — неоднородные фрактальные объекты, для полного описания которых, в отличие от регулярных фракталов, недостаточно введения всего лишь одной фрактальной размерности, а необходим спектр таких размерностей. Причина этого заключается в том, что, наряду с чисто геометрическими характеристиками, такие фракталы обладают и некоторыми статистическими свойствами.

Параметр H , $0 < H < 1$, называемый показателем Херста, представляет собой степень самоподобия. Наряду с этим свойством, показатель H характеризует меру долгосрочной зависимости стохастического процесса. Эта величина уменьшается, когда задержка между двумя одинаковыми парами значений во временном ряду увеличивается.

Итак, для самоподобного процесса локальные свойства отражаются на глобальных в соответствии с общеизвестным соотношением $D = n + 1 - H$ между фрактальной размерностью и коэффициентом Херста для самоподобного объекта в n -мерном пространстве.

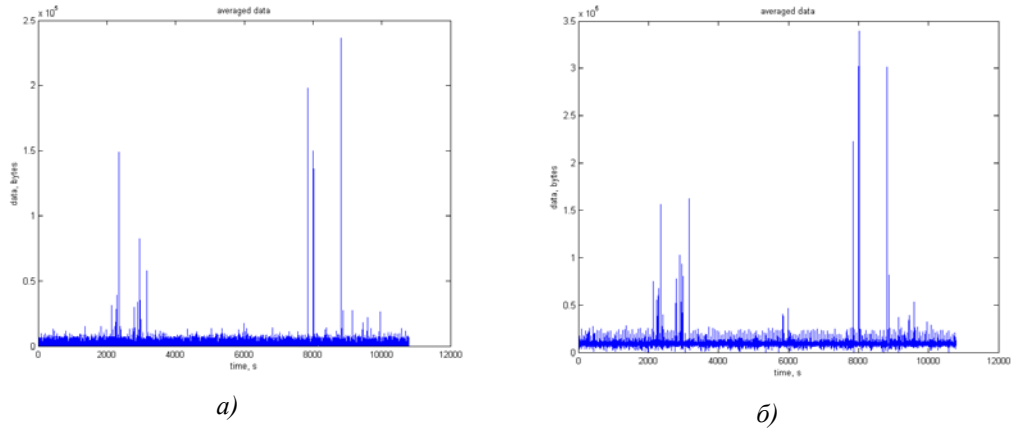


Рисунок 2. Агрегированный временной ряд (трафик) для хоста 2:
а) $\Delta t = 0.1$; б) $\Delta t = 1$

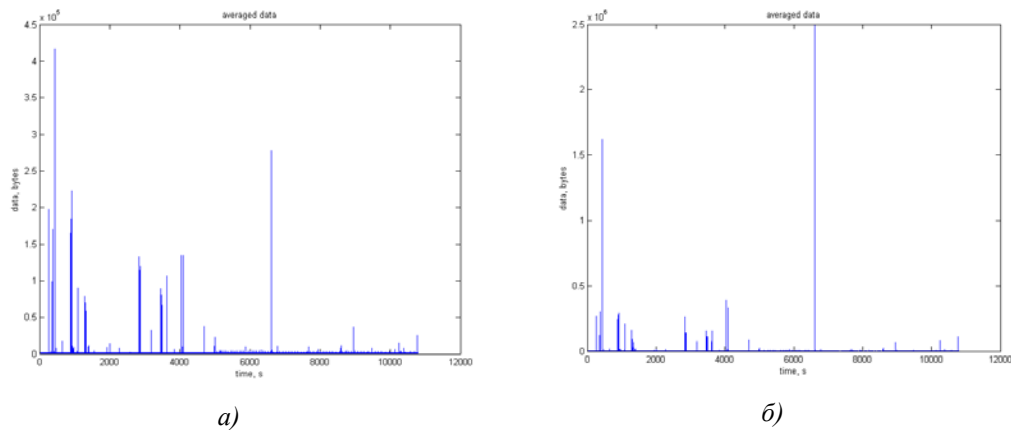


Рисунок 3. Агрегированный временной ряд (трафик) для хоста 3: а) $\Delta t = 0.1$; б) $\Delta t = 1$

В нашем случае $n = 1$ для временного ряда, и, соответственно, фрактальная размерность D временного ряда связана с показателем степени его фрактальности (показателем Херста) H формулой $H = 2 - D$.

Таким образом, параметры самоподобия H и D представляют собой меры устойчивости статистического явления или меры длительности долгосрочной зависимости стохастического процесса.

Значения $H = 0.5$ или $D = 1.5$ указывают на независимость (отсутствие какой-либо памяти о прошлом) приращений временного ряда. Ряд является случайным, а не фрактальным. Чем ближе значение H к 1, тем выше степень устойчивости долгосрочной зависимости. Диапазон $0 < H < 0.5$ соответствует антиперсистентным рядам: если антиперсистентный ряд характеризовался ростом в предыдущем пери-

оде, то чем ближе показатель Херста к 0, тем с большей вероятностью в следующем периоде начнется спад. При значениях $0.5 < H < 1$ ряд демонстрирует персистентное (трендоустойчивое) поведение. Если персистентный ряд возрастал (убывал) в предыдущий период, то чем ближе показатель Херста к 1, тем с большей вероятностью будет сохраняться тенденция поведения этого ряда в течение такого же периода в будущем.

5. Метод мультифрактального детрендрованного флуктуационного анализа

При оценивании параметра H для самоподобных временных рядов используется метод детрендрованного флуктуационного анализа (ДФА) [5, 9]. В этом случае для исходного временного ряда $x(t)$ строится кумулятивный ряд

$$y(t) = \sum_{i=1}^n x(t),$$

который разбивается на N сегментов длиной s . Для каждого сегмента $y(t)$ вычисляется флуктуационная функция

$$F^2(s) = \frac{1}{s} \sum_{t=1}^s (y(t) - Y_m(t))^2, \quad (2)$$

где $Y_m(t)$ — локальный m -полиномиальный тренд в пределах данного сегмента.

Функция $F(s)$ усредняется по всему ряду $y(t)$. Такие вычисления повторяются для различных размеров сегментов, чтобы получить зависимость $F(s)$ в широком диапазоне значений параметра s . Для процессов с фрактальными свойствами с ростом s функция $F(s)$ также возрастает, и линейная зависимость $\log F(s)$ от $\log s$ свидетельствует о наличии свойства масштабной инвариантности:

$$F(s) \sim s^H, \quad (3)$$

При исследовании свойств мультифрактальных процессов применяется мультифрактальный флуктуационный анализ (МФДФА) [4, 5]. При проведении МФДФА исследуется зависимость флуктуационной функции $F_q(s)$ от параметра q :

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F^2(s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (4)$$

полученной возведением выражения (12) в степень q и последующим усреднением по всем сегментам.

Изменяя временную шкалу s при фиксированном показателе q , находим зависимость $F_q(s)$, представляя ее в двойных логарифмических координатах. Если

исследуемый ряд сводится к мультифрактальному множеству, проявляющему долгосрочные зависимости, то флуктуационная функция $F_q(s)$ представляется степенной зависимостью

$$F_q(s) \sim s^{h(q)}, \quad (5)$$

с функцией обобщенного показателя Херста $h(q)$. Из определений (2) и (4) следует, что при $q = 2$ этот показатель сводится к обычному значению H .

В представленной работе проведено исследование мультифрактальных характеристик агрегированного трафика данных. Оценка обобщенного показателя Херста для реализаций агрегированного трафика для нескольких хостов рассматриваемой модельной сети при одинаковом уровне агрегации $\Delta t = 0.1$ приведена на рис. 4, 5.

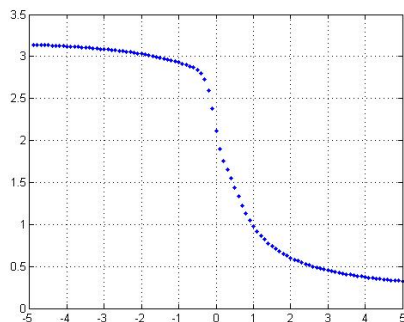


Рисунок 4. Функция $h(q)$ для реализаций временного ряда для хоста 2, $H = 0.62$

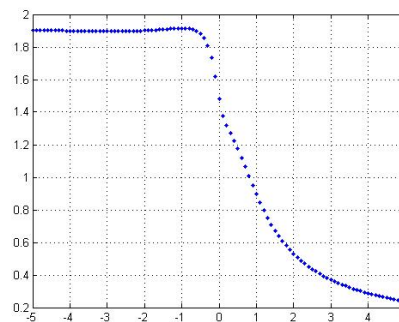


Рисунок 5. Функция $h(q)$ для реализаций временного ряда для хоста 3, $H = 0.55$

Проведенный анализ показал, что исследуемые реализации трафика обладают явно выраженными мультифрактальными свойствами: диапазон обобщенного показателя Херста $1.5 \leq \Delta h \leq 4$, причем мультифрактальная структура рядов существенно изменяется в зависимости от выбора хоста. Показатель Херста H практически во всех случаях превышает значение 0.5, что говорит о долгосрочной зависимости исследуемых рядов.

6. Максимальный показатель Ляпунова

Имея агрегированный временной ряд, можно посчитать максимальный показатель Ляпунова (Maximum Lyapunov Exponent, MLE) — величину, которая характеризует скорость разбегания близких траекторий, положительное значение которой обычно принимается как индикатор хаотического поведения системы. Вычисление максимального показателя Ляпунова производилось с помощью пакета утилит TISEAN [14], который предназначен для анализа временных рядов и основанный на

теории нелинейных детерминированных динамических систем или теории хаоса [7]. TISEAN представляет собой реализацию ряда алгоритмов теории хаоса. В данном случае для подсчета максимального показателя Ляпунова использовалась утилита lyap_k из пакета TISEAN. Результатом ее работы является набор данных, представляющих собой зависимость логарифма коэффициента разбегания траекторий от времени — $S(\varepsilon, m, \Delta n)$, который вычисляется следующим образом:

$$S(\varepsilon, m, \Delta n) = \frac{1}{N} \sum_{n_0=1}^N \ln \left(\frac{1}{|U(S_{n_0})|} \times \sum_{S_n \subset U(S_{n_0})} |S_{n_0+\Delta n} - S_{n+\Delta n}| \right), \quad (5)$$

где ε — окрестность точки S_{n_0} ; m — размерность фазового пространства; Δn — время; $U(S_{n_0})$ — окрестность точки S_{n_0} диаметра ε .

Если величина $S(\varepsilon, m, \Delta n)$ проявляет линейный рост с одинаковым уклоном в разумном диапазоне значений ε , тогда тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей этот участок, можно полагать приближенно равным максимальному показателю Ляпунова.

Как видно из графиков (рис. 6, 7), $MLE > 0$, что говорит о том, что рассматриваемая система проявляет хаотическое поведение.

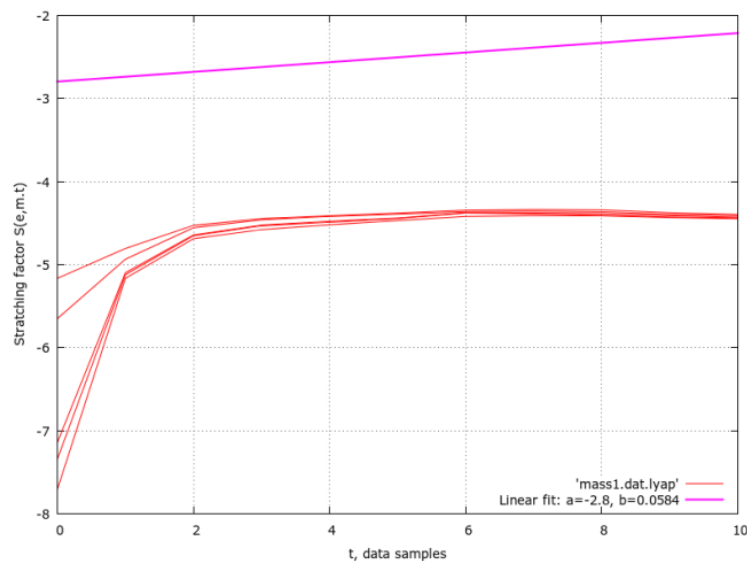


Рисунок 6. Вычисление показателя Ляпунова хоста 2 при $\Delta t = 0.1$, $\lambda \sim 0.0584$

Также был проведен сравнительный анализ между максимальным показателем Ляпунова и уровнем агрегации временных рядов, чтобы оценить, как эти два параметра коррелируют между собой. При разумном изменении шага агрегации временного ряда значение максимального показателя Ляпунова практически не менялось.

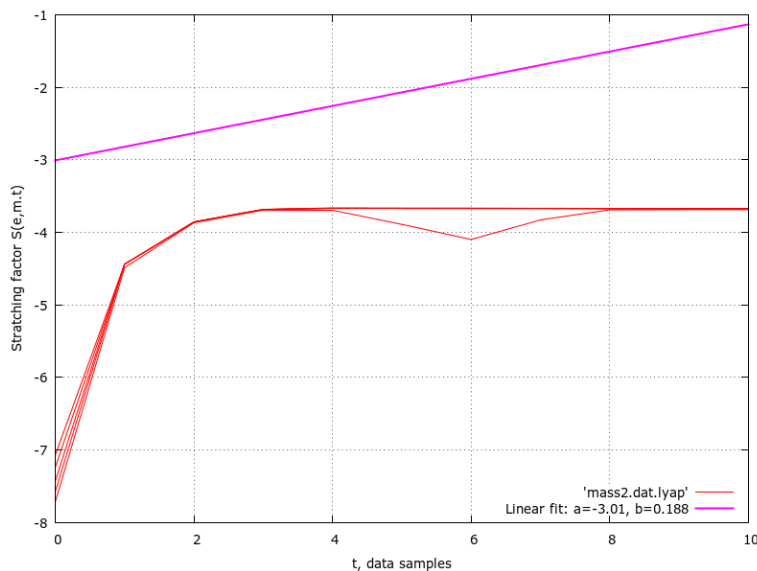


Рисунок 7. Вычисление показателя Ляпунова хоста 3 при $\Delta t = 0.1$, $\lambda \sim 0,188$

7. Выводы

В результате проведенного исследования проанализировано хаотическое поведение трафика в сетях с пакетной коммутацией при различных нагрузках, при взаимодействии нескольких потоков данных между собой в одном физическом канале передачи данных.

Изложенные в работе факторы накладывают ограничения на традиционные методы при проектировании современных компьютерных сетей, так как трафик обладает описанными самоподобными свойствами, в котором присутствуют многочисленные выбросы (bursts) по сравнению с общим уровнем трафика на всей временной оси. Поэтому игнорирование подобных особенностей может привести к увеличению задержки в передаче данных, уменьшению пропускной способности компьютерной сети и даже к потерям пакетов. Чтобы обеспечить надлежащий уровень качества обслуживания (QoS), необходимо прогнозирование поведения сетевого трафика. Проведенное в работе исследование сетевого трафика методом мультифрактального анализа показывает, что последний обладает явно выраженными мультифрактальными свойствами, а вычисленный максимальный показатель Ляпунова и показатель Херста могут охарактеризовать работу компьютерной сети в рамках данной модели.

Таким образом, данная методика дает возможность провести оценку влияния самоподобных процессов в современных компьютерных сетях, которые имеют «долгосрочную память», позволяя с определенной долей вероятности предсказать будущее поведение, обладая данными о недавнем прошлом.

Литература

- [1] Федер Е. Фракталы.— М. : Мир, 1991.
- [2] Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. On the self-similarity of ethernet traffic // IEEE/ACM Transactions of Networking. 1994. Vol. 2. P. 1–15.
- [3] Feng W., Tinnakornsrisuphap P. The Adverse Impact of the TCP Congestion-Control Mechanism in Distributed Systems // Proc. of International Conference on Parallel Processing (ICPP'00), 2000.
- [4] Kantelhardt J. W. Fractal and Multifractal Time Series // Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Ed.: R. A. Meyers. — New York : Springer, 2009. P. 3754–3779. (doi: 10.1007/978-0-387-30440-3_221)
- [5] Kantelhardt J. W., Koscielny-Bunde E., Rego H. H. A., Havlin S., Bunde A. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2001. Vol. 295. No. 3. P. 441–454. (doi: 10.1016/S0378-4371(01)00144-3).
- [6] Kantelhardt J. W., Zschiegner S. A., Bunde A., Havlin S., Koscielny-Bunde E., Stanley H. E. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2002. V. 316. No.1–4. P. 87–114. (doi: 10.1016/S0378-4371(02)01383-3).
- [7] Kantz H., Schreiber T. Nonlinear Time Series Analysis. 2nd edition. — Cambridge : Cambridge University Press, 2003.
- [8] Карпухин А. В. Особенности реализации протокола TCP в современных компьютерных сетях // Системы обработки информации. 2009. Вып. 6(80). С. 49–53.
- [9] Кириченко Л. О. Исследование выборочных характеристик, полученных методом мультифрактального флуктуационного анализа // Вестник НТУУ «КПИ». Информатика, управление и вычислительная техника. 2011. № 54. С.101–110.
- [10] Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы.— М.; Ижевск : ИКИ, 2002.
- [11] Никольчев Е. В., Паян С. В., Путиков Д. А., Плужник Е. В. Вычисление характеристик динамического хаоса по трафику компьютерных сетей // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–4. С. 812–816.
- [12] Петров В. В. Статистический анализ сетевого трафика.— М. : МЭИ, ИРЭ, 2003.
- [13] 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. P. 505–512. (doi: 10.4236/ijcns.2013.612054)
- [14] TISEAN — пакет программ и сопутствующая документация // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mpipks-dresden.mpg.de/~tisean/>
- [15] Шредер М. Фракталы, хаос и степенные ряды. Миниатюры из бесконечного рая.— Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотичкая динамика», 2005.
- [16] Wireshark — пакет программ и сопутствующая документация [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.wireshark.org/>

Авторы:

Карпухин Александр Владимирович — кандидат технических наук, доцент, в. н. с. кафедры прикладной математики Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Кириченко Людмила Олеговна — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Грицив Дмитрий Игоревич — аспирант физико-энергетического факультета Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

Ткаченко Александр Анатольевич — заместитель директора по маркетингу и продаже услуг Харьковский филиал (Ukrtelecom).

Application of Nonlinear Dynamics Methods and Fractal Analysis to Estimate the Operation of Infocommunication Systems with TCP Protocol

A. V. Karpukhin¹, L. O. Kirichenko¹,
D. I. Gritsiw², A. A. Tkachenko³

¹ Kharkov National University of Radio Electronics,
Lenin Ave, 14, Kharkov, 61166, Ukraine

² V.N. Karazin Kharkiv National University,
Svobody Sq. 4, 61022, Kharkiv, Ukraine

³ PJSC «Ukrtelecom», Ivanova str.,
7/9, 61002, Kharkiv, Ukraine
e-mail: kav-102@yandex.ru, ludmila.kirichenko@gmail.com,
dgritsiw@gmail.com

Abstract. In the following work issues of behaviour estimation of network traffic with self-similarity properties and obtained data analysis are being considered. The results that were obtained describe operation efficiency of a computer network. The purpose of the research was to define conditions of chaotic phenomena occurrence in infocommunication systems and the ways to decrease its impact on the bandwidth of such systems.

Currently the TCP protocol is a basic data transmission protocol and is considered to be the main reason of the traffic self-similarity property as the statistical characteristics due to fact that the traffic has the time-scale invariance property (self-similarity). This fact was confirmed by the numerous researches on the Internet network. In the following research, operation of the computer network has been estimated by means of multifractal analysis method and nonlinear dynamics methods which are used for simulation, analysis and examination of complex systems in various areas of science and technology. As the Internet network grows, the demand on transmission links is increasing and more strict requirements are applied to the quality of service (QoS). Since network traffic has the self-similarity property, ignoring such peculiarities may lead to the delay in data transmission increase, decrease of the computer network bandwidth and even packets loss. This may lead to certation limitations in established methods of modern computer networks designing.

In this paper a method of the computer networks efficiency analysis has been suggested which takes into consideration the peculiarity of the processes occurred. The given method makes it possible to predict further behaviour of network traffic if the key parameters change affecting the network operation as well as preventing network congestions and minimization of chaotic phenomena.

Key words: self-similarity, multifractality, chaos, congestion, loss of packets, TCP/IP.

Reference

- [1] *Feder J.* (1988) *Fractals*. New York, 1988. (doi: 10.1007/978-1-4899-2124-6)
- [2] *Feng W., Tinnakornsrisuphap P.* (2000) The Adverse Impact of the TCP Congestion-Control Mechanism in Distibuted Systems. *Proc. of International Conference on ParallelProcessing (ICPP'00)*.
- [3] *Kantelhardt J. W.* (2009) Fractal and Multifractal Time Series. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (ed. R. A. Meyers). New York: Springer, 3754-3779. (doi: 10.1007/978-0-387-30440-3_221)
- [4] *Kantelhardt J. W., Koscielny-Bunde E., Rego H. H. A., Havlin S. and Bunde A.* (2001) Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis. *Physica A*, 295. 441–454. (doi: 10.1016/S0378-4371(01)00144-3).
- [5] *Kantelhardt J. W., Zschiegner S. A., Bunde A., Havlin S., Koscielny-Bunde E. and Stanley H. E.* (2002) Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A*, 316, 87–114. (doi: 10.1016/S0378-4371(02)01383-3).
- [6] *Kantz H. and Schreiber T.* (2003) *Nonlinear Time Series Analysis*. Cambridge University Press.
- [7] *Karpuhin A. V.* (2009) Osobennosti realizacii protokola TCP v sovremennyh kompjuternyh setjah. *Sistemy obrabotki informacii*, 6(80). 49–53.
- [8] *Kirichenko L. O.* (2011) Issledovanie vyborochnyh harakteristik, poluchennyh metodom multifraktalnogo fluktuacionnogo analiza. *Vestnik NTUU «KPI». Informatika, upravlenie i vychislitel'naja tehnika*, 54, 101–110. (rus)
- [9] *Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W. and Wilson D.V.* (1994) On the self-similarity of ethernet traffic. *IEEE/ACM Transactions of Networking*, 2(1), 1-15.
- [10] *Mandelbrot B. B.* (1982) *The fractal geometry of nature*. San Francisco: W.H. Freeman.
- [11] *Nikulchev E. V., Pajain S. V., Pitikov D. A. and Pluzhnik E. V.* (2014) Vychislenie harakteristik dinamicheskogo haosa po trafiku kompjuternyh setej. *Fundamentalnye issledovaniya*. 8–4, 812–816. (rus)
- [12] *Petrov V. V.* (2003) *Statisticheskij analiz setevogo trafika*. Moscow. (rus)
- [13] *Pluzhnik E. V., Nikulchev E. V.* (2013) Use of dynamical systems modeling to hybrid cloud database. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 6 (12), 505–512. (doi: 10.4236/ijcns.2013.612054)
- [14] *Shreder M.* (2001) *Fractals, Chaos, and Power Laws: Miniatures from Infinite Paradise*. Izhevsk: Nauchn. Issledov. Tsentr “Regul. Khaot. Din.” (rus)
- [15] TISEAN (<http://www.mpi-pks-dresden.mpg.de/~tisean/>)
- [16] Wireshark (<http://www.wireshark.org/>).

УДК 004.42

Разработка программных средств апробации алгоритмов проектирования информационных структур

А. Ю. Громов, А. И. Баранчиков

*Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1,
e-mail: alexib@inbox.ru*

Аннотация. Для исследования алгоритмов построения схем реляционных баз данных необходимо значительное количество тестовых данных. Предлагается свести задачу генерации входных данных к генерации формализованной предметной области, что обеспечивает необходимый объем данных без учета смысла сгенерированной семантической информации. Разработан алгоритм генерации предметных областей с различными количественными характеристиками.

Ключевые слова: предметная область, семантические зависимости, реляционные базы данных, атрибут, транзитивность.

При разработке алгоритмов построения схем баз данных, кроме проверки их сходимости и расчета временной сложности, возникает задача статистического анализа путем экспериментальных исследований.

Под экспериментальными исследованиями понимается многократное применение разработанных алгоритмов к различным наборам входных данных, как для проверки их корректности, так и для анализа эффективности, при изменяемых уровнях факторов экспериментов.

Так как экспериментальные исследования предусматривают применение разработанных алгоритмов к различным входным наборам данных (предметным областям), причем для достоверных результатов исследований необходим достаточно большой набор предметных областей, то возникает проблема предоставления входных данных.

Проблема состоит в том, что необходим банк БД, содержащий тысячи предметных областей.

Возникает задача генерации достаточного количества предметных областей с различными характеристиками для исследования алгоритмов построения схем РБД.

Цель работы. Для решения поставленной задачи предлагается алгоритм генерации предметных областей с различными количественными характеристиками. Можно упростить генерацию входных данных и свести данную задачу к генерации

формализованной предметной области, не уделяя внимания смыслу сгенерированной семантической информации.

Рассмотрим основные параметры, характеризующие предметную область (в контексте решаемой задачи) [1].

1. Общее количество входных атрибутов $A \in \mathbf{A}$. От общего количества a входных атрибутов A зависит как временная сложность реализации алгоритма построения РБД, так и сложность набора входных зависимостей $U \in \mathbf{U}$ (множество семантических зависимостей \mathbf{U} , состоящее из подмножеств F-зависимостей \mathbf{F} , MV-зависимостей \mathbf{MV} и J-зависимостей \mathbf{J} , причем $\mathbf{U} = \mathbf{F} \cup \mathbf{MV} \cup \mathbf{J}$).

2. Количество семантических зависимостей различных типов.

3. Количество атрибутов $A \in \mathbf{A}$ в каждой зависимости. Данный параметр влияет на сложность зависимостей $U \in \mathbf{U}$, так же от него зависит временная сложность обработки каждой зависимости.

4. Глубина транзитивности входного набора функциональных зависимостей $F \in \mathbf{F}$. От глубины транзитивности зависит сложность связей между функциональными зависимостями $F \in \mathbf{F}$, а значит и временная сложность обработки этих связей.

5. Количество атрибутов в детерминантах каждой зависимости $F \in \mathbf{F}$.

6. Количество признаков ранжируемости $Y_i \in \mathbf{Y}$ входных атрибутов $A \in \mathbf{A}$.

7. Количество атрибутов каждого признака ранжируемости A_{Y_i} в каждой зависимости $U \in \mathbf{U}$.

Количественные характеристики предметных областей, используемые при генерации. Далее будет рассмотрена генерация формализованной предметной области с заданием следующих количественных характеристик:

- количество каждого вида зависимостей: F-зависимостей \mathbf{F} , MV-зависимостей \mathbf{MV} и J-зависимостей \mathbf{J} ;
- количество уровней ранжируемости $Y_i \in \mathbf{Y}$;
- количество атрибутов каждого признака ранжируемости $A_{Y_1}, A_{Y_2}, \dots, A_{Y_n}$ таких, что $\mathbf{A} = A_{Y_1} \cup A_{Y_2} \cup \dots \cup A_{Y_n}$;
- количество атрибутов в каждом типе зависимостей.

Общее количество атрибутов в предметной области может быть рассчитано из количества атрибутов каждого признака ранжируемости $A_{Y_1}, A_{Y_2}, \dots, A_{Y_n}$. Количество атрибутов в детерминантах F-зависимостей рандомизировано с помощью равновероятной принадлежности атрибута как левой, так и правой части F-зависимости. Глубина транзитивности реализована рандомизацией атрибутов в F-зависимостях, однако данный фактор является неуправляемым и случайным.

Сформулируем *требования к алгоритму генерации предметных областей*:

1. Сгенерированный набор данных должен включать:

- множество атрибутов $\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$;
- множество семантических зависимостей \mathbf{U} , включающих данные атрибуты, состоящее из подмножеств F-зависимостей \mathbf{F} , MV-зависимостей \mathbf{MV} и J-зависимостей \mathbf{J} , причём $\mathbf{U} = \mathbf{F} \cup \mathbf{MV} \cup \mathbf{J}$;
- множество признаков ранжируемости $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ и соответствующие множества атрибутов каждого ранга $\mathbf{A} = \mathbf{A}_{Y_1} \cup \mathbf{A}_{Y_2} \cup \dots \cup \mathbf{A}_{Y_n}$.

2. Допускается наличие атрибутов, не входящих в какие-либо зависимости.

3. Должна иметься возможность управления количественными характеристиками генерируемых формализованных предметных областей.

Рандомизация количественных параметров. В соответствии с принципами теории планирования эксперимента, касающимися рандомизации и отказа от полного перебора возможных уровней факторов эксперимента [2], в качестве инструмента рандомизации количественных параметров формализованной предметной области используются законы распределения случайной величины (равномерный, нормальный, показательный закон и закон Рэлея).

Для реализации псевдослучайных последовательностей выбранных законов распределения используются обратные функции [3] (преобразование Н.В. Смирнова) с применением стандартной равномерной последовательности [для показательного распределения по формуле (1), нормального распределения по формуле (2) и распределения Рэлея по формуле (3)]:

$$x_i = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln r_i,$$

где x_i — реализация псевдослучайной величины; λ — параметр показательного распределения; r_i — реализация случайной величины, распределенной равномерно на интервале (0,1);

$$x_i = \sqrt{\frac{12}{n}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n r_i - \frac{n}{2} \right);$$
$$x_i = a \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln r_i},$$

где a — параметр масштаба.

На основе описанных способов получения псевдослучайных последовательностей чисел с различными законами распределения предлагается алгоритм генерации формализованной предметной области с заданными параметрами (рис. 1).

Вход: параметры законов распределения для задания количественных характеристик генерируемой формализованной предметной области.

Выход:

- множество атрибутов $\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$;
- множество признаков ранжируемости $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ и соответствующие множества атрибутов каждого ранга $\mathbf{A} = \mathbf{A}_{Y_1} \cup \mathbf{A}_{Y_2} \cup \dots \cup \mathbf{A}_{Y_n}$;

- множество семантических зависимостей U , состоящее из подмножеств F-зависимостей F , MV-зависимостей MV и J-зависимостей J , причем $U = F \cup MV \cup J$ (F , MV , J — непересекающиеся множества семантических зависимостей).

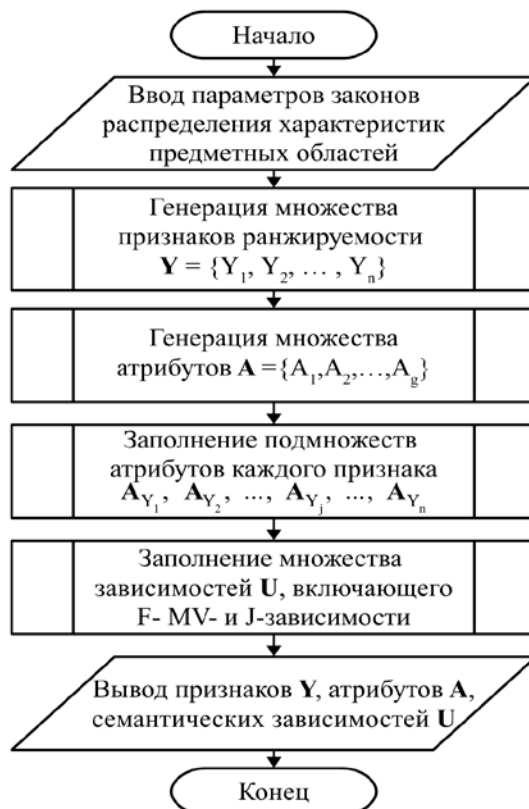


Рисунок 1. Алгоритм генерации предметных областей

Под параметрами законов распределения понимаются:

- для равномерного закона распределения: границы отрезка;
- для нормального закона распределения: математическое ожидание μ случайной величины X ;
- для показательного закона распределения: параметр масштаба λ ;
- для закона распределения Рэлея: параметр масштаба a .

Формирование семантических зависимостей происходит следующим образом:

- выборка произвольного атрибута с номером N_A из множества сгенерированных атрибутов (используется равномерное распределение случайной величины);

- добавление некоторого сгенерированного атрибута \mathbf{A} с номером N_A в зависимость $U_i (F_i, MV_i, J_i)$. При этом предусматривается его равновероятное попадание в любую часть зависимости.

Так как количество генерируемых множеств уровней ранжируемости \mathbf{Y} , атрибутов \mathbf{A} и зависимостей \mathbf{U} является ограниченным, то их заполнение происходит за конечное число шагов, а значит, алгоритм является сходящимся.

Под элементарной операцией будем понимать шаг алгоритма. Пусть n — максимально допустимое значение любой из используемых в алгоритме количественной характеристики предметной области. Тогда временную сложность алгоритма можно оценить следующим образом:

- не более чем за $(1 + n \cdot (n + 3))$ шагов происходит заполнение множеств атрибутов $\mathbf{A} = \{A_{Y_1}, A_{Y_2}, \dots, A_{Y_i}, \dots, A_{Y_n}\}$ и признаков $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$;
- не более чем за $3 \cdot (1 + n \cdot (2n + 2))$ шагов происходит заполнение множества зависимостей

$$\mathbf{U} = \mathbf{F} \cup \mathbf{M}\mathbf{V} \cup \mathbf{J},$$

где $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, $\mathbf{M}\mathbf{V} = \{MV_1, MV_2, \dots, MV_n\}$, $\mathbf{J} = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$, причем в каждой зависимости содержится по n атрибутов.

Тогда временную сложность алгоритма можно оценить как

$$S = 1 + n^2 + 3n + 3 + 2n^2 + 2n = 3n^2 + 5n + 4. \quad (1)$$

Временная сложность алгоритма по формуле (1) имеет порядок $O(n^2)$.

Цели экспериментального исследования:

- оценка корректности синтезированных схем реляционных баз данных, включающая:
 - проверку синтезированной схемы РБД на удовлетворение условиям нормализации;
 - проверку синтезированной схемы РБД на удовлетворение условиям наличия ранжируемых атрибутов;
- оценка временных характеристик исследуемых алгоритмов в зависимости от различных параметров входных данных;
- сравнение разработанных алгоритмов, основанных на синтезе отношений, с классическим алгоритмом синтеза с точки зрения временных затрат;
- сравнение длительности обработки запросов к спроектированным схемам РБД с учетом ранжируемых атрибутов и без него.

Исходя из поставленных целей формулируются отклики экспериментов. Результаты эксперимента с равномерным распределением уровней факторов, на основе проведения 1600 опытов, приведены на рис. 2.

Проведен анализ задачи генерирования формализованных предметных областей, необходимых для экспериментальных исследований алгоритмов построения схем РБД.

С точки зрения использования принципа рандомизации при задании уровней факторов наиболее предпочтительным является равномерный закон распределения, так как при условии достаточного числа опытов позволяет проработать наибольшее количество комбинаций уровней факторов эксперимента.

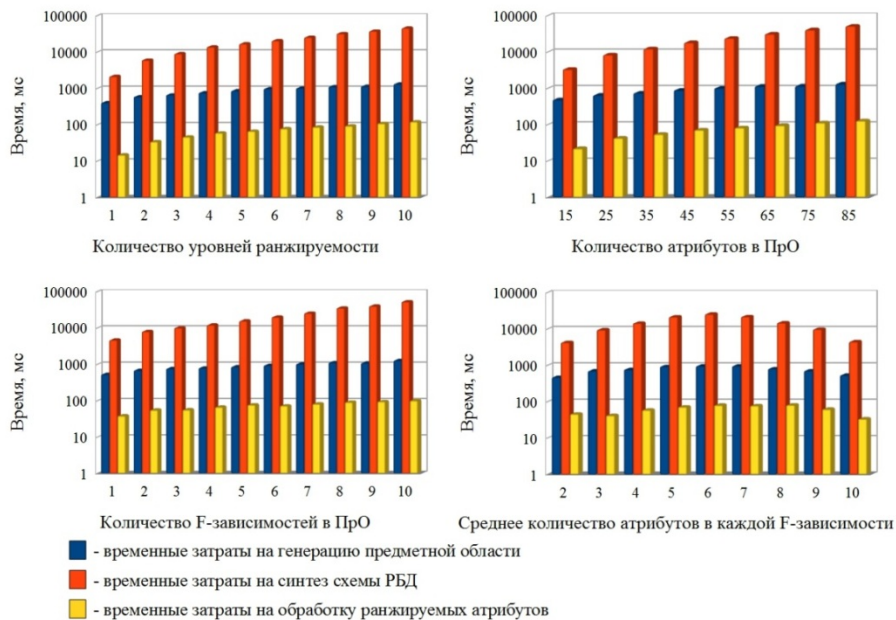


Рисунок 2. Результаты проведения эксперимента с равномерным распределением уровней факторов

Разработан алгоритм, позволяющий генерировать формализованные предметные области с заданными количественными характеристиками и автоматизировать процесс исследования временных характеристик алгоритмов построения схем РБД. Разработана программа для ЭВМ, включающая модуль генерации формализованных предметных областей.

Литература

- [1] Баранчиков А. И., Громов А. Ю. Алгоритм генерации формализованной модели предметной области // Вестник РГРТУ. 2010. № 33. С. 45–49.
- [2] Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента.— Минск : Изд-во БГУ, 1982.
- [3] Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям.— СПб. : Изд-во «Наука», 2001.

Авторы:

Громов Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета.

Баранчиков Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета.

Development of Software for Testing Algorithms Design Information Structures

A. Ju. Gromov, A. I. Baranchikov
Ryazan state radio engineering university
390005, Gagarina Str, 59/1. Ryazan, Russia.
E-mail:

Abstract. We suggest an algorithm for the generation of domains with different quantitative characteristics for solving the problem of providing a sufficient amount of test data required for the study of algorithms for constructing a relational database schema.

Key words: subject domain, semantic dependencies, correlations-tional database, the attribute is transitive.

Reference

- [1] *Burkov V. N., Korgin N. A., Novikov D. A. (2008) Vvedenie v teoriju upravlenija organizacionnymi sistemami. Moscow, URSS. (rus)*
- [2] *Andreev M. J., Pospelov I. G., Pospelova I. I., Hohlov M. A. (2007) Tehnologija modelirovanija jekonomiki i model sovremennoj jekonomiki Rossii. Moscow, MIFI. (rus)*
- [3] *Eliseeva I. I. (2003) Jekonometrika. Moscow, Finansy i statistika. (rus)*

УДК 004.934

Система обработки движения губ человека для речевого ввода информации

Е. Е. Ковшов, Т. А. Завистовская

*Московский государственный технологический университет «Станкин»
127055, Москва, Вадковский пер., 3А,
e-mail: e.kovshov@stankin.ru*

Аннотация. В статье рассматривается способ формирования текстовых сообщений на основе детектирования движения губ, соответствующих определенной фонеме. Построена геометрическая модель лица человека на основе метода активного контура и реализован макет программного обеспечения, автоматически определяющий дескрипторы рта.

Ключевые слова: человеко-компьютерный интерфейс, обработка изображений, чтение по губам, визема, идентификация лица человека, распознавание контуров губ, формирование текстовых сообщений.

1. Введение

Одним из приоритетных направлений развития информатизации является человеко-машинный интерфейс [6], разработка которых охватывает множество областей науки и прикладных научных дисциплин.

Основным способом общения и передачи информации для человека была и остается речь, поэтому надежный ввод речевой информации является актуальным направлением совершенствования человеко-компьютерных интерфейсов. На пути практического применения систем речевого ввода информации имеются существенные технические трудности, связанные со сложностями реализации автоматических распознавателей речи, основанных на обработке устной речи человека. Даже у самых надежных систем точность работы резко ухудшается при искажении звуковой информации шумами и помехами различной природы. К ним можно отнести шумы в помещении, разговоры других пользователей, посторонние акустические сигналы и т. п. Очевидно, больше всего на развитие речевого управления оказывают влияние проблемы, связанные с распознаванием индивидуальных особенностей человеческой речи.

При распознавании речи целесообразно также использовать и другой коммутационный канал, а именно — зрение. В речевом восприятии отслеживается связь между слуховой и зрительной информацией, в процессе передачи информации в устной форме она воспринимается не только с помощью сенсорной модальности — звука, но и благодаря зрению. Визуальная информация представляет собой «зри-

тельное» восприятие человеческой речи системой компьютерного зрения, визуальная система ввода информации позволит упростить и автоматизировать речевой ввод. Основным способом извлечения данных о речи из видеоинформации является формализованная процедура чтения по губам с помощью анализа изменения носогубных мышц лица. Главным источником получения входных данных для анализа изменения мышц лица при разговоре является поиск характерных точек или областей, в частности распознавание контуров губ.

Таким образом, актуальной является задача разработки кроссплатформенной информационной системы, способной детектировать движения губ, изменяющихся соответственно фонеме, и записывать визему в виде текстовой информации для дальнейшей обработки в модуле экспертной системы.

2. Алгоритмы и методы распознавания контуров губ на изображении

В большей части исследований, посвященных задаче распознавания речи, поиск контуров губ осуществляется с помощью активных контурных моделей. Существует и другой возможный способ получения информации о губах, заключающийся в выделении особенностей области рта без поиска характерных точек. В нашей стране вопросом распознавания контуров дольше всего и с наиболее содержательными научно-практическими результатами занимается группа исследователей факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ. В работе [10] предметом анализа в задаче распознавания контуров губ в видеопотоке являются цветные изображения при условии фронтального расположения лица. Для улучшения качества распознавания выделяются два цветовых класса — кожа и губы. В используемом двумерном цветовом пространстве на основе выделенных на изображениях областей находятся двумерные гистограммы. Предполагая приблизительный размер области губ, на изображении осуществляется поиск области, соответствующей площади цветового пространства, выделенного на предыдущем этапе. На данном этапе вычисляются приблизительные координаты центра области губ, которая затем ограничивается эллипсом с помощью статистических методов. На следующем этапе определяются характеристики формы губ, нужных для последующего распознавания. Контур уточняется с помощью алгоритма радиального расширения. В качестве начального приближения для контура используются точки на эллипсе, полученном на предыдущем этапе.

Применение подобного метода является иррациональным, поскольку алгоритм хоть и дает приемлемые результаты при меньшем числе итераций, его работа требует больших вычислительных затрат и аппаратных ресурсов. В свою очередь, модель активного контура позволяет обнаружить и определить элементы лица (брови, нос, овал лица) без предварительной обработки изображения на предмет поиска области рта на основе цветового пространства. Данное обстоятельство является безусловным преимуществом по сравнению с описанным ранее подходом, т. к. алгоритм деформируемого эталона работает с лицами людей различных рас и цвета

кожи благодаря тому, что в основу метода активного контура заложены форма лица и анатомические особенности расположения его элементов.

Идентификация лиц и его элементов на основе цветовой информации и последующем поиске области рта и уточнения его формы не требует специальных априорных знаний о структуре (форме) элементов лица, в то время, как методика, основанная на их характеристиках, дает значительную скорость распознавания, не требуя при этом специализированного программно-аппаратного обеспечения и больших объемов памяти.

Метод активного контура (МАК) позволяет идентифицировать лицо человека на изображении и выделить совокупность точек, характеризующих черты лица. Именно априорное знание координат характерных точек позволит следить за их изменением в видеопотоке для дальнейшей обработки их значений в модуле экспертной системы.

МАК требует наличия первоначального контура, который последовательно уточняется. Поиск контура выполняется путем решения задачи минимизации функции энергии, рассчитываемой для каждой точки контура v_i и точек из ее локальной окрестности. Эта энергия состоит из внешней энергии (External Energy) $E_{ext}(v_i)$, зависящей от свойств изображения (градиента, яркости), и внутренней энергии (Internal Energy) $E_{in}(v_i)$, зависящей от формы контура. Деформация контура осуществляется путем перемещения точки v_i в точку окрестности с минимальной энергией. Функция внутренней энергии определена следующим образом:

$$E_{in}(v_i) = cE_{con}(v_i) + bE_{bal}(v_i), \quad (1)$$

где $E_{con}(v_i)$ — энергия непрерывности (Continuity Energy), которая описывает форму контура; $E_{bal}(v_i)$ — энергия надувания (Balloon Energy), которая заставляет контур растягиваться или сжиматься; c , b — весовые коэффициенты влияния энергий.

В отсутствие других влияний, энергия непрерывности $E_{con}(v_i)$ деформирует контур, он может быть как открытым, так и закрытым. Энергия надувания $E_{bal}(v_i)$ заставляет контур расширяться (или сжиматься) в отсутствие других воздействий. Энергия надувания является наименьшей в точках, наиболее удаленных от v_i в направлении вектора нормали.

Функция внешней энергии притягивает контур к перепадам или экстремумам:

$$E_{ext}(v_i) = mE_{mag}(v_i) + gE_{grad}(v_i), \quad (2)$$

где $E_{mag}(v_i)$ — энергия интенсивности изображения (Image Intensity Energy), притягивающая контур к областям с высокой или низкой интенсивностью; $E_{grad}(v_i)$ — энергия градиента изображения (Image Gradient Energy), которая перемещает контур к перепадам интенсивности; m , g — весовые коэффициенты.

МАК, который еще называют моделью «змеи», определяется как энергетически минимальный сплайн, обучаемый введением внешних притягивающих вынужденных потенциалов и влиянием интенсивности и градиента самого изображения. Эти потенциалы натягивают полученный сплайн на элементы лица, основываясь на характеристиках линий и краев. «Змеи» фиксируются на ближайших краях и более аккуратно и точно локализируются в последующем.

Применение этого метода к лицу человека реализуется при помощи библиотеки STASM 3.0, функционал которой позволяет выделить совокупность 76 точек, определяющих черты лица (рис. 1).

Используя работы известного психолога и профессора Калифорнийского университета Пола Экмана, было выявлено, что выражение лица, определяемое «как уставое или сонное», проявляется в опущенных веках, в данном состоянии «появляется зевота»; чувство раздражения характеризуют «сжатые и суженные губы», тогда как при сдерживаемом гневе «брови опускаются и сводятся вместе» [3, 4].

«Вообще, поднятие или опускание бровей является наиболее частым мимическим выражением... Дарвин назвал мышцу, сводящую брови вместе и опускающую их вниз, мышцей затруднения. Он был прав, полагая, что ее движение сопровождается всевозможные затруднения, начиная от поднятия тяжестей и заканчивая выполнением сложных арифметических действий. Кроме того, это характерно еще для сосредоточения и замешательства». Верными признаками эмоций также являются и мышцы рта. «Сжатие губ является убедительным признаком гнева...». Такое движение большинство людей могут воспроизвести с трудом, и обычно оно бывает только у «начинающих сердиться, порой даже еще до того, как они сами отдадут себе отчет в этом».

Помимо отрицательных эмоций существуют «эмоции удовольствия, каждая из которых универсальна» и каждая из которых отличается от остальных. Так, удовольствие характеризуется «более широкой улыбкой», но в отличие от прочих улыбок, она «поднимает щеки кверху, собирает в складки кожу под глазами, уменьшает степень открытия глаз и даже вызывает появление морщинок под названием «куриные лапки» [2].

Основываясь на полученной информации, из всей совокупности точек активного контура были выделены 15 базовых точек для построения геометрической модели, которая представлена на рис. 2.

Из данной модели можно выделить параметры, характеризующие психологическое состояние человека, — дескрипторы. Дескрипторами в данном случае являются углы, образованные отрезками, проведенными между выделенными ранее базовыми точками. Изменение углов A_0 , A_1 и A_2 характеризует состояние напряженности, «затруднения». Изменения же углов A_3 , A_6 , A_7 и A_8 , а также отрезка 10, длина которого в данном случае также является дескриптором, показывают степень сжатия губ или возможное присутствие «зевоты». Углы A_3 и A_4 определяют, насколько открыты глаза. На рис. 3 приведены примеры характерных изменений дескрипторов при различных эмоциональных состояниях человека.

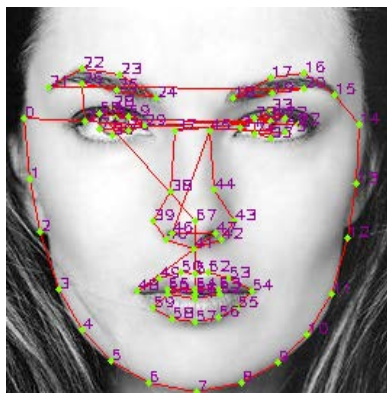


Рисунок 1. Применение активного контура к лицу человека

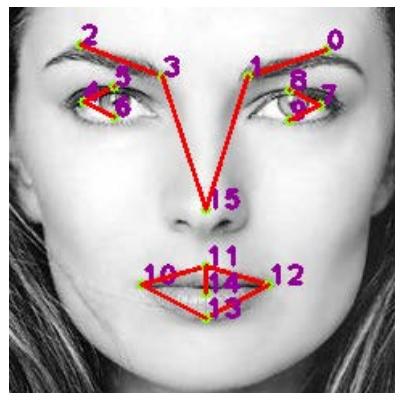


Рисунок 2. Геометрическая модель лица

Данные углы были вычислены с помощью формулы (3):

$$\cos \varphi = \frac{a_1^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_1a_2}, \quad (3)$$

где a_1 , a_2 — расстояние от крайних точек до точки пересечения прямых соответственно. Например, в случае угла A1 между прямыми, образованными точками 2, 3 и 15, это будут расстояния от 2 до 3 и от 3 до 15 соответственно; a_3 — расстояние между крайними точками. В случае угла A1 это точки 2 и соответственно.

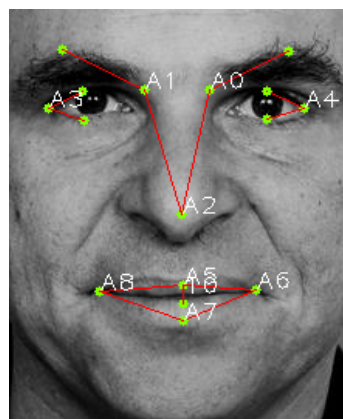
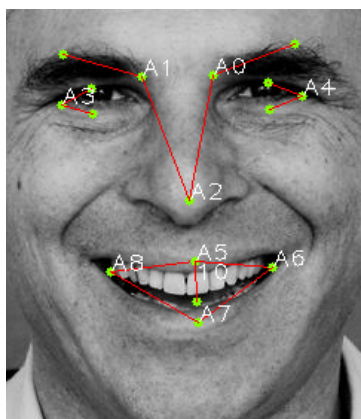


Рисунок 3. Изменение характерных параметров лица при различных эмоциях

Таким образом, геометрическая модель с определенными дескрипторами показана на рис. 4. Для реализации данного приложения была использована кросс-платформенная библиотека классов C++ — Qt 4, а также библиотека компьютерного зрения OpenCV 2.2.0.

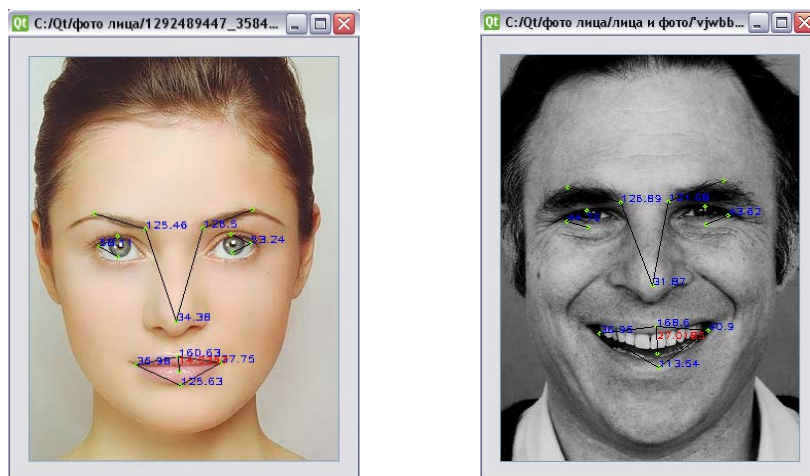


Рисунок 4. Геометрическая модель с определенными дескрипторами

В рамках представленной работы построена геометрическая модель человеческого лица, на основе которой были выделены дескрипторы. Анализируя значение дескрипторов на фотографии, а впоследствии, и изменение их значений на видеозаписи, можно определить эмоциональное состояние человека. Для этого могут использоваться различные интеллектуальные методы и средства: аппарат нечеткой логики или нечеткие нейронные сети [6].

В настоящий момент существует несколько программно-аппаратных разработок, использующие информацию движения губ. Исследователи немецкого технологического института (Germany's Karlsruhe Institute of Technology, KIT) создали систему, которая преобразовывает движения рта в синтезируемую речь. В ее основу легла технология электромиографии, т. е. мониторинга сигналов мышечной активности с помощью электродов, вводимых в мышечные волокна. Специальное программное обеспечение (ПО) на портативном мобильном компьютере преобразовывает эти сигналы в текст, который потом и «озвучивается». Недостатком данной разработки является обилие электродов, которые прикрепляются на лицо и другие части тела человека.

В Великобритании представили технологию, которая на основании визуального анализа мимики определяет язык, на котором говорит человек, а затем расшифровывает его речь. Программа может идентифицировать наиболее распространенные языки. Разработка этой технологии осуществлялась британским исследовательским советом инженерных и физических наук. Недостатком данной системы является большая база данных (более 500 вариантов артикуляции для каждой языковой группы).

В США исследователи создали ПО, способное научить говорить и воспринимать речь посредством чтения по губам. Исследователями под руководством Рона Кола (Ron Cole) из Университета Колорадо (University of Colorado, Boulder) создана компьютерная программа, способная помочь глухим детям научиться говорить и

воспринимать речь посредством зрительного восприятия. Обучение проводит синтетический персонаж — анимированный инструктор по прозвищу Baldi. «Недостатками» Baldi являются низкое качество артикуляции и мимики лица, а недостатком самой информационной системы — невозможность смены лица персонажа.

В США ожидается выход игрового контроллера Kinect 2 с приставкой Xbox 720. Kinect 2 будет обладать впечатляющей точностью отслеживания малейших движений пользователя: сможет распознавать эмоции игрока, а также считывать информацию по губам. Одним из факторов, негативно влияющих на точность считывания движений в существующей версии Kinect, является медленное USB соединение. К недостаткам можно также отнести высокую стоимость программного обеспечения.

Исходя из проведенных исследований различных программных библиотек и аппаратных решений, предлагается концепция информационной системы (далее — системы) коммуникации, призванной аккумулировать достоинства существующих разработок программного обеспечения и избежать их недостатков. Система представляет собой программное обеспечение, детектирующее изменение мышц губ, соответствующее определенной фонеме, — визему и записывающее ее в виде текстовой информации. В объектно-реляционной базе данных хранятся видимые образы, соответствующие фонемам, вместе с характерными для них дескрипторами, которыми являются углы, образованные отрезками геометрической модели лица или маски, накладываемой на лицо человека. Приложение, работающее с видеокamerой (веб-камерой), следит за изменением движений губ в видеопотоке, сопоставляя полученную информацию с базой данных. В результате транслирования движения губ на выходе системы будет записано текстовое сообщение — текст речи.

Чтение по губам затруднено тем, что в русском языке значительное число фонем имеет почти одинаковые видимые образы (виземы). Каждому речевому звуку (фонеме) соответствует специфическое выражение лица, положение рта, губ, а некоторые согласные, воспроизводимые во рту или горле, и вовсе не обнаруживаются визуально. Тем самым, предлагается детектировать изменение мышц рта при произношении слов и распознавать среди совокупности визем те, которые соответствуют фонемам гласных букв, так как их виземы, различные и не похожие друг на друга, а также требуют четкой артикуляции.

Для решения задачи распознавания визем, соответствующих фонемам гласных букв, найдет применение аппарат нечеткой логики. Входными параметрами являются значения дескрипторов, а выходным гласная буква, которая была «проговорена». Для формирования правил экспертной системы введены нечеткие переменные, множество их значений (термов) и соответствующие функции принадлежности. Для каждого дескриптора имеется следующее терм-множество: {«малый», «средний», «большой»}, а для нечеткой переменной «гласная буква» — {«А», «У», «О», «Э», «И»}. Следует обратить внимание, что терм-множество, описывающее возможные значения «гласной буквы», не содержит букв «Е», «Е», «Ю» и «Я», так как их виземы характеризуются фонемами «йО», «йЭ», «йУ» и «йА» соответственно, которые визуально полностью повторяют фонемы букв «О», «Э», «У» и «А». Для

термов всех нечетких переменных (дескрипторы, «гласная буква») выбрана функция принадлежности $y = f(x)$, имеющая форму трапеции, изображенной на рис. 5, и следующие индивидуальные параметры:

- А — значение левой координаты x терма, в которой $y = 0$;
- В — значение левой координаты x терма, в которой $y = 1$;
- С — значение правой координаты x терма, в которой $y = 1$;
- D — значение правой координаты x терма, в которой $y = 0$.

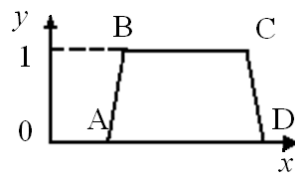


Рисунок 5. Вид функции принадлежности для термов переменных нечеткой логики

Для каждого дескриптора существует свой диапазон значений множества термов {«малый», «средний», «большой»}, где каждый из них представляет собой некоторый интервал значений углов в градусах, значения функции принадлежности которых лежат в диапазоне $0 \leq F(I) \leq 1$.

На рис. 6 приведены примеры для термов и функций принадлежности переменной «гласная буква».

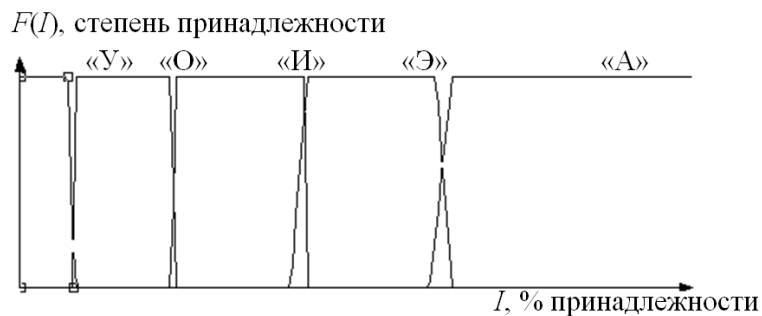


Рисунок 6. Множество термов нечеткой переменной «гласная буква»

Функции принадлежности для каждой из термов имеют различный вид. Для их построения проанализирован технический текст статьи на промышленную тему, состоящий из 112 слов, в котором было использовано 843 символа, 371 из которых — гласные буквы. В тексте было подсчитано общее число фонем каждого терма, т. е. счет велся с условием произношения слов, это означает, что в случае если гласная безударная, она может произноситься иначе: например, слово «корова», по правилам орфографии пишется через букву «О», а читается как «кАрова». Полу-

ченное число отражает, как часто встречается данная фонема в тексте, т. е. какой процент данная гласная буква занимает среди общего количества гласных в тексте. Например, буква «А», ее фонема встречалась 123 раза, это почти треть всех гласных в тексте (33%). Таким образом, фонема буквы «А» чаще всего встречается в тексте, и ее функция принадлежности самая широкая, что увеличивает вероятность попадания в данную область результата нечеткого вывода (значение переменной «гласной буквы») при распознавании речи по губам.

В базе правил нечетких продукций находятся лингвистические правила, определяющие комбинации углов с характерной термой для описания виземы гласной буквы. Данные правила имеют вид: «**Если условие, то заключение**». Нечеткий вывод будет базироваться на подзаключениях, получаемых при выполнении правил согласно начальным подусловиям, например:

Если дескриптор_1 **есть** *малый* **И** дескриптор_2 **есть** *средний*, **то** гласная буква **есть** «А»;

Если дескриптор_3 **есть** *малый* **И** дескриптор_4 **есть** *большой*, **то** гласная буква **есть** «А»; и т. д.

Применяя правила нечетких продукций, система нечеткого вывода позволит дать однозначный или «четкий» ответ на вопрос о принадлежности виземы к фонеме гласной буквы, произнесенной пользователем (оператором).

Применение аппарата нечеткой логики или искусственных нейронных сетей для задачи распознавания визем оправданно, поскольку лицо человека индивидуально: артикуляция и мышечная активность каждого человека неповторимы и уникальны, а это означает, что и значения дескрипторов для каждой из визем неоднозначны.

Информационная система после распознавания визем «предугадывает» какое слово было произнесено пользователем. Используя встроенный словарь, система предлагает вставить согласные буквы между гласными до слова, имеющего семантику.

3. Макет программного обеспечения

Как отмечалось ранее, основным способом извлечения данных о речи из видеоинформации является анализ движений губ или чтение по губам. Главным источником получения входных данных для поставленной задачи является поиск характерных точек или областей, в частности распознавание контуров губ. Для поставленной цели был выбран МАК, позволяющий идентифицировать лицо человека на изображении и выделить совокупность точек, характеризующих черты лица [8]. Из всей совокупности выбраны характерные точки и соединены таким образом, чтобы образованные ими углы (дескрипторы) однозначно определяли изменение мышц губ.

Геометрическая модель была построена на основе работы в области распознавания эмоций, созданной известными учеными П. Экманом и У. Фризенном, —

«Эмоциональная система кодирования лицевых движений» (СКЛИД) [9]. На рис. 7 приведена геометрическая модель лица.

На основе геометрической модели лица человека были выделены те дескрипторы, которые однозначно определяют изменение мышц рта при разговоре. Данные дескрипторы приведены на рис. 3а. Углы 1, 2, 3, 6 характеризуют круговую мышцу рта; углы 7, 8 — малую скуловую мышцу; значения углов 10, 9 определяют изменение щечной мышцы; 4, 0 — мышцы, опускающей угол рта; значение дескриптора 5 одновременно характеризует изменения мышцы, опускающей нижнюю губу, и подбородочную мышцу.

В ходе работы с описанным ранее алгоритмом было выявлено, что метод активного контура «чувствителен» к размерам изображения. Поэтому была проведена предобработка изображения для более качественного распознавания контуров губ. Предварительной обработкой является пропорциональное масштабирование с переходом к стандартным ширине или высоте: 336×448 пикселей.

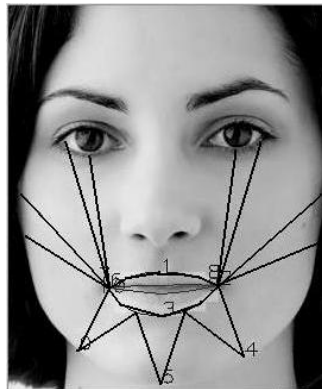


Рисунок 7. Геометрическая модель рта человека и его дескрипторы

На рис. 8 представлена диаграмма работы алгоритма метода активного контура с изображениями, которые прошли предварительную обработку и нет.

Диаграмма слева показывает сколько процентов изображений из выборки, не прошедших предобработку, было распознано корректно, справа — процент распознанных изображений на той же выборке с учетом предобработки. Как видно из диаграммы эффективность работы алгоритма увеличилась на 30%.

Применение этого метода к лицу человека реализуется при помощи библиотеки STASM 3.0, функционал которой позволяет выделить совокупность 76 точек, определяющих черты лица. Для визуализации геометрической модели, обработки изображения и выделения области рта в работе используется OpenCV версии V2.2.0 [3]. Функциональные возможности этой библиотеки используются также в STASM 3.0 [1] для идентификации лица на изображении методом Виолы-Джонса с использованием каскадов Хаара. При реализации прикладного программ-

ного обеспечения был использован комплект средств разработки Qt SDK v2010.05 (open source) для Windows XP.

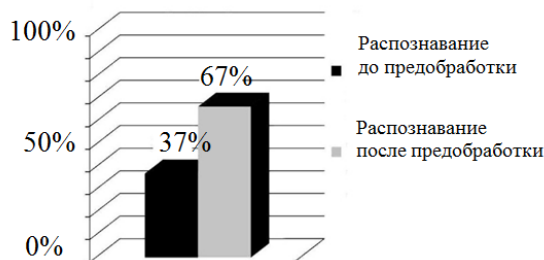


Рис. 8. Гистограмма эффективности работы алгоритма метода активного контура на выборке изображений

4. Результаты

В ходе выполненных исследований и проделанной работы было выявлено, что используемый метод активного контура зависит от размеров растрового изображения, в связи с чем авторами разработан и реализован алгоритм их предварительной обработки, заключающийся в пропорциональном масштабировании исходных размеров изображения с переходом к стандартной величине по ширине или высоте. В результате проведенного исследования было выявлено, что эффективность работы данного метода активного контура увеличилась в среднем на 30%.

Литература

- [1] Active Shape Models with Stasm [Электронный ресурс]. URL: <http://www.milbo.users.sonic.net/stasm/> (дата обращения: 04.02.2012).
- [2] Ekman P., Friesen W. V., Hager J. C. Facial action coding system.— Salt Lake City : Research Nexus division of Network Information Research Corporation, 2002.
- [3] Экман П. Психология лжи. Обмани меня, если сможешь / пер. с англ.— СПб. : Питер, 2011.
- [4] Экман П. Психология эмоций. Я знаю, что ты чувствуешь. 2-е изд. / пер. с англ. — СПб. : Питер, 2011.
- [5] <http://opencv.org/>
- [6] Ковшов Е. Е., Завистовская Т. А. Формирование текстовых сообщений на основе программно-математической обработки изображений лица человека // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т. 50. № 4.1. С. 145–150.

- [7] Ковшов Е. Е., Мартынов П. Н. Разработка средств автоматизации тестирования интерфейсов пользователя в человеко-машинных системах управления // Информационные технологии. 2012. № 7. С. 42–46.
- [8] Ковшов Е. Е., Митропольский Н. Н., Завистовская Т. А., Рогозина М. М. Построение геометрической модели лица для выделения дескрипторов психологического состояния оператора технологического оборудования // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. Т. 2. № 1. С. 66–69.
- [9] Рогозина М. М. Автоматическое определение дескрипторов эмоционального состояния на основе системы кодирования лицевых движений // Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. — М. : МИЭМ, 2012. С. 305–307.
- [10] Солдатов С. А. Чтение по губам: распознавание контуров губ // Лаборатория компьютерной графики [Электронный ресурс] URL: <http://www.ict.edu.ru/ft/002415/loi2002sss.pdf>

Авторы:

Ковшов Евгений Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Финансовый менеджмент» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»

Завистовская Татьяна Анатольевна, аспирант кафедры «Финансовый менеджмент» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН»

Development of Software for Testing Algorithms Design Information Structures

E. E. Kovshov, T. A. Zavistovskaya
Moscow State University of Technology STANKIN
3A, Vadkovsky per., Moscow, 127055
e-mail: e.kovshov@stankin.ru

Abstract. This article considers the way of analytical processing of the dynamic image of a human face while creating text sequences. The geometric model of the human face is built on the basis of the active shape model and the software is implemented, which automatically determines the descriptors of the mouth.
Key words: human-computer interaction, image processing, lip reading, visemes, identification of the human face, recognition of the lip contour, formation of text-messages.

Reference

- [1] Active Shape Models with Stasm [Электронный ресурс]. URL: <http://www.milbo.users.sonic.net/stasm/>
- [2] *Ekman P., Friesen W. V., Hager J. C.* (2002) Facial action coding system. Salt Lake City: Research Nexus division of Network Information Research Corporation.
- [3] *Ekman P.* (2011) Psihologija lzhi. Obmani menja, esli smozhesh. SPb, Piter. (rus)
- [4] *Ekman P.* (2011) Psihologija jemocij. Ja znaju, chto ty chuvstvuesh. SPb, Piter. (rus)
- [5] <http://opencv.org/>
- [6] *Kovshov E. E., Zavistovskaja T. A.* (2012) Formirovanie tekstovyh soobshhenij na osno-ve programmno-matematicheskoy obrabotki izobrazhenij lica cheloveka. *Systemy upravlenija i informacionnye tehnologii*, 50(4.1), 145–150. (rus)
- [7] *Kovshov E. E., Martynov P. N.* (2012) Razrabotka sredstv avtomatizacii testirovanija interfejsov pol'zovatelja v cheloveko-mashinnyh sistemah upravlenija. *Informacionnye tehnologii*, 7, 42–46. (rus)
- [8] *Kovshov E. E., Mitropolskiy N. N., Zavistovskaja T. A., Rogozina M. M.* (2012) Postroenie geometricheskoy modeli lica dlja vydelenija deskriptorov psihologicheskogo sostojanija operatora tehnologicheskogo oborudovanija. *Vestnik MGTU «Stankin»*, 2(1), 66–69. (rus)
- [9] *Rogozina M. M.* (2012) Avtomaticheskoe opredelenie deskriptorov jemocional'nogo sostojanija na osnove sistemy kodirovanija licevyh dvizhenij. *Innovacionnye informacionnye tehnologii. Proc. Conf. Moscow*, 305–307. (rus)
- [10] *Soldatov S. A.* (2002) Chtenie po gubam: raspoznavanie konturov gub (<http://www.ict.edu.ru/ft/002415/loi2002sss.pdf>) (rus)

УДК 614.84

Исследования процессов теплового воздействия лесных пожаров на ткани человека: перспективы создания медицинских информационных систем

Д. В. Коробкина, Н. В. Барановский

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634034, Томск, проспект Ленина, 30,
e-mail: firedanger@yandex.ru*

Аннотация. Настоящий обзор посвящен наиболее значимым исследованиям процессов теплового влияния лесных пожаров на ткани человека (особенно на кожные покровы). Проведен анализ различных исследований, выполненных с середины XX века по настоящее время. Рассматривается общая характеристика лесных пожаров и их основные типы. Выделены основные методы и подходы, используемые при исследовании проблемы теплового воздействия лесных пожаров на ткани человека. Рассматриваются инструментальные, расчетные и расчетно-экспериментальные методы для анализа проблемы оценки теплового воздействия лесных пожаров на ткани человека. Предлагается в качестве основного метода использовать подход математического моделирования для исследования указанной проблемы. Рассматриваются перспективы разработки программных компонент, реализующих математические модели теплового воздействия лесных пожаров на ткани человека. Такие программные реализации проблемно-ориентированных алгоритмов могут стать основой для создания медицинских информационных систем для нужд МЧС и скорой медицинской помощи при минимизации и ликвидации социального ущерба от лесных пожаров.

Ключевые слова: лесной пожар, тепловое воздействие, ожог, моделирование, медицинская информационная система.

1. Введение

Для оценки последствий воздействия теплового излучения в чрезвычайных ситуациях (в том числе, лесных пожаров) могут применяться как отечественные, так и зарубежные методы, которые представляют количественные зависимости между термодинамическими и медицинскими критериями теплового поражения. Большой объем расчетно-экспериментальных данных по термическим ожогам различной степени тяжести биообъекта накоплен в ведущих научно-исследовательских Центрах NASA. Основой для создания стандартных методов оценки поражения био-

объектов послужили результаты обработки экспериментальных исследований. После проведения гармонизации отечественных и зарубежных методов прогнозирования теплового поражения для системы «тепловой источник-пакет одежды-человек» выделяются следующие методы прогнозирования: 1) инструментальные; 2) расчетные; 3) расчетно-экспериментальные методы. Причем, в настоящее время отсутствуют программные компоненты, реализующие развитые математические модели реальных теплофизических процессов, происходящих в кожных покровах и тканях человека. Настоящий проект открывает перспективы создания нового поколения медицинских информационных систем для нужд МЧС и скорой медицинской помощи при минимизации и ликвидации социального ущерба от лесных пожаров.

2. Медицинские информационные системы

Целью инициированного научного исследования является создание в конечном итоге программы по прогнозированию степени поражения кожного покрова человека при воздействии высокоинтенсивного нагрева для рынка медицинских информационных систем (МИС) на базе физически содержательных математических моделей процессов теплопереноса в тканях человека в пожароопасных ситуациях. Динамика внедрения МИС за 2004–2010 годы приведена в табл. 1.

Таблица 1. Динамика внедрений МИС за 2004–2010 гг. [1]

Показатель	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Среднее число внедрений одной МИС в год	4.3	5.7	7.25	17.0	23.2	14.2	8.3	30.6
Среднее число автоматизированных рабочих мест на МИС	118.1	148.2	264.6	46.2	195.3	162.3	155.6	206.1

Оценивая длительность присутствия на рынке и достигнутые объемы внедрений, можно прийти к выводу, что наилучшие показатели у отрасли были в 2008 г.: тогда и среднее количество выполняемых каждым разработчиком проектов, и количество автоматизируемых рабочих мест за проект были максимальными. Затем в 2009–2010 гг. было заметное снижение. У многих компаний отмечена «просадка» по проектам на 20–40%. 2011 стал годом возрождения рынка МИС: многие компании существенно увеличили число проектов, в среднем вернувшись к докризисным показателям (см. табл. 1).

Стоимость существующих МИС из расчета за одно рабочее место различается значительно — от 3 до 30 тыс. руб. Средняя стоимость составляет 16 328 руб.

В России функционирует свыше 300 медицинских информационных систем (МИС) (данные 2012 г.). В условиях отсутствия стандартов обмена информацией внедрение МИС-систем выполняется неупорядоченно; многие используемые приложения несовместимы друг с другом. Проблемы совместимости не позволяют в полной мере раскрыть потенциал имеющихся решений.

На сегодняшний день показатель уровня развития инфраструктуры информационных систем медицинских учреждений остается на очень низком диапазоне из возможных показателей [1].

Достаточно медленное развитие рынка МИС объясняется высокой стоимостью создания и сопровождения МИС, малым числом производителей, также разработка МИС занимает длительный срок (2–3 года).

Основными пользователями будут 2 группы клиентов, заинтересованных в исключении или минимизации социального ущерба от лесных пожаров:

1) коммерческие организации, заинтересованные в минимизации своих расходов и социального ущерба: страховые компании; лесопользователи; предприятия и организации, в сфере деятельности сотрудников которых используются железные и автомобильные дороги, линии электропередач, проходящие через лесной фонд, а также технологические объекты на лесопокрытых территориях;

2) страны со значительными лесопокрытыми территориями: США, Канада, Австралия.

3. Классификация лесных пожаров

Экологическая система лесов Российской Федерации занимает 1.2 млрд га территории и содержит около 25% лесных ресурсов всей планеты [2]. Глобальные процессы регулирования состояния окружающей среды, биоразнообразия, климата, речных стоков подвержены значительному влиянию лесов РФ [3].

Определения лесного пожара различны. Например, лесным пожаром называется явление неуправляемого многостадийного горения в открытом пространстве на покрытой лесом площади, в рамках которого имеют место взаимосвязанные процессы конвективного и радиационного переноса энергии, нагревания, сушки и пиролиза ЛГМ, а также горение газообразных и догорание конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ [4, 5]. Более простое определение лесного пожара: горение растительности, стихийно распространяющееся по лесной территории [6].

Крупными считаются лесные пожары, распространившиеся на значительных площадях, для тушения которых, как правило, недостаточно сил и средств самих лесхозов и оперативных отделений баз авиационной охраны лесов. Такие пожары в большинстве случаев возникают в засушливые периоды, ветреную погоду и обычно носят смешанный характер, на отдельных участках распространяются как верховые, а частично носят характер низовых [7].

Масштаб воздействия лесных пожаров на биосферу Земли без сомнения относит их к глобальным явлениям. Природные пожары — важный экологический фактор динамики его лесного покрова. Они значительно влияют на биоразнообразие, возрастную структуру древостоев, соотношение видов, потоки энергии и биогеохимические циклы в лесных экосистемах [7].

Лесные пожары подразделяются на низовые, повальные верховые, вершинные верховые, подземные (торфяные) и массовые [8, 9]. При низовых пожарах сгорает напочвенный покров, при повальных верховых и напочвенный покров, и кроны де-

ревьев. При вершинном верховом пожаре горят только кроны деревьев. Подземные пожары характеризуются наличием очага горения в толще слоя. Массовые лесные пожары возникают при столкновительной катастрофе, воздушном ядерном взрыве и т. д. [10]. По скорости распространения огня лесные пожары подразделяются на устойчивые и беглые. Более полную классификацию лесных пожаров, существующую уже шесть десятилетий и служащую научным работникам и производству ориентиром в работе и опорой в обмене мнениями, предложил И.С. Мелехов в 1947 г. (табл. 2) [11].

По интенсивности лесные пожары подразделяются на слабые, средние и сильные. Интенсивность горения зависит от состояния и запаса горючих материалов, уклона местности, времени суток и силы ветра [6]. Наиболее опасным видом пожаров являются верховые. Следует отметить, что до сих пор не выяснены до конца механизмы и условия возникновения различных видов лесных пожаров [8, 12]. Тушение лесных пожаров требует больших затрат сил и средств, и в подавляющем большинстве случаев малоэффективно или невозможно. Из данных лесоложарной статистики следует, что низовые пожары в целом по стране преобладают как по числу (90–95%), так и по площади (85–90%). Верховые и подземные (торфяные) пожары случаются гораздо реже [7].

Таблица 2. Классификация лесных пожаров И.С. Мелехова (1947) [11]

1. Низовые пожары	2. Верховые пожары	3. Подземные пожары
Подстильно-гумусовые: 1) устойчивые Напочвенные: 2) устойчивые, 3) беглые Подлесно-кустарниковые: 4) устойчивые, 5) беглые Валежные и пневые: 6) устойчивые, 7) беглые	Вершинные: 8) устойчивые, 9) беглые Повальные: 10) устойчивые, 11) беглые Стволовые: 12) устойчивые	Торфяные: 13) устойчивые

Воздействие лесных пожаров на окружающую среду и человека обуславливает экономические, экологические и социальные ущербы (рис. 1) [13].

Приказом руководителя Федеральной службы лесного хозяйства России от 3 апреля 1998 г. № 53 утверждена Инструкция по определению ущерба, причиняемого лесными пожарами. Инструкция определяет порядок оценки размеров ущерба, причиненного лесными пожарами лесному фонду и лесам, не входящим в лесной фонд.

Лесные пожары прямо и косвенно влияют на здоровье населения [5]. Следствием действия поражающих факторов лесного пожара являются возникновение и обострение различных заболеваний. Качество атмосферного воздуха, содержащего частицы дыма и газообразные соединения от лесных пожаров, является фактором,

который увеличивает риск смертности и влияет на возникновение хронических obstructивных болезней легких (ХОБЛ). Велика вероятность образования термических поражений [14–16], которые и являются главным предметом настоящей статьи.

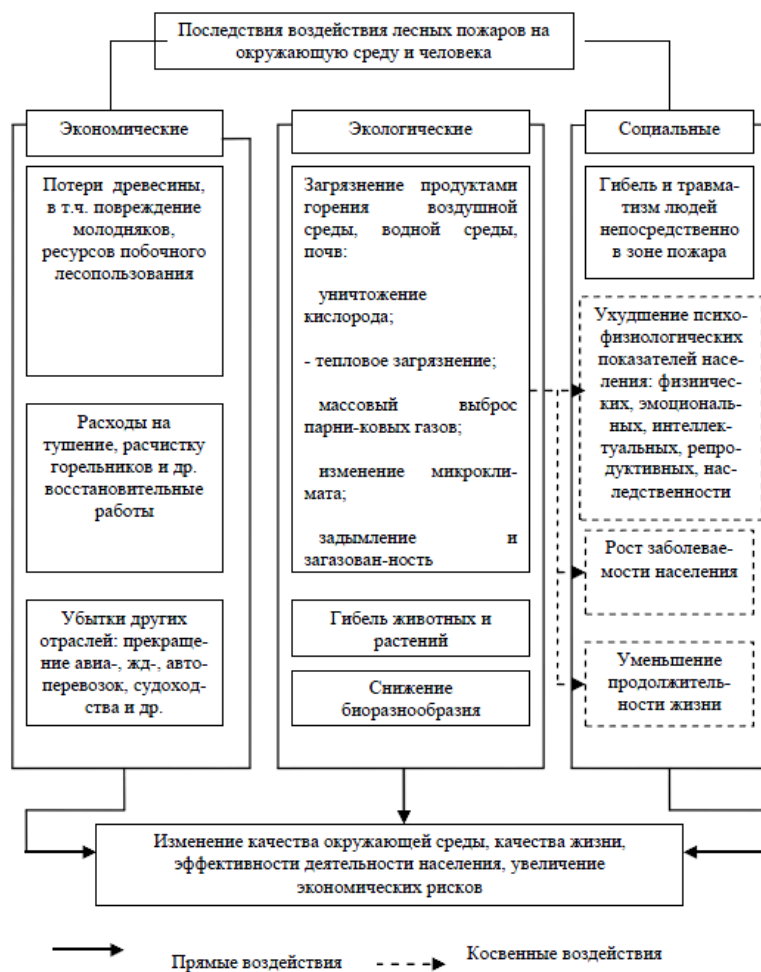


Рисунок 1. Структура последствий лесных пожаров [13]

4. Характеристика кожного покрова и тканей человека

Основным способом передачи тепла от высокотемпературного источника к объекту является тепловое излучение [15]. От интенсивности теплового излучения зависит степень повреждения кожного покрова. Кожа является самым большим органом тела. Она составляет примерно 14–16% веса взрослого человека и играет ряд важных ролей и занимает площадь 1.5–2.0 м² в зависимости от размеров тела человека [17].

Кожа имеет весьма сложное строение, имеющее свои особенности в различных частях тела. Кожа состоит из трех слоев: эпидермиса, дермы и подкожной клетчатки (гиподермис), как показано на рис. 2 [18].

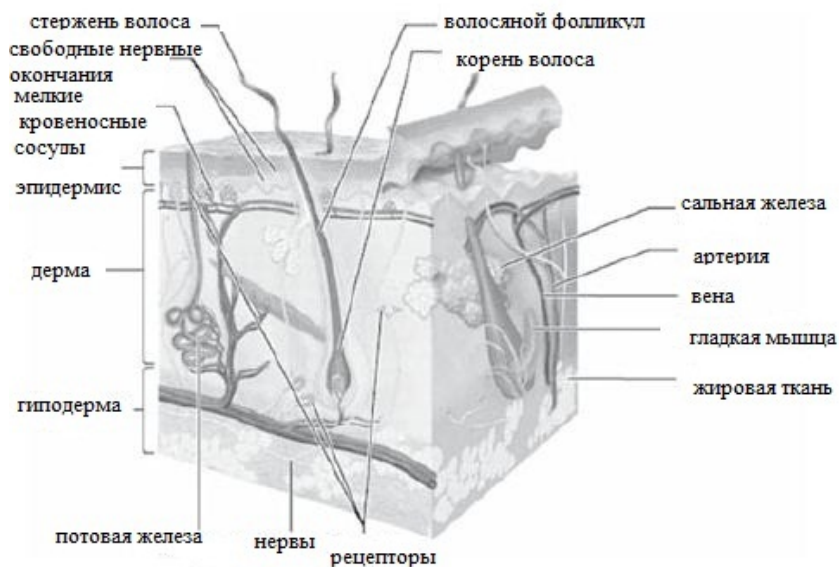


Рисунок .2. Структура кожного покрова человека [20]

Эпидермис состоит в основном из мертвых клеток, которые действуют в качестве защитного барьера против влаги, ультрафиолетового излучения и высоких температур [19]. Через эпидермис проходят потовые железы. Толщина эпидермиса различна — от 0.02–0.05 мм на шее и лице до 0.5–2.4 мм на ладонях и подошвах. Нижний слой эпидермиса — базальный, лежит на базальной мембране, разделяющей эпидермис и дерму. В базальном слое находятся цилиндрические клетки, которые постоянно, в процессе клеточного деления заполняют ороговевший слой [17]. Дерма является основной частью кожи. Она намного толще и содержит в себе кровеносные сосуды, нервные окончания, сальные железы и корни волос. Толщина дермы варьируется от 0.5 до 5 мм. В дерме выделяют два слоя: прилежащий к эпидермису сосочковый и сетчатый (ретикулярный). В сосочковом слое содержатся различные волокна, придающие коже прочность и упругость, а также многочисленные кровеносные и лимфатические сосуды, нервные сплетения и окончания нервных волокон. Сетчатый слой располагается под сосочковым слоем. В нем залегают потовые и сальные железы, волосяные сумки. Протоки сальных желез открываются в волосяные сумки. Волокнистые структуры дермы состоят из коллагеновых, эластических и ретикулярных волокон. Промежутки между волокнами, придатками кожи и другими структурными образованиями занимает так называемое основное вещество — аморфная субстанция [17]. Эпидермис и дерма, вместе взятые, имеют толщину около 1–2 мм. Ниже этих двух слоев лежит подкожная

ткань — жировая клетчатка (гиподерма), которая содержит потовые железы и крупные кровеносные сосуды, которые дают возможность коже приспосабливаться к местному нагреванию или охлаждению, но лишь в определенных пределах [20]. Она состоит из рыхлой сети коллагеновых, эластических и ретикулярных волокон, в петлях которых расположены дольки жировой ткани — скопления крупных жировых клеток. Подкожный слой пронизан сетью нервов и кровеносных сосудов, которые поддерживают и питают дерму и эпидермис. Толщина этого слоя различна и зависит от образа жизни человека, питания, обмена веществ [17].

Обычно кожу подразделяют на два типа — толстую и тонкую, что связано, главным образом, с различной толщиной эпидермиса. Толстая кожа покрывает ладони и подошвы. Для нее характерно наличие толстого эпидермиса, на наружной поверхности которого располагается особенно мощный слой кератина.

В коже, покрывающей остальные части тела, эпидермис относительно тонкий, причем его наружный ороговевший слой также сравнительно тонкий. На некоторых участках тела, подвергающихся давлению (на спине, ягодицах, задних поверхностях бедер), имеется толстая дерма.

Толщина кожи зависит от пола, возраста, цвета, состояния здоровья и локализации [21, 21].

Среди основных функций кожи можно выделить следующие [23]:

- защитная (защищает организм от действия механических и химических факторов, ультрафиолетового излучения, проникновения микробов, потери и попадания извне воды, роговой слой эпидермиса обеспечивает преграду испаряющейся жидкости, предотвращает набухание и сморщивание кожи);
- терморегуляторная (за счет излучения тепла и испарения пота);
- участие в водно-солевом обмене (связано с потоотделением);
- экскреторная (выведение с потом продуктов обмена, солей, лекарств);
- депонирование крови (в сосудах кожи может находиться до 1 л крови);
- эндокринная и метаболическая (синтез и накопление витамина D и некоторых гормонов);
- рецепторная (благодаря наличию многочисленных нервных окончаний);
- иммунная (захват, процессинг и транспорт антигенов с последующим развитием иммунной реакции);
- защита от ультрафиолетового облучения (за счет образования пигмента меланина);
- чувствительная функция (кожа содержит нервные окончания, воспринимающие раздражения, которые вызывают различные виды ощущений (тактильные, давления, тепла, холода и боли));
- резорбционная функция (проявляется в том, что через нее осуществляется транспорт многих химических (в том числе лекарственных) веществ);

- дыхательная функция (через кожу в организм поступает кислород и выделяется углекислота) [22].

Таким образом, кожа является важнейшим органом, выполняющим ряд уникальных функций в организме человека и по ее состоянию можно судить о состоянии здоровья в целом.

5. Поражение при тепловом воздействии

При термической травме первично происходит повреждение клеток, что выражается в нарушении их структуры и функций. Нарушается барьерная функция клеточных и внутриклеточных мембран, а также выключаются ионные насосы. Это, в свою очередь, сопровождается нарушением распределения веществ внутри клетки и между клеткой и окружающей средой, дезорганизацией внутриклеточного метаболизма и нарушением системы энергообеспечения [23].

Ожоговая травма вызывает тяжелые метаболические расстройства, нарушает работу всех звеньев системы доставки кислорода, в том числе снижение сердечного выброса, уменьшение содержания кислорода в артериальной крови и нарушение его утилизации [23].

При слабом тепловом излучении будет повреждаться только эпидермис на глубину 1 мм. Более интенсивный тепловой поток может привести к поражению не только эпидермиса, но и дермы, а излучение еще большей интенсивности будет воздействовать и на подкожный слой [18].

Степень прогревания различных участков тела у пострадавшего может быть неодинаковой. Определенное значение имеют теплозащитные свойства одежды и поверхностных слоев (в первую очередь рогового слоя) кожи. В частности, наличие толстого слоя одежды предотвращает от выраженного перегревания тканей. Участки кожи с «толстым» эпидермисом и выраженным роговым слоем более устойчивы к перегреванию.

Степень тканевой гипертермии прямопропорциональна продолжительности нагревания. Краткосрочное воздействие даже очень высоких температур может не приводить к развитию ожогов. Температурный оптимум активности ферментов составляет 36–37 °С. Чем выше степень перегрева тканей (начиная от 41 °С и выше), тем быстрее происходит гибель клеток.

Омертвевшие в результате действия термического фактора ткани получили название струпа. Незначительный нагрев кожи (до 60 °С) приводит к формированию влажного или колликвационного струпа. В случае более высокого разогрева формируется плотный сухой или коагуляционный струп. Степень плотности и толщина струпа может быть различной [22].

Ожоги кожи могут быть разделены на четыре степени тяжести в зависимости от глубины термического повреждения тканей кожи:

- I степень — проявляется гиперемией и отеком кожи;
- II степень — поражение поверхностных слоев эпидермиса, на коже появляются пузыри, наполненные прозрачным содержимым;

- IIIa степень — частичное поражение дермы, однако в ней сохраняются придатки кожи, из которых впоследствии происходит эпителизация;
- IIIб степень — поражение кожи на всю толщю с частичным захватом под-кожно-жировой клетчатки;
- IV степень — поражение глубоких структур (фасции, мышцы, кости).

За рубежом широко распространена следующая классификация, также предусматривающая выделение четырех степеней поражения [22]:

- первая степень (first degree) — соответствует I степени отечественной классификации;
- вторая поверхностная степень (second degree superficial) — соответствует II степени отечественной классификации;
- вторая глубокая степень (second degree deep) — соответствует ожогам IIIa степени;
- третья степень (third degree) — соответствует ожогам IIIб степени;
- четвертая степень (fourth degree) — соответствует одноименной отечественной.

Ожоги первой степени вызывают легкую боль, покраснение кожи, и, как правило, рассматриваются, как «слабые» ожоги и не являются опасными для жизни (например, солнечных ожоги). При ожогах второй степени повреждается дерма, в результате чего образуются волдыри. Ожоги третьей степени характеризуются повреждением подкожных слоев и разрушением тканей и рубцов. Ожоги второй и третьей степеней требуют немедленной медицинской помощи и потенциально могут привести к летальному исходу [19].

При получении ожогов возможность выживания зависит от ряда факторов:

- степень ожога;
- размер обожженной площади, выражаемый как доля от общей площади поверхности кожи;
- возраст;
- перенесенные болезни и состояние здоровья до происшествия.

Шансы выжить уменьшаются по мере того, как увеличиваются процент обожженной площади и возраст жертвы [20].

Среди основных характеристик теплового поражения человека от высокоинтенсивного нагрева можно выделить следующие [24, 25]:

- время возникновения термического ожога;
- количество поглощенной кожным покровом тепловой энергии;
- степень тяжести ожога;
- критическая температура основных структурных слоев кожного покрова.

По длительности и тяжести течения ожоговая болезнь (ОБ) лидирует среди различных вариантов травматической болезни. Велики материальные затраты на лечение больных, высока частота их инвалидизации. Летальность составляет в среднем 5–10%, а среди тяжелообожженных — значительно выше. Из-за несвоевременности оказания первой медицинской помощи летальность на догос-

питательном этапе в России в 5 раз выше, чем в развитых странах и составляет 25–30% [23].

Ежегодно, по данным Министерства здравоохранения РФ, от ожогов страдает около 700 тыс. человек. В течение года в европейских странах от термической травмы погибает около 60 тыс. человек. Из всех умерших в ожоговом шоке находилось 28% пострадавших, причем 9% пациентов имели ожоги менее 20% поверхности тела. При глубоких ожогах площадью более 20% поверхности тела пострадавшего летальность возрастает до 82,2%. Одной из главных причин высокой летальности среди пострадавших с тяжелыми ожогами является отсутствие единой концепции лечения этой категории пациентов. Все это требует более детального изучения механизмов развития и течения ожогового шока, а также совершенствования протоколов ведения пациентов с тяжелой термической травмой. Тяжелая термическая травма влечет за собой длительный период госпитализации, значительное число осложнений и высокую летальность [26].

6. Методы прогнозирования теплового поражения кожного покрова

После первых испытаний атомного оружия в таких городах, как Хиросима и Нагасаки, возникла проблема количественной оценки поражения людей тепловым излучением. В ведущих научно-исследовательских Центрах NASA — US Naval Air Department Development Center (Исследовательском центре морской авиации), University of Rochester (Университете Рочестера), Aerospace Medicine Research Center (Центр медицинских аэрокосмических исследований), NASA-George Marshall Space Flight Center (Центр космических полетов им. Г. Маршалла) с 40-х годов прошлого столетия накоплен большой объем экспериментальных исследований в этом направлении [14].

Результаты многочисленных исследований стали основой при формировании стандартных методов оценки поражения биообъекта тепловым излучением [27, 28].

Для системы «тепловой источник — пакет одежды — человек» выделяются следующие методы прогнозирования теплового поражения кожного покрова [25].

Инструментальные. Достоверность и большой объем экспериментальных исследований по воспроизведению ожогов II степени с вероятностью 0.5 послужили основой создания стандартного инструментального метода оценки теплозащитных свойств материалов TPP (Thermal Protective Performance) [25]. Достоинства: простота аппаратного оформления, реализация различных механизмов, воспроизводимость результатов, благодаря чему получил широкое распространение не только в промышленных стандартах США для оценки теплозащитных свойств материалов специальной одежды, но и в международных стандартах [25].

Расчетные. Используются пробит-функции, которые позволяют нормировать случайную величину дозы поражения в единицах стандартного отклонения для нормального закона распределения вероятностей. Информация, полученная при прогнозировании с помощью этого метода, необходима для медиков при обоснова-

нии объема и тактики лечения пострадавших. Результатом работы прогнозирующей программы является визуальное, графическое или табличное представление сопряженных полей логарифма индекса облучения на различных расстояниях от источника пожара, дающих спектр теплового поражения различной вероятности [25].

Расчетно-экспериментальные. Методика прогнозирования основывается на компьютерной программе обработки результатов лабораторного, реального или вычислительного эксперимента по воздействию на кожу человека поражающих факторов высокоинтенсивного нагрева. Предлагаемый метод прогнозирования теплового поражения человека, защищенного одеждой, при интенсивном нагреве имеет важное практическое значение в оценке зон поражения человека в чрезвычайных ситуациях [25].

Экспериментальные.

6.1. Экспериментальные методы

Для имитации теплового излучения в лабораторных условиях применяются различные установки. Авторами в [29] используется установка с трубчатыми ксеноновыми лампами в режиме перегрузок с тиристорным безынерционным регулированием подводимой электрической мощности [30]. Одежда имитируется пакетом материалов с воздушными зазорами, как показано на рис. 3 [29].

Температура внутри пакета измеряется микротермопарами, на поверхности — оптическими методами, давление — микроманометрами, потеря веса — торсионными весами [29].

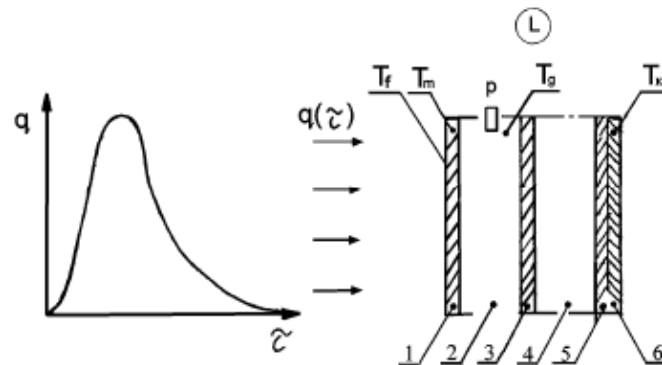


Рисунок 3. Схема эксперимента: 1, 3, 5 — материалы одежды; 2, 4 — воздушные зазоры; 6 — калориметр (имитатор кожи); T_f , T_m , T_g , T_k — температуры поверхности и середины наружного слоя, воздушного зазора, калориметра

Выделяются 5 периодов нагрева [29]:

I — инертный нагрев;

II — испарение влаги из наружного слоя;

- III — термическое разложение материала;
- IV — нагрев калориметра после прекращения воздействия теплового излучения;
- V — выравнивание температуры во всех слоях пакета.

Для прогнозирования степени повреждения кожного покрова авторами в [19] используется тестовая система PyroHands™, представленная на рис. 4. Система состоит из двух антропометрических руки манекена, к которым подключены 13 термодатчиков к каждой. Система находится в тестовой камере, где четыре больших пропан-горелки воспроизводят эффект пожара.

С целью моделирования кожу человека можно рассматривать как слоистую структуру, приведенную на рис. 5.

Неоднородная внутренняя структура биологической ткани предполагает существование нестационарной теплопроводности, при этом наблюдаются температурные колебания [18].



Рисунок 4. Тестовая система PyroHands™ [19]

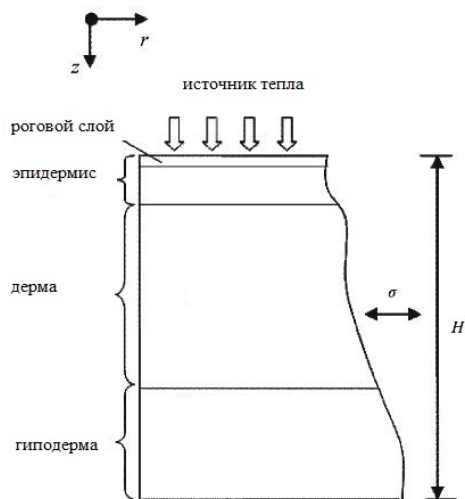


Рисунок 5. Идеализированная модель кожи [19]

Одномерная трехслойная модель кожи (рис. 6), используется для большинства испытаний, в том числе Pyroman™ [19].

Данные теплового потока, собранные датчиками на манекене, применяются к одномерному уравнению теплопроводности [25] следующим образом:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где ρc — объемная теплоемкость кожи (Дж/м³К); $T(x)$ — температура кожи (К); x — глубина (м); k — теплопроводность кожи (Вт/мК); t — время воздействия (с).

Уравнение (1) решается численно с использованием метода конечных разностей (МКР) [31, 32], чтобы оценить температуру кожи в любой момент времени [19].

6.2. Расчетный и расчетно-экспериментальный методы

Для прогнозирования теплового поражения человека могут быть использованы различные характеристики термического ожога и их комбинация. В настоящее время применяются четыре термодинамических критерия: пороговый импульс [33], критическая температура основного слоя кожи [34], инвариантная ко времени экспозиции критическая температура на глубине 0,36 мм от поверхности кожи [35], инвариантный ко времени экспозиции индекс поражения Ейзенберга [36]. В табл. 3 приведены данные критерии.

Таблица 3. Термодинамические критерии для оценки теплового поражения биообъектов

Термодинамический критерий	Краткая характеристика
Пороговый импульс	Впервые зависимость порогового импульса от времени облучения получена А. Stoll. В зарубежных стандартах используется как при статическом, так и динамическом нагреве кожи, но только при ожогах II степени с вероятностью 0,5. Для других вероятностей такие зависимости отсутствуют [24]
Критическая температура	Впервые использование в качестве критерия возникновения ожогов температуры кожного покрова на различных расстояниях от поверхности предложено Хенриком и Морицом. В зарубежных методиках возникновение поверхностных ожогов I и II степени определяется по изменению температуры основного слоя кожи (граница эпидермиса — дерма) [24]
Индекс поражения Ейзенберга	На основании обработки поражающего теплового излучения ядерных взрывов Ейзенберг предложил выражение для индекса облучения (индекс поражения Ейзенберга) [24]: $I = q^{4/3} T, \quad (2)$ где q — плотность теплового потока облучения, Вт/м ² ; T — время воздействия, с

В отечественных нормативных документах [37–39] экспериментально обоснованным зарубежным разработкам уделено недостаточно внимания. Благодаря обобщению зарубежных данных [34, 40, 41] и авторских исследований [42, 43] авторами в [44] проведена гармонизация отечественных и зарубежных методов оценки поражения человека тепловым излучением с использованием критерия критической дозы облучения [14].

Метод оценки поражения человека тепловым излучением с использованием критерия критической дозы облучения также известен как метод пороговой дозы. При гармонизации методов оценки поражения человека тепловым излучением мо-

гут использоваться различные термодинамические и медицинские критерии [16]. Высокая сходимость результатов гармонизации между зарубежными экспериментальными данными по пороговым значениям плотности теплового потока облучения и времени его воздействия, вызывающих ожог II степени с вероятностью 0,5, и прогнозированию той же степени поражения с той же вероятностью по пробит-функции с использованием термодинамического критерия индекса облучения, получена в работе [45].

Применение индекса поражения Эйзенберга имеет два практически важных аспекта. Во-первых, он инвариантен ко времени воздействия при заданной вероятности ожога. Во-вторых, его значение используется при прогнозировании тепловых поражений с помощью пробит-функций не только для вероятности 0,5, но и во всем диапазоне вероятностей возникновения термических ожогов [16, 25]:

$$Pr = a + b \ln I, \quad (3)$$

где a и b — постоянные коэффициенты, идентифицируемые в экспериментах по воспроизведению ожогов; Pr — пробит, нормированное отклонение случайной величины $\ln I$ с нормальным законом распределения.

В медицинской статистике пробит-функции (3) используются для прогнозирования вероятности поражения не только термических ожогов, но и действия ударной волны и токсических веществ [16].

В [14] авторами проводится гармонизация отечественных и зарубежных методов оценки теплового поражения человека по критерию критической температуры основного слоя кожного покрова биообъекта при воспроизведении термических ожогов II степени с вероятностью 0,5.

Тепловая модель представляет собой уравнение нестационарной теплопроводности Фурье при заданных краевых условиях [13]:

$$c_i \rho_i \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) \sum_{j=1}^3 Q_j, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (4)$$

Где i — количество слоев; c_i, ρ_i, λ_i — теплофизические свойства структурных слоев кожи; Q_1 — источник генерации тепла за счет поглощения и рассеяния энергии фотонов; Q_2 — сток тепла за счет кровотока; Q_3 — генерация тепла за счет метаболизма.

Модель (3) позволяет рассчитывать нестационарное температурное поле во всех структурных слоях кожи, в том числе и в основном слое [25].

Все методы количественной оценки поражающего действия теплового излучения на биообъекты основаны на причинно-следственной связи между термодинамическими и медицинскими критериями поражения. Такие регрессионные модели получили название пробит-функций, позволяющие нормировать случайную величину дозы поражения в единицах стандартного отклонения для нормального закона распределения вероятностей [30].

По тепловой модели (4) авторами получены результаты вычислительного эксперимента по пробит-функции для ожогов II степени, для 10 значений вероятно-

стей от 0.01 до 0.99 с шагом 0.1 и рассчитаны индексы облучения. При исследовании контактных ожогов в [42, 43] показано, что температура на определенной глубине сохраняет постоянное значение с точностью 0.5 °С независимо от интенсивности облучения при постоянном индексе [14].

Из этого исследования авторами сделан вывод, что при одинаковых индексах облучения температура на глубине 0.36 мм оказывается постоянной, имеющей одно и то же значение. Поэтому значение этой температуры может быть принято в качестве инвариантного к скорости нагрева температурного критерия возникновения ожогов для произвольной вероятности наступления события [14].

Стандартные зарубежные методы оценки теплового поражения основываются на зависимости скорости поражения от критической температуры на границе «эпидермис-дерма» (основной слой кожи), рассчитываемой по кинетической модели [14]:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (5)$$

$$\omega = \frac{C(0) - C(\tau)}{C(0)}, \quad (6)$$

где $(d\omega/d\tau)$ — скорость поражения; $C(0)$ — начальная концентрация белка коллагена; $C(\tau)$ — концентрация денатурированного белка; T — температура кожи на границе «эпидермис-дерма» или на другой глубине от поверхности; A — предэкспонент (частотный фактор); E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная.

Использование в качестве критерия возникновения ожогов температуры кожного покрова на различных расстояниях от поверхности предложено в [34]. Авторами [16] по модели, учитывающей влияние кровотока, предложен инвариантный ко времени воздействия критерий критической температуры на расстоянии 0.36 мм от поверхности кожи [14].

Сравнение максимальных значений температур по [16] и [34] представлено в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение максимальных значений температур [2].

Интенсивность облучения, кал/(см ² сек)	Время нагрева, сек	Максимальная температура, С	
		А. Stoll [33]	Авторы [15]
0.305	6.7	57.7	57.54
0.226	10	55.7	55.93
0.13	21	54.2	54.18
0.1	30	53.6	53.56

Сравнительная динамика нагрева основного слоя кожи в процессе облучения и прекращения его воздействия показана на рис. 6.

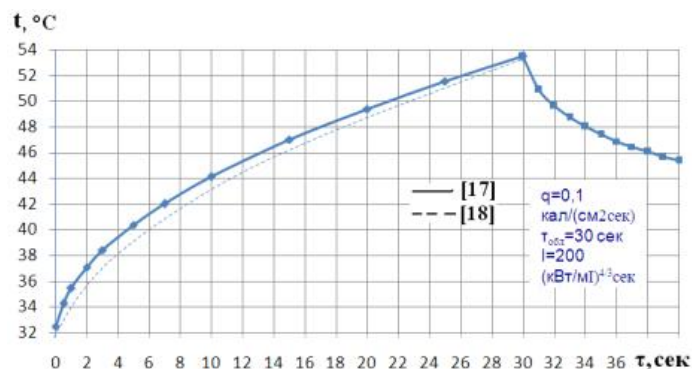


Рисунок 6. Изменение температуры основного слоя кожи в процессе нагрева облучением и прекращением его воздействия [14]

По результатам гармонизации отечественных и зарубежных методов авторы сделали вывод о правомерности применения инвариантного критерия критической температуры для прогнозирования санитарных потерь от ожогов II степени с вероятностью 0.5 от воздействия теплового излучения в ЧС.

По мнению авторов, более адекватно реальным экспериментальным данным соответствует зависимость, полученная с использованием пробит-функции, которая получается на основании статистической обработки огромного массива экспериментов с биообъектами, и математической модели процесса теплопередачи в кожном покрове [16].

7. Модели поражения кожного покрова

Авторами в [25] рассматриваются три модели поражения кожного покрова при воздействии теплового излучения [47].

Кинетическая модель. В зарубежных методиках за критерий теплового поражения принимается интеграл от скорости поражения кожи [24]:

$$P = \int_0^{\tau_{кр}} \frac{d\Omega}{dt} dt = \int_0^{\tau_{кр}} A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dt, \quad (7)$$

где $\tau_{кр}$ — время воздействия теплового источника до появления ожога; $(d\Omega/dt)$ — скорость поражения; A — предэкспонента; E — энергия активации; R — газовая постоянная; T — температура основного слоя кожи. При $P \leq 0.5$ — основной слой остается без повреждений; $0.5 \leq P \leq 1$ — возникают ожоги I степени; $P \geq 1$ — возникают ожоги II степени. Для $P = 1$ в [47] получена аналитическая зависимость максимальной температуры основного слоя от времени, график которой представлен на рис. 7 [14].

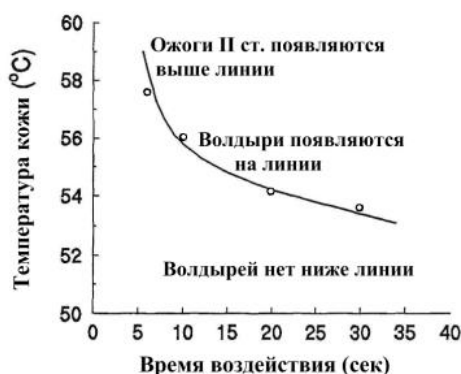


Рисунок 7. Температура основного слоя кожи при воспроизведении ожогов II степени: — кинетическая модель; ○ тепловая модель [14].

Аррениусовская зависимость скорости поражения от температуры позволяет критерий теплового поражения (7) условно назвать кинетической моделью для идентификации ожогов I и II степеней по критической температуре основного.

Эти данные используются в американских и международных стандартах [27, 49]. Однако в отечественных ГОСТированных методах оценки риска пожарной безопасности экспериментально обоснованным зарубежным разработкам должного внимания не уделяется [15].

Тепловая модель. В [43] для определения нестационарного профиля температуры в кожном покрове предложен метод математического моделирования процесса теплопередачи в многослойной структуре кожного покрова с учетом теплофизических свойств слоев [25].

Экспериментальное воспроизведение ожогов осуществлялось контактом с инертным блоком с заданной постоянной температурой. Результаты моделирования показали, что ожог возникает при достижении температуры сосочкового слоя дермы критического значения 51 °C. По данным физиологов, именно на этой глубине располагаются тепловые рецепторы, гибель которых приводит к возникновению ожоговой болезни [25].

Вероятностная модель. В многочисленных опытах с биообъектами [36, 50, 51] установлено, что вероятность «эффекта» возникновения поражения приближается к нормальному закону распределения, если в качестве критерия «дозы» взят логарифм индекса облучения. Вероятность возникновения «эффекта» можно определить по таблицам или рассчитать интегрированием нормированной плотности нормального распределения стандартной случайной величины. В первом приближении за стандартную случайную величину можно принять нормированное значение логарифма индекса облучения [25]:

$$t_0 = \frac{\ln I - m_{\ln I}}{\sigma_{\ln I}}, \quad (8)$$

где $m_{\ln I}$ — оценка математического ожидания индекса облучения; $\sigma_{\ln I}$ — оценка среднеквадратического отклонения $\ln I$ от $m_{\ln I}$.

Экспериментальное определение $\sigma_{\ln I}$ требует большого количества параллельных опытов с биообъектами в широком диапазоне изменения индекса облучения. Поэтому специалистами используется другой подход, основанный на определении зависимости $\Pr(I) = f(\ln I)$, получившей название пробит-функции (probability unit) [25].

В отечественных регламентирующих документах [38, 52, 53] приводится пробит-функция для прогнозирования ожогов I и II степени и летального исхода с различной вероятностью, но расчеты по этим функциям существенно отличаются от данных зарубежных стандартов. Кроме того, в указанных документах отсутствуют методы расчета температурного поля в каждом покрове для различных степеней и вероятностей термического ожога [15].

Результаты исследований по воздействию теплового излучения постоянной плотности теплового потока на открытые участки кожного покрова обобщены в фундаментальных зарубежных монографиях [40, 54, 54].

8. Заключение

Подавляющее большинство работ посвящено экспериментальному исследованию тепловых режимов воздействия поражающих факторов лесного пожара на ткани человека. В качестве полунатурной модели используются специальные манекены.

Ввиду невозможности проведения натуральных экспериментов актуальна разработка математических моделей и проведение численного анализа процессов теплового воздействия лесных пожаров на ткани человека.

Службами скорой помощи и подразделениями МЧС востребовано использование медицинских информационных систем для поддержки принятия решения в случае ЧС, происшествий на промышленных объектах и в лесных массивах.

Литература

- [1] Гусев А. В. Рынок медицинских информационных систем: обзор, изменения, тренды // Врач и информационные технологии. 2012. № 3. С. 6–15.
- [2] Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологические последствия.— Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009.
- [3] Кузнецов В. И., Козлов Н. И., Хомяков П. М. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления лесным хозяйством.— М. : ЛЕНАНД, 2005.
- [4] Гришин А. М., Фильков А. И. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров.— Кемерово : Изд-во Практика, 2005.

- [5] Барановский Н. В., Барановская С. В., Исакова А. В. Методика оценки влияния лесных пожаров на здоровье населения // Пожарная безопасность. 2007. № 3. С. 71–74.
- [6] Лесные пожары: виды, причины, способы тушения. Справка [Официальный сайт, Режим доступа]. URL: <http://ria.ru/documents/20090414/168056182.html>.
- [7] Калинин К. К. Воздействие крупных пожаров на лесные фитоценозы и система лесохозяйственных мероприятий по ликвидации их последствий : дис. доктора сель-хоз. наук.— Йошкар-Ола : Марийский государственный технический университет, 2002.
- [8] Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними.— Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1992.
- [9] Гришин А. М., Фильков А. И. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров.— Кемерово : Практика, 2005.
- [10] Пинаев В. С., Щербаков В. А. Пожары, вызванные ядерными взрывами, и их последствия // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 5. С. 116–121.
- [11] Залесов А. С. Классификация лесных пожаров : методические указания по курсу «Лесная пирология».— Екатеринбург : Изд-о УГЛТУ, 2011.
- [12] Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров.— Новосибирск : Наука, 2008.
- [13] Зайченко О. В. Разработка методов оценки воздействия лесного пожара на воздушную среду населенных территорий : автореф. дис. ...канд. техн. наук.— Владивосток : Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2005.
- [14] Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Закиров А. М., Качалкин В. А., Осипова Л. Э. Кинетика теплового поражения человека в чрезвычайных ситуациях // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 9. С. 30–36.
- [15] Закиров А. М. Количественная оценка опасности поражения человека тепловым излучением при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях : дисс. ... канд. техн. наук.— Казань : Казанский государственный технологический университет, 2011.
- [16] Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Закиров А. М., Чистов Ю. С., Закиров Г. М. Прогнозирование санитарных потерь от воздействия теплового излучения в чрезвычайных ситуациях // Безопасность жизнедеятельности. 2011. Т. 121. № 1. С. 36–41.
- [17] Пушкарева А. Е. Лазерный селективный нагрев элементов кожной ткани : дисс. ... канд. техн. наук.— СПб : Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2006.
- [18] Xu F., Lu T. J., Seffen K. A. Biothermomechanical behavior of skin tissue // Acta Mechanica Sinica. 2008. Vol. 24. No. 1. P. 1–23. (doi: 10.1007/s10409-007-0128-8)
- [19] Hummel A., Lyons K. Skin Burn Translation Model for Evaluating Hand Protection in Flash Fire Exposures // Fire Technology. 2014. Vol. 50. No. 5. P. 1285–1299. (doi: 10.1007/s10694-013-0336-7)

- [20] Академия ГПС МЧС России [Официальный сайт]. URL: <http://www.agps-mipb.ru/index.php/2010-12-23-08-05-07/138-8-12-teplovoe-izluchenie-i-ego-dejstvie-na-lyudej.html>.
- [21] *Whitton J. T., Everall J. D.* The thickness of the epidermis // *Br. J. Dermatol.* 1973. Vol. 89. No. 5. P. 467–476. (doi: 10.1111/j.1365-2133.1973.tb03007.x)
- [22] *Парамонов Б. А., Порембский Я. О., Яблонский В. Г.* Ожоги: руководство для врачей.— СПб. : СпецЛит, 2000.
- [23] *Вильдиева М. В.* Обоснование применения мексидпта в комплексном лечении больных с термической травмой : дисс. ... канд. мед. наук.— Саранск : Мордовский государственный университет, 2009.
- [24] *Быков В. Л.* Частная гистология человека. Глава 4. Кожа и ее производные.— СПб. : Сотис, 2001. С. 56—70.
- [25] *Еналеев Р. Ш., Закиров А. М., Чистов Ю. С., Теляков Э. Ш.* Термодинамические критерии теплового поражения человека в техногенных авариях // *Вестник Казанского технологического университета.* 2012. Т. 15. № 17. С. 50–55.
- [26] *Гольдзон М. А.* Недостаточность кровообращения при тяжелой термической травме и ее патогенетическая коррекция : дисс. ... канд. мед. наук.— Омск : Омская государственная медицинская академия, 2011.
- [27] ASTM Standard D 4108-87, Standard test method for thermal protective performance of material for clothing by open flame method, American society for testing and materials.— Philadelphia : PA, 1994.
- [28] ISO Standard 17492. Clothing for protection against heat and flame — determination of heat transmission on exposure to both flame and radiant heat.— Geneva, Switzerland : International Organization for standardization, 2003.
- [29] *Еналеев Р. Ш., Качалкин В. А., Теляков Э. Ш., Чистов Ю. С.* Прогнозирование теплового поражения человека при динамическом нагреве // *Пожаровзрывобезопасность.* 2012. № 5. С. 48–56.
- [30] *Еналеев Р. Ш., Осипов А. М., Качалкин В. А. и др.* // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену.— М. : Изд. МЭИ, 1998. Т. 6. С. 282–285.
- [31] *Incropera F. P., DeWitt D. P.* Fundamentals of heat and mass transfer.— New York : Wiley, 1981.
- [32] *Fausett L. V.* Numerical methods: algorithms and applications.— Upper Saddle River: Pearson Education, Inc. 2003.
- [33] *Stoll A. M., Greene L. C.* Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation // *Journal of Applied Physiology.* 1959. Vol. 14. No. 3. P. 373–382.
- [34] *Henriques F. C., Moritz A. R.* Studies of thermal injury. I. The conduction of heat to and through skin and the temperature attained therein. A theoretical and experimental investigation // *The American Journal of Pathology.* 1947. Vol. 21. No. 2. P. 531–549.

- [35] *Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Закиров А. М., Закиров Г. М., Качалкин В. А.* Математическая модель поражения человека тепловым излучением // *Материалы международной конференции «Химическая и радиационная физика».*— Казань : Казанский технологический университет, 2009. С. 73–83.
- [36] *Eisenberg N. A., Lynch C. J., Breeding R. J.* Vulnerability model. A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills. Tech. Report. — Springfield. 1975. P. 105–245.
- [37] ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.— М. : Госстандарт России. 1998.
- [38] Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий.— М. : ФГУ ВНИИПО, 2006.
- [39] Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Приложение к приказу МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404.
- [40] *Mannan S.* (ed.). *Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control.* Third Edition.— Butterworth-Heinemann, 2004. Vol. 1. (doi: 10.1016/B978-075067555-0.50090)
- [41] *Столл А.* Теплообмен в биотехнике // *Успехи теплопередачи : глава в монографии / пер. с англ.*— М. : Мир, 1970. С. 81–161.
- [42] *Еналеев Р. Ш., Келин И. А., Качалкин В. А.* и др. Применение математического моделирования для исследования термических ожогов // *Труды Казанского Ордена Трудового Красного Знамени медицинского института им. С. В. Курашова.* 1978. Т. 48. С. 91–95.
- [43] *Enalejev R. Sh., Kachalkin W. A.* Mathematical Sumulation of Heat and Mass Transfer Process in Skin Cover at Burn Injury // *Annals of the NewYork Academy of Science,* 1998. Vol. 858. P. 30–35. (doi: 10.1111/j.1749-6632.1998.tb10137.x)
- [44] *Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Хайруллин И. Р., Качалкин В. А.* Критерии опасности теплового поражения человека // *Безопасность жизнедеятельности.* 2008. № 8. С. 40–43.
- [45] *Еналеев Р. Ш., Теляков Э. Ш., Закиров А. М., Качалкин В. А., Осипова Л. Э.* Методы оценки опасности теплового поражения людей в чрезвычайных ситуациях // *Безопасность жизнедеятельности.* 2009. № 9. С. 30–36.
- [46] *Weaver U. A., Stoll A. M.* Mathematical model of skin exposed to thermal radiation. Aerospace medical research department. Tech. Rep. NADC-MR-6708. 1967.
- [47] *Feng Q., Zhao-yan H., Zheng-kang Z., Li-xing, S.* The Establishment of the Mathematical Model of the 2nd Degree Burn Injury of Human Tissues and Its Application // *Proc. of the 2005 IEEF Engineering in Medical and Biology 27th Annual Conference.*— Shanghai, 2005. P. 2918–2921. (doi: 10.1109/IEMBS.2005.1617085)
- [48] *Lawson J. R.* Fire fighter's protective clothing and thermal environments of structural fire fighting. — Gaithersburg : National institute of standards and technology, MD 20899, 1996. P. 1–22.

- [49] *Behnke W. P.* Predicting Flash Fire Protection of Clothing from Laboratory Test Using Second-degree Burn to Rate Performance // *Fire and materials*. 1984. Vol. 8. No. 2. P. 53–63. (doi: 10.1002/fam.810080202)
- [50] *Бессмертный Б. С.* Математическая статистика в клинической профилактической и экспериментальной медицине.— М. : Медицина, 1967.
- [51] *Герасимовой Л. И., Назаренко Г. И.* Термические и радиационные ожоги.— М. : Медицина, 2005.
- [52] *Елохин А. Н.* Анализ и управление риском: теория и практика.— М. : ЗАО «Индустриальный риск», 2002.
- [53] *Акимов В. А., Быков В. Ю., Востоков В. Ю. и др.* Методика оценки рисков чрезвычайных ситуаций и нормативы приемлемого риска чрезвычайных ситуаций // *Проблемы анализа риска*. 2007. Т. 4. № 4. С. 347–367.
- [54] *Маршалл В.* Основные опасности химических производств.— М. : Мир, 1989.
- [55] *Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др.* Взрывные явления. Оценка и последствия. Кн. 2. / пер. с англ.; под ред. Я. Б. Зельдовича и Б. Е. Гельфанда.— М. : Мир, 1986.

Авторы:

Коробкина Дарья Валерьевна, магистрант Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета

Барановский Николай Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета

Researches on Thermal Influence Processes of Forest Fires on the Person Tissue: Prospects of Medical Information Systems Creation

D. V. Korobkina, N. V. Baranovskiy
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634034
e-mail: firedanger@yandex.ru

Abstract. The present review is focused on most significant researches of thermal influence processes of forest fires on the person tissue (especially on skin). The analysis of the various researches implemented from the middle of the XX-th century on present time was carried out. The general characteristic of forest fires and their basic types is being considered. The basic methods and approaches used at research of a problem of thermal influence of forest fires on the person tissue are assigned. Tool, computational and computational-experimental methods for the analysis of a problem of an estimation of the thermal influence of forest fires on the person tissue were considered. It is suggested to use as the basic method the approach of mathematical modelling for research of the specified problem. Prospects of development of program components, mathematical models of thermal influence of forest fires on the person tissue are considered. Such program realizations of the problem-oriented algorithms could become a basis for creation of medical information systems for needs of the Ministry of Emergency Measures and emergency at minimization and liquidation of social damage from forest fires.

Keywords: forest fire, thermal influence, burn, modelling, medical information system

References

- [1] Gusev A. V. (2012) Rynok medicinskih informacionnyh sistem: obzor, izmenenija, trendy. *Vrach i informacionnye tehnologii*, 3, 6–15.
- [2] Kuznetsov G. V., Baranovskiy N. V. (2009) Prognoz vozniknovenija lesnyh pozharom i ih jekologicheskie posledstvija. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN. (rus)
- [3] Kuznetsov V. I., Kozlov N. I., Homjakov P. M. (2005) Matematicheskoe modelirovanie jevoljucii lesa dlja celej upravlenija lesnym hozjajstvom. Moscow. (rus)
- [4] Grishin A. M., Filkov A. I. (2005) Prognoz vozniknovenija i rasprostranenija lesnyh pozharov. Kemerovo: Izd-vo Praktika. (rus)
- [5] Baranovskiy N. V., Baranovskaja S. V., Isakova A. V. (2007) Metodika ocenki vlijanija lesnyh pozharov na zdorove naselenija. *Pozharnaja bezopasnost*, 3, 71–74. (rus)
- [6] Lesnye pozhary: vidy, prichiny, sposoby tushenija. Spravka. (<http://ria.ru/documents/20090414/168056182.html>) (rus)

- [7] Kalinin K. K. (2002) Vozdejstvie krupnyh pozharov na lesnye fitocenozy i sistema leshozozajstvennyh meroprijatij po likvidacii ih posledstvij. Dis. Marijskij gos. tech. univ. (rus)
- [8] Grishin A. M. (1992) Matematicheskoe modelirovanie lesnyh pozharov i novye sposoby borby s nimi. Novosibirsk, Nauka, Sib. otd. (rus)
- [9] Grishin A. M., Filkov A. I. (2005) Prognoz voznikovenija i rasprostraneniya lesnyh pozharov. Kemerovo, Praktika. (rus)
- [10] Pinaev V. S., Shherbakov V. A. (1996) Pozhary, vyzvannye jadernymi vzryvami, i ih posledstviya. *Fizika gorenija i vzryva*. 32(5), 116–121. (rus)
- [11] Zalesov A. S. (2011) Klassifikacija lesnyh pozharov: Metodicheskie ukazaniya po kursu «Lesnaja pirologija». Ekaterinburg, Izd. UGLTU. (rus)
- [12] Dorrer G. A. (2008) Dinamika lesnyh pozharov. Novosibirsk, Nauka. (rus)
- [13] Zajchenko O. V. (2005) Razrabotka metodov ocenki vozdeystvija lesnogo pozhara na voz-dushnuju sredu naselennyh territorij. Avtoref. dis. Komsomojsk-na-Amure. gosudarstvennyj tehničeskij universitet. (rus)
- [14] Enaleev P. S., Teljakov Je. S., Zakirov A. M., Kachalkin V. A., Osipova L. J. (2009) Kinetika teplovogo porazhenija cheloveka v chrezvychajnyh situacijah. *Bezopasnost zhiznedejatelnosti*, 9, 30–36. (rus)
- [15] Zakirov A. M. (2011) Kolichestvennaja ocenka opasnosti porazhenija cheloveka teplo-vym izlucheniem pri pozharah na himicheskikh i neftehimicheskikh predpriyatijah. Diss. Kazanskij gosudarstvennyj tehnologičeskij universitet. (rus)
- [16] Enaleev R. S., Teljakov J. S., Zakirov A. M., Chistov J. S., Zakirov G. M. (2011) Ppognozipovanie sanitapnyh potep' ot vozdeystvija teplovogo izluchenija v chpezvychajnyh situacijah. *Bezopasnost zhiznedejatelnosti*, 121(1), 36–41. (rus)
- [17] Pushkareva A. E. (2006) Lazernyj selektivnyj nagrev jelementov kozhnoj tkani. Diss. Sankt-Peterburgskij gos. univ. informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. (rus)
- [18] Xu F., Lu T. J., Seffen K. A. (2008) Biothermomechanical behavior of skin tissue. *Acta Mechanica Sinica*, 24(1), 1–23. (doi: 10.1007/s10409-007-0128-8)
- [19] Hummel A., Lyons K. (2014) Skin Burn Translation Model for Evaluating Hand Protection in Flash Fire Exposures. *Fire Technology*, 50(5), 1285–1299. (doi: 10.1007/s10694-013-0336-7)
- [20] Akademiya GPS MChS Russia. <http://www.agps-mipb.ru/index.php/2010-12-23-08-05-07/138-8-12-teplovoe-izluchenie-i-ego-dejstvie-na-lyudej.html>.
- [21] Whitton J. T., Everall J. D. The thickness of the epidermis // Br. J. Dermatol. 1973. Vol. 89. No. 5. P. 467–476. (doi: 10.1111/j.1365-2133.1973.tb03007.x)
- [22] Paramonov B. A., Porembskij J. O., Jablonskiy V. G. (2000) Ozhogi: Rukovodstvo dlja vrachej. SPb., SpecLit. (rus)
- [23] Vildieva M. V. (2009) Obosnovanie primenenija meksidapta v kompleksnom lechenii bol'nyh s termicheskoj travmoj. Diss. Mordovskij gosudarstvennyj universitet. (rus)

- [24] Bykov V. L. (2001) Chastnaja gistologija cheloveka. Glava 4. Kozha i ejo proizvodnye. SPb., Sotis, 56–70. (rus)
- [25] Enaleev R. S., Zakirov A. M., Chistov J. S., Teljakov J. S. (2012) Termodinamicheskie kriterii teplovogo porazhenija cheloveka v tehnogennyh avarijah. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 15(17), 50–55. (rus)
- [26] Goldzon M. A. (2011) Nedostatochnost' krovoobrashhenija pri tzhelohoj termicheskoj travme i ee patogeneticheskaja korrekciija. Diss. Omskaja gosudarstvennaja medicinskaja akademija, 2011. (rus)
- [27] ASTM Standard D 4108-87, Standard test method for thermal protective performance of material for clothing by open flame method, American society for testing and materials. Philadelphia, PA.
- [28] ISO Standard 17492. Clothing for protection against heat and flame — determination of heat transmission on exposure to both flame and radiant heat. Geneva, Switzerland, International Organization for standardization.
- [29] Enaleev R. S., Kachalkin V. A., Teljakov J. S., Chistov J. S. (2012) Prognozirovanie teplovogo porazhenija cheloveka pri dinamicheskom nagreve. *Pozharovzryvobezopasnost*, 5, 48–56. (rus)
- [30] Enaleev R. S., Osipov A. M., Kachalkin V. A. et al. (1996) // Trudy Vtoroj Rossijskoj nacional'noj konferencii po teploobmenu. Moscow, vol. 6, 282–285. (rus)
- [31] Incropera F. P., DeWitt D. P. (1981) Fundamentals of heat and mass transfer. New York: Wiley.
- [32] Fausett L. V. (2003) Numerical methods: algorithms and applications. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.
- [33] Stoll A. M., Greene L. C. (1959) Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation, *Journal of Applied Physiology*, 14(3), 373–382.
- [34] Henriques F. C., Moritz A. R. (1947) Studies of thermal injury. I. The conduction of heat to and through skin and the temperature attained therein. A theoretical and experimental investigation. *The American Journal of Pathology*, 21(2), 531–549.
- [35] Enaleev R. Sh., Teljakov Je. Sh., Zakirov A. M., Zakirov G. M., Kachalkin V. A. (2009) Matematicheskaja model' porazhenija cheloveka teplovym izlucheniem. *Conf. Himicheskaja i radiacionnaja fizika*. Kazan, 2009. P. 73–83.
- [36] Eisenberg N. A., Lynch C. J., Breeding R. J. (1975) Vulnerability model. A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills. Tech. Report. Springfield. P. 105-245.
- [37] GOST R 12.3.047-98. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. (rus)
- [38] Rukovodstvo po ocenke pozharnogo riska dlja promyshlennyh predpriyatij. Moscow. (2006) (rus)
- [39] Metodika opredelenija raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh objektah. Prilozhenie k prikazu MChS RF ot 10 july 2009. № 404. (rus)

- [40] Mannan S. (ed.). (2004) Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control. Third Edition. Vol. 1. (doi: 10.1016/B978-075067555-0.50090)
- [41] Stoll A. M. (1967) Heat transfer in biotechnology. In: Advances in heat transfer. T. F. Irvine, J. P. Hartnett (Eds). Vol. 4. New York, Academic press, 65–141.
- [42] Enaleev R. Sh., Kelin I. A., Kachalkin V. A. et al. (1978) Primenenie matematicheskogo modelirovaniya dlja issledovanija termicheskikh ozhogov. *Trudy Kazanskogo medicinskogo instituta S. V. Kurashova*, 48, 91–95. (rus)
- [43] Enalejev R. Sh., Kachalkin W. A. (1998) Mathematical Sumulation of Heat and Mass Transfer Process in Skin Cover at Burn Injury. *Annals of the NewYork Academy of Science*, 858, 30–35. (doi: 10.1111/j.1749-6632.1998.tb10137.x)
- [44] Enaleev R. Sh., Teljakov J. Sh., Hajrullin I. R., Kachalkin V. A. (2008) Kriterii opasnosti teplovogo porazhenija cheloveka. *Bezopasnost zhiznedejatelnosti*, 8, 40–43. (rus)
- [45] Enaleev R. Sh., Teljakov J. Sh., Zakirov A. M., Kachalkin V. A., Osipova L. J. (2009) Metody ocenki opasnosti teplovogo porazhenija ljudej v chrezvychajnyh situacijah. *Bezopasnost zhiznedejatelnosti*, 9, 30–36. (rus)
- [46] Weaver U. A., Stoll A. M. (1967) Mathematical model of skin exposed to thermal radiation. Aerospace medical research department. Tech. Rep. NADC-MR-6708.
- [47] Feng Q., Zhao-yan H., Zheng-kang Z., Li-xing S. (2005) The Establishment of the Mathematical Model of the 2nd Degree Burn Injury of Human Tissues and Its Application. *Proc. of the 2005 IEEF Engineering in Medical and Biology 27th Annual Conference*, 2918–2921. (doi: 10.1109/IEMBS.2005.1617085)
- [48] Lawson J. R. (1996) Fire fighter's protective clothing and thermal environments of structural fire fighting. Gaithersburg : National institute of standards and technology, MD 20899. P. 1–22
- [49] Behnke W. P. (1984) Predicting Flash Fire Protection of Clothing from Laboratory Test Using Second-degree Burn to Rate Performance. *Fire and materials*, 8(2), 53–63. (doi: 10.1002/fam.810080202)
- [50] Bessmertnyj B. S. (1967) Matematicheskaja statistika v klinicheskoy profilakticheskoy i jeksperimental'noj medicine. Mscow, Medicina. (rus)
- [51] Gerasimovoj L. I., Nazarenko G. I. (2005) Termicheskie i radiacionnye ozhogi. Moscow, Medicina. (rus)
- [52] Elohin A. N. (2002) Analiz i upravlenie riskom: teorija i praktika. Moscow, ZAO «Industrial'nyj risk».
- [53] Akimov V. A., Bykov V. J., Vostokov V. J. et al. (2007) Metodika ocenki riskov chrezvychajnyh situacij i normativy priemlemogo riska chrezvychajnyh situacij. *Problemy analiza riska*, 4(4), 347–367.
- [54] Marshall V. (1989) Osnovnye opasnosti himicheskikh proizvodstv. Moscow. (rus)
- [55] Bejker U., Koks P., Ujestajm P. et al. (1986) Vzryvnye javlenija. Ocenka i posledstviya. Vol. 2. Moscow, Mir.

УДК 004.05

Исследование алгоритмов работы информационной системы с использованием математического аппарата сетей Петри

Д. А. Корнев¹, Е. Ю. Логинова^{1, 2}

¹Московский государственный университет путей сообщения
127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 15

²Московский технологический институт,
119334, Москва, Ленинский проспект, 38А,
e-mail: da.kornev@gmail.com, eju-loginova@mail.ru

Аннотация. Предложена математическая модель для исследования функционирования информационной системы с использованием математического аппарата расширенных сетей Петри. Приведены результаты моделирования работы аппаратных ресурсов как дискретной динамической системы.

Ключевые слова: динамическое моделирование, математический аппарат сетей Петри, информационные системы

В настоящее время одной из актуальных тем является исследование динамических процессов, протекающих в информационных системах. С целью успешного использования ресурсов информационных систем необходимо решить задачу эффективного распределения доступных аппаратных средств.

Разработка алгоритмов эффективного управления ресурсами может выполняться на базе ее математической модели, которая должна адекватно отображать процессы управления и распределения ресурсов с учетом случайного характера параметров решаемой задачи. Для анализа динамических процессов распределения ресурсов информационной системы целесообразно использовать математический аппарат сетей Петри. Этот аппарат позволяет объединить преимущества графового представления системы и дискретной динамической модели, рассчитывать количественные показатели ее работы, которые характеризуются параллельными и асинхронными процессами. Аппарат сетей Петри может быть с успехом использован и для определения эффективности работы корпоративной ИС.

Моделирование в терминах сетей Петри осуществляется на событийном уровне. Переходы отображают действия, происходящие в системе, а позиции — состояния, предшествующие этим действиям, и состояния, принимаемые системой после выполнения действия. Анализ результатов моделирования позволяет опреде-

лечь динамическое состояние системы при любых алгоритмах управления и выполняемых процедурах.

Рассмотрим информационную систему (ИС), созданную на базе доступных аппаратных ресурсов, операционной системы (ОС) и множества процессов (ПР). Обобщенные доступные ресурсы аппаратного обеспечения (объем оперативной памяти, тактовая частота процессора, емкость, количество операций ввода-вывода в секунду и время обращения к жесткому диску) позволяют одновременно функционировать пяти ПР ($SRC = 5$). Связь ПР с аппаратным обеспечением и отдельных ПР между собой осуществляется через ОС, которая обеспечивает распределение ресурсов системы между всеми ПР. В конечном итоге, именно ОС определяет эффективность работы ПР на доступном аппаратном обеспечении.

Для исследования работы этой системы разработана ее динамическая модель в терминах сетей Петри, которая определяется совокупностью объектов (рис. 1) [1–3]:

$$\Pi = \{P, T, I, O, \mu\}, \quad (1)$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n\}$ — непустое конечное множество позиций; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_m\}$ — непустое конечное множество переходов; I — входная функция переходов, определяющая кратность входных дуг переходов $I(t_j)$; O — выходная функция переходов, определяющая кратность выходных дуг переходов $O(t_j)$; μ — вектор маркировки.

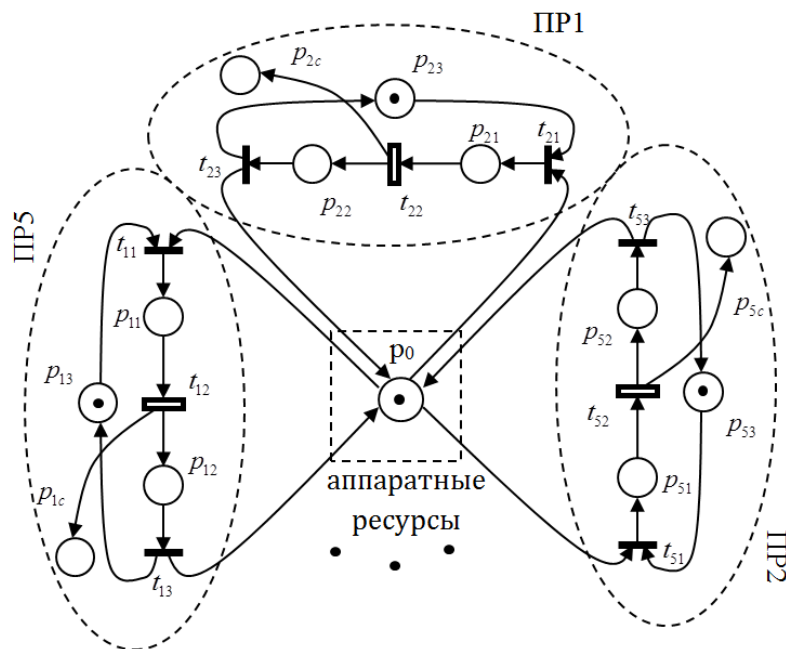


Рисунок 1. Функционирование ИС в терминах сети Петри

Функции входа и выхода определяются отображением бинарного произведения множества переходов и множества позиций на множество $\{0, 1\}$:

$$I: T \times P \rightarrow \{0, 1\};$$

$$O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}.$$

Маркировка сети определяется отображением множества позиций на множество натуральных чисел N :

$$\mu: P \rightarrow N.$$

Графически, в терминах расширенных сетей Петри, модель ИС представляется как двудольный ориентированный маркированный граф, состоящий из вершин двух типов — позиций и переходов, соединенных между собой дугами.

Моделирование маршрутов в маркированном графе сетей Петри должно удовлетворять условиям:

$$|I(p_i)| = |\{t_j | p_i \in O(t_j)\}| = 1;$$

$$|O(p_i)| = |\{t_j | p_i \in I(t_j)\}| = 1,$$

где $\{t_j | p_i \in O(t_j)\}$ — множество переходов, для которых p_i является выходом; $\{t_j | p_i \in I(t_j)\}$ — множество переходов, для которых p_i является входом.

Разрешение на выполнение перехода $t_i \in T$ определяется условием [1, 2]

$$t_j: \mu(p_i) \geq \#(p_i, I(t_j)), \quad (2)$$

для всех $p_i \in P$, где $\#(p_i, I(t_j))$ — кратность входной позиции p_i для перехода t_j ; т. е. переход t_j разрешен при некоторой маркировке $\mu(p_i)$, если позиция $p_i \in P$ имеет разметку, не меньшую, чем кратность дуги, соединяющей p_i и t_j .

Результатом выполнения разрешенного перехода $t_i \in T$ является новая маркировка μ' :

$$\mu'(p_i) = \mu(p_i) - \#(p_i, I(t_j)) + \#(p_i, O(t_j)). \quad (3)$$

С учетом изложенного, модель функционирования ИС с SRC = 5, представленная в терминах сетей Петри, содержит 21 позицию и 15 переходов:

$$P = \{p_0, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{1c}, p_{21}, \dots, p_{gl}, \dots, p_{53}, p_{5c}\};$$

$$T = \{t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{21}, \dots, t_{gl}, \dots, t_{52}, t_{53}\}.$$

Элементами множества позиций P являются: p_0 — разделяемая среда (ресурс системы); $p_{11} - p_{13}$, $p_{21} - p_{23}$, $p_{31} - p_{33}$, $p_{41} - p_{43}$, $p_{51} - p_{53}$ — состояние ПР 1–5; $(p_{11}, p_{21}, p_{31}, p_{41}, p_{51})$ — предоставление ресурсов ПР 1–5; $p_{12}, p_{22}, p_{32}, p_{42}, p_{52}$ —

освобождение ресурсов ПР 1–5; $p_{13}, p_{23}, p_{33}, p_{43}, p_{53}$ — ожидание ресурсов ПР 1–5); $p_{1c}, p_{2c}, p_{3c}, p_{4c}, p_{5c}$ — счетчики операций.

Элементами множества позиций T являются: $t_{11}-t_{13}, t_{21}-t_{23}, t_{31}-t_{33}, t_{41}-t_{43}, t_{51}-t_{53}$ — процессы распределения ресурсов аппаратного обеспечения и формирования запросов ПР 1–5 ($t_{11}, t_{21}, t_{31}, t_{41}, t_{51}$ — выделение ресурсов ПР 1–5; $t_{12}, t_{22}, t_{32}, t_{42}, t_{52}$ — работа с предоставленными ресурсами ПР 1–5; $t_{13}, t_{23}, t_{33}, t_{43}, t_{53}$ — возвращение ресурсов ПР 1–5 системе).

Процесс динамического моделирования работы ИС определяется срабатыванием переходов и изменением маркировки позиций в соответствии с (2) и (3): при срабатывании перехода изменяется маркировка его входной и выходной позиций. Таким образом, для ИС с ресурсом $SRC = 5$ динамическая модель состояний при полном использовании ресурса (функционировании пяти ПР) определится системой уравнений [4]:

$$\begin{aligned} \mu'(p_0) = & \mu(p_0) + 1(\#(p_0, I(t_{13})) = 1) + 1(\#(p_0, I(t_{23})) = 1) + 1(\#(p_0, I(t_{33})) = 1) + \\ & + 1(\#(p_0, I(t_{43})) = 1) + 1(\#(p_0, I(t_{53})) = 1) - 1(\#(p_0, O(t_{11})) = 1) - \\ & - 1(\#(p_0, O(t_{21})) = 1) - 1(\#(p_0, O(t_{31})) = 1) - 1(\#(p_0, O(t_{41})) = 1) - \\ & - 1(\#(p_0, O(t_{51})) = 1); \end{aligned}$$

$$t_{11}: \mu(p_0) \geq \#(p_0, I(t_{11})) \text{ и } \mu(p_{13}) \geq \#(p_{13}, I(t_{11}));$$

$$\mu'(p_{11}) = \mu(p_{11}) + 1(\#(p_{11}, I(t_{11})) = 1) - 1(\#(p_{11}, O(t_{12})) = 1);$$

$$t_{12}: \mu(p_{11}) \geq \#(p_{11}, I(t_{12}));$$

$$\mu'(p_{12}) = \mu(p_{12}) + 1(\#(p_{12}, I(t_{12})) = 1) - 1(\#(p_{12}, O(t_{13})) = 1);$$

$$t_{13}: \mu(p_{12}) \geq \#(p_{12}, I(t_{13}));$$

$$\mu'(p_{13}) = \mu(p_{13}) + 1(\#(p_{13}, I(t_{13})) = 1) - 1(\#(p_{13}, O(t_{11})) = 1);$$

$$\mu'(p_{1c}) = \mu(p_{1c}) + 1(\#(p_{1c}, I(t_{12})) = 1);$$

$$t_{21}: \mu(p_0) \geq \#(p_0, I(t_{21})) \text{ и } \mu(p_{23}) \geq \#(p_{23}, I(t_{21}));$$

$$\mu'(p_{21}) = \mu(p_{21}) + 1(\#(p_{21}, I(t_{21})) = 1) - 1(\#(p_{21}, O(t_{22})) = 1);$$

$$t_{22}: \mu(p_{21}) \geq \#(p_{21}, I(t_{22}));$$

$$\mu'(p_{22}) = \mu(p_{22}) + 1(\#(p_{22}, I(t_{22})) = 1) - 1(\#(p_{22}, O(t_{23})) = 1);$$

$$t_{23}: \mu(p_{22}) \geq \#(p_{22}, I(t_{23}));$$

$$\begin{aligned}
\mu'(p_{23}) &= \mu(p_{23}) + 1(\#(p_{23}, I(t_{23})) = 1) - 1(\#(p_{23}, O(t_{21})) = 1); \\
\mu'(p_{2c}) &= \mu(p_{2c}) + 1(\#(p_{2c}, I(t_{22})) = 1); \\
t_{31} : \mu(p_0) &\geq \#(p_0, I(t_{31})) \text{ и } \mu(p_{33}) \geq \#(p_{33}, I(t_{31})); \\
\mu'(p_{31}) &= \mu(p_{31}) + 1(\#(p_{31}, I(t_{31})) = 1) - 1(\#(p_{31}, O(t_{32})) = 1); \\
t_{32} : \mu(p_{31}) &\geq \#(p_{31}, I(t_{32})); \\
\mu'(p_{31}) &= \mu(p_{31}) + 1(\#(p_{31}, I(t_{31})) = 1) - 1(\#(p_{31}, O(t_{32})) = 1); \\
t_{32} : \mu(p_{31}) &\geq \#(p_{31}, I(t_{32})); \\
\mu'(p_{32}) &= \mu(p_{32}) + 1(\#(p_{32}, I(t_{32})) = 1) - 1(\#(p_{32}, O(t_{33})) = 1); \\
t_{33} : \mu(p_{32}) &\geq \#(p_{32}, I(t_{33})); \\
\mu'(p_{33}) &= \mu(p_{33}) + 1(\#(p_{33}, I(t_{33})) = 1) - 1(\#(p_{33}, O(t_{31})) = 1); \\
\mu'(p_{3c}) &= \mu(p_{3c}) + 1(\#(p_{3c}, I(t_{32})) = 1); \\
t_{41} : \mu(p_0) &\geq \#(p_0, I(t_{41})) \text{ и } \mu(p_{43}) \geq \#(p_{43}, I(t_{41})); \\
\mu'(p_{41}) &= \mu(p_{41}) + 1(\#(p_{41}, I(t_{41})) = 1) - 1(\#(p_{41}, O(t_{42})) = 1); \\
t_{42} : \mu(p_{41}) &\geq \#(p_{41}, I(t_{42})); \\
\mu'(p_{42}) &= \mu(p_{42}) + 1(\#(p_{42}, I(t_{42})) = 1) - 1(\#(p_{42}, O(t_{43})) = 1); \\
t_{43} : \mu(p_{42}) &\geq \#(p_{42}, I(t_{43})); \\
\mu'(p_{43}) &= \mu(p_{43}) + 1(\#(p_{43}, I(t_{43})) = 1) - 1(\#(p_{43}, O(t_{41})) = 1); \\
\mu'(p_{4c}) &= \mu(p_{4c}) + 1(\#(p_{4c}, I(t_{42})) = 1); \\
t_{51} : \mu(p_0) &\geq \#(p_0, I(t_{51})) \text{ и } \mu(p_{53}) \geq \#(p_{53}, I(t_{51})); \\
\mu'(p_{51}) &= \mu(p_{51}) + 1(\#(p_{51}, I(t_{51})) = 1) - 1(\#(p_{51}, O(t_{52})) = 1); \\
t_{52} : \mu(p_{51}) &\geq \#(p_{51}, I(t_{52})); \\
\mu'(p_{52}) &= \mu(p_{52}) + 1(\#(p_{52}, I(t_{52})) = 1) - 1(\#(p_{52}, O(t_{53})) = 1); \\
t_{53} : \mu(p_{52}) &\geq \#(p_{52}, I(t_{53})); \\
\mu'(p_{53}) &= \mu(p_{53}) + 1(\#(p_{53}, I(t_{53})) = 1) - 1(\#(p_{53}, O(t_{51})) = 1); \\
\mu'(p_{5c}) &= \mu(p_{5c}) + 1(\#(p_{5c}, I(t_{52})) = 1).
\end{aligned}$$

Алгоритм моделирования динамических процессов в ИС в терминах сетей Петри представлен на рис. 2. Разработанная программа расчетов процессов ИС базируется на объектно-ориентированном подходе, для чего были созданы специали-

зированные классы, описывающие состояния, переходы, дуги и функционирование сетей Петри в целом.

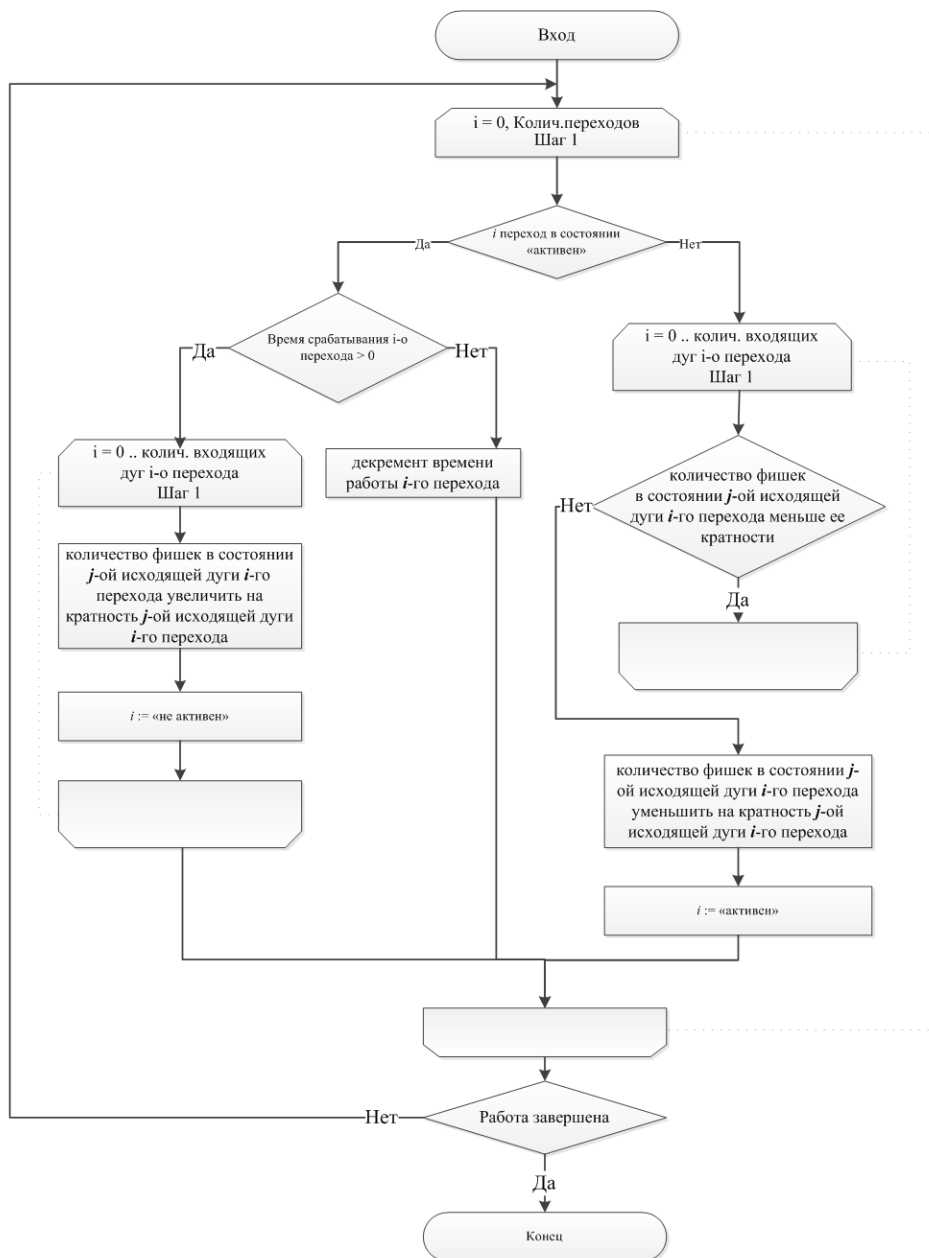


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма моделирования работы ИС в терминах сетей Петри

Применительно ко всей ИС с SRC = 5 и пятью ПР ее работа имеет вид, представленный на рис. 3.

При моделировании учитывалось, что в реальных условиях ИС работает со случайным характером загрузки. В разработанной программе это условие было реализовано с использованием генератора случайных чисел, который задавал время предоставления ресурса системе каждому ПР: алгоритмом моделирования выполнялось дискретное разбиение временной оси τ и задавалось распределение количества событий λ на каждом промежутке времени $\Delta\tau$ в предположении, что λ и τ являются независимыми величинами, т. е. работа ПР рассматривалась как случайный марковский процесс с пуассоновским потоком событий с интенсивностью $\lambda = \lambda(\tau)$ (рис. 3).

Из результатов моделирования, представленных на диаграммах рис. 3, видно, что поскольку продолжительность предоставления ресурсов ИС является случайной величиной, запросы на предоставление ресурса от ИС поступают хаотично, время их работы с ресурсом, в соответствии с алгоритмом работы генератора случайных чисел, меняется по дискретному закону распределения.

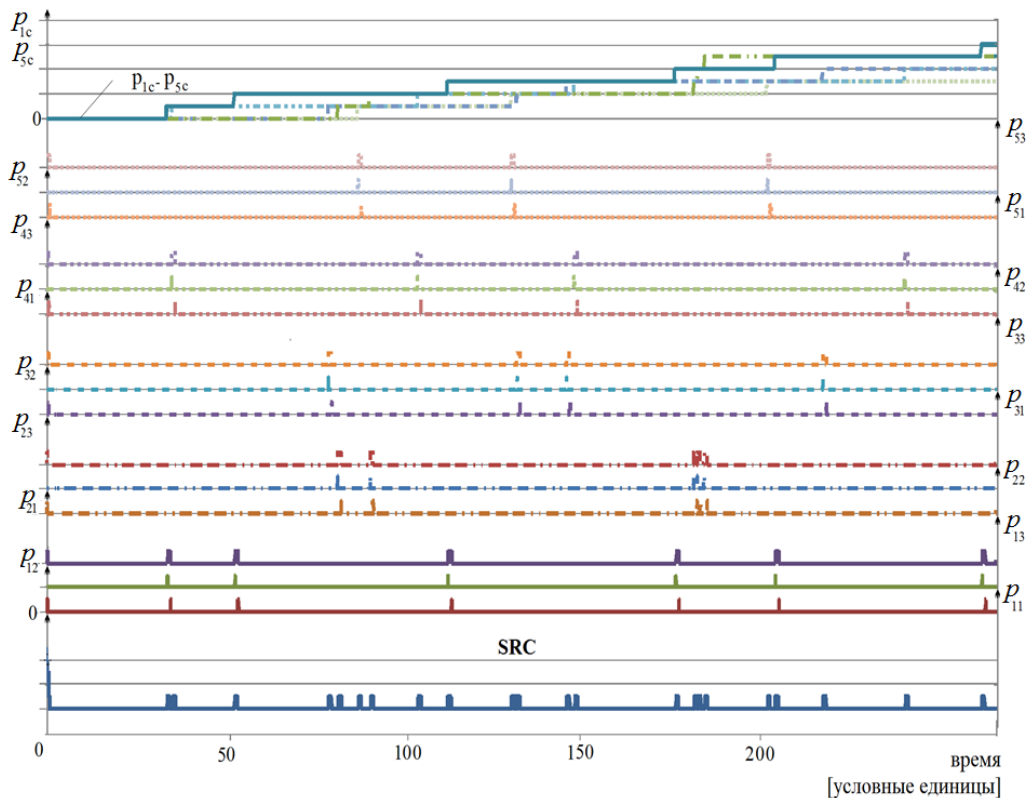


Рисунок 3. Динамический процесс работы ИС с $SRC = 5$ и пятью ПР при случайном времени использования ресурса

Таким образом, анализ процессов распределения ресурсов в ИС, полученных путем моделирования, соответствует работе реальной системы, а логические связи состояний и переходов системы соответствуют процессам взаимодействия отдельных ПР с ресурсом. Если ресурсов ИС достаточно только для работы одного ПР, то второй ПР всегда находится в состоянии ожидания, пока ресурс не освободится; и только после этого ресурс становится доступен для второго ПР. При этом ресурс ИС используется непрерывно. В случае, когда ресурсов достаточно для функционирования пяти ПР, они могут работать непрерывно и независимо друг от друга, что получено при моделировании ИС.

Таким образом, полученные результаты показали, что разработана динамическая модель ИС в терминах сети Петри, которая адекватно отражает работу реальной системы, что позволяет использовать ее для моделирования процессов в ИС и определять рациональную загрузку.

Литература

- [1] *Котов В. Е.* Сети Петри.— М. : Наука : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984.
- [2] *Лескин А. А., Мальцев П. А., Спиридонов А.М.* Сети Петри в моделировании и управлении.— Л. : Наука, 1989.
- [3] *Наумов В. С.* Использование сетей Петри при моделировании процесса транспортно-экспедиционного обслуживания // Автомобильный транспорт. 2009. № 24. С.120–124.
- [4] *Корнев Д. А.* Моделирование динамического состояния виртуальной инфраструктуры с использованием сетей Петри // Программная инженерия. 2014. № 5. С. 14–19.

Авторы:

Корнев Дмитрий Александрович, аспирант кафедры информационных технологий Московского государственного университета путей сообщения

Логинова Елена Юрьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергетики Московского технологического института

Investigation of Algorithms for the Information System with the Use of Petri Mathematical Networks

D. A. Korneev, E. Yu. Loginova
Moscow State University of Railway Engineering
15, Obraztsova Street, GSP-4, Moscow, 127994

Moscow Technological Institute,
38A, Leninckiy pr., Moscow, 119334

Abstract. The article proposes a mathematical model for the study of the functioning of the information system using the mathematical formalism of extended Petri networks. The results of simulation shows hardware resources as a discrete dynamical system.

Keywords: dynamic modeling, mathematical formalism of Petri nets, Information Systems.

Reference

- [1] *Kotov V. E.* (1984) *Seti Petri.* Moscow, Nauka Gl. red. fiz.-mat. lit. (rus)
- [2] *Leskin A. A., Malcev P. A., Spiridonov A.M.* (1989) *Seti Petri v modelirovanii i upravlenii.* Leningrad, Nauka. (rus)
- [3] *Naumov V. S.* (2009) *Ispolzovanie setej Petri pri modelirovanii processa trans-portno-jekspedicionnogo obsluzhivaniya.* *Avtomobilny transport*, 24, 120–124.
- [4] *Kornev D. A.* (2014) *Modelirovanie dinamicheskogo sostojaniya virtual'noj infrastruktury s ispol'zovaniem setej Petri.* *Programmnaja inzhenerija*, 5, 14–19.

УДК 004.4

Методы сокращения вычислительной сложности алгоритмов совмещения разнородных изображений

Е. Р. Муратов, М. Е. Никифоров

*Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1,
e-mail: nikiforov.m.b@vmt.rsreu.ru*

Аннотация. Повышение осведомленности пилота летательного аппарата о закабинном пространстве в условиях ограниченной видимости или полете на малых высотах в сложном рельефе местности является актуальной научно-технической задачей. Система комбинированного видения позволяет решить эту задачу путем предоставления комплексной информации от датчиков системы технического зрения, дополненной синтезированной моделью местности. В статье рассмотрены вопросы сокращения вычислительной сложности совмещения разнородных изображений.

Ключевые слова: алгоритмы совмещения изображений, вычислительная сложность алгоритмов.

Повышение осведомленности пилота летательного аппарата (ЛА) о закабинном пространстве в условиях ограниченной видимости или полете на малых высотах в сложном рельефе местности является актуальной научно-технической задачей. Система комбинированного видения ЛА должна решить эту задачу путем предоставления комплексной информации от датчиков системы технического зрения (СТЗ), дополненной синтезированной моделью местности. Синтезированная модель местности, или, другими словами, виртуальная модель местности (ВММ), строится по данным цифровой карты местности и текущим навигационным данным. Ошибки определения текущих навигационных данных ЛА не позволяют совмещать информацию от ряда датчиков СТЗ (таких как видеокамера, тепловизионная камера, радар) простым наложением двух изображений. Реальные суммарные погрешности позиционирования сенсоров могут достигать [1]:

- по координатам местности 35 ... 45 м;
- по углам 0.1° ... 0.2°;
- по высоте 6 ... 13 м.

На высотах порядка 1000 м и выше можно пренебречь ошибками в определении навигационных данных и выводить на индикатор пилота наложение ВММ на

изображения от датчиков СТЗ. На высотах ниже 1000 м требуется выполнять геометрическое совмещение разнородных изображений (например, кадр от видеокамеры и изображение ВММ). Чем ниже высота, тем больше расхождение изображений. На высотах порядка 100 м угловое расхождение ВММ и изображений от сенсоров достигает 1 радиана [1]. Для обеспечения безопасности полетов к системам комбинированного видения предъявляется ряд требований. В частности, требования регламентируются документом Р-315 [3], входящего в авиационный регистр международного авиационного комитета (АРМАК). А именно, в системах комбинированного видения максимальное угловое расхождение совмещенных изображений должно составлять не более 5 мрад, скорость обновления информации на индикаторах пилота быть не менее 15 Гц.

Вычислительная сложность геометрического совмещения возникает в первую очередь из-за разнородности информации, представляемой на ВММ и реальных изображениях. Геометрическое совмещение изображений, подверженных различным погодным, климатическим и сезонным факторам, фактически возможно только по контурам протяженных объектов на местности.

Существует несколько методов геометрического совмещения двух изображений:

- совмещение по линеаментам (нахождение линий на изображениях и вычисление между ними соответствия) [4];
- совмещения по парным точкам (ключевым точкам);
- корреляционно-экстремальное совмещение (КЭС).

При работе с разнородными изображениями, среди которых в большинстве случаев будут изображения от СТЗ, полученные в условиях ограниченной видимости, сложно выделить и сопоставить достаточное количество прямых линий или пар ключевых точек. Ошибка, например, в выборе одной пары точек может привести к неудовлетворительному результату совмещения. Поэтому самым надежным алгоритмом совмещения будет корреляционно-экстремальное совмещение по контурам объектов, выделенных на изображениях. Несмотря на то, что корреляционно-экстремальное совмещение дает результат в независимости от характера и состава контурных линий объектов, оно имеет значительные вычислительные затраты. При совмещении изображений для каждого кадра от датчика необходимо строить проекции ВММ, изменяя шесть параметров виртуальной камеры. Совмещение одной пары изображений сводится к определению значения корреляционной функции для ~10⁶ пар изображений, что в 10⁴ раза превышает производительность классической вычислительной архитектуры с графконтроллером [1].

Корреляционно-экстремальное совмещение выполняется с перебором значений по шести координатам: высоте, координатам места, курсу, крену и тангажу.

Предлагается использовать ряд подходов, позволяющих сократить вычислительную сложность корреляционно-экстремального совмещения до возможности выполнения его в реальном времени.

Для исключения перебора значений по курсу предлагается строить ВММ больших размеров (рис. 1).

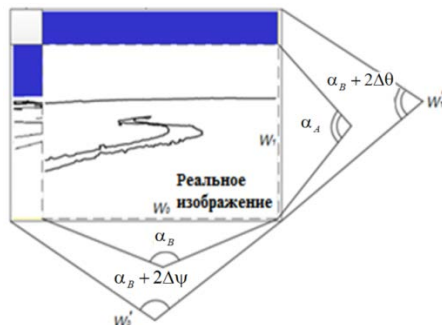


Рисунок 1. ВММ расширенных размеров $\alpha_B + 2\Delta\theta$

Для исключения перебора по крену и тангажу — использовать линию горизонта или некорреляционное совмещение по крену, если линию горизонта невозможно представить прямой линией, а также при ее отсутствии. На изображении α_A , α_B — углы зрения реальной камеры, $\Delta\theta$ — погрешность определения тангажа, $\Delta\psi$ — погрешность определения курса.

Время, затрачиваемое на обработку одной пары изображений, складывается из времени, затрачиваемого на предобработку пары изображений и досовмещение их методом КЭС. Под предобработкой будем понимать последовательность действий над изображениями, предоставленную на рис. 2.



Рисунок 2. Последовательность процедуры совмещения изображений

Для ряда шагов (контрастирование, размытие, детектор границ) в этой последовательности применяются известные алгоритмы. Для других используются авторские [2, 6], целью создания которых является снижение временных затрат вычислений.

Некорреляционное совмещение оперирует полученными параметрами отрезков в векторном описании границ объектов. Векторное описание границы объекта (контура) в итоге представлено упорядоченным множеством $\{T_i\}_{i=1}^n$ вершин в составе ломанной [2]. Для каждого отрезка $T_i T_{i+1}$ в составе ломанной (рис. 3) определяется его длина d_i и углы α_i и β_i , образованные этим отрезком с положительным направлением оси Ox в обеих вершинах.

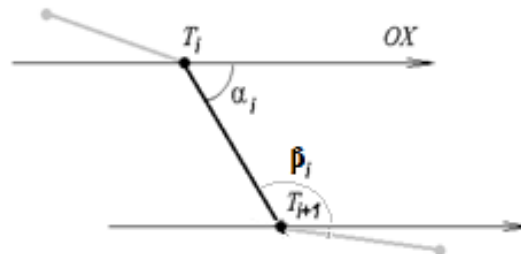


Рисунок 3. Векторное представление линий

Основной идеей некорреляционного совмещения по крену и тангажу является нахождение реальной линии горизонта и совмещение ее с синтезированной. Для этого отбираются отрезки линий на изображениях от СТЗ, находящиеся в области вероятного нахождения линии горизонта. Эта область заключена на рис. 4 между линиями g_1 и g_2 и рассчитывается с учетом максимальных ошибок в определении навигационных данных [5]. Используя координаты этих отрезков методом наименьших квадратов, вычисляется линия.



Рисунок 4. Нахождение линии горизонта

Погрешность по крену вычисляется по формуле

$$\Delta\gamma = \left(\overline{L_R}, \overline{L_S} \right),$$

где L_R — линия, параллельная вычисленной линии горизонта; L_S — линия, параллельная синтезированной линии горизонта.

Погрешность по тангажу вычисляется по формуле

$$\Delta\theta = \theta - \arctan\left(\frac{2 \tan(\alpha_A) \Delta H}{I_H}\right),$$

где α_A — угол зрения телекамеры в вертикальной плоскости; I_H — высота изображения в пикселях; ΔH — расстояние в пикселях между точками пересечения перпендикуляра к вычисленной линии горизонта в координате x , равной центру изображения по оси Ox и пересечением его с линией горизонта, построенной по ВММ (см. рис. 4б).

В случае, если линию горизонта выделить невозможно, то производится некорреляционное совмещение по крену, основывающееся на преобладающем наклоне отрезков на векторизованном изображении, полученном от СТЗ.

Алгоритм нахождения углового расхождения изображений по крену сводится к следующему. Составляется комбинация пар отрезков, у которых модуль разности наклонов не превышает некоторого порогового значения ε_{kr} (максимально возможного угла взаимного разворота с учетом погрешности определения навигационных данных). Образованные пары отрезков участвуют в процедуре вычисления статистических величин. Алгоритм нахождения угла взаимного разворота носит итерационный характер. На каждой итерации множество отфильтрованных пар отрезков составляют множество $\Gamma\{T_{im}, T_{VMM}\}$, где T_{im} — отрезки из векторного описания первого изображения, T_{VMM} — из второго (ВММ). В данном множестве один отрезок первого изображения может быть в паре с несколькими отрезками второго изображения и наоборот. Каждой паре отрезков соответствует значение разности углов их наклонов к оси Ox —

$$\Delta\alpha_i = \begin{cases} \alpha_i^{(1)} - \alpha_i^{(2)}, < \varepsilon_{kr}; \\ \alpha_i^{(1)}, \beta_i^{(2)}, < \varepsilon_{kr}. \end{cases}$$

Далее выполняются следующие шаги:

1. Нахождение предельных погрешностей для координат в зависимости от навигационных данных ε_{kr} .

2. Нахождение пар длинных ребер с взаимным расположением, удовлетворяющим найденным погрешностям.

3. Нахождение математического ожидания среди значений разности наклонов пар ребер, выбранных на шаге 2, по формулам

$$A = \sum_{i=1}^m \Delta\alpha_i, \quad |\Delta\alpha_i| < \varepsilon_{kr}, \quad \hat{M}(\Delta\alpha) = \frac{A}{m}.$$

4. Нахождение дисперсии среди значений разности наклонов, выбранных на шаге 2 пар ребер, по формулам

$$A' = \sum_{i=1}^m (\Delta\alpha_i - \hat{M}(\Delta\alpha))^2, \quad |\Delta\alpha_i| < \varepsilon_{kr}, \quad \hat{D}(\Delta\alpha) = \frac{A'}{m}.$$

5. Нахождение отклонения вычисляется по формуле:

$$A'' = \sum_{i=1}^{m'} \Delta\alpha_i, \quad |\Delta\alpha_i - \hat{M}(\Delta\alpha)| < \lambda \cdot \sqrt{\hat{D}(\Delta\alpha)},$$
$$\delta = \begin{cases} \frac{A''}{m'}, & (m') > 0; \\ \hat{M}(\Delta\alpha), & (m') = 0; \end{cases} \quad 0 < \lambda < 1.$$

6. Поворот ВММ изображения относительно видеоизображения на угол, равный значению отклонения.

7. Алгоритм завершает работу, если ε — требуемая точность совмещения превышает заданную величину, иначе алгоритм повторяется с шага 2.

Исходным углом поворота одного изображения относительно другого будем считать $\Delta = \sum_n \delta_n$, где n — номер итерации.

В экспериментальных исследованиях значение ε было выбрано как 0.01° .

Чем меньше максимально возможное угловое расхождение, тем меньше требуется итераций. Для углового расхождения 16° обычно требуется не более 5–6 итераций. На рис. 5 представлен результат вычисления углового расхождения для телевизионного изображения и ВММ.

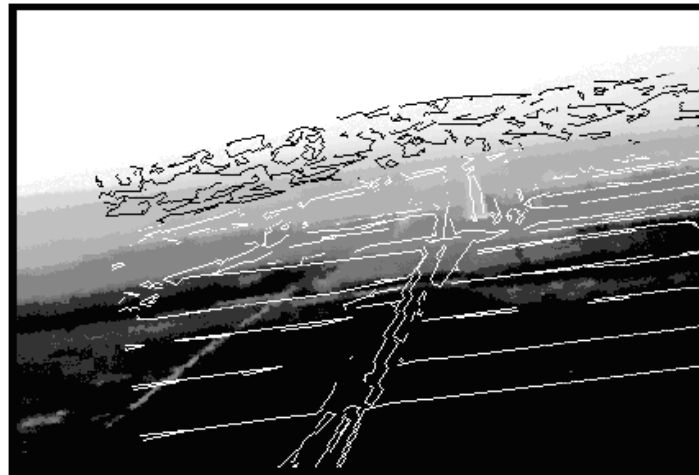


Рисунок 5. Результат совмещения изображений по крену

Замер производительности алгоритма для совмещения данных изображений размерностью 704×576 пикселей по крену составил 0.014 мкс. Данное время было получено при выполнении алгоритма на одном ядре процессора AMD Phenom II

3.1 ГГц. На каждой итерации были получены следующие углы компенсации взаимного разворота:

- первая итерация $\delta = -6.82$;
- вторая итерация $\delta = -2.13$;
- третья итерация $\delta = -0.46$;
- четвертая итерация $\delta = 0$.

При обработке 25 кадров/с на совмещение пары изображений отводится 0,04 с. В свою очередь, предварительная обработка одного кадра размерностью 704×576 пикселей представленными методами на тестовом стенде (1 ядро CPU Phenom-II 3 ГГц, 10 GFlops) выполняется в среднем за 0,42 с, что в ~14,14 раза больше требуемого времени.

Была произведена оценка времени выполнения алгоритмов на различных процессорах и видеочипах, результаты оценок приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Оценка производительности алгоритмов на CPU

Модель	Тактовая частота МГц	Производительность CPU, Гфлопс	Требуемое кол-во CPU, шт
AMD Phenom II X4 945	3000	40	4
МЦСТ R1000	1000	16	9
Эльбрус-2С+	500	32	5
Risc R16000	750-1000	1,4	102
Intel Xeon E5-2695 V2	2400	259	1

Таблица 2. Оценка производительности алгоритмов на GPU

Видео контроллер	Кол-во GPU	Производительность, Гфлопс	Требуемое кол-во чипов, шт
AMD HD7870	1280	2560	1
AMD Mob. 6870	800	1080	1

Из произведенных оценок видно, что в реальном времени возможно производить совмещение с использованием одного графического чипа, поддерживающего технологию OpenCL.

Узким местом вычислений с использованием технологии OpenCL является большое время передачи данных по шине. Предлагается использовать технологию OpenCLGL Interop [7] для минимизации времени передачи данных по шине. Пред-

лагается выводить данные от СТЗ непосредственно в текстуру OpenGL, доступ к которой возможен из OpenCL. Структура модуля, производящего совмещения изображений с помощью OpenCL на видеоконтроллере, представлена на рис. 6.

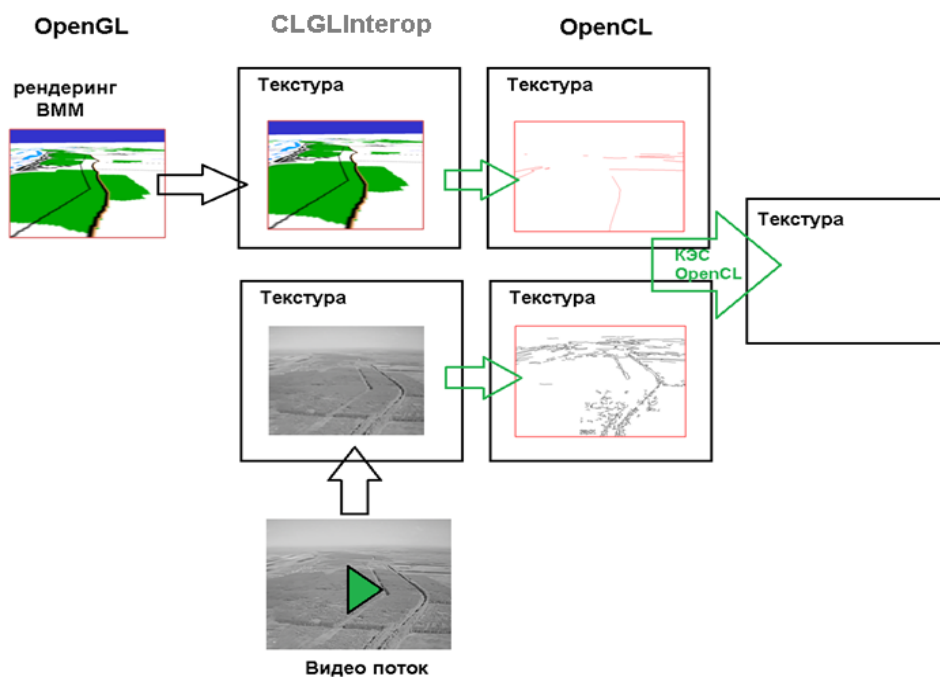


Рисунок 6 — Схема процедуры совмещения с использованием OpenCL и OpenGL

Структура предусматривает вывод видеопотока непосредственно в текстуру, обрабатываемую OpenGL. ВММ формируется также непосредственно технологией OpenGL. Для каждого кадра производится доступ к структурам под управлением OpenGL и обработка данных, хранящихся в них с помощью технологии OpenCL, что не требует перемещения данных во внутренней памяти видеоконтроллера. Результат совмещения выводится с помощью OpenGL, что также не требует перемещения данных в видеопамяти и существенно сокращает временные затраты на обработку данных.

Выводы. Совмещение разнородных изображений в реальном времени возможно выполнить методом КЭС. Технология OpenCL позволяет выполнить совмещение на одном графическом чипе, а совместно с технологией CLGLInterop производительнее OpenCL с передачей данных по шине в ~50–100 раз (зависит от граф-контроллера).

Рассмотренные методы нахождения истинных значений тангажа и крена совместно с изображением ВММ, полученным виртуальной камерой с расширенными углами зрения, позволяет сократить трудоемкость КЭС с 106 до 103–102.

Литература

- [1] *Костяшкин Л. Н., Логинов А. А., Никифоров М. Б.* Проблемные аспекты системы комбинированного видения летательных аппаратов // Известия ЮФУ. 2013. № 5. С. 61–65.
- [2] *Loginov A. A., Muratov E. R., Nikiforov M. B., Novikov A. I.* Image vectorization in real time // European Science and Technology: Materials of the IV international research and practice conference. — Munich Germany, 2013. Vol. I. P. 274–280.
- [3] Руководство Р-315 «По минимальным стандартам характеристик авиационных систем (MASPS) для систем улучшенного видения, систем искусственного видения, комбинированных систем искусственного видения и бортовых систем увеличения дальности видения» Авиационного Регистра Межгосударственного Авиационного Комитета (АР МАК), 2008.
- [4] *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход / пер. с англ.— М. : Изд. дом «Вильямс», 2004.
- [5] *Герман Е. В., Муратов Е. Р., Новиков А. И.* Математическая модель формирования зоны неопределенности в задаче совмещения изображений // Вестник РГРТУ. 2013. Вып. 46–2. С. 10–16.
- [6] *Муратов Е. Р.* Скелетизация контуров изображений в авиационных системах комбинированного видения // Техническое зрение в системах управления-2013: научно-техническая конференция.— М. : ИКИ РАН, 2013. С.158–159.
- [7] *Scarpino M.* OpenCl in action. How to accelerate graphics and computation.— Manning publication Co., 2012.

Авторы:

Евгений Рашиотович Муратов, кандидат технических наук, доцент кафедры ЭВМ Рязанского государственного радиотехнического университета

Михайл Борисович Никифоров, кандидат технических наук, доцент кафедры ЭВМ Рязанского государственного радиотехнического университета

Methods of Reducing the Computational Complexity of Combining Disparate Images

*E. R. Muratov, M. E. Nikiforov
Ryazan state radio engineering university
390005, Gagarina Str, 59/1. Ryazan, Russia,
e-mail: nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru*

Abstract. The rise of awareness of the aircraft pilot behind the cockpit space in conditions of reduced visibility or flying at low altitude in difficult terrain is an actual scientific and technical challenge. Combined vision system solves this problem by providing integrated information from sensors vision system, supported by a synthetic model of the terrain. The article discusses the reduction of computational complexity of combining disparate images.

Keywords: algorithms for image registration, the computational complexity of algorithms.

Reference

- [1] *Kostyshkin L. N., Loginov A. A., Nikiforov M. B.* (2013) Problemnnye aspekty sistemy kombinirovannogo videnija letatel'nyh apparatov. *Izvestija JuFU*, 5, 61–65. (rus)
- [2] *Loginov A. A., Muratov E. R., Nikiforov M. B., Novikov A. I.* (2013) Image vectorization in real time, *European Science and Technology*. Proc. IV intern. research and practice conference. Munich Germany: Vol. I, 274–280.
- [3] Po minimal'nym standartam harakteristik aviacionnyh sistem (MASPS) dlja sistem uluchshennogo videnija, sistem iskusstvennogo videnija, kombinirovannyh sistem iskusstvennogo videnija i bortovyh sistem uvelichenija dal'nosti videnija. Rukovodstvo R-315 Aviacionnogo Registra Mezhgosudarstvennogo Aviacionnogo Komiteta (AR MAK). (2008) (rus)
- [4] *Forsajt D., Pons Z.* (2004) Kompjuterneoe zrenie. Sovremennyj podhod. Moscow, Izd. dom Viljams. (rus)
- [5] *German E. V., Muratov E. R., Novikov A. I.* (2013) Matematicheskaja model' formirovanija zony neopredelennosti v zadache sovmeshhenija izobrazhenij. *Vestnik RGRTU*, 46–2, 1016. (rus)
- [6] *Muratov E. R.* (2013) Skeletizacija konturov izobrazhenij v aviacionnyh sistemah kombinirovannogo videnija. *Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija-2013*: Proc. conf. Moscow, IKI RAN, 158–159.
- [7] *Scarpino M.* (2012) OpenCl in action. How to accelerate graphics and computation. Manning publication Co.

УДК 004.4

Основные детерминанты объема венчурных сделок в российские ИТ-компании

А. С. Семенов^{1, 2, 3}, Э. Б. Гостева¹

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

Московский технологический институт,
119334, Москва, Ленинский проспект, 38А

VC Group,

e-mail: semenov.venture@mail.ru

Аннотация. Работа является продолжением исследований авторов. В статье рассматривается выборка инвестиционных сделок в российские инновационные компании и основные детерминанты объема инвестиции на втором раунде. Исследуется зависимость объема инвестиций от величины предшествующего раунда, темпов роста целевого рынка, наличия в проекте опытных инвесторов. Новым результатом является исследование вероятности получения инвестиций во втором раунде от параметров компании первого раунда.

Ключевые слова: венчурные сделки, ИТ-рынок.

Тема венчурных инвестиций как нового способа финансирования предприятий, как объекта исследований бурно развивается в последние десятилетия в контексте перехода на инновационную экономику и задачи развития малого бизнеса [1–3]. Фокусом венчурных инвесторов являются компании, демонстрирующие впечатляющие темпы роста или имеющие существенный рыночный потенциал для этого. Учитывая множественные истории успеха венчурной схемы финансирования и масштабы венчурного рынка (в мире до 35–40 млрд долл. в год), в последнее время исследователями уделяется достаточное внимание тенденциям и детерминантам развития венчурных инвестиций на микроуровне.

В российской экономике феномен венчурных инвестиций стал широко известен не так давно. Начало развития венчурного рынка в России проходило за четыре этапа. В 1990–1999 годах образовалась Российская ассоциация венчурного инвестирования (РАВИ) и некоторые другие негосударственные секторы. За этот же период было создано 11 региональных венчурных фондов (РВФ) для инвестирования в российские компании. В период с 2000 по 2006 год при поддержке государства был создан Венчурный Инновационный Фонд (ВИФ). Государство также стало активно поддерживать систему венчурных ярмарок и центров по венчурному

предпринимательству. В 2006–2009 годах были созданы Российская Венчурная Компания (РВК), РОСНАНО и сеть технопарков в сфере ИТ.

Учитывая динамику развития венчурных инвестиций в России в последние десятилетия, и возрастающую необходимость в систематизации данных и трендов, крайне актуальным представляется исследование драйверов и ограничений к развитию стартапов, финансируемых за счет венчурного капитала. Результаты, которые получены в этой работе, основываются на свежих данных, агрегированных порталами RusBase и базами данных PwC и FastLane.

В настоящее время в России практически отсутствуют опубликованные результаты фундаментальных исследований динамики венчурного инвестирования в инновационные проекты российских компаний с применением современных методов эмпирического анализа. Подавляющая часть существующих публикаций по проблематике венчурного инвестирования имеет преимущественно описательный, а не статистический характер, и построена на комментировании данных агрегированной статистической отчетности.

Состояние баз данных по России в этой отрасли до некоторого времени вызывало дополнительные сложности для исследователя по причине их разрозненности и противоречивости. Множество нюансов сделок просто не раскрывалось. В 2013 г. на российском рынке был отмечен резкий рост объема данных по сделкам, появление новых баз данных, раскрытие информации о десятках новых сделок.

Так, например, по результатам исследования PwC и ОАО «РВК» ИТ-сектор в 2012 и 2013 годах лидирует по объему привлеченных венчурных инвестиций (87% от всех сделок в 2013 году общим объемом 611 млн долл. США). При этом количество сделок в сегменте ИТ в 2013 году выросло на 23.7%, а общая сумма инвестиций снизилась на 22.8%, ввиду сокращения средней суммы сделки до 3.3 млн долл. США против 5.6 млн долл. США в 2012 году.

Так же, как и в 2012 году, продолжается заметное перетекание капитала из стадии «посева» в более поздние стадии: стадию «стартапа», «раннюю» стадию и стадию «расширения». В 2013 году на «посевной» стадии было заключено на 12% меньше сделок по сравнению с предыдущим годом. Рис. 1 демонстрирует, что самое существенное увеличение числа сделок отмечается на «ранней» стадии и на стадии «стартапа». На стадии «расширения» также отмечается небольшой рост. При этом как со стороны новых инвесторов, которые пришли на рынок в 2012–2013 г., так и со стороны более опытных игроков, которые начали выделять специализированные направления для инвестиций в ранние стадии, растет осознание потребности в инвестировании на ранних стадиях. Практически все участники рынка единогласны в необходимости развития посевного инвестирования и институтов поддержки компаний на самых ранних этапах [4, 5].

То есть на основе вышеописанной информации можно сделать вывод, что ранние стадии проектов ИТ-сектора являются подходящими для эмпирического исследования венчурного инвестирования в России.

Все это ставит вопрос о возможности проведения эконометрического исследования по российским данным, что раньше не представлялось возможным в силу в

том числе малых выборок. Данная статья представляет собой первую попытку провести эконометрическое исследование российского венчурного рынка.

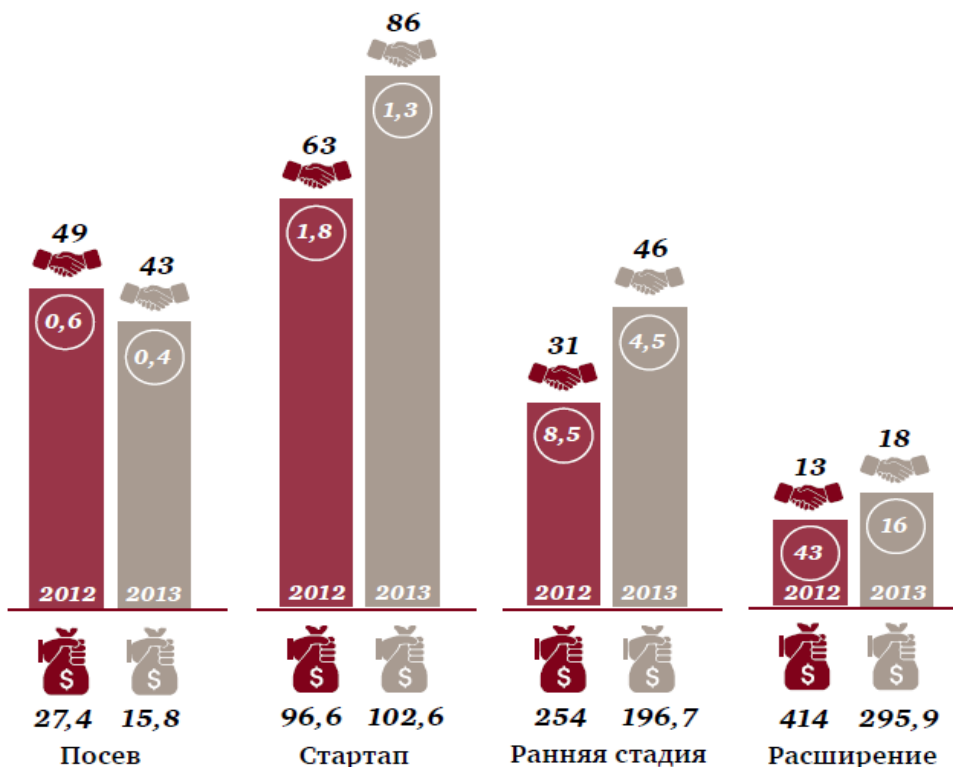


Рисунок 1. Распределение инвестиций по стадиям проекта в ИТ-секторе
(источник: PBK, Venture Database, RusBase, PwC)

Фокусом данного исследования был сделан ИТ-сектор России, поскольку по нему имеется наибольшее количество данных. Эмпирический анализ будет касаться ранних стадий венчурного инвестирования в отдельные проекты ИТ-сектора. Оценка переменных будет произведена путем регрессии методами наименьших квадратов и логистической регрессии.

Данное исследование посвящено анализу выборки на предмет зависимости объема инвестиций второго раунда от величины объема инвестиций первого раунда, наличия «опытного» частного инвестора среди пула инвесторов компании (под которым понимался крупный институциональный инвестор, имеющий опыты «выхода» или же долгий стаж работы на российском рынке) и прогнозных темпов роста рынка.

Учитывая то, что происходит перетекание количества профинансированных проектов в рамках ранних стадий, а сами стадии — понятие не достаточно кон-

кретное (в российских базах данных редко встречается указание стадий), в исследованиях учитываются так называемые раунды — отдельное фактическое вложение в данный конкретный проект. Первым раундом будет считаться самое первое вложение в данный проект (независимо от того, на какой из ранних стадий находится проект), а вторым раундом — следующее финансирование данного проекта.

Под «опытными» инвесторами мы также понимаем инвесторов с известным международным брендом или с долгим опытом развития проектов на российском рынке. По нашему экспертному заключению, исходя из всех критериев, таковыми в нашей выборке являются: Runa Capital, Intel Capital, Almaz Capital Partners, PPR, Access Industries, Mail.ru Group, DST, Accel Partners, Andreessen Horowitz. Объектом исследования являются компании, действующие на рынке информационных технологий, привлекающие венчурный капитал.

Анализируемая выборка формировалась на основе данных, полученных из RusBase-веб-проекта по сбору данных с венчурного рынка. В его рамках предложен набор сервисов, которые служат удобной навигацией по российскому венчурному рынку. Также использовалась опубликованная база Fastlane Ventures — инвестиционной компании, которая занимается созданием и развитием успешных интернет-бизнесов по уникальной для России бизнес-модели, уже доказавшей свою эффективность на мировом рынке, и ежегодная аналитика от Pricewaterhouse Coopers.

Для анализа учитывались фактически полученные венчурные инвестиции, осуществленные бизнес-ангелами, инвестиционными компаниями, частными, корпоративными или государственными венчурными фондами в ходе одного раунда финансирования. Если компания получала инвестиции в результате двух и более раундов, то каждый раунд рассматривался как отдельная сделка. По мнению многих экспертов, на сегодня условия для создания венчурной индустрии в России стали более благоприятны благодаря активной государственной политике и возобновлению интенсивного роста ИТ-сектора под действием рыночных факторов. Поэтому в данном исследовании анализируются только фирмы российского рынка информационных технологий.

Что касается прогнозных темпов роста рынка, информация основана на отчетах и статьях следующих источников:

- J'son & Partners Consulting (год основания 1996) — ведущая международная консалтинговая компания, специализирующаяся на рынках ИТ-сектора в России, СНГ, Центральной Азии.
- CNews — крупнейшее издание в России и странах СНГ, специализирующееся на оперативных новостях и аналитических материалах мира высоких технологий.

Была сформирована выборка из более 500 компаний российского ИТ-сектора, которые привлекали венчурные инвестиции в период с 2010 по 2014 год. Из них было отобрано 120 компаний, которые привлекали венчурные инвестиции более одного раза. Далее были выделены 60 из них, все необходимые данные по которым полностью известны (объем инвестиций в первом и втором раундах, название ин-

вестиционной компании, венчурного фонда или имя частного инвестора, дата заключения сделки), среди них такие известные компании, как:

- 2scan — терминал для проведения платежей с банковских карт с помощью мобильного телефона.
- ActiveCloud — хостинг и профессиональные облачные решения.
- Apps4all — разработка мобильных приложений.
- CyberCop — система выявления киберпреступников.
- EruditorGroup — подбор специалистов.
- iVENGO — российская DSP-платформа на рынке мобильной рекламы, ориентированная на глобальные сетевые рекламные агентства и крупных прямых рекламодателей.
- Lamoda — интернет-магазин одежды.
- MiiiX — платформа для взаимодействия поставщиков и интернет-магазинов.
- Oriense — система технического зрения для слепых и слабовидящих.
- uGift — интернет-магазин подарочных сертификатов.
- Winkcam — приложение для смартфонов для моментальной фотосъемки.
- YouDo — удобный способ заказать любую услугу на аутсорсинге.
- Airtime — программное обеспечение с открытым кодом для живого эфирного и удаленного управления радиостанцией.
- Renthome.ru — поиск и бронирование жилья для путешествия.
- Travelmenu — туристическое агентство.

По этим компаниям в открытых источниках имеется наиболее полная информация, а именно: объем инвестиций в первом и втором раундах, название инвестиционной компании, венчурного фонда или имя частного инвестора, а также дата заключения сделки.

Фирмы, которые привлекали венчурные инвестиции, действуют на рынках ИТ-сервисов, ИТ-услуг, мобильных приложений, эквайринга и рынке средств защиты от утечек конфиденциальных данных. Начальная информация была дополнена данными о прогнозном росте рынка на момент инвестирования в первом раунде на основании прогнозных данных ведущих маркетинговых агентств о темпах роста целевых рынков на момент начала инвестиций. Предполагалось, что инвесторы при принятии решений о сделках руководствуются рыночными трендами, и темпы роста, предсказываемые ведущими агентствами на момент начала инвестирования, являются ориентирами для инвесторов при принятии решений.

Характеристики исследуемой выборки компаний приведены на диагр. 1–4.



Диаграмма 1. Характеристика исследуемой выборки (% от общего числа компаний)



Диаграмма 2. Участие опытного инвестора в сделках сегмента ИТ-сервисов



Диаграмма 3. Участие опытного инвестора в сделках сегмента ИТ-услуг



Диаграмма 4. Участие опытного инвестора в сделках сегмента мобильных приложений

Мы предположили, что на объем инвестированных средств во втором раунде влияют такие факторы, как объем инвестиций в первом раунде, наличие «опытного» инвестора первого раунда, а также прогнозные данные о росте целевого рынка.

Вышеуказанные гипотезы проверялись с помощью МНК-регрессии:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3,$$

и построения logit модели в статистическом пакете STATA:

$$P(\text{rnd2} = 1) = F(\text{rndln1}, \text{inv}, \text{grateln})$$

МНК-регрессия выглядит следующим образом:

$$\ln Y = 1.86 + 0.87 \ln X_1 + 0.70 X_2 + 0.0003 \ln X_3,$$

где $\ln X_1$ — логарифм объема инвестиций в первом раунде (значим на 1%-ом уровне значимости); X_2 (dummy) — наличие «опытного» инвестора (значим на разумном 13%-ом уровне значимости); $\ln X_3$ — логарифм прогнозного темпа роста (не значим).

R^2 модели равен 59%; $\ln X_3$ — незначимый регрессор (p-value = 0.998), следовательно, можно исключить его из регрессии так же, как и константу. Новая регрессия будет выглядеть следующим образом:

$$Y = 0.87 \ln X_1 + 0.70 X_2,$$

уровни значимости регрессоров остались прежними.

Для построения логистической регрессии выборка была увеличена за счет компаний, не привлекавших инвестиции во втором раунде. В данной модели исследовалась 91 компания. Оценивалась вероятность того, что инвестиции во второй раунд будут произведены, в зависимости от трех вышеописанных факторов:

$$P(\text{rnd2} = 1) = F(\text{rndln1}, \text{inv}, \text{grateln}),$$

где *rnd2* — вероятность, того, что за определенный промежуток времени (2010–2014) данную фирму проинвестируют во второй раз; *rndln1* — логарифм объема инвестиций в первом раунде; *inv* — наличие опытного инвестора (dummy); *grateln* — логарифм прогнозного темпа роста (см. рис. 2).

```
. logit rnd2 rndln1 inv grateln
```

```
Iteration 0: log likelihood = -58.373938
Iteration 1: log likelihood = -46.093129
Iteration 2: log likelihood = -45.454471
Iteration 3: log likelihood = -45.452815
Iteration 4: log likelihood = -45.452815
```

```
Logistic regression
```

Number of obs	=	91
LR chi2(3)	=	25.84
Prob > chi2	=	0.0000
Pseudo R2	=	0.2214

```
Log likelihood = -45.452815
```

	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]
<i>rndln1</i>	-.3242273	.1371948	-2.36	0.018	-.5931242 - .0553304
<i>inv</i>	1.962967	.6134587	3.20	0.001	.7606102 3.165324
<i>grateln</i>	.8353225	.3919922	2.13	0.033	.0670318 1.603613
<i>_cons</i>	2.415313	2.012767	1.20	0.230	-1.529639 6.360264

Рисунок 2. Результаты logit регрессии

С экономической точки зрения, не следует категорично принимать за нулевую вероятность того события, что компании не будут проинвестированы во втором раунде, обрекая их тем самым на отсутствие последующих инвестиций вообще. Главная причина отсутствия второго раунда инвестирования — малый срок существования компании, ввиду которого второй раунд инвестиций мог просто не успеть произойти. Но данная модель несет некоторый экономический смысл с поправкой на ограниченный временной отрезок, в рамках которого проводится анализ.

Гипотеза о том, что величина инвестиций второго раунда зависит от участия опытного инвестора в первом, не отвергается на 1%-ом уровне значимости. Это значит, что наличие опытного инвестора в первом раунде влияет на очень скорое инвестирование во втором раунде. Скорее всего так происходит потому, что инвесторы гонятся за объектами с высокой доходностью, а вложения опытных инвесторов помогают немного нивелировать риски.

Отрицательный коэффициент перед переменной *rndln* объясняет отрицательную корреляцию между объемом инвестиций в первом раунде и вероятностью инвестиций во втором. Возможно такая ситуация возникает ввиду того, что инвесторы, проанализировав величину вложений в первом раунде, понимают, что они либо не могут себе позволить подобных вложений в этот проект (т. е. они не будут иметь достаточно голосов при принятии решений), либо не хотят работать в сотрудниче-

стве с уже существующими инвесторами (т. е. никогда не смогут договориться с существующими агентами бизнеса).

В данной модели переменная темпа роста рынка является значимой на 5%-ом уровне, и вероятность инвестирования в проект во второй раз положительно зависит от переменной $grateln$. Инвесторы, прежде чем принять решение, анализируют все свои действия. Темп роста рынка является одним из детерминант данного анализа.

Выводы. Результаты регрессии показали, в случае, когда зависимой переменной был объем инвестиций второго раунда, регрессоры объемом инвестиций первого раунда и наличие «опытного» инвестора оказались значимыми на 5%-ом и 10%-ом уровнях значимости соответственно. Свободные член регрессии равен $-1\ 479\ 363.9$, коэффициент при регрессоре объема первого раунда равен 8.0 , а при регрессоре наличия «опытного» инвестора положителен. Прогнозируемый рост рынка оказался незначимым. R^2 модели равен 92.2% , что говорит о высокой объясняющей доле дисперсии и качественной модели.

На основе модели возможно выявить, что существует устойчивая положительная зависимость инвестиций во втором раунде от размера инвестиций в первом раунде. Механизм останется сразу неясным: возможно в основе этого лежат факторы, относящиеся к деятельности фирмы, с другой стороны, возможно, что наличие инвестора на предыдущем раунде, независимо от результатов компании, привлекает инвесторов. Требуется дополнительные исследования этого вопроса, которые будут продолжены автором на более крупной выборке.

Выявлено было и то, что наличие «опытного» инвестора влияет на размер второго раунда отрицательно. Возможное объяснение заключается в том, что «опытные» инвесторы склонны к излишней бережливости. Существует еще вариант, что из-за ожиданий резкого увеличения числа инвестиций после своего вложения, опытные инвесторы оценивают оптимальный уровень своих инвестиций ниже, чем инвесторы с меньшим стажем работы на российском рынке, возможно потому, что первые уверены, что они смогут способствовать росту компании за счет своих контактов и знания о рынке.

В общем же развитие отрасли в ближайшие годы во многом будет зависеть от усилий, предпринимаемых всеми участниками российского рынка венчурного инвестирования. Это общее мнение экспертов, которое подтверждается данным эмпирическим исследованием. Государство от лица различных институтов должно поддерживать отрасль и добиваться эффективности ее деятельности, используя финансовые и нефинансовые рычаги.

В первую очередь в дальнейшем должны быть простимулированы инвестиции и в другие сектора рынка, которые также являются приоритетными направлениями развития экономики. Во-вторых, финансирование на более поздних стадиях проекта должно быть поддержано определенными силами. Более того, привлечение иностранного капитала — неотъемлемая часть развития российского рынка венчурного инвестирования. А содействие выходу российского бизнеса на глобальный рынок и его интеграция в международную структуру — одна из первостепенных задач, ко-

торая сейчас зависит только от личностей и опыта специалистов в данной сфере, в том числе самих инвесторов.

Рынок венчурного инвестирования был успешно запущен, теперь, по аналогии с венчурными проектами, должна начаться стадия его роста. Развитие рынка связано с оптимистичными перспективами и зависит от эффективности сотрудничества органов власти, институтов развития и представителей бизнеса. Этот факт эконометрически подтвердило и данное исследование.

Литература

- [1] *Каширин А., Семенов А.* Венчурное инвестирование в России.— М. : Вершина, 2007.
- [2] *Каширин А., Семенов А.* В поисках бизнес-ангела. Привлечение стартовых инвестиций в России.— М. : Вершина, 2007.
- [3] *Никконен А. И., Родионов И. И.* Венчурный капитал и прямые инвестиции в инновационной экономике.— СПб. : РАВИ, 2010.
- [4] MoneyTreeTM: Навигатор венчурного рынка // PwC, ОАО «РВК».
- [5] *Schertler A.* Driving Forces of Venture Capital Investments in Europe: A Dynamic Panel Data Analysis. Kiel Working Paper No. 1172. — Kiel Institute for World Economics, 2003.

Авторы:

Семенов Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Департамента финансов Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», преподаватель Московской бизнес-школы Московского технологического института

Гостева Элеонора Борисовна, бакалавр, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Приложение 1. Агрегированная информация по выборке

Компания	Номер раунда	Инвестор	Объем инвестиций, долл. США
2can	1	Inventure Partners	1 600 000
	2	Almaz Capital Partners	400 000
	3	Capital Venture Partners Seeding Foundation Unlimited	2 000 000
ActiveCloud	1	Softline Venture Partners	65 500
	2	Московский Посевной Фонд	135 868
Apps4all	1	Softline Venture Partners	500 000
	2	Бизнес-ангел	1 000 000
	3	Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере	35 000
	4	Министерство экономики и промышленности Республики Татарстан	45 000
CyberCop	1	LETA Capital	300 000
	2	Фонд Сколково	700 000
Eruditor Group	1	Runa Capital, Intel Capital	600 000
	2	Intel Capital, Frontier Ventures, Runa Capital	4 000 000
iVENGO	1	Бизнес-ангел, ISH-Capital	500 000
	2	Московский Посевной Фонд	250 000
Lamoda	1	PPR	16 000 000
	2	Access Industries, Summit Partners, Tengemann	130 000 000
	3	International Finance Corporation	10 000 000
MiiiX	1	IDealMachine	20 000
	2	RSV Venture Partners	20 000
	3	RSV Venture Partners	70 000
Oriense	1	IDealMachine	20 000
	2	RSV Venture Partners	20 000
uGift	1	Бизнес-ангел	250 000
	2	Global Technology Foundation (GTF)	30 000
Winkcam	1	Бизнес-ангел	200 000
	2	Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере	100 000
YouDo	1	Start Fellows	25 000
	2	Flint Capital	1 000 000
Airtime	1	Mail.ru Group, DST, Accel Partners, Andreessen Horowitz, бизнес-ангелы	8 300 000
	2	Mail.ru Group, DST, Accel Partners, Andreessen Horowitz, бизнес-ангелы	25 000 000
Renthome.ru	1	Fast Lane Ventures	500 000
	2	Бизнес-ангел	1 000 000
Travelmenu	1	Almaz Capital и Runa Capital	1 600 000
	2	Runa Capital и Almaz Capital	3 000 000

Major Determinants of the Volume of Venture Deals in the Russian IT Companies

A. S. Semenov^{1,2,3}, E. B. Gosteva¹

Higher School of Economics
20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000

Moscow Technological Institute,
38A, Leninckiy pr., Moscow, 119334

VC Group
e-mail: semenov.venture@mail.ru

Abstract. This paper is a continuation of the investigations of the authors. The article examines a sample of investment transactions in Russian innovation of the company and the main determinants of the volume of investment in the second round. The dependence of the total investment of the value of the previous round, the growth rate of the target market, the availability of experienced investors in the project. The new result is the study of the likelihood of receiving investment in the second round of the parameters of the first round.

Keywords: venture capital transactions, IT services market.

Reference

- [1] Kashirin A., Semenov A. (2007) Venchurnoe investirovanie v Rossia. Moscow, Vershina. (rus)
- [2] Kashirin A., Semenov A. (2007) V poiskah biznes-angela. Privlechenie startovyh investicij v Rossia. Moscow, Vershina. (rus)
- [3] Nikkonen A. I., Rodionov I. I. (2010) Venchurnyj kapital i prjamyje investicii v innovacionnoj jekonomike. SPb, RAVI. (rus)
- [4] MoneyTreeTM: Navigator venchurnogo rynka, PwC, OAO «RVK». (rus)
- [5] Schertler A. (2003) Driving Forces of Venture Capital Investments in Europe: A Dynamic Panel Data Analysis. Kiel Working Paper No. 1172. Kiel Institute for World Economics.

Свидетельство о регистрации СМИ в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций: Эл № ФС77–58766 от 28.07.2014 г.

Учредитель: Негосударственное образовательное учреждение высшего
образования Московский технологический институт

Адрес редакции: 117292, г. Москва, ул. Кедрова, д. 8, корп. 2

Контактный телефон: +7 (495 648-62-26)

e-mail: e_nikulchev@mti.edu.ru

Отв. за выпуск: Е.В. Никульчев

Корректор: С.Ф. Михайлова

Подписано в печать: 01.09.2014. Усл. печ. л. 20,5

© Авторы статей
© НОУ ВО МосТех