

«Инфокоммуникационные технологии»

Периодический научно-технический и информационно-аналитический журнал
Том 18, № 1, 2020

Учредитель журнала:

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (г. Самара)

Соучредитель журнала:

Академия телекоммуникаций и информатики (г. Самара)

Редакционный совет

Андреев В.А., д.т.н., профессор – председатель совета, главный редактор (ПГУТИ, г. Самара); Шорин В.П., академик РАН (СНЦ РАН, г. Самара); Зубарев Ю.Б., член-корреспондент РАН (РАН, г. Москва); Сойфер В.А., академик РАН (Самарский университет, г. Самара); Бузов А.Л., д.т.н., профессор (АО «СИП РС», г. Самара); Васильев К.К., д.т.н., профессор (УлГТУ, г. Ульяновск); Воронин А.А., д.ф.-м.н., профессор (ВолГУ, г. Волгоград); Кубанов В.П., д.т.н., профессор (ПГУТИ, г. Самара); Лихтциндер Б.Я., д.т.н., профессор (АТИ, г. Самара); Лялин В.Е., д.т.н., профессор (ИжГТУ, г. Ижевск); Мостовой Я.А., д.т.н., профессор (Самарский университет, г. Самара); Надеев А.Ф., д.ф.-м.н., профессор (КНИТУ-КАИ, г. Казань); Султанов А.Х., д.т.н., профессор (УГАТУ, г. Уфа); Цым А.Ю., д.т.н., с.н.с. (ЦНИИС, г. Москва); Червяков Н.И., д.т.н., профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Щербаков М.А., д.т.н., профессор (ПГУ, г. Пенза).

Редакционная коллегия

Абрамов В.Е., д.филол.н., профессор; Андропова И.В., д.пол.н., профессор; Бахарева Н.Ф., д.т.н., профессор; Блатов И.А., д.ф.-м.н., профессор; Бурдин В.А., д.т.н., профессор – заместитель главного редактора; Васин Н.Н., д.т.н., профессор; Горячкин О.В., д.т.н., профессор; Димов Э.М., д.т.н., профессор; Карташевский В.Г., д.т.н., профессор; Маслов О.Н., д.т.н., профессор – заместитель главного редактора; Осипов О.В., д.ф.-м.н., профессор; Росляков А.В., д.т.н., профессор; Тарасов В.Н., д.т.н., профессор; Тяжев А.И., д.т.н., профессор.

Выпускающий редактор: Диязитдинова А.А.

Редактор номера: Маслов О.Н.

Компьютерный набор и верстка: Градинарь И.М.

Корректур: Мурзинова Т.А.

Адрес редакции и издателя журнала:

443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. Телефон +7 846 332-21-61. Факс +7 846 333-58-56.
E-mail: redikt@psati.ru

Издается с 2003 г. Выходит 4 раза в год.

ПИ № 77-14381 от 17.01.2003 г. выдано Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации.

Решением ВАК Минобрнауки России журнал «Инфокоммуникационные технологии» включен в перечень ведущих научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

© Инфокоммуникационные технологии, 2020.

Подписной индекс 46832 в каталоге ОАО Агентства «Роспечать».

Подписной индекс 41914 в каталоге ЗАО ИД «Экономическая газета».

Тиражирование содержания журнала в электронном и любом другом виде – с письменного разрешения редакции.
443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

Отпечатано в типографии
ООО «Слово».
443070, Российская Федерация, г. Самара, ул. Песчаная, 1. Тел. +7 846 267-36-82.
E-mail: izdatkniga@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

Заливин А.Н., Черноморец А.А., Жиляков Е.Г., Белов С.П.	Анализ изображений на основе субполосных представлений в области пространственных частот	7
--	--	---

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Буранова М.А., Карташевский В.Г., Латыпов Р.Т.	Оценка джиттера в системе G/M/1 на основе использования гиперэкспоненциальных распределений	13
Белоногов А.С., Шорохов Н.С.	Удаленное электропитание оптических сетей, сетевых элементов связи и иного электрооборудования ОАО «РЖД» на основе технологии ROF	20

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ ТРУДЫ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ «МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ»

Тарасов В.Н.	Исследование системы со сдвинутыми гиперэрланговским и экспоненциальным входными распределениями	27
Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Ахметшина Э.Г.	Исследование систем массового обслуживания M/E ₂ /1 с обычными и сдвинутыми входными распределениями	33
Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Када О.	Моделирование телетрафика на основе системы E ₂ /HE ₂ /1	39

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В., Шевченко В.И.	Адаптивный метод обнаружения уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств в инфраструктуре умного города	45
Абрамов В.Е., Сахарова А.Л.	Внедрение экоменеджмента в гостиничный сервис	51

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

Шакурский М.В.	Двухкомпонентная стеганографическая система на основе отношения линейных функций двух сигналов, использующая аддитивный вид связи встраиваемых сигналов	56
Василенко К.А., Золкин А.Л., Абрамов Н.В., Курганов Д.О.	Корпоративные вычислительные сети: процедуры аутентификации и идентификации	61

ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Иващенко А.В., Диязитдинова А.Р., Кривошеев А.В., Никифорова Т.В.	Поиск пропорции естественного и искусственного интеллекта в прикладных задачах цифровой экономики	68
Антипова Т.А., Кудряшов А.А., Мишин Д.В., Осипов О.В.	Ядерно-кластерная модель платформы «Цифровой университет» и аспекты ее практической реализации	76

УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

Абрамов В.Е., Маслов О.Н., Шаталов И.С., Юкласов К.А.	Леонард Джимми Сэвидж и его субъективная теория вероятностей. Часть I. Условия возникновения, предпосылки и перспективы	89
--	--	-----------

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Лихтциндер Б.Я.	Связь и «обратная связь»	106
------------------------	---------------------------------	------------

ПОЗДРАВЛЯЕМ!

Поздравляем Александра Львовича Бузова с юбилеем		108
---	--	------------

CONTENTS

THEORETICAL TECHNOLOGICAL BASIS OF INFORMATION TRANSMISSION AND SIGNALS

Zalivin A.N., Chernomorets A.A., Zhilyakov E.G., Belov S.P.	Sub-band Representation Image Analysis in the Field of Spatial Frequencies	7
--	---	----------

TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES

Buranova M.A., Kartashevskiy V.G., Latypov R.T.	Estimate Jitter in the G/M/1 System Based on Hypreexponential Distributions	13
Belonogov A.S., Shorokhov N.S.	Remote Power Supply of Optical Networks, Network Communication Elements and Other Electrical Equipment of JSCo «RZD» on POF Technology	20

COMPUTER NETS AND SYSTEMS TECHNOLOGIES WORKS OF THE SCIENTIFIC SCHOOL OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCE «METHODS OF RESEARCH OF COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS»

Tarasov V.N.	Research of System with Shifted Hyper-Erlang and Exponential Input Distributions	27
Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Akhmetshina E.G.	Research of Two Queuing Systems M/E₂/1 with Ordinary and Shifted Input Distributions	33
Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Kada O.	Simulation of Teletraffic Based on E₂/HE₂/1 System	39

NEW INFORMATION TECHNOLOGIES

Skatkov A.V., Bryukhovetskiy A.A., Moiseev D.V., Shevchenko V.I.	An Adaptive Model for Detecting the Vulnerabilities of Unmanned Vehicles Interface in Smart City Infrastructure	45
Abramov V.E., Sakharova A.L.	Inculcation of Eco-Management in Hotel Service	51

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY
AND EQUIPMENT SAFETY**

Shakurskiy M.V.	Two-Component Steanographic System Based on Ratio of Linear Functions of Two Signals Using an Additive Type of Embedded Signal Communication	56
Vasilenko K.A., Zolkin A.L., Abramov N.V., Kurganov D.O.	Enterprise Data Processing Networks: Authentication and Identification Procedures	61

DIGITAL ECONOMY TECHNOLOGIES

Ivaschenko A.V., Diyazitdinova A.R., Krivosheev A.V., Nikiforova T.V.	On Artificial Versus Human Intelligence Proportion in Digital Economy Applications	68
Antipova T.A., Kudryashov A.A., Mishin D.V., Osipov O.V.	The Kernel-Cluster Model of «Digital University Platform» and Aspects of its Practical Implementation	76

**ENGINEERS MANAGEMENT
AND TRAINING FOR TELECOMMUNICATIONS**

Abramov V.E., Maslov O.N., Shatalov I.S., Yuklasov K.A.	Leonard Jimmy Savage and his Subjective Probability Theory. Part I. Scientific Background, Preconditions and Prospects	89
--	---	-----------

LETTERS

Likhttcinder B.Ya.	Communication and Feedback	106
---------------------------	-----------------------------------	------------

CONGRATULATIONS!

Congratulations on Alexander Lvovich Buzov's Anniversary		108
---	--	------------

«Infokommunikacionnye tehnologii»

Periodic technical and scientific information and analytical magazin
2020, vol. 18, no. 1

Founder of the journal:

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (Samara)

Co-founder of the journal:

Academy of Telecommunications and Informatics (Samara)

Editorial Management

Andreev V.A., Tenured Professor, Doctor – Chairman of the Board, Chief Editor (PSUTI, Samara);

Shorin V.P., Academic Professor RAS (Russian Academy of Sciences, Samara);

Zubarev U.B., RAS Corresponding Member (RAS, Moscow);

Soifer V.A., Academic Professor RAS (Samara Univ., Samara);

Buzov A.L., Tenured Professor, Doctor (SIPRS, Ltd., Samara);

Vasiliev K.K., Tenured Professor, Doctor (UISTU Ulyanovsk);

Voronin A.A., Tenured Professor, Doctor (VolSU, Volgograd);

Kubanov V.P., Tenured Professor, Doctor (PSUTI, Samara);

Likhttsinder B.Y., Tenured Professor, Doctor (ATI, Samara);

Lyalin V.E., Tenured Professor, Doctor (IzhSTU, Izhevsk);

Mostovoi J.A., Tenured Professor, Doctor (SSAU named after S.P. Korolev, Samara);

Nadeev A.F., Tenured Professor, Doctor (KNRTU-KAI, Kazan);

Sultanov A.H., Tenured Professor, Doctor (USATU, Ufa);

Tsym A.Y., Tenured Professor, Senior Manager Associate (CSRJC, Moscow);

Chervyakov N.I., Tenured Professor, Doctor (NKFU, Stavropol);

Shcherbakov M.A., Tenured Professor, Doctor (PSU, Penza).

Editorial board

Abramov V.E., Tenured Professor, Doctor; Andronova I.V., Tenured Professor, Doctor; Bahareva N.F.,

Tenured Professor, Doctor; Blatov I.A., Tenured Professor, Doctor; Burdin V.A., Tenured Professor,

Doctor – Deputy Editor; Vasin N.N., Tenured Professor, Doctor; Goryachkin O.V., Tenured Professor,

Doctor; Dimov E.M., Tenured Professor, Doctor; Kartashevskii V.G., Tenured Professor, Doctor;

Maslov O.N., Tenured Professor, Doctor – Deputy Editor; Osipov O.V., Doctor, Associate Professor;

Roslyakov A.V., Tenured Professor, Doctor; Tarasov V.N., Tenured Professor, Doctor; Tyagev A.I.,

Tenured Professor, Doctor.

Executive editor: Diyazitdinova A.A.

Editor of issue: Maslov O.N.

Type setting and page make up: Gradinar' I.M.

Proofreading: Murzinova T.A.

Editor and Publishing House address:

23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation,

Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Professional Education «Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics». Phone +7 846 332-21-61. FAX +7 846 333-58-56.

E-mail: redikt@psati.ru

Published since 2003. Edited 4 times a year. Licensed № 77-14381 on 17.01.2003 issued by

Russian Federation Ministry of Press Television and Mass Media.

Under the verdict of Russian Federation Ministry of Education Highest Attestation Committee

«Infokommunikacionnye tehnologii» journal is listed in a Leading Scientific Edition enumeration where main results of Doctorate Theses should be published.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И СИГНАЛОВ

УДК 621.39

АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СУБПОЛОСНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТ

Заливин А.Н.¹, Черноморец А.А.², Жилияков Е.Г.², Белов С.П.¹

¹ Белгородский университет кооперации экономики и права, Белгород, РФ

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, РФ

E-mail: belov@bsu.edu.ru

В настоящее время двумерные визуальные отображения различных информационных массивов широко распространены, так как изображения являются наиболее естественной для человека формой информационного обмена. Поэтому созданы различные информационные технологии, предназначенные для реализации компьютерной обработки изображений. Существенное место среди информационных технологий занимает компьютерный анализ изображений, основу которого составляют процедуры определения тех или иных свойств, характеризующих их с определенных позиций. В частности, важным направлением анализа изображений служат процедуры автоматической классификации составляющих их объектов (распознавания образов). При этом главное внимание уделяется выбору так называемого пространства признаков, которые с позиций решаемой задачи наиболее адекватно отражают свойства анализируемых изображений. В статье рассматривается возможность использования для анализа изображений субполосного метода, применение которого, как показали результаты исследований, позволяет получить характеристики, которые можно использовать в качестве признаков для их сравнения.

Ключевые слова: субполосный анализ и синтез, трансформанта Фурье, доля евклидовой нормы сигнала

Введение

Одним из характерных свойств изображений является наличие квазипериодичности в ориентации линий и контуров объектов. Это позволяет говорить об адекватности анализа изображений на основе частотных представлений, основным инструментом которых служат трансформанты Фурье следующего вида:

$$\Phi^F(\omega_1, \omega_2) = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M f_{ik} \exp(-j(\omega_1(i-1) + \omega_2(k-1))), \quad (1)$$

где f_{ik} , $i=1, \dots, N$; $k=1, \dots, M$ – пиксели изображения $F = \{f_{ik}\}$; $\omega_1 = 2\pi\nu_1$; $\omega_2 = 2\pi\nu_2$ – круговые нормированные пространственные частоты в том смысле, что выполняются неравенства (следствие дискретизации)

$$-0,5 \leq \nu_1, \nu_2 < 0,5. \quad (2)$$

Ввиду ортогональности используемого в (1) двумерного базиса в области (2) имеет место равенство Парсеваля [1], которое показывает

$$\|F\|^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M f_{ik}^2 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |\Phi^F(\omega_1, \omega_2)|^2 d\omega_1 d\omega_2 / 4\pi^2. \quad (3)$$

Важность этого равенства определяется тем, что оно описывает распределение евклидовой

нормы (энергии) изображения в области определения трансформанты Фурье (пространственных частот). Это распределение можно представить в следующем виде:

$$\|F\|^2 = \sum_{s=1}^{R_1} \sum_{r=1}^{R_2} E_{sr}(F), \quad (4)$$

где $E_{sr}(F)$ – часть энергии (квадрата нормы)

$$E_{sr}(F) = \iint_{(u, \omega v) \in V_{sr}} |\Phi^F(u, v)|^2 dudv / 4\pi^2, \quad (5)$$

связанная с одной из подобластей пространственных частот

$$V_{sr} = \{(u \in [-u_{s2}, -u_{s1}] \cup [u_{s2}, u_{s1}]) \cap (v \in [-v_{r2}, -v_{r1}] \cup [v_{r2}, v_{r1}])\}, \quad (6)$$

которые не пересекаются и полностью покрывают всю область вида (2). Условия покрытия всей области (2) имеют вид:

$$\begin{aligned} u_{11} = v_{11} = 0; \quad u_{s2} > u_{s1}; \\ v_{r2} > v_{r1}; \quad u_{sR_1} = v_{rR_2} = \pi. \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что характеристики (5) могут использоваться для описания свойств изображений, предназначенных для реализации компьютерной обработки [2; 3], например, в качестве признаков [4; 5] при идентификации их в том или ином классе. Кроме того, ниже будут получены и другие характеристики изображений.

Анализ свойств изображений на основе субполосных представлений

Анализ свойств изображений с позиций разбиения области определения их трансформант Фурье (2) на подобласти вида (6), (7) будем именовать субполосным [6].

Важно, что эти характеристики могут быть вычислены непосредственно в области оригиналов (без перехода в частотную область).

Нетрудно получить соответствующее представление, если в определение (5) подставить представление (1) подынтегральной функции. В результате имеем:

$$E_{sr}(F) = \sum_{i,n=1}^N \sum_{k,m=1}^M f_{ik} f_{nm} \times \iint_{(u_1, v_1) \in V_{sr}} \iint_{(u_2, v_2) \in V_{sr}} \exp(-j((i-1)u_1 + (k-1)v_1 - (n-1)u_2 - (m-1)v_2)) du_1 dv_1 du_2 dv_2.$$

После интегрирования и проведения несложных преобразований получаем искомое представление:

$$E_{sr}(F) = sp(A_s F B_r F^T), \quad (8)$$

где символ sp означает след матрицы;

$$A_s = \{a_{ik}^s\}, \quad i, k = 1, \dots, N;$$

$$B_r = \{b_{nm}^r\}, \quad n, m = 1, \dots, M$$

– матрицы с элементами

$$a_{ik}^s = 2 \sin(\Delta u_s (i-k) / 2) / (\pi(i-k)) \times \cos(\Omega_s (i-k)), \quad a_{ii}^s = \Delta u_s / \pi; \quad (9)$$

$$b_{nm}^r = 2 \sin(\Delta v_r (n-m) / 2) / (\pi(n-m)) \times \cos(\Omega_r (n-m)), \quad b_{mm}^r = \Delta v_r / \pi; \quad (10)$$

$$\Delta u_s = u_{s2} - u_{s1}; \quad \Omega_s = (u_{s2} + u_{s1}) / 2; \quad (11)$$

$$\Delta v_r = v_{r2} - v_{r1}; \quad \Omega_r = (v_{r2} + v_{r1}) / 2. \quad (12)$$

Здесь и в дальнейшем верхний индекс T означает символ транспонирования матриц и векторов.

Представляется естественным матрицы с элементами вида (9) и (10) называть субполосными. Они обладают рядом примечательных свойств, которые полезны для осуществления субполосного анализа изображений. Для более детального анализа этих свойств целесообразно привести общее интегральное представление элементов субполосной матрицы $C_u = \{c_{ik}^u\}$, $i, k = 1, \dots, N$ соотносимых с некоторой частотной полосой (субполосой)

$$U = [-u_2, -u_1) \cup (u_1, u_2], \quad 0 < u_1; \quad u_2 \leq \pi. \quad (13)$$

Это представление имеет вид

$$c_{ik}^u = \int_{u \in U} \exp(-ju(i-k)) du / 2\pi. \quad (14)$$

На основе этого представления легко показать, что субполосные матрицы будут неотрицательно определенными. В самом деле, пусть вектор $\vec{x} = (x_1, \dots, x_N)^T$ состоит из вещественных компонент. Тогда при подстановке (14) в определение субполосной квадратичной формы

$$G_u(\vec{x}) = \vec{x}^T C_u \vec{x} = \sum_{i,k=1}^N x_i x_k c_{ik}^u \quad (15)$$

нетрудно получить соотношение

$$G_u(\vec{x}) = \int_{u \in U} |X(u)|^2 du / 2\pi, \quad (16)$$

где $X(u)$ – трансформанта (спектр) Фурье рассматриваемого вектора

$$X(u) = \sum_{i=1}^N x_i \exp(-ju(i-1)). \quad (17)$$

Так как соотношение (17) определяет целую функцию частоты, то она ни в каком частотном интервале конечных размеров не может быть тождественно равна нулю. Поэтому интеграл в правой части (16), а следовательно, и квадратичная форма (15) на всем векторном пространстве будет положительной, то есть выполняется неравенство

$$\vec{x}^T C_u \vec{x} = \sum_{i,k=1}^N x_i x_k c_{ik}^u > 0. \quad (18)$$

Ясно также, что представление (14) определяет симметричную матрицу. Поэтому она является матрицей простой структуры [7], то есть обладает набором собственных векторов, образующих ортонормальный базис в пространстве векторов соответствующей размерности. Таким образом, справедливо представление

$$C_u = Q_u L_u Q_u^T, \quad (19)$$

где $Q_u = (\vec{q}_1^u \dots \vec{q}_N^u)$ – ортогональная матрица собственных векторов

$$Q_u Q_u^T = Q_u^T Q_u = \text{diag}(1, \dots, 1), \quad (20)$$

$$C_u Q_u = Q_u L_u, \quad (21)$$

$L_u = \text{diag}(\lambda_1^u, \dots, \lambda_N^u)$ – диагональная матрица собственных чисел.

Ввиду (18) собственные числа субполосной матрицы тоже положительны [7], и в дальнейшем полагаем, что они упорядочены по убыванию:

$$\lambda_1^u \geq \lambda_2^u \geq \dots \geq \lambda_N^u > 0. \quad (22)$$

На основе (21) и (14) нетрудно получить следующее соотношение для компонент собственных векторов

$$\lambda_r^u q_{mr}^u = \int_{z \in U} H_r^u(z) \exp(jz(m-1)) dz / 2\pi, \quad (23)$$

где

$$H_r^u(z) = \sum_{m=1}^N q_{mr}^u \exp(-j(m-1)). \quad (24)$$

Таким образом, собственные векторы субполосных матриц полностью определяются отрезками их трансформант Фурье в рассматриваемом частотном интервале.

Умножив (23) слева и справа на q_{mn}^u и суммирования по общему нижнему индексу, с учетом свойства ортонормальности собственных векторов (20) получаем важные соотношения (звездочка вверх означает комплексное сопряжение):

$$\int_{z \in U} H_r^u(z) H_n^{u*}(z) dz / 2\pi = \quad (25)$$

$$= \int_{-\pi}^{\pi} H_r^u(z) H_n^{u*}(z) dz = 0,$$

$$\lambda_r^u = \int_{z \in U} |H_r^u(z)|^2 dz / 2\pi \leq 1. \quad (26)$$

Соотношение (25) определяет так называемое [1] свойство двойной ортогональности спектров собственных векторов.

В свою очередь соотношение (26) наряду с равенством Парсевала показывает, что собственное число равно попадающей в исходный частотный интервал части квадрата евклидовой нормы (энергии) соответствующего собственного вектора. Отметим, что близость собственного числа к единице означает, что область определения спектра соответствующего собственного числа имеет малые размеры (финитна).

Соотношение (19) вместе с (20) определяют ортогонально подобные матрицы, следы которых поэтому равны [7], то есть для среднего собственного числа, согласно (25), должно выполняться равенство

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^u / N = \sum_{i=1}^N c_{ii}^u / N = (u_2 - u_1) / \pi, \quad (27)$$

которое следует из (13) и (14). Таким образом, все собственные числа равны единице тогда и только тогда, когда ширина субполосы совпадает со всей областью определения трансформанты Фурье. Очевидно, что в этом случае субполосная матрица с элементами (14) будет единичной.

По аналогии с (9) для элементов (14) можно использовать представление

$$c_{ik}^u = 2c_{ik}^0 \cos(\Omega_u(i-k)), \quad (28)$$

где

$$c_{ik}^0 = \sin(\Delta u(i-k)/2) / (\pi(i-k)), \quad (29)$$

$$c_{ii}^0 = \Delta u / 2\pi.$$

Остальные переменные определены соотношениями (11)–(12).

В свою очередь, полагая

$$C_u^0 = \{c_{ik}^0\}, \quad i, k = 1, \dots, N, \quad (30)$$

$$CS_u = 2\text{diag}(1, \cos \Omega_u, \dots, \cos(\Omega_u(N-1))), \quad (31)$$

$$SS_u = 2\text{diag}(0, \sin \Omega_u, \dots, \sin(\Omega_u(N-1))),$$

субполосную матрицу (14) можно представить в аддитивном виде:

$$C_u = CS_u C_u^0 CS_u + SS_u C_u^0 SS_u. \quad (32)$$

Субполосную матрицу вида (30) будем называть нулевой для выбранной частотной подполосы. Соотношение (31) определяет процедуру переноса ее в пределы этой субполосы, что может быть удобным для многократного использования субполос одной и той же ширины. Поэтому применение субполосного анализа представляется целесообразным использовать разбиения частотной полосы на $R+1$ субполос, границы которых определяются следующим образом:

$$u_{10} = 0; \quad u_{20} = 2\pi / N; \quad u_{11} = u_{20}; \quad (33)$$

$$u_{2r} = u_{1r} + 4\pi / N, \quad r = 1, \dots, R.$$

При этом в соответствии с требованием (13) совпадения с границей области определения должно выполняться равенство

$$R = (N-2) / 4. \quad (34)$$

Так как количество частотных интервалов должно быть целым, то выбор размерности обрабатываемых векторов (строк или столбцов изображений) должен это обеспечивать.

Пусть теперь наряду с изображением F рассматривается изображение такой же размерности $D = \{d_{ik}\}$, $i = 1, \dots, N$; $k = 1, \dots, M$. Тогда квадрат евклидовой нормы их разности

$$C = F - D \quad (35)$$

можно в соответствии с (4) представить в субполосной форме:

$$\|F - D\|^2 = \sum_{s=1}^{R_1} \sum_{r=1}^{R_2} E_{sr}(F - D). \quad (36)$$

Очевидно, что каждое из слагаемых в последнем соотношении можно считать локальной субполосной мерой близости, которая в соответствии с (5) отражает близость двумерных отрезков трансформант Фурье сравниваемых изображений в заданных подобластях пространственных частот. При этом в вычислительном соотношении (8) необходимо F заменить на C .

Для слагаемых в правой части (36) нетрудно показать справедливость следующего соотношения:

$$E_{sr}(F - D) = E_{sr}(F) + E_{sr}(D) - 2W_{sr}(F, D), \quad (37)$$

где последнее слагаемое естественно именовать субполосной корреляцией двух изображений:

$$W_{sr}(F, D) = \iint_{(u, \nu) \in V_{sr}} \Phi^F(u, \nu) \Phi^{*D}(u, \nu) dud\nu / 4\pi^2. \quad (38)$$

Сопоставление правой части (38) с определением (5) дает равенства

$$W_{sr}(F, F) = E_{sr}(F); \quad W_{sr}(D, D) = E_{sr}(D). \quad (39)$$

После подстановки в (38) определений трансформант Фурье вида (1) и очевидных преобразований можно получить соотношения для вычислений непосредственно в области оригиналов:

$$W_{sr}(F, D) = sp(A_s F B_r D^T). \quad (40)$$

Таким образом, субполосная корреляция является вещественным числом. Можно также определить нормированный субполосный коэффициент корреляции:

$$\rho_{sr}(F, D) = W_{sr}(F, D) / (E_{sr}(F)E_{sr}(D))^{1/2}, \quad (41)$$

который вследствие (39) удовлетворяет неравенству

$$|\rho_{sr}(F, D)| \leq 1 \quad (42)$$

и может использоваться в качестве меры сходства двумерных отрезков трансформант Фурье сравниваемых изображений в заданной подобласти пространственных частот.

Важным направлением анализа изображений служит разделение их на аддитивные компоненты одинаковой размерности [5]:

$$F = F^1 + F^2, \quad (43)$$

где $F^1 = \{f_{ik}^1\}$; $F^2 = \{f_{ik}^2\}$, $i = 1, \dots, N$; $k = 1, \dots, M$.

Такие процедуры принято именовать фильтрацией. Часто для получения компонент используются частотные представления. Достаточно широко применяются следующие идеальные требования

$$\Phi^{F^1}(u, \nu) \equiv \Phi^F(u, \nu), \quad (u, \nu) \in V_{sr}, \quad (44)$$

$$\Phi^{F^1}(u, \nu) \equiv 0, \quad (u, \nu) \notin V_{sr}. \quad (45)$$

В настоящее время для фильтрации чаще всего используются либо фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры), либо прием обнуления некоторых коэффициентов дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и последующего обратного ДПФ [8–11]. В любом случае в точности выполнить требования (44), (45) невозможно. Поэтому целесообразно ввести

некоторую меру погрешности их достижения. Естественной мерой представляется функционал следующего вида:

$$P_{sr}(F, F^1) = E_{sr}(F - F^1) + \|F^1\|^2 - E_{sr}(F^1). \quad (46)$$

Заметим, что здесь в правой части первое слагаемое определяет точность выполнения тождеств (44), тогда как остальные два – меру отклонения от тождества (45) (согласно равенству Парсеваля). С учетом равенства (37) и представлений (8) и (40) правую часть (46) можно преобразовать:

$$P_{sr}(F, F^1) = sp A_s F B_r F^T + sp(-2 A_s F B_r F^{1T} + F^1 F^{1T}). \quad (47)$$

Очевидно, что искомая компонента изображения должна минимизировать этот функционал. Ясно, что при этом должен минимизироваться след матрицы (часть выражения (47) в скобках). Это соответствует минимизации ее евклидовой нормы. Таким образом, минимум функционала погрешностей выполнения (44), (45) достигается на матрице (изображении):

$$F^1 = A_s F B_r, \quad (48)$$

подстановка которой в (47) с учетом симметрии субполосных матриц дает соотношение для вычисления достигаемого значения:

$$\min P_{sr}(F, F^1) = sp(A_s F B_r F^T - A_s F B_r B_r F^T A_s), \quad F^1 \in R^{N \times M}. \quad (49)$$

Отсюда нетрудно получить и иное представление:

$$\min P_{sr}(F, F^1) = sp(A_s F B_r (F^T - B_r F^T A_s)), \quad F^1 \in R^{N \times M}. \quad (50)$$

Легко увидеть, что второй сомножитель здесь равен второму слагаемому в (43), который получается в результате минимизации функционала (46).

Заключение

Субполосный подход к анализу изображений позволяет получить характеристики, которые можно использовать в качестве признаков для их сравнения. Получены соотношения, определяющие важнейшие понятия субполосного анализа, и, в частности, разработана процедура оптимальной фильтрации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00241.

Литература

1. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Фinitные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971. 408 с.

2. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Цифровые видеоинформационные системы. М.: Техносфера, 2012. 1009 с.
3. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision / Ю.В. Визильтер [и др.]. М.: ДМК пресс, 2007. 464 с.
4. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 2004. 264 с.
5. Ветров Д.П., Рязанов В.В. О минимизации признакового пространства в задачах распознавания // Математические методы распознавания образов (ММРО-10): доклады Всероссийской конференции. М.: Изд-во ВЦ РАН, 2001. С. 22–25.
6. Жилияков Е.Г. Оптимальные субполосные методы анализа и синтеза сигналов конечной длительности // Автоматика и телемеханика. 2015. № 4. С. 51–66.
7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Физматлит, 2004. 560 с.
8. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / пер. с англ. М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. 656 с.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1105 с.
10. Арлазаров В.Л., Емельянов Н.Е. Обработка изображений и анализ данных. М.: ИСА РАН, 2008. Т. 38. 368 с.
11. Оберхеттингер Ф. Преобразование Фурье распределений и их обращения / пер. с англ. М.С. Никулина. М.: Наука, 1979. 248 с.

Получено 06.02.2020

Заливин Александр Николаевич, к.т.н., доцент кафедры организации и технологии защиты информации Белгородского университета кооперации экономики и права. 308023, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Садовая, 116а. Тел. +7 472 226-38-31. E-mail: zalivin@bsu.edu.ru

Черноморец Андрей Алексеевич, д.т.н., профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета. 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-00 (2027). E-mail: chernomorets@bsu.edu.ru

Жилияков Евгений Георгиевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета. 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел. +7 472 230-13-92. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Белов Сергей Павлович, д.т.н., профессор кафедры организации и технологии защиты информации Белгородского университета кооперации экономики и права. 308023, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Садовая, 116а. Тел. +7 980 323-61-04. E-mail: belovssergei@gmail.com

SUB-BAND REPRESENTATION IMAGE ANALYSIS IN THE FIELD OF SPATIAL FREQUENCIES

Zalivin A.N.¹, Chernomorets A.A.², Zhilyakov E.G.², Belov S.P.¹

¹ *Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, Belgorod, Russian Federation*

² *Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation*

E-mail: belov@bsu.edu.ru

Currently, two-dimensional visual representations of various information arrays are widespread, since images are the most natural form of information exchange for humans. Therefore, various information technologies for the implementation of computer image processing have been created. A significant place among existing information technologies is occupied by computer image analysis, the basis of which is the procedure for determining certain properties that characterize them from certain positions. In particular, an important area of image analysis is the automatic classification of their constituent objects (pattern recognition). The main attention is paid to the choice of the so-called feature space, which from the standpoint of the problem being solved most adequately reflects the properties of the analyzed images. The article considers the possibility of using a sub-band method for image analysis, the application of which, as shown by the research results, allows to obtain characteristics that can be used as features for their comparison.

Keywords: *sub-band analysis and synthesis, Fourier transform, fraction of the Euclidean norm of the signal*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.01

Zalivin Alexander Nikolaevich, Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, 116a, Sadovaya Street, Belgorod, 308023, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection, PhD. Tel. +7 472 226-38-31. E-mail: zalivin@bsu.edu.ru

Chernomorets Andrey Alekseevich, Belgorod State National Research University, 85, Pobeda Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technology, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 472 230-13-00 (2027). E-mail: chernomorets@bsu.edu.ru

Zhilyakov Evgeny Georgievich, Belgorod State National Research University, 85, Pobeda Street, Belgorod, 308015, Russian Federation; Head of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 472 230-13-92. E-mail: zhilyakov@bsu.edu.ru

Belov Sergey Pavlovich, Belgorod University of Cooperation of Economics and Law, 116a, Sadovaya Street, Belgorod, 308023, Russian Federation; Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 980 323-61-04. E-mail: belovssergei@gmail.com

References

1. Hurgin Ya.I., Yakovlev V.P. *Finitnye funktsii v fizike i tekhnike* [Limited Functions in Physics and Technology]. Moscow: Nauka, 1971, 408 p. (In Russian).
2. Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. *Cifrovye videoinformatsionnye sistemy* [Digital Video Information Systems]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 1009 p. (In Russian).
3. Vizil'ter Yu.V. et al. *Obrabotka i analiz cifrovyykh izobrazheniy s primerami na LabVIEW i IMAQ Vision* [Digital Image Processing and Analysis with Examples on LabVIEW and IMAQ Vision]. Moscow: DMK press, 2007, 464 p. (In Russian).
4. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition Methods]. Moscow: Vysshaya shkola, 2004, 264 p. (In Russian).
5. Vetrov D.P., Ryazanov V.V. O minimizatsii priznakovogo prostranstva v zadachah raspoznavaniya [On minimization of feature space in recognition problems] // *Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov (MMRO-10): doklady Vserossiyskoj konferentsii*. Moscow: Izd-vo VC RAN, 2001, pp. 22–25. (In Russian).
6. Zhilyakov E.G. Optimal'nye subpolosnye metody analiza i sinteza signalov konechnoj dlitel'nosti [Optimal subband methods for the analysis and synthesis of signals of finite duration]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2015, no. 4, pp. 51–66. (In Russian).
7. Gantmaher F.R. *Teoriya matric* [Matrix Theory]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 560 p. (In Russian).
8. Lajons R. *Cifrovaya obrabotka signalov / per. s angl.* [Digital Signal Processing. English Trans.]. Moscow: OOO «Binom-Press», 2007, 656 p. (In Russian).
9. Gonsales R., Vuds R. *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij* [Digital Image Processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 1105 p. (In Russian).
10. Arlazarov V.L., Emel'yanov N.E. *Obrabotka izobrazhenij i analiz dannykh* [Image Processing and Data Analysis]. Moscow: ISA RAN, 2008, vol. 38, 368 p. (In Russian).
11. Oberhettinger F. *Preobrazovanie Fur'e raspredelenij i ih obrashcheniya / per. s angl. M.S. Nikulina* [Fourier Transform of Distributions and their Inversions. English Trans. by M.S. Nikulin]. Moscow: Nauka, 1979, 248 p. (In Russian).

Received 06.02.2020

ОЦЕНКА ДЖИТТЕРА В СИСТЕМЕ G/M/1 НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Буранова М.А., Карташевский В.Г., Латыпов Р.Т.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: mburanova@yandex.ru, kartashevskiy-vg@psuti.ru, msib@psuti.ru

Анализ параметров функционирования IP-сетей при обработке мультимедийных потоков является весьма важной задачей. Существует множество подходов по оценке параметров качества обслуживания в системе G/G/1. При этом такой анализ часто основывается на допущениях, которые не позволяют определить параметры с необходимой точностью. В работе рассмотрен подход по оценке среднего значения джиттера мультимедийного трафика, зарегистрированного на реальной сети. Приведен анализ джиттера мультимедийного трафика в системе G/M/1. Оценка джиттера основана на аппроксимации системы G/G/1 системой $H_2/H_2/1$, имеющей гиперэкспоненциально распределенное время поступления и обслуживания. Для определения параметров гиперэкспоненциального распределения в работе использованы известные подходы, основанные на оценке начальных моментов первого и второго порядка.

Ключевые слова: качество обслуживания (QoS – Quality of Service), джиттер, гиперэкспоненциальный закон распределения, система массового обслуживания

Введение

В настоящее время производительность сети является одним из ключевых направлений в исследовании телекоммуникационных сетей. Для анализа производительности сети и повышения качества обслуживания (QoS – Quality of Service) необходима разработка новых методов, основанных на математических моделях реального трафика. Для решения данной задачи, как правило, применяется теория систем массового обслуживания. Однако ввиду отсутствия адекватных моделей современного трафика зачастую для анализа используется пуассоновская модель [1].

Проблемы, связанные с разработкой моделей трафика и сетей обработки трафика, обусловлены разнородностью обрабатываемых потоков, статистической структурой современного трафика, необходимостью учитывать конвергенцию инфокоммуникационных технологий, что может реально влиять на оценки производительности разрабатываемых сетей [2].

Анализ качества обслуживания в инфокоммуникационных сетях, как правило, направлен на оценку задержки. При этом не менее важной характеристикой качества функционирования сети является джиттер. Для некоторых приложений джиттер выступает более значимым параметром, чем задержка. Особенно важно это для мультимедийных потоков. Учитывая, что мультимедийный трафик в современных сетях занимает все большую долю, проблема оценки джиттера становится все актуальней.

Свидетельство сложности трафика проявляется в таких формах, как наличие корреляционных связей, долговременные зависимости или самоподобие, которые обнаруживаются при статистическом анализе реализаций трафика [2–4]. Данные явления изучаются давно, и существуют достаточно убедительные доказательства их значительного влияния на показатели функционирования сетей [5; 6].

Эффект самоподобия во многом определяется характером поведения пользователей, организацией запросов, особенностью работы протокола ТСР. Для характеристик, описывающих интенсивность поступления пакетов, их длительности, более точные оценки показывают статистические модели, основанные на распределениях с тяжелыми хвостами, таких как Парето и Вейбулла.

При этом следует учесть тот факт, что конкретный тип распределения, лежащий в основе математической модели, значительно зависит от конкретной реализации трафика и требует тщательного анализа. Другой проблемой, связанной с использованием распределений с тяжелыми хвостами, является сложность их анализа и использования. В том числе необходимо получить преобразование Лапласа этих распределений, при этом нет удобного выражения для преобразования Лапласа распределений Парето и Вейбулла.

Самоподобный характер современного трафика необходимо учитывать и при оценке джиттера или изменения задержки пакетов. Как правило, такая оценка базируется, как и при оценке задержки, на основе математического аппарата

теории массового обслуживания. Современные системы, обрабатывающие непуассоновский трафик, лучше описываются моделями $G/G/1$. В работах [7–9] представлены результаты оценки джиттера с использованием аналитического и имитационного моделирования. Реализуемые в этих работах подходы весьма трудоемки.

Одним из возможных вариантов использования методов классической теории массового обслуживания при обработке самоподобного трафика является вариант аппроксимации системы $G/G/1$ системой $H_2/H_2/1$, имеющей гиперэкспоненциально распределенное время поступления и обслуживания. Развитием такого подхода стало использование аппроксимации системой $H_K/H_L/1$. В [10] было установлено, что применение смеси экспоненциальных распределений является теоретически обоснованным подходом к моделированию IP-трафика.

Модель $H_2/H_2/1$ может быть использована в различных подходах описания систем. Например, в [2] приведена методика анализа функционирования сети при обработке самоподобного трафика с использованием гиперэкспоненциального распределения, где первая компонента распределения показывает экспоненциальную составляющую, а вторая описывает поведение тяжелого хвоста. Но данный подход также достаточно трудоемкий для оценки сетевых параметров и требует анализа распределений с тяжелыми хвостами. Более удобными являются подходы с применением аппроксимации с суммой двух экспонент [10].

Анализ джиттера IP-сети

Под джиттером понимают либо среднюю абсолютную вариацию задержки, либо изменение задержки в потоке от некоторого минимального значения [12]. В соответствии с рекомендацией IETF (Internet Engineering Task Force – Специальная комиссия интернет-разработок) [13] под джиттером понимается случайная переменная J_i , определяемая как

$$J_{i+1} = |T_{i+1} - T_i|,$$

где T_i – время задержки i -го пакета в узле сети, которое определяется в виде $T_i = W_i + Q_i$, где W_i – время ожидания i -го пакета в очереди и Q_i – время его обслуживания.

Основываясь на [7–9; 14] и на предположении Линдли [1], заключающемся в том, что $(i+1)$ -й пакет не будет ждать в очереди при выполнении условия, что интервал времени между приходом $(i+1)$ -го и i -го пакета больше, чем время задержки i -го пакета в узле сети, получим:

$$W_{i+1} = \begin{cases} 0 & \text{при } V_{i+1} \geq T, \\ W_i + Q_i - V_{i+1} & \text{в др. случае.} \end{cases}$$

Исходя из этого, джиттер определим следующим образом:

$$J_{i+1} = \begin{cases} |Q_{i+1} - T_i| & \text{при } V_{i+1} \geq T, \\ |Q_{i+1} - V_{i+1}| & \text{в др. случае.} \end{cases}$$

Если предположить случайные величины T_i , Q_i и V_i независимыми между собой и не коррелированными в структуре каждой последовательности случайной величины, индекс i у соответствующих плотностей вероятностей можно отбросить и ввести обозначения: $f_T(x)$ – плотность вероятностей случайной величины T , $f_V(y)$ – плотность вероятностей случайной величины V и $f_Q(z)$ – плотность вероятностей случайной величины Q .

В [7; 9] показано, что среднее значение джиттера определяется в соответствии со следующим выражением:

$$J = E(|T_{i+1} - T_i|) = \int_0^{\infty} f_V(y) \int_0^{\infty} f_Q(z) \times \left[\int_0^y |z-x| f_T(x) dx + |z-y| \int_y^{\infty} f_T(x) dx \right] dz dy. \quad (1)$$

При известных или приближенных функциях плотности вероятностей случайных интервалов времени между поступлениями пакетов, времени обслуживания и времени ожидания пакета в очереди выражение (1) позволяет оценить среднее значение джиттера для системы обслуживания $G/G/1$.

В случае когда плотность распределения вероятностей какой-либо реализации либо практически невозможно, либо весьма затруднительно описать конкретным законом распределения, можно описать ее смесью распределений. Для (1) функции $f_T(x)$, $f_V(y)$ и $f_Q(z)$ можно представить в виде смеси показательных распределений, которые предпочтительней для описания и моделирования трафика IP-сети [10].

Если произвольную плотность вероятностей в системе $G/G/1$ обозначить как $f(x)$, то задача аппроксимации $f(x)$ с использованием гиперэкспоненциальных распределений может быть представлена в виде

$$f(x) = H_N(x) = \sum_{i=1}^N p_i h_i(x), \quad (2)$$

где $h_i(x)$ – функция правдоподобия i -й компоненты смеси; $h_i(x) = \alpha_i e^{-\alpha_i x}$; $p_i \geq 0$ – вероят-

ность; $\sum_{i=1}^N p_i = 1$. В случае применения модели $H_2/H_2/1$ выражение (2) можно представить в виде

$$f(x) = p\alpha_1 e^{-\alpha_1 x} + (1-p)\alpha_2 e^{-\alpha_2 x}.$$

Использование гиперэкспоненциального распределения в качестве примера произвольного распределения G позволяет получить достаточно точные результаты при незначительных вычислительных затратах. При этом необходимо обозначить параметры каждой экспоненциальной составляющей распределения.

Интервалы между отсчетами реализации трафика, распределенные по закону $f_V(y)$, определяются параметром γ :

$$a(x) = p\gamma_1 e^{-\gamma_1 x} + (1-p)\gamma_2 e^{-\gamma_2 x},$$

время обслуживания – $f_Q(z)$, определяется параметром μ :

$$b(x) = q\mu_1 e^{-\mu_1 x} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2 x},$$

транзитное время – $f_T(x)$, определяется параметром δ :

$$c(x) = g\delta_1 e^{-\delta_1 x} + (1-g)\delta_2 e^{-\delta_2 x}.$$

В [14] показан подход с использованием гиперэкспоненциальной аппроксимации плотностей $f_V(y)$ для интервалов времени между поступлениями и $f_Q(z)$ для интервалов времени обслуживания. При этом было принято, что $f_W(\cdot)$ – показательное распределение, имеющее вид $f_W(\tau) = \delta e^{-\delta\tau}$, где параметр δ определяется как $\delta = \mu(1-\xi)$ [1]; ξ – корень уравнения $\xi = \Lambda_V(\mu - \mu\xi)$, где Λ_V – преобразование Лапласа плотности $f_V(\cdot)$; μ – средняя интенсивность обработки пакета в системе $G/M/1$. Следовательно, $c(x)$ можно записать в виде $c(x) = \delta e^{-\delta x}$.

Учитывая вышесказанное, можно принять следующее представление для плотностей $f_V(\cdot)$ и $f_Q(\cdot)$:

$$f_V(\tau) = p\gamma_1 e^{-\gamma_1 \tau} + (1-p)\gamma_2 e^{-\gamma_2 \tau}; \quad (3)$$

$$f_Q(\tau) = q\mu_1 e^{-\mu_1 \tau} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2 \tau}. \quad (4)$$

Так как для времени задержки пакета в системе T_i справедливо $T_i = W_i + Q_i$, то плотность вероятности $f_T(\cdot)$ определяется сверткой распределений (при выполнении условия независимости случайных величин W и Q):

$$\begin{aligned} f_T(y) &= \int_0^{\infty} f_W(u) f_Q(y-u) du = \\ &= \frac{\delta q \mu_1}{|\delta - \mu_1|} e^{-\mu_1 y} + \frac{\delta(1-q)\mu_2}{|\delta - \mu_2|} e^{-\mu_2 y}. \end{aligned}$$

В итоге получены все плотности, входящие в (1), следовательно, можно оценить среднее значение джиттера, учитывая соотношение:

$$\begin{aligned} \int_0^y |z-x| f_T(x) dx &= \int_0^z (z-x) f_T(x) dx + \\ &+ \int_z^y (x-z) f_T(x) dx. \end{aligned}$$

Окончательный результат выражения для расчета джиттера [14]:

$$\begin{aligned} J &= \alpha_1 + \alpha_2(A+B) - \\ &- \frac{A}{\mu_1} \left[\frac{p\gamma_1}{\mu_1 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{\mu_1 + \gamma_2} \right] - \\ &- \frac{B}{\mu_2} \left[\frac{p\gamma_1}{\mu_2 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{\mu_2 + \gamma_2} \right] + \\ &+ \frac{2qA}{\mu_1} \left[\frac{p\gamma_1}{2\mu_1 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{2\mu_1 + \gamma_2} \right] + \\ &+ \frac{2(1-q)B}{\mu_2} \left[\frac{p\gamma_1}{2\mu_2 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{2\mu_2 + \gamma_2} \right] + \\ &+ 2 \left[\frac{A(1-q)}{\mu_2} + \frac{Bq}{\mu_1} \right] \times \\ &\times \left[\frac{p\gamma_1}{\mu_1 + \mu_2 + \gamma_1} + \frac{(1-p)\gamma_2}{\mu_1 + \mu_2 + \gamma_2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{(\mu_1 - \mu_2)[Bq\mu_1 - A(1-q)\mu_2]}{\mu_1\mu_2(\mu_1 + \mu_2)}, \\ \alpha_2 &= \frac{\mu_1(1-q) + q\mu_2}{\mu_1\mu_2}, \\ A &= \frac{\delta q}{|\delta - \mu_1|}, \quad B = \frac{\delta(1-q)}{|\delta - \mu_2|}. \end{aligned}$$

Для получения значения джиттера, согласно выражению (5), необходимо знание параметров распределений $f_V(\cdot)$ и $f_Q(\cdot)$ и $f_W(\cdot)$, то есть (p, γ_1, γ_2) и (q, μ_1, μ_2) и δ . Для определения параметров гиперэкспоненциальных распределений (3) и (4) воспользуемся подходом, показанным в [15; 16], где представлена методика определения параметров по двум моментам (среднее, дисперсия) исходного распределения для независимых случайных величин.

В [15; 16] показано, что для получения аналитических выражений начальных моментов гиперэкспоненциальных распределений до второго порядка, основанный на использовании свойства преобразования Лапласа, и для (3):

$$\frac{-}{\tau_\gamma} = \frac{p}{\gamma_1} + \frac{(1-p)}{\gamma_2}, \quad (6)$$

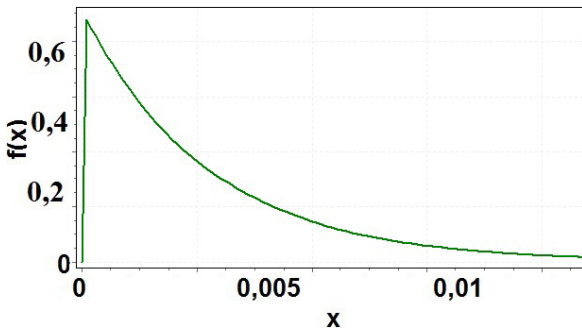


Рисунок 1. Распределение случайных интервалов времени между пакетами (Weibull)

$$\overline{\tau_\gamma^2} = \frac{2p}{\gamma_1^2} + \frac{2(1-p)}{\gamma_2^2}, \quad (7)$$

где $\overline{\tau_\gamma}$ – среднее значение интервалов между поступлениями пакетов. Учитывая, что для квадрата коэффициента вариации

$$\overline{c^2} = \frac{\overline{\tau_\gamma^2} - (\overline{\tau_\gamma})^2}{(\overline{\tau_\gamma})^2}. \quad (8)$$

Параметры распределений вычисляются как

$$\gamma_1 = 2p / \overline{\tau_\gamma}, \quad \gamma_2 = 2(1-p) / \overline{\tau_\gamma}, \quad (9)$$

С учетом выражений (6), (7) и (9) в (8) получено для параметра p :

$$p = \frac{1}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{c_\gamma^2 - 1}{c_\gamma^2 + 1}} \right). \quad (10)$$

Аналогично можно получить значения параметров для выражения (4), но для определения параметров (q, μ_1, μ_2) необходимо использовать выражения для $\overline{\tau_\mu}$ – среднее значение времени обслуживания.

Для оценки параметра δ воспользуемся известными подходами [15] для системы $H_2/H_2/1$. В работе [15] авторы показали, что для системы $H_2/H_2/1$ для функции плотности времени ожидания преобразование Лапласа имеет вид

$$W^*(s) = \frac{s_1 s_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 (s + s_1)(s + s_2)},$$

а среднее время ожидания будет иметь вид

$$T = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}, \quad (11)$$

где $-s_1$ и $-s_2$ – отрицательные вещественные части корней кубического уравнения $s^3 - c_2 s^2 - c_1 s - c_0 = 0$, для которого коэффициенты:

$$\begin{aligned} c_{\overline{\tau_\mu}} &= a b - a b - a (\mu + \mu) + b (\gamma + \gamma), \\ c_{\overline{\tau_\mu^2}} &= -a b - a - b + (\gamma + \gamma)(\mu + \mu)(\gamma + \gamma), \\ c_2 &= \gamma_1 + \gamma_2 - \mu_1 - \mu_2, \end{aligned}$$

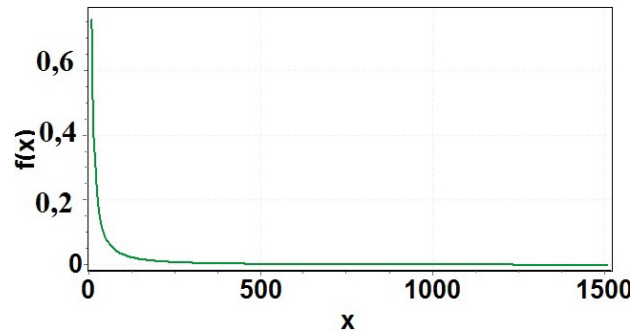


Рисунок 2. Распределение случайных длин пакетов (Pareto)

с промежуточными параметрами:

$$\begin{aligned} a_0 &= \gamma_1 \gamma_2, & a_1 &= p \gamma_1 + (1-p) \gamma_2, \\ b_0 &= \mu_1 \mu_2, & b_1 &= q \mu_1 + (1-q) \mu_2. \end{aligned}$$

В итоге параметр δ в системе $G/M/1$ можно определить согласно выражению

$$\delta = \frac{1}{W} = \frac{s_1 s_2 \mu_1 \mu_2}{s_1 \mu_1 \mu_2 + s_1 \mu_1 \mu_2 - \mu_1 s_1 s_2 - \mu_2 s_1 s_2}.$$

Полученные результаты позволяют оценить параметры, характеризующие реальный мультимедийный трафик.

Анализ статистических характеристик мультимедийного трафика

Рассмотрим реализацию мультимедийного трафика на уровне доступа пользователя сети, описание которого приведено в [11]. Законы распределения интервалов времени между пакетами и длин пакетов данного трафика можно проанализировать на основании статистического критерия Колмогорова – Смирнова. Анализ распределения случайных интервалов времени между пакетами показал, что наиболее точным является распределение Weibull (Вейбулла) с параметрами: $\alpha = 0,32$, $\beta = 167$, которое имеет вид

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left(- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right),$$

где α – параметр формы; β – масштабный параметр. На рисунке 1 отражены гистограмма и результат ее аппроксимации.

Для длин пакетов получили результат, показанный на рисунке 2, в виде распределения Парето (Pareto) с параметрами: $\alpha = 0,3$; $\beta = 60$, которое имеет вид

$$f_R(x) = \begin{cases} \alpha \frac{x_m^\alpha}{x^{\alpha+1}}, & \text{если } x \geq x_m, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где x_m – масштабный параметр; α – параметр формы. При определении параметров функции

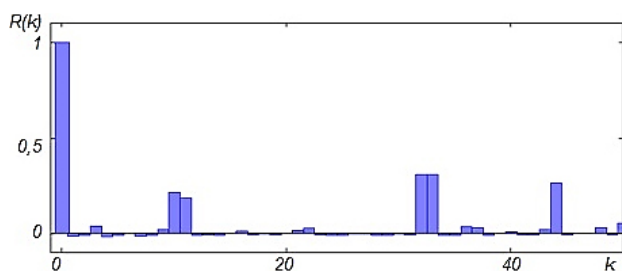


Рисунок 3. График зависимости коэффициентов корреляции $R(k)$ интервалов времени между пакетами

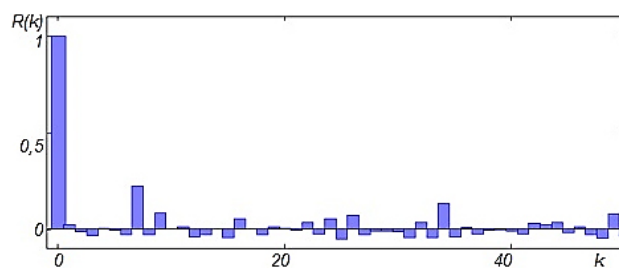


Рисунок 4. График зависимости коэффициентов корреляции $R(k)$ длин пакетов

онирования необходимо учитывать наличие зависимостей между случайными величинами трафика или наличие корреляционных связей между отсчетами реализации трафика.

Расчет автокорреляционной функции выборочной реализации случайного процесса можно провести по формуле

$$R(k) = \frac{\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2},$$

где \bar{X} – среднее значение; N – объем выборки. Для исследуемых отсчетов рассматриваемого мультимедийного потока были определены зависимости коэффициентов корреляции, показанные на рисунках 3, 4.

Анализ графиков зависимостей коэффициентов корреляции $R(k)$ для интервалов времени между пакетами реализации мультимедийного трафика свидетельствует, что корреляции практически отсутствуют. Это позволяет при анализе параметров функционирования сделать предположение о независимости рассматриваемых случайных величин. Следует заметить, что отсутствие корреляции наблюдается для исследуемой реализации трафика, но не является характерной особенностью в целом для современных инфокоммуникационных потоков.

Оценка джиттера для мультимедийного трафика

Анализируя реализацию рассматриваемого мультимедийного трафика, мы определили значения $\bar{\tau}_\gamma = 20$ мс, $\bar{\tau}_\mu = 102$ мс. Известно, что коэффициент загрузки системы рассчитывается как $\rho = \bar{\gamma} / \mu = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\gamma$, учитывая полученные значения для $\bar{\tau}_\gamma$ и $\bar{\tau}_\mu$, получим $\rho = 0,19$. Согласно выражению (8), можно оценить коэффициенты вариации: $c_\gamma = 7,2$ мс и $c_\mu = 0,06$ мс. Для параметров гиперэкспоненциальных распределений по выражениям (9) и (10) было получено:

– $p = 0,93$, $\gamma_1 = 800$ мс⁻¹, $\gamma_2 = 58$ мс⁻¹ – для $f_V(\tau)$ согласно (3);

– $q = 0,96$, $\mu_1 = 189$ мс⁻¹, $\mu_2 = 6$ мс⁻¹ – для $f_Q(\tau)$ согласно (4).

Используя для расчета δ полученные значения параметров, имеем $\delta = 0,002$ мс⁻¹. На основании полученных значений параметров и формулы (5) для джиттера определено: $J = 8 \cdot 10^{-2}$ мс.

Заключение

В работе была получена аналитическая оценка джиттера в системе $G/M/1$ на основе применения системы $H_2/H_2/1$. Оценка джиттера произведена с использованием известных подходов, но данные подходы ранее не были применены совместно. Представленная методика анализа джиттера является основой для моделирования системы $G/G/1$ с использованием $H_2/H_2/1$.

При этом сохраняется проблема учета корреляционных свойств потоков.

Литература

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
2. Feldmann A., Whitt W. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models // Proceedings IEEE INFOCOM'97. Piscataway: IEEE, 1997. P. 1096–1104.
3. On the self-similar nature of Ethernet traffic / W.E. Leland [et al.] // IEEE. ACM Transactions on Networking. 1994. Vol. 2. № 1. P. 1–15.
4. Montgomery M., Veciana G. On the relevance of time scales in performance oriented traffic characterizations // IEEE INFOCOM'96. 1996. P. 513–520.
5. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы // Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
6. Kartashevskii V.G., Buranova M.A. Analysis of packet jitter in multiservice network //

- 5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Conference Proceedings. 2018. P. 797–802. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632085.
7. Dbira H., Girard A., Sanso B. Calculation of packet jitter for non-Poisson traffic // *Annals of Telecommunications*. 2016. Vol. 71. № 5–6. P. 223–237.
 8. Карташевский В.Г., Буранова М.А. Моделирование джиттера пакетов при передаче по мультисервисной сети // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2019. Т. 17. № 1. С. 34–40.
 9. Латыпов Р.Т., Буранова М.А. Анализ параметров функционирования сети MPLS при изменении топологии // *Труды учебных заведений связи*. 2019. Т. 5. № 3. С. 6–12.
 10. Keilson J., Machihara F. Hyperexponential waiting time structure in hyperexponential $H_K/H_L/1$ system // *Journal of the Operation Society of Japan*. 1985. № 28 (3). P. 242–250.
 11. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов / под ред. А.Л. Бузова, С.А. Букашкина. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
 12. Demichelis C., Chimento P. IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). Institution IETF, RFC 33934. 2000. 21 p. DOI: 10.17487/RFC3393.
 13. Internet protocol data communication service IP packet transfer and availability performance parameters. ITU-T Recommendation Y. 1540. 2002. 33 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-I.380-199902-S/en> (д.о. 10.11.2019).
 14. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of packet jitter for correlated traffic // *International Conference on «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019»*. 2019. Vol. 11660. P. 610–620. (Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham). DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9_53.
 15. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Определение среднего времени ожидания требований в управляемой системе массового обслуживания $H_2/H_2/1$ // *Системы управления и информационные технологии*. 2014. № 3 (57). С. 92–96.
 16. Тарасов В.Н., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А. Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // *Инфокоммуникационные технологии*. 2014. № 2. С. 40–44.

Получено 31.01.2020

Буранова Марина Анатольевна, к.т.н., доцент кафедры информационной безопасности (ИБ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-67. E-mail: buranova-ma@psuti.ru

Карташевский Вячеслав Григорьевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ИБ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-53-50. E-mail: kartashevskiy-vg@psuti.ru

Латыпов Руслан Танисович, аспирант кафедры ИБ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-67. E-mail: msibs@psuti.ru

ESTIMATE JITTER IN THE G/M/1 SYSTEM BASED ON HYPEREXPONENTIAL DISTRIBUTIONS

Buranova M.A., Kartashevskiy V.G., Latypov R.T.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: buranova-ma@psuti.ru, kartashevskiy-vg@psuti.ru, msib@psuti.ru

Analysis of the parameters of the functioning of IP-networks in the processing of multimedia streams is a very important task. There are many approaches to assessing the quality of service parameters in the $G/G/1$ system. But such an analysis is often based on assumptions that do not allow determining the parameters with the necessary accuracy. The paper considers an approach to assess the average value of jitter of multimedia traffic recorded on a real network. The analysis of jitter of multimedia traffic in the $G/M/1$ system is given. Jitter estimation is based on the $G/G/1$ system approximation by the system, which has a hyperexponentially distributed arrival and servicing time. To determine

the hyperexponential distribution parameters, well-known approaches based on the assessment of the initial moments of the first and second order have been used.

Keywords: *quality of service, jitter, hyperexponential distribution law, queuing system*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.02

Buranova Marina Anatolievna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Tel. +7 846 339-11-67. E-mail: buranova-ma@psuti.ru

Kartashevskiy Vyacheslav Grigorievich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Doctor of Technical Sciences, Professor. Tel. +7 846 333-53-50. E-mail: kartashevskiy-vg@psuti.ru

Latypov Ruslan Tanisovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics (PSUTI), 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD Student. Tel. +7 846 339-11-67. E-mail: msib@psuti.ru

References

1. Kleinrock L. *Queueing Systems: Volume I, Theory*. New York: Wiley Interscience, 1975, 417 p.
2. Feldmann A., Whitt W. Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models. *Proceedings IEEE INFOCOM'97*. Piscataway: IEEE, 1997, pp. 1096–1104.
3. Leland W.E. et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic. *IEEE. ACM Transactions on Networking*, 1994, vol. 2, no. 1, pp. 1–15.
4. Montgomery M., Veciana G. On the relevance of time scales in performance oriented traffic characterizations. *IEEE INFOCOM'96*, 1996, pp. 513–520.
5. Sheluhin O.I., Osin A.V., Smol'skiy S.M. Samopodobie i fraktaly [Self-Similarity and Fractals]. *Telekommunikacionnye prilozheniya*. Moscow: Fizmatlit, 2008, 368 p. (In Russian).
6. Kartashevskii V.G., Buranova M.A. Analysis of packet jitter in multiservice network. *5th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2018 – Conference Proceedings*, 2018, pp. 797–802. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632085.
7. Dbira H., Girard A., Sanso B. Calculation of packet jitter for non-Poisson traffic. *Annals of telecommunications*, 2016, vol. 71, no. 5–6, pp. 223–237.
8. Kartashevskii G., Buranova, M.A. Modelirovanie dzhittera paketov pri peredache po mul'tiservisnoj seti [Simulation of packet jitter in multi-service network transmission]. *Infokommunikacionnie tehnologii*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 34–40. (In Russian).
9. Latypov R.T., Buranova, M.A. Analiz parametrov funkcionirovaniya seti MPLS pri izmenenii topologii [Analysis of the parameters of the functioning of the MPLS network with a change in topology]. *Trudy uchebnyh zavedenij svyazi*, 2019, vol. 5, no. 3, pp. 6–12. (In Russian).
10. Keilson J., Machihara F. Hyperexponential waiting time structure in hyperexponential $H_K/H_L/1$ system. *Journal of the Operation Society of Japan*, 1985, no. 28 (3), pp. 242–250.
11. *Spetsial'naya radiosvyaz'. Razvitie i modernizatsiya oborudovaniya i ob'ektov / pod red. A.L. Buzova, S.A. Bukashkina* [Special Radio Communication. Development and Modernization of Equipment and Facilities. Ed. by A.L. Buzov, S.A. Bukashkin]. Moscow: Radiotekhnika, 2017, pp. 323–386. (In Russian).
12. Demichelis C., Chimento P. *IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)*. Institution IETF, RFC 33934, 2000, 21 p. DOI: 10.17487/RFC3393.
13. *Internet protocol data communication service IP packet transfer and availability performance parameters*, ITU-T Recommendation Y. 1540, 2002, 33 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-I.380-199902-S/en>.

14. Kartashevskiy I., Buranova M. Calculation of packet jitter for correlated traffic. *International Conference on «Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019»*, 2019, vol. 11660, p. 610–620. (Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham). DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9_53.
15. Tarasov V.N., Kartashevskij I.V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovanij v upravly-aemoj sisteme massovogo obsluzhivaniya $H_2/H_2/1$ [Determination of the average waiting time for requirements in a managed mass service system $H_2/H_2/1$]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*, 2014, no. 3 (57), pp. 92–96. (In Russian).
16. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. Vosstanovlenie momentnyh harakteristik raspredeleniya intervalov mezhdru paketami v hodyashchego trafika [Recovery of moment characteristics of the distribution of intervals between packets of incoming traffic]. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 40–44. (In Russian).

Received 31.01.2020

УДК 621.315

УДАЛЕННОЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, СЕТЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СВЯЗИ И ИНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОАО «РЖД» НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РОФ

Белоногов А.С., Шорохов Н.С.

Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, РФ

E-mail: abelonogov@rambler.ru

Статья описывает способ и систему передачи энергии лазерного излучения высокой мощности по оптоволокну для электроснабжения удаленных от основных источников питания электронных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, оптических сетей и узлов на основе технологии Power-over-Fiber с использованием специального волоконно-оптического кабеля и лазерной системы высокой мощности. Причем используемые кабели обеспечивают возможность передачи энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, и эти расстояния и уровни передаваемой мощности ранее считались недостижимыми. Стоит отметить, что этого удалось добиться за счет особой многослойной структуры кабеля, а в спектральной характеристике лазерного излучения – отсутствия спектра частот, на котором возникают явления вынужденного рамановского рассеяния, что позволило достичь приведенных в работе теоретических и экспериментальных результатов. Кроме того, предполагается, что конструкция кабелей будет выдерживать суровые атмосферные условия эксплуатации. Приведены результаты эксперимента, которые показали возможность передачи пиковой вводимой мощности лазера 5 кВт на расстояние 2 км по оптическому кабелю с получением на выходе системы 51 % исходной вводимой мощности.

Ключевые слова: *Power-over-Fiber, передача энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, оптическое волокно, вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, вынужденное рамановское рассеяние, стоксовы и антистоксовы компоненты, QВН-коннектор, коллиматор, удаленное электроснабжение оптических сетей, узлов и прочих электроустройств посредством волоконно-оптического кабеля*

Введение

Кратко опишем смысл технологии Power-over-Fiber (PoF): подразумевается, что мощность, необходимая для питания удаленного устройства, передается по оптоволокну в виде оптического излучения, генерируемого лазерным источником, с величиной оптической мощности порядка сотен мВт–десятков Вт, что значительно превышает значения, используемые в телекоммуникациях. На стороне питаемого устройства находится полупроводниковый фотоприемник особой

конструкции, называемый фотовольтаическим преобразователем, чаще всего многослойной структуры, показывающий высокую эффективность преобразования мощности на рабочей длине волны (более 25 %).

Преобразователь не имеет внешнего питания, генерация носителей заряда происходит исключительно за счет подводимой оптической мощности. При подключении преобразователя в цепь питаемого устройства преобразователь начинает работать как источник постоянного тока. Он пре-

образует мощность оптического излучения, распространяющегося по оптоволокну, в электрическую мощность. Величина электрической мощности и напряжения на выходе преобразователя зависит от характеристик выбранного преобразователя, а также от величины оптической мощности на его входе.

Используемое в статье понятие «энергия лазерного излучения высокой мощности» означает лазерный пучок, имеющий мощность порядка 5 кВт, если не указано иное. Термин «большие расстояния» – не менее 500 м, если не указано иное. Термины «значительная потеря мощности» и «значительные потери мощности» означают: не больше чем 2,0 дБ/км в зависимости от выбранной рабочей длины волны излучения; термин «значительная передача мощности» – передачу по меньшей мере около 50 % мощности [1].

На сети ОАО «РЖД» активно внедряются современное телекоммуникационное оборудование, оптические сети связи, сетевые элементы связи и иное электрооборудование. К тому же с недавнего времени актуальной стала задача организации «последней мили» и систем видеоконтроля на базе технологии **Passive Optical Network (PON)** или ее вариаций, в частности GPON, EPON и т. д. Внедрение технологии **GPON** обеспечивает весь спектр услуг связи, однако существовавшее ранее удаленное электропитание оконечного оборудования, позволявшее пользоваться телефонной связью в качестве источника питания при перерывах в энергоснабжении, стало невозможным. Поэтому для обеспечения связи и электропитания удаленных объектов автоматики, телемеханики и связи (АТС), оптических узлов и сетей связи предлагается осуществлять передачу электроэнергии по оптоволоконному кабелю, используя технологию PoF [2].

Описание проблемы

До недавнего времени считалось, что существует парадигма, заключающаяся в том, что передача энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния без значительной потери мощности является недостижимой, причем 45 % передаваемой мощности – это потеря в оптическом волокне и 50 % – потеря в фотоэлементе при преобразовании энергии света в электрический ток. Это подтверждает, например, характеристика продукции компании LaserMotive, создавшая линию продуктов PoF, которая позволяет обеспечивать передачу до 10 Вт энергии на расстояние до 10³ м [2].

Вследствие этого также считалось, что нет основания для конструирования или исследования структуры оптического волокна или волоконно-оптического кабеля, предназначенного для передачи энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния.

Потери мощности в оптическом волокне на больших расстояниях происходят по многим причинам, включая [3]:

– потери на поглощение:

$$a_n = \frac{8,69\pi n}{\lambda} \operatorname{tg} \delta, \text{ дБ/км}, \quad (1)$$

где λ – длина волны, мкм; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь в световоде;

– потери на поглощение из-за гидроксильных ионов ОН:

$$\alpha_{OH} = \begin{cases} \bar{\alpha}_{OH}, & \bar{\alpha}_{OH} \leq \alpha_{OH, \max}, \\ \alpha_{OH, \max}, & \bar{\alpha}_{OH} > \alpha_{OH, \max}, \end{cases} \text{ дБ/км}, \quad (2)$$

где

$$\alpha_{OH, \max} = \alpha_{SE} - \alpha_{PP}(\lambda_{SE}) - \alpha_{ИКП}(\lambda_{SE}), \text{ дБ/км}, \quad (3)$$

$$\bar{\alpha}_{OH} = \frac{7\Delta\alpha_{OH}}{49 + (\lambda - \lambda_{SE})^2} \text{ дБ/км}. \quad (4)$$

– рэлеевское рассеяние:

$$\alpha_{PP} = \frac{C_{PP}}{\lambda^4}, \text{ дБ/км}, \quad (5)$$

где λ – длина волны, мкм; C_{PP} – постоянная, которая зависит от состава материала сердцевины волокна и лежит в пределах $C_{PP} = 0,7...0,9 \text{ мкм}^4 \cdot \text{дБ/км}$;

– бриллюэновское рассеяние и рамановское рассеяние (ВРМБ).

Порог ВРМБ достигается при критической мощности накачки p_0^{cr} [4], которую можно оценить из выражения

$$g_b p_0^{cr} L_{эфф} / A_{эфф} \approx 21, \quad (6)$$

где $L_{эфф}$ – эффективная длина взаимодействия; $A_{эфф}$ – эффективная площадь сечения оптического волокна; g_b – коэффициент ВРМБ усиления.

Если взять обычные параметры световода для оптической связи на $\lambda = 1,55$ мкм: $A_{эфф} = 50 \text{ мкм}^2$, $L_{эфф} = 20 \text{ км}$, $g_b = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м/Вт}$, то (6) дает критическую мощность накачки $p_0^{cr} = 1 \text{ мВт}$. Такой низкий порог делает ВРМБ доминирующим нелинейным процессом в световодах [8].

Согласно [5], в случае вынужденного бриллюэновского рассеяния (ВБР) «порог возрастает как квадрат диаметра модового поля (ДМП) сигнала и обратно пропорционально эффективной длине волокна. Следовательно, для повышения

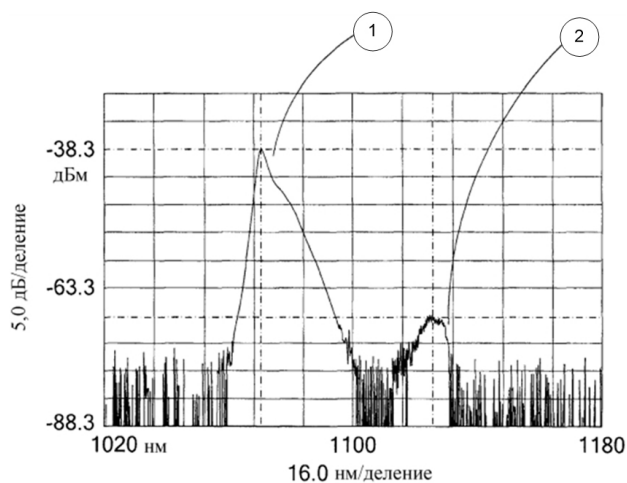


Рисунок 1. Вид спектра из предыдущего поколения техники с показом наличия явления вынужденного рамановского рассеяния [6]

мощности желательно иметь больший размер сердцевины и меньшую длину волокна». В статье Corning [10] отмечено, что «из рассеяний трех типов (рэлеевского, рамановского и бриллюэновского) ВБР признается доминирующим в нелинейных характеристиках оптического волокна». Далее указано, что «кривая выходной мощности... также показывает, что мощность сигнала снижается при повышении входной мощности сверх определенного предела. Этот вредный результат будет эффективно ограничивать выходную мощность сигнала, но будет продолжаться передача мощности стоксовой (отраженного) компоненты сигнала с помощью электрострикционного процесса, который лежит в основе явления вынужденного бриллюэновского рассеяния», что отражено в работе [9]. При этом «вынужденное бриллюэновское рассеяние известно как явление, сильно ограничивающее проектирование различных оптических систем передачи, усилителей и лазеров» [10].

Данная парадигма, дополненная техническими испытаниями, подтверждала факт существования связи между длиной волокна и передаваемой мощностью, и она показана в работе Mr. Muto в [6]. Однако при этом автор [6] установил, что мощность 4 кВт транспортируется по волокну длиной 1 км, когда к волокну прикладывается мощность лазера 5 кВт, однако дальнейших положительных результатов не было достигнуто, ибо Mr. Muto не смог исключить явление вынужденного рамановского рассеяния (ВРР). Как показано далее, это вредное явление эффективно ограничивает выходную мощность по мере увеличения длины кабеля или мощности излучения. Явление вынужденного рамановского рассеяния можно наблюдать в спектре излучения оптического волокна, который отражен на рисунке 1.

На рисунке 1 лазерный пучок показан в виде отметки «1», а вынужденное рамановское рассеяние – в виде отметки «2». Таким образом, до настоящего времени считалось, что при увеличении входной мощности от лазера или длины волокна выходная мощность волокна не будет повышаться вследствие ВБР, ВРР и других нелинейных явлений. В частности, при вынужденном бриллюэновском рассеянии выходная мощность передается по волокну обратно ко входу. Кроме того, ВБР, ВРР, а также другие вредные нелинейные эффекты в дополнение к ограничению величины мощности, которую можно передавать на выход волокна, могут приводить к нагреву волокна и в конечном счете к повреждению. Поэтому, как признает [6], «установлено, что доставка мощности 10 кВт возможна только по волокну длиной 250 м при диаметре сердцевины волокна 150 мкм. Таким образом, физическим явлением, которое ограничивает передаваемую мощность, является вынужденное рамановское рассеяние». В итоге автор [6], как это до него делали другие, считал невозможным передачу энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния.

Передача энергии лазерного излучения высокой мощности по оптическому кабелю на большие расстояния

В данной работе утверждается, что доставка энергии лазерного излучения высокой мощности на длинные расстояния возможна за счет создания системы с лазером и волоконно-оптическим кабелем, в которой исключены потери, вызванные нелинейными эффектами волокна, и которая обеспечивает передачу энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния без значительной потери мощности [1].

На рисунке 2 приведена структура испытательной системы, которая позволяет провести эксперимент по передаче энергии лазерного излучения высокой мощности на длинные расстояния, оценить различные типы волокон и кабеля для передачи высокой оптической мощности по волокну.

При этом желательно иметь волоконно-оптический кабель, который обеспечивает доставку энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния без значительной потери мощности. Поэтому, исходя из выводов [1], в работе предлагается использовать для эксперимента несколько волоконно-оптических кабелей для передачи энергии лазерного излучения высокой мощности на большие расстояния, чтобы оце-

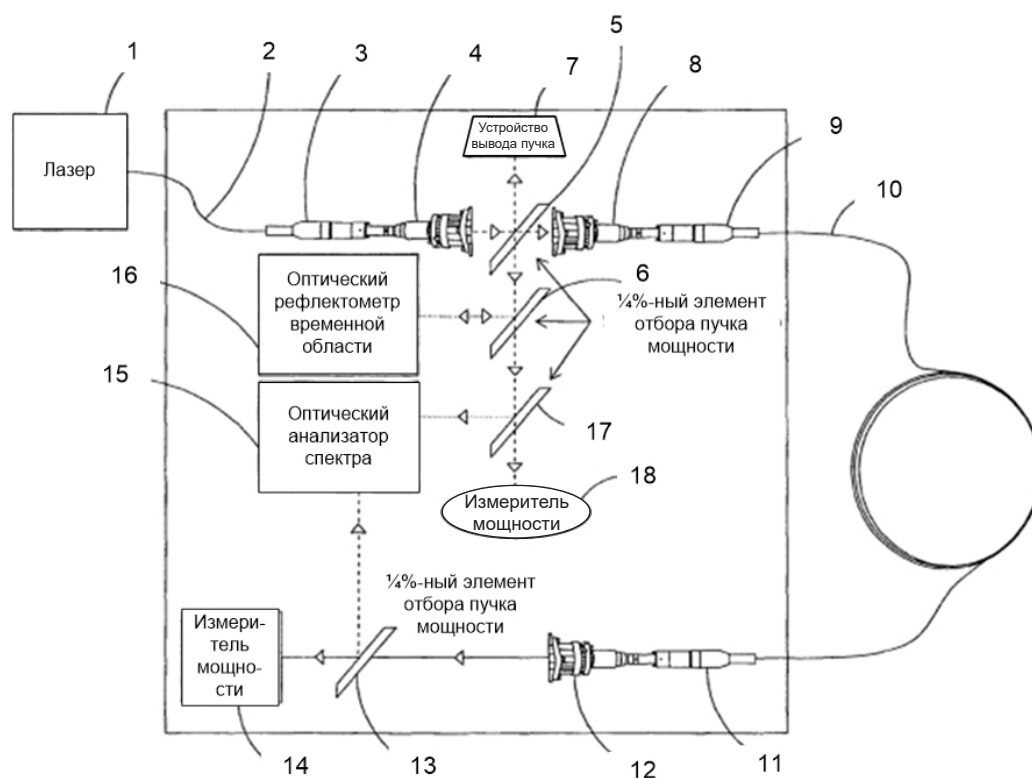


Рисунок 2. Функциональная схема испытательной системы [1]

нить возможности метода на разных длинах оптического кабеля.

Будем использовать кабель, представляющий собой слоистую структуру, содержащую: сердцевину; оболочку; покрытие; два защитных слоя. Используемый оптический кабель должен быть особой технической конструкции длиной от 0,5 км до 5 км, диапазон затухания которого в зависимости от рабочей длины волны составляет от 2 до 0,5 дБ/км в зависимости от длины волны излучения.

Кроме того, необходимо создать условия, чтобы в испытуемый волоконно-оптический кабель поступало лазерное излучение, в котором отсутствовал спектр, относящийся к вынужденному рамановскому излучению. Кабель должен обеспечить передачу энергии лазерного излучения, имеющую мощность от 1 до 10 кВт. Детальные сведения о структуре кабеля приведем в последующих работах.

В системе (см. рисунок 2) предусмотрены лазер 1, короткое, длиной около 25 м, оптическое волокно 2 диаметром 300 мкм, соединяющее лазер с QFN-коннектором 3 (кварцевым кубическим), который соединяет волокно 2 с коллиматором 4. Коллиматор 4 коллимирует лазерный пучок, который пропускается через 1/4%-ный элемент 5 отбора пучка. Из этой точки в системе пучок может быть направлен к 1/4%-ному элементу 6 отбора пучка, элементу 7 вывода пучка или коллиматору 8.

Коллиматор 8 фокусирует пучок с образованием входного пучка для QFN-коннектора 9. Коллиматор 8 содержит фокусирующую линзу, теплоотвод и приемную часть коннектора для волокна. Коннектор 9 соединен с коллиматором 8. Коннектор 9 прикреплен к длинному испытуемому волокну 10. Длинное испытуемое волокно 10 имеет QFN-коннектор 11, который соединяет испытуемое волокно 10 с коллиматором 12. Лазерный пучок из коллиматора 12 проходит на 1/4%-ный элемент 13 отбора пучка. Пучок от элемента 13 может проходить к измерителю 14 мощности или оптическому анализатору 15 спектра (ОАС).

Оптический рефлектометр 16 временной области (ОРВО) передает и принимает синхронизированный лазерный пучок через элемент 16 отбора, направляя к элементу отбора 5 и далее по волокну 10. Оптический рефлектометр 16 временной области также можно использовать для тестирования волокна 10 отдельно от лазера 1. Лазерный пучок из лазера 1 проходит через элемент 6 отбора к 1/4%-ному элементу 17 отбора пучка и далее на оптический анализатор 15 спектра или на измеритель 18 мощности.

В рассмотренной системе (см. рисунок 2) источник лазерного излучения должен иметь высокую мощность: от 1 до 10 кВт. Лазер может быть любого типа, но совместим по техническим параметрам с испытуемыми кабелями. Примером такого предпочтительного лазера, предназначен-

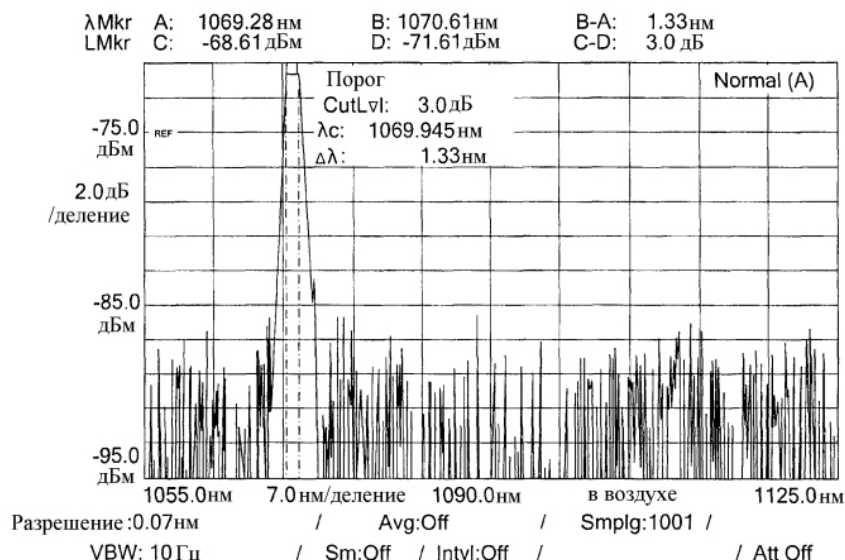


Рисунок 3. Спектр энергии лазерного излучения, передаваемой тестируемому волокну, с демонстрацией отсутствия явления вынужденного рамановского рассеяния [1]

Таблица. Результаты эксперимента

Пиковая входимая мощность, Вт	Пиковая выводимая мощность, Вт	Процент переданной мощности, %
924	452	48,9
1535	864	56,3
1563	844	54,0
1660	864	52,0
1818	970	53,3
1932	1045	54,1
2000	1100	55,0
2224	1153	51,8
2297	1216	52,9
2495	1250	50,1
2632	1329	50,5
2756	1421	51,6
3028	1592	52,6
3421	1816	53,1
3684	1987	53,9
3947	2105	53,3
4342	2263	52,1
4605	2382	51,7
4868	2487	51,1

ного для использования совместно с волоконно-оптическими кабелями для передачи электроэнергии в настоящем устройстве, является IPG 20000 YB [7] (фирмы IPG). Данный лазер состоит из 20 модулей. В результате особенности работы этих модулей происходит поддержание низких значений рамановского усиления и бриллюэновского усиления на определенных рабочих длинах волн модулей, что в итоге приводит к последующему ослаблению ВБР и ВРР в волокне.

Экспериментальное исследование предлагаемой системы

Проведем эксперимент на системе, показанной на рисунке 2. Настроим лазер IPG 20000 YB [7]

таким образом, чтобы он работал с КПД 10 % при частоте повторения импульсов 1 кГц. В этом примере рабочие условия устанавливали такими, чтобы длительность импульсов поддерживалась большей, чем постоянная времени вынужденного бриллюэновского рассеяния. Поэтому отсутствие вынужденного бриллюэновского рассеяния в эксперименте было обусловлено волокном и лазером, а не длительностью импульсов. Лазерный пучок передавали по волокну длиной 2 км при температуре около 150 °С, давлении окружающей среды и при затухании оптической мощности 0,8 дБ/км.

Испытуемый волоконно-оптический кабель в эксперименте имел сердцевину из плавленого

кварца диаметром около 500 мкм, оболочку из легированного фтором плавленого кварца, имеющую толщину 50 мкм, покрытие из акрилата толщиной около 60 мкм и защитное покрытие из нержавеющей стали с наружным диаметром около 3,175 мм и длиной около 2 км. Волокно имело числовую апертуру 0,22.

Полученные результаты приведены в таблице, где значения максимальной вводимой мощности и максимальной выводимой мощности представлены в ваттах. Спектр частот, наблюдаемый в кабеле на мощности 4868 Вт, показан на рисунке 3. Из спектра ясно видно отсутствие явления ВРР. Кроме того, линейная связь между входной и выходной мощностями подтверждает отсутствие явления ВРР. К тому же при импульсной работе лазера с изменением длины волны вследствие формирования импульса с линейной частотной модуляцией может вноситься дополнительный вклад в подавление явлений ВРР и ВРР, поскольку эффективно возрастает ширина спектральной линии лазера.

Выводы

Описанная система POF продемонстрировала, что существует возможность передавать энергию лазерного излучения большой мощности по оптическим кабелям с низкими потерями на большие расстояния с дальнейшим преобразованием в электрическую энергию и тем самым обеспечивать удаленное электроснабжение не только устройств АТС ОАО РЖД, но и иных устройств, например лазерных инструментов, таких как инструменты лазерной сварки и резки, различных буровых установок и т. п.

Литература

1. Патент РФ 2551392. Волоконно-оптический кабель для передачи энергии лазерного из-

лучения высокой мощности на большое расстояние. № 2011138270/28, заявл. 17.02.2010, опублик. 27.03.2013. Бюл. № 9.

2. Терехов А.Н. Анализ вероятности обеспечения удаленного электропитания оптических сетевых терминалов через оптоволоконный кабель // Т_Comm. 2014. № 12. С. 95–97.
3. Белоногов А.С. Электрические основы связи на железнодорожном транспорте. Самара: Изд. СамГУПС, 2012. С. 13–19.
4. Kaiser W., Maier M. Laser Handbook. North-Holland, Amsterdam. Part. E2. 1972. Vol. 2.
5. Crystal Fiber A/S (February 28th, 2006). White Paper, Towards 100 kW fiber laser system scaling up power in fiber lasers for beam combining. P. 14.
6. Muto S., Tei K., Fujioka T. Laser cutting for thick concrete by multi-pass techniques // Chinese Optics Letters. 2007. Vol. 5. P. 39–41.
7. Патент РФ 2522016. Способ и система для проходки ствола скважины с использованием лазера большой мощности. № 2011110388/03, заявл. 2009.08.19, опублик. 2014.07.10. Бюл. № 19.
8. Скляров О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. М.: ООО «Солон Р», 1999. С. 103–107.
9. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М.: Радио и связь, 2000. С. 298–299.
10. Ruffin A.B. Stimulated Brillouin scattering: an overview of measurements, system impairments, and applications // Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements, Boulder, CO, USA, 2004. P. 23–28.

Получено 07.02.2020

Белоногов Алексей Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры автоматизации, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). 443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18. Тел. +7 846 303-75-09. E-mail: abelonogov@rambler.ru

Шорохов Николай Сергеевич, к.т.н., доцент кафедры электротехники СамГУПС. 443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18. Тел. +7 846 303-75-09. E-mail: nik-shorokhov@mail.ru

REMOTE POWER SUPPLY OF OPTICAL NETWORKS, NETWORK COMMUNICATION ELEMENTS AND OTHER ELECTRICAL EQUIPMENT OF JSCO «RZD» ON POF TECHNOLOGY

Belonogov A.S., Shorokhov N.S.

Samara State Transport University, Samara, Russian Federation

E-mail: abelonogov@rambler.ru

The article describes the method and system of high power laser transmission over fiber optic for power supply of electronic devices of railway automatics, telemechanics and communications, optical networks and nodes based on Power-over-Fiber technology using special fiber optic cable and high power laser system. Use of these cables enables transmission of high power laser radiation energy over long distances, and these distances and power transmission levels were previously considered unattainable. This was achieved due to the special multi-layer structure of the cable used, as well as the absence of the frequency spectrum in the spectral characteristics of laser radiation, where the phenomena of forced Raman scattering occur. The results of the experiment are presented, which showed the possibility of transmitting a peak input laser power of 5 kW at a distance of 2 km, having received 51 % of the initial power at the system output. In addition, the cable design is expected to withstand severe atmospheric conditions.

Keywords: *Power-over-Fiber technology, high power laser transmission of energy over long distances, optical fiber, stimulated Raman scattering, Mandelstam – Brillouin stimulated scattering, stokes component, anti-Stokes component, QBH-connector, collimator, remote power supply of optical networks, nodes and other electrical devices via fiber optic cable*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.03

Belonogov Aleksey Sergeevich, Samara State Transport University Samara, 18, Perviy Bezimyanniy pereulok, Samara, 443066, Russian Federation; PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +7 846 303-75-09. E-mail: abelonogov@rambler.ru

Shorokhov Nikolay Sergeevich, Samara State Transport University Samara, 18, Perviy Bezimyanniy pereulok, Samara, 443066, Russian Federation; PhD in Technical Science, Associate Professor. Tel. +7 846 303-75-09. E-mail: nik-shorokhov@mail.ru

References

1. Patent RF. no. 2551392. Volokonno-opticheskij kabel' dlya peredachi energii lazernogo izlucheniya vysokoj moshchnosti na bol'shoe rasstoyanie [Optical fiber cable for transmission of high power laser energy over great distances]. No. 2011138270/28, decl. 17.02.2010, publ. 27.03.2013. Bul. no. 9. (In Russian).
2. Terekhov A.N. Analiz veroyatnosti obespecheniya udalennogo elektropitaniya opticheskikh setevikh terminalov cherez optovolokonnyy kabel [Probability analysis of providing remote power to optical network terminals via fiber optic cable]. *T-COMM*, 2014, no. 12, pp. 95–97. (In Russian).
3. Belonogov A.S. *Elektricheskie osnovy svyazi na zheleznodorozhnom transporte* [Electrical fundamentals of communication in railway transport: guidelines for practical exercises]. Samara: Izd. SamGUPS, 2010, pp. 13–19. (In Russian).
4. Kaiser W., Maier M. *Laser Handbook*. Noth-Holland, Amsterdam. Part. E2, 1972, vol. 2.
5. Crystal Fiber A/S (February 28th, 2006). White Paper, Towards 100 kW fiber laser system scaling up power in fiber lasers for beam combining, p. 14.
6. Muto S., Tei K., Fujioka T. Laser cutting for thick concrete by multi-pass techniques. *Chinese Optics Letters*, 2007, vol. 5, pp. 39–41.
7. Patent RF no. 2522016. *Sposob i sistema dlya prohodki stvola skvazhiny s ispol'zovaniem lazera bol'shoj moshchnosti* [Hole-making method and system using high-power laser]. No. 2011110388/03, decl. 19.08.2009, publ. 10.07.2014. Bul. no. 19. (In Russian).
8. Sklyarov O.K. *Sovremennye volokonno-opticheskie sistemy peredachi, apparatura i elementi* [Modern fiber optic transmission systems, equipment and elements]. Moscow: OOO «Solon R», 1999, pp. 103–107. (In Russian).

9. Slepov N.N. *Sovremennye tekhnologii cifrovikh optovolokonnikh setey svyazi* [Modern technology of digital fiber optic communication networks]. Moscow: Radio i svyaz, 2000, pp. 298–299. (In Russian).
10. Ruffin A.B. Stimulated Brillouin scattering: an overview of measurements, system impairments, and applications. *Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements*, Boulder, CO, USA, 2004, pp. 23–28.

Received 07.02.2020

ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

ТРУДЫ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ «МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ»

УДК 621.391.1:621.395

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СО СДВИНУТЫМИ ГИПЕРЭРЛАНГОВСКИМ И ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМИ ВХОДНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ

Тарасов В.Н.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

В данной статье представлены результаты исследований по системе массового обслуживания $HE_2/M/1$ со сдвинутыми вправо от нулевой точки гиперэрланговским и экспоненциальными входными распределениями. По определению Кендалла, система $HE_2/M/1$ с обычными распределениями относится к типу $G/M/1$, для которых в общем случае неизвестно решение для среднего времени ожидания требований в очереди. Эта же система со сдвинутыми распределениями трансформируется в систему $G/G/1$, для которой в общем случае также неизвестно решение для среднего времени ожидания. Учитывая тот факт, что, начиная с коэффициента вариации, равного четырем, распределение гипер-Эрланг имеет тяжелый хвост, рассматриваемая система может иметь активное приложение в современной теории телетрафика. Использование распределений гипер-Эрланга более высокого порядка затруднительно для вывода решения для среднего времени ожидания требований в очереди из-за нарастающей вычислительной сложности. Для гиперэрланговского закона распределения, как и гиперэкспоненциального закона, метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли дает возможность получить решение в конечном виде. В статье приведены результаты по спектральному разложению решения интегрального уравнения Линдли для системы массового обслуживания $HE_2/M/1$ со сдвинутыми распределениями, а также расчетная формула для среднего времени ожидания требований в очереди. Показано, что система $HE_2/M/1$ со сдвинутыми распределениями является системой с запаздыванием во времени и обеспечивает меньшее время ожидания по сравнению с обычной системой. Адекватность полученных результатов подтверждена корректностью использования классического метода спектрального разложения и результатами численного моделирования. Для вывода полученных результатов, а также для численных расчетов использован известный метод моментов теории вероятностей.

Ключевые слова: СМО $HE_2/M/1$ со сдвинутыми распределениями, среднее время ожидания в очереди, метод спектрального разложения, интегральное уравнение Линдли, преобразование Лапласа

Введение

Настоящая статья посвящена анализу системы массового обслуживания) СМО $HE_2/M/1$ со сдвинутыми вправо от нулевой точки гиперэрланговским и экспоненциальными входными распределениями. Система $HE_2/M/1$ с обычными распределениями рассмотрена в [1], где для нее представлены спектральное разложение решения интегрального уравнения Линдли и расчетная

формула для главной характеристики СМО – среднего времени ожидания требований в очереди. В отличие от обычной системы $HE_2/M/1$, систему со сдвинутыми распределениями обозначим $HE_2^-/M^-/1$.

Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли (ИУЛ) в теории систем массового обслуживания $G/G/1$ занимает важное место. Одна из форм интегрального уравнения Линдли выглядит так [2; 3]:

$$W(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u) dC(u), & y \geq 0, \\ 0, & y < 0. \end{cases}$$

Для записи ИУЛ, а также при рассмотрении метода спектрального разложения решения ИУЛ будем использовать стандартные обозначения [2]: через $A^*(s)$ и $B^*(s)$ обозначим преобразования Лапласа функций плотности распределения интервалов между поступлениями и времени обслуживания соответственно.

Суть решения ИУЛ методом спектрального разложения состоит в нахождении для выражения $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1$ представления в виде произведения двух множителей, которое давало бы рациональную функцию от s . Следовательно, для нахождения закона распределения времени ожидания необходимо следующее спектральное разложение: $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$, где $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ – некоторые дробно-рациональные функции от s , удовлетворяющие специальным условиям согласно [2], которые здесь опускаем.

Постановка задачи

В статье ставится задача вывода формулы для среднего времени ожидания для рассматриваемой системы со сдвинутыми распределениями $HE_2/M/1$, а также подтверждения адекватности построенной математической модели путем численного моделирования в пакете **Mathcad**. Вывод решения для среднего времени ожидания проводится методом спектрального разложения решения ИУЛ, как это показано в работах [4–7]. Близкие аппроксимативные подходы использованы в [8–11].

Решение для системы $HE_2^-/M^-/1$

В системе $HE_2^-/M^-/1$ интервалы времени между поступлениями требований заданы функцией плотности

$$a(t) = 4p\lambda_1^2(t-t_0)e^{-2\lambda_1(t-t_0)} + 4(1-p)\lambda_2^2(t-t_0)e^{-2\lambda_2(t-t_0)}, \quad (1)$$

преобразование Лапласа которой имеет вид

$$A^*(s) = \left[p \left(\frac{2\lambda_1}{s+2\lambda_1} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{s+2\lambda_2} \right)^2 \right] e^{-t_0 s}. \quad (2)$$

Время обслуживания распределено с плотностью

$$b(t) = \mu e^{-\mu(t-t_0)}, \quad (3)$$

а ее преобразование Лапласа вычисляется как:

$$B^*(s) = \left(\frac{\mu}{s+\mu} \right) e^{-t_0 s}. \quad (4)$$

В выражениях (1)–(4) $t_0 > 0$ представляет собой параметр сдвига распределений.

Тогда спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2^-/M^-/1$ $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$ примет вид

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \left[p \left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1 - s} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2 - s} \right)^2 \right] \times e^{t_0 s} \left(\frac{\mu}{\mu + s} \right) e^{-t_0 s} - 1. \quad (5)$$

В разложении (5) экспоненты с противоположными знаками обнуляются, тогда получаем спектральное разложение:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \left[p \left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1 - s} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2 - s} \right)^2 \right] \times \left(\frac{\mu}{\mu + s} \right) - 1. \quad (6)$$

Таким образом, спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2^-/M^-/1$ полностью совпадает с таким же разложением для обычной системы $HE_2/M/1$, поэтому мы в дальнейшем изложении можем воспользоваться результатами [1].

Окончательно спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2/M/1$ имеет вид [1]

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \frac{-s(s+s_1)(s-s_2)(s-s_3)(s-s_4)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(\mu+s)}. \quad (7)$$

Исследование многочлена в числителе разложения (7) и определение его корней являются основным моментом метода спектрального разложения решения ИУЛ.

Многочлен четвертой степени в числителе разложения (6)–(7)

$$s^4 + c_3 s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0 \quad (8)$$

с коэффициентами

$$\begin{aligned} c_0 &= a_1 \mu + 16\lambda_1 \lambda_2 [\lambda_1 \lambda_2 - \mu(\lambda_1 + \lambda_2)], \\ c_1 &= 4\mu(\lambda_1^2 + 4\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2) - 16\lambda_1 \lambda_2 (\lambda_1 + \lambda_2) - a_2 \mu, \\ c_2 &= 4(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + 16\lambda_1 \lambda_2 - 4\mu(\lambda_1 + \lambda_2), \\ c_3 &= \mu - 4(\lambda_1 + \lambda_2) \end{aligned}$$

в случае стабильной системы имеет один действительный отрицательный корень $-s_1$ и три положительных корня s_2, s_3, s_4 (либо вместо последних один действительный положительный и два комплексно сопряженных с положитель-

ной вещественной частью). Эти коэффициенты сформированы с помощью символьных операций Mathcad и выражаются через параметры распределений (1) и (3), которые предстоит еще определить.

Рациональные функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ будем строить по правилам метода спектрального разложения: $\psi_+(s) = s(s+s_1)/(\mu+s)$, так как нули многочлена (6) $s=0$, $s=-s_1$ и полюс $s=-\mu$ лежат в области $\text{Re}(s) \leq 0$, а функция

$$\psi_-(s) = -\frac{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2}{(s-s_2)(s-s_3)(s-s_4)},$$

так как ее нули и полюсы лежат в области $\text{Re}(s) > D$, как того требует метод спектрального разложения.

Далее по методике спектрального разложения найдем константу K :

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s+s_1}{s+\mu} = \frac{s_1}{\mu},$$

где s_1 – абсолютное значение отрицательного корня $-s_1$. Постоянная K определяет вероятность того, что поступающее в систему требование застает ее свободной.

Для нахождения преобразования Лапласа функции плотности времени ожидания построим функцию

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)} = \frac{s_1(s+\mu)}{s\mu(s+s_1)}.$$

Отсюда преобразование Лапласа функции плотности времени ожидания $W^*(s) = s \cdot \Phi_+(s)$ будет

$$W^*(s) = \frac{s_1(s+\mu)}{\mu(s+s_1)}. \quad (9)$$

Для вычисления среднего времени ожидания найдем производную от функции $W^*(s)$ со знаком минус в точке $s=0$:

$$-\left. \frac{dW^*(s)}{ds} \right|_{s=0} = \frac{1}{s_1} - \frac{1}{\mu}.$$

Окончательно среднее время ожидания для системы $\text{HE}_2^-/\text{M}^-/1$:

$$\bar{W} = 1/s_1 - 1/\mu. \quad (10)$$

Выражение (9) для преобразования Лапласа функции плотности времени ожидания позволяет определить также моменты высших порядков времени ожидания, а именно: вторая производная от преобразования (9) в точке $s=0$ дает второй начальный момент времени ожидания, что позволяет определить дисперсию времени ожидания. В стандарте [12] джиттер (дрожание задержки)

в телекоммуникациях определен как колебание времени ожидания вокруг его среднего значения. Тогда джиттер можно определить через дисперсию времени ожидания. При анализе трафика, чувствительного к задержкам, это будет важным подспорьем.

Для использования формулы (10) при расчетах необходимо знать числовые характеристики распределения (1) и (3). Через числовые характеристики будем определять неизвестные параметры распределений (1) и (3) методом моментов. Для этого воспользуемся основным свойством преобразований Лапласа (2) и (4) воспроизведения моментов и запишем первые два первых начальных момента для распределения (1):

$$\bar{\tau}_\lambda = \frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2} + t_0, \quad (11)$$

$$\bar{\tau}_\lambda^2 = t_0^2 + 2t_0\left[\frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}\right] + \frac{3p}{2\lambda_1^2} + \frac{3(1-p)}{2\lambda_2^2}.$$

Отсюда определим квадрат коэффициента вариации интервалов поступления:

$$c_\lambda^2 = \frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2) + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[\lambda_1 - p(\lambda_1 - \lambda_2) + t_0\lambda_1\lambda_2]^2}. \quad (12)$$

Для распределения (3) эти же моменты равны

$$\bar{\tau}_\mu = \mu^{-1} + t_0. \quad (13)$$

Второй начальный момент времени обслуживания выглядит как

$$\bar{\tau}_\mu^2 = t_0^2 + \frac{2t_0}{\mu} + \frac{2}{\mu^2}. \quad (14)$$

Отсюда коэффициент вариации времени обслуживания будет равен

$$c_\mu = (1 + \mu t_0)^{-1}. \quad (15)$$

Рассматривая равенства (11)–(15) как форму записи метода моментов, найдем неизвестные параметры распределений (1) и (3) λ_1 , λ_2 , p , μ , t_0 . Теперь, исходя из вида первого уравнения (11), положим

$$\lambda_1 = 2p/(\bar{\tau}_\lambda - t_0), \quad \lambda_2 = 2(1-p)/(\bar{\tau}_\lambda - t_0) \quad (16)$$

и потребуем выполнения условия (12). Подставив (16) в (12), решаем полученное уравнение четвертой степени относительно параметра p с учетом условия $0 < p < 1$ и выбираем нужное решение:

$$p = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{3(\bar{\tau}_\lambda - t_0)^2}{8[(\bar{\tau}_\lambda - t_0)^2 + c_\lambda^2 \bar{\tau}_\lambda^2]}}$$

а затем определяем из (16) параметры λ_1 и λ_2 .

Определим параметры распределения (3) из уравнений моментов (13)–(15). Из (13) получим значение $t_0 = \bar{\tau}_\mu - \mu^{-1}$ и, подставив его в (15), найдем параметр распределения (3) $\mu = 1/c_\mu \bar{\tau}_\mu$.

Таблица. Результаты экспериментов для СМО $HE_2^-/M^-/1$ и $HE_2/M/1$

Входные параметры		Среднее время ожидания			
ρ	$c_\lambda \backslash c_\mu$	для $HE_2^-/M^-/1$			для $HE_2/M/1$
		$c_\mu = 0,1$ $t_0 = 0,9$	$c_\mu = 0,5$ $t_0 = 0,5$	$c_\mu = 0,99$ $t_0 = 0,01$	
0,1	0,71	0,000	0,005	0,029	0,03
	2	0,000	0,013	0,078	0,08
	4	0,000	0,016	0,094	0,10
	8	0,000	0,017	0,099	0,11
0,5	0,71	0,005	0,181	0,610	0,62
	2	0,008	0,458	1,966	2,00
	4	0,009	0,599	4,503	4,62
	8	0,009	0,655	9,706	10,15
0,9	0,71	0,344	2,956	6,516	6,61
	2	0,805	16,002	22,465	22,59
	4	1,102	60,607	77,044	77,28
	8	1,260	238,99	295,29	295,96

Параметр сдвига будет связан с параметрами обслуживания условием

$$t_0 = \bar{\tau}_\mu(1 - c_\mu). \quad (17)$$

Выражение (17) будет определять диапазон изменения параметра сдвига $t_0 \in (0, 1)$.

Тогда алгоритм расчета среднего времени ожидания в очереди для системы $HE_2^-/M^-/1$ сведется к следующим этапам.

1. Задавая значения $\bar{\tau}_\lambda$, $\bar{\tau}_\mu$, c_λ , c_μ , t_0 в качестве входных параметров системы, определяем методом моментов все неизвестные параметры распределений (1) и (3).

2. Находим нужный корень $-s_1$ уравнения (8) и используем расчетную формулу (10).

Аналогичную аппроксимацию законов распределений с использованием начальных моментов можно увидеть в [7; 8].

Теперь рассмотрим влияние параметра сдвига на коэффициенты вариаций распределений. Для обычного распределения HE_2 , как следует из выражения (12), при $t_0 = 0$:

$$c_\lambda^2 = \frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2) + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[\lambda_1 - p(\lambda_1 - \lambda_2)]^2}.$$

Сравнивая последнее выражение с (12), убеждаемся, что параметр сдвига во времени $t_0 > 0$ уменьшает коэффициент вариации интервалов поступлений в $1 + \frac{t_0\lambda_1\lambda_2}{[\lambda_1(1-p) + \lambda_2p]}$ раз. Аналогично для экспоненциального закона времени обслуживания параметр сдвига уменьшает коэффициент вариации времени обслуживания в $1 + \mu t_0$ раз. Учитывая квадратичную зависимость среднего времени ожидания от коэффициентов

вариаций интервалов поступлений и времени обслуживания, убеждаемся в том, что введение параметра сдвига в законы распределения (1) и (3) уменьшает среднее время ожидания в очереди в СМО.

Результаты численного моделирования

В таблице приведены данные расчетов среднего времени ожидания для систем $HE_2^-/M^-/1$ и $HE_2/M/1$ для случаев малой, средней и высокой нагрузки $\rho = 0,1; 0,5; 0,9$.

Коэффициент загрузки ρ определяется отношением средних интервалов $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda$. Результаты, приведенные в таблице, получены для нормированного времени обслуживания $\bar{\tau}_\mu = 1$.

Данные таблицы подтверждают сделанные выше предположения о среднем времени ожидания в системе с запаздыванием. Кроме того, с уменьшением параметра сдвига t_0 среднее время ожидания в системе с запаздыванием стремится к значению этого времени в обычной системе, что дополнительно подтверждает адекватность полученных результатов. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными [13] в той области изменения параметров, где применимы данные рассматриваемой системы.

Заключение

В работе получено спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2^-/M^-/1$, а через нее выведена расчетная формула для среднего времени ожидания требований в очереди для этой системы. Эта формула дополняет известную незавершенную формулу теории массового об-

служивания для среднего времени ожидания для систем типа $G/G/1$.

Результаты вычислительных экспериментов подтверждают, что новая система $HE_2/M/1$ обеспечивает намного меньшее время ожидания в очереди, чем обычная система $HE_2/M/1$, за счет введения в законы распределения параметра сдвига $t_0 \in (0, 1)$.

Известно, что среднее время ожидания требований в очереди является главной характеристикой СМО, так как остальные характеристики: средняя задержка, средняя длина очереди, среднее количество требований в системе и др. – определяются через среднее время ожидания. Адекватность полученных результатов обеспечена корректным использованием классического метода спектрального разложения, а проведенные вычислительные эксперименты только подтверждают данный факт.

Литература

1. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Када О. Математическая модель телетрафика на основе системы $HE_2/M/1$ // Информационные технологии. 2019. Т. 25. № 4. С. 205–210. DOI: 10.17587/it.25.205-210.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
3. Brannstrom N. A Queueing Theory analysis of wireless radio systems. Applied to HS-DSCH. Lulea University of Technology, 2004. 79 p.
4. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Липилина Л.В. Математическая модель телетрафика на основе системы $G/M/1$ и результаты вычислительных экспериментов // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 2. С. 121–126.
5. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Способы аппроксимации входных распределений для системы $G/G/1$ и анализ полученных результатов // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 3. С. 182–185.
6. Тарасов В.Н., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А. Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 2. С. 40–44.
7. Тарасов В.Н. Вероятностное компьютерное моделирование сложных систем. Самара: СНЦ РАН, 2002. 194 с.
8. Myskja A. An improved heuristic approximation for the $GI/GI/1$ queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. 1991. P. 683–688.
9. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research. 1982. Vol. 30. № 1. P. 125–147.
10. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
11. Алиев Т.И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 88–93.
12. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393> (дата обращения: 26.02.2016).
13. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Обобщенная двумерная диффузионная модель массового обслуживания типа $GI/G/1$ // Телекоммуникации. 2009. № 7. С. 2–8.
14. Тарасов В.Н., Малахов С.В., Карташевский И.В. Теоретическое и экспериментальное – исследование задержки в программно-конфигурируемых сетях // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13. № 4. С. 409–413.

Получено 04.10.2019

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

RESEARCH OF SYSTEM WITH SHIFTED HYPER-ERLANG AND EXPONENTIAL INPUT DISTRIBUTIONS

Tarasov V.N.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

This article presents the results of studies on the $HE_2/M/1$ queuing system with hyper-Erlang and exponential input distributions shifted to the right from the zero point. By Kendall's definition, the $HE_2/M/1$ system with conventional distributions is of type $G/M/1$, for which, in general the solution

for the average queue waiting time is not known. The same system with shifted distributions is transformed into the G/G/1 system, for which, in the general case, the solution for the average waiting time is also unknown. Considering the fact that, starting with a coefficient of variation equal to four, the distribution of hyper-Erlang has a heavy tail, the system in question can have an active application in the modern theory of teletraffic. Using higher-order hyper-Erlang distributions is difficult to derive a solution for the average waiting time of requests in a queue due to increasing computational complexity. For the hyper-Erlangian distribution law, as well as the hyperexponential law, the spectral decomposition method for solving the Lindley integral equation makes it possible to obtain a final solution. The article presents the results on the spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation for the queuing system $HE_2/M/1$ with shifted distributions, as well as the calculation formula for the average waiting time for claims in the queue. It is shown that the $HE_2/M/1$ system with shifted distributions is a system with a time lag and provides a shorter waiting time compared to a conventional system. The adequacy of the results is confirmed by the correct use of the classical method of spectral decomposition and the results of numerical simulation. To derive the obtained results, as well as for numerical calculations, the well-known method of moments of probability theory is used.

Keywords: *QS $HE_2/M/1$ with shifted distributions, average waiting time in the queue, the method of spectral decomposition, the Lindley integral equation, the Laplace transform*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.04

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Software and Management in technical Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

References

1. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Kada O. Matematicheskaya model' teletrafika na osnove sistemy $HE_2/M/1$ [The mathematical model of teletraffik based on the $HE_2/M/1$ system]. *Informacionnye tehnologii*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 205–210. DOI: 10.17587/it.25.205-210. (In Russian).
2. Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing Theory]. Moscow: Mashinostroeinie Publ., 1979, 432 p. (In Russian).
3. Brannstrom N. *A Queueing Theory Analysis of Wireless Radio Systems. Applied to HS-DSCH*. Lulea University of Technology, 2004. 79 p.
4. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Lipilina L.V. Matematicheskaya model' teletrafika na osnove sistemy G/M/1 i rezul'taty vychislitel'nyh eksperimentov [Mathematical model of teletraffic on the based G/M/1 system and results of computational experiment]. *Informacionnye tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 121–126. (In Russian).
5. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V. Sposoby approksimacii vhodnyh raspredelenij dlya sistemy G/G/1 i analiz poluchennyh rezul'tatov [Methods for approximating input distributions for the G/G/1 system and analysis of the results]. *Sistemy upravleniya i informatsionniye tehnologii*, 2015, no. 3, pp. 182–185. (In Russian).
6. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. Vosstanovlenie momentnyh harakteristik raspredeleniya intervalov vremeni mezhdru paketami vkhodyaschego trafika [Restoring moment distribution characteristics interval between packets of incoming traffic]. *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 40–44. (In Russian).
7. Tarasov V.N. *Veroyatnostnoe komp'yuternoe modelirovanie slozhnyh sistem* [Probabilistic Computer Modeling of Complex Systems]. Samara: SNC RAN Publ., 2002, 194 p. (In Russian).
8. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13*, 1991, pp. 683–688.
9. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, 1982, vol. 30, no. 1, pp. 125–147.

10. Aliev T.I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh system* [Fundamentals of Modeling Discrete Systems]. SPb.: SPbGU ITMO, 2009, 363 p. (In Russian).
11. Aliev T.I. *Approksimatsiya veroyatnostnykh raspredelenij v modelyakh massovogo obsluzhivaniya* [Approximation of probability distributions in queuing models]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 88–93. (In Russian).
12. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393> (accessed: 26.02.2016).
13. Tarasov V.N., Bahareva N.F. *Obobshchennaya dvumernaya diffuzionnaya model' massovogo obsluzhivaniya tipa GI/G/1* [Generalized two-dimensional diffusion queuing model type GI/G/1]. *Telekommunikacii*, 2009, no. 7, pp. 2–8. (In Russian).
14. Tarasov V.N., Malakhov S.V., Kartashevskiy I.V. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie zaderzhki v programmno-konfiguriruemyyh setyah* [Theoretical and experimental study of delay in software-configured networks]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2015, no. 4, pp. 409–413. (In Russian).

Received 04.10.2019

УДК 621.391.1:621.395

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ $M/E_2/1$ С ОБЫЧНЫМИ И СДВИНУТЫМИ ВХОДНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Ахметшина Э.Г.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: tarasov-vn@psuti.ru, nadin1956_04@inbox.ru, elyamalusha@mail.ru*

В статье представлены результаты по двум системам массового обслуживания: для обычной системы $M/E_2/1$ с экспоненциальным и эрланговским распределениями, а также этой системы со сдвинутыми вправо от нулевой точки распределениями. Операция сдвига законов распределений в данном случае трансформирует систему $M/G/1$ в систему типа $G/G/1$ вследствие уменьшения коэффициента вариации интервалов входного потока в систему. Как оказалось, для рассматриваемых законов распределений используемый метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли для систем $G/G/1$ позволяет получить решение для среднего времени ожидания в конечном виде. Показано, что в такой системе с запаздыванием во времени среднее время ожидания требований в очереди может быть во много раз меньше, чем в аналогичной обычной системе. Это следует из того, что операция сдвига во времени законов распределений уменьшает величину коэффициентов вариаций интервалов между поступлениями и времени обслуживания. В то же время известно, что среднее время ожидания требований в очереди к системе зависит прямо пропорционально от квадратов этих коэффициентов вариаций. Система $M/E_2/1$ применима только при коэффициенте вариации интервалов поступления, равном единице и, коэффициенте вариации времени обслуживания, равном $1/\sqrt{2}$, а система с запаздыванием применима при коэффициентах вариаций интервалов поступления в диапазоне $(0, 1)$ и коэффициентах вариаций времени обслуживания из интервала $(0, 1/\sqrt{2})$, что резко расширяет область применения этих систем. Для вывода решений по среднему времени ожидания в очереди использован метод спектрального разложения.

Ключевые слова: *системы массового обслуживания $M/E_2/1$, $M^-/E_2^-/1$, среднее время ожидания в очереди, метод спектрального разложения, интегральное уравнение Линдли, преобразование Лапласа*

Введение

Статья посвящена исследованию двух систем массового обслуживания (СМО) $M/E_2/1$ с обычными и сдвинутыми вправо экспоненциальными и эрланговскими входными распределениями. Первая система относится к типу $M/G/1$, а вторая – $G/G/1$. В теории массового обслуживания исследования систем $G/G/1$ актуальны до сих пор в связи с тем, что нельзя получить решения для среднего времени ожидания в очереди в конечном виде в общем случае.

В работе авторов [1] впервые приведены результаты по исследованию системы $M/M/1$ с запаздыванием во времени со сдвинутыми экспоненциальными входными распределениями. В [1] показано, что среднее время ожидания требования в очереди в системе с запаздыванием во времени меньше, чем в классической системе $M/M/1$ при одинаковом коэффициенте загрузки за счет того, что коэффициенты вариации времен поступления c_λ и обслуживания c_μ становятся меньше единицы при параметре запаздывания

$t_0 > 0$. В [2] идеи статьи [1] перенесены на системы $H_2/H_2/1$, $H_2/M/1$ и $M/H_2/1$.

Результаты работ [1; 2] совместно с классической теорией массового обслуживания [3] позволяют расширить теорию метода спектрального разложения (МСР) решения интегрального уравнения Линдли (ИУЛ) также на сдвинутое распределение Эрланга.

При решении задачи методом спектрального разложения будем использовать стандартную символику оригинала [3], в которой для преобразований Лапласа функций плотностей распределений интервалов между поступающими в систему требованиями и времени обслуживания введены обозначения $A^*(s)$ и $B^*(s)$. Метод спектрального разложения состоит в преобразовании ключевого выражения $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1$ к произведению некоторых двух множителей в виде дробно-рациональных функций. Для определенности это произведение представим в виде $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$, где рациональные функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ являются компонентами метода спектрального разложения. Конструирование этих компонент $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ является важной частью МСР, и они должны удовлетворять специальным условиям.

Система $M/E_2/1$ и вывод решения для среднего времени ожидания

Для системы $M/E_2/1$ законы распределения интервалов входного потока и времени обслуживания задаются функциями плотности вида

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

$$b(t) = 4\mu^2 t e^{-2\mu t}. \quad (2)$$

При таком виде функции (2) решения для среднего времени ожидания для системы $M/E_2/1$ в теории массового обслуживания [3; 4; 8; 9] авторами не найдено, и поэтому это решение находим методом спектрального разложения решения ИУЛ, как это показано в [1; 2; 6; 11–13]. Такой подход позволяет определить не только среднее время ожидания, но и моменты высших порядков времени ожидания. Учитывая тот факт, что понятие «дрожание задержки» в стандарте [7] определено как разброс времени ожидания от его среднего значения \bar{W} , дрожание задержки можно определить через дисперсию.

Преобразования Лапласа функций (1) и (2) соответственно имеют вид

$$A^*(s) = \frac{\lambda}{\lambda + s}; \quad B^*(s) = \left(\frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2.$$

В связи с тем что система $M/E_2/1$ относится к классу систем $M/G/1$, воспользуемся результатом

для данной системы. Среднее время ожидания в системе $M/G/1$ дается формулой Полячека – Хинчина [3]:

$$\bar{W} = \frac{\lambda \overline{\tau_\mu^2}}{2(1-\rho)}, \quad (3)$$

где λ – интенсивность входного потока; $\overline{\tau_\mu^2}$ – второй начальный момент времени обслуживания; ρ – коэффициент загрузки $0 < \rho < 1$. Для распределения Эрланга второго порядка E_2 второй начальный момент времени обслуживания $\overline{\tau_\mu^2} = 3 / (2\mu^2)$, тогда среднее время ожидания в системе $M/E_2/1$ окончательно равно

$$\bar{W} = \frac{3\rho}{4\mu(1-\rho)}. \quad (4)$$

Результатом (4) мы воспользуемся при исследовании системы со сдвинутыми распределениями, которую обозначим как $M^-/E_2^-/1$.

Система $M^-/E_2^-/1$ и вывод решения для среднего времени ожидания

Для системы $M^-/E_2^-/1$ функциями плотностей распределений интервалов будут сдвинутые вправо от нулевой точки распределения:

– для входного потока

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda(t-t_0)}, \quad (5)$$

– для времени обслуживания

$$b(t) = 4\mu^2 (t-t_0) e^{-2\mu(t-t_0)}. \quad (6)$$

Для вывода решения по среднему времени ожидания для данной системы используем классический метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли (ИУЛ).

Преобразование Лапласа функции (5) есть функция

$$A^*(s) = \frac{\lambda}{\lambda + s} e^{-t_0 s},$$

а для функции (6):

$$B^*(s) = \left(\frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2 e^{-t_0 s}.$$

Тогда спектральное разложение: $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$ для рассматриваемой системы примет вид

$$\begin{aligned} A^*(-s) \times B^*(s) - 1 &= \frac{\lambda}{\lambda - s} e^{t_0 s} \left(\frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2 e^{-t_0 s} - 1 = \\ &= \frac{\lambda}{\lambda - s} \times \left(\frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2 - 1 = \\ &= \frac{s \left[s^2 + (4\mu - \lambda)s + 4\mu(\mu - \lambda) \right]}{(\lambda - s)(2\mu + s)^2}. \end{aligned}$$

Показатели степени у экспонент с противоположными знаками здесь обнуляются, и эффект от операции сдвига исчезает.

Квадратный трехчлен в числителе последнего выражения $s^2 + (4\mu - \lambda)s + 4(\mu^2 - \lambda\mu)$, где $4\mu(\mu - \lambda) > 0$ и $(4\mu - \lambda) > 0$ при $\mu > \lambda$ в случае стабильной системы, имеет два действительных отрицательных корня $-s_1, -s_2$:

$$\begin{aligned} -s_1 &= -(4\mu - \lambda) / 2 + \sqrt{[(4\mu - \lambda) / 2]^2 - 4\mu(\mu - \lambda)}, \\ -s_2 &= -(4\mu - \lambda) / 2 - \sqrt{[(4\mu - \lambda) / 2]^2 - 4\mu(\mu - \lambda)}. \end{aligned}$$

Тогда мы приходим к окончательному виду спектрального разложения:

$$A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \frac{\Psi_+(s)}{\Psi_-(s)} = \frac{s(s + s_1)(s + s_2)}{(\lambda - s)(2\mu + s)^2}.$$

Исходя из правил построения функций $\Psi_+(s)$ и $\Psi_-(s)$, строим их в виде

$$\Psi_+(s) = \frac{s(s + s_1)(s + s_2)}{(2\mu + s)^2}, \quad \Psi_-(s) = \lambda - s.$$

Далее по методике спектрального разложения находим константу:

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Psi_+(s)}{s} = \frac{s_1 s_2}{4\mu^2} = \frac{4\mu(\mu - \lambda)}{4\mu^2} = 1 - \rho,$$

которая представляет вероятность того, что очередное поступающее в систему требование заставит ее свободной. Теперь построим функцию

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\Psi_+(s)} = \frac{(1 - \rho)(2\mu + s)^2}{s(s + s_1)(s + s_2)},$$

через которую получим преобразование Лапласа функции плотности времени ожидания в системе $M^-/E_2^-/1$:

$$W^*(s) = s^* \Phi_+(s) = \frac{(1 - \rho)(2\mu + s)^2}{(s + s_1)(s + s_2)}. \quad (7)$$

В [3] приведено уравнение Полячека – Хинчина для преобразования Лапласа функции плотности времени ожидания для системы $M/G/1$:

$$W^*(s) = \frac{s(1 - \rho)}{s - \lambda + \lambda B^*(s)}, \quad (8)$$

где $B^*(s)$ – преобразование Лапласа функции плотности времени обслуживания. Теперь предстоит доказать тождественность выражений (7) и (8). В нашем случае $B^*(s) = 4\mu^2 / (s + 2\mu)^2$ и после подстановки этой функции в (8) получим:

$$\begin{aligned} W^*(s) &= \frac{s(1 - \rho)}{s - \lambda + \lambda[2\mu / (2\mu + s)]^2} = \\ &= \frac{s(1 - \rho)(2\mu + s)^2}{(s - \lambda)(2\mu + s)^2 + 4\lambda\mu^2} = \frac{(1 - \rho)(2\mu + s)^2}{(s + s_1)(s + s_2)}, \end{aligned}$$

так как знаменатель раскладывается на множители вида

$$\begin{aligned} (s - \lambda)(2\mu + s)^2 + 4\lambda\mu^2 &= \\ -s[s^2 - (4\mu - \lambda)s + 4\mu(\mu - \lambda)] &= \\ = s(s + s_1)(s + s_2). \end{aligned}$$

Следовательно, равенства (7) и (8) тождественны. Далее необходимо определить числовые характеристики сдвинутых распределений (5), (6). Они нужны, в свою очередь, для определения неизвестных параметров распределений (5), (6) по методу моментов.

Определение числовых характеристик распределений M^- и E_2^-

Числовые характеристики сдвинутого экспоненциального распределения M^- приведены в [1]. Средний интервал поступлений равен

$$\bar{\tau}_\lambda = \lambda^{-1} + t_0. \quad (9)$$

Коэффициент вариации интервалов поступлений выглядит как

$$c_\lambda = (1 + \lambda t_0)^{-1}. \quad (10)$$

Для определения числовых характеристик сдвинутого распределения Эрланга E_2^- воспользуемся свойством преобразования Лапласа функции плотности воспроизводить моменты:

$$\begin{aligned} -\left. \frac{dB^*(s)}{ds} \right|_{s=0} &= -\left. \frac{d}{ds} \left[\left(\frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2 e^{-t_0 s} \right] \right|_{s=0} = \\ &= \left[\frac{8\mu^2}{(2\mu + s)^3} e^{-t_0 s} + \left(\frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2 t_0 e^{-t_0 s} \right]_{s=0} = 1/\mu + t_0. \end{aligned}$$

Отсюда среднее время обслуживания требований:

$$\bar{\tau}_\mu = \mu^{-1} + t_0. \quad (11)$$

Найдя вторую производную от преобразования Лапласа функции (8) при $s = 0$, определяем второй начальный момент интервала между поступлениями:

$$\left. \frac{d^2 B^*(s)}{ds^2} \right|_{s=0} = \frac{3}{2\mu^2} + 2\frac{t_0}{\mu} + t_0^2.$$

Отсюда определим коэффициент вариации времени обслуживания:

$$c_\mu = \left[\sqrt{2} (1 + \mu t_0) \right]^{-1}. \quad (12)$$

Теперь оценим влияние параметра сдвига t_0 на числовые характеристики рассматриваемых распределений. Для интервалов поступлений по закону M^- коэффициент вариации c_λ уменьшается при сдвиге в $(1 + \lambda t_0)$ раз по сравнению с коэффициентом $c_\lambda = 1$ для распределения M .

Таблица. Результаты экспериментов для СМО $M/E_2/1$ и $M^-/E_2^-/1$

Входные параметры				Среднее время ожидания	
ρ	c_λ	c_μ	t_0	Для $M^-/E_2^-/1$	Для $M/E_2/1$
0,1	0,643	0,071	0,9	0,001	0,083
	0,950	0,354	0,5	0,021	
	0,990	0,636	0,1	0,068	
	0,999	0,700	0,01	0,082	
0,5	0,550	0,071	0,9	0,008	0,75
	0,750	0,354	0,5	0,188	
	0,950	0,636	0,1	0,608	
	0,995	0,700	0,01	0,735	
0,9	0,190	0,071	0,9	0,068	6,75
	0,550	0,354	0,5	1,688	
	0,910	0,636	0,1	5,468	
	0,991	0,700	0,01	6,616	

Коэффициент вариации времени обслуживания для распределения E_2^- : c_μ уменьшается при сдвиге в $(1 + \mu t_0)$ раз по сравнению с коэффициентом $c_\mu = 1/\sqrt{2}$ для распределения E_2 .

Учитывая, что среднее время ожидания в системе $G/G/1$ связано с коэффициентами вариаций времени между поступлениями требований и времени обслуживания квадратичной зависимостью, в системе с запаздыванием время ожидания будет меньше, чем в обычной системе.

Таким образом, для определения среднего времени ожидания мы можем использовать формулу (4) с параметрами $\rho = \bar{c}_\mu / \bar{c}_\lambda$, где \bar{c}_λ и \bar{c}_μ определены (9) и (11), а μ рассчитываем из (11) при заданных \bar{c}_μ , \bar{c}_λ и параметре сдвига t_0 . В качестве входных параметров для расчета системы $M^-/E_2^-/1$ удобнее брать \bar{c}_λ , \bar{c}_μ , c_λ , c_μ и t_0 . Диапазоны изменения коэффициентов вариаций определяются, соответственно, выражениями (10) и (12): $c_\lambda \in (0,1)$, а $c_\mu \in (0, 1/\sqrt{2})$ в зависимости от величины параметра сдвига $t_0 > 0$.

В таблице приведены расчеты для системы $M^-/E_2^-/1$ при малой, средней и высокой нагрузках $\rho = 0,1; 0,5; 0,9$.

При этих коэффициентах загрузки значения параметра сдвига $t_0 = 0,01; 0,1; 0,5$ и $0,9$ обеспечивают определенные значения коэффициентов вариаций входного потока c_λ и времени обслуживания c_μ согласно равенствам (10) и (12). С уменьшением параметра сдвига t_0 среднее время ожидания в системе $M^-/E_2^-/1$ стремится к значению среднего времени ожидания в обычной системе $M/E_2/1$. Как и следовало ожидать, уменьшение коэффициентов вариации c_λ и c_μ влечет за собой сокращение времени ожидания.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Введение операции сдвига во времени в законы распределения, описывающие работу СМО, приводит к увеличению загрузки системы с запаздыванием. Для системы $M^-/E_2^-/1$ с запаздыванием загрузка увеличивается в $(1 + \mu t_0) / (1 + \lambda t_0)$ раз по сравнению с обычной системой $M/E_2/1$.

2. Однако операция сдвига уменьшает коэффициенты вариаций случайного интервала между поступлениями и времени обслуживания требований. В связи с тем что среднее время ожидания в системе $G/G/1$ зависит от квадратов этих коэффициентов вариаций, среднее время ожидания в очереди к системе с запаздыванием будет меньше, чем в обычной системе при одной и той же нагрузке. Например, для системы $M^-/E_2^-/1$ при нагрузке $\rho = 0,9$ и параметре сдвига $t_0 = 0,9$ коэффициент вариации интервалов поступления c_λ уменьшается с 1 для обычной системы до 0,19 для системы с запаздыванием, коэффициент вариации времени обслуживания c_μ снижается с $1/\sqrt{2}$ до 0,071, а время ожидания сокращается с 6,75 единицы времени для обычной системы до 0,19 единицы.

3. Изложенные результаты справедливы только для одинаковых параметров сдвига t_0 для распределения интервалов между поступлениями требований и времени обслуживания.

Литература

1. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Блатов И.А. Анализ и расчет системы массового обслуживания с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 2015. № 11. С. 51–59. DOI: 10.1134/S0005117915110041.
2. Тарасов В.Н. Расширение класса систем массового обслуживания с запаздыванием // Автоматика и телемеханика. 2018. № 12. С. 57–70. DOI: 10.1134/S0005117918120056.
3. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
4. Brannstrom N. A Queueing Theory analysis of wireless radio systems. Applied to HS-DSSS. Lulea University of Technology, 2004. 79 p.
5. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393> (дата обращения: 26.02.2016).
6. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Липилина Л.В. Математическая модель телетрафика на ос-

- нове системы G/M/1 и результаты вычислительных экспериментов // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 2. С. 121–126.
7. Алиев Т.И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 88–93.
 8. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. 1991. P. 683–688.
 9. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research. 1982. Vol. 30. № 1. P. 125–147.
 10. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates // Queueing Systems. 2018. Vol. 89. № 3. P. 269–301.
 11. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Способы аппроксимации входных распределений для системы G/G/1 и анализ полученных результатов // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 3. С. 182–185.
 12. Тарасов В.Н., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А. Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 2. С. 40–44.
 13. Тарасов В.Н., Малахов С.В., Карташевский И.В. Теоретическое и экспериментальное – исследование задержки в программно-конфигурируемых сетях // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13. № 4. С. 409–413.
 14. Тарасов В.Н. Вероятностное компьютерное моделирование сложных систем. Самара: СНЦ РАН, 2002. 194 с.

Получено 15.01.2020

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Бахарева Надежда Федоровна, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-31. E-mail: bakhareva-nf@psuti.ru

Ахметшина Элеонора Газинуровна, ассистент кафедры программного обеспечения и управления в технических системах ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: elyamalusha@mail.ru

RESEARCH OF TWO QUEUING SYSTEMS M/E₂/1 WITH ORDINARY AND SHIFTED INPUT DISTRIBUTIONS

Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Akhmetshina E.G.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: tarasov-vn@psuti.ru, nadin1956_04@inbox.ru, elyamalusha@mail.ru*

Teletraffic theory often uses queuing systems like M/G/1 and G/G/1. Studies of the latter are still relevant due to the fact that it is impossible to obtain solutions for the average waiting time in the queue in the final form in the general case. This article presents the results for two queuing systems: for a regular M/E₂/1 system with exponential and Erlangian distributions, as well as this system with distributions shifted to the right from the zero point. The operation of shifting the laws of distributions in this case transforms the M/G/1 system into a G/G/1 type system due to a decrease in the coefficient of variation of the intervals of the input flow into the system. As it turned out, for the distribution laws under consideration, the spectral decomposition method used for solving the Lindley integral equation for G/G/1 systems allows us to obtain a solution for the average waiting time in the final form. It is shown that in such a system with a delay in time, the average waiting time for requests in the queue can be many times shorter than in a similar conventional system. This follows from the fact that the time-shift operation of the distribution laws reduces the coefficient of variation of the intervals between arrivals and service time. At the same time, it is known that the average waiting time for re-

requirements in the queue for the system depends directly on the squares of these variation coefficients. The $M/E_2/1$ system is applicable only when the coefficient of variation of the intervals of arrival equal to 1 and the coefficient of variation of the service time is equal to $1/\sqrt{2}$, and the system with delay is applicable when the coefficients of variation of the intervals of arrival in the range $(0, 1)$ and the coefficients of variation of the time of service from the interval $(0, 1/\sqrt{2})$, which dramatically expands the scope of these systems. To derive solutions by the average waiting time in the queue, the spectral decomposition method of solving the Lindley integral equation, known in queuing theory, was used.

Keywords: $QS M/E_2/1$, $M^-/E_2^-/1$, the average waiting time, the method of spectral decomposition, Lindley integral equation, Laplace transform

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.05

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Software and Management in technical Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Bakhareva Nadezhda Fedorovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Informatics and Computer Technics Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 339-11-31. E-mail: bakhareva-nf@psuti.ru

Akhmetshina Eleonora Gazinurovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Assistant of Software and Management in technical Systems Department. Tel. +7 846 228-00-13. E-mail: elyamalusha@mail.ru

References

1. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Blatov I.A. Analiz i raschet sistemy massovogo obsluzhivaniya s zapazdyvaniem [Analysis and calculation of queuing system with delay]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2015, no. 11, pp. 1945–1951. DOI: 10.1134/S0005117915110041. (In Russian).
2. Tarasov V.N. Rasshirenie klassa sistem massovogo obsluzhivaniya s zapazdyvaniem [Extension of the class of queueing systems with delay]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2018, vol. 79, no. 12, pp. 2147–2157. DOI: 10.1134/S0005117918120056. (In Russian).
3. Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing Theory]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, 432 p. (In Russian).
4. Brannstrom N. *A Queueing Theory Analysis of Wireless Radio Systems. Applied to HS-DSCH*. Lulea University of Technology, 2004. 79 p.
5. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393> (accessed: 26.02.2016).
6. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Lipilina L.V. Matematicheskaya model' teletrafika na osnove sistemy G/M/1 i rezul'taty vychislitel'nyh eksperimentov [Mathematical model of teletraffic on the based G/M/1 system and results of computational experiment]. *Informacionnyeologii*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 121–126. (In Russian).
7. Aliev T.I. Approksimaciya veroyatnostnyh raspredelenij v modelyah massovogo obsluzhivaniya [Approximation of probability distributions in queuing models]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 88–93. (In Russian).
8. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13*, 1991, pp. 683–688.
9. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, 1982, vol. 30, no. 1, pp. 125–147.
10. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates. *Queueing Systems*, 2018, vol. 89, no. 3, pp. 269–301.

11. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V. Sposoby approksimacii vhodnyh raspredelenij dlya sistemy G/G/1 i analiz poluchennyh rezul'tatov [Methods for approximating input distributions for the G/G/1 system and analysis of the results]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tehnologii*, 2015, no. 3. pp. 182–185. (In Russian).
12. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. Vosstanovlenie momentnyh harakteristik raspredeleniya intervalov vremeni mezhdu paketami vkhodyaschego trafika [Restoring moment distribution characteristics interval between packets of incoming traffic]. *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 40–44. (In Russian).
13. Tarasov V.N., Malakhov S.V., Kartashevskiy I.V. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie zaderzhki v programmno-konfiguriruemym setyah [Theoretical and experimental study of delay in software-configured networks]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2015, no. 4, pp. 409–413. (In Russian).
14. Tarasov V.N. *Veroyatnostnoe komp'yuternoe modelirovanie slozhnyh sistem* [Probabilistic Computer Modeling of Complex Systems]. Samara: SNC RAN Publ., 2002, 194 p. (In Russian).

Received 15.01.2020

УДК 621.391.1:621.395

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛЕТРАФИКА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $E_2/HE_2/1$

Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Када О.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Представлены результаты вывода формулы для среднего времени ожидания для системы массового обслуживания $E_2/HE_2/1$ с эрланговскими и гиперэрланговскими входными распределениями второго порядка. По определению Кендалла, эта система относится к классу G/G/1 с произвольными законами распределения интервалов входного потока и времени обслуживания. В теории массового обслуживания исследования таких систем особо актуальны в связи с тем, что невозможно найти решение для среднего времени ожидания в очереди в конечном виде для общего случая. Для рассматриваемой системы такое решение возможно получить в замкнутой форме на основе классического метода спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли для систем типа G/G/1. Использование же распределений Эрланга и гипер-Эрланга более высокого порядка затруднительно для вывода решения для среднего времени ожидания из-за нарастающей вычислительной сложности. В статье представлены полученное спектральное разложение решения интегрального уравнения Линдли для рассматриваемой системы и расчетная формула для среднего времени ожидания в очереди. Адекватность полученных результатов подтверждена корректностью использования классического метода спектрального разложения и результатами численного моделирования. Система $E_2/HE_2/1$ применима при коэффициенте вариации интервалов поступления, равного $1/\sqrt{2}$, и коэффициенте вариации времени обслуживания, большего $1/\sqrt{2}$. Для практического применения полученных результатов использован метод моментов теории вероятностей. Результаты численного моделирования в пакете Mathcad однозначно подтверждают тот факт теории массового обслуживания, что среднее время ожидания связано с коэффициентами вариаций интервалов поступления и времени обслуживания квадратичной зависимостью.

Ключевые слова: *система массового обслуживания $E_2/HE_2/1$, среднее время ожидания в очереди, метод спектрального разложения, интегральное уравнение Линдли, преобразование Лапласа*

Введение

Статья посвящена анализу системы массового обслуживания (СМО) $E_2/HE_2/1$ с эрланговским (E_2) и с гиперэрланговским (HE_2) входными распределениями. В открытом доступе авторам не удалось обнаружить результаты для среднего времени ожидания требований в очереди для такой СМО. Как известно из теории массового обслуживания, среднее время ожидания является главной харак-

теристикой для любых СМО. По этой характеристике, например, оценивают задержки пакетов в сетях пакетной коммутации при их моделировании с помощью СМО. Рассматриваемая СМО относится к типу G/G/1.

В теории массового обслуживания исследования систем G/G/1 актуальны в связи с тем, что они активно используются в современной теории телетрафика, к тому же нельзя получить решения для таких систем в конечном виде для

общего случая. Законы распределений Вейбулла или Гамма наиболее общего вида, которые обеспечивают диапазон изменения коэффициентов вариаций от 0 до ∞ в зависимости от величины их параметров, не позволяют их использовать в теории массового обслуживания. Поэтому остается применять другие частные законы распределений.

В исследовании систем G/G/1 важную роль играет метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли и большинство результатов в теории массового обслуживания получены именно с помощью данного метода.

Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли (ИУЛ) составляет важную часть теории систем G/G/1. Для записи ИУЛ введем следующие обозначения [1]: $W(y)$ – функция распределения вероятностей (ФРВ) времени ожидания требования в очереди; $C(u) = P(\tilde{u} < u)$ – ФРВ случайной величины $\tilde{u} = \tilde{x} - \tilde{t}$; \tilde{x} – случайное время обслуживания требования; \tilde{t} – интервал времени между поступлениями требований. Тогда одна из форм уравнения Линдли выглядит так [1]:

$$W(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u) dC(u), & y \geq 0 \\ 0, & y < 0 \end{cases}.$$

При кратком изложении метода спектрального разложения решения ИУЛ будем придерживаться подхода [1]. Для этого через $A^*(s)$ и $B^*(s)$ обозначим преобразования Лапласа функций плотности распределения интервалов между поступлениями и времени обслуживания соответственно. Суть решения ИУЛ методом спектрального разложения состоит в нахождении для выражения $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1$ представления в виде произведения двух множителей, которое давало бы рациональную функцию от s . Следовательно, для нахождения закона распределения времени ожидания необходимо следующее спектральное разложение: $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$, где $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ – некоторые дробно-рациональные функции от s . Функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ должны удовлетворять следующим условиям согласно [1]:

– для $\text{Re}(s) > 0$ функция $\psi_+(s)$ является аналитической без нулей в этой полуплоскости;

– для $\text{Re}(s) < D$ функция $\psi_-(s)$ – аналитическая без нулей в этой полуплоскости, где D – некоторая положительная константа, определяемая из условия $\lim_{t \rightarrow \infty} a(t) / e^{-Dt} < \infty$.

Кроме того, функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ должны обладать следующими свойствами:

$$\lim_{|s| \rightarrow \infty, \text{Re}(s) > 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = 1; \quad (1)$$

$$\lim_{|s| \rightarrow \infty, \text{Re}(s) < D} \frac{\psi_-(s)}{s} = -1. \quad (2)$$

Теперь остается применить метод спектрального разложения к рассматриваемой системе.

Постановка задачи

В статье ставится задача вывода формулы для среднего времени ожидания для рассматриваемой системы $E_2/HE_2/1$ и подтверждения адекватности построенной математической модели путем численного моделирования в пакете Mathcad. Вывод решения для среднего времени ожидания проводится классическим методом спектрального разложения решения ИУЛ, как это показано в [3–6; 13]. Аналогичные подходы к аппроксимации законов распределений использованы в [2; 7–10; 12].

Решение для системы $E_2/HE_2/1$

В системе $E_2/HE_2/1$ интервалы времени между поступлениями требований заданы функцией плотности

$$a(t) = 4\lambda^2 t e^{-2\lambda t}, \quad (3)$$

преобразование Лапласа которой выглядит как:

$$A^*(s) = \left(\frac{2\lambda}{s + 2\lambda} \right)^2. \quad (4)$$

Время обслуживания распределено с функцией плотности

$$b(t) = 4q\mu_1^2 t e^{-2\mu_1 t} + 4(1-q)\mu_2^2 t e^{-2\mu_2 t}, \quad (5)$$

а ее преобразование Лапласа имеет вид

$$B^*(s) = q \left(\frac{2\mu_1}{s + 2\mu_1} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{s + 2\mu_2} \right)^2. \quad (6)$$

Тогда спектральное разложение решения ИУЛ для системы $E_2/HE_2/1$ $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$ примет вид:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \left(\frac{2\lambda}{2\lambda - s} \right)^2 \times \left[q \left(\frac{2\mu_1}{2\mu_1 + s} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{2\mu_2 + s} \right)^2 \right] - 1. \quad (7)$$

Выражение в квадратных скобках (7) примет вид:

$$\left[q \left(\frac{2\mu_1}{2\mu_1 + s} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{2\mu_2 + s} \right)^2 \right] = \frac{q(16\mu_1^2\mu_2^2 + 16\mu_1^2\mu_2s + 4\mu_1^2s^2) + (2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2}{(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2}$$

$$+ \frac{(1-q)(16\mu_1^2\mu_2^2 + 16\mu_1\mu_2^2s + 4\mu_2^2s^2)}{(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2} =$$

$$= \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2}{(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2},$$

где промежуточные параметры

$$b_0 = 16\mu_1^2\mu_2^2,$$

$$b_1 = 16\mu_1\mu_2[q\mu_1 + (1-q)\mu_2],$$

$$b_2 = 4[q\mu_1^2 + (1-q)\mu_2^2].$$

Продолжая разложение (7), получим:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \frac{4\lambda^2(b_0 + b_1s + b_2s^2)}{(2\lambda - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2} -$$

$$- \frac{(2\lambda - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2}{(2\lambda - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2} =$$

$$= \frac{-s(s^5 - d_4s^4 - d_3s^3 - d_2s^2 - d_1s - d_0)}{(2\lambda - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2} =$$

$$= \frac{-s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)(s + \sigma_3)(s + \sigma_4)(s - \sigma_5)}{(2\lambda - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2}.$$

Окончательно спектральное разложение решения ИУЛ для системы $HE_2/E_2/1$ имеет вид

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} =$$

$$= \frac{-s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)(s + \sigma_3)(s + \sigma_4)(s - \sigma_5)}{(2\lambda - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2}. \quad (8)$$

Исследование многочлена в числителе разложения (8) и определение его корней являются основным моментом метода спектрального разложения решения ИУЛ. Поэтому выпишем многочлен пятой степени в числителе разложения (8):

$$s^5 - d_4s^4 - d_3s^3 - d_2s^2 - d_1s - d_0. \quad (9)$$

Его коэффициенты, сформированные с помощью символьных операций Mathcad, равны:

$$d_0 = 64\lambda\mu_1\mu_2[\mu_1\mu_2 - \lambda(\mu_1 + \mu_2) + 4b_1\lambda^2];$$

$$d_1 = 16\{4\lambda\mu_1\mu_2(\mu_1 + \mu_2) -$$

$$- \lambda^2[2\mu_1\mu_2 + (\mu_1 + \mu_2)^2] + 4b_2\lambda^2\};$$

$$d_2 = 16\lambda[(\mu_1 + \mu_2)^2 + 2\mu_1\mu_2] -$$

$$- 16(\mu_1 + \mu_2)(\lambda^2 + \mu_1\mu_2);$$

$$d_3 = -4[\lambda^2 + \mu_1^2 + \mu_2^2 - 4\lambda(\mu_1 + \mu_2) + 4\mu_1\mu_2];$$

$$d_4 = 4(\lambda - \mu_1 - \mu_2),$$

и выражаются через параметры распределений (3) и (5), которые предстоит еще определить.

Многочлен (9) имеет четыре действительных отрицательных корня $-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3, -\sigma_4$ (либо два действительных отрицательных корня и два

комплексно сопряженных с отрицательными действительными частями) и один положительный корень σ_5 . Исследование знака младшего коэффициента d_0 показывает, что $d_0 > 0$ всегда в случае стабильной системы, когда $0 < \rho < 1$. С учетом знака минус перед d_0 в многочлене (6) это также подтверждает предположение о наличии таких корней многочлена.

С учетом условий [1] строим рациональные функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$:

$$\psi_+(s) = \frac{s(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)(s + \sigma_3)(s + \sigma_4)}{(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2},$$

так как нули многочлена (9) $s = 0, s = -\sigma_1, s = -\sigma_2, s = -\sigma_3, s = -\sigma_4$ и двукратные полюсы $s = -2\mu_1$ и $s = -2\mu_2$ лежат в области $\text{Re}(s) \leq 0$,

$$\psi_-(s) = -\frac{(2\lambda - s)^2}{(s - \sigma_5)},$$

так как ее нули и полюсы лежат в области $\text{Re}(s) > D$, определенной условием [1]. Теперь выполнение обоих условий метода спектрального разложения для построенных функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ очевидно. Далее по методике спектрального разложения найдем константу K :

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\psi_+(s)}{s} =$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)(s + \sigma_3)(s + \sigma_4)}{(s + 2\mu_1)^2(s + 2\mu_2)^2} =$$

$$= \frac{\sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4}{16\mu_1^2\mu_2^2},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – абсолютные значения отрицательных корней $-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3, -\sigma_4$. Постоянная K определяет вероятность того, что поступающее в систему требование заставит ее свободной.

Для нахождения преобразования Лапласа ФРВ времени ожидания построим функцию

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)} = \frac{\sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4}{16\mu_1^2\mu_2^2s} \times$$

$$\times \frac{(s + 2\mu_1)^2(s + 2\mu_2)^2}{(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)(s + \sigma_3)(s + \sigma_4)}.$$

Отсюда преобразование Лапласа ФРВ времени ожидания $W^*(s) = s \cdot \Phi_+(s)$ будет равно

$$W^*(s) =$$

$$= \frac{\sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4(s + 2\mu_1)^2(s + 2\mu_2)^2}{16\mu_1^2\mu_2^2(s + \sigma_1)(s + \sigma_2)(s + \sigma_3)(s + \sigma_4)}. \quad (10)$$

Для нахождения среднего времени ожидания вычислим производную от функции $W^*(s)$ со знаком минус в точке $s = 0$:

$$\left. -\frac{dW^*(s)}{ds} \right|_{s=0} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_4} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}.$$

Окончательно среднее время ожидания для системы $E_2/HE_2/1$:

$$\bar{W} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_4} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}. \quad (11)$$

Из выражения (10) при необходимости также можно определить моменты высших порядков времени ожидания, например, вторая производная от преобразования (10) в точке $s = 0$ дает второй начальный момент времени ожидания, что позволяет определить дисперсию времени ожидания. Учитывая определение джиттера в телекоммуникациях как разброс времени ожидания вокруг его среднего значения [10], тем самым получим возможность определения джиттера через дисперсию. Это является важным результатом для анализа трафика, чувствительного к задержкам.

Для практического применения формулы (11) необходимо определить числовые характеристики распределений (3) E_2 и (5) HE_2 , а через них – неизвестные параметры этих распределений. Для распределения E_2 среднее значение $\bar{\tau}_\lambda = \lambda^{-1}$, коэффициент вариации $c_\lambda = 1/\sqrt{2}$. Для нахождения числовых характеристик до второго порядка для распределения (5) воспользуемся свойством преобразования Лапласа $B^*(s)$ воспроизведения моментов и запишем начальные моменты:

$$\bar{\tau}_\mu = \frac{q}{\mu_1} + \frac{(1-q)}{\mu_2}, \quad \bar{\tau}_\mu^2 = \frac{3}{2} \left[\frac{q}{\mu_1^2} + \frac{(1-q)}{\mu_2^2} \right]. \quad (12)$$

Рассматривая равенства (12) как запись метода моментов, найдем неизвестные параметры распределения (5) μ_1 , μ_2 , q . Система двух уравнений (12) при этом является недоопределенной, поэтому к ней добавим выражение для квадрата коэффициента вариации:

$$c_\mu^2 = \frac{\bar{\tau}_\mu^2 - (\bar{\tau}_\mu)^2}{(\bar{\tau}_\mu)^2}, \quad (13)$$

как связующее условие между (12). Кроме того, коэффициент вариации будем использовать в расчетах в качестве входного параметра системы. Исходя из вида первого уравнения (12), положим

$$\mu_1 = 2q/\bar{\tau}_\mu, \quad \mu_2 = 2(1-q)/\bar{\tau}_\mu \quad (14)$$

и потребуем выполнения условия (13) [2; 3]. Подставив выражения (12) и (14) в (13), получим уравнение четвертой степени относительно неизвестного параметра q :

$$q(1-q)[8(1+c_\mu^2)q^2 - 8(1+c_\mu^2)q + 3] = 0.$$

Отбросив тривиальные решения $q = 0$ и $q = 1$, получим квадратное уравнение $8(1+c_\mu^2)q^2 -$

Таблица. Исходные данные и результаты вычислительного эксперимента для СМО $E_2/HE_2/1$

Входные параметры		Среднее время ожидания	
ρ	c_μ	для системы $E_2/HE_2/1$	для системы $E_2/H_2/1$
0,1	0,71	0,018	–
	2	0,160	0,160
	4	0,796	0,795
	8	3,452	3,448
0,5	0,71	0,395	–
	2	2,102	2,094
	4	8,092	8,082
	8	32,089	32,079
0,9	0,71	4,380	–
	2	20,082	20,072
	4	74,075	74,065
	8	290,074	290,063

$-8(1+c_\mu^2)q + 3 = 0$, решив его, выберем для однозначности больший корень:

$$q = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{2(1+c_\mu^2) - 3}{8(1+c_\mu^2)}}. \quad (15)$$

Отсюда следует, что коэффициент вариации $c_\mu \geq 1/\sqrt{2}$. Теперь, подставив (15) в (14), определим все три неизвестных параметра распределения (5).

Аналогичную аппроксимацию законов распределений с использованием начальных моментов можно увидеть в [3–5; 13].

Результаты численного моделирования

В таблице приведены данные расчетов для системы $E_2/HE_2/1$ для случаев малой, средней и высокой нагрузки $\rho = 0,1; 0,5; 0,9$. Заметим, что эта система определена для $c_\lambda = 1/\sqrt{2}$ и $c_\mu \geq 1/\sqrt{2}$. Данные расчетов для системы $E_2/HE_2/1$ сравниваются с результатами близкой системы $E_2/H_2/1$, где H_2 – гиперэкспоненциальный закон распределения второго порядка. Прочерки в таблице означают, что при данных параметрах система $E_2/H_2/1$ неприменима.

Коэффициент загрузки ρ определяется отношением средних интервалов $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda$. Результаты, приведенные в таблице, получены для нормированного времени обслуживания $\bar{\tau}_\mu = 1$.

Данные таблицы свидетельствуют о незначительном различии сравниваемых систем, так как сами распределения HE_2 и H_2 мало отличаются друг от друга. Результаты для системы $E_2/HE_2/1$ хорошо согласуются с данными [10] в той области изменения параметров, при которых применима данная система, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Заключение

В работе получено спектральное разложение решения интегрального уравнения Линдли для системы $E_2/HE_2/1$ и через него выведена расчетная формула для среднего времени ожидания в очереди в такой системе. Это расчетное выражение дополняет известную незавершенную формулу для среднего времени ожидания для систем типа $G/G/1$.

Среднее время ожидания в очереди – это основная характеристика для систем массового обслуживания, так как все остальные характеристики: время задержки, средняя длина очереди, количество требований в системе и др. – являются производными от основной характеристики.

Адекватность полученных результатов обеспечена корректным использованием классического метода спектрального разложения, а проведенные вычислительные эксперименты только подтверждают данный факт.

Литература

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
2. Brannstrom N. A Queueing Theory analysis of wireless radio systems. Applied to HS-DSSS. Lulea University of Technology, 2004. 79 p.
3. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф., Липилина Л.В. Математическая модель телетрафика на основе системы $G/M/1$ и результаты вычислительных экспериментов // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 2. С. 121–126.
4. Тарасов В.Н., Карташевский И.В. Способы аппроксимации входных распределений для системы $G/G/1$ и анализ полученных результатов // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 3. С. 182–185.
5. Тарасов В.Н., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А. Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 2. С. 40–44.
6. Тарасов В.Н. Вероятностное компьютерное моделирование сложных систем. Самара: СНЦ РАН, 2002. 194 с.
7. Myskja A. An improved heuristic approximation for the $GI/GI/1$ queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. 1991. P. 683–688.
8. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research. 1982. Vol. 30. № 1. P. 125–147.
9. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
10. Алиев Т.И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 88–93.
11. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393> (дата обращения: 26.02.2016).
12. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Обобщенная двумерная диффузионная модель массового обслуживания типа $GI/G/1$ // Телекоммуникации. 2009. № 7. С. 2–8.
13. Тарасов В.Н., Малахов С.В., Карташевский И.В. Теоретическое и экспериментальное – исследование задержки в программно-конфигурируемых сетях // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13. № 4. С. 409–413.

Получено 16.01.2020

Тарасов Вениамин Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах (ПОУТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Бахарева Надежда Федоровна, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 339-11-31. E-mail: bakhareva-nf@psuti.ru

Када Отхмане, аспирант кафедры ПОУТС ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-13. E-mail: otman2333@gmail.com

SIMULATION OF TELETRAFFIC BASED ON $E_2/HE_2/1$ SYSTEM

Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Kada O.

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia Federation

E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

This article presents the results of deriving the formula for the average waiting time for the queuing system $E_2/HE_2/1$ with second-order Erlang and hyper-Erlang input distributions. By the definition of Kendall, this system belongs to the class $G/G/1$ with arbitrary laws of distribution of intervals of the input stream and service time. In queuing theory, studies of such systems are particularly relevant because it is impossible to find a solution for the average waiting time in the queue in the final form for the general case. For the system under consideration, such a solution can be obtained in closed form based on the classical method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation for systems of type $G/G/1$. Using higher-order Erlang and hyper-Erlang distributions is difficult to derive a solution for the average latency due to increasing computational complexity. The article presents the obtained spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation for the system under consideration and the calculation formula for the average waiting time in the queue. The adequacy of the results is confirmed by the correct use of the classical method of spectral decomposition and the results of numerical simulation. The $E_2/HE_2/1$ system is applicable when the coefficient of variation of the intervals of receipt is equal to $1/\sqrt{2}$ and the coefficient of variation of the service time is greater $1/\sqrt{2}$. For practical application of the results obtained, the probability method moments method is used. The results of numerical modeling in the Mathcad package unambiguously confirm the fact of the queuing theory that the average waiting time is related to the coefficients of variation of the intervals of arrival and service time by a quadratic dependence.

Keywords: *queuing system $E_2/HE_2/1$, average waiting time in the queue, the method of spectral decomposition, the Lindley integral equation, the Laplace transform*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.06

Tarasov Veniamin Nikolaevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Software and Management in technical Systems Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 228-00-13. E-mail: tarasov-vn@psuti.ru

Bakhareva Nadezhda Fedorovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Informatics and Computer Technics Department, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 846 339-11-31. E-mail: bakhareva-nf@psuti.ru

Kada Othmane, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD Student of Software and Management in technical Systems Department. E-mail: otman2333@gmail.com

References

1. Kleinrock L. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing Theory]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, 432 p. (In Russian).
2. Brannstrom N. *A Queueing Theory Analysis of Wireless Radio Systems. Applied to HS-DSCH*. Lulea University of Technology, 2004. 79 p.
3. Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Lipilina L.V. Matematicheskaya model' teletrafika na osnove sistemy $G/M/1$ i rezul'taty vychislitel'nyh eksperimentov [Mathematical model of teletraffic on the based $G/M/1$ system and results of computational experiment]. *Informacionnye tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 121–126. (In Russian).
4. Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V. Sposoby approksimacii vhodnyh raspredelenij dlya sistemy $G/G/1$ i analiz poluchennyh rezul'tatov [Methods for approximating input distributions for the $G/G/1$ system and analysis of the results]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tehnologii*, 2015, no. 3. pp. 182–185. (In Russian).

5. Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A. Vosstanovlenie momentnykh harakteristik raspredeleniya intervalov vremeni mezhdu paketami vkhodyaschego trafika [Restoring moment distribution characteristics interval between packets of incoming traffic]. *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 40–44. (In Russian).
6. Tarasov V.N. *Veroyatnostnoe komp'yuternoe modelirovanie slozhnykh sistem* [Probabilistic Computer Modeling of Complex Systems]. Samara: SNC RAN Publ., 2002, 194 p. (In Russian).
7. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13*, 1991, pp. 683–688.
8. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods. *Operation Research*, 1982, vol. 30, no. 1, pp. 125–147.
9. Aliev T.I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of Modeling Discrete Systems]. SPb.: SPbGU ITMO, 2009, 363 p. (In Russian).
10. Aliev T.I. Approksimatsiya veroyatnostnykh raspredelenij v modelyakh massovogo obsluzhivaniya [Approximation of probability distributions in queuing models]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2 (84), pp. 88–93. (In Russian).
11. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393> (accessed: 26.02.2016).
12. Tarasov V.N., Bahareva N.F. Obobshchennaya dvumernaya diffuzionnaya model' massovogo obsluzhivaniya tipa GI/G/1 [Generalized two-dimensional diffusion queuing model type GI/G/1]. *Telekommunikacii*, 2009, no. 7, pp. 2–8. (In Russian).
13. Tarasov V.N., Malakhov S.V., Kartashevskiy I.V. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie zaderzhki v programmno-konfiguriruemyykh setyah [Theoretical and experimental study of delay in software-configured networks]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2015, no. 4, pp. 409–413. (In Russian).

Received 16.01.2020

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.3

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ ИНТЕРФЕЙСОВ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ИНФРАСТРУКТУРЕ УМНОГО ГОРОДА

*Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В., Шевченко В.И.
Севастопольский государственный университет, Севастополь, РФ
E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru*

Предлагается метод обнаружения уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств на основе анализа состояния трафика в каналах связи беспилотных транспортных систем. Подход базируется на методах непараметрической статистики для оценки информационных состояний контролируемых объектов, к которым относятся такие ресурсы беспилотных транспортных систем, как: канал связи, процессор, память, источник питания и др. Для каждого из этих ресурсов предлагается оценивать изменение таких характеристик, как степень загрузки ресурса и скорость его изменения. Распознавание состояния сетевого трафика осуществляется в условиях дефицита априорной информации о свойствах источника вторжений и стохастической природы распознаваемых событий. Для повышения уровня достоверности обнаружения уязвимостей в модели производится адаптивная динамическая настройка правил принятия решений по классификации информационного состояния трафика беспилотных транспортных средств.

Ключевые слова: беспилотное транспортное средство, адаптивная модель, обнаружение уязвимостей, классификация информационных состояний, оценочная матрица

Введение

В последнее десятилетие наблюдается быстрое развитие беспилотных транспортных систем (БТС) в самых разных аспектах. Сложность современных транспортных систем в сочетании с резким увеличением использования электронных устройств и беспроводных технологий изменила традиционную концепцию безопасности в автомобильной промышленности. Более того, растущий интерес к развитию специальных транспортных сетей (VANET) и интеллектуальных транспортных систем (ITS) привел к появлению новых проблем безопасности и уязвимостей. При этом возникают задачи по созданию информационных технологий, обеспечивающих безопасность объектов критической информационной инфраструктуры «умный город». Применительно к БТС как к киберфизическому объекту в инфраструктуре «умного города» можно выделить три зоны уязвимости:

- системы управления движением: хранилища данных и динамические потоки данных и команд, передаваемые по каналам связи и обрабатываемые в автоматизированных системах;

- техническая инфраструктура: технологии, системное программное обеспечение, устройства, с помощью которых осуществляется реализация основных действий по управлению БТС;

- информационное взаимодействие субъектов «умного города» с использованием информации, получаемой от БТС (передаваемой БТС) и обрабатываемой посредством технической инфраструктуры.

Разработке моделей механизмов защиты в информационно-вычислительных сетях и исследованию их эффективности посвящены [1–5]. Особое место занимает проблема обеспечения безопасности критических инфраструктур [6], к которым относится система «умный город», представляющая собой масштабную киберфизическую систему, координирующую взаимодействия между разнородными физическими устройствами и вычислительными системами в реальном масштабе времени. Разнородность приложений и беспроводных коммуникаций существенно усложняет обеспечение безопасности таких систем.

Поэтому разработка методов, обеспечивающих безопасность информационного взаимодействия БТС с другими субъектами «умного города» посредством программных интерфейсов, представляет собой актуальную задачу.

В статье рассматривается подход, базирующийся на основе методов непараметрической

статистики для оценки информационных состояний контролируемых объектов, к которым относятся ресурсы БТС: канал связи, процессор, память, источник питания. Для каждого из этих ресурсов предлагается оценивать изменение таких характеристик, как степень загрузки ресурса и скорость его изменения.

Модель обнаружения уязвимостей

Будем оценивать степень внешнего информационного воздействия на БТС по изменению информационного состояния, например сетевого трафика БТС. При достаточно общей постановке задачи речь идет о необходимости сравнения двух выборок результатов наблюдений над состоянием объекта с целью выявления значимости его качественного изменения. Совокупность наблюдений представляет собой набор измерений состояния объекта – множество выборок:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

где $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_V\}$, x_i – значение измеряемого параметра объекта; n – число выборок; V – объем каждой выборки.

Вопрос заключается в том, можно считать наблюдаемые в двух из n выборках между X_p и X_q различия на основе оценки информационной меры Кульбака существенными, значимыми или различия между ними следует отнести на счет случайного рассеивания значений исследуемого признака. Последнее предположение представляет нулевую гипотезу H_0 об отсутствии существенного различия между двумя информационными состояниями ресурса [6]. Расстояние Кульбака распределения X_p относительно X_q может быть оценено как

$$D(X_p \| X_q) \leq Q \text{ – отсутствие } J\text{-эффекта};$$

$$D(X_p \| X_q) > Q \text{ – наблюдение } J\text{-эффекта},$$

где Q – предельное значение расстояния, зависящее от критичности контролируемого ресурса. Тогда нулевая гипотеза H_0 имеет место при $D(X_p \| X_q) \leq Q$ – отсутствие J -эффекта. В этом случае состояние ресурса принимается за стабильное, в противном случае принимается гипотеза H_1 – имеет место качественное изменение информационного состояния ресурса.

Введем понятие зоны распознавания J -эффекта. Будем для определенности рассматривать следующие границы зон распознавания: Q_1, Q_2, Q_3 . Тогда зоны определяются следующими интервалами:

$$[0; Q_1], [Q_1; Q_2], [Q_2; Q_3].$$

В зависимости от принадлежности текущего значения расстояния $D_{pq} \in Q_i$ ($i = 1, m$) будем

классифицировать следующие информационные состояния ресурса:

$0 \leq D_{pq} < Q_1$ – стабильное, устойчивое;

$Q_1 \leq D_{pq} < Q_2$ – неустойчивое;

$Q_2 \leq D_{pq} < Q_3$ – предкритическое.

В общем случае число зон распознавания Q_i определяется экспертом и зависит от критичности ресурса, динамики его состояния, требований к качеству контроля его характеристик, затрат на выполнение контроля и возможных потерь при контроле. Чем больше значение D_{pq} , тем более динамичный объект, то есть его состояние во времени (значение контролируемого параметра) подвержено большим изменениям. Поэтому если ресурс критического назначения и ставится задача контролировать незначительные изменения его состояния, то необходимо использовать:

- высокую частоту f съема значений контролируемого параметра;
 - малый интервал зон распознавания ΔQ ;
 - большое число зон распознавания m ;
 - большой объем выборки V ;
 - большое число интервалов гистограммы g .
- Соблюдение указанных требований обеспечивает:
- высокую достоверность определения информационного состояния ресурса;
 - снижение величины ошибок первого и второго рода;
 - минимальный возможный ущерб от потери информации.

В то же время обеспечение высокой достоверности контроля в сочетании с минимальным ущербом приведет к увеличению времени контроля и затрат при контроле. Как следствие, последние две характеристики могут оказаться препятствием для проведения контроля в реальном масштабе времени. Возникает противоречие, когда улучшение одних характеристик контроля вызывает ухудшение других.

Общей рекомендацией для оценки обнаружения J -эффекта является следующее. В зависимости от назначения системы эксперт (ЛППР) вправе задавать значение p – уровня достоверности, и соответствующие ему значения f – частоты измерения, и Q – предельного значения расстояния, зависящие от критичности ресурса, для которых, с одной стороны, будет обеспечена высокая достоверность значений характеристик объектов, с другой – достигается допустимое число ошибок первого и второго рода, а значит, будут снижены риски при принятии ошибочных решений.

Выбор параметров системы контроля производится таким образом, чтобы обеспечить мини-

	V_1	...	V_k	...	V_v
$Q_1 f_1$	L_{11}^1		L_{11}^k		L_{ij}^v
$Q_1 f_2$					
...
$Q_1 f_t$					
...
$Q_i f_j$			L_{ij}^k		
...
$Q_m f_1$					
...
$Q_m f_t$	L_{m1}^m				L_{mt}^m

Рисунок 1. Структура оценочной матрицы потерь

мальные потери при оценке состояния ресурса, которые могут возникнуть из-за несвоевременного принятия решения. Потери зависят от пороговых значений расстояния Кульбака Q_i , частоты измерений f_j , объема выборки V_k . Чем выше частота и чем меньше диапазон пороговых значений ΔQ , тем оперативнее будет приниматься решение о текущем состоянии ресурса. Чем больше объем выборки, тем точнее будет вычислено значение потерь.

Одним из возможных подходов к структурированию информации и использованию ее в целях адаптации параметров системы контроля к текущему информационному состоянию ресурса и среды является применение оценочной матрицы. Оценочная матрица позволяет выбрать наиболее оптимальные значения контролируемых параметров с точки зрения обеспечения принятых критериев, задаваемых экспертом.

Будем рассматривать потери L , связанные с оценкой информационного состояния ресурса, на элементах множества декартова произведения $\{Q \times f \times V\}$. Структура оценочной матрицы изображена на рисунке 1. Ее элементами являются значения потерь L_{ij}^k , а входами – пороговые значения расстояния Кульбака Q_i , ($i = 1, m$); частота измерения контрольных параметров ресурса f_j , ($j = 1, t$) и значения V_k объемов выборок ($k = 1, l$).

Каждая зона распознавания $[Q_{i-1}; Q_i]$ содержит значения потерь для множества частот f_j ($j = 1, t$). Будем полагать, что в пределах отдельной зоны распознавания значение контролируемого параметра изменяется монотонно во времени, то есть является не убывающим или не возрастающим для любых двух моментов времени, в которые производятся измерения.

Введем обозначения для заданных Q_i, f_j, V_k : $f_{i,j,\min}^k$ – значение частоты для интервала, обес-

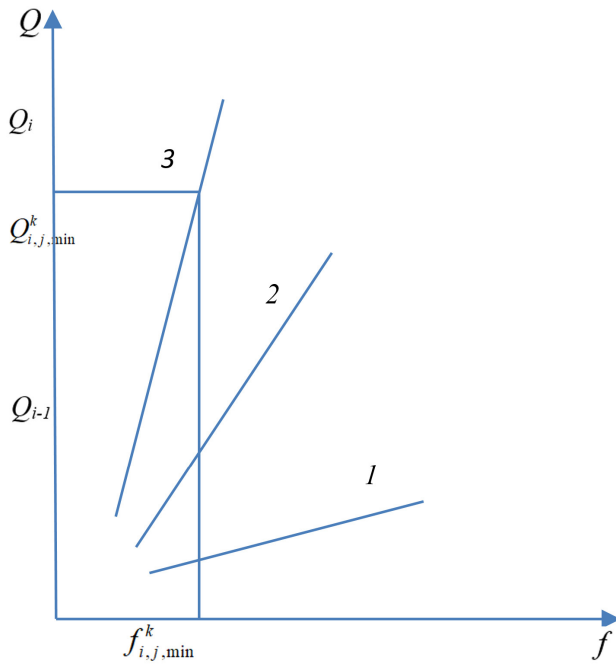


Рисунок 2. Пример иллюстрации скорости изменения $\Delta Q / \Delta f$ состояния ресурса в пределах зоны $[Q_{i-1}; Q_i]$: 1 – скорость незначительна; 2 – скорость превышает допустимый порог; 3 – скорость изменения высокая

печивающее минимум потерь L_{ij}^k ; $Q_{i,j,min}^k$ – значение порогового расстояния Кульбака, обеспечивающее минимум потерь L_{ij}^k ; L_{ij}^k – текущие потери при оценке расстояния Кульбака между выборками X_p и X_q .

Указанные значения определяются в режиме обучения и настройки. Значение потерь предлагается вычислять с помощью модифицированной функции Тагучи [8]:

$$L_{ij}^k(p, q) = \alpha \left(\frac{f_{p,q} - f_{i,j,min}^k}{f_{i,j,min}^k} \right)^2 + \beta \left(\frac{D_{p,q} - Q_{i,j,min}^k}{Q_{i,j,min}^k} \right), \quad (1)$$

где $f_{p,q}$, $D_{p,q}$ – текущие значения частоты и информационной меры Кульбака.

Будем полагать, что для каждой зоны распознавания $[Q_{i-1}; Q_i]$ задается множество значений частот $f_{i,j,min}^k$ и расстояний $Q_{i,j,min}^k$, для которых обеспечивается минимум потерь. Это позволит в пределах отдельной зоны распознавать скорость изменения состояния ресурса:

– устойчивое состояние, при котором скорость изменения незначительна;

– неустойчивое (переходное) состояние, когда скорость изменения превышает минимально допустимый порог;

– предкритическое состояние, в котором скорость изменения высокая, вследствие чего возможна критическая ситуация.

На рисунке 2 представлена графическая иллюстрация скорости изменения состояния ресурса $\Delta Q / \Delta f$.

Предлагаемый подход позволит выбирать оптимальные значения частоты контроля и объема выборки, обеспечивающие минимум потерь. Каждому виду потерь сопоставляется коэффициент α или β , причем $\alpha + \beta = 1$. Имеется возможность исследовать дуальный принцип управления, при котором управляющие воздействия носят двойственный характер [9]. С одной стороны, они призваны управлять объектом, с другой – служат для изучения его функциональных (структурных) свойств и закономерностей поведения для формирования последующих управляющих воздействий. Следовательно, структура управляющих воздействий должна меняться в соответствии с изменениями параметров системы объекта управления. Дуальное управление применяется в таких ситуациях, когда необходимо повысить интенсивность накопления информации о заранее неизвестных динамических свойствах объекта.

Каждое из слагаемых выражения (1) позволяет оценивать значимость значений параметров при оценке информационных потерь. Варьируя значениями коэффициентов α и β , мы можем детально изучать влияние $f_{p,q}$, $D_{p,q}$ на величину потерь в зависимости от величины интервала ΔQ зоны распознавания и скорости изменения состояния ресурса.

Заключение

Предлагаемая адаптивная модель обнаружения возможных уязвимостей интерфейсов в БТС на основе методов непараметрической статистики может являться основой для IT-технологий обеспечения компьютерной безопасности в условиях адаптации при быстром изменении состояния сетевого трафика в каналах связи БТС – диспетчерский центр – базовая станция. Использование адаптивной модели системы принятия решений позволяет повысить уровень правдоподобия распознавания событий, минимизировать число ложных тревог, а также обеспечить высокую реактивность системы, что особенно важно для этапов раннего обнаружения.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 19-29-06015/19 и 19-29-06023/19.

Литература

1. Patsakis C., Dellios K., Bouroche M. Towards a distributed secure in-vehicle communication architecture for modern vehicles // Computers & Security. 2014. Vol. 40. P. 60–74.

2. Vanet security challenges and solutions: A survey / H. Hasrouny [et al.] // *Vehicular Communications*. 2017. Vol. 7. P. 7–20.
3. Building an automotive security assurance case using systematic security evaluations / M. Cheah [et al.] // *Computers & Security*. 2018. Vol. 77. P. 360–379.
4. Зегжда П.Д., Полтавцева М.А., Лаврова Д.С. Систематизация киберфизических систем и оценка их безопасности // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2017. № 2. С. 127–138.
5. Онтологии и безопасность автономных (беспилотных) автомобилей / О.Н. Покусаев [и др.] // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. Vol. 7. № 2.
6. Интеллектуальная система мониторинга для решения крупномасштабных научных задач в облачных вычислительных средах / А.В. Скатков [и др.] // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 2 (87). С. 19–25.
7. Skatkov A., Bryukhovetskiy A., Moiseev D. Detecting changes simulation of the technological objects' information states // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. P. 02072.
8. Кампанелла Дж. Экономика качества. Основные принципы и их применение / пер. с англ. М.: РИА Стандарты и качество, 2005. 232 с.
9. Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В. Проектирование систем адаптивного управления производством. Харьков: Высшая школа, 1984. 384 с.

Получено 15.01.2020

Скатков Александр Владимирович, д.т.н., профессор кафедры информационных технологий и компьютерных систем (ИТКС) Севастопольского государственного университета (СевГУ). 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. Тел. +7 978 784-08-84. E-mail: vm1945@mail.ru

Брюховецкий Алексей Алексеевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ИТКС СевГУ. 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. Тел. +7 978 811-62-46. E-mail: a.alexir@mail.ru

Моисеев Дмитрий Владимирович, д.т.н., профессор кафедры ИТКС СевГУ. 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. Тел. +7 978 709-29-96. E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

Шевченко Виктория Игоревна, к.т.н., доцент кафедры ИТКС СевГУ. 299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33. Тел. +7 978 767-71-73. E-mail: shevchenko-vika@mail.ru

AN ADAPTIVE MODEL FOR DETECTING THE VULNERABILITIES OF UNMANNED VEHICLES INTERFACE IN SMART CITY INFRASTRUCTURE

*Skatkov A.V., Bryukhovetskiy A.A., Moiseev D.V., Shevchenko V.I.
Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation
E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru*

A method of detection vulnerabilities in unmanned vehicle interfaces based on an analysis of a traffic condition in communication channels of unmanned transport systems is proposed. The approach is based on non-parametric statistics methods for assessing the information states of controlled objects, which include such unmanned vehicles resources as: communication channel, processor, memory, power supply, etc. For each of these resources, it is proposed to evaluate the change in such characteristics as the degree of load resource and its rate of change. Recognition of the state of network traffic is carried out in conditions of a lack of a priori information about the properties of the intrusion source and the stochastic nature of the recognized events. To increase the reliability level of vulnerability detection in the model, adaptive dynamic tuning of decision-making rules for classifying the information state of the traffic of unmanned vehicles is carried out.

Keywords: *unmanned vehicle, adaptive model, vulnerability detection, classification of information states, assessment matrix*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.07

Skatkov Alexander Vladimirovich, Sevastopol State University, 33, Universetetskaya Street, Sevastopol, 299053, Russian Federation; Professor, Doctor of Technical Science, Professor of information technology and computer systems. Tel. +7 978 784-08-84. E-mail: vm1945@mail.ru

Bryukhovetskiy Alexey Alexeevich, Sevastopol State University, 33, Universetetskaya Street, Sevastopol, 299053, Russian Federation; Associate Professor, PhD in Technical Science, Head of information technology and computer systems. Tel. +7 978 811-62-46. E-mail: a.alexir@mail.ru

Moiseev Dmitriy Vladimirovich, Sevastopol State University, 33, Universetetskaya Street, Sevastopol, 299053, Russian Federation; Associate Professor, Doctor of Technical Science, Professor of information technology and computer systems. Tel. +7 978 709-29-96. E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

Shevchenko Viktoriya Igorevna, Sevastopol State University, 33, Universetetskaya Street, Sevastopol, 299053, Russian Federation; Associate Professor, PhD in Technical Science, Associate Professor of information technology and computer systems. Tel. +7 978 767-71-73. E-mail: shevchenko-vika@mail.ru

References

1. Patsakis C., Dellios K., Bouroche M. Towards a distributed secure in-vehicle communication architecture for modern vehicles. *Computers & Security*, 2014, vol. 40, pp. 60–74.
2. Hasrouny H. et al. Vanet security challenges and solutions: A survey. *Vehicular Communications*, 2017, vol. 7, pp. 7–20.
3. Cheah M. et al. Building an automotive security assurance case using systematic security evaluations. *Computers & Security*, 2018, vol. 77, pp. 360–379.
4. Zegzhda P.D., Poltavceva M.A., Lavrova D.S. Sistematizaciya kiberfizicheskikh sistem i ocenka ih bezopasnosti [Systematization of cyberphysical systems and assessment of their security]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy*, 2017, no. 2, pp. 127–138. (In Russian).
5. Pokusaev O.N. et al. Ontologii i bezopasnost' avtonomnyh (bespilotnyh) avtomobilej [The ontology of security and Autonomous (unmanned) vehicles]. *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 2. (In Russian).
6. Skatkov A.V. et al. Intellectual'naya sistema monitoringa dlya resheniya krupnomasshtabnyh nauchnyh zadach v oblachnyh vychislitel'nyh sredah [Intelligent monitoring system for solving large-scale scientific problems in cloud computing environments]. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy*, 2017, no. 2 (87), pp. 19–25. (In Russian).
7. Skatkov A., Bryukhovetskiy A., Moiseev D. Detecting changes simulation of the technological objects' information states. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 02072.
8. Campanella J. *Ekonomika kachestva. Osnovnye principy i ih primeneniye / per. s angl.* [The Economy of Quality. Basic Principles and their Application. Trans. from English]. Moscow: RIA Standarty i kachestvo, 2005, 232 p. (In Russian).
9. Skurihin V.I., Zabrodskij V.A., Kopejchenko Yu.V. *Proektirovaniye sistem adaptivnogo upravleniya proizvodstvom* [Design of Adaptive Production Management Systems]. Kharkiv: Vysshaya shkola, 1984, 384 p. (In Russian).

Received 15.01.2020

ВНЕДРЕНИЕ ЭКОМЕНЕДЖМЕНТА В ГОСТИНИЧНЫЙ СЕРВИС

Абрамов В.Е.¹, Сахарова А.Л.²

¹ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

² Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

E-mail: dobronraw@rambler.ru

Статья посвящена вопросам сохранения окружающей среды, посредством внедрения экоменеджмента в оказание гостиничных услуг. Рассмотрены факторы и источники угроз безопасности окружающей среды и возможные меры и средства ее сохранности и защиты. Сформулированы рекомендации по обеспечению безопасного влияния человека на окружающую среду для гостиниц и отелей в мировой практике. Приводятся общие и частные характеристики излагаемых проблем, а также предполагаемые средства их решения. Излагаемая информация основана на документально подтвержденных материалах из мировой практики использования различных методов и средств, привлекаемых для решения обозначенных проблем мирового сообщества. Источники информации аутентичны, чем привлекают внимание не только экспертов, но и ординарных пользователей гостиничных услуг, а также всех неравнодушных обитателей планеты Земля – места, в котором мы все сегодня живем.

Ключевые слова: экоменеджмент, гостиничный сервис, внедрение экоменеджмента, меры и средства защиты

Введение

Проблема защиты окружающей среды настолько очевидна, что не требует дополнительной мотивации. Каждый, несомненно, не раз сталкивался с фактами загрязнения окружающей среды. Дети изучают подобные темы в школах, каждый день мы видим баннеры на улицах, призывающие снизить потребление пластика в повседневном обиходе, хорошо известны факты атмосферного загрязнения и пр. Модная приставка «эко» все чаще появляется в социальных сетях, на ТВ, страницах газет и журналов. Туристская сфера не является исключением. Многие слышали или даже останавливались в «экоотелях», которые стараются максимально снизить воздействие на окружающую среду посредством внедрения «экоменеджмента».

Экологический менеджмент (экоменеджмент) представляет собой часть системы корпоративного управления, которая обладает четкой организационной структурой и ставит целью достижение положений, указанных в экологической политике посредством реализации программ по охране окружающей среды [1]. Это определение экоменеджмента применимо для разных сфер общественной жизни. Если рассматривать его непосредственно в туристском и гостиничном бизнесе, то экологический менеджмент – это внедренные и реализуемые программы по охране окружающей среды на территории отеля или гостиницы.

Основные понятия

В последнее десятилетие охране окружающей среды стали уделять гораздо большее внимание, нежели ранее, что вывело ее на совершенно но-

вый уровень. Создание экоотелей, в которых максимально снижено потребление пластика, воды и электроэнергии, уже заслуживает отдельного внимания. По утверждению П. Шэклфорда, регионального представителя Всемирной торговой организации в Европе, термин «экотуризм» используется уже более 10 лет, однако в это понятие вкладывается самое разное содержание [2]. По первому и самому распространенному определению, экотуризм – это форма устойчивого туризма, сфокусированная на посещении относительно незатронутых антропогенным воздействием природных территорий [3]. По второму определению, термин «экотуризм» рассматривается как ярлык предлагаемого к продаже турпродукта. Однако в обоих случаях экотуризм рассматривается как составляющая устойчивого развития туризма. Ни для кого не секрет, что туризм оказывает разное влияние на окружающую среду, но чаще пагубное: туриндустрия эксплуатирует природные, исторические и культурные ресурсы страны, располагает собственностью на землю, производит отходы, загрязняет воду, воздух и почву, оказывает мощное антропогенное воздействие на природу. Влияние транспортных выбросов на окружающую среду значительно и весьма отрицательно.

Ежегодно миллионы людей путешествуют по разным странам мира и, конечно, производят отходы: они едят на улицах стритфуд, потребляют напитки в пластиковых стаканах, часто загрязняют пляжи и береговые территории. Заметное количество отходов (не только в виде пластикового или бумажного мусора, а также в виде химических элементов) люди производят, находясь в гостиницах и отелях. Заселяясь в какую-либо

гостиницу, отель, хостел или арендуя квартиру, турист не задумывается о том, что загрязняет природу почти каждым своим действием.

Влияние человека на окружающую среду в сфере туризма

Рассмотрим среднестатистического отдыхающего, который приехал на отдых в Турцию (одно из самых популярных направлений отдыха на сегодняшний день). Гость приобрел allinclusive и заселился в номер. При входе в отель его обычно ждет кулер с питьевой водой и пластиковыми стаканчиками, которые используются тысячами людей ежедневно. Далее клиент получает ключ и поднимается в номер, проверяет состояние ванной комнаты, наличие гигиенических принадлежностей, состояние полотенец и т. д. Как правило, все шампуни, гели для душа, зубные щетки и даже ватные палочки упаковываются в пластиковую посуду и пакеты. Часто в отелях предоставляются шапочки для душа, которые выполнены из того же материала, что и защита для обуви (бахилы) – отметим, что срок разложения бахил составляет 400 лет. Все это меняется в номерах каждый день, плюс – ежедневная уборка номеров, при которой расходуется колоссальное количество электричества, а также используются химические моющие средства, которые затем сливаются по водостокам, проходят через канализационные трубы, попадают в реки и далее оказываются в Мировом океане. Еще одним интересным предметом наблюдения является мини-бар. У гостя программы «все включено», нет проблем с выбором напитков, он выберет пакетированный продукт, употребит и выбросит упаковку в мусорный контейнер.

Рассмотренное иллюстрирует лишь малую часть способов, которыми турист способен нанести вред окружающей среде. В зарубежных странах отели стали применять методы по сохранению окружающей среды посредством внедрения экомеджмента в оказываемых услугах. Так, британско-австралийский журнал Journal of Travel Research опубликовал статью, где приведены результаты мероприятий, проведенных в отеле Bohinj Eco-Hotel (Словения). Данный отель был построен в 2009 г. и оснащен новейшими технологическими достижениями с целью минимизации воздействия на окружающую среду и снижения эксплуатационных расходов. Большая часть его гостей – туристы из Италии, Хорватии и жители самой Словении. Самым интересным фактом является то, что данный отель пользуется достаточно широкой популярностью не из-за

того, что он экологичен, а по причине наличия высокого уровня оборудования, оздоровительно-го и SPA-центров, ресторана с большим выбором блюд, зала для боулинга и кинотеатра. В 2015 г., в сезон отпусков с 3 по 23 августа, было проведено исследование, которое показывало отношение гостей к сохранению окружающей среды. Им предложили на время пребывания в отеле по возможности отказываться от ежедневной уборки номера и взамен получать ваучер на один бесплатный напиток в баре отеля, причем приводились серьезные аргументы в пользу отказа от уборки: данные по расходу электричества, воды и химических элементов. В эксперименте приняли участие 324 гостя, средний возраст которых составил 41 год, они останавливались в основном на 4 ночи, и 80 % из них были платежеспособны.

Гости были разделены на три группы: первой группе предлагалось отказаться от уборки номера и получать взамен ваучер на бесплатный напиток в баре за каждый день отказа; для второй группы приводились доводы в пользу отказа от уборки номера, но ваучеры не предлагались; в третьей группе сначала приводились доводы, а затем предлагались ваучеры. Результат был следующим: в первой группе отказались от ежедневной уборки номеров 41 % участников; во второй группе – 16 % и в третьей группе – 32 % [4]. Очевидно, для людей, заселяющихся в отель, который позиционируется как «эко», это весьма низкие показатели. Постояльцы согласны экономить средства отеля и сохранять окружающую среду ограниченным контингентом только потому, что им предлагается что-то взамен. Фактически они пытаются найти для себя выгоду, совершенно не понимая, для чего именно проводятся такие акции. Результат 16 % весьма незначителен, хотя те, кто отказался от уборки номеров, не получив ничего взамен, конечно, люди, понимающие и осознающие всю опасность глобальной проблемы загрязнения окружающей среды.

Способы и средства снижения пагубного воздействия человека на окружающую среду

Стоит остановиться еще на одном факте: многие отели за границей сейчас переходят на специальные средства для уборки, которые не вредят окружающей среде, а наоборот, помогают перерабатывать вредные отходы. Так, бельгийская компания CHRISAL, основанная в 1988 г., запустила масштабный проект по созданию инновационных средств для уборки. Компания сразу выбрала путь по созданию очистителей нового

поколения на водной основе, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. «В настоящее время продукция компании CHRISAL представляет собой линейку универсальных чистящих и стабилизирующих окружающую среду средств, приемлемых для всех отраслей промышленности, сельского хозяйства, транспортной инфраструктуры, объектов системы здравоохранения, общественного сектора и быта. Продукция CHRISAL представляет собой водный раствор органических солей, абсолютно безопасный для человека и окружающей среды. Отсутствие каких-либо агрессивных компонентов, вступающих в химическую реакцию с обрабатываемыми поверхностями, негорючесть, биоразлагаемость позволяют использовать всю гамму средств CHRISAL на любых поверхностях из любых материалов» [5]. В настоящий момент продукция компании представлена и активно используется в таких странах, как Бельгия, Германия, Нидерланды, странах Восточной Европы и Прибалтики, США, Израиле, Австралии и ряде других. В России продукция CHRISAL также представлена, но пока ограниченно и только в домашних условиях – для использования частными лицами.

На сегодняшний день для сохранения окружающей среды гостиницами и турфирмами Европейским союзом разработано Положение ЕС 1893/93 «О добровольном участии компаний в Системе экологического менеджмента и ревизии». В соответствии с методикой экологического менеджмента турфирма или гостиница может проводить или заказывать объективные экоревизии, целью которых является улучшение управления экологическими аспектами туристской деятельности. Так, система экологического менеджмента Финляндии предполагает при проведении экоревизии на туристских предприятиях рассмотрение следующих вопросов:

- требования экологически сознательных туристов к условиям проведения путешествий;
- меры, способствующие экономии сырья, воды и электрической и тепловой энергии туристскими предприятиями;
- освоение управления отходами с целью обеспечения соответствия Закону об утилизации отходов Финляндии;
- особые характеристики туристских предприятий при предоставлении ими специфических туристских услуг [2].

Internet как инструмент продвижения туристических услуг

На сегодняшний день любой бизнес уделяет большое внимание продвижению своих услуг

через Internet. Для этого используются все известные методы продвижения: реклама в социальных сетях, таргетированная реклама, реклама через блогеров, баннерная или медийная реклама и прочие виды.

Туристский бизнес также активно использует рекламу своих услуг через Internet-площадки. Сегодня второй по популярности и прибыльности социальной сетью считается Instagram. По сообщению сети Instagram, число пользователей с момента запуска приложения в 2010–18 гг. (последнее статистическое сообщение компании) выросло до 1 млрд человек [8]. Из них число ежедневных активных пользователей Instagram равняется 500 млн. Согласно исследованиям, проведенным журналом *Forbes*, любимая маркетологами аудитория в возрасте 18–34 лет составляет почти 67 % пользователей российского Instagram [9]. Однако стоит отметить, что туристские фирмы ориентируются на пользователей по всему миру, поэтому целесообразно привести мировую статистику (числовые показатели соответствуют дате написания статьи):

- самое большое количество пользователей Instagram составляют жители США (11 % от числа пользователей по всему миру);
- Instagram является популярной социальной сетью в следующих странах: Бразилия (70 млн пользователей), Индия (69 млн), Индонезия (59 млн);
- Россия занимает пятое место в мире с показателем 40 млн человек [10].

Вышеприведенные цифры позволяют туристским фирмам и агентствам составить большую базу данных о потенциальных клиентах, которые могут воспользоваться их услугами. В свою очередь они пользуются услугами профессиональных маркетологов и SMM-специалистов, отвечающих за продвижение компании в каждой социальной сети. Анализ аккаунтов туристских фирм в социальной сети Instagram позволяет сделать следующие выводы:

- фирмы TUI, Anex tour, Пегас Туристик, Coral travel наиболее активно используют продвижение своих услуг через данную социальную сеть;
- данные компании имеют прирост клиентов, приходящих к ним посредством Instagram;
- при дальнейшем развитии своих аккаунтов фирмы смогут повышать прибыль и увеличивать базу реальных и потенциальных клиентов.

Помимо туристских фирм и агентств, услугами социальных сетей пользуются гостиничный бизнес, рестораны, кафе, а также развлекательные центры, аттракционы и прочие фирмы, оказывающие полный спектр туристических услуг.

Роль информационных технологий в развитии охраны окружающей среды

В последние годы защите экологии и окружающей среды уделяется большое внимание. Важную роль в данном вопросе также играет Internet, в особенности социальные сети. Острые темы экологии поднимаются в блогах у многих знаменитостей и медийных личностей.

В 2019 г. на весь мир стала известна 16-летняя шведка Грета Тунберг. В августе 2018 г. девочка впервые села перед зданием парламента Швеции с самодельным плакатом в руках, на котором было написано *Skolstrejk för klimatet*, что переводится как «Школьная забастовка за климат». С тех пор миллионы людей по всему миру подхватили движение Греты и стали больше задумываться о будущем планеты. Многие люди узнали и о ней, и о проблеме, о которой не задумывались раньше, именно благодаря Internet-ресурсам. В декабре 2019 г. Грета Тунберг стала человеком года по версии журнала *Time* [11].

Заключение

Резюмируя вышеописанное, мы можем сделать следующие выводы. Каждый человек должен задуматься о количестве разнообразных пластиковых и прочих токсичных отходов, которые он производит, снижать их количество, а также грамотно их утилизировать. В учебных заведениях с начальных классов нужно проводить занятия по охране окружающей среды. Необходимо сократить производство пластиковой тары и, соответственно, ее использование в повседневной жизни. Целесообразно перейти на экологически защищенные товары: стеклянную тару для продуктов (переработка стекла менее токсична, нежели переработка пластика), экологически чистые бытовые средства для уборки, тканевые бахилы вместо полиэтиленовых и пр.

Можно сформулировать следующие рекомендации по защите окружающей среды, которых должны придерживаться все отели, гостиницы и любые другие объекты размещения туристов.

1. Целесообразно отказаться от использования пластика во всех его проявлениях – от пластиковых стаканчиков до баночек от шампуней, заменяя их стеклянными или картонными изделиями, которые в разы быстрее разлагаются и не наносят урон окружающей среде.

2. Необходимо постепенно переходить на безвредные природные очистители для уборки помещений, которые, попадая в воду, не станут

загрязнять ее, а наоборот, будут способствовать нейтрализации вредных и токсичных элементов.

3. Следует использовать специальные контейнеры для разного типа отходов и перерабатывать все виды бытового мусора.

4. Необходимо пропагандировать меры по сохранению окружающей среды всеми возможными средствами всем, вовлеченным в сферу туристической деятельности.

5. Изначально целесообразно разместить информацию о воздействии человека на окружающую среду в отелях и проводить акции, которые будут стимулировать гостей уделять больше внимания необходимости сохранения экологического равновесия.

В заключение следует отметить необходимость постоянного внимания к вопросам охраны и заботы о всевозможных аспектах всего, что окружает нас, что вносит свой вклад в сохранение окружающей среды, безопасной жизни и будущее процветание нашей планеты.

Литература

1. Экологический менеджмент. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1346975> (дата обращения: 29.05.2019).
2. Сенин В.С. Организация международного туризма. М.: Финансы и статистика, 2014. 399 с. ISBN 978-5-279-02409-4.
3. Лукичев А.Б. Сущность устойчивого и экологического туризма // *Российский Журнал Экотуризма*. 2011. № 1. С. 3–6.
4. Dolnicar S., Knezevic Cvelbar L., Grün B. A sharing-based approach to enticing tourists to behave more environmentally friendly // *Journal of Travel Research*. 2019. Vol. 58 (2). P. 241–252. DOI: 10.1177/0047287517746013.
5. О компании CHRISAL. URL: <https://chrisal-product.ru/publikatsii/o-kompanii-crisal> (дата обращения: 02.06.2019).
6. Россия в цифрах. М.: Росстат, 2018. 522 с.
7. Гулин К.А. Проблема отходов в России и ее территориальные особенности. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/problema-othodov-v-rossii-i-ee-territorialnye-osobennosti> (дата обращения: 04.06.2019).
8. Сайт Агентства Деловой Информации «Рос-БизнесКонсалтинг». Число пользователей Instagram достигло 1 млрд. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5b2aa6c49a7947e32da2ea8b> (дата обращения: 19.12.2019).
9. Кречетова А. Исследование аудитории Instagram: сервисом пользуется каждый десятый в России, большинство – женщины. URL:

<https://www.forbes.ru/tehnologii/343331-issledovanie-auditorii-instagram-servisom-polzuetsya-kazhdyu-desyatyy-v-rossii> (дата обращения: 19.12.2019).

10. Рожкова Ж. Статистика по Instagram, которую нужно знать к 2020 году. URL: <https://www.likeni.ru/analytics/statistika-po-instagram>

[kotoruyu-nuzhno-znat-k-2020-godu](#) (дата обращения: 19.12.2019).

11. Русская служба BBC News. Грета Тунберг – человек года по версии Time. Моложе ее никогда не было. URL: <https://www.bbc.com/russian/news-50742196> (дата обращения: 20.12.2019).

Получено 20.12.2019

Абрамов Владимир Евгеньевич, д.филол.н., профессор, заведующий кафедрой иностранных языков Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-63; +7 927 335-66-99. E-mail: vabrta@mail.ru

Сахарова Анастасия Леонидовна, студентка Самарского государственного технического университета. 443001, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 917 140-98-69. E-mail: sakharova-1999@mail.ru

INCULCATION OF ECO-MANAGEMENT IN HOTEL SERVICE

Abramov V.E.¹, Sakharova A.L.²

¹ *Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*

² *Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*

E-mail: dobronraw@rambler.ru

The article is devoted to environmental issues, through the introduction of eco-management in the provision of hotel services. Possible threats to environmental security and measures of its preservation and protection are considered. Recommendations on the prevention of harmful human impact on the environment for hotels and resorts in the world practice are formulated. The general and private characteristics of the stated problems, as well as the supposed means of their solution are given. The information presented is based on documented materials from the world practice of using various methods and means involved in solving the indicated problems of the world community. The sources of information are authentic, which attracts attention not only of experts, but also ordinary users of hotel services, as well as all the inhabitants of planet Earth – the place where we all live today.

Keywords: *eco-management, hotel service, implementation of eco-management, means and ways of protection*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.08

Abramov Vladimir Evgenyevitch, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of the Foreign Languages Department, Doctor of Linguistics, Professor. Tel. +7 846 228-00-63; +7 927 335-66-99. E-mail: dobronraw@rambler.ru

Sakharova Anastasia Leonidovna, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443001, Russian Federation; Student. Tel. +7 917 140-98-69. E-mail: sakharova-1999@mail.ru

References

1. *Ecologicheskij menedjment* [Environmental Management]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1346975> (accessed: 29.05.2019). (In Russian).
2. Senin V.S. *Organizatsiya mejdunarodnogo turisma* [Organization of International Tourism]. Moscow: Financy i statistika, 2014, 399 p. ISBN 978-5-279-02409-4. (In Russian).
3. Luykichiov A.B. Sushnost ustoichivogo i ecologicheskogo turisma [The essence of sustainable and ecological tourism]. *Russian Journal Ecotourism*, 2011, № 1, pp. 3–6. (In Russian).

4. Dolnicar S., Knezevic Cvelbar L., Grün B. A sharing-based approach to enticing tourists to behave more environmentally friendly. *Journal of Travel Research*, 2019, vol. 58 (2), pp. 241–252. DOI: 10.1177/0047287517746013.
5. *O kompanii CHRISAL* [About CHRISAL]. URL: <https://chrisal-product.ru/publikatsii/o-kompanii-crisal> (accessed: 02.06.2019). (In Russian).
6. *Rossiya v zifrah* [Russia in Numbers]. Moscow: Rosstat, 2018, 522 p. (In Russian).
7. Gulin K.A. *Problema othodov v Rossii i eje territorialnye vozmozhnosti* [The problem of waste in Russia and its territorial features.]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/problema-othodov-v-rossii-i-ee-territorialnye-osobennosti> (accessed: 04.06.2019). (In Russian).
8. *Website agentstva delovoy informazii RosBusinessKonsalting (RBK). Chislo polzyvateleyi Instagram dostiglo 1 mlrd* [Site of the Agency of Business Information «RosBusinessConsulting». The number of Instagram users has reached 1 billion]. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5b2aa6c49a7947e32da2ea8b> (accessed: 19.12.2019). (In Russian).
9. Krechetova A. *Issledovaniye auditoria Instagram: servisom polzyetsia kajduy desatyi v Rossii, bolshuunstvo – jenshiny*» [Instagram audience research: every tenth in Russia uses the service, most of them are women]. URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/343331-issledovanie-auditorii-instagram-servisom-polzuetsya-kazhdyy-desyatyy-v-rossii> (accessed: 19.12.2019). (In Russian).
10. Rojkipva J. *Statistika po Instagram, kotoryu doljen znat kajdy k 2020 gody* [Statistics on Instagram, which you need to know by 2020]. URL: <https://www.likeni.ru/analytics/statistika-po-instagram-kotoryu-nuzhno-znat-k-2020-godu> (accessed: 19.12.2019). (In Russian).
11. *Russkaya slujba BBC NEWS. Statya Greta Tunberg – chelovek goda po versii Time. Moloje ee nikogo ne bylo*» [The Russian service of BBC News. Greta Tunberg is the person of the year according to Time. No one was younger than her]. URL: <https://www.bbc.com/russian/news-50742196> (accessed: 20.12.2019). (In Russian).

Received 20.12.2019

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.372.552

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ОТНОШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ ДВУХ СИГНАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ АДДИТИВНЫЙ ВИД СВЯЗИ ВСТРАИВАЕМЫХ СИГНАЛОВ

Шакурский М.В.

Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

E-mail: m.shakurskiy@gmail.com

Формирование двухкомпонентного контейнера позволяет значительно расширить возможности известных стеганографических методов за счет возникновения новых свойств. Двухкомпонентный контейнер представляет собой две функции двух переменных, одна из которых представляет собой скрываемый сигнал, другая – сигнал контейнера. В статье рассматриваются функции формирования компонент на основе отношения линейных функций двух сигналов. Выражения для формирования компонент и выражение для восстановления скрытого сигнала представляют собой дроби и имеют точки разрыва, что требует проведения анализа и определения условий формирования контейнера. В статье приводятся результаты анализа двухкомпонентной стеганографической системы с нелинейным контейнером в области разрыва функции восстановления информативного сигнала. Определяются ключевые коэффициенты с точки зрения обеспечения наибольшей чувствительности системы к вносимой в значение коэффициента ошибке. Проводится анализ влияния ошибки, вносимой в ключевой коэффициент, на форму восстановленного сигнала. Дается оценка полученных результатов.

Ключевые слова: *двухкомпонентная стеганографическая система, нелинейный контейнер, ключевой коэффициент, инвариантность к маскирующему сигналу*

Введение

В двухкомпонентной стеганографической системе контейнер содержит два сигнала, в формировании которых участвуют маскирующий сигнал и два информативных сигнала. Последние функционально связаны с входным маскируемым сигналом [1–10]. Задача извлечения скрытых сигналов сводится к решению системы двух уравнений с двумя неизвестными. Форма уравнений определяется выбором алгоритма смешивания сигналов.

Алгоритмы могут быть линейные и нелинейные. Алгоритмы восстановления информативного сигнала инвариантны к маскирующему сигналу, что существенно упрощает задачу вскрытия контейнера. Кроме этого, функции восстановления информативного сигнала содержат разрывы, в области которых на несколько порядков возрастает чувствительность функции к ошибкам задания коэффициентов функции.

В статье рассматривается нелинейный алгоритм формирования двухкомпонентного контейнера, использующий отношение линейных функций смешиваемых сигналов, и приводится анализ чувствительности функции восстановления к вариации коэффициентов с целью выбора ключевого (секретного) коэффициента.

Математическая модель системы

Отношение линейных функций двух сигналов имеет вычисляется как:

$$y = \frac{a_1 + b_1 u_1}{a_2 + b_2 u_2}. \quad (1)$$

Данное выражение преобразуется к виду

$$y = \frac{1 + a u_1}{b + c u_2}. \quad (2)$$

Полученное выражение представляет собой общую форму маскировки сигнала. В роли маскирующего сигнала может выступать как сигнал u_1 , так и сигнал u_2 . В данной статье рассмотрим вариант, когда в роли маскирующего сигнала выступает сигнал u_2 . В этом случае две компоненты передаваемого сигнала будут иметь вид:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{1 + a_1 u_1}{b_1 + c_1 \xi}, \\ y_2 = \frac{1 + a_2 u_2}{b_2 + c_2 \xi}, \end{cases} \quad (3)$$

где a , b и c – коэффициенты преобразования; ξ – сигнал контейнера (маскирующий сигнал); u_1 и u_2 – встраиваемые сигналы, сформированные из входного информативного сигнала u :

$$\begin{cases} u_1 = u, \\ u_2 = K - u_1. \end{cases} \quad (4)$$

Решим систему (3), выразив из второго уравнения сигнал ξ :

$$\xi = \frac{1 + a_2 u_2 - b_2 y_2}{c_2 y_2}. \quad (5)$$

Подставим (5) в первое уравнение (3) и преобразуем к виду

$$a_1 c_2 y_2 u_1 - a_2 c_1 y_1 u_2 - c_1 y_1 + c_2 y_2 + y_1 y_2 (b_2 c_1 - b_1 c_2) = 0. \quad (6)$$

Подставим в (6) второе выражение (4):

$$a_1 c_2 y_2 (K - u_1) - a_2 c_1 y_1 u_2 - c_1 y_1 + c_2 y_2 + y_1 y_2 (b_2 c_1 - b_1 c_2) = 0. \quad (7)$$

Решая уравнение (7), получим:

$$u = u_1 = \frac{c_1 y_1 (a_2 K + 1) - c_2 y_2 - y_1 y_2 (b_2 c_1 - b_1 c_2)}{a_1 c_2 y_2 + a_2 c_1 y_1}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет восстановить скрытый сигнал.

Исследование

Получим выражения для чувствительности (8) к вариации коэффициентов. Для этого определим дифференциал u_1 через приращения коэффициентов. Число коэффициентов в (8) равно шести. Помимо этого, используется значение K . Выражение для абсолютной чувствительности алгоритма восстановления ищем в виде

$$\Delta_{u_1} = S_{a_1} \Delta_{a_1} + S_{a_2} \Delta_{a_2} + S_{b_1} \Delta_{b_1} + S_{b_2} \Delta_{b_2} + S_{c_1} \Delta_{c_1} + S_{c_2} \Delta_{c_2} + S_K \Delta_K. \quad (9)$$

Получим необходимые производные для перехода к приращениям в выражении (9). Максимальная чувствительность стеганографической системы достигается вблизи точки разрыва функций декодирования сигнала. Заметим, что y_1 и y_2 представляют собой дроби. Поэтому знаменатель (8) не позволяет определить точку разрыва функции. Подставляя значения y_1 и y_2 в выражение (8) и выделяя знаменатель выражения, получим условия попадания в область разрыва:

$$\begin{cases} b_2 c_1 - b_1 c_2 = 0, \\ a_1 + a_2 + a_1 a_2 K = 0, \\ a_1 b_1 c_2 + a_2 b_2 c_1 + a_1 a_2 b_1 c_2 K = \sigma \\ \text{при } \sigma \rightarrow 0. \end{cases} \quad (10)$$

Первое условие позволяет исключить влияние сигнала u_1 на точку разрыва, второе условие дает возможность исключить влияние сигнала ξ на

точку разрыва. При выполнении первого и второго условий (10) третье условие обращается в ноль. Одновременное выполнение первого, второго и третьего условий (10) невозможно.

Так как σ стремится к нулю, приравняем второе условие к σ . В этом случае положение точки разрыва не зависит от сигнала u_1 , но продолжает зависеть от ξ . Перепишем (10) как

$$\begin{cases} c_2 = \frac{b_2 c_1}{b_1}, \\ a_2 = \frac{\sigma - a_1}{1 + a_1 K}, \text{ при } \sigma \rightarrow 0. \end{cases} \quad (11)$$

Определим значение ξ , при котором знаменатель функции восстановления равен нулю:

$$\xi = -\frac{b_1}{c_1}. \quad (12)$$

Найдем выражения коэффициентов чувствительности S в (9). Для этого используем производные по всем коэффициентам:

$$S_{a_1} = \frac{du_1}{da_1} = -\left[c_2 y_2 (c_1 y_1 - c_2 y_2 + y_1 y_2 (b_1 c_2 - b_2 c_1) + a_2 c_1 K y_1) \right] / \left(a_2 c_1 y_1 + a_1 c_2 y_2 \right)^2, \quad (13)$$

$$S_{a_2} = \frac{du_1}{da_2} = \left[c_1 y_1 (c_2 y_2 - c_1 y_1 + y_1 y_2 (b_2 c_1 - b_1 c_2) + a_1 c_2 K y_2) \right] / \left(a_2 c_1 y_1 + a_1 c_2 y_2 \right)^2, \quad (14)$$

$$S_{b_1} = \frac{du_1}{db_1} = \frac{c_2 y_1 y_2}{a_2 c_1 y_1 + a_1 c_2 y_2}, \quad (15)$$

$$S_{b_2} = \frac{du_1}{db_2} = -\frac{c_1 y_1 y_2}{a_2 c_1 y_1 + a_1 c_2 y_2}, \quad (16)$$

$$S_{c_1} = \frac{du_1}{dc_1} = \frac{c_2 y_1 y_2 (a_1 + a_2 - a_2 b_1 y_1 - a_1 b_2 y_2 + a_1 a_2 K)}{(a_2 c_1 y_1 + a_1 c_2 y_2)^2}, \quad (17)$$

$$S_{c_2} = \frac{du_1}{dc_2} = -\frac{c_1 y_1 y_2 (a_1 + a_2 - a_2 b_1 y_1 - a_1 b_2 y_2 + a_1 a_2 K)}{(a_2 c_1 y_1 + a_1 c_2 y_2)^2}, \quad (18)$$

$$S_K = \frac{du_1}{dK} = \frac{a_2 c_1 y_1}{a_2 c_1 y_1 + a_1 c_2 y_2}. \quad (19)$$

Зная коэффициенты преобразования (3), с помощью выражений (13)–(19) можно оценить чувствительность системы к вариации того или

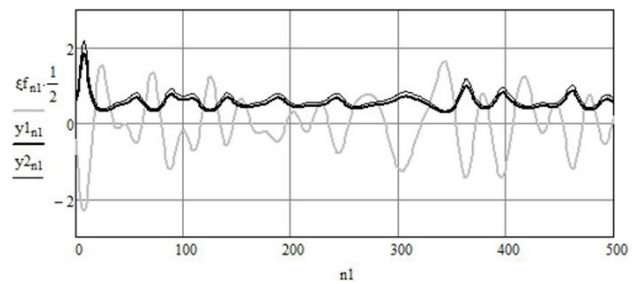


Рисунок 1. Диаграммы маскирующего сигнала и сигналов компонент контейнера

иного коэффициента и выбрать коэффициент, наиболее подходящий на роль ключевого коэффициента, который является секретным. Для наглядности определения, какой из коэффициентов наиболее эффективно использовать в качестве ключевого, определим характер искажения восстановленного полезного сигнала при внесении ошибки в тот или иной коэффициент. Для этого воспользуемся численным моделированием. Зададимся исходными значениями:

$$a_1 = 0,3; \quad b_1 = 2; \quad b_2 = 1,3; \\ c_1 = 0,3; \quad K = 1; \quad \sigma = 1 \cdot 10^{-9}.$$

С помощью (11) найдем a_2, c_2 :

$$a_2 = \frac{\sigma - a_1}{1 + a_1 K} = -0,231; \\ c_2 = \frac{b_2 c_1}{b_1} = 0,195.$$

Здесь важно отметить, что при формировании сигналов y_1 и y_2 используются дроби, которые, в свою очередь, также могут иметь точки разрыва. Приближение к точкам разрыва приводит к тому, что значение амплитуды компонент может стать недопустимо высоким. Заметим, если диапазон значений ξ не захватывает точку (12), знаменатель y_1 не будет равен нулю. При этом, с учетом условий (10) и (11) знаменатель y_2 также не будет равен нулю.

На рисунке 1 приведены зависимости маскирующего сигнала и сигналов передаваемых компонент y_1 и y_2 . Видно, что форма сигналов компонент сходна с формой маскирующего сигнала. При заданных параметрах системы коэффициенты корреляции компонент и полезного сигнала равны 0,38, что говорит об удовлетворительном сокрытии сигнала. При внесении в значения коэффициентов ошибки, равной $\delta = 1 \cdot 10^{-10}$, получены зависимости, приведенные далее. Заметим, что характер зависимостей при внесении ошибки в коэффициенты первой и второй компонент сходен. Поэтому на рисунках представлены только зависимости, полученные при внесении ошибки в коэффициенты первой компоненты.

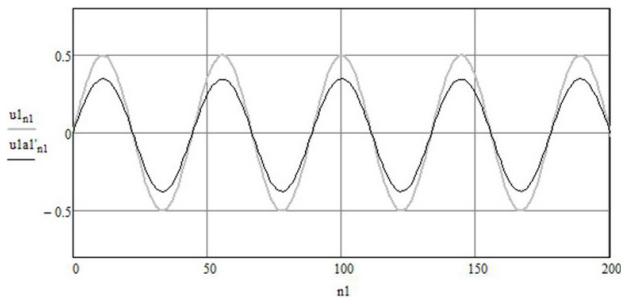


Рисунок 2. Исходный и декодированный информационные сигналы при ошибке в коэффициенте a_1

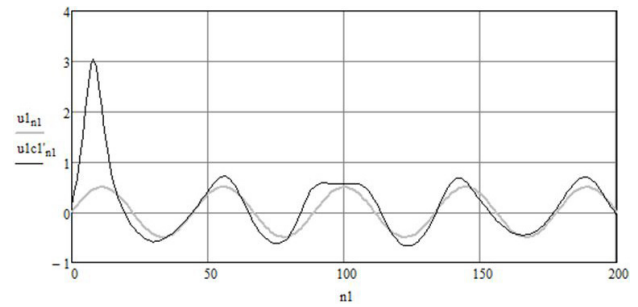


Рисунок 4. Исходный и декодированный информационные сигналы при ошибке в коэффициенте c_1

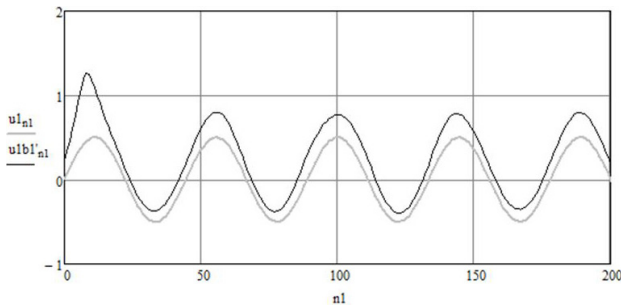


Рисунок 3. Исходный и декодированный информационные сигналы при ошибке в коэффициенте b_1

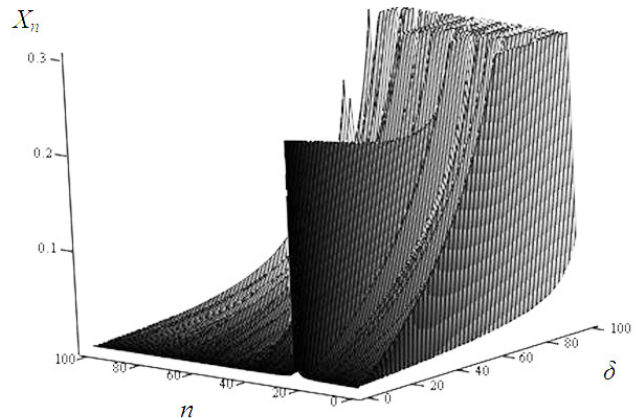


Рисунок 5. Зависимость спектра восстановленного сигнала от ошибки, внесенной в коэффициент c_1

На рисунке 2 приведены графики исходного и восстановленного сигналов при внесении ошибки в коэффициент a_1 . Видно, что в этом случае, помимо постоянной составляющей, имеет место искажение сигнала, однако отсутствует маскировка случайным сигналом. Следовательно, использование в качестве ключа коэффициентов a в данном алгоритме восстановления допустимо, но малоэффективно.

На рисунке 3 показаны графики исходного и восстановленного сигналов при внесении ошибки в коэффициент b_1 . Видно, что в этом случае, помимо изменения амплитуды, имеет место искажение сигнала, однако отсутствует маскировка случайным сигналом. Следовательно, использование в качестве ключа коэффициентов a в данном алгоритме восстановления допустимо, но малоэффективно.

На рисунке 4 построены графики исходного и восстановленного сигналов при внесении погрешности в коэффициент c_1 . Видно, что в этом случае информативный сигнал маскируется случайным сигналом, но при данных значениях ключа амплитуда случайного сигнала достаточно мала и слабо изменяется при изменении вносимой ошибки. Таким образом, использование коэффициента c в качестве ключа допустимо, но также малоэффективно.

При внесении ошибки в коэффициент K при декодировании появляется постоянная состав-

ляющая, которая легко исключается из сигнала. Следовательно, использование в качестве ключа коэффициента K в данном алгоритме восстановления исключается.

Рассмотрим влияние изменения ошибки значения коэффициента c на спектр восстановленного сигнала. На рисунке 5 приведена поверхность, показывающая изменение спектра восстановленного сигнала от ошибки $\delta = 1 \cdot 10^{-10}$ в значении коэффициента c_1 от изменения δ . Видно, что при нулевой ошибке спектр состоит из одной гармоники. При увеличении ошибки гармоника информативного сигнала скрывается в спектре случайного сигнала.

Отметим, что при $\sigma = 10^{-9}$ и ошибке значения $c_1 = 8 \cdot 10^{-10}$ гармоника информативного сигнала полностью скрывается в спектре маскирующего сигнала.

Выводы

1. Использование алгоритма маскировки сигнала, описываемого выражениями (3), является эффективным.

2. Использование коэффициентов c_1 и c_2 в качестве ключа обеспечивает наибольшую устойчивость системы.

3. Для обеспечения сокрытия полезного сигнала необходимо задавать достаточно малые значения коэффициента a_1 , что может привести к потере данных при округлении.

Литература

1. Шакурский М.В. Математические модели двухкомпонентных инвариантных стеганографических систем, использующих различные алгоритмы связи встраиваемых сигналов // Вопросы защиты информации. 2018. № 2 (121). С. 8–13.
2. Шакурский В.К., Шакурский М.В. Сжимающие отображения в инвариантных преобразованиях и системах стеганографии. Самара: СНЦ РАН, 2014. 159 с.
3. Шакурский М.В. Формирование контейнера для стеганографической системы на основе сжимающих отображений // Радиотехника. 2015. № 2. С. 134–139.
4. Шакурский М.В., Шакурский В.К. Стеганографическая система на основе сжимающих отображений // Вопросы защиты информации. 2015. № 2. С. 74–78.
5. Шакурский М.В., Шакурский В.К. Оценка стойкости двухкомпонентной стеганографической системы // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 11. С. 87–91.
6. Шакурский М.В., Шакурский В.К. Двухканальная система сокрытия информации с взаимным зашумлением каналов // Радиотехника. 2016. № 2. С. 96–99.
7. Патент РФ 2546307. Шакурский М.В., Шакурский В.К. Устройство сокрытия информации. № 2014123943/08, заявл. 10.06.2014, опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
8. Патент РФ 2546306. Шакурский М.В., Шакурский В.К. Способ скрытой передачи информации. № 2014123912/08, заявл. 10.06.2014, опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
9. Патент РФ 167074. Шакурский М.В. Устройство сокрытия информации. № 2016102913/08, заявл. 28.01.2016, опубл. 20.12.2016. Бюл. № 35.
10. Патент РФ 174362. Шакурский М.В., Шакурский В.К., Козловский В.Н., Сорочкин А.Г. Устройство сокрытия информации. № 2017109750, заявл. 23.03.2017, опубл. 11.10.2017. Бюл. № 29.

Получено 20.01.2020

Шакурский Максим Викторович, к.т.н., доцент кафедры теоретической и общей электротехники Самарского государственного технического университета. 443001, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 224. Тел. +7 927 772-98-73. E-mail: m.shakurskiy@gmail.com

TWO-COMPONENT STEANOGRAPHIC SYSTEM BASED ON RATIO OF LINEAR FUNCTIONS OF TWO SIGNALS USING AN ADDITIVE TYPE OF EMBEDDED SIGNAL COMMUNICATION

Shakurskiy M.V.

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: m.shakurskiy@gmail.com

The implementation of a two-component container can significantly expand the capabilities of known steganographic methods due to occurrence of new properties. A two-component container consists of two functions of two variables, one of which is a hidden signal and the other is a container signal. The article considers the functions of component formation based on the ratio of the linear functions of two signals. The expressions for forming the components and the expression for restoring the hidden signal are ratios and have break points. It requires analysis and determination of the conditions for the formation of the container. The article presents the results of the analysis of a two-component steganographic system with a non-linear container in the area of the break of the restore function of the informative signal. Key coefficients are determined from the point of view of ensuring the greatest sensitivity of the system to the error introduced in the value of the coefficient. An analysis is made of the influence of the error added into the key coefficient on the shape of the recovered signal.

Keywords: *two-component steganographic system, non-linear container, key coefficient, invariance to a masking signal*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.09

Shakurskiy Maxim Victorovich, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443001, Russian Federation; Assistant Professor of Department of Theoretical and General Electrical Engineering, PhD in Technical Science. Tel. +7 927 772-98-73. E-mail: m.shakurskiy@gmail.com

References

1. Shakurskiy M.V. Matematicheskiye modeli dvukhkomponentnykh invariantnykh steganograficheskikh sistem, ispol'zuyushchikh razlichnyye algoritmy svyazi vstraivayemykh signalov [Mathematical models of two-component invariant steganographic systems using various embedded signal coupling algorithms]. *Voprosy zashchity informatsii*, 2018, no. 2 (121), pp. 8–13. (In Russian).
2. Shakurskiy V.K., Shakurskiy M.V. *Szhimayushchiye otobrazheniya v invariantnykh preobrazovatelyakh i sistemakh steganografii* [Contraction Mapping in Invariant Transducers and Steganography Systems]. Samara: SNC RAN, 2014, 159 p. (In Russian).
3. Shakurskiy M.V. Formirovaniye konteynera dlya steganograficheskoy sistemy na osnove szhimayushchikh otobrazheniy [Forming a container for a steganographic system based on compressive mappings]. *Radiotekhnika*, 2015, no. 2, pp. 134–139. (In Russian).
4. Shakurskiy M.V., Shakurskiy V.K. Steganograficheskaya sistema na osnove szhimayushchikh otobrazheniy [Steganography system based on contraction mapping]. *Voprosy zashchity informatsii*, 2015, no. 2, pp. 74–78. (In Russian).
5. Shakurskiy M.V., Shakurskiy V.K. Otsenka stoykosti dvukhkomponentnoy steganograficheskoy sistemy [Evaluation of the durability of a two-component steganographic system]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 2015, no. 11, pp. 87–91. (In Russian).
6. Shakurskiy M.V., Shakurskiy V.K. Dvukhkanal'naya sistema sokrytiya informatsii s vzaimnym zashumleniyem kanalov [The dual-channel system of concealment of information with mutual channel noising]. *Radiotekhnika*, 2016, no. 2, pp. 96–99. (In Russian).
7. Patent RF. no. 2546307. Shakurskiy M.V., Shakurskiy V.K. *Ustrojstvo sokrytiya informacii* [Information hiding device]. No. 2014123943/08, decl. 10.06.2014, publ. 10.04.2015. Bul. no. 10.
8. Patent RF. no. 2546306. Shakurskiy M.V., Shakurskiy V.K. *Sposob skrytoj peredachi informacii* [The method of covert information transfer]. No. 2014123912/08, decl. 10.06.2014, publ. 10.04.2015. Bul. no. 10.
9. Patent RF. no. 167074. Shakurskiy M.V. *Ustrojstvo sokrytiya informacii* [Information hiding device]. No. 2016102913/08, decl. 28.01.2016, publ. 20.12.2016. Bul. no. №35.
10. Patent RF. no. 174362. Shakurskiy M.V., Shakurskiy V.K., Kozlovskiy V.N., Sorokin A.G. *Ustrojstvo sokrytiya informacii* [Information hiding device]. No. 2017109750, decl. 23.03.2017, publ. 11.10.2017. Bul. no. 29.

Received 20.01.2020

УДК 004.725.5

КОРПОРАТИВНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ: ПРОЦЕДУРЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ

Василенко К.А.¹, Золкин А.Л.², Абрамов Н.В.³, Курганов Д.О.³

¹ Владивостокский государственный институт экономики и сервиса, Владивосток, РФ

² Волжский государственный университет водного транспорта (Самарский филиал), Самара, РФ

³ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, РФ

E-mail: k2857@mail.ru, alzolkin@list.ru, nikolay.abramov1990@mail.ru, kurganov_vl@mail.ru

В статье рассматриваются проблемы защиты персональных данных и информации от злоумышленников, способы аутентификации и идентификации в корпоративных сетях. Приведены различные методы аутентификации и идентификации в компьютерных сетях. Авторами проведен их сравнительный анализ, выделены особенности и недостатки в различных сферах использования, при этом проанализированы риски и возможный ущерб от нарушения конфиденциальности данных. Величина нарушений конфиденциальности, доступности и целостности информации с каждым годом все больше растет, вместе с тем растет и нанесенный ущерб, что вызывает необходимость у специалистов информационной безопасности все тщательней и углубленно вести анализ всех рисков незаконного доступа к информации, а затем прибегать к внедрению современных средств аутентификации, использовать новые методы шифрования, все чаще генерировать новые пароли доступа к системе. На сегодняшний день существует множество способов и методов аутентификации, но специфика их применения зависит от расположения хранилища информации и ее ценности. Между тем методы аутентификации не являются безупречными методами защиты, они также уязвимы, иногда многое зависит от навыков злоумышленников.

Ключевые слова: корпоративные вычислительные сети, пароли, токены, аутентификация, идентификация, информационная безопасность, алгоритм действия

Введение

Корпоративные вычислительные сети стали иметь немаловажное значение для аналитиков информационного рынка, поскольку в настоящее время прослеживается тенденция нарастающего развития угроз информационной безопасности. Это связано с распространением услуг мобильного банкинга и управления счетами, доступностью средств связи (смартфоны, коммуникаторы, планшеты) и персональных данных, накоплением электронных ресурсов, широким использованием облачных вычислений, стремлением российских компаний сохранить коммерческую тайну и нежеланием приглашать соответствующих специалистов, необходимостью доработки и настройки универсальных «коробочных» решений.

Аутентификация и идентификация как пути доступа к системе сети

Процедуры идентификации и аутентификации неразрывно связаны друг с другом. Они обязательно проводятся при каждом входе в систему или возобновлении работы без выхода из системы. Идентификация – это присвоение индивидуальных имен или номеров. Аутентификация – подтверждение подлинности идентификации субъекта системы. Авторизация – процедура предоставления определенных прав доступа к ресурсам системы после прохождения им процедуры аутентификации. Для каждого субъекта в системе определяется набор прав, которые он может использовать при обращении к ее ресурсам.

В данном случае под субъектом подразумевается любой участник безопасности, например учетная запись пользователя, созданная в службе каталога AD DS. Для того чтобы обеспечить управление и контроль над данными процедурами, дополнительно используются процессы администрирования и аудита.

Администрирование представляет собой процесс управления доступом к ресурсам системы. Этот процесс включает в себя:

- создание идентификатора (создание учетной записи пользователя) в системе;
- управление данными пользователя, применяемыми для его аутентификации (смена пароля, издание сертификата и т. п.);
- управление правами доступа к ресурсам системы.

Аудит – это процесс контроля доступа к ресурсам системы, включающий протоколирование действий при доступе к ресурсам системы для обеспечения возможности обнаружения попыток несанкционированных действий.

Для подтверждения своей подлинности необходимо предоставить некоторую секретную информацию. Существуют различные виды такой информации, которые можно обозначить одним термином – «фактор аутентификации».

Фактор аутентификации – определенный вид информации, предоставляемый субъектом системе при его аутентификации. Данная процедура может быть реализована с использованием одного или нескольких аутентификационных факторов. Например, у пользователя может быть запрошен пароль либо потребуется предоставить отпечаток пальца.

Однофакторная аутентификация – процесс, в котором используется только один тип аутентификационных факторов. Многофакторная аутентификация – процесс, в котором применяется несколько факторов. Например, при регистрации пользователь должен предоставить смарт-карту и пароль.

Выбор метода и средств аутентификации в сети и его рациональное использование

Наиболее распространено использование сочетания двух типов аутентификационных факторов. Характерным примером является работа с банкоматом. Нам требуется одновременно использовать карту с магнитной полосой и PIN-код. Многие руководители предприятий не уделяют должного внимания защите своих устройств и информации, которая находится на них. Подобная халатность зачастую приводит к финансовым убыткам в результате утечки информации. В настоящее время используют три основных метода однофакторной аутентификации: парольная аутентификация; биометрическая аутентификация; аутентификация с помощью токенов (смарт-карт) [2]. Также используются комбинации выше перечисленных методов аутентификации, называемые двухфакторной аутентификацией.

Парольная аутентификация – не самый надежный способ проверки подлинности пользователя. Как правило, люди используют пароли, которые легко запоминаются. Если же пароль достаточно надежный и состоит из большого количества символов, то пользователи часто пишут такие пароли на стикерах и приклеивают их к монитору, столу или внутренней части клавиатуры. Получить такой пароль не представляет сложности [3].

Политика информационной безопасности предлагает менять восьмизначный пароль минимум раз в месяц. Запоминать так часто случайным образом сгенерированный пароль довольно сложно. Забыв нужную последовательность символов, пользова-

тель обращается к администратору, который присылает пароль. Данная процедура также небезопасна, потому что пароль можно перехватить по сети. Чтобы этого не произошло, сообщение с паролем нужно зашифровать или передавать по защищенному каналу. Все это ведет к дополнительным затратам. Во многих фирмах звонка администратору недостаточно для получения пароля. Необходима служебная записка или личный визит администратора, что, в свою очередь, также ведет к потере времени и финансовым затратам. Можно сделать вывод, что метод парольной аутентификации неэффективен в силу «человеческого фактора» [4].

В последнее время широкое распространение получили так называемые токены, USB-ключи или смарт-карты. Данный метод аутентификации может реализовываться с помощью: генерации одно-разовых паролей, хранения в памяти устройства паролей, ключей шифрования, цифровых сертификатов. Помимо пароля пользователю необходимо воспользоваться устройством. В зависимости от потребностей внешний вид аппаратных средств может быть разным, для контроля доступа к персональным компьютерам или помещениям используется смарт-карта со встроенной RFID-меткой [5].

Наиболее эффективным в плане защищенности будет использование смарт-карт и USB-ключей, такой идентификатор тяжелее украсть, и его потеря откроется быстрее, чем кража пароля. Помимо этого, в таких устройствах используется двухфакторная аутентификация, что значительно повышает надежность системы, но следует учитывать и возможность подмены сервера аутентификации [6].

В корпоративных вычислительных сетях биометрическими системами стали пользоваться относительно недавно. Это достаточно дорогие системы, поэтому немногие организации могут приобрести и администрировать их.

Биометрическая аутентификация – надежный способ аутентификации, но не исключены ситуации, при которых данный идентификатор может быть украден или испорчен. Отпечатки носителя идентификатора можно украсть, например, со стакана, дверной ручки и т. д.

Алгоритм действия биометрической аутентификации [7].

1. Биометрическая система записывает образец биометрических черт пользователя с помощью считывателя.

2. С помощью программного алгоритма извлекаются индивидуальные черты.

3. Вместе с другими идентификаторами в базе данных сохраняются и черты.

4. Для аутентификации необходимо предъявить оригинал биометрической черты, который

с помощью алгоритма сопоставления сравнивается с данными из базы данных.

5. Система открывает доступ, только если рейтинг соответствия превысил выставленный ранее порог.

Биометрическая аутентификация построена на принципе считывания анатомических и поведенческих особенностей человека: отпечатков пальцев (ладони); сканирования сетчатки глаза (радужной оболочки глаза); геометрии и термограммы лица; по голосу; по клавиатурному подчерку. Аутентификация по отпечатку пальца происходит с помощью специальных сканеров. Аутентификация по сетчатке и радужной оболочке считается наиболее отказоустойчивой с минимальными ошибками, но долгое время не использовалась в силу своей дороговизны и сложности [8].

Одним из наиболее надежных способов аутентификации является сканирование радужной оболочки глаза. В качестве источника для идентификации используется ткань глаза, которая генетически у всех индивидуальна. В ходе исследований учеными-медиками было установлено, что при заболеваниях глаза на радужной оболочке образуются пигментные пятна. Чтобы решить данную проблему, в сканерах используют черно-белые изображения. Фокусировка глаза происходит с помощью регистрирующей аппаратуры на расстоянии до одного метра. Далее аппарат формирует примерно 250 точек идентификации на роговице. Аутентификация происходит путем сравнения отсканированных точек с эталоном, который хранится в базе.

Аутентификация по геометрии и термограмме лица основана на распознании человека по его внешним характеристикам (форме носа, черепа, чертам лица) и разделяется на две категории: 2D- и 3D-распознавание лица. Наиболее эффективным методом считается 3D-распознавание лица. Аутентификация по термограмме лица основана на сканировании инфракрасным лучом кровеносных сосудов на лице и создании термокарты. Главное преимущество данного метода заключается в том, что система сосудов не зависит от температуры тела и остается неизменной, даже если были применены методы конспирации или сделана пластическая операция.

Аутентификация по голосу происходит путем сравнения голоса говорящего с данными из базы. Существует несколько методов аутентификации: текстонезависимая; текстозависимая по статической парольной фразе; текстозависимая по динамической парольной фразе, а также

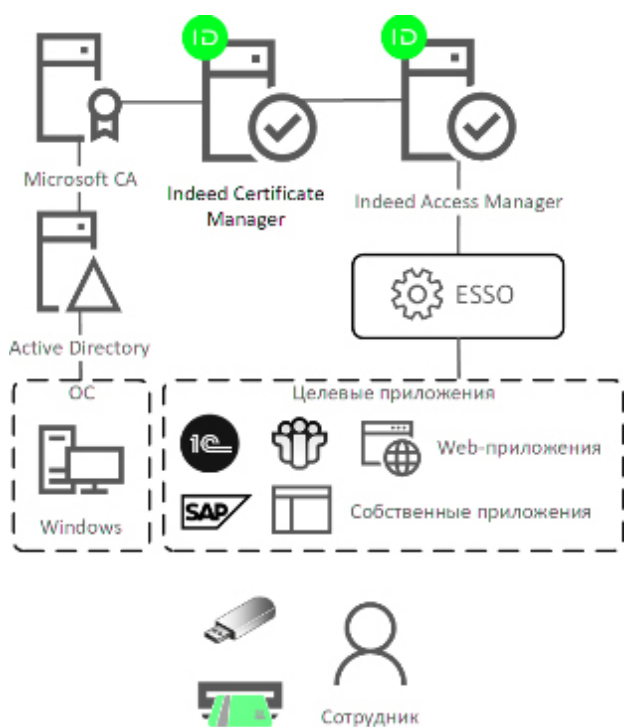


Рисунок. Двухфакторная аутентификация в операционных системах

по рукописному и клавиатурному подчерку. При разработке систем аутентификации по рукописному подчерку необходимо учитывать внешние факторы, влияющие на состояние человека. Поэтому допускается большая погрешность, что увеличивает вероятность взлома или подделки идентификатора.

Хранение биометрических данных в соответствии с Федеральным законом «О персональных данных» в соответствующей базе данных достаточно дорого, что также является минусом.

Двухфакторная аутентификация – это совокупность двух или даже трех факторов, чаще всего это пары: что-то знать и что-то иметь; что-то знать и кем-то являться. Пример работы данного метода представлен на рисунке. С точки зрения безопасности такой метод более эффективен, чем использование одиночных методов аутентификации.

Обеспечение единоличного доступа пользователя к его учетной записи, притом что ключ может быть известен кому-то еще из злоумышленников, может гарантировать именно двухфакторная аутентификация. В данном случае она выступает как дополнительная стадия безопасности ID. Определив перечень устройств, которым доверяет пользователь, двухфакторная аутентификация может вести синхронизацию между данными устройствами по одной учетной записи, обеспечив безопасный вход в каждое из них. Например, введение пароля и

многозначного кода в некоторых гаджетах являются основными двумя видами информации при первом входе на новой технике.

При этом отображение как пароля, так и кода будет автоматически воспроизводиться на включенной в перечень доверенной технике. Как только будет введен код, перечень доверенных устройств будет пополнен новой техникой. Если вход окажется выполненным, то введение заново нового кода подтверждения уже не понадобится, его запрос на устройстве будет отсутствовать, пока пользователь не произведет выход либо данные в технике не будут отформатированы, либо пользователю потребуется внезапная смена пароля. При этом возможен вход через Internet, однако при данных условиях стоит признать браузер достоверным и доверенным, в результате чего при следующем входе с технического устройства запрос на код подтверждения безопасности не появится.

Для того чтобы устройство признать доверенным, это должна быть такая техника, у которой для пользователя должны быть идентифицированы и известны все факты ее принадлежности, в чьих интересах она работает. Однако главное направление данного устройства при свойстве доверенности – это возможность идентификации личности, например, путем отображения и установления кода входного подтверждения при эксплуатации другой доверенной техники или браузера [9].

Также стоит обратить внимание на значимость номера телефона, который стоит признавать доверенным. Этот номер должен выполнять функции получения и отображения специальных кодов подтверждения, при этом использовать текстовые сообщения, различные рассылки идентификационных данных, автоматические телефонные вызовы. Двухфакторная аутентификация предусматривает подтверждение как минимум одного достоверного и доверенного номера телефона, только тогда будет сформирован путь доступа к данным.

Кроме того, наличие дополнительного доверенного номера телефона, к которому пользователь будет иметь доступ, является также применимым вариантом аутентификации в рамках безопасности. Это может быть как домашний телефон, так и телефон друзей и близких, членов семьи, то есть лиц, которым пользователь доверяет. Обычно дополнительный доверительный номер используется при временном отсутствии доступа к основному номеру или вообще ко всей доверенной синхронизированной технике.

Сам код подтверждения можно определить как временный шифр, который с целью входа отправляет пользователь на доверенную технику либо на доверенный телефонный номер, при этом вход должен быть первичным, с использованием идентификатора ID он также может быть осуществлен не на самом устройстве, а через браузер.

VPN-сети и Internet-ресурсы различных видов чаще всего применяют для своих путей доступа такие методы, как смарт-карты, USB-ключи, SMS-сообщения, email-сообщения, в которых присутствует наличие специального кода аутентификации.

Также в корпоративном секторе иногда используются генераторы кодов (в виде брелока с кнопкой и дисплеем небольшого размера), технология SecureID и некоторые другие специфические методы, характерные в основном для данного сектора. Есть и менее современные интерпретации: например, так называемые TAN-пароли (Transaction Authentication Number – аутентификационный номер транзакции). К примеру, данный метод используется при обслуживании клиентов какого-нибудь не самого прогрессивного банка: при подключении интернет-банкинга клиенту выдается документ с заранее сформированным списком одноразовых паролей, которые вводятся один за другим при каждом входе в систему и/или совершении транзакции [10]. При этом банковская карта и PIN тоже формируют систему двухфакторной аутентификации: карточка – «ключ», которым вы владеете, а PIN-код к ней – «ключ», который пользователь запоминает.

С тем существует обязательная зависимость между специальным клиентским программным обеспечением и многими техническими продуктами, имеющими функцию многофакторной аутентификации. Чтобы войти в сеть, программистами были разработаны специальные инсталляционные программные продукты, позволяющие использовать смарт-карту либо токен с условием установки на персональный компьютер нескольких подобных программ. Данные пакеты программ ведут ревизионный контроль и проверку на наличие конфликтов между приложениями и техническими устройствами, а также осуществлению специальные обновлений [11]. Но чаще всего доступ к устройству производится при использовании веб-страниц. С другими программными решениями многофакторной аутентификации, такими как «виртуальные» токены или некоторые аппаратные токены, ни одно ПО не может быть установлено непосредственными пользователями.

Заключение

Выбор средств аутентификации и других дополнительных мер защиты важно основывать на анализе потенциальных потерь в той или иной ситуации. Если анализ рисков показывает, что возможный ущерб от нарушения конфиденциальности, целостности или доступности информации достаточно велик, то полагаться на пароли в этих ситуациях – удовольствие гораздо более дорогое, чем закупка и внедрение современных средств двухфакторной аутентификации. Несмотря на большое многообразие методов аутентификации, всегда присутствует хотя бы маленький процент уязвимости. Обусловлено это непрерывным и стихийным явлением развития информационных технологий, модернизацией техники и компьютеризацией данных.

Литература

1. Береза Н.В. Современные тенденции развития мирового и российского рынка информационных услуг // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/758> (дата обращения: 22.12.2019).
2. Бондарев В.В. Введение в информационную безопасность автоматизированных систем: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 255 с.
3. Панкратов С.А. Использование графической информации для защиты программного и информационного обеспечения // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/792> (дата обращения: 22.12.2019).
4. Уилсон Э. Мониторинг и анализ сетей. Методы выявления неисправностей. М.: Лори, 2016. 480 с.
5. Аладышев О.С., Овсянников А.П., Шабанов Б.М. Развитие корпоративной сети Межведомственного суперкомпьютерного центра. URL: <https://vbakanov.ru/methods/1441> (дата обращения: 22.12.2019).
6. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). М.: Физматлит, 2017. 264 с.
7. Khalil H.K. Nonlinear Systems. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2016. 766 p. URL: <https://en.bookfi.net/book/1417228> (дата обращения: 22.12.2019).
8. Melin P., Castillo O. Modeling, Simulation and Control of Non-linear Dynamical Systems:

- An Intelligent Approach Using Soft Computing and Fractal Theory. Boca Raton: Taylor & Francis, 2017. 265 p.
9. Смирнов А.В. Руководство по захвату сетевого трафика. URL: <https://blog.packet-foo.com/2016/11/the-network-capture-playbook-part-3-network-cards> (дата обращения: 22.12.2019).
10. Perlman R. Interconnections: Bridges & Routers. Boston: Addison-Wesley, 2016. 245 p.
11. Oggerino C. High Availability Network Fundamentals. Indianapolis: Cisco Press, 2017. 327 p.

Получено 04.02.2020

Василенко Константин Александрович, преподаватель Колледжа сервиса и дизайна Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 690092, Российская Федерация, Приморский край, г. Владивосток, ул. Добровольского, 20. Тел. +7 964 453-06-36. E-mail: k2857@mail.ru

Золкин Александр Леонидович, к.т.н., преподаватель кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин Волжского государственного университета водного транспорта (Самарский филиал). 443099, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 62-64. Тел. +7 960 825-68-49. E-mail: alzolkin@list.ru

Абрамов Николай Викторович, студент Дальневосточного федерального университета (ДВФУ). 690920, Российская Федерация, Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел. +7 914 373-91-16. E-mail: nikolay.abramov1990@mail.ru

Курганов Даниил Олегович, студент ДВФУ. 690920, Российская Федерация, Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел. +7 999 059-37-74. E-mail: kurganov_vl@mail.ru

ENTERPRISE DATA PROCESSING NETWORKS: AUTHENTICATION AND IDENTIFICATION PROCEDURES

Vasilenko K.A.¹, Zolkin A.L.², Abramov N.V.³, Kurganov D.O.³

¹ *Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation*

² *Volga State University of Water Transport (Samara branch), Samara, Russian Federation*

³ *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation*

E-mail: k2857@mail.ru, alzolkin@list.ru, nikolay.abramov1990@mail.ru, kurganov_vl@mail.ru

This article is dedicated to the problem of personal data and information protection from intruders, as well as to methods of authentication and identification in the enterprise data processing networks. Different methods of authentication and identification in data processing networks are given in the article. The authors have conducted the comparative analysis of these methods, have highlighted the features and weaknesses of these methods in different fields of application. In addition to the above the authors have conducted the risks analysis and analyzed the possible losses in case of confidentiality compromise. Every year, the amount of violations in data confidentiality, availability and integrity is growing as well as the amount of caused losses. These facts make cyber security specialists conduct more careful and deep analyses of all risks of unauthorized access to the information and then to introduce modern authentication means, use new coding methods and increase the frequency of generation of the new system access passwords. Today, there are many authentication means and methods, but the specifics of their application depend on the location of the information storage and its value. Meanwhile, the authentication methods are not flawless methods of protection, they are also vulnerable and success of their hack depends on the skills of the intruders.

Keywords: *enterprise data processing networks, passwords, tokens, authentication, identification, information safety, algorithm*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.10

Vasilenko Konstantin Alexandrovich, Service and Design College of the Vladivostok State University of Economics and Service, 20, Dobrovolskogo Street, Vladivostok, Primorsky Krai, 690092, Russian Federation; Highest Category Lecturer. Tel. +7 964 453-06-36. E-mail: k2857@mail.ru

Zolkin Alexander Leonidovich, Volga State University of Water Transport (Samara branch), 62-64, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443099, Russian Federation; PhD in Technical Science, Lecturer of Natural-Science and General Professional Disciplines Sub-Faculty. Tel. +7 960 825-68-49. E-mail: alzolkin@list.ru

Abramov Nikolai Viktorovich, Far Eastern Federal University, 8, Sukhanova Street, Vladivostok, Primorsky Krai, 690092, Russian Federation; Student. Tel. +7 914 373-91-16. E-mail: nikolay.abramov1990@mail.ru

Kurganov Daniil Olegovich, Far Eastern Federal University, 8, Sukhanova Street, Vladivostok, Primorsky Krai, 690092, Russian Federation; Student. Tel. +7 999 059-37-74. E-mail: kurganov_vl@mail.ru

References

1. Bereza N.V. Sovremennye tendentsii razvitiya mirovogo i rossiyskogo rinka informatsionnykh uslug [Current trends in the development of the global and Russian markets of information services]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2012, № 2. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/758> (accessed: 22.12.2019). (In Russian).
2. Bondarev V.V. *Vvedenie v informatsionnuyu bezopasnost avtomatizirovannykh sistem: uchebnoe posobie* [Introduction to Information Security of Automated System: Study Guide]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2017, 255 p. (In Russian).
3. Pankratov S.A. Ispolzovanie graficheskoy informatsii dlya zaschiti programnogo i informatsionnogo obespecheniya [Use of graphical information for protection of the software and data intelligence]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2012, № 2. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/792> (accessed: 22.12.2019). (In Russian).
4. Ed Willson. *Monitoring i analiz setey. Metodi viyavleniya neispravnostey* [Network Monitoring and Analysis. Fault Identification Methods]. Moscow: Lori, 2016, 480 p. (In Russian).
5. Aladishev O.S., Ovsyannikov A.P., Shabanov B.M. *Razvitie korporativnoy seti Mezhhvedomstvennogo superkomputernogo centra* [Development of enterprise network of Interagency supercomputer center] URL: <https://vbakanov.ru/methods/1441> (accessed: 22.12.2019). (In Russian).
6. Gaiduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya: (polinomialnii podhod)* [Theory and Methods of Analytical Synthesis of Automatic Control Systems (Polynomial Approach): Monograph]. Moscow: Fizmatlit, 2017, 264 p. (In Russian).
7. Khalil H.K. *Nonlinear Systems. 3rd ed.* Upper Saddle River: Prentice Hall, 2016, 766 p. URL: <https://en.bookfi.net/book/1417228> (accessed: 22.12.2019).
8. Melin P., Castillo O. *Modeling, Simulation and Control of Non-linear Dynamical Systems: An Intelligent Approach Using Soft Computing and Fractal Theory*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2017, 265 p.
9. Smirnov A.V. *Rukovodstvo po zahvatu setevogo trafika* [Network Traffic Capture Guide]. URL: <https://blog.packet-foo.com/2016/11/the-network-capture-playbook-part-3-network-cards> (accessed: 22.12.2019). (In Russian).
10. Perlman R. *Interconnections: Bridges & Routers*. Boston: Addison-Wesley, 2016, 245 p.
11. Oggerino C. *High Availability Network Fundamentals*. Indianapolis: Cisco Press, 2017, 327 p.

Received 04.02.2020

ПОИСК ПРОПОРЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Иващенко А.В.¹, Диязитдинова А.Р.², Кривошеев А.В.¹, Никифорова Т.В.¹

¹ Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: anton-ivashenko@yandex.ru

Рассматривается проблема поиска оптимального баланса в распределении функций на современном предприятии между персоналом и интеллектуальными компонентами систем управления и поддержки принятия решений. Предложена модель взаимодействия программных агентов и лиц, принимающих решения (актеров), которая предназначена для определения наилучшего соотношения между несколькими агентами и исполнителями с точки зрения синхронизации их фокуса, а также для выработки наиболее эффективных стратегий профессионального развития сотрудников предприятия. Даны рекомендации по оптимизации пропорции естественного и искусственного интеллекта в прикладных задачах с учетом влияния человеческого фактора в условиях активного внедрения интеллектуальных технологий в рамках построения цифровой экономики. Решение данной проблемы проиллюстрировано на примере организации сбора и обработки данных приборов учета электроэнергии в определенной информационно-коммуникационной системе, реализующей функции, выполняемые операторами с помощью мобильных устройств связи и интеллектуальным программным обеспечением на базе искусственной нейронной сети.

Ключевые слова: *цифровая экономика, искусственный интеллект, интегрированная информационная среда, человеко-машинное взаимодействие*

Введение

Развитие цифровой экономики предусматривает активное и повсеместное внедрение систем искусственного интеллекта, роботизацию и виртуализацию взаимодействия в интегрированной информационной среде. Современные системы распознавания изображений, текста и голоса, средства автоматического сбора и накопления информации, технологии анализа больших данных позволяют заменить человека его цифровым двойником. Учитывая более высокую надежность и производительность программно-аппаратных комплексов, такой подход приведет к тотальному перестроению организационной структуры предприятий и, как следствие, переосмыслению оставшимся персоналом своей роли в бизнесе.

Следует отметить, что эта роль не так мала. Высокая изменчивость бизнес-процессов, способность к адаптации к внешним изменениям, которую может обеспечить профессиональный и мотивированный персонал предприятия, пока недоступна интеллектуальным системам, требующим высоких временных и материальных затрат на перенастройку и внедрение. Например, системы распознавания изображений, построенные на базе искусственных нейронных сетей, предполагают скрупулезный подбор и разметку обучающей выборки. При этом свойство адаптации совершенно необходимо для сохранения конкурентоспособности современного предприятия.

Таким образом, актуальной является проблема поиска оптимального баланса в распределении функций на современном цифровом предприятии между персоналом и интеллектуальными компонентами систем управления и поддержки принятия решений. Кроме этого, необходимо производить адекватный прогноз развития интеллектуальных технологий и обеспечить выработку наиболее эффективных стратегий профессионального развития сотрудников предприятия в цифровых социальных и экономических системах. В данной статье приводится модель для описания и постановки такого рода задач в прикладных приложениях и предложены рекомендации по ее реализации на практике.

Обзор существующих разработок

Современные разработки в области искусственного интеллекта и дополненной реальности [1; 2] предоставляют широкие возможности в различных сферах цифровой экономики. Наиболее значимые результаты достигаются в области визуализации данных и поддержки принятия решений, направленных на развитие существующих приложений новыми возможностями сбора, обработки и управления данными. Реализуя эти технологии, традиционные компании превращаются в компании с цифровым мышлением, идущие по пути цифровой трансформации с учетом

современных аспектов применения информационных технологий [3]. При этом большие надежды связываются с внедрением искусственного интеллекта в робототехнике, направленным на замену операторов автономными техническими устройствами. Несмотря на успех решений такого рода в промышленных приложениях, проблема взаимодействия людей и роботов в общем пространстве все еще остается открытой.

Совместная работа программно-аппаратных компонентов с автономным поведением и искусственным интеллектом и персонала предприятия идентифицируется как смешанный интеллект. Данные возможности широко рассматриваются в коллаборативной робототехнике [4]. Большинство разработчиков прилагают усилия, чтобы избежать такого взаимодействия или сократить его до минимально необходимых операций, связанных с запуском, настройкой и обслуживанием оборудования. Другие вводят ограничения по времени и пространству (например, размещают роботизированное оборудование в специальных закрытых помещениях или боксах).

Однако дальнейшее развитие цифровой экономики приведет к необходимости нарушить строгое разделение сфер деятельности. Сотрудникам цифровых предприятий придется иметь дело с роботами, а производственная система, в которой ранее человек был главным игроком, при этом превращается в комбинированную среду, в которой человек работает в сочетании с автономными комплексами, устройствами и программами. Поэтому роль искусственного интеллекта в различных сферах жизни человека значительно возрастет.

Проблемы построения смешанного интеллекта тесно связаны с его определением. Когнитивные вычисления [5], основа искусственного интеллекта, подразумевают симуляцию активности человеческого мозга, которая позволяет машинам обрабатывать информацию, изучать мир и анализировать события, подобно людям, возможно, более продуктивно. Искусственный интеллект эффективно используется в таких областях, как производство, электроэнергетика, бизнес, медицина, образование, логистика, торговля, банковское дело и т. д.

Концепция «Индустрия 4.0» [6; 7] объявляет взаимодействие человека и искусственного интеллекта одной из основных целей. Взаимодействие означает способность машин, устройств, датчиков и людей соединяться и общаться друг с другом через **Internet вещей** или **Internet людей**. Эти процессы обладают свойством само-

организации, в связи с чем в распределенных сетях автономных сущностей необходимо применять методы децентрализованного управления. Это обеспечивает способность киберфизических систем принимать решения самостоятельно. Для реализации такого рода систем имитационного моделирования и управления широко применяются мультиагентные технологии [8; 9].

Практическое использование мультиагентных моделей базируется на следующих основных предположениях. Во-первых, программные агенты должны соответствовать реальным активным субъектам по целям, ограничениям и логике взаимодействия. Это возможно для простых агентов, когда логику принятия решений можно задавать в виде правил в базе знаний. В случае введения более сложных агентов, таких как, например, интернет-боты, применение данных моделей затрудняется. Во-вторых, сложно обеспечить эффективное взаимодействие компьютерных агентов и действующих лиц в реальном времени из-за необходимости координировать это взаимодействие и обрабатывать непредсказуемые отклонения от бизнес-процессов, вызванные влиянием человеческого фактора.

Для реализации баз знаний используют механизмы семантического описания предметной области в форме онтологии [10; 11]. Онтология может быть реализована в форме семантической сети, состоящей из понятий (концептов), атрибутов, отношений и правил и описывающей ситуацию с predetermined точки зрения. Онтологии лиц, принимающих решения, обычно различаются в силу субъективного характера восприятия, хотя в определенной проблемной области акторы склонны находить консенсус. В связи с этим в системах поддержки принятия решений обычно удается построить такую онтологию, которая может рассматриваться участниками взаимодействия как обезличенная и объективная. Онтологии компьютерных агентов могут быть формально predetermined и использованы для спецификации конкретной логики их поведения.

В некотором смысле эти проблемы решаются в рамках субъектно-ориентированного подхода к управлению бизнес-процессами (S-BPM), который рассматривает процесс как совместную работу нескольких субъектов, организованных посредством структурированной коммуникации [12; 13]. Эти модели обеспечивают синхронизацию компьютерных агентов и персонала организации. Тем не менее они по-прежнему ориентированы в первую очередь на принятие решений человеком, что становится недостаточ-

ным в случае преобладания роботов над людьми-операторами.

Существующий опыт в области построения человеко-компьютерных интерфейсов прикладных приложений цифровой экономики [14; 15] позволил обобщить способы координации программных агентов и персонала предприятия и предложить новую модель определения роли человека в пространстве смешанного интеллекта. Модель предназначена для решения двух задач: определить рациональное соотношение искусственного интеллекта и персонала в условиях смешанного взаимодействия и выявить наилучшие области применения данных решений с учетом человеческого фактора.

Модель смешанного интеллекта

Модель взаимодействия программных агентов и лиц, принимающих решения (актеров), предназначена для определения наилучшего соотношения между несколькими агентами и исполнителями. Модель основана на онтологическом подходе, который позволяет определять семантику объектов, оперируемых в смешанной среде, с помощью дескрипторов:

$$\omega(x_q, t_q) = \left\{ \left\{ \tau_{q,l}, w_{q,l} \right\}, \left\{ p(x_{q'}) \right\}, t_q \right\}, \quad (1)$$

где $\tau_{q,l}$ – тег (ключевое слово); $w_{q,l}$ – вес тега, $p(x_{q'})$ – определяет отношение к другому семантическому дескриптору $x_{q'}$; t_q – время актуальности дескриптора.

С помощью концептов можно специфицировать множество классов реальных объектов, с которыми необходимо работать. Это могут быть компоненты сложного оборудования, технологические операции или задания в рамках определенного бизнес-процесса. Атрибутивное описание таких концептов можно произвести с помощью взвешенных тегов, а зависимости описать с использованием отношений.

Для определения степени семантической близости таких классов предлагается ввести соответствующий критерий. Так, объекты x_q и $x_{q'}$ онтологически близки, когда

$$\begin{aligned} P(\omega(x_q, t_q), \omega(x_{q'}, t_{q'})) &= \\ &= \sum_{q,l} \left| w_{q,l} - \sum_{q',l'} w_{q',l'} \delta(\tau_{q,l} = \tau_{q',l'}) \right| + \\ &+ \sum_{q',l'} \left| w_{q',l'} - \sum_{q,l} w_{q,l} \delta(\tau_{q,l} = \tau_{q',l'}) \right| \leq \Delta W. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим интегрированную информационную среду цифрового предприятия, которая включает в себя персонал, представленный акто-

рами a_i , и множество программных агентов b_j . Особенности восприятия акторов и агентов (их онтологии) описываются с помощью семантических дескрипторов $\omega(a_i)$ и $\omega(b_j)$ соответственно.

Типовое предприятие реализует стандартизированные бизнес-процессы, в соответствии с которыми действующие лица и агенты должны выполнять определенные задачи или действия в определенные моменты времени. Поэтому бизнес-процесс может быть описан с помощью сценария:

$$\varepsilon_r = \left\{ s_k(d_k, t_k, \Delta t_k, \omega(d_k, t_k)) \right\}, \quad (3)$$

где $\omega(d_k, t_k)$ – требование к исполнителю; t_k – время начала операции; Δt_k – его нормативная продолжительность.

Для повторяющихся операций могут быть заданы шаблоны (паттерны), используемые для генерации новых состояний для каждого нового заказа. Агенты и акторы считаются взаимозаменяемыми, поэтому здесь не учитывается разница между нормативной продолжительностью выполнения задачи сотрудником или роботом, а также разницей в затратах.

Для запуска операции (задачи) в работу ей должен быть определен соответствующий исполнитель, а для начала выполнения должно быть задано время. Обозначим событие назначения как

$$e'_{k,i} = e'_{k,i}(d_k, a_i, t'_{k,i}, \Delta t'_{k,i}, \omega(a_i, t'_i)), \quad (4)$$

где $\omega(a_i, t'_i)$ – последовательность семантических дескрипторов, описывающая, как фокус (внимание) актора меняется со временем. События назначения операций агентам задаются аналогично.

Для своевременной обработки входящих задач (операций) необходимо обеспечивать их ресурсами, распределив их между исполнителями: акторами или агентами. Учитывая автономное поведение исполнителей, а также для сохранения возможности их самоорганизации эту задачу нельзя решать централизованно. Необходимо обеспечить такие механизмы взаимодействия с исполнителями, при которых они бы сами отбирали наиболее привлекательные для себя задачи, например, посредством проведения аукционов. Для этого требуется привлекать их внимание к новым задачам в нужные моменты времени. Этот механизм описывается индикатором соответствия:

$$\begin{aligned} R_a &= \sum_k \sum_i \left(s_k e'_{k,i} P(\omega(d_k, t_k), \omega(a_i, t'_i)) \right) \times \\ &\times \delta(t'_{k,i} \leq t_k < t'_{k,i} + \xi) \delta(t'_i \leq t'_{k,i} < t'_{i+1}) \rightarrow \max, \end{aligned} \quad (5)$$

где t_i^a – время фокуса (время изменения актором своего интереса, описанного семантическим дескриптором); $t_{k,i}^a$ – время назначения; t_k – время начала выполнения задачи. Индикатор соответствия (5) позволяет определить основные корреляции между потоками событий поступления задач и их назначения агентам или акторам.

Следует учитывать разную специфику восприятия потока задач человеком и программным агентом. По сравнению с высокой динамикой $\omega(a_i, t_i^a)$, вызванной изменениями интереса акторов, фокусировка каждого агента $\omega(b_j, t_j^b)$ предопределена при его создании и не меняется со временем:

$$R_b = \sum_k \sum_j \left(s_k e_{k,j}'' P(\omega(d_k, t_k), \omega(b_j, t_j^b)) \right) \times \delta(t_{k,j}'' \leq t_k < t_{k,j}'' + \xi) \delta(t_j^b \leq t_{k,j}'' < t_{j+1}^b) \rightarrow \max. \quad (6)$$

В условиях ограниченного объема задач утверждения (5) и (6) противоречат друг другу. Решение этого противоречия видится в поиске эффективной пропорции программных агентов (роботов) и акторов (персонала) в смешанной среде естественного и искусственного интеллекта цифрового предприятия. В целом акторы оказываются более предпочтительными для обработки непредсказуемых событий в режиме реального времени, тогда как программным агентам лучше удастся моделировать несколько альтернативных версий возможных ситуаций для прогнозирования, анализа, сравнения и оптимизации.

События объективно влияют на контекст решаемых задач, что, в свою очередь, приводит к изменению фокуса акторов. В отличие от фокуса каждого программного агента, задаваемого декларативно, гарантировать привлечение необходимого внимания лиц, принимающих решения, в заданные моменты времени бывает сложно. Для этого нужно обеспечить генерацию оверлейного контекста, формируя соответствующие уведомления и нотификации средствами информационных систем управления предприятием, поддержки принятия решений и документооборота.

Свойства среды смешанного интеллекта

Учитывая особенности взаимодействия акторов и программных агентов в комбинированной среде смешанного интеллекта, можно выделить следующие ключевые свойства:

– восприятие времени и реальности у агентов и акторов изначально разное, фокус агента должен устанавливаться при формулировке задачи,

Таблица
Особенности взаимодействия

Критерий	Агенты	Акторы
Время	Модельное время	Реальное время
Восприятие реальности	Формируется искусственно, для каждой ситуации есть возможность моделирования нескольких версий развития событий (сцен)	Ограничено существующими обстоятельствами (сцена одна) и особенностями представления информации в пользовательском интерфейсе
Внимание	Фокус жестко задан непосредственно в алгоритме или с помощью цели и ограничений	Фокус не определен, формируется под воздействием текущего интереса и гибко меняется в зависимости от возникновения новых событий
Горизонт	Ограничен моделью	Не ограничен, предусматривает прогнозирование решений
Роль	Заданная моделью или постановкой задачи	Определена должностью, зоной ответственности и мотивацией

в то время как фокус актора меняется под воздействием внешних событий и изменений контекста; – субъективный характер восприятия реальности и времени, выраженный в особенностях обработки событий искусственным и естественным интеллектом, необходимо учитывать при синхронизации их совместной деятельности.

Основные различия в работе участников взаимодействия в смешанной среде, оказывающих влияние на эффективность этого взаимодействия, приведены в таблице.

С учетом указанных особенностей взаимодействия акторов и агентов в смешанной среде цифрового предприятия могут быть предложены следующие решения.

Поиск эффективного соотношения акторов и агентов (персонала и искусственного интеллекта) в команде может быть обеспечен на основе анализа индикатора соответствия (5). При организации взаимодействия акторов и агентов необходимо предусматривать увеличенные интервалы времени для переключения фокуса.

Акторы требуют большего времени на подключение к решению задачи, но в том же контексте у них есть перспектива более глубокой и творческой проработки решений. В процессах, для которых характерно быстрое изменение контекста, преимущество будет на стороне агентов. Таким образом, может быть введено правило, учитывающее особенности конкретной пред-

метной области, которое позволит найти баланс между людьми и роботами для эффективного управления.

Поиск оптимальной стратегии развития персонала в смешанной среде искусственного и естественного интеллекта может быть основан на планировании динамики изменений фокуса. Формально существует необходимость в увеличении веса тегов интереса актора, которые соответствуют тегам целевого интереса. Это позволит понять, в каких контекстах необходимо действовать, чтобы достичь соответствия фокуса и желаемой цели.

Обобщая данные рассуждения, предлагается следующая методика для разработки прикладных решений в среде смешанного интеллекта.

1. Определить и формализовать типовые бизнес-процессы по шаблонным сценариям (например, с использованием нотации S-BPM).

2. Указать возможные состояния, которые получают и обрабатывают события, не определенные в шаблонах.

3. Расширить шаблоны путем выделения соответствующих виртуальных площадок для взаимодействия агентов и акторов с соответствующими ограничениями по времени.

4. Обеспечить ритмичность взаимодействия агентов и акторов с учетом особенности формирования интереса и соответствующей динамики изменения фокуса.

5. Настроить продолжительность и обеспечить координацию взаимодействия средствами программной платформы.

Реализация смешанного интеллекта на примере системы мониторинга показаний приборов учета

Для того чтобы проиллюстрировать практическое применение предлагаемой модели, можно привести пример интеллектуальной системы, разработанной для автоматизированного сбора и учета показаний приборов учета (счетчиков) [16]. В настоящее время отсутствует понимание того, какова должна быть архитектура программно-аппаратного решения для такого рода задачи. С одной стороны, перспективным видится полная цифровизация приборов учета, при которой все данные собираются автоматически и передаются по линиям связи в соответствии с концепцией Internet вещей. С другой стороны, на практике не удается полностью отказаться от привлечения специализированного персонала, обеспечивающего регулярный осмотр и инспекцию приборов учета для реализации необходимого контроля.

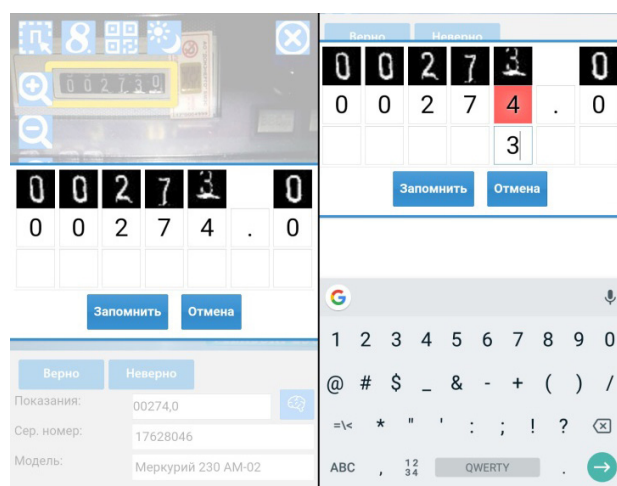


Рисунок 1. Мобильное приложение системы мониторинга показаний приборов учета

В аспекте конкретной практической задачи необходимо реализовать поиск пропорции естественного и искусственного интеллекта в смешанной среде.

Для автоматизированного сбора показаний приборов учета электроэнергии, воды, тепла и газа на рынке доступно несколько решений: некоторые предоставляют полностью автоматизированные компоненты, другие основаны на ручном управлении операторами с последующим вводом данных в информационную систему для обработки. Хотя в настоящее время широко внедряются цифровые устройства, количество аналоговых индикаторов и счетчиков остается высоким, что создает проблему их распознавания и обработки. Поэтому инспекторы электросетей нуждаются в мобильном инструменте для захвата и обработки фото- и видеоизображений, которые описывают текущее состояние сетевых устройств, линий и систем.

Эта проблема может быть решена с помощью информационно-коммуникационной системы с внешним мобильным приложением для фиксации и предварительной обработки, а также базой данных на стороне сервера для хранения и анализа показаний. Интеллектуальный компонент для распознавания изображений был разработан с использованием искусственных нейронных сетей. Предлагаемая архитектура состоит из нескольких программных компонентов, развернутых как на стороне сервера, так и на мобильных устройствах.

Интерфейс приложения представлен на рисунке 1. Основные требования к системе включают следующее:

- автоматизацию расчетов за энергоресурсы с поставщиками и потребителями;

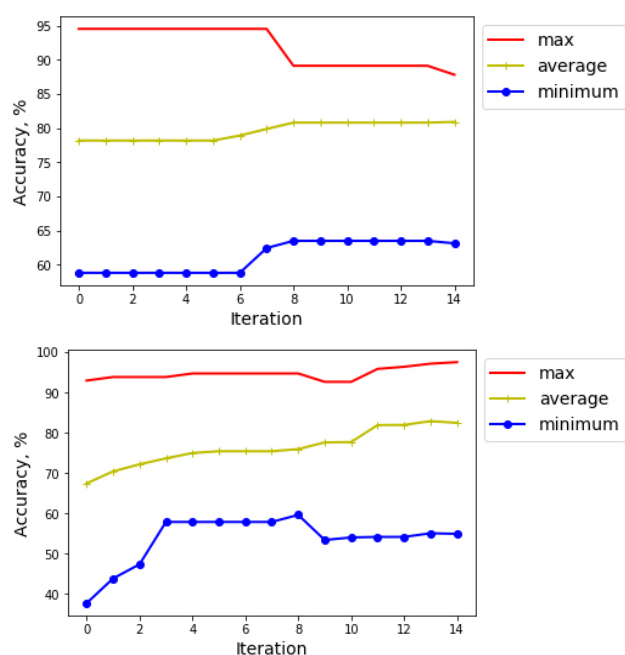


Рисунок 2. Анализ качества распознавания для аналоговых и цифровых счетчиков

– автоматизацию процесса записи показаний счетчиков электроэнергии сотрудниками компании;

– выявление мошеннических и иных незаконных действий потребителей;

– сбор доказательств выявленных преступлений для использования в судебных и других разбирательствах.

Анализ процессов взаимодействия акторов в условиях распознавания показаний с использованием искусственной нейронной сети позволил найти адекватное решение по выделению функций, решаемых с помощью искусственного интеллекта. А именно, распознавание данных обеспечивает решение следующих задач:

– распознать серийный номер счетчика в соответствии с утвержденной «маской», если таковой имеется, с применением заводского штрих-кода или QR-кода;

– сформировать запрос (или определить автоматически с использованием доступной базы данных) для выбора четырех значений) и контролировать полученную информацию в соответствии с выбранным типом;

– обеспечить самообучение для минимизации ошибок распознавания на основе опыта;

– автоматически обеспечить качество распознавания показаний счетчиков.

Таким образом, распознавание показаний производится автоматически. Если есть неправильные результаты распознавания цифр, актер вручную корректирует распознанное значение. Изображение неправильно распознанной цифры

и правильное значение передаются на сервер. Актер проверяет список пар «изображение – правильное значение» и добавляет его в тренировочный набор. Когда в обучающем наборе накоплено достаточное количество выборок, производится дополнительное обучение нейронной сети.

Это решение позволило обеспечить достаточно высокую точность распознавания и достаточную адекватность выбранной архитектуры системы. Результаты анализа качества распознавания представлены на рисунке 2. Здесь показана зависимость доли успешно распознанных показаний от итерации совершенствования программного обеспечения системы. Показано, что в среднем происходит улучшение.

Результаты внедрения предлагаемого решения в энергетической компании доказывают эффективность применения предложенной модели для реализации распределенной обработки данных изображений, полученных в процессе фотосъемки. Предлагаемое решение позволяет найти баланс между ручной и интеллектуальной обработкой данных в едином информационном пространстве.

Заключение

Реализация смешанной среды естественного и искусственного интеллекта на практике требует прагматичного подхода, предусматривающего поиск баланса с учетом человеческого фактора и особенностей предметной области. Сокращение персонала приводит к отсутствию адаптивности, внедрение дополнительного искусственного интеллекта дает новые возможности и преимущества.

Дальнейшие исследования позволят автоматизировать методику для эффективной поддержки принятия решений в новых проектах цифровой экономики.

Литература

1. Patel K., McCarthy M.P. Digital Transformation: The Essentials of E-Business Leadership. New York: KPMG/McGraw-Hill, 2000. 134 p.
2. Singh M.P. Augmented reality interfaces. Natural web interfaces // IEEE Internet Computing. 2013. № 17. P. 66–70.
3. Димов Э.М., Маслов О.Н. Информационные технологии цифровой экономики: образовательные и научно-исследовательские аспекты // Инфокоммуникационные технологии. Т. 17. № 1. 2019. С. 100–115.
4. Ющенко А.С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // Мехатроника,

- автоматизация, управление. 2017. № 18 (12). С. 812–819.
5. Kelly III J. Computing, cognition and the future of knowing. IBM Research: Cognitive Computing. IBM Corporation, 2015. 7 p.
 6. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013. 82 p.
 7. Industry 4.0 / H. Lasi [et al.] // Business & Information Systems Engineering. 2014. № 4 (6). P. 239–242.
 8. Wooldridge M. An introduction to multi-agent systems. Chichester: John Wiley and Sons, 2002. 340 p.
 9. Gorodetskii V.I. Self-organization and multiagent systems: I. Models of multiagent self-organization // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2012. Vol. 51. № 2. P. 256–281.
 10. Pouchard L., Ivezic N., Schlenoff C. Ontology engineering for distributed collaboration in manufacturing // Proceedings of the AIS2000 Conference, 2000.
 11. De Nicola A., Missikoff M., Navigli R. A software engineering approach to Ontology building // Information Systems. 2009. № 34 (2). P. 258–275.
 12. Subject-oriented modeling and execution of multi-agent business processes / A. Fleischmann [et al.] // Proceedings of Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT), 2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences. 2013. P. 138–145.
 13. Fleischmann A., Schmidt W., Stary C. S-BPM in the wild. Berlin: Springer, 2015. 282 p.
 14. Ivaschenko A., Kolsanov A., Nazaryan A. Focused visualization in surgery training and navigation // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 858. P. 537–547.
 15. Ivaschenko A., Sitnikov P., Katirkin G. Accented visualization in digital industry applications // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol. 199. P. 366–378.
 16. Ivaschenko A., Krivosheev A., Sitnikov P. Multi-agent solution for a distributed intelligent photo surveying // Proceedings of the 2019 European Simulation and Modeling Conference (ESM 2019), Palma de Mallorca, Spain, EUROSIS-ETI. 2019. P. 73–78.

Получено 09.01.2020

Иващенко Антон Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники (ВТ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ). 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 904 731-98-90. E-mail: anton-ivashenko@yandex.ru

Диязитдинова Альфия Радмировна, к.т.н., доцент кафедры прикладной информатики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-36. E-mail: dijazitdinova@mail.ru

Кривошеев Аркадий Владимирович, аспирант кафедры ВТ СамГТУ. 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 904 731-98-90. E-mail: arkas19@gmail.com

Никифорова Татьяна Вячеславовна, аспирант кафедры ВТ СамГТУ. 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 904 731-98-90. E-mail: fantic93@mail.ru

ON ARTIFICIAL VERSUS HUMAN INTELLIGENCE PROPORTION IN DIGITAL ECONOMY APPLICATIONS

Ivaschenko A.V.¹, Diyazitdinova A.R.², Krivosheev A.V.¹, Nikiforova T.V.¹

¹ *Samara State Technical University, Samara, Russian Federation*

² *Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation*
E-mail: anton-ivashenko@yandex.ru

In this article the problem of finding the optimal balance in the distribution of functions in a modern enterprise between personnel and the intelligent software components of the systems for decision-making support is considered. The new model of interaction between software agents and decision makers, which is designed to determine the balance between several agents and performers, in order

to develop the most effective strategies for the professional development of enterprise employees is proposed. Recommendations are given on optimizing the proportion of natural and artificial intelligence in applied problems, taking into account the influence of the human factor in the context of the active introduction of intelligent technologies under the context of digital economy development. The proposed solution is illustrated by the example of organizing the collection and processing of electricity meter data in a distributed organizational and technical system that implements the functions performed by operators using mobile communication devices and intelligent software based on an artificial neural network.

Keywords: *digital economy, artificial intelligence, integrated information space, computer-human interaction*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.11

Ivaschenko Anton Vladimirovich, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; Head of the Computer Engineering Department Chair, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 904 731-98-90. E-mail: anton-ivashenko@yandex.ru

Diyazitdinova Alfiya Radmirovna, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Associate Professor of Applied Informatics Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 846 228-00-36. E-mail: dijazitdinova@mail.ru

Krivosheev Arkadiy Vladimirovich, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; PhD Student of Computer Engineering Department. Tel. +7 904 731-98-90. E-mail: arkas19@gmail.com

Nikiforova Tatiyana Vyacheslavovna, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; PhD Student of Computer Engineering Department. Tel. +7 904 731-98-90. E-mail: fantic93@mail.ru

References

1. Patel K., McCarthy M.P. *Digital Transformation: The Essentials of E-Business Leadership*. New York: KPMG/McGraw-Hill, 2000, 134 p.
2. Singh M.P. Augmented reality interfaces. Natural web interfaces. *IEEE Internet Computing*, 2013, no. 17, pp. 66–70.
3. Dimov E.M., Maslov O.N. Informacionnye tekhnologii cifrovoj ekonomiki: obrazovatel'nye i nauchno-issledovatel'skie aspekty [Information technologies of the digital economy: educational and research aspects]. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 100–115. (In Russian).
4. Yuschenko A.S. Kollaborativnaya robototekhnika: sostoyanie i novye zadachi [Collaborative robotics – state of art and new problems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2017, no. 18 (12), pp. 812–819. (In Russian).
5. Kelly III J. Computing, cognition and the future of knowing. IBM Research: Cognitive Computing. IBM Corporation, 2015, 7 p.
6. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013, 82 p.
7. Lasi H. et al. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 2014, no. 4 (6), pp. 239–242.
8. Wooldridge M. *An Introduction to Multi-Agent Systems*. Chichester: John Wiley and Sons, 2002, 340 p.
9. Gorodetskii V.I. Self-organization and multiagent systems: I. Models of multiagent self-organization. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 2, pp. 256–281.

10. Pouchard L., Ivezic N., Schlenoff C. Ontology engineering for distributed collaboration in manufacturing. *Proceedings of the AIS2000 Conference*, 2000.
11. De Nicola A., Missikoff M., Navigli R. A software engineering approach to Ontology building. *Information Systems*, 2009, no. 34 (2), pp. 258–275.
12. Fleischmann A. et al. Subject-oriented modeling and execution of multi-agent business processes. *Proceedings of Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT), 2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences*, 2013, pp. 138–145.
13. Fleischmann A., Schmidt W., Stary C. *S-BPM in the wild*. Berlin: Springer, 2015, 282 p.
14. Ivaschenko A., Kolsanov A., Nazaryan A. Focused visualization in surgery training and navigation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 858, pp. 537–547.
15. Ivaschenko A., Sitnikov P., Katirkin G. Accented visualization in digital industry applications. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2019, vol. 199, pp. 366–378.
16. Ivaschenko A., Krivosheev A., Sitnikov P. Multi-agent solution for a distributed intelligent photo surveying. *Proceedings of the 2019 European Simulation and Modeling Conference (ESM 2019)*, Palma de Mallorca, Spain, EUROSIS-ETI, pp. 73–78.

Received 09.01.2020

УДК 004.9

ЯДЕРНО-КЛАСТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАТФОРМЫ «ЦИФРОВОЙ УНИВЕРСИТЕТ» И АСПЕКТЫ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Антипова Т.А.¹, Кудряшов А.А.², Мишин Д.В.², Осипов О.В.²

¹ *Самарский государственный медицинский университет, Самара, РФ*

² *Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ*

E-mail: o.osipov@psuti.ru

Статья посвящена описанию принципов создания глобальной цифровой платформы управления деятельностью высшего учебного заведения «Цифровой университет». Рассмотрены основные принципы создания подобной платформы, определены основные процессы, подлежащие цифровой трансформации. В работе изложены общие вопросы взаимодействия пользователей в рамках цифровой платформы, описан вариант управления платформой в целом с использованием ядра платформы с применением технологий нейронных сетей и искусственного интеллекта. Рассмотрена возможность создания индивидуальных образовательных траекторий для обучаемых. Предложена общая модель платформы «Цифровой университет», а также возможность интеллектуального электронного набора абитуриентов. В работе обозначены основные принципы построения моделей цифровых платформ вне зависимости от их области применения. Подробно описаны функциональные возможности цифровой платформы применительно к образовательной деятельности университета. Рассмотрен процесс интеллектуального набора абитуриентов на основе анализа их цифровых портфолио, а также открытых данных из социальных сетей.

Ключевые слова: *цифровизация, цифровая трансформация, цифровое обучение, цифровой университет, платформа, дистанционное обучение*

Введение

В настоящее время в рамках реализации национальной программы «Цифровая экономика РФ» одной из основных задач является цифровая трансформация различных сфер жизнедеятельности граждан. Подобные процессы сейчас наблюдаются в образовании, легкой и тяжелой промышленности, сельском хозяйстве и т. д. Интенсификация процессов цифровой трансформации связана в первую очередь с активным усовершенствованием инфокоммуникационных технологий, а также созданием передовых техно-

логий, являющихся основой для цифровой экономики в целом (искусственный интеллект, виртуальная и дополненная реальность и т. д.) [1–3]. Задачи цифровизации образования решаются уже достаточно давно. Это связано с активным внедрением в образовательную деятельность вузов дистанционного и сетевого обучения (использование LMS), а также разработкой и практическим применением систем управления различными процессами деятельности вуза (системы типа «1С: Университет» и т. п.).

В предлагаемой статье пойдет речь о принципах создания платформы «Цифровой универ-

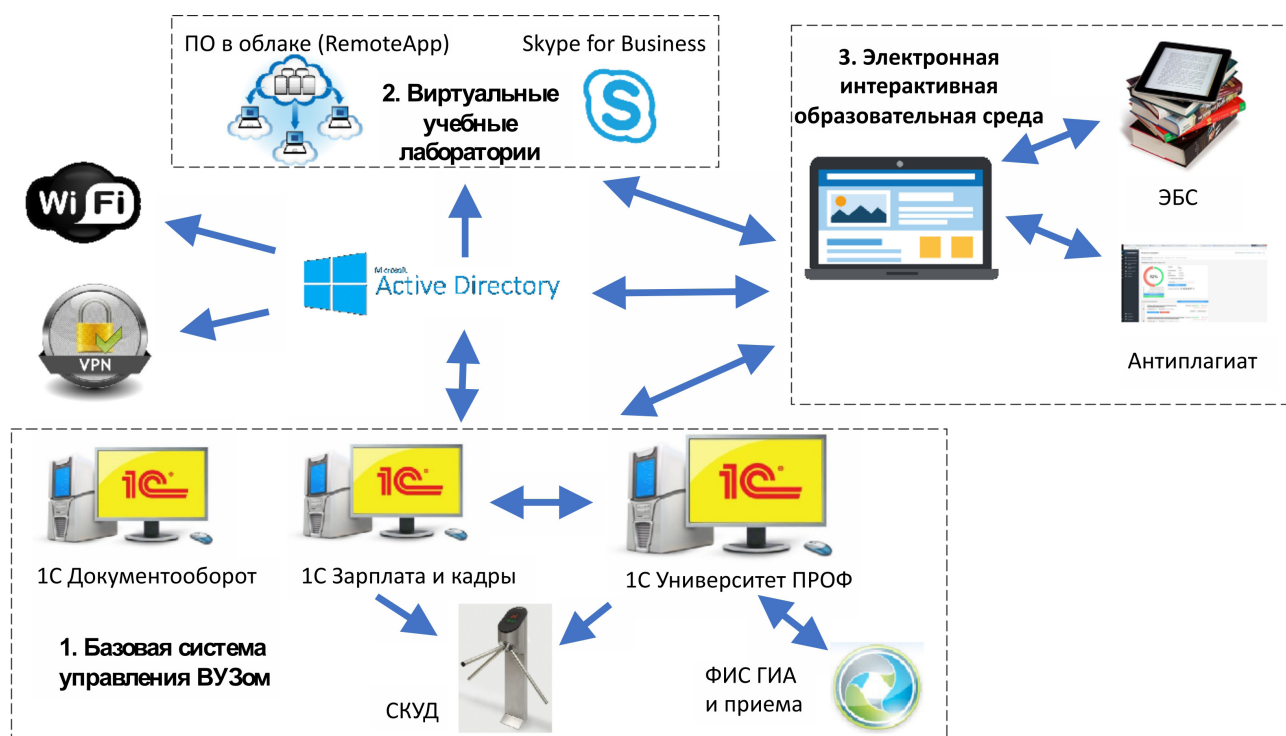


Рисунок 1. Интеграция элементов платформы «Цифровой университет»

ситет», в рамках которой должны быть реализованы в цифровом виде как процессы, связанные непосредственно с образовательной деятельностью (обучением), так и процессы управления университетом в целом. Речь пойдет о возможностях создания цифровой платформы, которая в дальнейшем может быть применена различными вузами с использованием облачных технологий (в виде сервиса PaaS – Platform as a Service).

К созданию цифровой платформы управления образовательными процессами, по сути, существуют два подхода. Первый подход в целом является достаточно простым и быстро реализуемым. Как уже отмечалось, в настоящее время существуют различные сервисы (программное обеспечение) для реализации процессов цифрового обучения и управления деятельностью высшего учебного заведения. На примере Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ) можно выделить следующие сервисы сторонних разработчиков для выполнения задач дистанционного обучения и управления вузом.

1. Система «1С: Университет» (приемная комиссия, деятельность деканатов, контингент студентов и ППС, расписание и др.) [4].

2. Система «Руконтекст» (проверка на плагиат) [5].

3. Электронные библиотечные системы (ПГУТИ, «Руконт») [6].

4. Система электронного документооборота Naudoc [7].

5. LMS eFront (дистанционное обучение) [8].

6. Система SunRav WebClass (компьютерное тестирование) [9].

7. Система OTRS:ITSM (заявки на обслуживание пользователей) [10].

8. Microsoft Skype for Business (общение пользователей) [11].

9. ММИС «Учебные планы ФГОС ВО» (разработка учебных планов) [12].

Эти системы имеют различное назначение и не являются между собой связанными. Унификация доступа для пользователей заключается в использовании доменных учетных записей Active Directory.

Первый вариант построения платформы заключается в интеграции всех указанных сервисов и информационных сервисов в рамках единой платформы. Также на базе платформы необходимо внедрение электронной интерактивной образовательной среды (ЭИОС) и виртуальных учебных лабораторий. Общая схема интеграции показана на рисунке 1. Также с платформы необходима реализация взаимодействия со внешними информационными системами (например, ФИС ГИА и приема и др.). Также должна быть предусмотрена интеграция с системой контроля и управления доступом (СКУД). Для доступа к специализированному программному обеспечению предлагается использовать технологию доставки приложений как с локальных серверов, так и на основе облачных технологий.

Таким образом, речь идет о разработке самой платформы для интеграции существующих информационных систем и сервисов, а также модуля управления для обеспечения взаимосвязи между различными элементами.

К недостаткам такого принципа построения цифровой платформы относятся:

- трудности и дополнительная доработка модуля управления при добавлении любого нового сервиса (от сторонних разработчиков);

- использование программного обеспечения зарубежных разработчиков (что не укладывается в перспективы ближайшего импортозамещения программного обеспечения);

- сложность создания личного кабинета пользователя, в котором должна отображаться информация из разных информационных систем и сервисов.

Достоинство такой реализации платформы относится к отсутствию необходимости разработки новых сервисов и информационных систем, так как на платформу интегрируются существующие системы.

В данной работе будет предложен вариант создания интерактивной интеллектуальной платформы «Цифровой университет» с использованием единых принципов построения сервисов и возможностью управления платформой с помощью интеллектуального ядра.

Процессы деятельности вуза, подлежащие цифровой трансформации

На первом этапе перечислим процессы деятельности вуза, которые необходимо цифровизировать и автоматизировать в рамках платформы «Цифровой университет».

Все процессы можно разбить на несколько категорий (таблица 1). В таблице 1 также указаны необходимые связи с внешними федеральными информационными системами, требуемые для цифровой трансформации конкретных процессов управления вузом.

Основные принципы создания платформы «Цифровой университет»

В рамках указанной модели управления вузом предлагается следующая методика создания принципов цифровой платформы.

1. Цифровая платформа представляет собой набор кластеров, в которых размещаются модули, соответствующие категориям управления из таблицы 1.

2. Цифровая платформа представляет собой «конструктор» – в каждый кластер может быть

добавлен модуль, соответствующий новой категории управления.

3. Все кластеры представляют собой набор «цифровых клеток», соответствующих процессу из таблицы 1. «Цифровая клетка» состоит из таблиц базы данных с соответствующими данными о процессе.

4. Для управления цифровой платформой и данными служит ядро платформы (**Digital Kernel – DK**). Его назначение – вывод данных, требуемых для конкретного пользователя, из «цифровых клеток» через кластеры на основе искусственного интеллекта и эвристического анализа. Таким образом, **DK формирует динамическую структуру** личных кабинетов пользователей, то есть в каждый момент времени у пользователя будут формироваться только требуемые ему в ближайшее время блоки с информацией, а также система обмена сообщениями. Другой функцией **DK** является анализ передаваемой пользователями информации и запись ее в базы данных «цифровых клеток».

5. Пользователи заходят на платформу через единое окно входа. В **DK передается только идентификационный номер** пользователя, по которому путем анализа информации из кластеров для пользователя динамически формируется структура личного кабинета.

6. **DK осуществляет запросы для поиска информации** во внешних информационных системах (ФИС ГИА и приема и др.), а также обрабатывает возвращаемые ответы.

7. Для обучаемого личный кабинет содержит информацию о его успеваемости, его личное портфолио, электронный образовательный контент, требуемый для усвоения текущих дисциплин.

8. В рамках платформы реализуется технология «цифровых локальных конструкторов» (**DLC – Digital Local Constructor**). Их назначение – интеллектуальное конструирование в режиме онлайн моделей различных процессов и описательных структур. Основными конструкторами платформы являются:

- **DLC ООП с интеллектуальным учетом матрицы компетенций;**
- **DLC учебных планов и графиков;**
- **DLC индивидуальных траекторий обучения;**
- **DLC договоров;**
- **DLC процессов управления;**
- **DLC рейтингов;**
- **DLC отчетов;**
- **DLC компетенций (в том числе и компетенций цифровой экономики);**

Таблица 1. Процессы деятельности вуза

№	Категория	Процессы
1	Управление контингентом	Управление контингентом обучающихся Управление контингентом ППС Управление контингентом сотрудников
2	Финансово-хозяйственная деятельность	Бухгалтерский учет Финансовый учет Финансовое планирование Данный процесс реализуется в системе «1С: Предприятие» (требуется интеграция)
3	Управление научной и инновационной деятельностью	Управление публикационной активностью (eLibrary, Scopus, Web of Science) Управление патентной деятельностью (ФИПС, ЕГИСУ НИОКТР) Управление научными проектами Управление грантовой деятельностью Управление студенческой научной работой Управление диссертационными советами (ФИС ЕГИСМ) Управление аспирантурой и докторантурой
4	Управление образовательной деятельностью	Управление ООП Управление учебными планами ЭИОС Управление структурным подразделением «Факультет» (деятельность деканатов) Управление структурным подразделением «Кафедра» Управление переподготовкой и повышением квалификации Управление договорами об обучении Электронные матрицы компетенций
5	Управление инфраструктурой	ИТ-обслуживание пользователей Управление парком вычислительной техники Управление издательской деятельностью Система единой аутентификации и авторизации Система управления безопасностью
6	Управление цифровыми технологиями	Система дистанционного обучения (использование LMS eFront) Компьютерное тестирование (использование SunRav WebClass) Управление хранилищем электронного образовательного контента Электронные библиотечные системы Управление научно-технической библиотекой Реализация индивидуальных образовательных траекторий
7	Управление административно-хозяйственной деятельностью	Управление зданиями и помещениями Управление закупочной деятельностью (автоматизированный поиск закупок по различным направлениям при помощи специализированных ботов) Управление хозяйственными договорами Обслуживание пользователей в сфере АХЧ Система контроля и управления доступом
8	Управление международной деятельностью и связями с общественностью	Управление международными связями Управление по связям с общественностью Управление общежитиями
9	Прием абитуриентов	Интеллектуальный набор абитуриентов Прием абитуриентов (ФИС ГИА и приема) Военно-учетный сектор
10	Управление качеством	Управление отчетной деятельностью Управление рейтингами студентов Управление рейтингами ППС
11	Система электронного документооборота	–

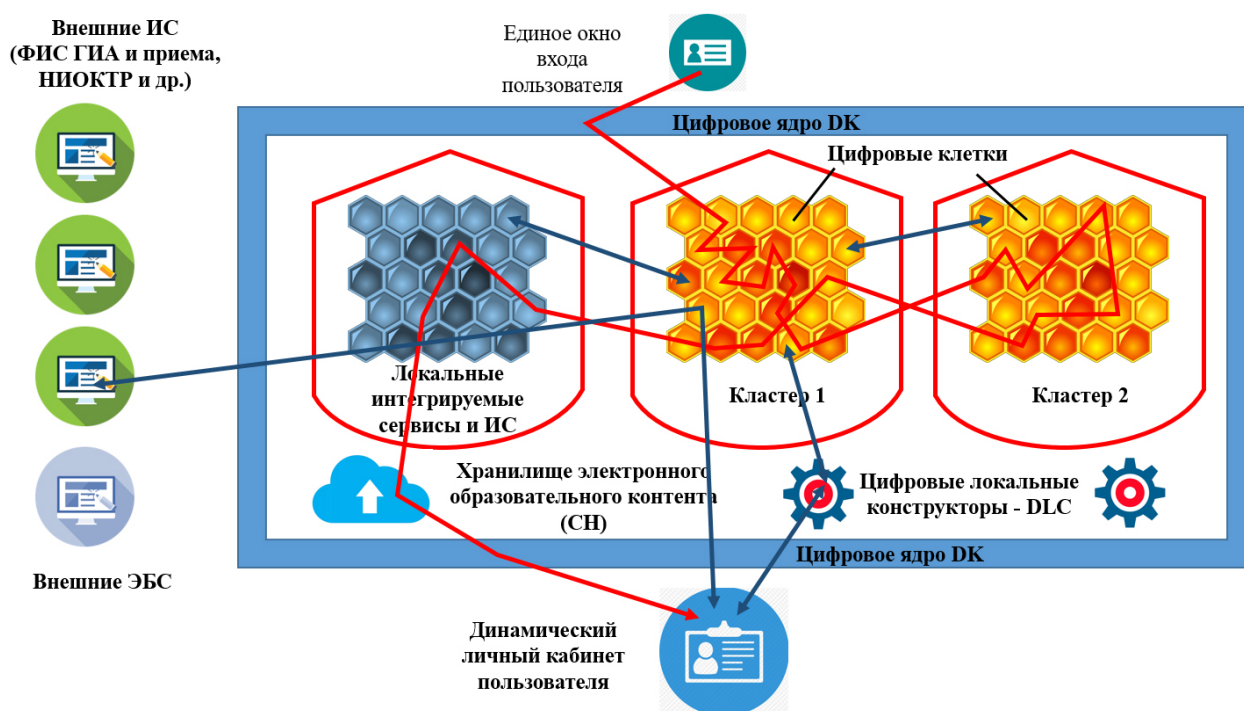


Рисунок 2. Ядерно-кластерная модель платформы «Цифровой университет»

– DLC электронного образовательного контента и др.

9. Цифровая платформа должна обеспечивать индивидуальные предложения по выбору направления обучения для абитуриента на основе анализа его оценок ЕГЭ (с автоматической проверкой через ФИС ГИА и приема), а также интеллектуального анализа открытых частей его социальных сетей.

10. Цифровая платформа должна обеспечивать возможность автоматической генерации перечня публикаций ППС путем запросов и семантического разбора данных из eLibrary, Scopus, Web of Science, а также перечня патентов и др. из ЕГИСУ НИОКТР.

11. Рейтинг студентов и ППС должен постоянно отображаться в их личном кабинете по состоянию на текущий момент времени. Рейтинг формируется автоматически из анализа данных из кластера «Управление научной и инновационной деятельностью».

12. Все личные кабинеты являются динамически создаваемыми с предусмотренным кэшированием для ускорения создания кабинета и его отображения пользователю.

13. Система электронного документооборота является отдельным кластером цифровой платформы и представляет возможность отслеживания текущего состояния письма или требуемого отчета.

14. Система выполнения заявок пользователей на ИТ и АХЧ обслуживания является отдельным

кластером цифровой платформы и представляет возможность отслеживания текущего состояния заявки.

15. Все кластеры являются взаимосвязанными: любой кластер может запросить требуемую для себя информацию из любого другого кластера путем локального запроса через соответствующий сервис ДК.

16. ДК обеспечивает доступ к виртуальным лабораториям внешних разработчиков, реализованных на основе технологий виртуальной и дополненной реальности.

17. Для реализации управления платформой с помощью ДК используются нейронные сети и технологии искусственного интеллекта.

18. Цифровая платформа включает в себя хранилище электронного образовательного контента (СН – Content Holder).

19. Работа с платформой может осуществляться также через мобильное приложение.

Общая структура предлагаемой платформы «Цифровой университет» представлена на рисунке 2. Проектируемую модель платформы будем называть ядерно-кластерной моделью.

Таким образом, цифровая платформа представляет собой совокупность Цифрового ядра, кластеров, «цифровых клеток» с таблицами баз данных и набора цифровых локальных конструкторов. Принципы работы платформы будут описаны подробно в разделе 4.

Далее остановимся на основных функциональных возможностях платформы «Цифровой

университет», определенных требованиями Министерства науки и высшего образования РФ [12].

Основные функциональные возможности платформы «Цифровой университет»

Модель платформы «Цифровой университет» состоит из четырех основных блоков [12].

1. Системы управления на основе данных.
2. Цифровые образовательные технологии.
3. Индивидуальные образовательные траектории.
4. Компетенции цифровой экономики.

Блок систем управления на основе данных предполагает разработку информационной модели, создание цифрового ядра университета, обеспечивающего безопасность, доступность и актуальность данных. Данный блок включает три следующих направления.

1. Информационные системы, внедряемые или разрабатываемые для обеспечения автоматизированного сбора, мониторинга и анализа данных в целях принятия решений в отношении планирования и управления вспомогательными видами деятельности вуза, включая в том числе:

- системы управления административно-хозяйственной деятельностью (бухгалтерский учет, финансовый учет, финансовое планирование, управление контингентом студентов, управление персоналом, управление ППС, управление приемной кампанией, электронный документооборот, сервисы единого окна, система заявок helpdesk, управление научной и инновационной деятельностью и др.);

- системы управления кампусом (управление зданиями, управление общежитиями, СКУД и др.);

- системы управления ИТ-инфраструктурой (система единой аутентификации и авторизации, управление парком вычислительной техники и др.);

- системы управления безопасностью (СКУД, информационная безопасность, защита персональных данных и др.).

В рамках предлагаемой цифровой платформы для реализации блока систем управления на основе данных предлагается использовать кластерную модель, описанную выше, за исключением финансово-экономической деятельности, для которой предлагается интеграция с продуктами компании 1С.

2. Платформы интеграции информационных систем и интерфейсов (интеграция с внешними информационными системами и сервисами, интегрированные интерфейсы доступа к информационным системам и сервисам университета для всех категорий пользователей) и т. д.

Блок цифровых образовательных технологий включает онлайн-поддержку образователь-

ного процесса и внедрение в образовательный и исследовательский процесс современных технологий, поддерживающих и трансформирующих взаимодействие студента и преподавателя:

- LMS-системы (материалы курса в цифровом виде, автоматизированная проверка заданий, асинхронное обсуждение материалов курса студентами и др.);

- онлайн-курсы, в том числе массовые открытые онлайн-курсы (MOOCs) других университетов;

- адаптивные курсы с нелинейным треком прохождения в зависимости от успешности освоения материала, в том числе использующие инструменты анализа больших данных и искусственного интеллекта;

- системы управления контентом (конструктор для проектирования образовательных курсов и программ, новые форматы представления контента, доступ к электронной библиотеке);

- смешанная модель обучения, объединяющая использование онлайн- и аудиторных занятий (в том числе просмотр лекций на онлайн-курсах, обсуждение и практические задания с преподавателем в аудитории);

- онлайн-коммуникации в образовательном процессе: сервисы видео-конференц-связи, вебинаров;

- виртуальные лаборатории, симуляторы, тренажеры, в т. ч. с использованием технологий дополненной, смешанной и виртуальной реальности;

- сервисы проверки студенческих работ на наличие плагиата и т. д.

Для реализации блока цифровых образовательных технологий в рамках предлагаемой платформы будут использованы: LMS eFront, интегрированная в платформу, конструктор электронного образовательного контента, кластеры «Управления цифровыми технологиями», доступ к внешним сервисам проверки работ на плагиат и виртуальным лабораториям и тренажерам. Смешанное обучение будет реализовано в личных кабинетах обучаемых, в том числе для повышения квалификации и переподготовки сотрудников. Цифровое ядро платформы будет обеспечивать доступ в личных кабинетах к внешним и внутренним электронным библиотечным системам с интеллектуальным предложением по учебникам и учебным пособиям, необходимым обучающимся для усвоения текущих дисциплин.

Блок индивидуальных образовательных траекторий включает в себя поддержку трансформации образовательного процесса с целью учета интересов, способностей и темпов обучения каждого студента для формирования и реа-

лизации индивидуальной образовательной траектории [12]:

- структуризацию в цифровом виде пространства образовательных активностей, предоставляемых университетом студенту, с возможностью конструирования индивидуальной траектории для каждого студента с учетом его цифрового следа;

- поддержку конструирования из образовательного пространства образовательных активностей образовательных программ, профилей, рекомендуемых траекторий;

- сбор и анализ цифрового следа студентов, включая анализ их образовательной траектории, скорости и глубины освоения материала, профессиональных и общественных интересов;

- цифровые портфолио студентов, которые позволяют при внешних запросах верифицировать различные данные: индивидуальную траекторию студента во время обучения в вузе, выданный диплом, полученные оценки, выполненные проекты, тексты ВКР, курсовых, победы в конкурсах, достижения в общественных и иных мероприятиях и т. д.

Блок индивидуальных образовательных траекторий в рамках предлагаемой платформы реализуется в виде цифрового локального конструктора индивидуальных траекторий, который путем интеллектуального анализа цифрового следа обучающегося (абитуриента) позволяет с использованием данных кластера «Управление образовательной деятельностью» и цифровой матрицы компетенций генерировать индивидуальную траекторию обучения с рекомендацией времени изучения соответствующих дисциплин, а также уровня глубины освоения материала. Сам процесс прохождения образовательного процесса по индивидуальной траектории осуществляется в личном кабинете обучающегося с отображением требуемого электронного образовательного контента, тестов для самостоятельного и итогового контроля, электронных книг из электронных библиотечных систем.

Блок компетенций цифровой экономики содержит мероприятия, направленные на повышение цифровой грамотности как обучающихся, так и преподавателей, исследователей и других сотрудников образовательных организаций высшего образования за счет [12]:

- изменения содержания реализуемых вузами образовательных программ с целью формирования у всех обучающихся ключевых компетенций цифровой экономики;

- изменения методик и инструментов реализации образовательных и исследовательских про-

грамм в целях формирования у научно-педагогических работников необходимых компетенций цифровой экономики;

- изменения административных и хозяйственных процессов с целью формирования у сотрудников компетенций цифровой экономики, цифровой грамотности.

Для реализации блока компетенций цифровой экономика платформа предоставляет следующие возможности.

1. Модель тестирования гражданина на предмет его компетенций в области цифровой экономики.

2. Конструктор компетенций цифровой экономики в зависимости от сферы деятельности гражданина.

3. Конструктор электронного образовательного контента, используемый в данном случае для создания контента для категорий граждан с разным уровнем компетенций в области цифровой экономики.

4. Конструктор процессов управления, позволяющий генерировать изменения административных и хозяйственных процессов с целью формирования у сотрудников компетенций цифровой экономики.

Таким образом, в предлагаемой в работе обобщенной модели платформы «Цифровой университет» заложены возможности для эффективной реализации задач четырех блоков цифрового управления образовательной деятельностью, определенных Министерством науки и высшего образования [12].

Принципы функционирования платформы «Цифровой университет»

В данном разделе рассмотрим общие принципы функционирования предлагаемой цифровой платформы.

Общий принцип работы платформы: «Пользователь в личном кабинете должен видеть информацию, касающуюся только его в ближайшее время». При регистрации пользователей, согласно таблице ролей, в базе данных в соответствие его роли и идентификационному номеру ставится набор номеров кластеров и «цифровых клеток», информация в которых может его касаться. Например, 1.2; 2.56 и т. д., где первая цифра означает номер кластера, а вторая – номер цифровой ячейки. При следующем входе при создании динамического личного кабинета буду анализироваться только соответствующие ячейки платформы.

Аналогично пользователю дается доступ к внешним информационным системам (ЭБС,



Рисунок 3. Интеллектуальный набор абитуриентов

Антиплагиат и др.). При необходимости ядро ДК может делать запрос информации к цифровым клеткам других кластеров, если это необходимо для формирования информации из текущего кластера. По результатам анализа текущего состояния пользователя (в данном случае обучающегося) ему будет в личный кабинет выводиться необходимая в данный момент времени информация из хранилища электронного образовательного контента СН. Это особенно важно, когда пользователь обучается с использованием индивидуальной образовательной траектории.

Определенные группы пользователей (деканаты и руководители процессов) имеют доступ к различным видам цифровых локальных конструкторов для создания и изменения различных компонентов процессов управления.

Общие элементы личного кабинета для всех пользователей (Календарь событий, система заявок и др.) также уникальны, и в соответствующих блоках имеется информация, касающаяся только этого пользователя. Например, таким образом после согласования с учебным отделом можно оповещать конкретную группу студентов о переносе занятий и т. п. Причем с использованием кластера «Управление зданиями и помещениями» можно определить свободную аудиторию для проведения занятий.

Система электронного документооборота также является гибкой – она совмещает в себе как модуль внешних писем, так и внутренних документов. Определенные модули в личных кабинетах при его формировании заполняются автоматически путем поиска информации во внешних базах данных. Например, таким образом осуществляется формирование списков публикаций путем обращения к базам данных РИНЦ и др.

Остановимся на возможностях интеллектуального набора абитуриентов (см. рисунок 3). Абитуриент регистрируется на цифровой платформе через единое окно. Процесс аутентификации может быть привязан к номеру его мобильного телефона. После регистрации ему предлагается заполнить персональные данные (с отправкой согласия на обработку персональных данных), загрузить требуемые сканы документов, фото, результаты сдачи ЕГЭ и заполнение цифрового портфолио (грамоты и др.). После этого цифровое ядро ДК формирует запрос в ФИС ГИА и приема для валидации данных ЕГЭ. После этого производится интеллектуальный анализ его цифрового следа в соцсетях с целью выявления его интересов и формирования рекомендаций по выбору направления подготовки. Затем формируется личный кабинет абитуриента и осуществляется запись в кластер «Приемная комиссия».

На рисунке 4 приведен пример личного кабинета обучающегося. Для него основная информация, динамически отображаемая в личном кабинете, связана с его обучением в вузе:

- информация об успеваемости;
- доступ к необходимому ему в данный момент времени электронному образовательному контенту и электронным учебным пособиям;
- доступ к тестированию по текущим дисциплинам для самостоятельной проверки знаний, умений и навыков;
- информация и управление индивидуальной образовательной траекторией;
- доступ к системе проверки на плагиат;
- доступ к внешним и внутренним ЭБС;
- доступ к программным продуктам из «облака» и др.



Рисунок 4. Пример личного кабинета обучающегося



Рисунок 5. Пример личного кабинета преподавателя

На рисунке 5 приведен пример личного кабинета преподавателя. Для него основная информация, динамически отображаемая в личном кабинете, связана с его преподавательской и научной деятельностью в вузе:

- информация об электронных работах студентов, поступивших на проверку;
- информация об успеваемости групп студентов, в которых он проводит занятия;
- блок занесения информации об успеваемости «своих» студентов;

- доступ к «своему» электронному образовательному контенту и электронным учебным пособиям с целью их изменения и создания новых;
- доступ к системе проверки на плагиат;
- доступ к внешним и внутренним ЭБС;
- блок проектной научной деятельности;
- возможность загрузки своих публикаций и сведений о патентах;
- текущий собственный рейтинг;
- блок OTRS-заявок на ИТ и АХЧ-обслуживание;



Рисунок 6. Пример личного кабинета руководителя

– загрузка скан-копий в цифровой портфолио (награды, грамоты и т. д.);

– доступ к программным продуктам из «облака» и др.

На рисунке 6 приведен пример личного кабинета руководителя. Для него основная информация, динамически отображаемая в личном кабинете, связана с его управленческой и научной деятельностью в вузе:

– информация о входящей корреспонденции из органов исполнительной власти, требующей написания ответов и назначения исполнителей;

– блок контроля ответов на входящие письма;

– блок управления персоналом;

– доступ к системе проверки на плагиат;

– доступ к внешним и внутренним ЭБС;

– блок проектной научной деятельности;

– возможность загрузки своих публикаций и сведений о патентах;

– просмотр текущего рейтинга ППС;

– блок OTRS-заявок на ИТ и АХЧ-обслуживание;

– загрузка скан-копий в цифровой портфолио (награды, грамоты и т. д.).

Все личные кабинеты содержат блок «Самая важная текущая информация», однако контент данного блока различный у разных пользователей. Для руководителя туда могут поступать новые письма, требующие ответов; для преподавателя – информация об электронных работах студентов, поступивших на проверку; для студентов – информация о предстоящих контрольных

работах, сроках окончания этапов индивидуально-образовательной траектории, переносе занятий и др. Также в данный блок всем пользователям выводится информация о предстоящих мероприятиях университета. В блок «Новости» помещаются новости с официального сайта университета.

Цифровые локальные конструкторы DLC

Кластер по сути представляет собой цифровое описание определенного процесса, набор правил и процедур управления им. Он также обеспечивает удобное хранение BigData в таблицах баз данных «цифровых клеток». Для управления кластерами необходимы построение инструментов для добавления новых процессов и упаковка их в кластеры.

Аппаратом, обеспечивающим данные возможности в ядро-кластерной модели, являются цифровые локальные конструкторы DLC, представляющие собой программное обеспечение для реализации экспертных систем различного назначения. Они позволяют создавать новые процессы в различных сферах управления вузом (или модифицировать существующие) с целью упрощения каких-либо процессов.

В частности, цифровой локальный конструктор «Основные образовательные программы» должен в автоматическом онлайн-режиме создавать основные элементы ООП с автоматическим учетом электронных матриц компетенций с целью правильной постановки компетенций и

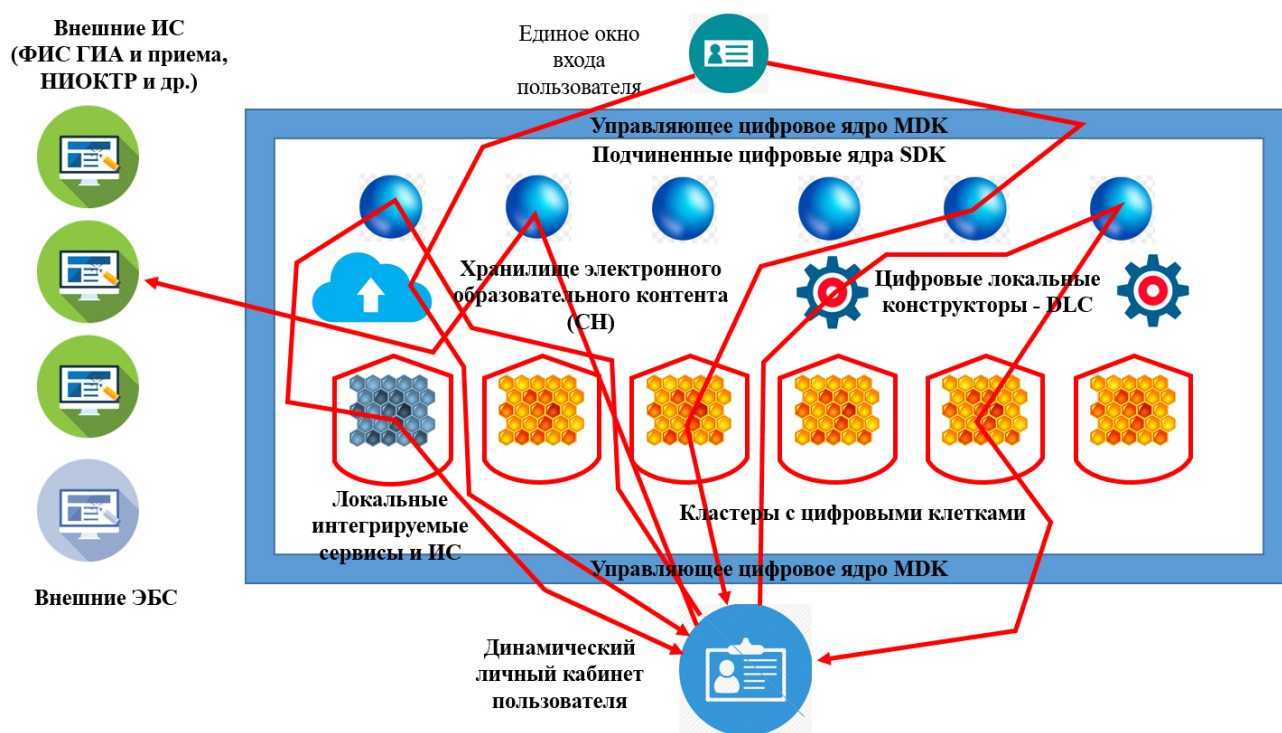


Рисунок 7. Многоядерно-кластерная модель платформы «Цифровой университет»

дисциплин, а также генерировать шаблон рабочей программы дисциплины с автоматическим заполнением списка рекомендуемой литературы путем получения информации из внутренней и внешних ЭБС.

DLC электронного образовательного контента должен давать возможность преподавателям в онлайн-режиме создавать онлайн-курсы лекций, тестовые задания и др. DLC компетенций – это конструктор перечня компетенций, привязанного к той или иной роли пользователя в системе, чтобы в дальнейшем использовать возможности этого пользователя для решения конкретных задач управления университета или подготовки отчетов.

Таким образом, в статье рассмотрена обобщенная ядро-кластерная модель платформы «Цифровой университет», позволяющая эффективно систематизировать возможности цифровизации как самого образовательного процесса, так и управления высшим учебным заведением в целом. Предлагаемая цифровая платформа является расширяемой благодаря кластерной структуре и неизменному цифровому ядру DK. Данная платформа может быть легко применена различными вузами с использованием технологии PaaS, более того, различные организации могут внедрять в нее свои кластеры, реализующие уникальные для данной организации процессы управления. Доступ к платформе может быть организован через web-приложение (сайт) или мобильное приложение.

В основе функционирования цифрового ядра DK лежат технологии нейронных сетей и искусственного интеллекта. Также проектируемая платформа позволяет внедрять и внешние информационные сервисы.

Расширение модели «Цифровой университет»

Для расширения предлагаемой модели «Цифровой университет» эффективным способом является система на основе совокупности управляющего и подчиненных цифровых ядер DK. Каждое подчиненное ядро управляет своим собственным кластером, что значительно должно снизить нагрузку на основное управляющее цифровое ядро (Managing Digital Kernel – MDK). Общая схема многоядерной модели приведена на рисунке 7. Назначение MDK – перенаправление потока управления на соответствующий набор подчиненных цифровых ядер (Slave Digital Kernel – SDK). Цифровые локальные конструкторы взаимодействуют с MDK, который затем передает информацию в подчиненные ядра для работы с конкретным кластером. Такая модель является более универсальной, чем модель с одним цифровым ядром

Заключение

В работе рассмотрены основные принципы создания платформы «Цифровой университет», определены основные процессы, подлежащие

цифровой трансформации в образовательной и административно-хозяйственной деятельности вуза. В работе изложены общие вопросы взаимодействия пользователей в рамках цифровой платформы, описан вариант управления платформой в целом с использованием ее ядра.

В заключение отметим следующее: данная цифровая платформа может претендовать на значительную степень общности, а именно – следует обратить внимание на то, что кластерная модель цифровой платформы позволяет ее применить и для других областей, в которых требуется проведение цифровой трансформации. Кластеры соответствуют основным категориям управления в той или иной сфере, при этом цифровое ядро ДК остается прежним, так как оно отвечает за интеллектуальный анализ BigData и взаимодействие с «цифровыми клетками» – таблицами баз данных.

В связи с этим для адаптации предложенной цифровой платформы для другой сферы цифровизации, по сути, достаточно грамотного описания в таблице 1, перераспределений ролей пользователей и модификации кластеров. На наш взгляд, подобная цифровая платформа может быть с успехом адаптирована для цифрового управления сельского хозяйства и др.

Литература

1. Цифровая экономика / под ред. И.А. Хасаншина. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 288 с.
2. Лapidус Л.В. Цифровая экономика. Управление электронным бизнесом и электронной коммерцией. М.: ИНФРА-М, 2019. 479 с.
3. Маркова В.Д. Цифровая экономика. М.: ИНФРА-М, 2018. 186 с.
4. 1С: Университет ПРОФ – Возможности. URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/university-prof/features> (дата обращения: 16.11.2019).

5. Руконтекст – антиплагиат, научный поиск и анализ документов. URL: <https://text.rucont.ru> (дата обращения: 16.11.2019).
6. Электронная библиотека (эбс) «Руконт». URL: <https://rucont.ru> (дата обращения: 16.11.2019).
7. NAUMEN – информационные системы управления растущим бизнесом. URL: <https://www.naumen.ru> (дата обращения: 16.11.2019).
8. eFront a part of BlackRock. URL: <https://www.efront.com> (дата обращения: 16.11.2019).
9. Программы для создания тестов и электронных книг. URL: <https://sunrav.ru> (дата обращения: 16.11.2019).
10. Official Site of OTRS, a leading service management suite. URL: <https://otrs.com> (дата обращения: 16.11.2019).
11. Приложение Skype для всех устройств. URL: <https://products.office.com/ru-ru/skype-for-business/download-app> (дата обращения: 16.11.2019).
12. Программные продукты лаборатории ММИС. URL: <https://www.mmis.ru/programs> (дата обращения: 16.11.2019).
13. Объявление о проведении в 2019 году отбора и документация о конкурсном отборе на предоставление грантов в форме субсидий из федерального бюджета некоммерческим организациям по мероприятию «Создание и обеспечение функционирования сети центров на базе образовательных организаций высшего образования для разработки моделей “Цифровой университет” федерального проекта “Кадры для цифровой экономики” национальной программы “Цифровая экономика в Российской Федерации” в 2019–2021 годах». URL: https://minobrnauki.gov.ru/ru/documents/card/?id_4=678 (дата обращения: 16.11.2019).

Получено 16.12.2019

Антипова Татьяна Александровна, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета. 443079, Российская Федерация, г. Самара, ул. Тухачевского, 226. Тел. +7 846 336-03-20; +7 917 122-30-44. E-mail: pta2903@mail.ru

Кудряшов Александр Анатольевич, к.э.н., доцент, доцент кафедры цифровой экономики Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-42; +7 927 202-11-26. E-mail: kudriachov@psuti.ru

Мишин Дмитрий Викторович, д.т.н., профессор, ректор ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 333-58-56; +7 927 209-29-85. E-mail: mishin-dv@psuti.ru

Осипов Олег Владимирович, д.ф.-м.н., доцент, проректор по науке и инновациям ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, ул. Л. Толстого, 23. Тел.+7 846 332-21-61; +7 917 941-10-73. E-mail: o.osipov@psuti.ru

THE KERNEL-CLUSTER MODEL OF «DIGITAL UNIVERSITY PLATFORM» AND ASPECTS OF ITS PRACTICAL IMPLEMENTATION

Antipova T.A.¹, Kudryashov A.A.², Mishin D.V.², Osipov O.V.²

¹Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

*²Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: o.osipov@psuti.ru*

The work is devoted to the description of the principles of creating a global digital platform for the management of the activities of higher education institution «Digital University» The basic principles of creating such a platform are considered, the main processes that are subject to digital transformation are identified. The work outlines the general issues of user interaction within the digital platform, describes the option of managing the platform as a whole using the platform core, neural network technologies and artificial intelligence. The possibility of creating individual educational trajectories for students is considered. A general model of the «Digital University» platform is proposed, as well as the possibility of an intelligent electronic recruitment of applicants. The basic principles of building models of digital platforms regardless of their field of application are described in the paper. The functionality of the digital platform in relation to the educational activities of the university is described in detail. The process of intellectual enrollment is considered on the basis of the analysis of their digital portfolios, as well as open data from social networks.

Keywords: *digitalization, digital transformation, digital learning, digital university, platform, distance learning*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.12

Antipova Tatyana Aleksandrovna, Samara State Medical University, 226, Tukhachevsky Street, Samara, 443079, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Computer Science, PhD in Physics and Science. Tel. +7 846 336-03-20; +7 917 122-30-44. E-mail: pta2903@mail.ru

Kudryashov Alexander Anatol'evich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Associate Professor of Digital Economics, PhD in Economics. Tel. +7 846 228-00-42; +7 927 202-11-26. E-mail: kudriachov@psuti.ru

Mishin Dmitriy Viktorovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Rector, Doctor of Technical Science. Tel. +7 846 333-58-56; +7 927 209-29-85. E-mail: mishin-dv@psuti.ru

Osipov Oleg Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Vice-Rector for Science and Innovations, Doctor of Physics and Mathematics. Tel. +7 846 332-21-61; +7 917 941-10-73. E-mail: o.osipov@psuti.ru

References

1. *Cifrovaya ekonomika / pod red. I.A. Khasanshina* [The Digital Economy. Ed. by I.A. Khasanshin]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2019, 288 p. (In Russian).
2. Lapidus L.V. *Cifrovaya ekonomika. Upravlenie elektronnyim biznesom i elektronnoj kommerciej* [The Digital Economy. E-Business and E-Commerce Management]. Moscow: INFRA-M, 2019, 479 p. (In Russian).

3. Markova V.D. *Cifrovaya ekonomika* [The Digital Economy]. Moscow: INFRA-M, 2018, 186 p. (In Russian).
4. *IS: Universitet PROF – Vozможности* [IC: University PROF – Abilities]. URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/university-prof/features> (accessed: 16.11.2019). (In Russian).
5. *Rukontekst – antiplagiat, nauchnyj poisk i analiz dokumentov* [Rukontekst – anti-plagiarism, scientific search and analysis of documents]. URL: <https://text.rucont.ru> (accessed: 16.11.2019). (In Russian).
6. *Elektronnaya biblioteka (ebs) Rukont* [Electronic library (ebs)]. URL: <https://rucont.ru> (accessed: 16.11.2019). (In Russian).
7. *NAUMEN – informacionnaya sistema upravleniya rastushchim biznesom* [NAUMEN – information systems for managing a growing business]. URL: <https://www.naumen.ru> (accessed: 16.11.2019). (In Russian).
8. *eFront a part of BlackRock*. URL: <https://www.efront.com> (accessed: 16.11.2019).
9. *Programmy dlya sozdaniya testov i elektronnyh knig* [Applications for creating tests and e-books]. URL: <https://sunrav.ru> (accessed: 16.11.2019). (In Russian).
10. *Oficial'nyj sayt OTRS, vedushchego paketa uslug po upravleniyu* [Official Site of OTRS, a leading service management suite]. URL: <https://otrs.com> (accessed: 16.11.2019).
11. *Prilozhenie Skype dlya vseh ustrojstv* [Skype app for all devices]. URL: <https://products.office.com/ru-ru/skype-for-business/download-app> (accessed: 16.11.2019).
12. *Programmnye produkty laboratorii MMIS* [Software products MMIS laboratory]. URL: <https://www.mmis.ru/programs> (accessed: 16.11.2019). (In Russian).
13. Ob'yavlenie o provedenii v 2019 godu otbora i dokumentaciya o konkursnom otbore na predostavlenie grantov v forme subsidij iz federal'nogo byudzheta nekommercheskim organizaciyam po meropriyatiyu «Sozdanie i obespechenie funkcionirovaniya seti centrov na baze obrazovatel'nyh organizacij vysshego obrazovaniya dlya razrabotki modelej “Cifrovoj universitet” federal'nogo proekta “Kadry dlya cifrovoj ekonomiki” nacional'noj programmy “Cifrovaya ekonomika v Rossijskoj Federacii” v 2019–2021 godah» [Announcement on the selection in 2019 and documentation on the competitive selection of grants in the form of subsidies from the federal budget to non-profit organizations for the event «Creating and maintaining a network of centers based on educational institutions of higher education for the development of Digital University models of the federal project “Personnel for of the digital economy” of the national program “Digital economy in the Russian Federation” in 2019–2021»). URL: https://minobrnauki.gov.ru/ru/documents/card/?id_4=678 (accessed: 16.11.2019). (In Russian).

Received 16.12.2019

УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

УДК 004

ЛЕОНАРД ДЖИММИ СЭВИДЖ И ЕГО СУБЪЕКТИВНАЯ ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ. ЧАСТЬ I. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, ПРЕДПОСЫЛКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Абрамов В.Е., Маслов О.Н., Шаталов И.С., Юкласов К.А.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: maslov@psati.ru

Статья открывает цикл публикаций, целью которых является ознакомление специалистов в области инфокоммуникационных технологий с наследием одного из основоположников субъективной теории вероятностей, которая именуется сегодня теорией вероятностей Бернулли – Сэвиджа. Отмечено, что содержание фундаментального

труда «Основы статистики» выводит современного читателя далеко за пределы названия данной книги, поскольку непосредственно связано с субъективными теориями риска и ожидаемой полезности. Показано, что теория вероятностей Бернулли – Сэвиджа соответствует подклассу сложных систем, которые принято называть нерелекторными квазиреальными системами. К числу таких систем (инновационных, проектируемых, разведанных), неотъемлемым компонентом которых является «человеческий фактор», относятся социально-экономические, экологические, производственные, военные и другие иерархические системы. В данной первой статье рассматриваются условия возникновения, исходные представления, исторические предпосылки и перспективы, а также область применения теории вероятностей Бернулли – Сэвиджа.

Ключевые слова: субъективная теория вероятностей, условия возникновения, исходные представления, исторические предпосылки и перспективы, область применения

Введение

Фундаментальный труд одного из отцов субъективной теории вероятностей (ТВ) Бернулли – Сэвиджа [1] более чем полувековой давности до сих пор недооценен, на наш взгляд, научной общественностью по целому ряду причин. Во-первых, он не был оперативно переведен на русский язык по непонятным причинам – скорее всего, далеким от науки. Во-вторых, безусловно, сдерживающим моментом является его название, поскольку статистика в полном смысле этого слова до сих пор мало кого интересует. В-третьих, впечатляющие достижения объективной ТВ Лапласа – Колмогорова долгое время достаточно хорошо удовлетворяли потребностям прикладных наук, и в каком-то субъективном дополнении эта версия ТВ не нуждалась. В-четвертых, вербальные, эвристические, эмпирические и другие методы, изначально присущие ей, в известной мере компрометировали ее как науку вообще, признаком которой всегда считались строгие аналитические методы, математические вычислительные процедуры.

Времена, однако, с тех пор существенно изменились, и потребность в субъективной ТВ Бернулли – Сэвиджа самым парадоксальным образом стала объективной реальностью. Поэтому авторы статьи в данном случае взяли на себя смелость не столько выполнить перевод [1], сколько подготовить своего рода дайджест, реферативный конспект и обзор – не претендуя, естественно, на авторство, но постаравшись более-менее связно изложить принципы субъективной ТВ, осветить ее основные подходы и методы. Чтобы избежать бесчисленного множества кавычек при цитировании, фрагменты [1], включая мысли и утверждения автора книги, ими было решено набирать обычным простым шрифтом, тогда как их собственные, к сожалению, неизбежные, краткие комментарии и добавления – простым курсивом.

Остается добавить, что все выявленные недочеты и неточности перевода, теоретические и стилистические огрехи текста они целиком принимают на себя и будут благодарны за соответствующий критический анализ.

Предварительные замечания

Книга по столь актуальной и спорной тематике может иметь значение в образовательном процессе, но это не учебник и не инструкция по применению, которых, впрочем, тоже не так уж много. В открытом или завуалированном виде, пряча за вежливостью заинтересованность, она даже в большей мере, чем другие публикации, должна отражать в первую очередь взгляды самого автора. Каждый ученый, выражающий свое мнение, всерьез опасается (как можно судить об этом из других предисловий), что он общается лишь сам с собой и с собственной книгой. Однако он всегда желает знать, пусть это и покажется кому-то излишне благородным мотивом, несет ли его работа какой-то созидательный смысл. Авторское тщеславие, поддержка друзей, доверие издателя дают ему надежду на это, но он никогда не знает этого точно, а чужие благие надежды сбываются редко.

Чисто математических знаний и опыта требуется не так уж много, одного года практики в вычислениях будет более чем достаточно. Но хотя читатели, не обладающие знаниями в области формальной логики, или в других абстрактных областях математики, способны понять предлагаемый материал, автор опасается, что для них некоторые математические выкладки покажутся непривлекательными. Ради таких читателей он берет на себя смелость привести там, где это требуется, ряд педагогических образовательных замечаний, которые более зрелым математикам покажутся лишними или даже раздражающими. Кроме того, нельзя быть уверенным в том, что слишком длинный математический вывод может быть понят при первом прочтении – за исключением самых элементарных вещей (хотя понятие «элементарный» тоже зависит от уровня знаний читателя). Тот, кто хочет понять только самую суть, может прочитать такой вывод один раз. Но, с другой стороны, ему полезно сделать это как минимум во второй раз. И вообще, читая серьезные книги, лучше всего сидеть, выпрямившись

за столом на жестком стуле, карандаш и ручка всегда должны быть под рукой, так как рисунки должны быть нарисованы, а шаги в доказательстве проверены и подтверждены вычислениями.

Роль научных основ

Можно слышать, что нет ничего более надежного в науке, чем ее основы: ведь если возникают сомнения в основах, то уж точно ненадежны и противоречивы глубины науки. На деле же основы являются самыми спорными частями большинства, если не всех наук: физика и математика отлично иллюстрируют этот феномен. Что же касается основ статистики, то они включают в себя вероятность – а это самый спорный предмет из того, о чем я когда-либо слышал. Как и в других науках, споры вокруг основ статистики идут постоянно, но они не являются катастрофой, как это может показаться на первый взгляд. Я верю, что здесь, как нигде, можно избежать «катастрофы» – в первую очередь потому, что в повседневной практике здравый смысл позволяет спасти положение, а при достаточной педантичности – и уберечься от опасных ошибок. Трудно судить, однако, о том, насколько относительно спокойствие в данном случае связано с господством достаточно строгой научной школы, внутри которой основные положения хорошо согласованы между собой.

Несмотря на то что исследование основ не играет заглавной роли, которую им бы присвоило твердое следование установленному порядку, они продолжают играть достаточно большую роль в разработке науки, влияют и испытывают влияние целого ряда ее практических отраслей.

Исторические предпосылки

Понятие и проблема индуктивного вывода появились в философии начиная с времен Аристотеля. Математический анализ ключевых аспектов данной проблемы датируется началом XVIII века. Готфрид Лейбниц был первым, кто опубликовал свои соображения на этот счет, но все же первой конкретной работой по праву считается *Ars Conjectandi* (1713) Я. Бернулли [2], опубликованная после его смерти. Эта математическая работа строилась вокруг принципа вероятности, и несмотря на то, что интерес к вероятности наблюдался к тому времени уже достаточно долго, ни одна из публикаций до *Ars Conjectandi* не была посвящена индуктивному выводу.

В настоящее время значительный интерес к математическому обоснованию индуктивного вывода продолжает иметь место. По причинам,

которые я не берусь анализировать, эта исследовательская деятельность удивительным образом сконцентрирована в англоязычном мире. Эти проблемы известны под несколькими названиями, большинство из которых подчеркивают аспекты темы, актуальные в момент выбора им имени. «Математическая статистика» – одно из самых ранних имен, до сих пор сохранившее свою популярность. В таком сочетании термин «математическая» соответствует рациональным теоретическим и по возможности расширенным в математическом плане определениям, отделенным от проблем сбора и обработки численных данных, которые следует рассматривать вне проблемы индуктивного вывода, математическая сторона которой обычно тривиальна. Название «статистический вывод» при этом показывает, что внимание сосредоточено вокруг индуктивного вывода. Термин «статистическое решение» отражает идею о том, что индуктивный вывод не всегда, даже если поверить приведенным неокончательным доказательствам, позволяет принять решение в предлагаемых обстоятельствах.

Общепризнано, что статистика так или иначе зависит от вероятности. Но относительно того, что такое вероятность и как она связана со статистикой, имеет место редкое в наши дни абсолютное несогласие – напоминающее разве что языковой конфликт времен строительства Вавилонской башни. Существует ряд интерпретаций понятия «вероятность», отстаиваемых действующими специалистами, причем некоторые из них считают даже, что многообразие этих интерпретаций полезно, поскольку в зависимости от концепции вероятности они могут иметь применение в разных контекстах. Несомненно, что большая часть разногласий являются чисто терминологическими и исчезли бы при достаточно строгом анализе, если бы авторитетные ученые, работающие в данной области, самостоятельно навели здесь необходимый порядок.

Принимая во внимание разногласия относительно основ статистики, удивительно и, безусловно, приятно, что большинство исследователей согласны между собой по поводу чисто математических свойств вероятности. Фактически все их противоречия сконцентрированы в вопросах прикладной интерпретации общепринятого понятия вероятности, то есть в определении ее дополнительных математических свойств.

Наиболее распространенное определение вероятности принадлежит Колмогорову [3] и названо его именем. Но стоит отметить, что существуют разногласия между ним и группой,

возглавляемой фон Мизесом [4], а также существует ряд технических вариаций определения Колмогорова, которые представляют интерес и будут рассмотрены далее.

Можно выделить три основных способа интерпретации вероятности – в этой книге я назвал их объективистскими, субъективными и необходимыми (степень разумной веры). Необходимо хотя бы кратко дать описание каждого из них – читателя, который сочтет эти описания чересчур сжатыми и неразборчивыми, могу уверить в том, что они будут развиваться на протяжении всей книги.

Объективистские представления подразумевают наличие в природе неких повторяющихся ситуаций, таких как подбрасывание монеты, которые довольно близки к математической концепции взаимно независимых, повторяющихся с одинаковой вероятностью, случайных событий. Согласно этим представлениям, доказательство качества связи между поведением повторяющихся событий, математической концепцией и величиной вероятности того, что это означает в самом общем случае, должно быть получено путем наблюдения указанных повторяющихся событий и никак иначе.

Субъективные представления считают, что вероятностная мера достоверности заключается в том, что у каждого человека может быть собственная правда в виде относительного определенного суждения: например, что «завтра будет дождь». Эти взгляды постулируют, что заинтересованный человек в известной степени разумен, но не отвергают возможность существования других разумных людей, у которых при контакте с теми же фактами и доказательствами могут быть разные степени уверенности в истинности тех же суждений.

Необходимые представления (степень разумной веры) полагают, что вероятностная мера измеряется степенью, которая определяется набором суждений, логической необходимостью и существует отдельно от человеческого мнения, подтверждая ту или иную истину. Они обычно расцениваются их последователями как расширение логики, говорящей, когда один набор суждений требует истинности других.

Примечание о том, что куда приятнее выглядит определение Кейнса. В 20-е годы XX века с новой интерпретацией вероятности выступил известный английский ученый Дж.М. Кейнс. Критикуя классическую и частотную интерпретации, он предложил рассматривать вероятность как степень разумной веры, которую мы припи-

сываем высказыванию при точно фиксированных данных. «Термины *достоверность* и *вероятность*, – отмечает он, – описывают различные степени разумной веры в высказывание, которое мы обязаны приписать ему при различном знании».

«Пусть наши послышки, – указывает далее Кейнс, – состоят из любого множества высказываний *h*, а наше заключение – из множества *a*. Тогда, если знание *h* обосновывает разумную веру степени *a*, мы говорим, что существует вероятностное отношение степени *a* между *h* и *a*». Таким образом, в интерпретации Кейнса, вероятность представляет логическое отношение между двумя множествами высказываний. Поэтому оно имеет аналитический, а не синтетический, эмпирический характер. Важно отметить, что одновременно Кейнс подчеркивал объективный характер своей интерпретации вероятности. Хотя степень вероятности и меняется с изменением нашего знания, она характеризует отношение, независимое от сознания человека.

«В смысле, важном для логики, – пишет Кейнс, – вероятность не субъективна. Она не является, так сказать, предметом человеческого каприза. Высказывание вероятно не потому, что мы думаем о нем так. Как только появляются факты, которые определяют наше познание, что считать вероятным и невероятным в этих обстоятельствах, фиксируется объективно и не зависит от нашего мнения. Теория вероятности является логической, таким образом, потому, что она имеет дело со степенью веры, которая является разумной при данных условиях, а не просто с фактической верой, которая может быть как разумной, так и неразумной».

После всего, чтобы было сказано об интенсивности и сложности противоречий вокруг понятия вероятности, можно понять, если эта короткая таксономия приведет эксперта по основам статистики в бешенство, но я верю, что она все же принесет больше пользы, чем вреда.

«Большой взрыв» в научных исследованиях в англоговорящем мире в XX веке сосредоточен вокруг объективистских представлений об интерпретации вероятности. Как будет вскоре объяснено, любое чистое объективистское представление влечет за собой серьезные трудности для аппарата статистики. Эта трудность была признана специалистами Британо-Американской школы (да будет позволено мне использовать ее условное название, надеюсь, что не буду воспринят слишком буквально или вообще националистически), которые рассматривают его как

существенное, хотя и преодолимое препятствие, а в действительности – как центральную проблему статистики.

Трудность объективистской позиции при любых подходах заключается в том, что вероятности могут плодотворно применяться только к повторяющимся событиям, то есть к определенным процессам с учетом сложившегося представления о них. Поэтому одинаково бессмысленно говорить, что рассматриваемое суждение есть или абсолютная истина, или вероятность его может быть только «1» или «0», при восприятии факта о том, что данное суждение является истинным или ложным. Ни в какой интерпретации вероятность не может служить в качестве меры доверия относительно имеющегося суждения. Таким образом, существование доказательства суждения в объективистском подходе не может быть выражено только разговорами о том, что суждение истинно с какой-то определенной вероятностью.

Британо-Американская школа имела огромный успех в ряде направлений своей деятельности, число ее последователей быстро росло. С ними росли и множество процедур интуитивного обращения к ней, и, что очевидно, значимая ценность этих обращений – в научных исследованиях, промышленности, коммерции. Успех научной школы можно считать фактическим доказательством корректности подхода, на котором она базируется. Поэтому каждый, кто опровергает ее взгляды, должен или дискредитировать процедуры и практические результаты, к которым они привели, или показать (именно это я и собираюсь сделать в настоящей книге), что они также полностью соответствуют предложенной альтернативе.

Ряд исследователей, к числу которых я себя отношу, полагают, что основания для принятия объективистских взглядов не универсальны и не всемогущи, что существуют серьезные логические ограничения на любое такое представление и, что важнее всего, трудность применения строгих объективистских взглядов в статистике отражает их существенное несоответствие реальности.

Содержание книги

Целью автора является изложение теории основ статистики, которая базируется на субъективном взгляде на вероятность – в основном производном от работы Б. де Финетти [5]. Теория представлена в предварительном виде, поскольку, я это ясно вижу и понимаю, в ней есть пробелы, которые должны быть дополнены критически мыслящими читателями. Взгляды на вероятность

также будут рассмотрены в книге – частично для собственного интереса, частично, чтобы объяснить взаимоотношения между субъективным подходом, на котором она построена, и другими принятыми взглядами.

Книга состоит из семнадцати глав, первой из которых является введение. Главы 2–7, если можно так выразиться, касаются основ статистики на достаточно глубоком теоретическом уровне. Они развивают, объясняют и защищают определенную абстрактную теорию поведения высокоидеализированного человека, сталкивающегося с неопределенностью. Показано, что эта теория содержит в себе скрытое проявление теории субъективной вероятности, соответствующее субъективным взглядам на вероятность, что является основным в этой книге, а также теории полезности в ее современной форме, связанной с работами фон Неймана и Моргенштерна [6].

Начиная с 8 главы осуществляется переход к прикладному уровню основ статистики – иначе говоря, от предварительной общей статистики к конкретной статистике. В этих главах показано, что прежняя теория была слишком идеализированной и не всегда подходила для практического применения. Компромиссные предложения рассмотрены при анализе ряда открытий и идей Британо-Американской школы – надеюсь, что внешне несовместимые системы идей, обусловленных, с одной стороны, субъективным взглядом на вероятность, а с другой стороны, конкретикой объективистских исследований, фактически дополняют друг друга и помогут читателю лучше понять их сущность.

Предварительные размышления над решениями в условиях неопределенности

Решения, принятые перед лицом неопределенности, встречаются в жизни каждого человека и каждой организации. Даже животные постоянно принимают такие решения, и психологические механизмы, при помощи которых они это делают, имеют много общего с человеческими. Однако разница в том, что формальное рассуждение не играет никакой роли в процессе принятия решений у животных, играет малую роль у детей и ощутимо меньшую, чем хотелось бы, но достаточно большую у взрослых людей. Можно сказать, что цель этой книги, и, возможно, статистики в целом, состоит в том, чтобы выяснить основания формальных рассуждений и их роль в процессе принятия решений.

Рассуждение обычно ассоциируется с логикой, но очевидно, что использование логики ста-

новится достаточно ограниченным при встрече с неопределенностью. Поэтому встает вопрос о том, не может ли логика быть расширена в соответствии с некими приемлемыми для нас принципами, чтобы более полно взаимодействовать с неопределенностью. Такая попытка, начатая в данной главе, отличается двумя важными обстоятельствами.

Во-первых, так как логика связана с суждениями, многим показалось бы естественным расширить логику за счет установки критериев меры, с которой одно выражение определяет другое выражение либо представляет собой его подтверждение. Но что кажется мне очевидным и одновременно еще более важным и действительно значимым, так это логический поиск критерия для выбора лучшего из возможных способов действий как следствие обобщения взаимосвязей между суждениями по типу импликации «если... то...», что может быть удобным обходным маневром при решении проблемы, который намного лучше ее лобовой атаки. Логика действительно как бы сама собой приводит к нужному критерию в ситуации, когда суждение, признанное истинным, обладает релевантностью и, в свою очередь, относится к истинному, то есть единственно правильному решению.

Если будет доказано, что наше представление о частичной импликации так же надежно (или даже лучше) сопряжено с принятием верного решения, как это предполагает полная импликация, то это было бы замечательно, но возникает вопрос о том, как такое представление можно получить косвенным путем, поскольку найти верное решение в явном виде невозможно. Эта проблема достаточно подробно рассматривается в [7].

Во-вторых, обычно предполагают, что если два индивида находятся в одинаковой ситуации, обладают одинаковым мировоззрением, способностями, интеллектом, объемом информации, оба действуют разумно, то их действия будут идентичными. Такого согласия, вера в которое (в отличие от субъективного взгляда) представляет собой «необходимое» представление о вероятности, конечно же, стоит добиваться. Но лично я считаю, что такой подход даже приблизительно не соответствует действительности, хотя на данный момент не имею достаточно сильных аргументов для такого «пессимизма» и не могу настаивать на этом. Поэтому я настаиваю только на том, что, пока обратное не будет доказано, мы должны полагать рассуждение (логический ход мысли) недостаточным средством для того, чтобы прийти к полному согласию. Расширения

логики, в том числе представленные в этой книге, не приведут к полному согласию, и достаточно ли будет для него каких-то дополнительных принципов или нет, или же дополнительные принципы и их следствия, которые можно привести, будут способствовать ему, я не знаю. Но что вполне возможно и во что я действительно верю, так это в то, что предпосылки для таких решений могут быть найдены на основе представлений, о которых здесь не говорится.

Далее в данной главе будет построена формальная модель – схема ситуации, когда человек сталкивается с неопределенностью. В заключительной части с учетом этой модели обсуждаются причины и формулируются принципы, претендующие, на мой взгляд, на право быть взятыми в качестве постулатов для принятия рациональных решений.

Личность как лицо, принимающее решение

Прежде чем перейти от задачи принятия решений к высокоидеализированной теории поведения «рационального человека», необходимо обсудить и согласовать критерии его рациональности. Поскольку рациональное означает логичное, казалось бы, по умолчанию можно оставить все как есть, полагая, что это всего лишь форма, однако наш человек должен будет принимать решения и в ситуациях, где необходимы решения за пределами ординарной логики. Ведь когда те или иные правила представлены для вашего рассмотрения, вы прежде всего должны определиться по отношению к ним, должны спросить сами себя, насколько твердо вы повели бы дела в соответствии с ними или вопреки им, как бы реагировали, заметив, что нарушаете их, и т. д.

В экономической теории известна идея о том, что при определенных условиях организации ведут себя подобно личностям, то есть отдельным людям, поэтому теория, изначально предназначенная для людей, бывает также применима (может даже давать лучшие решения) для таких коллективных объектов, как семьи, корпорации и даже нации. С учетом этой неоднозначности специалисты стараются избегать понятий «человек как персона» или даже «индивидуальность» по отношению к поведенческим единицам (объектам), к которым они относятся, но для наших целей определение «человек как персона» путаницы не вносит (тем не менее нельзя забывать, что это понятие используется в широком смысле слова).

Среда и состояния среды

Модель неопределенности имеет в виду формальное описание (результат моделирования) того, в чем человек не уверен. Чтобы доходчиво и правильно (хотя неофициально и неформально) представить суть этого описания, начнем с рассмотрения списка примеров. Человек может быть не уверен в тех или иных конкретных фактах – неопределенность оформлена в виде следующих вопросов.

№ 1. Является ли выбранное яйцо плохим (непригодным в пищу)?

№ 2. Какие яйца из дюжины, если таковые в ней имеются, непригодны в пищу?

№ 3. Какая температура в Чикаго была вчера в полдень?

№ 4. Какая температура была и какая температура будет в месте, которое сейчас занимает Чикаго, в полдень начиная с 1 января 1 года н.э. до 1 января 4000 года н.э.?

№ 5. Какой будет бесконечная последовательность «орлов» и «решек» в результате бесконечно повторяющихся подбрасываний монетки?

№ 6. Как выглядит полное десятичное разложение числа π ?

№ 7. Как выглядит полное, точное и при этом достаточно понятное описание истории Вселенной?

Все приведенные примеры имеют ряд общих черт, хотя если их будет слишком много, то это дискредитирует воображение автора. В каждом из представленных выше случаев человек в чем-то не уверен: в яйце, в дюжине яиц, в температуре, последовательности температур и т. д. Каждый объект допускает определенный класс описаний, которые можно мысленно применить к нему. Яйцо из примера № 1 может быть как плохим, так и хорошим, но условия заданы таким образом, что исключают все другие описания (помимо заявленных), хотя это не отменяет того факта, что выбранное яйцо обладает большим числом иных свойств. Для примера № 2 любое множество из дюжины яиц (включая случаи, когда все они хорошие или наоборот – все плохие) может быть непригодно в пищу, соответствует 2^{12} вариантам существования второго примера. Для примера № 3 и каждого последующего существует бесконечное число вариантов (описаний), хотя сложность и число описаний (вариаций) разнится в зависимости от конкретного примера, достигая наивысшей в примере № 7.

Пример № 6 – это небольшая аномалия, так как человек, не знающий вариантов представления числа π , тем не менее может получить его,

Таблица 1. Термины, характеризующие среду

Термин	Определение
Среда	Объект, на котором (вокруг которого) человек сосредоточен
Состояние среды	Описание среды, не оставляющее ни один связанный со средой (относящийся к делу) аспект неопианным (незамеченным, без внимания)
Истинное состояние среды	Состояние, которое признано фактическим, то есть истинное описание среды

руководствуясь одной лишь логикой, но это будет стоить ему достаточно больших усилий. Для читателей, незнакомых с данной проблемой, поясним, что если воспринимать π как область единичной окружности, то логично предположить, что его значение будет не больше площади квадрата, описывающего эту единичную окружность, откуда следует $\pi < 4$. Развитие метода позволяет вычислить π с любой точностью аналогичным образом, используя чистую логику, а также установить другие факты, связанные с π , например, что π не является рациональным числом и т. д.

Необходимая в связи с рассмотренными понятиями терминология представлена в виде таблицы 1 компактно и эффективно (в том смысле, что наводит на нужные мысли), в разумной гармонии со статистикой и простыми рассуждениями.

При применении теории каждый раз встает вопрос о том, какую среду следует использовать в контексте решаемой задачи. Если наш «человек как персона» заинтересован только в одном хорошем яйце из дюжины, должно ли именно это яйцо быть средой, или же средой должна стать дюжина яиц? В дальнейшем, по мере изучения теории, станет ясно, что нет никакой проблемы в том, чтобы взять большую из двух сред в качестве модели ситуации. Поэтому каждый раз возникает соблазн использовать одну достаточно большую среду для всех остальных – вроде той, что представлена в примере № 7.

Наиболее серьезное возражение против этого состоит в том, что пример № 7 является слишком общим (неопределенным, абстрактным), а опыт математических и философских наук подсказывает, что неопределенность не может быть устранена без разрушения универсальности объекта. Можно также добавить, что использование разумно малых сред в пределах контекста решаемой задачи пусть и является существенным упрощением, но может быть оправдано, например, ввиду наличия математических работ с родственными идеями.

Очевидно, что среда дюжины яиц ощутимо больше мира одного яйца из дюжины. На первый взгляд это хорошо, но следует отметить, что состояние малой среды может соответствовать не одному состоянию большей среды, а набору ее состояний. Утверждение «плохое яйцо непригодно в пищу» целиком описывает малую среду, следовательно, является ее состоянием, но в то же время мало что говорит нам о большой среде и соответствует только 2^{11} ее состояний. В данном контексте меньшая среда получена из большей среды путем игнорирования ряда различий в их состояниях, хотя не самих этих состояний напрямую. Данный вид уменьшения неопределенности может быть полезен в случае, если часть состояний расцениваются человеком как фактически невозможные и могут быть проигнорированы.

События

Событие – это множество состояний. Например, в связи со средой из примера № 2 человек вполне может быть сосредоточен на событии, где ровно одно яйцо из дюжины является плохим (очевидно, что это событие обладает 12 состояниями в качестве элементов), или чуть менее отвлеченно: что по меньшей мере одно из яиц испортилось (это событие обладает $2^{12} - 1$ состояниями в качестве элементов, то есть всеми возможными, за исключением одного). В связи со средой из примера № 3 человек может быть сосредоточен на событии с бесконечным числом состояний, которое заключается в том, что температура вчера в полдень в Чикаго была ниже нуля. Заключительной иллюстрацией, которая наверняка понравится математикам, является пример № 5: отношение «орлов» к «решкам» приблизительно равно трем при бесконечной последовательности исходов.

Для абсолютно любой среды существуют два события, имеющие первостепенную логическую важность, пусть их упоминание и покажется в чем-то банальным. Это универсальное событие и пустое событие. Универсальное событие будем обозначать S , это событие, включающее в себя в качестве элемента каждое из состояний среды. Поскольку понятие «среда» обладает существенным техническим смыслом, обозначим его S . Пустое событие может быть адекватно выражено как арифметический ноль, это событие, которое не обладает ни одним состоянием в качестве элементов. Например, для примера № 1 событие, в котором яйцо либо хорошее, либо плохое, – это универсальное событие, но когда яйцо хорошее и плохое одновременно – это пустое событие.

Важно также иметь возможность утверждать, что рассматриваемое событие включает истинное состояние объекта среди своих элементов. В английском языке нет альтернативы выражению «событие существует». Разрабатываемая теория не делает ссылок на время. Поэтому понятие «событие» нами везде формулируется без связи с каким-то определенным временем, однако «временные идеи» могут быть использованы при описании конкретных событий. Таким образом, хотя не говорится о том, что убийство Линкольна относится к 1865 г., а возвращение кометы Галилея произойдет в 1985 г., имеется в виду, что эти события связаны с указанными моментами времени.

Последствия, действия и решения

Сделанный выбор означает необходимость предпринять затем одно, два или несколько тех или иных действий. При выборе действий необходимо учитывать возможные состояния среды, а также явные и неявные последствия каждого такого действия в каждом возможном состоянии среды. Последствия – это прежде всего то, что может далее случиться с человеком.

Рассмотрим простой семейный пример. Пусть ваша жена разбила пять яиц в миску, которые все оказались хорошими, а когда вы пришли, то вдруг предложила вам самому закончить делать омлет. Шестое яйцо, которое она не использовала по неизвестной причине, должно либо пойти в омлет, либо будет потрачено впустую, а пока оно лежит целое рядом с миской. Вам необходимо решить, что делать с этим неразбитым яйцом – возможно, что это не очень хорошее упрощение ситуации, но вы должны выбрать одно из трех действий, а именно: разбить яйцо и добавить его к остальным в миску, разбить его в блюде для проверки на предмет пригодности в пищу или же выбросить без всякой проверки. В зависимости от состояния рассматриваемого объекта (неиспользованного шестого яйца) каждое из трех этих действий будет иметь последствия, указанные в таблице 2.

Наш простой пример из практики приготовления омлета показывает, сколь разнообразными могут быть объекты и явления, рассматриваемые в качестве следствий. Они могут включать деньги, качество жизни, состояние здоровья, одобрение друзей, благополучие других людей, волю Бога – иначе говоря, все, что имеет ценность для человека. Соответственно, следствия могут быть названы состояниями человека в противоположность состояниям среды. Также в случае небольшого расширения анализа при помощи

Таблица 2. Пример, иллюстрирующий действия, состояния и последствия

Действие	Состояние объекта	
	Хорошее	Плохое
Разбить яйцо в миску	Омлет из шести яиц	Омлета нет, пять хороших яиц потеряны
Разбить яйцо в блюдец	Омлет из шести яиц и блюдец, которое нужно помыть	Омлет из пяти яиц и блюдец, которое нужно помыть
Выбросить яйцо	Омлет из пяти яиц, одно хорошее яйцо потеряно	Омлет из пяти яиц

понятия экономический доход они могут называться «возможным доходом» человека. В любой задаче множество следствий обозначается далее заглавной буквой F , а индивидуальные следствия – строчными f, g, h , и т. д. В примере с омлетом F состоит из шести следствий, заключенных в таблице 2: омлет из шести яиц, омлета нет, пять хороших яиц уничтожены и т. д.

Если два разных действия имеют одинаковые следствия в каждом из состояний среды, то с практической точки зрения нет особого смысла отличать их друг от друга и вообще рассматривать в качестве двух разных действий. Однако важно, что действие может быть определено по его возможным следствиям. Или, выражаясь более формально, действие – это функция присоединения следствия к каждому состоянию среды. Обозначение f будет использоваться для указания действия, а именно: функции, присоединяющей следствие $f(s)$ к состоянию s . При этом обозначение функции f значительно лучше, чем привычное $f(s)$ по аналогии с термином «логарифм»: ведь просто «логарифм» звучит на порядок лучше, нежели «логарифм z ». Обозначения, которые используются далее, очень часто игнорируются в работах математиков (что оправдано их характером), но нам они особенно необходимы в связи с действиями, в чем мы очень скоро убедимся. Когда несколько действий рассматриваются как одно, они могут быть обозначены разными способами: буквами, следующим образом: f, g, h ; с помощью знака штриха: f, f', f'' ; или подстрочными индексами: f_1, f_2 . Множество всех действий, доступных в данной ситуации, будут обозначаться F или подобным символом. В примере с омлетом F включает три действия в качестве элементов. Например, если обозначим первое из трех действий, отображенный в таблице 2 как f , то оно будет определено следующим образом:

$$-f(\text{хорошее}) = \text{омлет из шести яиц};$$

$-f(\text{плохое}) = \text{омлета нет, и пять хороших яиц уничтожены.}$

Можно было бы выдвинуть аргумент, что формальное описание решения, установленное таким образом, является недостаточным, поскольку человек может не знать следствия действий, открывающихся ему в каждом состоянии среды. Например, человек может быть столь невежественным, что даже не знает о том, что одно плохое яйцо способно испортить омлет из шести яиц. Но в этом случае ничего не может быть проще, чем признать, что в «среде» существуют четыре состояния, соответствующие двум состояниям яйца, и два возможных ответа на вопрос из области кулинарии: испортит ли одно плохое яйцо омлет из шести яиц. Мне кажется очевидным, что это решение работает наилучшим образом, хотя последующий более тщательный анализ может оказаться весьма нетривиальным. Читатель, интересующийся техническими подробностями метода, может найти обширное описание аналогичной задачи во второй главе [6], где фон Нейман и Моргенштерн обсуждают упрощение игры общего вида до приведенной формы.

Формальное описание может показаться недостаточным в том смысле, что оно не дает явного представления о том, как одно решение может привести к другому. Таким образом, если омлет будет испорчен в момент, когда в него разбили плохое яйцо, могут возникнуть новые вопросы: что съесть на завтрак вместо испорченного омлета и как успокоить разгневанную жену? Но, как и в предыдущем параграфе, очевидный недостаток предложенного способа описания объясняется неполным анализом возможных состояний: я бы сказал, что список доступных действий, отображенный в таблице 2, недостаточен для интерпретации, только что добавленной нами в решаемую задачу. В ситуации, где одиночное действие «разбить в чашку» должно стать несколькими действиями: «разбить в чашку и в случае провала приготовить тосты», «разбить в чашку и в случае провала отвести семью завтракать в соседний ресторан», соответствующие следствия этих новых действий легко себе представить.

Согласно приведенным суждениям, то, что для обычного способа мышления выглядит как цепочка решений: одно следует за другим во времени, согласно предложенному формальному описанию, выглядит как одиночное решение. Иными словами, предлагается, чтобы выбор линии поведения или плана рассматривался как одиночное решение. Подобная точка зрения, пусть и не всегда явно выраженная, сыграла заметную роль

в достижениях статистики XX века. Например, ее великая движущая сила – экспериментаторы, даже сегодня предполагают, что назначение статистики и статистиков в том, чтобы правильно извлечь выводы из данных, собранных в результате эксперимента или наблюдения за объектом. При этом статистики боятся одного: что им недостает предусмотрительности при сборе данных вне зависимости от использованного метода анализа, то есть они считают, что проектирование и анализ эксперимента должны составлять единое целое.

Данная точка зрения выражается как половицей «Не зная броду, не суйся в воду», так и противоположной ей «Не говори гоп, пока не перепрыгнешь». Несмотря на то что эти две половицы противоречат друг другу, очевидно, что в каждой из них есть доля истины, но очень редко (если это вообще возможно) бывает, чтобы их общий смысл был сведен к единственной истине. Действительно, нужно проверить брод, прежде чем лезть в воду, ибо такая проверка не займет много времени и средств, но также очевидно, что есть дела, исход которых нельзя предугадать заранее, полностью не погрузившись в них.

Доведенный до логической крайности принцип «Не зная броду, не суйся в воду» требует, чтобы каждый человек тщательно рассматривал и прогнозировал все возможные исходы собственной жизни (по крайней мере, с текущего момента времени) в мельчайших деталях в свете огромного числа неизвестных состояний среды и сразу же выбирал единственную линию поведения. Но это выглядит совершенно нелепо – и не потому, как многие подумали бы, что позже это может вызвать сожаления или же произойдет не то, что ожидалось, а потому, что решение подобной задачи находится за пределами возможностей человеческого разума. Точно спланировать пикник или партию игры в шахматы в соответствии с данным принципом невозможно, даже если рассматриваемые состояния среды и множество доступных действий удастся искусственно свести к очень узким разумным пределам.

Но хотя принцип «Не зная броду, не суйся в воду», доведенный до предела, явно абсурден, я тем не менее буду считать его правильным субъектом нашего дальнейшего обсуждения, потому что когда вы подходите к воде, то искусственно ограничиваете свое внимание «малой средой» для последующего принятия решения, где данный принцип может применяться. С одной стороны, я не могу сформулировать критерии выбора таких малых сред и считаю, что их выбор –

вопрос личного мнения и опыта, принципы которых сложно сформулировать достаточно полно и точно, чуть больше об этом будет сказано далее. С другой стороны, это процесс, в котором каждый из нас имеет опыт, достаточный для того, чтобы на практике согласие было достигнуто.

В силу принципа «Не зная броду, не суйся в воду» действия и решения подобны событиям вне времени. Человек решает сейчас и навсегда: ему нечего ждать, так как одно его решение предусматривает все возможные случаи. Тем не менее временные способы описания, хотя и переводятся нами во вневременные, порой ведут к дополнительным размышлениям. В частности, есть возможность продолжить анализ и отсрочить принятие решения до тех пор, пока не будет завершено соответствующее наблюдение.

Простой порядок действий с предпочтением

Рассмотрим ситуацию, когда из двух своих действий f и g человек заранее предпочитает действие f действию g . Другими словами, если бы у него был выбор между действиями f и g , то он бы выбрал f . Такая процедура проверки предпочтения не совсем адекватна не потому, что она не только не учитывает, но и даже не допускает возможность того, что у человека нет никаких предпочтений между f и g (если он считает их эквивалентными), и в этом случае его выбор f не должен считаться показательным. Если человек действительно считает f и g эквивалентными, то есть при выборе между ними он беспристрастен, то, если бы действие f или g было бы модифицировано путем присоединения небольшого «бонуса» к его следствию в каждом состоянии, решение человека предположительно было бы в пользу действия, которое модифицировано таким образом.

Этот тест на безразличие не дает удовлетворительно точного определения, поскольку он в известной мере уклоняется от предмета спора, фактически допуская, что тестер знает, что представляет собой упомянутый небольшой «бонус». Еще одно возможное решение состоит в том, чтобы человек путем самоанализа разобрался в том, принял ли он решение случайно, или в ответ на определенное чувство предпочтения. Такое решение кажется мне наиболее нежелательным, поскольку я считаю принципиальным и крайне важным, чтобы предпочтение или безразличие между f и g определялись решениями между действиями, а не результатом самоанализа (ответами на поставленные интроспективные вопросы).

Несмотря на трудность различения предпочтения и безразличия, я полагаю, что было сказано достаточно для обоснования аксиоматического (основанного на принятых постулатах) отношения к ним.

Сам смысл отношения предпочтения, который я только что попытался установить, подразумевает, что человек не может одновременно f предпочесть g и g предпочесть f . При аксиоматической трактовке отношения предпочтения и безразличия технически удобнее работать с отношениями «не предпочтительнее», а не с его дополнением – «предпочтительнее». Таким образом, вместо того, чтобы сказать, что невозможно, что f предпочтительнее g и g для f , я могу сказать, что из двух любых действий f и g действие f не является предпочтительнее g или g не предпочтительнее f ; возможно и то и другое. Опять же, определение предпочтения предполагает, что если f не предпочтительнее g и g не предпочтительнее h , то невозможно, чтобы f был предпочтен h .

Эта пара предположений об отношении «не предпочтительнее» иногда выражается обычными математическими выражениями: говорят, что это отношение – просто упорядочивание действий. Отношение \leq среди множества элементов $x, y, z \dots$ называется простым порядком, если для каждого x, y, z имеет место:

1. Любой $x \leq y$ или $y \leq x$.
2. Если $x \leq y$ и $y \leq z$, тогда $x \leq z$.

Позаимствуем из арифметики обозначение \leq для отношения «не предпочтительнее», тогда предположение \leq о простом упорядочивании может быть формально выражено следующим образом:

P1. Отношение \leq означает простой порядок действий.

Примечательно, что в постулате **P1** нет прямой ссылки на состояние среды. Мне кажется, за исключением возможных математических уточнений, что дополнительные постулаты не могут быть сформированы без ссылки на него – во всяком случае, в данной книге такого точно не будет. Сам по себе постулат **P1** не изобилует следствиями, но можно привести одну легко доказываемую теорему.

Теорема 1. Если F – конечное множество событий, тогда в F существуют такие f и h , что для всех g в F выполняется $f \leq g \leq h$.

Теорема 1 особенно актуальна для применения в теории решений, поскольку я интерпретирую эту теорию таким образом, что если множество F конечно, то человек будет реализовывать действие h из F , которому никакое иное действие в F им не предпочтено, но существование по

Таблица 3. Таблица производных соотношений от \leq

Новое соотношение	Определение
$f \geq g$	$g \leq f$
$f < g$; g предпочтительнее f	ложь, что $g < f$
$f > g$	$g < f$
$f = g$, то есть f эквивалентно (или безразлично по отношению к) g	$f \leq g$ и $g \leq f$
g между f и h	$f \leq g \leq h$ или $h \leq g \leq f$

крайней мере одного такого действия h гарантируется теоремой.

В ряде случаев уместно рассматривать бесконечные множества доступных действий. Например, в экономике, как правило, неуместно сложным является четкое указание на возможность того, что все транзакции должны быть целочисленными до центов. Но если бесконечные множества действий устанавливаются и интерпретируются без определенного математического такта, за ними могут последовать нереалистичные выводы. Предположим, что вы свободны в выборе дохода, при условии, что он меньше \$ 10⁵ в год. Какой именно доход вы бы выбрали, абстрагируясь от неделимости цента?

Соотношение \leq иногда удобно дополнить другими соотношениями, полученными из него согласно определениям в таблице 3, которые по аналогии применимы к любому простому упорядочиванию. Допущение простого упорядочивания **P1** имеет несколько следствий для произвольных соотношений \geq , $<$, $>$ и $=$. Как правило, это подтверждается свойствами сходных соотношений в арифметике.

Логическая интерпретации **P1**

Постулат **P1** можно интерпретировать двумя разными способами. Первая интерпретация: **P1** можно рассматривать как предсказание поведения людей, животных и т. п. в ситуациях, где необходимо принять решение. Вторая интерпретация: **P1** можно рассматривать как логико-подобный критерий непротиворечивости в ситуациях, где необходимо принимать решение. Для нас вторая интерпретация является основной, но возможно совместное применение обеих, называем первую эмпирической, а вторую – нормативной.

Логика сама по себе допускает как эмпирическую, так и нормативную интерпретацию. Таким образом, если субъект эксперимента верит определенным положениям, то он должен верить их логическим следствиям и, соответственно, не верить в их отрицание. Эта теория человеческой

психологии имеет определенную ценность и обладает большой практической пользой в повседневных отношениях между людьми, пусть она и упрощена и весьма приближительна. Во-первых, люди часто допускают элементарные ошибки в вопросах логики, которые более совершенные теории связывают либо со случайностями, либо с подсознательной мотивацией. Во-вторых, если бы кто-то верящий в аксиомы математики также верил всему, что они подразумевают, а также не верил ничему из того, чему они противоречат, то математическое исследование было бы для него излишним – такой человек мог бы, как уже было сказано, назвать десяти тысячный или любой другой знак после запятой числа π по первому требованию. Поэтому логику можно интерпретировать как весьма неточную и грубую, но удобную в практическом отношении эмпирико-психологическую теорию.

Однако главная ценность логики заключается в ее связи с нормативной интерпретацией, то есть в качестве набора критериев, с помощью которых можно обнаружить (пусть даже с определенными недостатками) какие-то несоответствия между нашими убеждениями и их следствиями, требуя от них логичности. Здесь не очень целесообразно анализировать, почему и в каком контексте мы хотим быть логичными, но достаточно напомнить о том, что мы часто этого просто хотим.

Аналогично **P1** вместе с постулатами, которые будут приведены позже, может быть интерпретирован в качестве грубой и поверхностной эмпирической теории, предсказывающей поведение людей, принимающих решения. Эта теория эффективна в достаточно ограниченных областях, и каждый человек фактически использует некоторые ее аспекты для прогнозирования поведения других людей. В то же время, причем достаточно часто, поведение людей расходится с любой теорией. Отклонения эти порой вопиюще огромны, и в таких ситуациях наше отношение к ним во многом напоминает отношение к логической ошибке: мы называем ошибку ошибкой и приписываем ее появление случайностям или подсознательной мотивации. Другие отклонения могут быть обнаружены только с помощью сложной аргументации (длинной цепочки аргументов) или соответствующих вычислений, где вероятности становятся все более сложными, поскольку все более и более новые постулаты порождаются **P1**.

Приводя аналогию с логикой, я бы хотел указать на основное использование **P1** и его нормативных преемников: это защита моих решений от согласованности и возможность там, где это

удается, делать сложные решения зависимыми от простых.

Здесь также более уместно, чем в случае с логикой, хотя бы кратко сказать о том, почему и когда логичность бывает желательна или нежелательна. Предположим, что кто-то говорит мне: «Я рациональный человек, потому что редко, да и вряд ли вообще когда-либо, допускаю логические ошибки». Но я не желаю вести себя в соответствии с его постулатами, потому что они не соответствуют моим предпочтениям: мне кажется более разумным следовать собственным мыслям и чувствам, нежели чьей-то деспотичной выдуманной теории. Я не уверен, что смогу опровергнуть его доводы, но склонен сопоставлять его интроспекцию (самоанализ и самонаблюдение) с моей собственной. В частности, я бы хотел сказать ему, что когда мне явно будет показано, что я предпочел f в сравнении с g , g в сравнении с h и h в сравнении с f , то я буду чувствовать себя весьма неловко, когда замечу, что некоторые мои убеждения оказались логически ошибочными.

Всякий раз, когда я рассматриваю данную тройку предпочтений с моей личной точки зрения, я нахожу, что не так уж и сложно инвертировать или вообще отменить, аннулировать одно из них. При совместном рассмотрении трех предполагаемых предпочтений фактически я прихожу к мысли о том, что одно из них не является моим предпочтением. Возникает соблазн исследовать возможности анализа предпочтений среди частично упорядоченных действий, то есть фактически заменить первую часть определения простого упорядочивания очень слабым предположением $f \leq g$, допуская, что некоторые пары действий нельзя сравнивать. Считается, что это выражает интроспективные ощущения нерешительности, сомнения и колебания людей, которые мы можем отождествлять с равнодушием. Мое собственное предположение заключается в том, что это может привести к тупику и большим потерям сил, не позволив продвинуться дальше. Но пролить свет на этот вопрос может только более подробное отдельное исследование.

Принцип безусловности

Бизнесмен планирует приобрести участок земли с учетом результатов президентских выборов, которые имеют отношение к покупке недвижимости. Как следствие, чтобы прояснить этот вопрос, он спрашивает себя, купил бы он данный участок, если бы знал, что кандидат от республиканцев победит, и решает, что да – купил бы. Потом точно так же он рассматривает вариант,

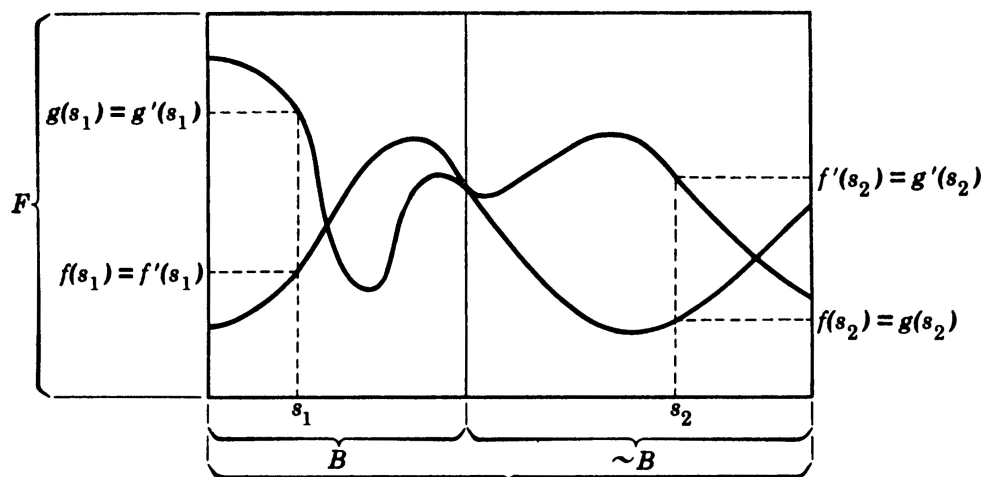


Рисунок. К иллюстрации постулата P2

при котором побеждает кандидат от демократов, и тоже решает, что купил бы. Понимая, что в любом случае он купил бы этот участок, в итоге он решает, что непременно должен сделать это вне зависимости от того, какое событие вскоре произойдет, как мы обычно говорим, в повседневной жизни. Редко бывает, что решение принимается на основе принципа, использованного этим бизнесменом, но, помимо простого упорядочивания, я не знаю другого экстралогического принципа, который бы контролировал процесс принятия решений и нашел бы столь же широкое применение.

Позвольте мне предложить именовать представленный принцип принципом безусловности и дать ему относительно формальное определение: если человек f не предпочитает g , зная, что достигнуто либо событие B , либо $\sim B$, тогда он f определенно не предпочтет g . Более того (если он не считает B виртуально невозможным): если он g предпочитает f , зная, что B достигнуто, и если он f не предпочитает g , зная, что B не достигнуто, он определенно g предпочтет f .

Принцип безусловности не может быть надлежащим образом принят в качестве постулата, как P1, потому что он привел бы к новым, не объявленным ранее условиям, относящимся к знанию и возможностям, которые сделали бы его бесполезным без дополнительных постулатов, регулирующих эти условия. Поэтому предпочтительнее рассматривать этот принцип как есть, то есть свободным и лишь предлагающим некоторые формальные постулаты, хорошо сочетающиеся с P1.

Какая трактовка может быть связана с идеей, что f было бы предпочтительнее g , если бы B было известно? При любой разумной трактовке результат не зависит от значений f и g , принимаемых в состояниях вне B . Тогда нет никакой потери общности в предположении, что f и g

согласуются между собой в B , то есть $f(s) = g(s)$ для всех s , принадлежащих B . Под этим слабым ограничительным предположением f и g , безусловно, должны рассматриваться как эквивалентные и при условии $\sim B$; то есть они считались бы эквивалентными, если бы было известно, что B не имеет места.

Первая часть принципа безусловности может быть выражена следующим образом: если после модификации f так, чтобы согласовать его с другим действием за пределами B , f не предпочтительнее g , тогда f будет не предпочтительнее g , если B известно. Формально это понятие выглядит как $f \leq g$ при заданном B . При этом подразумевается, что в определении $f \leq g$ при заданном B для действий f и g , модифицированных в $\sim B$, чтобы быть согласованными друг с другом, полученный порядок предпочтения между модифицированными действиями не зависит от того, какая из разрешенных модификаций была фактически выполнена.

Другими словами, если f и g – два действия, которые согласованы друг с другом в $\sim B$, и $f \leq g$, то если f и g модифицированы в $\sim B$ как f' и g' и при этом остаются согласованными друг с другом в $\sim B$, то будет выполняться $f' \leq g'$. Это предположение содержится в последующем постулате P2 и схематически показано на рисунке в виде своего рода диаграммы, которую я нахожу наводящей на важные во многих контекстах мысли.

На рисунке множество S состояний s и множество F следствий f представлены, соответственно, горизонтальными и вертикальными интервалами. На любой такой диаграмме действие f является функцией, связывающей значение $f(s)$ из F с каждым значением s из S в виде графика. Эта конкретная диаграмма отображает два действия f и g , согласованные друг с другом в $\sim B$

и два других действия f' и g' , которые также согласованы между собой в $\sim B$ и возникли путем изменения, соответственно, f и g в $\sim B$, то есть эти действия согласованы с f и g в B .

Р2. Если f, g и f', g' таковы, что:

1) в $\sim B$ действие f согласовано с g и f' согласовано с g' ,

2) в B действие f согласовано с f' и g согласовано с g' ,

3) $f \leq g$,

тогда $f' \leq g'$.

Каждое из соотношений « \leq заданного B » теперь можно рассматривать как простое упорядочивание, а соотношения « $\geq, <, >, =$ заданного B » должны быть определены с соответствующими изменениями. Примечательно, хоть это и так очевидно, что если $f(s) = g(s)$ для всех $s \in B$, то $f = g$ заданного B .

Теперь, возможно, и будет весьма полезно провести вневременной анализ следующей описанной ситуации принятия решения: если человек должен решить между f и g после того, как в результате наблюдения он узнает о существовании B , то каким будет его решение, если он узнает, что B действительно существует? Если также без учета времени человек может подчиниться следствиям f или g для всех $s \in B$ и независимо от этого он может подчиниться следствиям f или g для всех $s \in \sim B$, то какую возможность он выберет при условии, что s', s в B ?

Наконец, не только вне времени, но и формально опишем ситуацию, когда человек должен принять решение из четырех действий:

- h_{00} , согласованное с f на B и с f на $\sim B$,
- h_{01} , согласованное с f на B и с g на $\sim B$,
- h_{10} , согласованное с g на B и с f на $\sim B$,
- h_{11} , согласованное с g на B и с g на $\sim B$.

По форме этот вопрос выглядит так: предположим, что ни одна из функций не предпочтительнее других для конкретного действия h_{ij} , где $i = 0$ или $i = 1$; но тогда согласуется ли h_{ij} с f на B или с g на B ?

Нетрудно понять, что $i = 1$ тогда и только тогда, когда $f \leq g$ заданного B . Действительно, если $i = 1$, $h_{0j} \leq h_{1j}$, это означает, что $f \leq g$ заданного B . Рассуждая в противоположном направлении, если $f \leq g$ заданного B , тогда $h_{00} \leq h_{10}$, и $h_{01} \leq h_{11}$. Теперь предположим для определенности, что $h_{10} \leq h_{11}$, тогда ни одна из этих четырех возможностей не была бы предпочтена h_{11} , и это доказывает суть вопроса.

Можно справедливо заметить, что если человек считает B виртуально невозможным, то это означает, что B является нулевым и может быть

тогда и только тогда, когда для всех f и g имеет место $f \leq g$ заданного B . Действительно, если B – нулевое, тогда значения действий, взятые из элементов B , не имеют отношения к решениям.

Теорема 2. Если B_i является частью B и $f \leq g$ заданного B_i для каждого i , тогда $f \leq g$ заданного B . Если вдобавок $f < g$ заданного B_j по крайней мере для одного j , тогда $f < g$ заданного B .

Если в теореме 2 имеет место $B = S$ (или, в более общем смысле, если $\sim B$ нулевое), излишне говорить, что «задано B » в следствиях теоремы. Если $f = g$ заданного B_i для каждого i , тогда $f = g$ заданного B .

Действия, являющиеся постоянными (следствия которых не зависят от состояния среды), представляют для нас особый интерес. В частности, они приводят к естественному определению предпочтения среди следствий с точки зрения предпочтения среди действий. Следуя обычной математической нотации, $f \equiv g$ будет означать, что f тождественно g , то есть для каждого s имеет место $f(s) = g$. Теперь возможно весьма удобным способом выразить формально определение предпочтения среди последствий. Для любых следствий g и g' имеет место $g \leq g'$ тогда и только тогда, когда $f \equiv g$ и $f' \equiv g', f \leq f'$.

По аналогии можно перенести все это на выражения $f \leq g, g \leq f$ заданного B и т. д. Условимся в дальнейшем использовать подобные выражения без явного определения. В частности, $f \leq g$ заданного B представляется естественно понятным, чего более чем достаточно для вскоре последующего постулата **Р3**. Кстати, теперь очевидно, насколько неудобным было бы обозначение $f(s)$ для f ; потому что $f(s) \leq g(s)$ – это формулировка следствий $f(s)$ и $g(s)$, где $f \leq g$ – это выражение, относящееся к действиям, и мы часто нуждаемся в обоих видах выражений.

Практический пример

Предположим, что $f \equiv g$ и $f' \equiv g'$, а также $g \leq g'$, тогда разумно ли принять, что для некоторых B имеет место $f > f'$ заданного B ? Это в значительной степени зависит от трактовки, которую мы выбираем для создания терминологии, что видно из следующего примера.

Прежде чем отправиться на пикник с друзьями, человек решает, что купить ему: купальный костюм или теннисную ракетку ввиду того, что у него нет с собой достаточной суммы денег для покупки обоих предметов. Если мы называем владение теннисной ракеткой и владение купальным костюмом следствиями, тогда мы обязаны сказать, что следствия его решений будут незави-

симы от места, где пройдет пикник. Если человек предпочитает купальный костюм, его решение будет отменено в момент, когда он узнает, что пикник будет в месте, где рядом нет воды. Таким образом, возникает вопрос о том, может ли $f > f'$ заданного B иметь место, если бы ответ был утвердительным. Но в пределах трактовок «действия» и «следствия», которые я пытаюсь сформулировать, это некорректный анализ ситуации.

Владение теннисной ракеткой и владение купальным костюмом следует рассматривать как действия, а не как следствия (правильнее было бы выразиться, что вступление во владение или их покупка – это действия). Следствия, имеющие отношения к принятию решения – такого, как освежающее купание с друзьями, чтобы сидеть на безбрежном пляже и крутить в руке новую теннисную ракетку, пока твои друзья купаются и т. д. Кажется очевидным, что этот анализ доведен до предела, и на поставленный вопрос стоит ответить отрицательно, поэтому я предлагаю принять отрицательный ответ в качестве постулата **P3**. Постулат сформулирован таким образом, чтобы не только утверждать, что знание о событии не может установить новое предпочтение среди следствий или изменить старое, но также утверждать, что если событие не нулевое, никакое предпочтение среди следствий не может быть сведено к безразличию при помощи знаний об этом событии.

P3. Если $f \equiv g$, $f' \equiv g'$ и B – не пустое, тогда $f \leq f'$ заданного B тогда и только тогда, когда $g \leq g'$. Применяя далее теорему 2, получаем теорему 3.

Теорема 3. Если B_i – это часть B , если для всех i и s имеет место $f_i \leq g_i$, $f(s) = f_i$ и $g(s) = g_i$, когда $s \in B_i$, тогда $f_i \leq g_i$ заданного B . Если, кроме того, $f_j \leq g_j$ для некоторых j , причем B_j для них не пустое, тогда $f < g$ заданного B .

Теорема 3 логически эквивалентна постулату **P3** при наличии **P1** или **P2**, поэтому ее можно назвать интуитивным базисом, как и упомянутый третий постулат. Принятие или непринятие **P3** в качестве постулата вместо теоремы 3 – это всего лишь вопрос выбора, дело вкуса.

Теореме 3 было уделено особое внимание в связи с понятием допустимости, введенным покойным А. Вальдом. Я полагаю, как подробнее будет сказано позже, что большая часть значимости основ данной школы вытекает из того, что если несколько примерно одинаковых людей едины в предпочтениях относительно тех или иных следствий, то тогда они должны согласовать эти свои предпочтения и в отношении соответству-

ющих действий. Сказанное подводит к логическому завершению начальной части книги и создает фундамент для последующих постулатов.

Заключение

В соответствии с изложенным настоящая статья содержит материалы предисловия, введения и первых двух глав [1], где автором рассматриваются роль научных основ и предпосылки возникновения ТВ Бернулли – Сэвиджа, структура, содержание и назначение его книги. Отмечается роль индивидуума: человеческой личности – по современной терминологии – лица, принимающего решения (ЛПР) в условиях неопределенности состояния внешней среды.

Вводится ряд ключевых понятий и определений: «события», «следствия», «действия» и «решения», которые фигурируют в такого рода процессах. Одним из важнейших моментов является определение и математическое обозначение предпочтения ЛПР при выборе варианта решения, а также формулировка правила установки порядка действий с предпочтением и принципа безусловности.

Источники [2–7] в списке литературы указаны согласно [1]. Представленный научно-методический материал является основой для рассмотрения широкого круга вопросов, связанных с определением и последующим применением субъективной вероятности [8–12].

Литература

1. Savage L.J. The Foundations of Statistics. New York: Wiley, 1954. 310 p.
2. Bernoulli Jacob. Ars conjectandi. Basel, 1713.
3. Kolmogoroff A.N. Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin: J. Springer, 1933. 62 p.
4. Mises R. von. Probability, Statistics and Truth. London: William Hodge and Co, 1939. 323 p.
5. De Finetti B. La provision: ses lois logiques, ses sources subjectives // Annales de l'Institut Henri Poincaré. 1937. № 7. P. 1–68.
6. Нейман Дж. фон., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение / пер. с англ. М.: Наука, 1970. 708 с.
7. Ramsey F.P. Truth and probability (1926), Further considerations (1928) // The Foundations of Mathematics and Other Logical Essays. London: Kegan Paul; New York: Harcourt, Brace and Co., 1931.
8. Kahneman D., Tversky A. Prospect theory: an analysis of decision under risk // Econometrica. 1979. Vol. 47. № 2. P. 263–291.

9. Кейнс Дж.М. Общая теория занятости, процента и денег / пер. с англ. М.: Гелиос АРВ, 2002. 352 с.
10. Шумейкер П. Модель ожидаемой полезности: разновидности, подходы, результаты и пределы возможностей / пер. с англ. // THESIS. 1994. Вып. 5. С. 29–80.
11. Маслов О.Н., Фролова М.А. Функционал ожидаемой полезности: принципы моделирования и практического применения // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13. № 3. С. 291–297.
12. Маслов О.Н., Фролова М.А. Функционал ожидаемой полезности в задачах управления сложными системами организационно-технического типа // Инфокоммуникационные технологии. 2016. Т. 14. № 2. С. 168–178.

Получено 25.12.2019

Маслов Олег Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной информатики (ПИ) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-36; +7 917 950-05-13. E-mail: maslov@psati.ru

Шаталов Иван Сергеевич, аспирант кафедры ПИ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-36; +7 927 732-54-22. E-mail: maslov@psati.ru

Абрамов Владимир Евгеньевич, д.филол.н., профессор, заведующий кафедрой иностранных языков ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-63; +7 927 335-66-99. E-mail: vabrta@mail.ru

Юкласов Константин Андреевич, магистрант кафедры ПИ ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-63; +7 927 739-31-13. E-mail: fistand42@gmail.com

LEONARD JIMMY SAVAGE AND HIS SUBJECTIVE PROBABILITY THEORY. PART I. SCIENTIFIC BACKGROUND, PRECONDITIONS AND PROSPECTS

Abramov V.E., Maslov O.N., Shatalov I.S., Yuklasov K.A.

*Povolzhskiy State University of Telecommunication and Information, Samara, Russian Federation
E-mail: maslov@psati.ru*

This paper is the first in a series of publications which aims to familiarize infocommunication technology specialists with the legacy of one of the founders of the subjective theory of probability – Leonard Jimmy Savage. It is noted that the content of the fundamental work «Fundamentals of Statistics» brings the modern reader far beyond the title of this book, as it is directly related to subjective theories of risk and expected utility. It is shown that Bernoulli-Savage's probability theory corresponds to a subclass of complex systems that are commonly referred to as non-reflective quasi-real systems. This class also encompasses a wide range of socioeconomic, ecological, industrial, military and other hierarchical systems, all of which also incorporate, to varying extent, the factor of human reliability and decision-making. The first paper of the series details the scientific background and historical preconditions of the Bernoulli-Savage theory of probability, as well as its prospective outlooks and practical applications.

Keywords: *subjective theory of probability, theoretical basis, scientific background, historical preconditions, practical application*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.13

Maslov Oleg Nikolayevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Department of Applied Informatics, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +7 902 371-06-24. E-mail: maslov@psati.ru

Shatalov Ivan Sergeevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Postgraduate of Applied Informatics Department. Tel. +7 846 228-00-36; +7 927 732-54-22. E-mail: shatalovivv@gmail.com

Abramov Vladimir Evgeniyevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Head of Department of Foreign Languages, Doctor of Philology, Professor. Tel. +7 846 228-00-63; +7 902 335-66-99. E-mail: vabrta@mail.ru

Yuklasov Konstantin Andreevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Master's Degree Student of Software Engineering Department. Tel. +7 927 739-31-13. E-mail: fistand42@gmail.com

References

1. Savage L.J. *The Foundations of Statistics*. New York: Wiley, 1954, 310 p.
2. Bernoulli Jacob. *Ars conjectandi*. Basel, 1713.
3. Kolmogoroff A.N. *Grundbegriffe der Wahr-scheinlichkeitsrechnung*. Berlin: J. Springer, 1933, 62 p.
4. Mises R. von. *Probability, Statistics and Truth*. London: William Hodge and Co, 1939, 323 p.
5. De Finetti B. La provision: ses lois logiques, ses sources subjectives. *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, 1937, no. 7, pp. 1–68.
6. Neumann J. von, Morgenstern O. *Teoriya igr i ekonomicheskoe povedenie / per. s angl.* [Theory of Games and Economic Behavior. Trans. from English]. Moscow: Nauka, 1970. 708 p. (In Russian).
7. Ramsey F.P. Truth and probability (1926), Further considerations (1928). *The Foundations of Mathematics and Other Logical Essays*. London: Kegan Paul; New York: Harcourt, Brace and Co., 1931.
8. Kahneman D., Tversky A. Prospect theory: an analysis of decision under risk. *Econometrica*, 1979, vol. 47, no. 2, pp. 263–291.
9. Kejns J.M. *Obshchaya teoriya zanyatosti, procenta i deneg / per. s angl.* [The General Theory of Employment, Interest and Money. Trans. from English]. Moscow: Gelios ARV, 2002, 352 p. (In Russian).
10. Shumejker P. Model' ozhidaemoj poleznosti: raznovidnosti, podhody, rezul'taty i predely voz-mozhnostej / per. s angl. [Expected utility model: varieties, approaches, results and limits of possibilities. Trans. from English]. *THESIS*, 1994, vol. 5, pp. 29–80. (In Russian).
11. Maslov O.N., Frolova M.A. Funkcional ozhidaemoj poleznosti: principy modelirovaniya i prakticheskogo primeneniya [Functionality of expected utility: principles of modeling and practical application]. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 291–297. (In Russian).
12. Maslov O.N., Frolova M.A. Funkcional ozhidaemoj poleznosti v zadachah upravleniya slozhny-mi sistemami organizacionno-tekhnicheskogo tipa [Functionality of expected utility in the tasks of managing complex systems of organizational and technical type]. *Infokommunikacionnye tekhnologii*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 168–178. (In Russian).

Received 25.09.2017

СВЯЗЬ И «ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ»

Лихтциндер Б.Я.

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail lixt@psuti.ru*

Отмечается необходимость изучения связистами основ теории регулирования и управления. Приводятся оценки процесса регулирования: сходимостью, устойчивостью, качеством и точностью.

Ключевые слова: управление, регулирование, обратная связь, изучение

Часто, вслед за командой капитана корабля: «Право руля!» – мы слышим в ответ: «Есть, право руля!» В технике это называют «обратной связью». Обратная связь состоит в том, что объект регулирования на каждом этапе сообщает управляющему объекту о результатах управляющего воздействия, и, исходя из указанного сообщения, принимается решение о дальнейших действиях. Система образует замкнутый контур управления, замыкание которого осуществляет обратная связь.

Принцип обратной связи широко используется при управлении трафиком современных телекоммуникационных сетей. Наиболее ранними из них являются системы с решающей обратной связью с ожиданием (РОС-ОЖ) и системы непрерывного действия (РОС-НП) [1].

Многоконтурными системами управления являются системы, оптимизирующие распределение нагрузки телекоммуникационных сетей [5–6]. Имеется множество различных способов стабилизации размеров буфера пакетов при передаче трафика потокового видео в ТСП-сетях [2–4]. И все они основаны на принципах обратной связи.

Широкое применение систем с обратной связью обусловило повышенный интерес к ним со стороны связистов. Выполняются дипломные работы, защищаются диссертации, посвященные вопросам автоматического регулирования и управления в связи.

Однако во многих из них отсутствуют основополагающие оценки таких систем:

- оценка сходимости процесса регулирования,
- оценка динамической устойчивости системы,
- оценка качества процесса регулирования,
- оценка точности регулирования.

Сходимость процесса регулирования определяется сходимостью итерационного процесса решения соответствующих линейных или нелинейных алгебраических уравнений и не учитыва-

ет наличие запаздывания, инерционные и динамические характеристики объектов управления. Системы с плохой сходимостью работают крайне неустойчиво.

Динамическая устойчивость учитывает запаздывания и другие временные характеристики, объектов, и при определенных обстоятельствах, характеризуемых критериями устойчивости, система с обратной связью может потерять устойчивость и войти в колебательный режим. Очень часто в сетях с большими запаздываниями мы наблюдаем подобные колебания.

Качество регулирования определяется скоростью, с которой происходит затухание переходного процесса и прекращаются имеющиеся колебания. Вызывает восхищение, когда многотонная орудийная башня танка с огромной скоростью поворачивается и мгновенно останавливается, достигнув заданного угла поворота.

В то же время переходные процессы в некоторых телекоммуникационных сетях иногда длятся минутами, а часто и не прекращаются вообще, переходя в незатухающие колебания. Точность регулирования характеризует погрешность отклонения от заданного значения регулируемого параметра после завершения переходного процесса.

К сожалению, большинство специалистов в области телекоммуникаций плохо владеют вопросами проектирования систем управления. Это и понятно: ведь в учебных планах телекоммуникационных специальностей полностью отсутствуют дисциплины, связанные с изучением вопросов автоматического регулирования и управления.

По нашему глубокому убеждению, соответствующую дисциплину или ее отдельные вопросы необходимо обязательно включить в учебные планы подготовки связистов в области телекоммуникаций.

Литература

1. Лихтциндер Б.Я., Зайкин В.П. Системы документальной электросвязи: курс лекций. Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2003. 356 с.
2. De Cicco L., Mascolo S. An experimental investigation of the Akamia adaptive video streaming // Proc. 6th International Conference on HCI in Work and Learning, Life and Leisure: Workgroup Human-computer Interaction and Usability Engineering, USAB 10. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. P. 447–464.
3. Understanding the impact of video quality on user engagement / F. Dobrian [et al.] // Proc. ACM conference, SIGCOMM 11. New York, 2011. P. 362–373.
4. Houdaille R., Gouache R. Shaping HTTP adaptive streams for a better user experience // Proc. 3rd Multimed Systems Conference. 2012. P. 1–9.
5. Гордеев Э.Н. Новые технологии в системах управления сетями связи // Вестник связи. 2000. № 2. С. 79–83.
6. Нетес В.А., Трубникова Н.В. Управление сетями: стандарты, проблемы и перспективы // Вестник связи. 2000. № 2. С. 83–88.

Получено 15.01.2020

Лихтциндер Борис Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры сетей и систем связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 927 260-96-00. E-mail: lixt@psuti.ru

COMMUNICATION AND FEEDBACK

Likhttcinder B. Ya.

*Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: lixt@psuti.ru*

The article notes the need for signalmen to study the fundamentals of the theory of regulation and control. Estimates of the regulatory process are given: convergence, stability, quality and accuracy.

Keywords: *management, regulation, feedback, study*

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.1.14

Likhttcinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of the Department of Networks and Communication Systems, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 927 260-96-00. E-mail: lixt@psuti.ru

References

1. Likhttcinder B. Ya., Zajkin V. P. *Sistemy dokumental'noj elektrosvyazi: kurs lekciy* [Documentary Telecommunication Systems. Lecture Course]. Samara: IUNL PGUTI, 2003, 356 p.
2. De Cicco L., Mascolo S. An experimental investigation of the Akamia adaptive video streaming. *Proc. 6th International Conference on HCI in Work and Learning, Life and Leisure: Workgroup Human-computer Interaction and Usability Engineering, USAB 10*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, pp. 447–464.
3. Dobrian F. et al. Understanding the impact of video quality on user engagement. *Proc. ACM conference, SIGCOMM 11*. New York, 2011, pp. 362–373.
4. Houdaille R., Gouache R. Shaping HTTP adaptive streams for a better user experience. *Proc. 3rd Multimed Systems Conference*, 2012, pp. 1–9.
5. Gordeev E. N. *Novye tekhnologii v sistemah upravleniya setyami svyazi* [New technologies in communication network management systems]. *Vestnik svyazi*, 2000, no. 2, pp. 79–83. (In Russian).
6. Netes V. A., Trubnikova N. V. *Upravlenie setyami: standarty, problemy i perspektivy* [Network management: standards, problems and prospects]. *Vestnik svyazi*, 2000, no. 2, pp. 83–88. (In Russian).

Received 15.01.2020



Поздравляем с юбилеем!

2 апреля 2020 года исполнилось 60 лет известному российскому ученому, члену редколлегии нашего журнала, заведующему базовой кафедрой «Системы специальной радиосвязи» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, генеральному директору АО «Самарское инновационное предприятие радиосистем», лауреату Государственной премии Российской Федерации имени маршала Советского Союза Г.К. Жукова, доктору технических наук, профессору Александру Львовичу Бузову.

Александр Львович хорошо известен в научных кругах как крупный ученый, признанный лидер Самарской антенной научной школы. На протяжении многих лет он успешно сочетает свою основную деятельность с научной и педагогической работой. В ПГУТИ он работает с 1998 года, сначала в должности профессора, а затем и заведующего базовой кафедрой.

Под руководством Александра Львовича сотрудниками кафедры разрабатываются учебные пособия для бакалавриата, специалитета, магистратуры и аспирантуры по различным направлениям подготовки. Кафедра регулярно выполняет хозяйственные НИОКР по заказам предприятий России.

Кроме того, уже более двадцати лет он является членом диссертационного совета Д 219.003.02 в нашем университете. Под его руководством успешно защищены 21 кандидатская и 3 докторские диссертации, причем подавляющее большинство из них – в указанном совете. В настоящее время к кафедре ССРС прикреплены 2 докторанта, 8 аспирантов и соискателей.

Под руководством Александра Львовича и его учеников проводились и проводятся научные исследования в областях методов и средств математического моделирования электродинамических систем, теории, техники и технологий антенн и СВЧ-устройств, электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности радиоэлектронных средств, инновационных технологий комплексного проектирования объектов и оборудования телекоммуникаций, экономики и организации производства.

Им предложено новое научное направление в области теории и техники антенн – «Схемно-пространственная мультиплексия», на основе которого создан новый класс многочастотных многоканальных приемо-передающих антенных комплексов объединения радиосредств систем специальной связи. Выполненная под руководством Александра Львовича работа «Создание уникального комплекса антенно-фидерных устройств модернизированной системы президентской подвижной радиосвязи на Останкинской телевизионной башне» была удостоена Государственной премии Российской Федерации имени маршала Советского Союза Г.К. Жукова в области создания вооружений и военной техники.

Хорошо известны его труды в области электромагнитной безопасности производственного персонала и населения. Под его руководством были разработаны государственные нормативные и методические документы, определяющие предельно допустимые уровни воздействия электромагнитных полей, и методы контроля.

Научные исследования Александра Львовича широко известны в нашей стране: он активно участвует в работе многих российских и международных конференций, является председателем подсекции «Технологии специальной связи и антенно-фидерных устройств» на ежегодной Российской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ. Александр Львович – автор более 370 научных трудов, включая 8 монографий, 9 учебных пособий, 18 патентов, государственные нормативные и методические документы, а также статьи и научные доклады.

За успехи в научной и производственно-технической деятельности Александр Львович удостоен звания «Мастер связи», награжден знаком «Почетный радист», медалью Министерства обороны Российской Федерации «За укрепление боевого содружества».

Редакция журнала «Инфокоммуникационные технологии» присоединяется к поздравлениям в адрес Александра Львовича Бузова, желает ему счастья, крепкого здоровья, научных и производственных успехов при осуществлении всех своих замыслов!