

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 612.821.2

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗНАЧИМЫХ ОТВЕДЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ВООБРАЖАЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ

*С.Н. Агапов¹, В.А. Буланов¹, Н.Г. Губанов², А.В. Захаров³,
М.С. Сергеева³*

¹ ООО «IT Universe»
Россия, 443086, г. Самара, ул. Ерошевского, 3

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

³ Самарский государственный медицинский университет
Россия, 443079, г. Самара, ул. Гагарина, 18

В современной технике активно развивается направление нейрокомпьютерных интерфейсов (НКИ). Взаимодействие человека с окружающей средой через ее связь с электро- и химической активностью мозга будет одной из важнейших составляющих следующей ступени научно-технического развития в XXI веке. В последние годы достигнут значительный прогресс в распознавании и классификации выполнения различных видов воображаемых задач. На текущий момент одним из основных методов управления в НКИ являются ЭЭГ-корреляты воображаемых движений. Целью настоящего исследования является выявление локализации наиболее значимых ЭЭГ-отведений при распознавании паттерна воображаемого движения в ведущей руке. Меньшее количество используемых ЭЭГ-отведений должно привести к увеличению эффективности и уменьшению стоимости разрабатываемого оборудования.

Ключевые слова: ЭЭГ, воображаемые движения, *t*-критерий Стьюдента.

Введение

В докладе Агентства стратегических инициатив в рамках развития платформы национальной технологической инициативы отмечается значимость развития нейрокомпьютерных интерфейсов (НКИ) в России как с научно-технической, так и с коммерческой позиции [1].

Сергей Николаевич Агапов, специалист лаборатории математической обработки биологической информации.

Владимир Александрович Буланов, начальник лаборатории математической обработки биологической информации.

Николай Геннадьевич Губанов (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами».

Александр Владимирович Захаров (к.м.н.), доцент кафедры «Неврология и нейрохирургия».

Мария Станиславовна Сергеева (к.б.н.), доцент кафедры «Физиология».

НКИ можно определить как коммуникационный комплекс, не требующий периферической мышечной активности и позволяющий оператору посылать команды внешнему исполнительному устройству только посредством активности головного мозга [2].

Реализация НКИ в основном представляет собой 3-уровневый процесс. Во-первых, сигналы ЭЭГ считываются с помощью электродов, расположенных на скальпе человека, производится их предварительная обработка с целью удаления различных артефактов и малоинформативных частей сигнала. Во-вторых, производится декомпозиция сигнала на значимые компоненты и выделение в сигнале значимых коррелятов. В-третьих, обработанный сигнал передается системе принятия решения и от нее к исполнительному устройству.

В последние годы достигнут значительный прогресс в распознавании и классификации выполнения различных видов воображаемых задач [3]. На текущий момент одним из основных методов управления в НКИ являются ЭЭГ-корреляты воображаемых движений конечностями [4, 5].

Несмотря на то, что в распознавании ЭЭГ-сигналов достигнуты успехи, в основном благодаря современным методам машинного обучения, цифровой обработке сигналов и алгоритмам слепого разделения (blind source separation) [6, 7], остается нерешенным ряд серьезных проблем на пути создания коммерческих систем НКИ для широкого использования. Например, создание недорогих аппаратов регистрации ЭЭГ с небольшим количеством отведений, разработанных под конкретную задачу управления с помощью НКИ.

Цель исследования

Целью настоящего исследования является выявление локализации значимых ЭЭГ-отведений при распознавании паттерна воображаемого движения в ведущей руке для снижения сложности аппаратной части НКИ. Меньшее количество используемых ЭЭГ-отведений должно привести к увеличению эффективности и уменьшению стоимости разрабатываемого оборудования.

Материалы и методы

В исследовании участвовали семь студентов-добровольцев Самарского государственного медицинского университета, все правши, возраст 19–21 год. Все добровольцы дали информированное согласие на участие в эксперименте. В работе использовались ЭЭГ-записи 128-канального прибора Brain Vision actiChamp (Германия). Электроды располагались на голове испытуемых согласно международной системе «10–20» (модификация «10–5») [8]. Референтный электрод находился у правого уха. Активные усилители ЭЭГ-сигнала находились непосредственно на электродах. На рис. 1 показана схема расположения электродов на голове испытуемых в нашем исследовании.

Записи ЭЭГ проводились в экранированной от электромагнитных помех звуко- и светоизолированной лаборатории. Аппарат ЭЭГ работал от аккумуляторов. ЭЭГ-сигналы были записаны с частотой дискретизации 1000 Гц. При проведении анализа были использованы программные средства MathWork® MATLAB версии R2015a (<http://www.mathworks.com>), EEGLab Toolbox версии 13.5.4b (<https://sccn.ucsd.edu/eeglab/>), пакет статистической обработки данных R версии 3.1.3 (<https://www.r-project.org>).

Статистические методы и компьютерная реализация. При анализе ЭЭГ-сигналов мы использовали t-критерий Стьюдента (Student's t-test). Этот критерий применяется для проверки нулевой гипотезы о равенстве средних значений двух совокупностей. Использование t-критерия Стьюдента требует нормальности распределения выборок, поэтому мы использовали тест Шапиро – Уилка (Shapiro – Wilk test) [12] для проверки нормальности распределения амплитуд в ЭЭГ-сигналах. Статистика критерия Шапиро – Уилка имеет вид

$$W = \frac{1}{s^2} \left[\sum_{i=1}^n a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_{(i)}) \right]^2,$$

где

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

s^2 – квадрат оценки среднеквадратического отклонения Ллойда;

n – количество наблюдений;

a_{n-i+1} – табличные коэффициенты [12].

В R данный критерий реализован как функция «shapiro.test».

T-критерий Стьюдента по модификации Уэлча (Welch) рассчитывается по формуле

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{Sd_1^2}{n_1} + \frac{Sd_2^2}{n_2}}},$$

где \bar{X}_1 и \bar{X}_2 – среднее значение по первой и второй выборкам;

Sd_1^2 и Sd_2^2 – дисперсия первой и второй выборок;

n_1 и n_2 – объем первой и второй выборок.

В R данный критерий реализован как функция «t.test».

Результаты исследования и их обсуждение

Основная идея нашей работы – выбор обобщенного показателя и сравнение получившейся выборки из 10 показателей (по количеству предъявления стимулов в одной сессии) на каждом отведении ЭЭГ между данными при воображении движения и фоновым ЭЭГ-сигналом (т. е. отрезком записи ЭЭГ без воображения движения). В качестве такого показателя мы выбрали сумму модулей амплитуд на отведении в течение длительности одной эпохи. За эпоху мы приняли 5-секундный отрезок ЭЭГ-сигнала с момента предъявления звукового стимула испытуемым. В качестве эпохи для фонового ЭЭГ-сигнала мы использовали 5-секундный отрезок ЭЭГ-сигнала, предшествующий предъявлению стимула.

После сбора данных мы исключили из исследования те отведения, на которых при визуальном анализе имеются явные отклонения или артефакты. Таких отведений было от 1 до 5 в разных сессиях записи.

Далее мы суммировали значения модулей амплитуд в эпохе ЭЭГ-сигнала при воображении движения и сравнивали с таким же показателем эпохи фонового ЭЭГ-сигнала.

Формально t-критерий Стьюдента рассчитан на выборки из популяций с нормальным распределением и гомогенной дисперсией. Однако из исследований известно, что он сохраняет мощность и при нарушении данных условий в определенных пределах [13–15]. Проверку на нормальность мы проводили с помощью теста Шапиро – Уилка. Следуя работе [15], мы считали значимым различием отношение дисперсий при $\sigma_1^2/\sigma_2^2 > 3,33$ и $\sigma_1^2/\sigma_2^2 < 0,30$.

Мы проанализировали данные восемь экспериментальных сессий семи испытуемых. Соответственно, выборка состояла из 160 эпох – 80 эпох воображаемого движения и 80 эпох фонового ЭЭГ-сигнала. После проверки с помощью t-критерия Стьюдента мы отобрали такие ЭЭГ-отведения, для которых значение p-value меньше 0,05. В таблице представлены номера и наименования ЭЭГ-отведений, на которых значение p-value < 0,05 встречалось в трех и более сессиях из восьми.

ЭЭГ-отведения, отобранные после проверки t-критерием Стьюдента

ЭЭГ-отведение		Количество сессий, в которых значение p-value < 0,05
Номер	Наименование	
110	AFF6h	3
70	AFF2h	3
99	CPP1h	3
4	F4	3
102	FFC4h	3
122	FFT10h	3
56	FT8	3
29	FT9	3
37	P1	3
7	P3	3
51	P5	4
45	PO3	3
46	PO4	3
93	PO9	3
107	POO1	3
13	T7	3

Отбор отведений для задач НКИ в основном определяется выбором частотного диапазона для анализа ЭЭГ-сигнала. В частности, для анализа альфа (8–14 Гц), бета (14–30 Гц) и мю (9–11 Гц) ритмов головного мозга человека, которые широко применяются в НКИ, обычно выбираются отведения F3, F4, C3, C4, P3, P4 [16]. В работе [5] авторы используют отведения C3, C4, P3, P4, O1, O2.

Наши результаты в ряде случаев совпадают с существующей практикой расположения ЭЭГ-отведений. На рис. 2 представлена локализация ЭЭГ-отведений

на голове, как традиционно используемых для задач НКИ, так и полученных в результате нашего исследования.

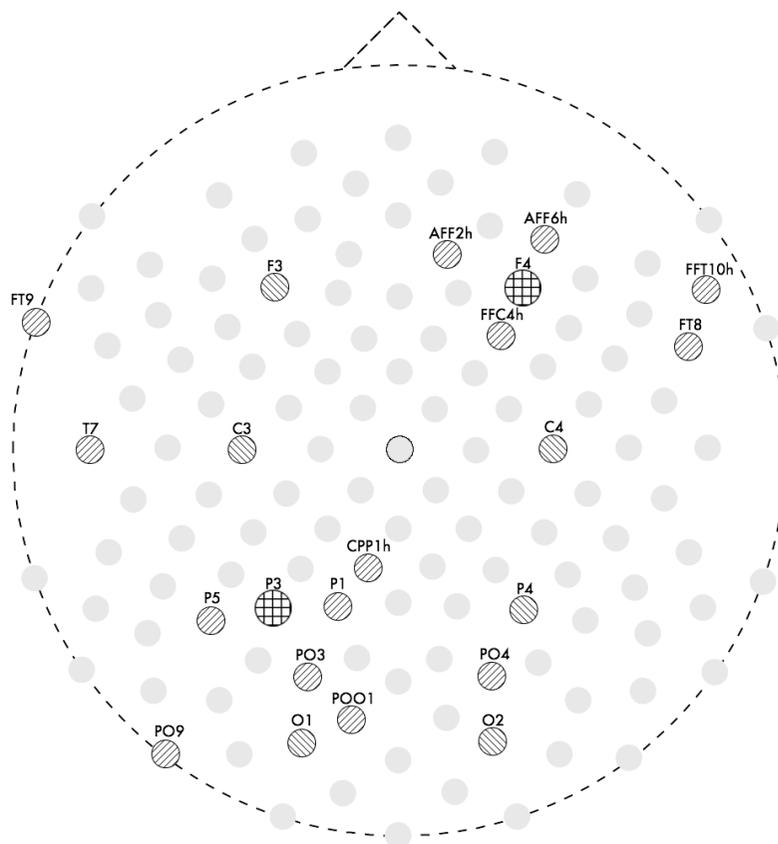


Рис. 2. Расположение отведений на голове человека:

- — штриховкой влево показаны отведения, которые традиционно применяются в исследованиях НКИ и взяты из литературных источников (отведения F3, C3, C4, P4, O1, O2);
- — штриховкой вправо показаны значимые отведения, которые получены в результате нашего исследования (AFF2h, AFF6h, FFC4h, FFT10h, FT8, FT9, T7, CPP1h, P1, P5, PO3, PO4, POO1, PO9);
- ⊗ — штриховкой квадратами показаны отведения, которые совпали в литературных данных и нашем исследовании (F4, P3)

Полученные нами отведения F4 и P3 совпали с традиционно используемыми. Отведения AFF2h, AFF6h, FFC4h очень близки к традиционно используемому отведению F4. Группа отведений CPP1h, P1, P5, PO3, POO1, PO4, PO9 также находится в одной области с традиционно используемыми отведениями P3, P4, O1, O2.

Однако полученные нами отведения FT9, T7, FFT10h, FT8 не совпадают с литературными данными и расположены относительно далеко от традиционно используемых отведений.

Также интересно отметить, что вблизи традиционно используемых отведений F3, C3, C4 наше исследование не показало значимых отведений.

Заключение

В основном результаты нашего исследования совпали с текущими литературными данными по выбору значимых ЭЭГ-отведений для задач НКИ. Для распознавания воображаемого движения правой кистью наиболее подходящими ЭЭГ-отведениями, по нашему мнению, являются отведение в центроиде между отведениями AFF2h, AFF6h, FFC4h (в международной системе нотации отведений «10–5» наиболее близкое к этой точке отведение обозначается как F4h) и отведение в центроиде между отведениями P3, P1, PO3 (наиболее близкое к этой точке отведение обозначается как PPO3h).

Получены интересные результаты в ранее широко не использовавшихся в НКИ отведениях FT9, T7, FFT10h, FT8, которые требуют дополнительных экспериментальных данных, а также проверки на более сложном уровне обработки сигналов – с использованием современных методов кластеризации, классификации и машинного обучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подходы к формированию и запуску новых отраслей промышленности в контексте Национальной технологической инициативы, на примере сферы «Технологии и системы цифровой реальности и перспективные «человеко-компьютерные» интерфейсы (в части нейроэлектроники)» // Агентство стратегических инициатив. URL: <https://asi.ru/nti/docs/Doklad.pdf> (дата обращения: 08.11.2016).
2. Vaughan, Heetderks, Trejo, Rymer, Weinrich, Moore, Kübler, Dobkin, Birbaumer, Donchin, Wolpaw EW, Wolpaw JR. Brain-computer interface technology: a review of the Second International Meeting // IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., vol. 11, no. 2, pp. 94–109, 2003.
3. Lotte, Congedo, Lécuyer, Lamarche, Arnaldi. A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces // J. Neural Eng., vol. 4, no. 2, pp. R1–R13, 2007.
4. Leuthardt, Schalk, Roland, Rouse, Moran. Evolution of brain-computer interfaces: going beyond classic motor physiology // Neurosurg. Focus, vol. 27, no. 1, p. E4, 2009.
5. Yong, Menon. EEG classification of different imaginary movements within the same limb // PLoS One, vol. 10, no. 4, 2015.
6. Alotaiby, El-Samie, Alshebeili, Ahmad. A review of channel selection algorithms for EEG signal processing // EURASIP J. Adv. Signal Process., vol. 2015, no. 1, p. 66, 2015.
7. Li, Chen, Yan, Wei, Wang. Classification of EEG Signals Using a Multiple Kernel Learning Support Vector Machine // Sensors, vol. 14, no. 7, pp. 12784–12802, 2014.
8. Binnie, Dekker, Smit, Van Der Linden. Practical considerations in the positioning of EEG electrodes // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol., vol. 53, no. 4, pp. 453–458, 1982.
9. Johns. A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale // Sleep, vol. 14, no. 6, pp. 540–545, 1991.
10. Kaida, Takahashi, Åkerstedt, Nakata, Otsuka, Haratani, Fukasawa. Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables // Clin. Neurophysiol., vol. 117, no. 7, pp. 1574–1581, 2006.
11. Hoddes, Dement, Zarcone. The development and use of the Stanford sleepiness scale (SSS) // Psychophysiology, vol. 9, p. 150, 1972.
12. Shapiro, Francia. An approximate analysis of variance test for normality // J. Am. Stat. Assoc., vol. 67, no. 337, pp. 215–216, 1972.
13. Boneau. The effects of violations of assumptions underlying the t test // Psychol. Bull., vol. 57, no. 1, pp. 49–64, 1960.
14. Neuhäuser. Two-sample tests when variances are unequal // Anim. Behav., vol. 63, no. 2000, pp. 823–825, 2002.
15. Posten. Robustness of the two-sample t-test // Robustness of Statistical Methods and Nonparametric Statistics, vol. 1, 1984, pp. 92–99.
16. Lo, Chien, Chen, Tsai, Fang, Lin. A Wearable Channel Selection-Based Brain-Computer Interface for Motor Imagery Detection // Sensors, vol. 16, no. 2, p. 213, 2016.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2016 г.

IDENTIFICATION OF SIGNIFICANT LEADS IN THE EEG DURING RECOGNITION IMAGINARY MOVEMENTS

**S.N. Agapov¹, V.A. Bulanov¹, N.G. Gubanov², A.V. Zakharov³,
M.S. Sergeeva³**

¹ IT Universe LLC
3, Eroshevskogo st., Samara, 443086, Russian Federation

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

³ Samara State Medical University
18, Gagarina st., Samara, 443079, Russian Federation

Modern technology is actively use the brain-computer interface (BCI). Human interaction with the environment through a communication with the electrical and chemical activity of the brain is one of the most important components of the next stage of scientific and technological development in the XXI century. In recent years there has been significant progress in tasks of recognition and classification of various types of motor imagery. At the moment, one of the main methods of control in BCI are the EEG correlates of imaginary movements. The aim of this study is to identify the localization of most significant EEG electrodes in task of pattern recognition the motor imagery of the dominant arm. Using the fewer EEG electrodes should lead to increase the efficiency and reduce the cost of the EEG-equipment.

Keywords: EEG, motor imagery, Student's t-test, BCI.

Sergey N. Agapov, Specialist of Laboratory.

Vladimir A. Bulanov, Head of Laboratory.

Nikolay G. Gubanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Alexander V. Zakharov, (Ph.D. (Medical.)), Associate Professor.

Mariya S. Sergeeva (Ph.D. (Biolog.)), Associate Professor.

УДК 50.03.05

ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ В НАУКЕ О ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ В ОБЩЕСТВЕ

В.А. Виттих

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

В развитие принципа дополнительности Н. Бора сформулирован принцип дополнительности применительно к науке о процессах управления в обществе, который постулирует, что для полного описания проблемной ситуации в жизни общества необходимо использовать две взаимоисключающие и одновременно дополнительные науки – классическую науку о процессах управления в обществе и постнеклассическую эвергетику, которые совместно дают исчерпывающее описание ситуации как целостности. Классическая наука об управлении исходит из оппозиции субъекта и объекта: человек "выносится" из ситуации, сложившейся в общественной жизни, которую познает со стороны, "объективно", без примеси человеческой субъективности, приобретая отвлеченное знание. Независимо от классической науки, но в дополнение к ней эвергетика предполагает суперпозицию субъекта и объекта: каждый неоднородный актор, находясь "внутри" проблемной ситуации, переживает ее и вырабатывает "живое", по С. Франку, знание.

Ключевые слова: принцип дополнительности, наука о процессах управления в обществе, эвергетика, проблемная ситуация, отвлеченное и живое знание.

Введение

Человек с момента своего рождения запрограммирован на принятие решений. Сначала он это делает неосознанно, на уровне рефлексов, а по мере того как познает себя и окружающий жизненный мир, включает в процессы принятия решений свои интеллектуальные и волевые ресурсы. И когда человек задумывается о том, как ему живется на этом свете, то невольно начинает сравнивать сформировавшиеся у него представления о «хорошей» жизни (о желаемом и ожидаемом) с реальностью (с фактически наблюдаемым), и если обнаруживает негативные противоречия между ними, то испытывает дискомфорт, чувство неудовлетворенности, которое может перерасти для него в проблему, требующую решения. Поэтому в течение всей своей жизни человек постоянно осознает себя в тех или иных проблемных ситуациях, побуждающих его принимать решения.

Поскольку сознание человека интерсубъективно, т. е. отвечает факту существования других индивидов, то решения эти являются своеобразной «равнодействующей параллелограммов сил» (волевых, интеллектуальных и эмоциональных) всех тех, кто озабочен необходимостью совместного урегулирования общей для них проблемной ситуации. Принятие и исполнение решения относительно устраивающего всех способа решения проблемы (или снижения чувства неудовлетворенности) составляет существо процесса управления в общественной жизни.

Подобные интерсубъективные механизмы организации процессов управления начали формироваться еще в первичной социальной форме первобытного

строю – общине, где общее собрание служило социальным институтом, обеспечивающим самоуправление по принципу «каждый за всех, все за каждого». Это были отношения «первобытной демократии», когда управленческие структуры были «встроены» в основную массу общинников, а возникающие в повседневной жизни проблемные ситуации, затрагивающие интересы членов общины, урегулировались ими путем локальных взаимодействий на сходе общины. Необходимо обратить внимание, что каждый член общины выступал как актер – субъект, выполняющий деятельностные функции по отношению к объекту – проблемной ситуации, в которую он был «погружен» вместе с другими актерами. Поэтому описанный взгляд на процессы управления в обществе может быть назван субъектно-ориентированным.

При переходе от общинного «естественного состояния» к «государственному состоянию» между субъектами появился посредник в виде государства, которое наделялось полномочиями и ресурсами для урегулирования проблемных ситуаций, возникающих в жизни общества. Сформировавшись как «система», в которой фиксированы элементы и отношения между ними, государство создавало свои «подсистемы», являющиеся по своей сути самостоятельными системами. Так появились системы государственного и муниципального управления, общественные системы здравоохранения и образования, армия и т. п. Все составляющие общественной жизни стали рассматриваться как «системы» или «системы систем», а в науке об управлении речь шла о «системах управления» и об «управлении системами» [1].

Однако системный подход не предполагал включение человека в науку о процессах управления в обществе; и это не случайно, поскольку теория управления создавалась на принципах классической научной рациональности, постулирующей оппозицию субъекта-исследователя и объекта. Человек «выносился» из объекта – ситуации, сложившейся в общественной жизни, которую изучал «со стороны» и «объективно», без примеси человеческой субъективности. Оставался только так называемый «человеческий фактор», который чаще всего характеризовал «мешающую роль» человека при выполнении системой своих функций. Классическая наука об управлении формировалась, таким образом, как субъектно-инвариантная, объектно- и системно-ориентированная.

В последние годы появились публикации, свидетельствующие о зарождении не «бессубъектной», а субъектно-ориентированной науки о процессах управления в обществе – эвергетики [2–4], предполагающей участие людей из повседневной жизни в процессах принятия решений. Возникает вопрос: *в каком соотношении находятся классическая наука об управлении и постнеклассическая эвергетика?* Является ли одна частью другой? Или, как это отмечается в [5], они дополняют друг друга? Для ответа на этот вопрос в данной статье предлагается использовать принцип дополнительности Н. Бора, являющийся важнейшим принципом не только квантовой механики, но и науки в целом.

Два взгляда на проблемную ситуацию

Стартовой позицией в процессах управления является осознание проблемной ситуации человеком-актером в повседневном жизненном мире, и если он (актер) располагает необходимыми ресурсами, то будет решать проблему самостоятельно, а если нет, то будет искать контакты с другими актерами, озабоченными той же проблемой, но каждый со своей точки зрения (в этом смысле актеры являются неоднородными). Коммуницируя между собой, актеры стремятся достичь взаи-

мопонимания и консенсуса относительно способов совместного урегулирования проблемной ситуации, для реализации которого собственных ресурсов у них может быть недостаточно. И тогда акторы из повседневности обращаются в «мир систем», наделенный общественными ресурсами, а также полномочиями по принятию социально значимых решений и распределению этих ресурсов. Следует отметить, что, по А. Лефевру, «концепт повседневности не означает систему, но скорее является знаменателем, общим для существующих систем» [6].

В отличие от акторов (людей из повседневности), находящихся, образно говоря, «внутри» проблемной ситуации, представители мира систем (например, сотрудники органов государственного управления) начинают изучать ситуацию «со стороны»; таким образом, первые «осознают» проблему, вторые – «познают» [7]. Налицо два различных, в значительной степени противоположных взгляда на проблемную ситуацию: *человек из повседневности «переживает» свою уникальную ситуацию* «всеми фибрами души и тела», а *человек из мира систем выступает в роли отстраненного наблюдателя*, призванного (в соответствии с функцией, выполняемой им в системе) описать проблему в понятных и принятых (желательно формализованных) терминах и предложить способы ее решения (возможно, совместно со своими коллегами). В первом случае человек – актер участвует в процессах управления (урегулирования ситуации) *непосредственно*, а во втором от его имени в мире систем действует представитель (функционер, менеджер), т. е. осуществляется *опосредованная* (представительная) форма управления. Причем функционеры и акторы приобретают два различных типа знания.

Отвлеченное и живое знание

Проблемная ситуация рассматривается в мире систем как внешний объект, изучаемый с помощью классической гносеологии, вырабатывающей научное знание, которое не зависит от особенностей субъекта познания и средств наблюдения. В своей монографии «Предмет знания» [8] С.Л. Франк назвал такое знание отвлеченным: «Знание, выраженное в суждении посредством понятий, *то, что мы называем отвлеченным знанием, имеет всегда свой предмет вне себя и, достигая содержания самого предмета, вместе с тем не есть подлинное обладание предметом, а дает лишь вторичное воспроизведение его в отраженной, низшей сфере понятий...* Знание, дающее нам вместо истинно-сущего лишь производно-сущее, имея объективное значение, тем не менее не адекватно своему предмету».

Проанализировав основы и пределы отвлеченного знания, С.Л. Франк вводит понятие «живое знание» как «*знание – переживание*», *схватывающее предмет в целостности и значимости для человека, через которое «проходят связующие нити, соединяющие онтологию, гносеологию и этику в цельное знание, одновременно теоретическое и практическое»* [9]. Утверждая, что нет «гносеологии» вне «онтологии», С.Л. Франк приходит к единой «теории знания и бытия» – *онтологической гносеологии*.

Таким образом, отвлеченное знание о проблемной ситуации, выраженное в понятиях, приобретает рационально мыслящим «человеком системы» с помощью классической гносеологии, а живое знание осознается «человеком из повседневности» как телесно-духовной целостностью в рамках онтологической гносеологии.

Непосредственное применение и описание содержания понятий

В процессе осознания проблемной ситуации и проведения переговоров относительно ее урегулирования человек в своей повседневной жизни использует понятия естественного языка, непосредственно воспроизводя имеющиеся в его памяти образцы, которым эти понятия соответствуют. Он не задумывается об определениях этих понятий, прибегая к ним только в тех случаях, когда того требует ситуация.

Если же человек выступает как внешний наблюдатель, который должен «объективно» отобразить и донести информацию о проблеме до своих коллег, то он должен описать или/и использовать общепринятое содержание используемых понятий. Но как соотносятся между собой описание содержания и непосредственное применение понятий? Н. Бор дал ответ на этот вопрос, постулировав, что *«глубокий анализ любого понятия и его непосредственное применение взаимно исключают друг друга»* [10, с. 58], и сформулировал свой фундаментальный принцип дополнительности.

Принцип дополнительности Н. Бора

Н. Бор отмечает *«тот очевидный факт, что в конечном счете непосредственное употребление каждого слова находится в дополнительном отношении к подробному анализу его смысла»* [10, с. 212], предлагая использовать термин «дополнительность», чтобы подчеркнуть то обстоятельство, что *«в противоречащих друг другу явлениях мы имеем дело с различными, но одинаково существенными аспектами единого четко определенного комплекса сведений об объектах»* [10, с. 393]. Поэтому в принципе дополнительности он говорит о том, что *для полного описания квантово-механических явлений необходимо применять два взаимоисключающих («дополнительных») набора классических понятий, совокупность которых дает исчерпывающую информацию об этих явлениях как о целостных.*

В. Гейзенберг в 1958 году комментировал принцип дополнительности следующим образом: *«Бор рассмотрел два описания – частицы и волны – как два дополняющих друг друга описания одной и той же реальности. Любое из этих описаний может быть только частично истинным. Должны быть ограничения на употребление концепции частицы, так же как на употребление концепции волнового процесса, кроме того, ни одна концепция по отдельности не может избежать противоречий»* [11].

Н. Бор предвидел более широкое, выходящее за рамки квантовой механики, применение принципа дополнительности: *«Мы и в других областях человеческого познания сталкиваемся с видимыми противоречиями, которые могут быть устранены только с помощью принципа дополнительности»* [10, с. 209]. *«Что касается человеческих сообществ, то мы хотели бы особенно подчеркнуть, что в описании положения отдельного лица внутри общества имеются типично дополнительные стороны, связанные с подвижной границей между оценкой ценностей и общими положениями, на основании которых о них судят... В каждом случае, где нужно строго применять закон, не остается места для проявления милосердия, и наоборот, доброжелательство и сострадание могут вступить в конфликт с самими принципами правосудия... В древневосточной философии это подчеркивается следующим мудрым советом: добиваясь гармонии человеческой жизни, никогда не забывай, что на сцене бытия мы сами являемся как актерами, так и зрителями»* [10, с. 495]. Этим высказыванием Н. Бор, по существу, пред-

восхитил применение принципа дополнительности в науке о процессах управления в обществе.

Следует отметить, что в работе [12] принцип дополнительности рассматривается как один из ключевых принципов научного познания, который «означает правомерность и равноправие различных научных описаний объекта».

Принцип дополнительности в науке о процессах управления в обществе

В развитие изложенной мысли Н. Бора можно констатировать, что *для гармоничного развития общества нельзя ограничиться организацией процессов управления в нем только на принципах классической научной рациональности*, предполагающей строгое (по возможности формальное) описание содержания понятий человеком – внешним наблюдателем из мира систем и приобретение им объективного отвлеченного знания о решаемой проблеме. *Нужно использовать и другую составляющую науки о процессах управления в обществе, которая исходит из того, что человек – актер (Н. Бор называет его актером) из повседневного жизненного мира становится участником коммуникативных действий, направленных на приобретение живого знания о проблемной ситуации с непосредственным применением понятий обыденного языка, сформировавшихся в основном на базе допредикативного (не требующего использования логических форм мышления) человеческого опыта.*

Это два *взаимоисключающих, но дополнительных подхода к описанию одной и той же реальности*: первый реализуется в классической науке об управлении, а второй положен в основу постнеклассической эвергетики. Их сравнительные характеристики приведены в таблице.

Сравнительные характеристики классической и постнеклассической наук об управлении

Классическая наука об управлении	Постнеклассическая наука об управлении – эвергетика
Гносеология	Онтологическая гносеология
Субъект-объектная оппозиция	Субъект-объектная суперпозиция
Объект пред-дан субъекту, изучающему его со стороны	Объект не пред-дан субъекту, а формируется в его сознании
Субъект – элемент мира систем, выполняющий заданную функцию	Субъект – неоднородный актер из мира повседневности
Отвлеченное знание, приобретаемое с использованием описания содержания понятий	Живое знание, приобретаемое на основе непосредственного применения понятий

Один и тот же человек может оказаться одновременно и неоднородным актором, «погруженным» в переживаемую им проблемную ситуацию в повседневном жизненном мире, и «функциональником» в мире систем, изучающим и решающим проблему «со стороны». Тогда в одном случае он должен опираться на эвергетику, а в другом – на классическую теорию управления, что находится в полном соответствии с принципом дополнительности: *для полного описания проблемной ситуации в жизни общества необходимо использовать две взаимоисключающие и одновременно дополнительные науки – классическую науку*

о процессах управления в обществе и постнеклассическую эвергетику, которые совместно дают исчерпывающее описание ситуации как целостности.

Заключение

В настоящее время в научной и общественной жизни используется практически только классическая наука об управлении, нацеленная на создание систем государственного, муниципального и корпоративного управления самого разнообразного назначения. Вторая составляющая – эвергетика, предполагающая включение в процессы управления неоднородных акторов из повседневного жизненного мира, находится в стадии становления, поэтому говорить о ее применении преждевременно, хотя безусловно назрела социально значимая потребность в создании и развитии этой науки. Нельзя не согласиться с мнением Ю. Хабермаса, который говорит о происходящей «колонизации жизненного мира системами» [13], что в конечном счете влечет за собой снижение качества жизни людей. Эвергетика как наука, дополнительная к классической науке об управлении, должна сыграть важную роль в решении этой проблемы, создав теоретический фундамент для совершенствования процессов управления в обществе путем использования интеллектуальных и волевых ресурсов людей из повседневности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Johnson R.A., Kast F.E., Rosenzweig J.E.* The Theory and Management of Systems (second edition) // McGraw – Hill Book Company, New York, 1967 (пер. с англ., М.: Советское радио, 1971. – 648 с.)
2. *Bumtux B.A.* Проблемы эвергетики // Проблемы управления. – 2014. – № 4. – С. 69–71.
3. *Vittikh V.A.* Evolution of Ideas on Management Processes in the Society: from Cybernetics to Evergetics. – Group Decision and Negotiation, volume 24, issue 5, September 2015, p. 825–832.
4. *Vittikh V.A.* Evergetics: Science of Intersubjective Management Processes in Everyday Life. – International Journal Management Concepts and Philosophy, vol. 9, No. 2, 2016, p. 63–72.
5. *Vittikh V.A.* Heterogeneous Actor and Everyday Life as Key Concepts of Evergetics. – Group Decision and Negotiation, vol. 24, issue 6, November 2015, p. 949–956.
6. *Лефевр А.* Повседневное и повседневность // Социологическое обозрение. – 2007. – Т. 6. – № 3. – С. 33–36.
7. *Виттих В.А.* О понятиях «познание» и «осознание» в науке об управлении // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVII международной конференции. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2015. – С. 200–201.
8. *Франк С.Л.* Предмет знания. Душа человека. – Мн.: Харвест, М.: АСТ, 2000. – 992 с.
9. *Аляев Г.Е.* «Живое знание» в философии С. Франка: гносеологический, онтологический и этико-антропологический контекст. – СПб.: Мысль, вып. 16, 2014. – С. 19–32.
10. *Бор Н.* Избранные научные труды: в 2 т. Т. II. – М.: Наука, 1971. – 674 с.
11. *Дорфман Л.Я., Дудорова Е.В.* Системная традиция: теория холизма и холизм // Системные исследования культуры. – СПб.: Алетейя, 2006. – С. 52–54.
12. *Новиков А.М., Новиков Д.А.* Методология. – М.: СИНТЕГ, 2007. – 668 с.
13. *Хабермас Ю.* Отношения между системой и жизненным миром в условиях позднего капитализма. – Thesis, вып. 2, 1993. – С. 123–136.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2016 г.

COMPLEMENTARITY PRINCIPLE IN THE SCIENCE OF MANAGEMENT PROCESSES IN SOCIETY

V.A. Vittikh

Institute for the Control of Complex Systems, Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

In the development of Bohr's complementarity principle, the paper formulates the complementarity principle with regard to the science of management processes in society, which postulates that, for the purpose of a complete description of a problem situation in society, it is necessary to use two mutually exclusive and, at the same time, complementary sciences, i.e. the classical science of management processes in society and the postnonclassical evergetics, which, together, provide a comprehensive description of the situation as the integrity.

Classic management science proceeds from the opposition of subject and object: a man is "removed" from the situation in public life, which he learns "objectively" from the outside, without any admixture of human subjectivity, acquiring abstract knowledge. Unlike classical science but in addition to it, evergetics assumes the superposition of subject and object, i.e. all heterogeneous actors being "inside" the problem situation, experience it, and produce a "living", according to S. Frank, knowledge.

Keywords: *complementarity principle, science of management processes in society, evergetics, problem situation, abstract and living knowledge.*

УДК 004.896 : 681.5

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ЗАМКНУТОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ

Ю.Р. Владов, М.Ю. Нестеренко, В.В. Влацкий

ФГБУН «Оренбургский научный центр УрО РАН»
Россия, 460000, г. Оренбург, ул. Пионерская, 1

Мониторинг состояния природно-техногенных объектов (ПТО) – одна из актуальнейших научных и практических проблем. В статье представлена разработанная методология мониторинга состояния ПТО с замкнутой автоматизированной системой. Предложена декомпозиция проблемы, предполагающая нахождение оптимальных агрегированных и аналитических моделей изменения состояния, а также моделей формирования мониторинговой информации. Разработана геоинформационная система с сетью сейсмических станций. Структурную основу замкнутой автоматизированной системы мониторинга составляют программные модули нахождения соответствующих моделей состояния ПТО, в том числе моделей формирования мониторинговой информации. При ее использовании установлено существенное (более 10 %) повышение эффективности функционирования и использования природно-техногенных объектов.

Ключевые слова: мониторинг состояния, геоинформационная технология, замкнутая автоматизированная система, природно-техногенные объекты.

Состояние исследований и актуальность проблемы

Под мониторингом состояния объекта понимается система сбора, хранения и анализа относительно небольшого количества существенных признаков или его параметров описания для вынесения суждения о его состоянии или поведении в целом. Отказы природно-техногенных объектов (ПТО) расходуют значительные материальные и экологические ресурсы. Увеличивающаяся продолжительность работы ПТО сопровождается их износом и выдвигает проблему мониторинга состояния в ранг наиболее актуальных.

В ряде работ выделены типичные механизмы отказов, составлены физико-механические и математические модели процессов изменения состояния различных объектов на основе локальных параметров. В то же время методы локального или точечного мониторинга не отражают реальной их интенсивности изменения.

Обширная диагностическая информация о повреждениях ПТО создается при использовании современных методов разрушающего и неразрушающего контроля. Однако ее анализ затруднен из-за большой размерности задачи и невозможности использования существующих методов обработки данных в условиях необходимости их ранжирования и сохранения связи с исследуемым объектом.

Среди наиболее значимых работ, посвященных широкому кругу вопросов

*Юрий Рафаилович Владов (д.т.н., проф.), заведующий лабораторией.
Максим Юрьевич Нестеренко (д.геол.-минерал.н., доц.), заведующий лабораторией.
Валерий Викторович Влацкий, старший научный сотрудник.*

идентификации и мониторинга состояния объектов, следует отметить работы отечественных и зарубежных авторов [1–5], а также работы в области сбора данных, моделирования и идентификации с помощью ЭВМ [2–8], управления технологическими процессами с сосредоточенными и распределенными параметрами [7–13]. Однако особенности техногенных объектов не позволяют использовать соответствующие классические методы. Применяемые методы интеллектуального анализа данных, используемые в различных областях науки и техники, предназначены для выявления закономерностей, классификации и кластеризации данных и не выходят на требуемый уровень мониторинга состояния объектов выделенного класса.

Теория автоматизированных информационных систем и ее отдельные приложения отражены в трудах ведущих отечественных и зарубежных ученых [1, 5, 11–13]. Однако многие теоретические и прикладные вопросы их использования еще далеки от завершения, в особенности для природно-техногенных объектов, функционирующих в условиях полной или частичной неопределенности и высокой удельной концентрации различных видов энергии. Современные природно-техногенные объекты в ряде случаев относятся к классу сложных. Существенное повышение эффективности функционирования таких объектов достигается путем применения адекватно сложных замкнутых автоматизированных систем мониторинга состояния.

Цель – повышение эффективности функционирования и использования сложных техногенных объектов длительной эксплуатации за счет разработки методологии мониторинга их состояния.

Задачи исследования: изложить основные теоретические положения построения методологии мониторинга состояния ПТО; разработать геоинформационную систему с сетью сейсмических станций; апробировать предлагаемую технологию мониторинга состояния природно-техногенных объектов.

Декомпозиция проблемы

Ввиду масштабности и сложности фундаментальной проблемы автоматизированного мониторинга состояния ПТО рациональна ее декомпозиция на три этапа. На первом этапе создаются оптимальные агрегированные модели состояния. На втором этапе на их основе выявляются аппроксимирующие зависимости корреляционных функций изменения состояния и решается модифицированное интегральное уравнение Винера – Хопфа. Третий этап предусматривает формирование мониторинговой информации с принятием обоснованных решений.

Агрегированные модели

Процесс нахождения агрегированных моделей состояния ПТО рассмотрим на примере теплоэнергетического оборудования. Предлагается вести агрегирование на пяти уровнях [3]: поэлементное, покомпонентное, поагрегатное, погрупповое и общее (рис. 1). Например, покомпонентное агрегирование предусматривает нахождение степени повреждения металла по трем компонентам: надежностной $S_{нк}$ в соответствии с эффективной наработкой, температурной $S_{тк}$ в зависимости от напряжения и температуры и механической компоненты $S_{мк}$ также в зависимости от эффективной температуры для каждого элемента с учетом 11 существенных физико-механических свойств, а также марки стали, давления и других факторов, выбранных из базы данных.

		$S_{\text{Опт.мин}}, S_{\text{Опт.ср}}, S_{\text{Опт.макс}}$																						
5	5	$S_{\text{адд}}$					$S_{\text{МПТ}}$										$S_{\text{КМб}}$							
		N_a			N_q							N_z												
		$S_{\text{агр1}}$					.....					$S_{\text{агр m}}$											
4	4	Гибы		$M_{\text{Гибов}}$			$D_{\text{Гибов}}$					$\sigma_{\text{Гибов}}$			Интервальные значения									
		Св. швы		$M_{\text{Св.швов}}$			$D_{\text{Св.швов}}$					$\sigma_{\text{Св.швов}}$												
		Трубы		$M_{\text{Труб}}$			$D_{\text{Труб}}$					$\sigma_{\text{Труб}}$												
		$S_{\text{адд1}}$		$S_{\text{МПТ1}}$		$S_{\text{КМб1}}$			...		$S_{\text{адд k}}$		$S_{\text{МПТ k}}$		$S_{\text{КМб k}}$						
		N_{a1}		N_{q1}		N_{z1}			...		$N_{a k}$		$N_{q k}$		$N_{z k}$									
		Схема 1										...		Схема k										
		$S_{\text{Опт агр}}$					.....					$S_{\text{Опт агр}}$											
3	3	$S_{\text{адд1}}$		$S_{\text{МПТ1}}$		$S_{\text{КМб1}}$			...		$S_{\text{адд m}}$		$S_{\text{МПТ m}}$		$S_{\text{КМ m}}$						
		N_{a1}		N_{q1}		N_{z1}			...		$\alpha_{N_a}, \alpha_{N_q}, \alpha_{N_z}$		$N_{a m}$		$N_{q m}$		N_{z33}							
									...															
		Агрегат 1										.....		Агрегат m									
2		S_1										...		S_n										
2		$S_{\text{нк1}}$			$S_{\text{тк1}}$			$S_{\text{МК1}}$...		$S_{\text{нк n}}$			$S_{\text{тк n}}$		$S_{\text{МК n}}$					
1		$S_{\text{нк1}}$		$S_{\text{тк1}}$		$S_{\text{МК1}}$...		$S_{\text{нк n}}$			$S_{\text{тк n}}$		$S_{\text{МК n}}$					
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Рис. 1. Схема нахождения агрегированных моделей состояния энергетического котла как сложного техногенного объекта:
 1 – покомпонентная; 2 – поэлементная; 3 – поагрегатная; 4 – погрупповая; 5 – общая

Выбраны весовые коэффициенты: в надежностной компоненте для вероятности отказов (1) $\alpha_{Q(t)}$, номинального допускаемого напряжения (2) $\alpha_{\dot{A}f}$ и относительного количества пусков (3) $\alpha_{\bar{n}}$; в температурной компоненте для допускаемого напряжения (4) $\alpha_{\dot{A}f}$, предела ползучести (5) $\alpha_{\dot{H}}$ и предела длительной прочности (6) $\alpha_{\dot{A}\dot{H}}$; в механической компоненте для предела прочности (7) $\alpha_{\dot{H}\dot{\sigma}}$, предела текучести (8) $\alpha_{\dot{H}\dot{\sigma}}$, относительного удлинения (9) $\alpha_{\dot{H}\dot{\sigma}}$, относительного сужения (10) $\alpha_{\dot{H}\dot{\sigma}}$ и ударной вязкости (11) $\alpha_{\dot{O}\dot{A}}$. Как видно из рис. 1, при нахождения агрегированных моделей состояния теплоэнергетического оборудования использованы три компоненты, n элементов, m агрегатов и k схем.

Третий уровень операций агрегирования предполагает выбор удельного количества элементов в агрегате. Выбор оптимального количества осуществляется

по критерию минимума среднего риска. Таким образом, создаются агрегаты, для каждого из которых вычисляются по предложенному алгоритму три параметра агрегирования N_{ai} , N_{qi} , N_{zi} , из которых образуются по три агрегированные модели – аддитивная, мультипликативная и комбинированная с учетом весовых коэффициентов.

Конечной целью погруппового агрегирования является получение основных статистических характеристик: математического ожидания M , дисперсии D , стандартного отклонения σ и границ интервалов для гибов, сварных соединений и труб с опорой на разработанный комплект схем графической части базы данных. В качестве исходной информации на уровне общего агрегирования используются найденные значения состояния каждого агрегата, по которым вычисляются те же критерии N_a , N_q , N_z , и находятся агрегированные модели $S_{алд}$, $S_{млт}$, $S_{кmb}$, из которых по одному из критериев минимального, среднего или максимального риска в зависимости от ситуации находятся соответствующие состояния ПТО – $S_{опт.мин}$, $S_{опт.ср}$, $S_{опт.макс}$.

По результатам каждого диагностирования ПТО выявляется неравномерность его состояния, ухудшение по мере увеличения наработки и выделяются потенциально опасные агрегаты.

Корреляционные зависимости

Из множества построенных на основе оптимальных агрегированных моделей состояния ПТО выделяются типы корреляционных функций: авто- $R_{xx}(\tau)$, $R_{yy}(\tau)$ и взаимно- ($R_{yx}(\tau)$ при $\tau \geq 0$ и $R_{xy}(\tau)$ при $\tau < 0$). По полученным результатам нами предлагается провести замену нормированных авто- $r_{ii}(\tau)$ и взаимно- $r_{ij}(\tau)$, $r_{ji}(\tau)$ корреляционных функций аппроксимируемыми зависимостями: экспоненциальными, экспоненциально косинусными, экспоненциально полиномиальными и экспоненциально косинуссинусными [3–4]. Например, экспоненциально косинусные зависимости описываются формулами

$$r_{ii}(\tau) = A \cdot e^{-\alpha \cdot |\tau|} \cos(\omega \cdot \tau); \quad (1)$$

$$r_{ij}(\tau) = B \cdot e^{-\beta_1 \cdot \tau} \cos(\omega \cdot \tau); \quad (2)$$

$$r_{ji}(\tau) = B \cdot e^{\beta_2 \cdot \tau} \cos(\omega \cdot \tau), \quad (3)$$

где коэффициенты A и B – характеризуют начальные условия;

α , β_1 , β_2 – показывают интенсивность затухания корреляционных функций;

ω – определяет среднюю частоту периодических составляющих случайных процессов.

Во всех случаях коэффициенты аппроксимации, характеризующие случайные процессы изменения состояния, – положительные вещественные числа, что позволяет находить аналитические модели изменения состояния ПТО в символьном виде.

Аналитические модели изменения состояния

Аналитические модели изменения состояния ПТО найдутся при постановке задачи с входной $U_x(t)$ и выходной $U_y(t)$ оптимальными агрегированными моделями [3]. Нужно найти оценку оператора, характеризующего интенсив-

ность изменения состояния ПТО, $-v(t)$. Для этого необходимо соблюсти требование близости случайных функций $U_y^*(t)$ выхода модели к случайной функции $U_y(t)$, являющейся выходной переменной объекта. Критерием близости случайных функций является функция потерь $\rho[u_y(t), u_y^*(t)]$, на математическое ожидание которой наложено требование минимума (4):

$$M\{\rho[u_y(t), u_y^*(t)]\} = \min. \quad (4)$$

Критерий минимума среднего риска будет выполнен при минимуме математического ожидания функции потерь и конкретной реализации случайной агрегированной модели на входе. Оператор математического ожидания или регрессия выходной переменной $U_y(t)$ относительно входной $U_x(t')$ дает оптимальную оценку оператора состояния объекта. Проводя преобразования линейных операторов [3] с учетом нормирования аппроксимирующих корреляционных зависимостей, стационарности и стационарной связанности случайных функций $U_y(t)$ и $U_x(t)$, интенсивность изменения состояния ПТО найдем по модифицированному интегральному уравнению Винера – Хопфа (5):

$$\int_0^{\infty} v(\tau) \cdot r_{yx}(t - \tau) \cdot d\tau = r_{yx}(t), \quad -\infty < t < \infty, \quad v(\tau) = 0 \text{ при } \tau < 0. \quad (5)$$

По данным [9, 11, 13, 15] известно, что интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода типа (5) сводится декомпозицией авто- и взаимно- КФ на две составляющие при $t \geq 0$ и $t < 0$ к интегральному уравнению Вольтерра 1-го рода, аналитически решаемому с помощью преобразования Лапласа.

В силу единственности аналитического продолжения для функций $r_{xx}^-(t)$ и $r_{yx}^-(t)$ соответствующее уравнение имеет место для всех t . Проводя интегральные преобразования, получаем

$$\int_0^t v(\tau) \cdot [r_{xx}^+(t - \tau) - r_{xx}^-(t - \tau)] \cdot d\tau = r_{yx}^+(t) - r_{yx}^-(t). \quad (6)$$

Поскольку для рассматриваемых функций существует преобразование Лапласа, то решение (6) всегда существует, и притом оно единственное. Применяя преобразование Лапласа с оператором s и учтя теорему умножения для свертки оригиналов, получим расчетное выражение для нахождения передаточной функции $G(s)$:

$$G(s) \cdot [r_{xx}^+(s) - r_{xx}^-(s)] = r_{yx}^+(s) - r_{yx}^-(s). \quad (7)$$

Используя обратное преобразование Лапласа с оператором s^{-1} , находим аналитические модели, отражающие процессы изменения состояния и их интенсивности для техногенных объектов. В целом построенные на этом этапе по оптимальным агрегированным моделям корреляционные функции позволяют выделить 4 типа аппроксимирующих зависимостей с увеличивающимися по сложности описания аргументами в соответствии с установленными при длительной эксплуатации четырьмя механизмами повреждений ПТО. По найденным расчетным выражениям для модифицированного интегрального уравнения Винера – Хопфа получены модели процессов изменения состояния и их интенсивностей в символьном виде.

Разработка геоинформационной системы с сетью сейсмических станций

Назначение системы – проводить сейсмический мониторинг геодинамической активности недр разрабатываемых месторождений в реальном времени. Система состоит из ряда сеймостанций с общим количеством N , GPS-датчиков (GPS_1, \dots, GPS_N), сервера данных (рис. 2) и информационной подсистемы «ГИС – Недропользование». В свою очередь, датчики подсистемы, входящие в сеть сейсмических станций «Нефтегаз-сейсмика», подразделяются на две группы: локальную и телесеismicкую. Из группы локальной сейсмики необходимо отметить позиционирование этих датчиков по сторонам света (N-S и E-W) и глубине залегания (Z_1, \dots, Z_N).

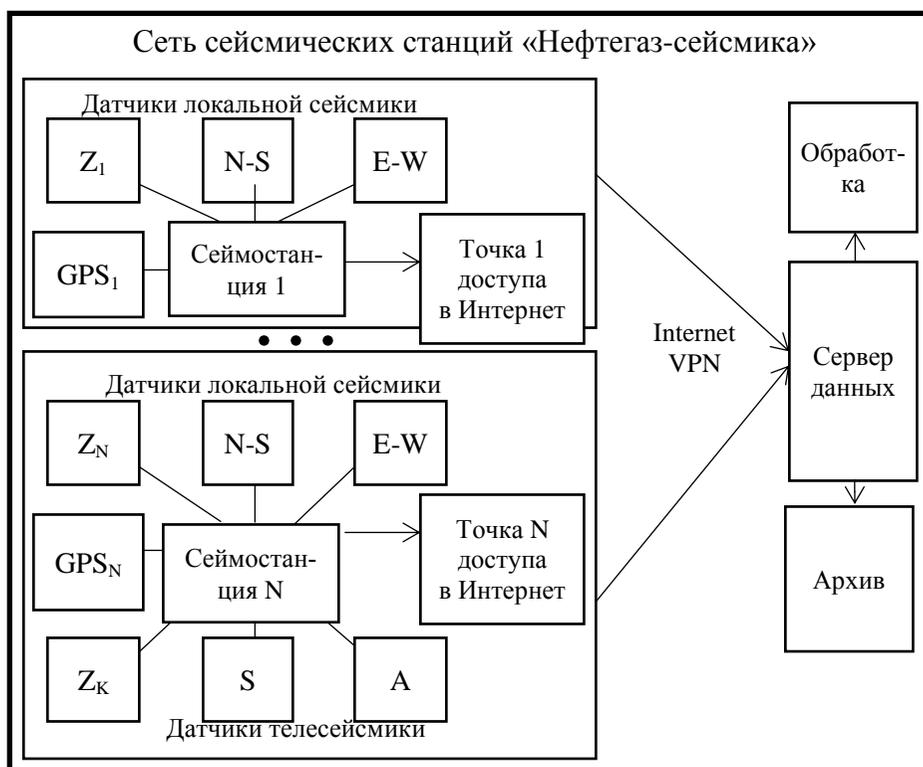


Рис. 2. Схема информационной системы «ГИС – Недропользование» с сетью сейсмических станций «Газ-сейсмика»

В группу датчиков телесеismicки введены устройства для фиксации удаленных событий в виде степени охвата недр (S) и амплитуды сигналов (A). Система интегрирована в локальную сеть Центра данных с использованием наземных и спутниковых каналов связи. Информация в каждой группе передается с помощью точек доступа в Интернет (1...N).

Основным преимуществом рассмотренной системы является гиперчувствительность к удаленным сейсмическим событиям в реальном времени. С помощью системы «ГИС – Недропользование» и сети, состоящей из восьми стационарных и двух передвижных сейсмических станций, на разрабатываемых месторождениях нефти и газа в Оренбургской области фиксируется в среднем 2–3 сейсмических события в месяц. Подавляющее большинство зафиксированных

в последнее десятилетие сейсмических событий имеют очаги на глубинах до 10 км.

Замкнутая автоматизированная система мониторинга состояния

С учетом представленной методологии и разработанного алгоритмического, математического и интеллектуального обеспечения составлена схема (рис. 3) автоматизированной системы мониторинга состояния ПТО, содержащая в прямой цепи (кроме группы однородных техногенных объектов) службу технического надзора и диагностики, а также устройство для выполнения операций по неразрушающему контролю [3]. Цепь отрицательной обратной связи, замыкающая автоматизированную систему, составлена из базы знаний и программного комплекса, выполняющего в автоматизированном режиме операции по нахождению оптимальных агрегированных моделей, выявлению по результатам аналитической идентификации в текущее и прогнозное время потенциально опасных агрегатов и формированию мониторинговой информации.

Замкнутая автоматизированная система мониторинга состояния ПТО состоит из следующих блоков:

1 – база знаний о повреждениях и аналитических моделях изменения состояния в символьном виде;

2 – построение и нахождение оптимальных агрегированных моделей;

3 – выявление по результатам аналитической идентификации потенциально опасных агрегатов;

4 – выявление по результатам прогнозирования потенциально опасных агрегатов в прогнозное время;

5 – формирование мониторинговой информации на момент последнего диагностирования для восстановления потенциально опасных агрегатов;

6 – формирование мониторинговой информации для восстановления потенциально опасных агрегатов в прогнозное время;

7 – организация, занимающаяся техническим обслуживанием и ремонтом техногенных объектов;

8 – группа однородных техногенных объектов;

9 – устройство для выполнения операций по неразрушающему контролю в автоматизированном режиме.

Основные информационные векторы, отмеченные на схеме, – многокомпонентные. Ниже дается их расшифровка:

– $Q_0(H_{кр}, h_{кр}, a_{кр}, L_{кр}, D_{кр})$ – вектор с информацией о критических или опасных повреждениях, подлежащих вырезке эксплуатирующей организацией или требующих отдельного контроля. Здесь $H_{кр}$, $h_{кр}$, $a_{кр}$, $L_{кр}$, $D_{кр}$ – критические толщины стенки в районах повреждений, критические глубины и длины повреждений, а также местоположение и количество критических повреждений;

– $Q_1(H^*, h^*, a^*, L^*, D^*)$ – вектор с той же информацией о повреждениях, за исключением критических;

– $Q_2(S_{хорт}, S_{уорт}, L, D)$ – вектор с информацией о входных и выходных агрегированных моделях для каждого участка, а также об их местоположении и количестве;

– $Q_3(S_{ор}, L_{ор}, D_{ор})$ – вектор с информацией о потенциально опасных участках в исследуемом ПТО после проведения аналитической идентификации, в частности о величине состояния $S_{ор}$, местоположении $L_{ор}$ и количестве $D_{ор}$;

– $Q_4(S_{ор-}, L_{ор-}, D_{ор-})$ – вектор с информацией о потенциально опасных

участках в исследуемом ПТО после прогнозирования, в частности о величине состояния $S_{op_}$, местоположении $L_{op_}$ и количестве $D_{op_}$;

– $Q_5(S_{v_}, L_{v_}, D_{v_})$ – вектор с информацией о вариантах восстановления состояния потенциально опасных участков в исследуемом ПТО после проведения аналитической идентификации, в частности о величине состояния S_v до и после восстановления, местоположении L_v , предназначенных для восстановления повреждений, и их количестве D_v ;

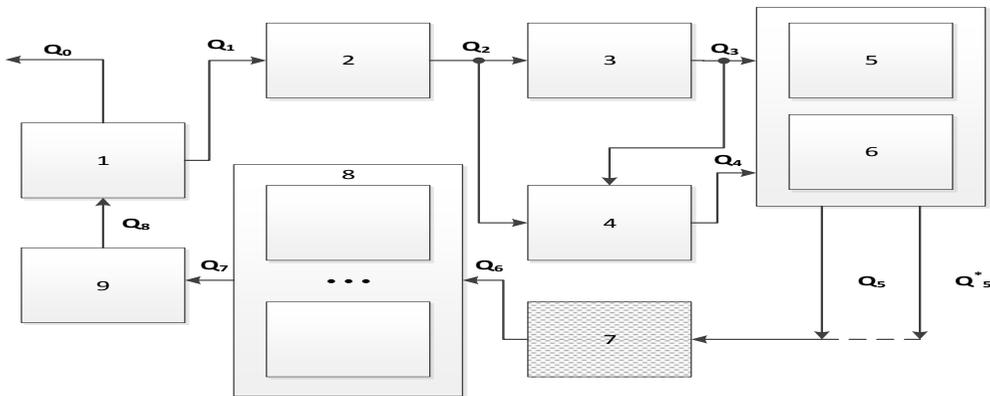


Рис. 3. Функциональная схема замкнутой автоматизированной системы мониторинга состояния природно-техногенных объектов

– $Q_6(S_{v_}, L_{v_}, D_{v_})$ – вектор с информацией о вариантах восстановления состояния потенциально опасных участков в исследуемом ПТО после проведения прогнозирования, в частности о величине состояния S_v до и после восстановления, местоположении L_v , предназначенных для восстановления повреждений, и их количестве D_v ;

– $Q_7(S_0, L_0, D_0)$ – вектор с информацией о потенциально опасных участках в исследуемом ПТО, оставшихся без восстановления в связи с ограниченными возможностями эксплуатирующей организации, в частности о величине состояния S_0 , местоположении L_0 и их количестве D_0 ;

– $Q_8(H_r, h_r, a_r, b_r, L_r, D_r)$ – вектор с информацией обо всех распознанных в результате неразрушающего контроля повреждениях внешней и внутренней поверхности металлической оболочки ПТО и их параметрах, включающих толщину стенки H_r в районе каждого повреждения, глубину h_r , длину a_r , ширину b_r , месторасположение L_r , а также их количество D_r ;

– Q_9 – вектор, поступающий на второй вход блока 7 и несущий информацию о нормативно-технических требованиях (на схеме не показан).

В целом автоматизированная система мониторинга состояния ПТО представляет собой более совершенную замкнутую систему, в которой блоки 7, 8 и 9 образуют прямую цепь, а блоки 1–6 составляют цепь обратной связи. В целом сформированная информация на выходе блоков 5 и 6 (векторы Q_5 и Q_5^*) позволяет корректировать организацию, содержание и стратегию диагностирования, а также технического обслуживания и ремонта, и тем самым существенно повысить эффективность функционирования природно-техногенных объектов.

Выводы

Анализ опубликованных сведений по мониторингу состояния объектов, сбору данных, моделированию и идентификации, управлению технологическими процессами с сосредоточенными и распределенными параметрами, Data Mining, а также патентный анализ позволяют уверенно констатировать значительную актуальность проблемы.

Предложенная декомпозиция проблемы на три этапа оптимальна, причем наиболее трудоемкий, требующий значительных информационных ресурсов второй этап позволяет получить аппроксимирующие зависимости корреляционных функций изменения состояния техногенных объектов и решить модифицированное интегральное уравнение Винера – Хопфа с нахождением соответствующих моделей изменения состояния в символьном виде.

Использованные в исследовании агрегированные модели состояния по объективным причинам значительно информативнее локальных моделей, а также обладают рядом эмерджентных свойств, из которых в первую очередь следует выделить сглаживающий эффект, позволяющий применять линейный математический аппарат в виде обыкновенных дифференциальных уравнений.

Полученные в исследовании модели процессов изменения состояния и их интенсивностей апробированы на целом ряде ПТО и, как установлено, с достаточной точностью отражают различные механизмы их повреждения.

Регистрация сейсмических событий в недрах разрабатываемых месторождений углеводородов – сложная проблема, требующая установки локальных и телесеизмических датчиков и построения автоматизированной геоинформационной системы на их основе. Разработанная система, состоящая из сети сейсмических станций «Нефтегаз-сеймика» и информационной подсистемы «ГИС – Недропользование», позволяет решить проблему на достаточно высоком научном и практическом уровне.

Девять основных информационных векторов позволяют замкнуть автоматизированную систему мониторинга техногенных объектов, а информационное наполнение векторов позволяет проследить интеллектуальное преобразование информации для реализации эффективного мониторинга состояния объектов природно-техногенного характера. Разработанная технология апробирована также при мониторинге геодинамической активности недр разрабатываемого месторождения углеводородов [14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алиев Р.А., Абдикеев Н.М., Шахназаров М.М.* Производственные системы с искусственным интеллектом. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
2. *Владов Ю.Р., Кушнарченко В.М., Владова А.Ю., Степанов Е.П. и др.* Идентификация технического состояния теплоэнергетического оборудования: монография. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 200 с.
3. *Владов Ю.Р., Владова А.Ю.* Построение и моделирование систем интеллектуального управления состоянием техногенных объектов: монография. – Оренбург: Университет, 2013. – 243 с.
4. *Владов Ю.Р.* Систематизация математических моделей при аналитической идентификации технического состояния промышленных объектов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – № 33. – С. 14–19.
5. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит, 2000. – 352 с.
6. *Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В., Владов Ю.Р.* Влияние переотраженного сигнала на точность глобальных навигационных систем в области мониторинга деформаций земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 9. – С. 143–147.

7. Основы управления технологическими процессами / А.С. Анисимов [и др.]. Под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Наука, 1978. – 440 с.
8. Оценивание параметров и состояния / П. Эйхофф; Пер. с англ. В.А. Лотоцкого, А.С. Манделя; под ред. Н.С. Райбмана. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
9. Пащенко Ф.Ф. Введение в состоятельные методы моделирования систем. В 2 ч. Ч. 2. Идентификация нелинейных систем. – М.: Финансы и Статистика, 2007. – 288 с.
10. Райбман Н.С., Чадаев В.М. Построение моделей процессов производства. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.
11. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. – М.: Высш. шк., 2005. – 291 с.
12. Растрюгин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
13. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
14. Патент RU 2575469, 2575469, МПК G01V 9/00; G01V 1/28 (2006.01). Способ определения геодинамической активности недр разрабатываемого месторождения углеводородов / М.Ю. Нестеренко, Ю.М. Нестеренко, Ю.П. Владов, А.Ю. Владова (РФ). – № 2014145515/28; заявл. 12.11.2014; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5. – 14 с.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

MONITORING THE STATE OF NATURAL AND MAN-MADE OBJECTS WITH A CLOSED AUTOMATED SYSTEM

Y.R. Vladov, M.Y. Nesterenko, V.V. Vlatsky

Orenburg Scientific Centre of UrB RAS
11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russian Federation

Monitoring natural and industrial objects is one of the most actual scientific and practical problems. The article presents the developed methodology for monitoring of natural-technogenic objects with a closed automated system. A decomposition of the problem involves finding: optimal aggregation and analytical models of changes in the state, as well as models of the formation of the monitoring information. The GIS that includes a network of seismic stations is developed. The structural basis for a closed automated system monitoring software modules make finding relevant models of the state of natural and man-made objects, including models of formation of monitoring information. With its use of established significant (over 10%), improving the functioning and use of natural and man-made objects.

Keywords: condition monitoring, GIS technology, closed automated system, natural and man-made objects.

*Yury R. Vladov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Head of Laboratory.
Maksim Y. Nesterenko (Dr. Sci. (Geologo-Mineralogical), Professor, Head of Laboratory.
Valery V. Vlatsky, Senior Research.*

УДК 004.312.24

ФОРМИРОВАНИЕ ОЧЕРЕДЕЙ В ПАКЕТНЫХ СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Б.Я. Лихтциндер, Л.Б. Иванова

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Россия, 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23

E-mail: lixt@psati.ru

Рассматриваются системы массового обслуживания (СМО) с пачечными потоками заявок, характерными для современных мультисервисных сетей связи. Приведено обобщение формулы Хинчина – Поллячека на системы с потоками общего вида. Рассмотрены зависимости средних значений размера очереди от загрузки, при малых загрузках системы. Вводится понятие условного среднего значения размера очереди, при условии отсутствия интервалов простоя процессора.

Ключевые слова: системы массового обслуживания (СМО), пачечные потоки, размеры очередей, мультисервисные сети, условное среднее, максимальное значение очередей, коэффициент загрузки.

Введение

Процесс формирования очередей заявок в СМО подробно и широко рассмотрен в литературе [1, 4].

Формирование очередей в СМО с пакетным пачечным трафиком рассмотрено нами в [2]. Анализ проводился для стационарных потоков интервальными методами, основанными на определении чисел заявок (пакетов), поступающих в систему, в течение интервала времени τ обработки одной заявки [2, 3].

В этих работах показано, что среднее значение размера очередей для однопоточных СМО определяется величиной коэффициента загрузки чисел заявок $\rho = \lambda \tau$ и дисперсией $D_n(\rho)$ чисел заявок $n_i(\tau)$, поступающих в течение интервала τ , соответствующего данному коэффициенту загрузки ρ . Здесь λ – средняя интенсивность потока заявок. Показано, что среднее число заявок $\overline{n(\tau)}$ всегда равно коэффициенту загрузки ρ . Получено обобщение формулы Хинчина – Поллячека [2, 5, 6]:

$$\overline{q(\rho)} = \frac{D_n(\rho) + 2 \sum_{j=1}^K C_{0j} v[n_j(\rho); n_{i-j}(\rho)] - \rho(1 - \rho)}{2(1 - \rho)} = \frac{\Phi_n(\rho)\rho}{2(1 - \rho)}, \quad (1)$$

где $\overline{q(\rho)}$ – среднее значение длины очереди, определенное на всем промежутке времени наблюдения, с учетом интервалов времени простоя процессора;

$D_n(\rho)$ – дисперсия чисел заявок на интервале обслуживания τ , соответ-

Борис Яковлевич Лихтциндер (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Мультисервисные системы и информационная безопасность».

Людмила Борисовна Иванова (к.т.н., доцент.), доцент кафедры «Экономика и организация производства».

ствующем коэффициенту загрузки $\rho = \lambda \tau$; $Cov[n_i(\rho); n_{i-j}(\rho)]$ – коэффициент ковариации и $n_{i-j}(\rho)$; K – интервал корреляции.

Потоки пакетов трафика современных мультисервисных сетей доступа носят явно выраженный пачечный характер [2]. Поэтому существует весьма значительное число временных интервалов, в течение которых заявки не поступают.

На рис. 1, а показаны количества пакетов видеотрафика, поступающих в течение постоянных интервалов времени τ , которые соответствуют различным значениям коэффициентов загрузки.

ρ ($\rho = 0,1$ – черные линии, $\rho = 0,7$ – серые линии).

На рис. 1, б показан фрагмент этого же трафика в увеличенном масштабе времени. В качестве единицы времени здесь выбран постоянный интервал τ времени обработки одной заявки.

На рис. 2, а показан процесс образования очередей в потоке пакетов рассмотренного видеотрафика при различных значениях коэффициентов загрузки ρ ($\rho = 0,1$ – черные линии, $\rho = 0,7$ – серые линии). На рис. 2, б показан фрагмент этого же трафика в увеличенном масштабе времени.

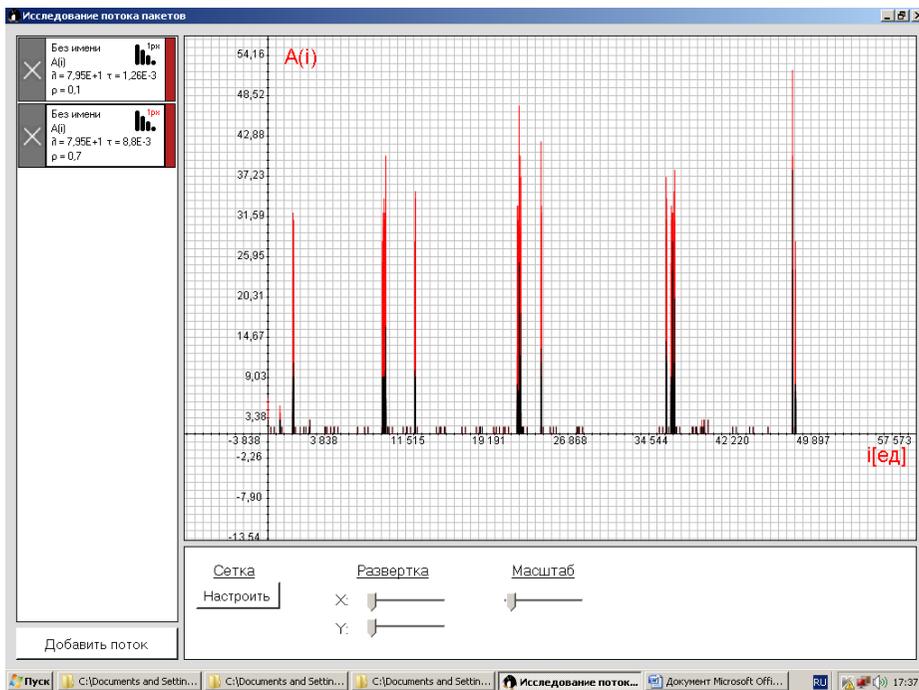


Рис. 1, а. Количества пакетов видеотрафика, поступающих в течение постоянных интервалов времени τ

Из графиков следует, что в периоды активного поступления пакетов очереди быстро возрастают. При малых значениях коэффициента загрузки (интервал времени обработки τ мал) очередь быстро уменьшается, достигает нулевого значения, и все остальное время процессор простаивает. При большой загрузке (интервал времени обработки τ велик) очередь уменьшается медленно и процессор простаивает меньше.

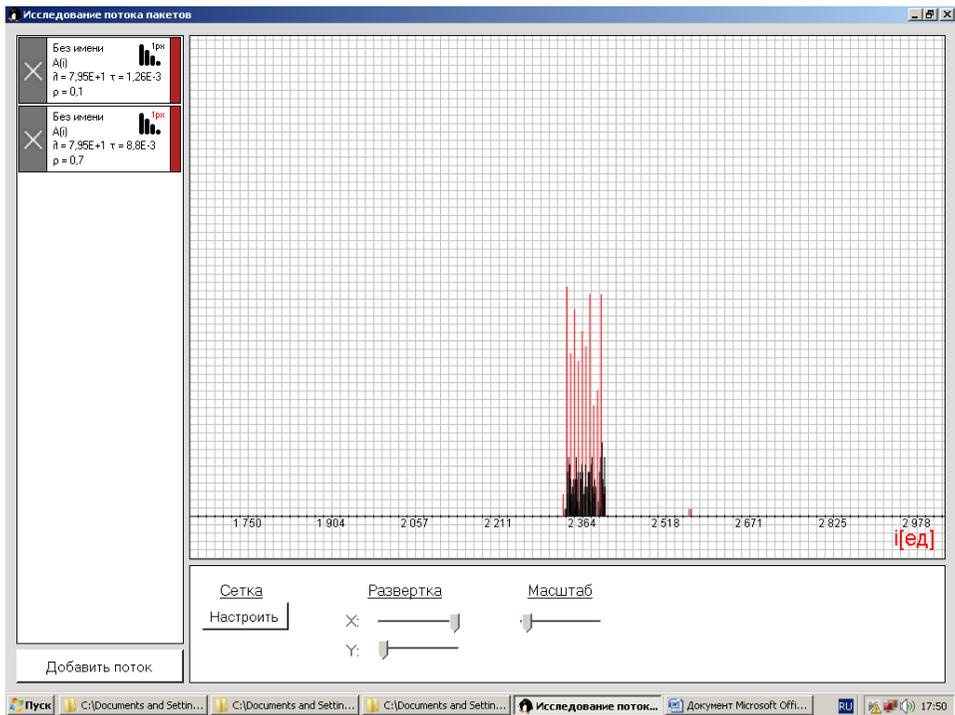


Рис. 1, б. Фрагмент количества пакетов видеотрафика, поступающих в течение постоянных интервалов времени τ (масштаб времени увеличен)

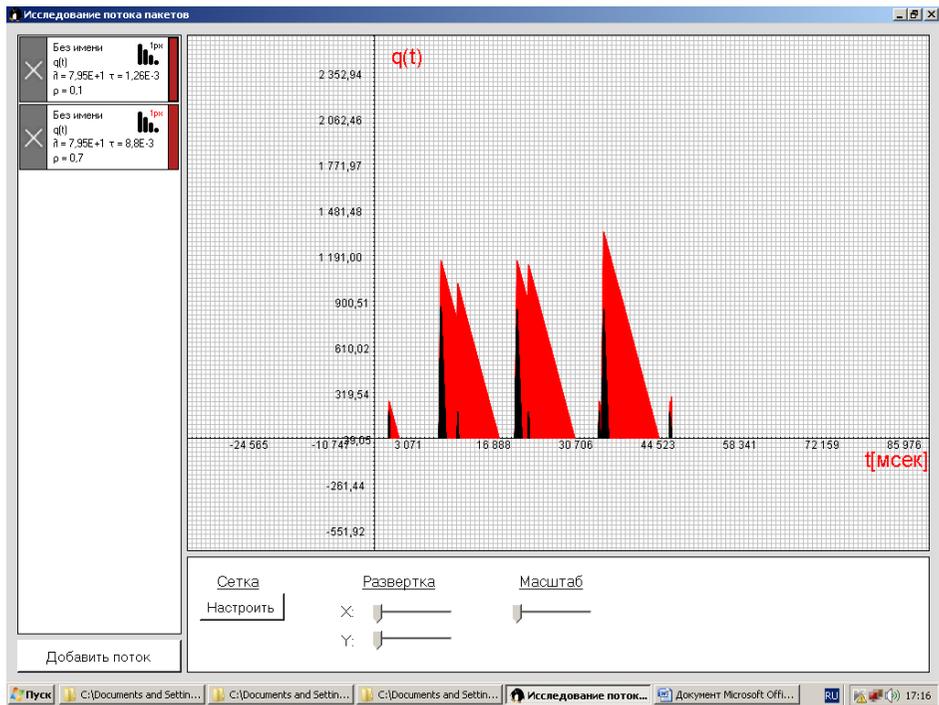


Рис. 2, а. Образование очередей в потоке пакетов реального видеотрафика

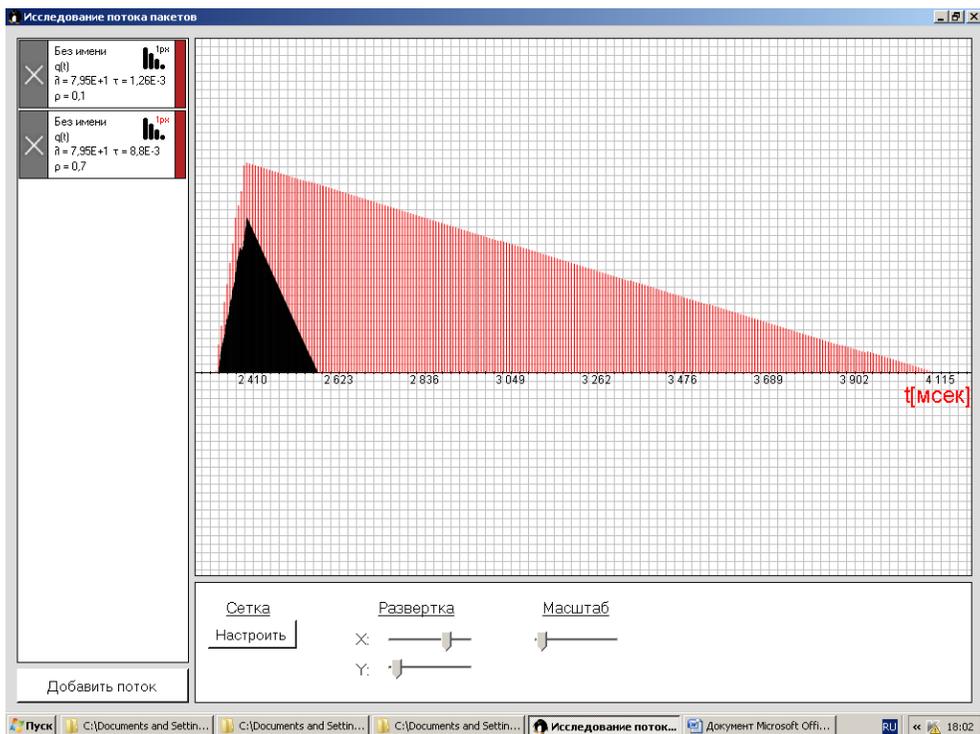


Рис. 2, б. Фрагмент образования очередей в потоке пакетов реального видеотрафика (масштаб времени увеличен)

Очевидно, что при малых нагрузках средние значения чисел заявок в очереди $q(\rho)$ весьма малы. Из рис. 2, б видно, что даже при весьма значительных нагрузках график изменения очереди имеет треугольную форму.

Процесс формирования очереди можно разделить на три этапа: этап нарастания, этап уменьшения и этап полного отсутствия очереди, когда процессор простаивает.

Формирование очереди

На рис. 3 приведен график формирования очереди при пачечном потоке.

В рассматриваемом примере показаны пакеты, поступающие в период цикла T_c в течение промежутка времени T_{pi} , пачками, размером $N_{pi} = 12$, с максимальной интенсивностью $\lambda_{max} = \frac{1}{\Delta T}$ (этап нарастания очереди).

Примем, что на всем интервале времени наблюдения максимальная интенсивность λ_{max} поступления пакетов (заявок) и время τ обработки одной заявки остаются постоянными.

В течение времени обработки τ в систему каждый раз поступает $n(\tau) = \lambda_{max} \tau$ заявок (в рассматриваемом примере – три заявки). Примем, что на промежутке времени T_{pi} укладывается целое число k_i интервалов τ (в рассматриваемом примере – 4 интервала):

$$k_i = \frac{T_{pi}}{\tau} = \frac{N_{pi}}{n(\tau)} = 4.$$

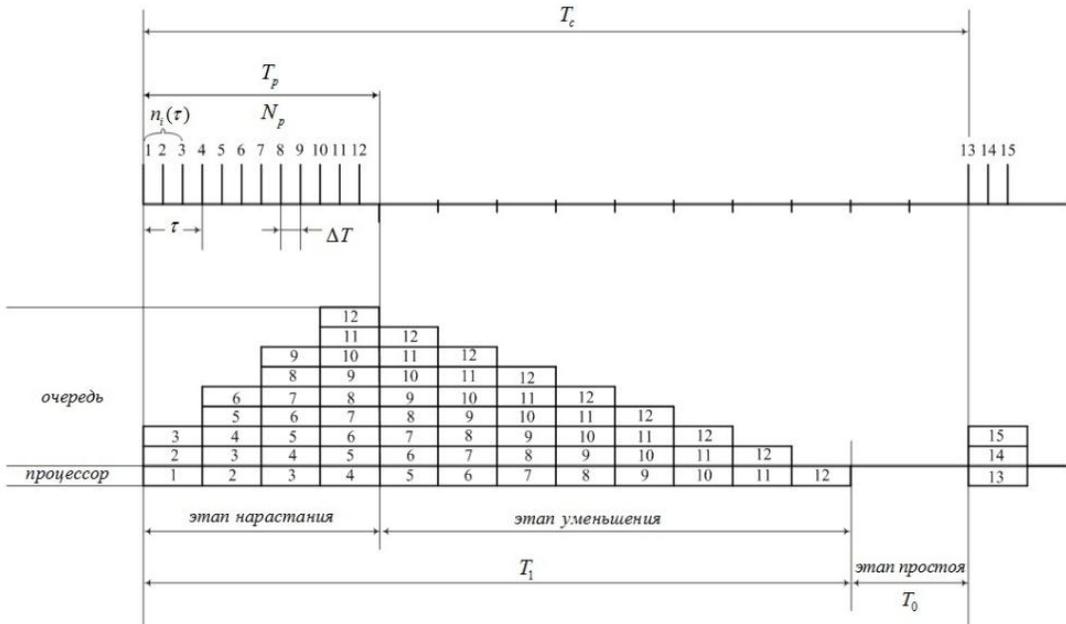


Рис. 3. График формирования очереди при пачечном потоке

На этапе уменьшения в течение каждого интервала времени τ происходит убывание очереди на одну заявку. Длительность этапа простоя T_0 определяется принятым периодом T_c , после окончания которого в систему поступает очередная пачка заявок.

Обозначим максимальный размер очереди, образованной i -й пачкой заявок, $h_{\max i}(\tau)$ (на рис. 3 показана одна пачка).

Нетрудно доказать, что максимальный размер определяется соотношением

$$h_{\max i}(\tau) = N_{pi} \frac{n(\tau) - 1}{n(\tau)} = N_{pi} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau}\right) = 8. \quad (2)$$

На рис. 2, б хорошо заметно, что с увеличением нагрузки увеличивается максимальное значение очереди. Естественно, что эта формула имеет ограничение $n(\tau) > 1$, что соответствует $\lambda_{\max} \tau > 1$. В противном случае в течение интервала обслуживания τ будет поступать не более одной заявки и очередь отсутствует.

Нетрудно показать, что в случае появления одной пачки заявок в течение цикла T_c общее число заявок, которые находились в очередях (суммарная площадь треугольника),

$$S_i(\tau) = \frac{1}{2} N_{pi}^2 \frac{n(\tau) - 1}{n(\tau)} = 48.$$

Если предположить, что в течение каждого из циклов появляется несколько пачек, но каждая из последующих пачек появляется после окончания обработки всех заявок предыдущей пачки, и размеры пачек взаимно независимы, то общее

число заявок, находившихся в очередях в течение всего периода наблюдения T , определяется соотношением

$$S(\tau) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau}\right) \cdot \sum_{i=1}^K N_{pi}^2,$$

где K – общее число пачек на всем периоде наблюдения (в рассматриваемом примере $K = 1$ и $S(\tau) = 48$)).

Среднемаксимальное значение очереди

Введем в рассмотрение понятие «среднемаксимальное значение» очередей $\overline{h_{\max}(\tau)}$ (среднее из всех максимальных значений). Обозначим также среднее число заявок в пачке через $\overline{N_p}$:

$$\overline{N_p} = \frac{\sum_{i=1}^K N_{pi}}{K}.$$

Поскольку каждой пачке заявок соответствует максимальное значение $\overline{h_{\max}(\tau)}$, определяемое соотношением (2), а всего на интервале рассмотрения имеется K пачек, то

$$\overline{h_{\max}(\tau)} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K h_{\max i}(\tau) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K N_{pi} \cdot \frac{n(\tau) - 1}{n(\tau)} = \overline{N_p} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau}\right). \quad (3)$$

Введем понятие условного среднего значения размера очереди $\overline{Q(\tau)}$, которое представляет среднее значение очереди на каждом из интервалов τ , соответствующем условию активной загрузки процессора (процессор не простаивает):

$$\overline{Q(\tau)} = \frac{S(\tau)}{\sum_{i=1}^K N_{pi}} = \frac{\sum_{i=1}^K N_{pi}^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau}\right)}{2 \sum_{i=1}^K N_{pi}} = \frac{\overline{N_p}^2}{2 \overline{N_p}} \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau}\right), \quad (4)$$

где $\overline{N_p}^2$ – второй начальный момент чисел заявок в пачках (в рассматриваемом примере $K = 1$ и $\overline{Q(\tau)} = 4$)).

Сравнивая (3) и (4), получаем зависимость

$$\overline{h_{\max}(\tau)} = 2 \overline{Q(\tau)} \frac{\overline{N_p}^2}{N_p^2} = \frac{2 \overline{Q(\tau)}}{(1 + \nu_{N_p}^2)}, \quad (5)$$

где $\nu_{N_p}^2$ – коэффициент вариации чисел заявок и пачках.

Если все пачки одинаковые ($\nu_{N_p}^2 = 0$), то $\overline{h_{\max}(\tau)}$ имеют наибольшее значение $\overline{h_{\max}(\tau)} = 2 \overline{Q(\tau)}$.

Подставляя из (4) в (5), получим

$$\overline{h_{\max}(\tau)} = \overline{N_p} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau}\right) = \overline{N_p} \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\max} \rho}\right), \text{ при } \rho > \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}.$$

Подобный результат не является неожиданным, поскольку случайные величины $h_{\max i}(\tau)$ и N_{pi} в (2) отличаются только постоянным коэффициентом $(1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau})$.

Среднее число заявок $\overline{q(\rho)}$, находящихся в очереди, с учетом наличия интервалов простоя процессора:

$$\overline{q(\rho)} = \overline{Q(\rho)} \cdot \rho = \frac{\overline{N_p^2}}{2N_p} (1 - \frac{1}{\lambda_{\max} \tau}) \rho = \frac{1}{2} \overline{h_{\max}(\rho)} \cdot (1 + v_{N_p}^2) \rho.$$

Указанные соотношения определяют среднее значение очереди при условии, что очередная пачка не может появиться до окончания обработки предыдущей пачки.

Однако это условие выполняется далеко не всегда.

На рис. 2, а видно, что при коэффициенте загрузки $\rho = 0,7$ происходит наложение очередей от соседних пачек.

В работах [2, 3] показано, что расположение взаимно независимых пачек не оказывает влияния на числитель формулы (1), а учитывается изменением коэффициента загрузки ρ в знаменателе. Таким образом, с учетом возможного наложения обобщенная формула для определения средних значений очередей в одноприборных СМО с рассмотренными пачечными потоками примет вид

$$\overline{q(\rho)} = \frac{\overline{N_p^2}}{N_p} \cdot \frac{(\rho - \frac{\lambda}{\lambda_{\max}})}{2(1-\rho)} = \frac{\overline{h_{\max}(\rho)} \cdot (1 + v_{N_p}^2) \rho}{2(1-\rho)}. \quad (6)$$

При этом

$$\overline{Q(\rho)} = \frac{\overline{N_p^2}}{N_p} \cdot \frac{(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\max} \rho})}{2(1-\rho)} = \frac{\overline{h_{\max}(\rho)} \cdot (1 + v_{N_p}^2)}{2(1-\rho)}. \quad (7)$$

На рис. 4 для рассмотренного выше видеотрафика показаны количества пакетов, поступающих в течение постоянных интервалов времени τ , которые соответствуют коэффициенту загрузки $\rho = 0,1$ (черные линии).

Для сравнения здесь же показаны количества пакетов пуассоновского потока, полученные при той же загрузке (серые линии).

Из рис. 4 следует, что по сравнению с видеотрафиком пуассоновский поток носит весьма равномерный характер.

Для пуассоновского потока при постоянном времени обслуживания условное среднее значение очереди $\overline{Q(\rho)}$ определяются на основании известной формулы Хинчина – Поллячека [4]:

$$\overline{Q(\rho)} = \frac{\overline{q(\rho)}}{\rho} = \frac{\rho}{2(1-\rho)}.$$

Анализ показывает, что абсолютная разница среднего и условного среднего значений, полученных по этим формулам для пуассоновских потоков, не превышает 0,25 заявки. Для потока видеотрафика указанная разница становится весьма значительной. На рис. 5 для рассмотренного выше реального видеотрафика пока-

зана зависимость $\overline{q(\rho)}$ в диапазоне изменения коэффициента загрузки ρ от 0 до 0,05.

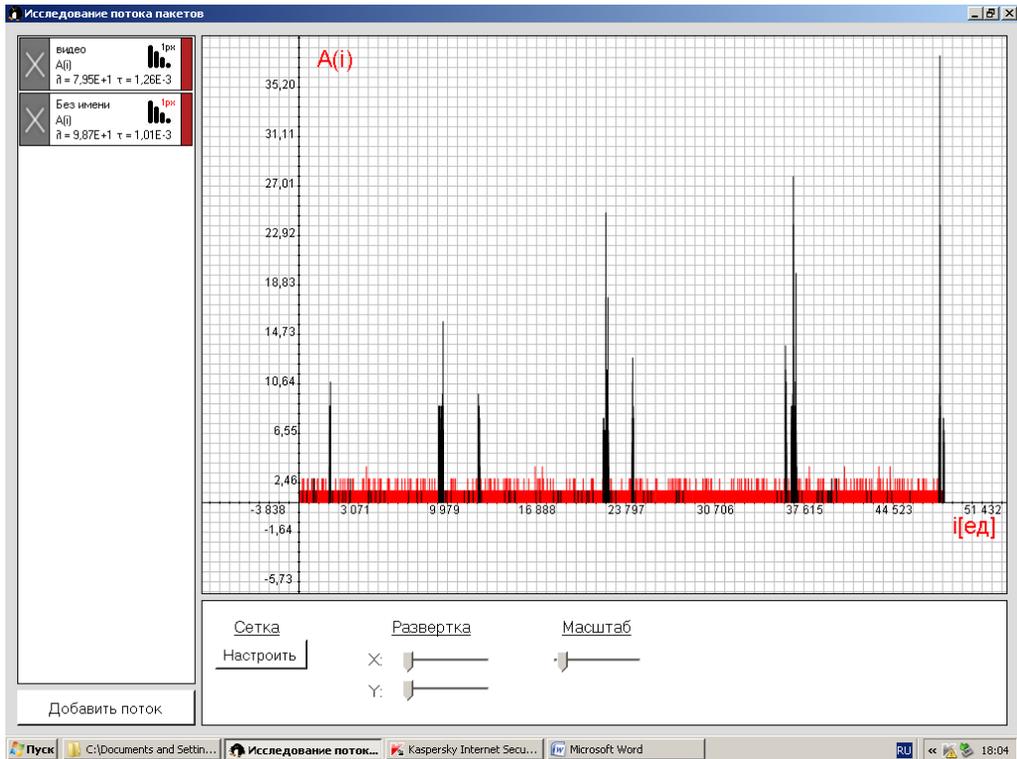


Рис. 4. Количества пакетов, поступающих в течение интервалов времени τ , которые соответствуют коэффициенту загрузки $\rho = 0,1$, для видеотрафика и пуассоновского потока

Из графика следует, что коэффициент загрузки $\rho = 0,031$ соответствует среднему значению очереди $\overline{q(\rho)} = 1,004$ (показано в верхней части рисунка). Условное среднее число пакетов в очереди при этом составляет $\overline{Q(\rho)} = 32,2$. Среднее от максимальных значений очередей $\overline{h_{\max}(\tau)}$, определенное соотношением (5), почти в 60 раз превышает среднее значение очереди $\overline{q(\rho)}$. Таким образом, среднее значение плохо отражает реальное состояние очередей; для характеристики размеров очередей следует ориентироваться на условные средние значения чисел пакетов в очереди $\overline{Q(\rho)}$.

На рис. 6 для рассмотренного выше реального видеотрафика показана зависимость $\overline{Q(\rho)}$ в диапазоне изменения коэффициента загрузки ρ от 0 до 0,05.

Так как согласно (7) при малых значениях ρ

$$\overline{Q(\rho)} \approx \overline{h_{\max}(\rho)} \cdot \frac{(1 + v_{N_p}^2)}{2},$$

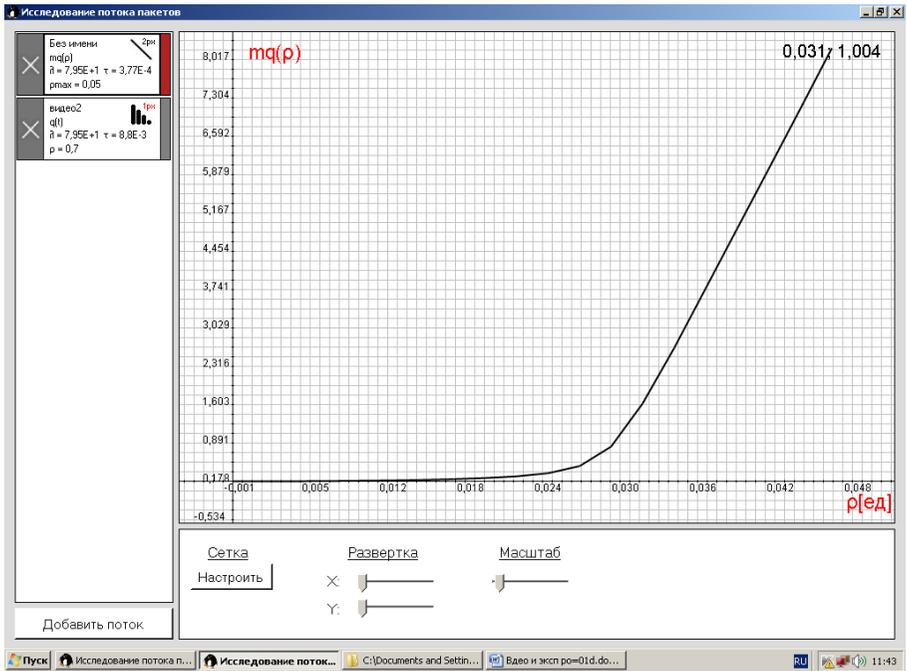


Рис. 5. Зависимость $\overline{mq}(\rho)$ для реального видеотрафика в диапазоне изменения коэффициента загрузки ρ от 0 до 0,05

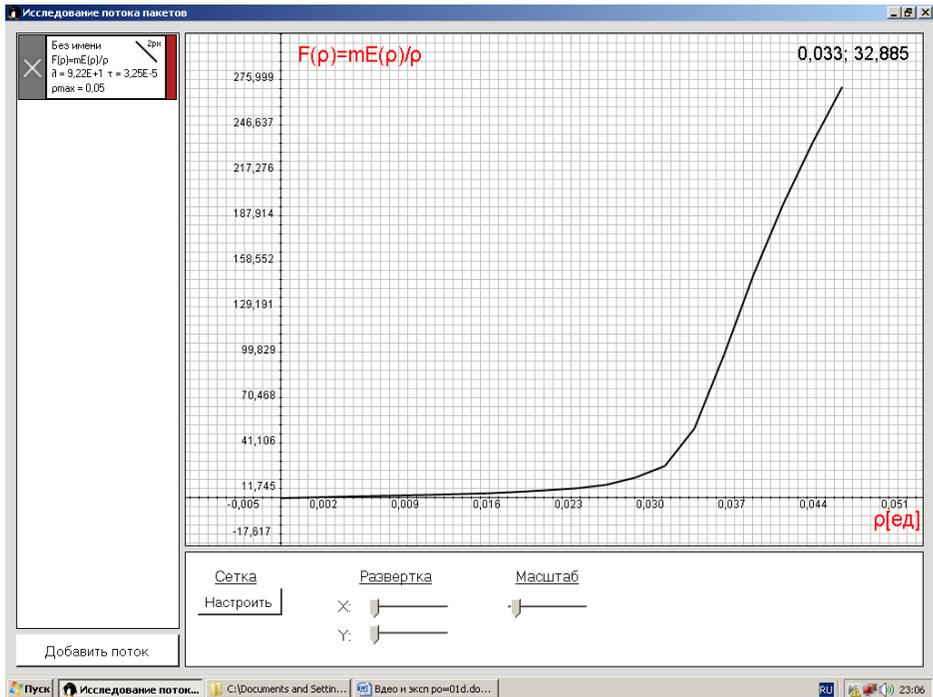


Рис. 6. Зависимость $\overline{Q}(\rho)$ в диапазоне изменения коэффициента загрузки ρ от 0 до 0,05

для трафика с экспоненциальным распределением длительностей пачек ($\nu_{N_p}^2 = 1$) при малой нагрузке $\overline{h_{\max}}(\rho) \approx \overline{Q}(\rho)$.

Таким образом, условное среднее число пакетов $Q(\rho)$ полностью определяет среднее от максимальных значений размеров очереди.

Заключение

Для СМО с пачечными потоками среднее значение очереди с учетом интервалов простоя процессора плохо отражает реальную картину размера очередей и не может непосредственно использоваться для определения размеров буферной памяти. Условное среднее число пакетов $Q(\rho)$ более чем в 30 раз превышает среднее значение и полностью характеризует максимальные значения размеров очередей, которые и определяют требуемые предельные значения объема буферной памяти.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов С.Н. Теория телетрафика. Концепции, модели, приложения. – М.: Горячая линия Телеком, 2015. – 808 с.: ил.
2. Лихтциндер Б.Я. Интервальный метод анализа трафика мультисервисных сетей // Приложение к журналу ИКТ Модели инфокоммуникационных систем: разработка и применение. – Вып. 8. – Самара, 2011. – С. 101–152.
3. Лихтциндер Б.Я. Интервальный метод анализа трафика мультисервисных сетей доступа. – Самара: ПГУТИ, 2015. – 121 с.: ил.
4. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Т. 2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1979.
5. Лихтциндер Б.Я. О некоторых обобщениях формулы Хинчина – Поллячека // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – Т. 5. – № 4. – С. 253–258.
6. Лихтциндер Б.Я. Интервальный метод анализа мультисервисного трафика сетей доступа // Электросвязь. – 2015. – № 12. – С. 52–54.

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2016 г.

QUEUES MODELING IN BATCH QUEUING SYSTEMS (QMS)

B.Ya. Lichtcinder, L.B. Ivanova

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, Lev Tolstoy st., Samara, 443010, Russian Federation

The paper describes queuing systems with batch request flows typical for modern multiservice telecommunication networks. It contains generalization of Pollaczek-Khinchin formula for systems with common type flows. The dependences of queues average value at low duty ratio are examined. Full absence of any queues because of a minimal time interval between nearby requests takes place. The term of conditional average queue size that is an average value with the absence of processor downtime intervals is given.

Keywords: conceptual model, resources, elements, links, corporative development.

Boris Ya. Lichtcinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Lyudmila B. Ivanova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

УДК 681.5

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ЗАДАЧАХ С ДВУМЯ ТРЕБОВАНИЯМИ К КОНЕЧНОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ СОСТОЯНИЮ ОБЪЕКТА**Э.Я. Рапопорт, А.В. Капустина**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: rapoport@samgtu.ru; alenakapustina@outlook.com

Рассматривается задача оптимального по быстрдействию управления процессом индукционного нагрева металлических полуфабрикатов перед операциями пластического формоизменения в условиях, предусматривающих как возможность передачи нагретых изделий к деформирующему оборудованию непосредственно после достижения требуемого конечного температурного состояния, так и необходимость перехода к промежуточной стадии его термостатирования в зависимости от реализуемого режима работы технологического комплекса «нагрев-обработка давлением». Предлагается постановка и метод решения соответствующей задачи оптимального быстрдействия с двумя одновременно предъявляемыми требованиями к конечным температурным кондициям нагреваемых заготовок, отвечающим обоим заранее неизвестным вариантам организации режимов работы нагреваемой установки. Приводятся полученные результаты и их анализ для исследуемых моделей процесса индукционного нагрева.

Ключевые слова: оптимальное управление, индукционный нагрев, альтернативный метод, термостатирование, ограничения на конечное состояние объекта.

В реальных производственных условиях наряду с требуемой точностью приближения управляемой величины объекта с распределенными параметрами к заданному эталону в конце оптимального процесса может потребоваться учет дополнительного ограничения на ошибку отклонения от желаемого стационарного состояния объекта при использовании последующей стадии его стабилизации [1]. Например, вполне возможны нарушения непрерывности производственного цикла в технологическом комплексе «нагрев-обработка давлением» (перерыв в работе деформирующего оборудования, отсутствие необходимости дальнейшего выпуска продукции технологического комплекса определенной номенклатуры в рассматриваемый момент времени, возникновение нештатных ситуаций и др.). В таких ситуациях возникает необходимость сохранения достигнутого в нагревательной установке температурного состояния в течение некоторого заранее неизвестного промежутка времени и обеспечения на протяжении указанного перерыва возможности последующей передачи заготовок для операций пластического деформирования в любой требуемый момент возобновления процесса работы комплекса.

Эдгар Яковлевич Рапопорт (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Алена Валерьевна Капустина, магистрант.

Постановка задачи оптимального управления

В качестве объекта управления в настоящей работе рассматривается технологический процесс индукционного нагрева металлического изделия цилиндрической формы перед обработкой давлением, описываемый одномерным неоднородным дифференциальным уравнением теплопроводности в частных производных параболического типа с краевыми условиями третьего рода [2, 3].

Температурное поле $Q_1(x_1, x_2, t)$ заготовки цилиндрической формы в пренебрежении на стадии нагрева неравномерностью температурного распределения в осевом направлении x_2 описывается в зависимости от радиальной координаты x_1 и времени t в любой точке x_2 решением $Q_1(x_1, t)$ линейного одномерного неоднородного уравнения теплопроводности в относительных единицах следующего вида [2]:

$$\frac{\partial Q_1(x_1, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 Q_1(x_1, t)}{\partial x_1^2} + \frac{1}{x_1} \frac{\partial Q_1(x_1, t)}{\partial x_1} + W(x_1)u_1(t), \quad 0 < t < t^*, 0 < x_1 < 1; \quad (1)$$

$$Q_1(x_1, 0) = Q_0 = \text{const}, \quad 0 \leq x_1 \leq 1; \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_1(0, t)}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial Q_1(1, t)}{\partial x_1} + \beta Q_1(1, t) = 0. \quad (3)$$

Здесь $W(x_1)$ – функция радиального распределения электромагнитных внутренних источников тепла; $u_1(t)$ – суммарная удельная мощность внутреннего тепловыделения, рассматриваемая в качестве управляющего воздействия с ограничением:

$$0 \leq u_1(t) \leq 1, 0 < t \leq t^*; \quad (4)$$

коэффициент $\beta = \text{const} > 0$ определяет уровень тепловых потерь в окружающую среду.

Функция распределения по радиусу источников тепла $W(x_1)$ определяется выражением:

$$W(\xi, x_1) = \xi \frac{\text{ber}'^2(\xi x_1) + \text{bei}'^2(\xi x_1)}{\text{ber}\xi \text{ber}'\xi + \text{bei}\xi \text{bei}'\xi}, \quad (5)$$

где ber , bei , ber' , bei' – функции Кельвина и их первые производные; ξ – характерный параметр:

$$\xi = \frac{R\sqrt{2}}{\delta}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}. \quad (6)$$

Здесь R – радиус цилиндрической заготовки; δ – глубина проникновения тока в металл; ω – частота питающего тока; σ – электропроводность нагреваемого материала; μ – абсолютная магнитная проницаемость.

Характерные требования технологии индукционного нагрева сводятся к обеспечению равномерного нагрева заготовок до заданной температуры $Q_1^{**} = \text{const}$.

К результирующему температурному полю оптимального процесса $Q_1(x_1, t^*)$ в момент $t = t^*$ окончания процесса нагрева, как правило, предъявляется требова-

ние равномерного приближения к желаемому конечному распределению температур с заданной точностью ε_1 [2]:

$$\max_{x_1 \in [0,1]} |Q_1(x_1, t^*) - Q_1^{**}| \leq \varepsilon_1, \quad (7)$$

Пусть далее предусматривается возможность перехода к последующей стадии термостатирования достигнутого в процессе нагрева температурного состояния $Q_1(x_1, t^*)$ в стационарном режиме работы нагревательной установки [1].

Температурное поле $Q_1(x_1, x_2)$ на стадии термостатирования описывается в пренебрежении неравномерностью радиального распределения температур в зависимости от осевой координаты x_2 по длине цилиндра в любой точке x_1 по радиусу цилиндра решением линейного одномерного неоднородного уравнения стационарной теплопроводности в относительных единицах с краевыми условиями второго рода [1]:

$$\frac{d^2 Q_2(x_2)}{dx_2^2} + u_2(x_2) - g_0 = 0, \quad 0 \leq x_2 \leq 1, \quad (8)$$

$$\frac{dQ_2(0)}{dx_2} = u_0; \quad \frac{dQ_2(1)}{dx_2} = 0. \quad (9)$$

Здесь $u_2(x_2)$ - распределенное по длине цилиндра управляющее воздействие по мощности нагрева в режиме термостатирования с ограничением:

$$0 \leq u_2(x_2) \leq u_{2\max}; \quad (10)$$

значения $g_0, u_0 = \text{const} > 0$ определяют тепловые потери с боковой и торцевой поверхностей цилиндра соответственно.

Рассматриваемый объект (8)-(9) неуправляем относительно желаемого состояния $Q_2^{**}(x_2) = Q_1^{**} = \text{const}$ [1], и в связи с этим возникает задача минимизации ошибки равномерного приближения $Q_2(x_2)$ к Q_1^{**} путем выбора управления $u_2(x_2)$ в (10) [1].

Как показано в [1], решение этой задачи зависит от числа интервалов постоянства оптимального по выбранному критерию управления $u_2^*(x_2)$ кусочно-постоянной структуры, попеременно принимающего только свои предельно допустимые значения в (10). Далее рассматривается случай одноинтервального управления $u_2(x_2) = u_{2\max}$, $x_2 \in [0,1]$ с равномерно распределенной мощностью термостатирования по длине индуктора при наиболее просто реализуемой конструкции термостата, которому отвечает известное стационарное температурное состояние $Q_2^{**}(x_2)$ с минимально возможным в классе таких управляющих воздействий отклонением от Q_1^{**} в равномерной метрике [1] (Рисунок 1):

$$Q_2^{**}(x_2) - Q_1^{**} = u_0 \left(x_2 - \frac{x_2^2}{2} - \frac{1}{4} \right). \quad (11)$$

В таком случае вместе с требованием (7), предусматривающим возможность передачи изделия на последующую обработку давлением непосредственно по окончанию процесса нагрева, требуется выполнить подобное (7) условие равномерного приближения $Q_1(x_1, t^*)$ к $Q_2^{**}(x_2)$ с требуемой точностью ε_1 при необходимости перехода к режиму термостатирования:

$$\max_{x_1, x_2 \in [0,1]} |Q_1(x_1, t^*) - Q_2^{**}(x_2)| \leq \varepsilon_2. \quad (12)$$

В итоге может быть сформулирована следующая задача оптимального быстрогодействия. Необходимо определить стесненное ограничением (4) управляющее воздействие $u_1^*(t)$, которое переводит объект (1)-(3) из заданного начального состояния (2) в требуемое конечное согласно двум условиям (7), (12) за минимально возможное время $t^* = t_{\min}^*$.

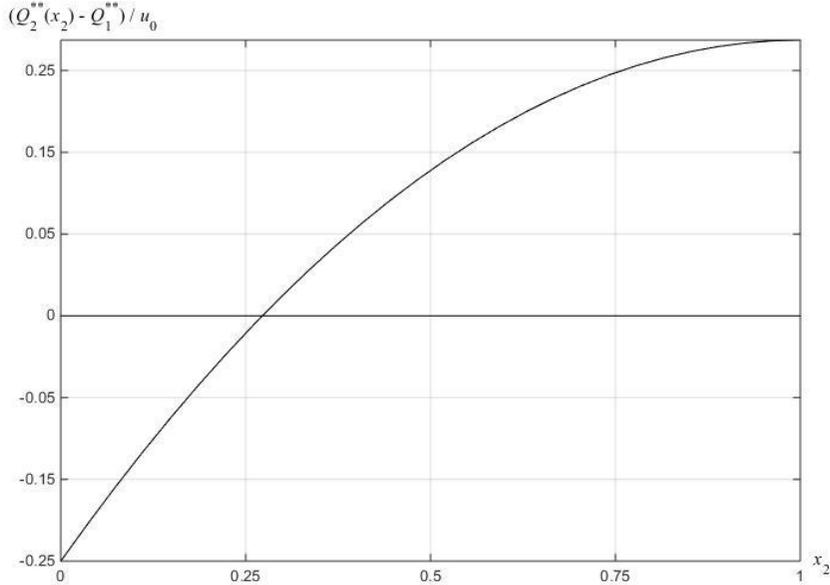


Рис. 1. Температурное распределение по длине цилиндра в режиме термостатирования

Редукция к специальной задаче математического программирования

Стандартная процедура принципа максимума определяет оптимальное по быстродействию управление $u_1^*(t)$ в форме релейной функции времени, попеременно принимающей только свои предельно допустимые значения согласно (4) заранее заданной с точностью до числа N и длительностей $\Delta_i, i = \overline{1, N}$, интервалов своего постоянства [2-4]:

$$u_1^*(t) = \frac{1}{2} \left[1 + (-1)^{j+1} \right]; \sum_{i=0}^{j-1} \Delta_i < t < \sum_{i=0}^j \Delta_i; j = \overline{1, N}; \Delta_0 = 0. \quad (13)$$

При равномерном начальном распределении температур $Q_1(x_1, 0) = Q_0 = \text{const}$, совпадающим с постоянной температурой окружающей среды, решение уравнений (1)-(3) модели объекта с управлением вида (13) в конечный момент времени t^* принимает следующий вид [2-4]:

$$Q(x_1, t^*) = Q(x_1, \Delta) = Q_0 + \sum_{m=1}^N (-1)^{m+1} \Lambda \left(x_1, \sum_{i=m}^N \Delta_i \right); \Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}. \quad (14)$$

Здесь $\Lambda \left(x_1, \sum_{i=m}^N \Delta_i \right)$ – определяемая известными выражениями температура в

точке x_1 в момент времени $t = \sum_{i=m}^N \Delta_i$ при $Q_0 = 0$ и постоянной максимальной мощности нагрева, т.е. при управлении $u_1(t) \equiv 1$.

В таком случае в роли критерия оптимальности выступает сумма длительностей интервалов постоянства $u_1^*(t)$:

$$I(\Delta) = \sum_{i=1}^N \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta} \quad (15)$$

а условия (7), (12) достижения заданных конечных температурных кондиций записываются в виде:

$$\Phi_1(\Delta) = \max_{x_1 \in [0,1]} |Q_1(x_1, \Delta) - Q_1^{**}| \leq \varepsilon_1; \quad (16)$$

$$\Phi_2(\Delta) = \max_{x_1, x_2 \in [0,1]} |Q_1(x_1, \Delta) - Q_2^{**}(x_2)| \leq \varepsilon_2, \quad (17)$$

где $Q(x_1, \Delta)$ определяется по формуле (14).

В итоге проблема сводится к задаче математического программирования на минимум целевой функции (15) N переменных Δ_i с заданным ограничением на множество допустимых значений Δ_i в форме неравенств (16), (17).

Оптимальное управление, являющееся решением рассматриваемой задачи быстрогодействия, отличается от всех других N -интервальных управлений вполне определёнными длительностями $\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0$ интервалов постоянства, совокупность которых $\Delta^0 = (\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0)$ и является решением задачи математического программирования (15)-(17).

Способ и пример решения задачи оптимального быстрогодействия по схеме альтернансного метода

На первом этапе сначала решается задача быстрогодействия (15), (16) с учетом одного ограничения (7) на конечное температурное состояние.

Согласно технологии альтернансного метода [2-4] решение задачи (15), (16) для типичного случая $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\min}^{(2)}$, где $\varepsilon_{1\min}^{(2)}$ - минимально достижимая величина ε_1 в классе управлений вида (13) с двумя интервалами постоянства, для которых следует принять $N=2$ в (13) [2-4], сводится с учетом известных свойств температурных полей в оптимальном процессе индукционного нагрева [2, 3] к решению системы четырех уравнений в точках x_1 максимума $|Q_1(x_1, \Delta) - Q_1^{**}|$ в (16):

$$\begin{aligned} Q_1(x_{11}, \Delta^{[1]}) - Q_1^{**} &= -\varepsilon_{1\min}^{(2)}; \\ Q_1(x_{12}, \Delta^{[1]}) - Q_1^{**} &= \varepsilon_{1\min}^{(2)}; \\ Q_1(x_{13}, \Delta^{[1]}) - Q_1^{**} &= -\varepsilon_{1\min}^{(2)}; \\ \frac{\partial Q_1(x_{12}, \Delta^{[1]})}{\partial x_{12}} &= 0, \end{aligned} \quad (18)$$

где $x_{11}, x_{12}, x_{13} \in \{x_1 : 0 \leq x_1 \leq 1\}; x_{11} = 0; 0 \leq x_{12} < 1; x_{13} = 1; \Delta^{[1]} = (\Delta_1^{[1]}, \Delta_2^{[1]})$, $\Delta^{[1]}$ - искомое решение задачи (15), (16).

Система решается стандартными численными методами с требуемой точностью с использованием выражений (14) относительно четырех неизвестных: $\Delta_1^{[1]}, \Delta_2^{[1]}, \varepsilon_{1\min}^{(2)}$ и координаты x_{12} точки экстремума кривой температурного распределения.

Зависимость $Q_1(x_1, \Delta^{[1]})$ от своих аргументов в (14) после подстановки известных выражений для $\Lambda\left(x_1, \sum_{i=m}^N \Delta_i\right)$ выглядит следующим образом [3]:

$$Q_1(x_1, \Delta^{[1]}) = Q_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2W_n J_0(\mu_n x_1)}{(\mu_n^2 + \beta^2) J_0^2(\mu_n)} \left[\sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \left(1 - \exp\left(-\mu_n^2 \sum_{m=j}^N \Delta_m^{[1]}\right) \right) \right], \quad (19)$$

где при $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\min}^{(2)}$ следует принять $N=2$.

Здесь $\mu_n^2 = \frac{a\eta_n^2}{R^2}$ - собственные числа; $\eta_n, n=1,2,\dots$, - бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения:

$$\beta J_0(\eta) - \eta J_1(\eta) = 0; \quad (20)$$

R - радиус цилиндра; W_n - моды функции (5):

$$W_n = \int_0^1 W(\xi, x_1) J_0(\mu_n x_1) x_1 dx_1; \quad (21)$$

$J_0(z)$ и $J_1(z)$ - функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

Численное решение системы (18) производилось с учетом первых 20 членов бесконечного ряда (19).

В итоге, после перехода к абсолютным величинам по правилам перехода от относительных единиц согласно [2, 3], получим в соответствии (19) следующий окончательный вид формулы для расчета температурного поля $Q_1(x_1, \Delta^{[1]})$:

$$Q_1(x_1, \Delta^{[1]}) = \frac{P_{\max} R^2}{\lambda} \left\{ Q_0 + \sum_{n=1}^{20} \frac{2W_n J_0(\mu_n x_1)}{(\mu_n^2 + B i^2) J_0^2(\mu_n)} \left[\sum_{j=1}^2 (-1)^{j+1} \left(1 - \exp\left(-\mu_n^2 \sum_{m=j}^2 \Delta_m^{[1]}\right) \right) \right] \right\}. \quad (22)$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности нагреваемого материала, P_{\max} - максимально допустимая величина объемной плотности мощности внутреннего тепловыделения при индукционном нагреве.

В итоге были получены следующие результаты решения системы уравнений (18) в программной среде MATLAB:

$$\Delta_1^{[1]} = 5879c; \Delta_2^{[1]} = 679c; \varepsilon_{1\min}^{(2)} = 52^\circ C; x_{12} = 0,1841m. \quad (23)$$

Кривая результирующего распределения температуры по радиусу цилиндра представлена на рис. 2.

На рис. 3 показано результирующее температурное поле по объему нагреваемого слитка с равномерным распределением по длине цилиндра в соответствии с пренебрежением температурным градиентом в осевом направлении в исходной

модели (1)-(3) процесса нагрева.

Если теперь, в соответствии с (17) для найденного решения $\Delta^{[1]}$ выполняется непосредственно проверяемое с помощью выражения (22) условие:

$$\Phi_2(\Delta^{[1]}) = \max_{x_1, x_2 \in [0,1]} |Q_1(x_1, \Delta^{[1]}) - Q_2^{**}(x_2)| \leq \varepsilon_2, \quad (24)$$

для требуемой точности ε_2 приближения результирующего температурного состояния нагреваемой заготовки к заданному распределению температур в режиме термостатирования, то $\Delta^{[1]}$ является искомым решением Δ^0 задачи (15)-(17) с обоими ограничениями.

Исходные данные для процесса индукционного нагрева

Материал	Титановый сплав
Радиус заготовки R, м	0.27
Длина заготовки L, м	1.0
Начальная температура Q_0 , °C	30
Требуемая температура Q_1^{**} , °C	1050
Частота питающего тока ω , Гц	50
Коэффициент β	0.7
Параметр ξ	4
Коэффициент теплопроводности титанового сплава λ , Вт/(м·°C)	14

Если неравенство (24) не выполняется, необходимо перейти на следующем этапе к решению задачи (15), (17) с одним ограничением (17) применительно к ситуации с промежуточной стадией термостатирования температурного состояния нагреваемого слитка перед его передачей к деформирующему оборудованию. Подобно (18) такая задача при $\varepsilon_2 = \varepsilon_{2\min}^{(2)}$, $N=2$ сводится к решению по схеме альтернансного метода системы четырех уравнений:

$$\begin{aligned} Q_1(x_{11}, \Delta^{[2]}) - Q_2^{**}(x_{21}) &= -\varepsilon_{2\min}^{(2)}; \\ Q_1(x_{12}, \Delta^{[2]}) - Q_2^{**}(x_{22}) &= \varepsilon_{2\min}^{(2)}; \\ Q_1(x_{13}, \Delta^{[2]}) - Q_2^{**}(x_{23}) &= -\varepsilon_{2\min}^{(2)}; \\ \frac{\partial Q_1(x_{12}, \Delta^{[2]})}{\partial x_{12}} &= 0 \end{aligned} \quad (25)$$

с четырьмя неизвестными $\Delta_1^{[2]}$, $\Delta_2^{[2]}$, $\varepsilon_{2\min}^{(2)}$ и x_{12} .

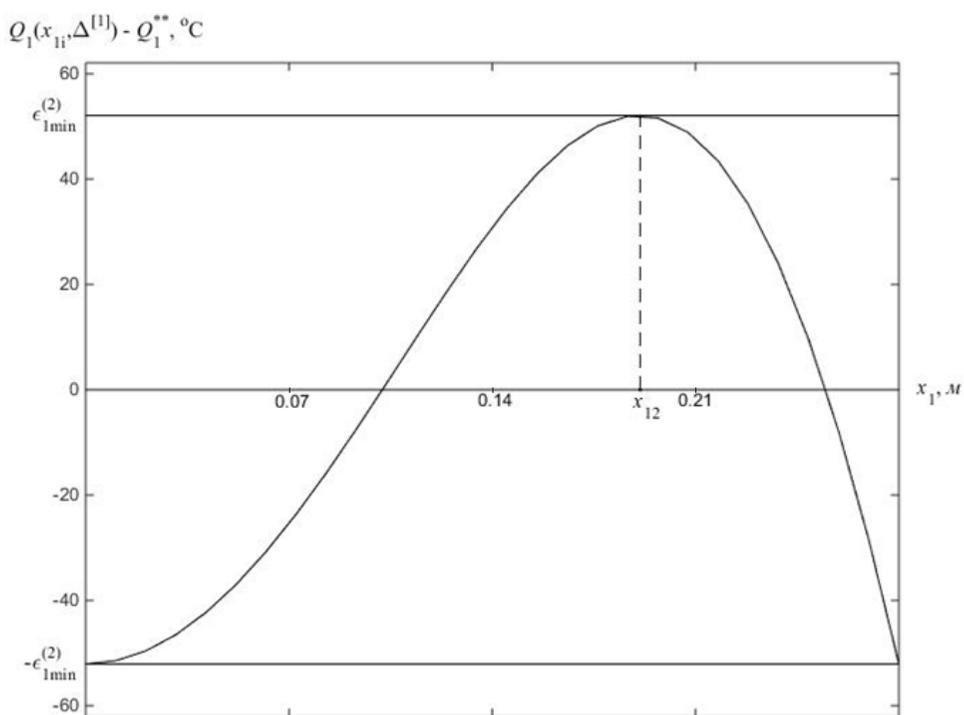


Рис. 2. Кривая результирующего распределения температуры по радиусу нагреваемой заготовки

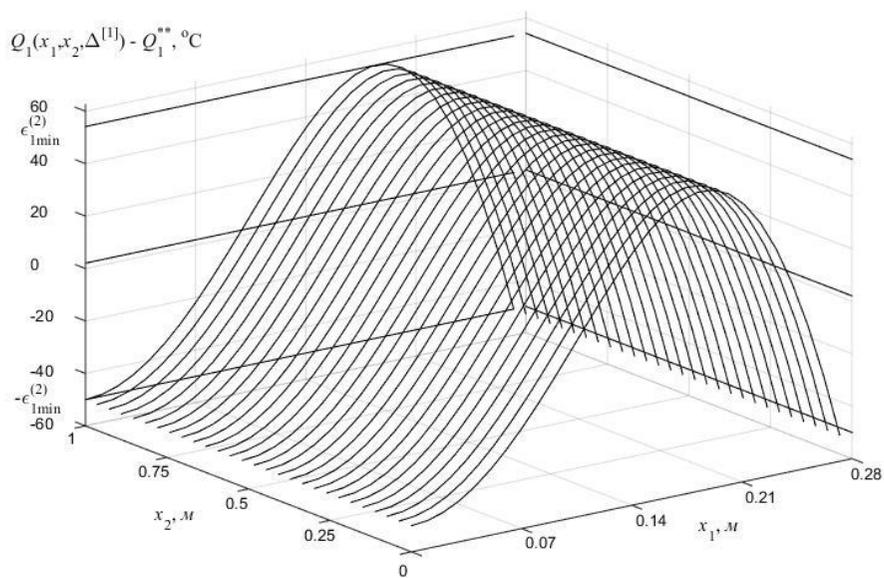


Рис.3. Результирующее пространственное распределение температуры по всему объему заготовки

Здесь $\Delta^{[2]}$ - искомое решение задачи (15), (17); $\varepsilon_{2\min}^{(2)}$ - минимально достижимая величина ε_2 в (17) при $N=2$; $x_{21}, x_{22}, x_{23} \in \{x_2 : 0 \leq x_2 \leq 1\}$; $x_{21} = 1$; $x_{22} = 0$; $x_{23} = 1$, и радиальные координаты x_{11}, x_{12}, x_{13} не меняются по сравнению с их значениями в (18). Система (25) решалась аналогично (18) после перехода к абсолютным единицам с подстановкой выражений для Q_1 вида (22) при $u_0 = 0,02$ в (11).

В итоге получены следующие результаты: $\Delta_1^{[2]} = \Delta_1^{[1]} = 5879\text{с}$; $\Delta_2^{[2]} = \Delta_2^{[1]} = 679\text{с}$; $\varepsilon_{2\min}^{(2)} = 192^\circ\text{C}$; $x_{22} = 0,184\text{м}$, отличающиеся от (23) только величиной $\varepsilon_{2\min}^{(2)} > \varepsilon_{1\min}^{(2)}$.

Результирующее температурное поле по объему цилиндра, характеризующееся теперь уже одинаковым радиальным распределением температур по длине цилиндра в соответствии с моделью (8), (9) режима термостатирования, показано на рисунке 4.

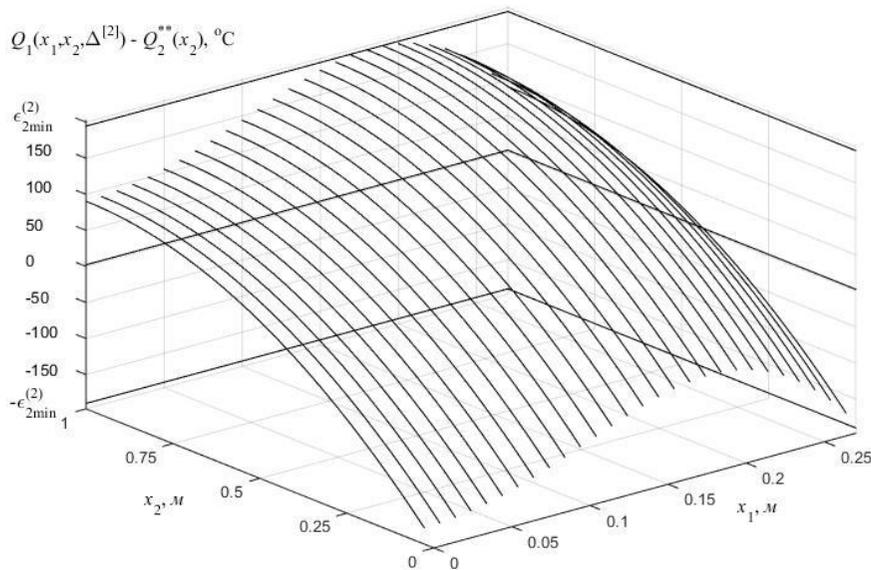


Рис. 4. Результирующее пространственное распределение температуры по всему объему заготовки в задаче (15), (17)

Таким образом, в данном случае при $\Delta^{[2]} = \Delta^{[1]}$ оптимальные двухинтервальные управления в задачах (15), (16) и (15), (17) совпадают, обеспечивая при этом различную максимально возможную точность приближения к требуемым конечным температурным состояниям.

Такие результаты получаются из-за использования одинаковой формулы для вычисления температурного поля $Q_1(x_1, \Delta^{(N)})$ и совпадения точек альтернанса в (25) на границах изменения радиальной и продольной координат по объему цилиндрической заготовки.

Из сказанного следует, что решением исходной задачи (15)-(17) с двумя ограничениями является $\Delta^0 = \Delta^{[1]} = \Delta^{[2]}$, если $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\min}^{(2)}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{2\min}^{(2)}$ в (16), (17).

При других заданных значениях ε_1 и ε_2 опять сначала следует решить по

схеме альтернансного метода подобно (18), (25) две различные задачи (15), (16) и (15), (17) с одним ограничением с последующей оценкой неравенств:

$$\Phi_2(\Delta^{[1]}) = \max_{x_1, x_2 \in [0,1]} |Q_1(x_1, \Delta^{[1]}) - Q_2^{**}(x_2)| \leq \varepsilon_2; \quad (26)$$

$$\Phi_1(\Delta^{[2]}) = \max_{x_1 \in [0,1]} |Q_1(x_1, \Delta^{[2]}) - Q^{**}| \leq \varepsilon_1. \quad (27)$$

При выполнении (26) или (27) $\Delta^0 = \Delta^{[1]}$ или $\Delta^0 = \Delta^{[2]}$ соответственно. Если оба неравенства нарушаются, следует перейти непосредственно к задаче (15)-(17) путем её преобразования к виду, содержащему единственное ограничение [5], с последующим решением по схеме альтернансного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рапопорт Э.Я.* Минимаксная оптимизация стационарных состояний в системах с распределенными параметрами // Изв. РАН. ТиСУ, 2013. №2. С. 3-18
2. *Рапопорт Э.Я., Плещишцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева – М.: Наука, 2012.
3. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.
4. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами – М.: Высшая школа, 2009.
5. *Рапопорт Э.Я.* Альтернансный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000.

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2016 г.

OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION HEATING PROCESSES WITH COMBINED REQUIREMENTS TO THE FINAL TEMPERATURE DISTRIBUTION OF THE OBJECT

E.Ya. Rapoport, A.V. Kapustina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

This paper presents the problem of optimal control of induction heating process of the metal billet to the next operation of pressure treatment in conditions involving both if the billet immediately after heating is sent to deforming equipment, and if the need to move to temperature stabilization stage, depending on the implemented mode "pressure-heat treatment" technology complex. Proposed formulation and the method of solution of the corresponding the problem of time-optimal control with two at the same time the requirements presented demands to the final temperature of heated billets condition responsible for both options in advance unknown organization modes induction heating installation. The results and their analysis for the investigated models of induction heating process are given.

Keywords: *optimal control, induction heating process, alternance method, temperature stabilization stage, requirements to the final temperature distribution of the object.*

*Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor
Alena V. Kapustina, Postgraduate Student.*