

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26

2020

№ 11

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

25 лет
журналу

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

25 лет журналу



***Уважаемые читатели журнала
«Информационные технологии», коллеги, друзья!***

Нашему журналу исполняется 25 лет!

Наш предмет – информационные технологии – это современная область знаний, имеющая широкое применение практически во всех областях науки и техники. В настоящее время она во многом определяет весь прогресс развития человечества. С каждым годом ее возможности расширяются, с развитием производительности современных ЭВМ появляются новые методы и подходы к использованию средств информационных технологий во всех областях человеческой деятельности.

Первый выпуск журнала «Информационные технологии» вышел в ноябре 1995 года. Основателем журнала и его первым Главным редактором был д-р техн. наук профессор, Лауреат государственной премии СССР Игорь Петрович Норенков. С тех пор вышли 336 выпусков журнала, опубликованы 2 462 статьи по современным проблемам информационных технологий. Журнал старается представить читателям широкую панораму научных исследований и провести анализ новейших достижений по профилю журнала. Основой отбора статей для публикации в настоящее время является генерация знаний в области информационных технологий.

Редакционно-издательский коллектив делает все возможное, чтобы держать вас в курсе важнейших новостей. Нам приятно отметить, что ваша активная позиция и ваши научные публикации позволяют делать журнал все более многогранным и интересным.

От имени редакционно-издательского коллектива поздравляю вас с нашим юбилеем!

Главный редактор,
академик РАН, член Президиума РАН
Александр Стемпковский

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26
2020
№ 11

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Биялтинов К. З., Меньяло В. В. Модифицированный метод DEA и методика оценки эффективности технических систем 611

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

- Лялинский А. А. Распараллеливание в процессах характеристики библиотек цифровых элементов 618

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

- Полещук О. М. Модель принятия решений на основе Z-информации 625

- Кравченко Т. К., Брускин С. Н., Исаев Д. В., Кузнецова Е. В. Приоритизация элементов бэклога ИТ-продукта с применением систем поддержки принятия решений 631

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Милосердов Д. И. Архитектурные особенности программных систем нейросетевого прогнозирования с непрерывным обучением 641

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

- Иванова С. М., Ильиченкова З. В., Антонова А. А. Проверка подлинности пользователя при работе в обучающих системах 648

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Гурарий М. М., Русаков С. Г. Анализ установившихся колебаний в автогенераторе при многочастотном возбуждении 655

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.

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

Главный редактор:

СТЕМПОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.
КУЛЕШОВ А. П.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ПОПКОВ Ю. С.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
РУСАКОВ С. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОЙФЕР В. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ И. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ШАХНОВ В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШОКИН Ю. И.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ЮСУПОВ Р. М.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.
ЛВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.
ПРОХОРОВ С. А., д. т. н., проф.
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

INFORMATION TECHNOLOGIES INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 26
2020
No. 11

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

DOI 10.17587/issn.1684-6400

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING AND OPTIMIZATION

- Biliatdinov K. Z., Menailo V. V.** Modified Method DEA and Methodology of Technical Systems Effectiveness Assessment 611

COMPUTING SYSTEMS AND NETWORKS

- Lyalinsky A. A.** Parallelization in Characterization of Digital Cells Libraries 618

MAKING DECISIONS

- Poleshchuk O. M.** Decision Making Model Based on the Z-Information 625

- Kravchenko T. K., Bruskin S. N., Isaev D. V., Kuznetsova E. V.** Prioritization of IT Product Backlog Items Using Decision Support Systems 631

NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

- Miloserdov D. I.** Architectural Features of Neural Network Forecasting Software Systems with Continuous Training 641

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION

- Ivanova S. M., Ilyichenkova Z. V., Antonova A. A.** User Authentication in Training Systems 648

APPLICATION INFORMATION SYSTEMS

- Gourary M. M., Rusakov S. G.** Analysis of Steady-State Oscillations in an Autonomous Oscillator under Multi-Frequency Excitation 655

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Prokhorov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 621.396

DOI: 10.17587/it.26.611-617

К. З. Билятдинов, доц., e-mail: k74b@mail.ru,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский университет ИТМО",

В. В. Меньяло, канд. филол. наук, доц., menyaylo917@mail.ru,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Санкт-Петербург

Модифицированный метод DEA и методика оценки эффективности технических систем

Представлен модифицированный метод DEA, усиленный расчетом корреляционных зависимостей сравниваемых переменных и использованием коэффициента вето. На основе данного метода авторами разработана методика оценки эффективности технических систем и представлена ее программная реализация. Предлагается применение метода и методики для оценки эффективности технических систем, составления отчетов о функционировании технических систем и подготовки обоснованных управленческих решений в условиях нехватки времени и ресурсов.

Ключевые слова: модифицированный метод DEA, результативность технических систем, экономичность технических систем

Введение

В настоящее время можно вполне обоснованно утверждать, что в современных условиях эффективность управления техническими системами (далее — системами) в значительной степени зависит от своевременного принятия управленческих решений, основанных на оценке их эффективности и учитывающих специфику оцениваемых систем. При этом объективная оценка эффективности систем требует подробной детализации и наиболее полного учета множества факторов и условий, которые сопровождают функционирование систем, а также их сравнение с аналогичными системами и (или) с различными периодами функционирования оцениваемых систем.

Большинство современных систем имеют аналоги, которые функционируют в похожих условиях. В особенности это касается систем жизнеобеспечения, технических систем охраны, систем контроля управления доступом, систем электропитания, различных систем сигнализации, автоматизированных систем управления и связи. Логично предположить, что дальнейшее эффективное развитие и совершенствование оцениваемых систем невозможно без учета перспектив, анализа и оценки современного состояния дел в этой сфере.

Разнообразие систем и современное развитие технологий обосновывает необходимость комплексного и системного использования информации из внутренних и внешних информационных ресурсов для сравнения этих систем в интересах объективной оценки их эффективности. Вышеизложенное обосновывает необходимость разработки универсальных инструментов оценки эффективности систем [1, 2].

Для оценки качества системы любой природы важнейшей характеристикой является эффективность ее функционирования. Однако очевидно, что никакой отдельный частный показатель не может быть использован для универсального применения при оценке эффективности различных систем. Поэтому А. Чарнесом, В. Купером и Е. Родесом (A. Charnes, W. Cooper, E. Rhodes) был разработан метод "Data Envelopment Analysis" (DEA), или "Анализ среды функционирования" (АСФ) [3—8]. В то же время применение метода DEA не дает объяснения причин состояния системы и, соответственно, не дает дополнительной обоснованной информации для принятия наиболее рационального управленческого решения. Исходя из этого авторы предлагают использовать модифицированный метод DEA в качестве основы методики оценки эффективности системы.

1. Модифицированный метод DEA

В предлагаемом модифицированном методе DEA с помощью апробированных математических инструментов устранены вышеупомянутые недостатки. Кроме того, предлагаемый метод в большей степени пригоден для программной реализации, поскольку использует систематизированные расчетные таблицы. Модифицированный метод DEA представляет собой симбиоз методов DEA ("Анализа среды функционирования") [3–7] и расчета корреляции зависимости [1].

На основании научных работ М. Дж. Фаррелла (М. J. Farrell) [8] в сфере развития методов непараметрического граничного анализа можно сформулировать следующие направления применения модифицированного метода DEA:

1. Оценка результативности (effectiveness) — определение степени достижения цели оцениваемой системой в заданный период времени.
2. Оценка экономичности (efficiency) — определение соотношения затрат ресурсов и результата, достигнутого оцениваемой системой в заданный период времени.

Таким образом, в самом общем виде содержание задачи оценки эффективности системы сводится к определению экономичности осуществляемого системой преобразования потребляемых ресурсов в получаемые результаты.

При современном многообразии различных систем, выполняющих одинаковые функции, наиболее перспективным направлением применения модифицированного метода DEA и разработанной на его основе методики оценки эффективности системы будет являться первое направление, т. е. оценка (сравнение) достигнутого результата с требуемым (базовым) значением этого результата за заданный период времени при условии одинаковых затрат ресурсов оцениваемыми системами [1, 2, 9].

Для этой цели в модифицированном методе DEA применяется парное сравнение количественных значений всех затраченных ресурсов ($X_1, X_2, \dots, X_i$) и количественных значений достигнутого результата (Y) или сравнение достигнутого результата (Y) с его установленными базовыми (требуемыми) значениями (Y_0). Проводится сравнение всех оцениваемых систем и (или) оцениваемых периодов времени функционирования одной системы. Ключевым моментом в модифицированном методе DEA является рекомендация по установлению базовых количественных значений для результата (Y_0) и затраченных ресурсов (X_{j0}).

В разработанном методе сравнение рекомендуется проводить с помощью построения соот-

ветствующих расчетных таблиц: таблица 1 — для сравнения количественных значений достигнутого результата ($Y_1, \dots, Y_n$) и таблица 2 — для сравнения количественных значений всех затраченных ресурсов ($X_1, X_2, \dots, X_i$) с их базовыми значениями. В таблицах n — это число оцениваемых систем; i — число видов затраченных ресурсов.

Для оценки результативности систем вводится коэффициент результативности (R_{j0}) по формуле

$$R_{j0} = \frac{Y_j}{Y_0},$$

где Y_j — это количественное значение результата, достигнутого j -й системой.

В таблице 1 указывается степень достижения цели оцениваемой системой в заданный период времени по сравнению с установленным базовым (требуемым) количественным значением результата (Y_0), которое должно быть обязательно достигнуто системами за время своего функционирования.

Очевидно, что для объективной оценки значения требуемых результатов (Y_0) для всех оцениваемых систем должны быть равны. Однако в методе возможны расчеты с использованием разных значений требуемых результатов в зависимости от расхода ресурсов в различных условиях функционирования систем, например, расхода топлива в зимнем и летнем периодах эксплуатации.

В таблице 1 оценка результативности систем проводится в соответствии со следующими тремя критериями:

1. Если $R_{j0} > 1$, то j -я система достигла требуемого результата и превысила требуемый результат в R_{j0} раза или на $(100R_{j0} - 100) \%$.
2. Если $R_{j0} = 1$, то j -я система достигла требуемого результата и находится на границе своей результативности.
3. Если $R_{j0} < 1$, то j -я система не достигла требуемого результата и достигнутый результат меньше требуемого на $(100 - 100 R_{j0})$ процента(ов).

В таблице 1 место в рейтинге систем определяется по следующему правилу: наибольшему значению R_{j0} ($R_{j0\max}$) соответствует первое место в рейтинге, наименьшему — последнее место.

Из вышеприведенного правила понятно, что на первом месте рейтинга будет система с наибольшим значением R_{j0} и, соответственно, на последнем месте будет система с наименьшим количественным значением сравнения достигнутого результата с требуемым. При этом возможна ситуация, когда при равных значениях R_{j0} две и более системы будут занимать одно

Оценка результативности систем

Система	Результат (ед. измер.)		Место в рейтинге	Выводы о результативности систем		
	Достиг- нутый системой	Коэффици- ент результа- тивности (R_6)		Система достигла требуемого результата		Система не достигла требуемого результата
				Превысила требу- емый результат	Находится на границе своей результативности	
1	Y_1	R_{16}				
2	Y_2	R_{26}				
	...	...				
n	Y_n	R_{n6}				

место в рейтинге. Иными словами, N не всегда может быть равно числу оцениваемых систем n .

При необходимости в методе по результатам заполнения таблицы 1 предусмотрено построение диаграммы распределения результатов, пример приведен на рис. 1.

На рис. 1 системы, которые не достигли требуемого (базового) результата (системы 2 и 5), находятся ниже контрольной линии базового уровня ($R_{j6} = 1$), а системы, которые превысили требуемый результат (системы 4, 7 и 3), соответственно, находятся выше. Системы, достигнувшие результаты, равные базовому, расположены на базовом уровне (системы 6 и 1).

В методе для учета специфических требований к оцениваемым системам может применяться коэффициент вето — $\varphi(X_i)$, где X_i — количественное значение заданного вида расходуемого ресурса, для которого установлен диапазон допустимых значений. В частности, коэффициент вето может заключаться в установлении лицом, принимающим решение (ЛПР), верхнего порога значений расхода отдельных видов ресурсов (например, число персонала, трудозатраты и т.д.) для достижения требуемого результата.

В принципе, согласно теории, в комплексных показателях качества низкие значения одних единичных показателей могут компенсиро-

ваться высокими значениями других [2, 7]. Но для некоторых оцениваемых систем такая компенсация будет противоречить реальным требованиям к их эффективному функционированию, так как в отдельных случаях недопустимо компенсировать значения одних показателей высокими значениями других. Поэтому для исключения такой возможности, а также для учета принципа универсальности и различных специфических требований к разным системам коэффициент вето является важной частью разработанного метода [2].

Таким образом, в предлагаемом методе коэффициент вето — это функция, которая при выходе любого из важнейших единичных показателей за допустимые пределы установленного диапазона становится равной нулю. Во всех остальных случаях коэффициент вето $\varphi(X_i)$ остается равным единице.

В таблице 2 расчеты и оценка проводятся по тем же правилам, что и для таблицы 1, за исключением правила составления рейтинга систем по расходу ресурсов, так как на первом месте рейтинга должна быть система с наименьшим расходом, а на последнем — с наибольшим.

Таблица 2

Оценка экономичности систем по расходу ресурса X_i для достижения результата Y_j

Сис-тема	Расход ресурса X_i (ед. измер.)		Ме-сто в рей-тинге	Выводы об экономич-ности систем (одной системы в разные периоды времени)		
	Ре-аль-ный	Требуе-мый не более X_{i6}		Система экономична		Систе-ма не эконо-мична
				Расход менее X_{i6}	Расход равен X_{i6}	
1	X_1	X_{16}				
2	X_2	X_{26}				
	...	...				
n	X_n	X_{n6}				

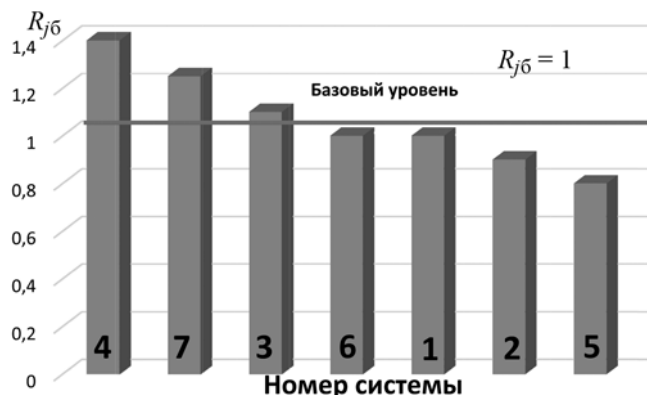


Рис. 1. Рейтинг систем и распределение результатов

При определенных условиях может выполняться равенство $X_{16} = X_{26} = \dots = X_{n6}$. Таблица 2 составляется для каждого оцениваемого вида ресурсов.

Для анализа данных целесообразно составление графиков (диаграмм) зависимостей расхода между разными видами ресурсов и (или) между разными видами ресурсов и достигнутыми результатами, что реализовано в методике оценки эффективности систем. Также в методе предусмотрено составление графиков зависимости расхода ресурсов с учетом их базовых значений (рис. 2).

Анализ распределения значений S_{xi} и S_{xk} на рис. 2 позволяет ЛПР сделать следующие выводы по аналогии с тремя критериями таблицы 1:

1. Системы, расположенные внутри квадрата со сторонами $S_{xi} = 1$ и $S_{xk} = 1$, экономичны по расходу ресурсов X_i и X_k на достижение результата Y_j , в примере на рис. 2 это системы 1, 2 и 4.
2. Системы, расположенные справа от данного квадрата, т. е. $S_{xk} > 1$, но ниже линии $S_{xi} = 1$, экономичны по расходу ресурсов X_i и не экономичны по расходу ресурса X_k , в примере на рис. 2 это система 3.
3. Системы, расположенные сверху данного квадрата ($S_{xi} > 1$, но $S_{xk} < 1$), но слева от линии $S_{xk} = 1$ ($S_{xk} < 1$) экономичны по расходу ресурсов X_{i-z} , но не экономичны по расходу ресурса X_j . На рис. 2 это система 7.
4. Системы, расположенные по диагонали сверху от данного квадрата ($S_{xi} > 1$ и $S_{xk} > 1$) не экономичны по расходу ресурсов X_k , и X_i , в примере на рис. 2 это системы 5 и 6.

При необходимости можно рассчитать нормированные коэффициенты важности для каждого расходуемого ресурса c_k , где k — это номер вида ресурса. При расчете значения c_k должно соблюдаться правило: чем важнее k -й ресурс, тем меньше должен быть его норми-

рованный коэффициент важности c_k . Для соблюдения указанного правила наиболее рационально рассчитать значение c_k для каждого вида ресурсов на основе субъективного мнения ЛПР, выраженного с помощью ранжирования i ресурсов по принципу: чем важнее вид ресурса, тем меньший номер места в рейтинге он получает, т. е. на первом месте будет наиболее важный ресурс, а на последнем i -м месте — наименее важный ресурс. Таким образом, формула расчета c_i имеет вид:

$$c_k = \frac{N_k}{\sum_{k=1}^{k=i} N_k},$$

где N_k — это номер места в рейтинге k -го вида ресурса.

В модифицированном методе DEA на основе данных таблиц вида таблицы 2, составленных для каждого вида расходуемых ресурсов и нормированных коэффициентов важности расходуемых видов ресурсов c_k , рекомендуется рассчитать комплексный показатель C_m экономичности расходования ресурсов ($X_1, X_2, \dots X_i$) системой m на достижение результата:

$$C_m = \sum_{k=1}^{k=i} c_k S_{X_k m},$$

где m — это номер оцениваемой системы, а $S_{X_k m}$ — это коэффициент экономичности расхода ресурса X_k для достижения результата системой m .

По результатам оценки результативности и экономичности систем (таблицы 1 и 2) целесообразно составить рейтинг эффективности оцениваемых систем, применяя для этой цели таблицу 3.

В таблице 3 рейтинг определяется по наибольшему значению суммы баллов.

Сумма баллов (E_j) оцениваемой системы j рассчитывается по формуле:

$$E_j = e_R R_{j6} + e_C \left(1 - \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \right),$$

Таблица 3

Рейтинг эффективности систем

Система	Коэффициент результативности R_{j6}	Комплексный показатель экономичности C_j	Коэффициент эффективности системы E_j	Место в рейтинге
1				
n				

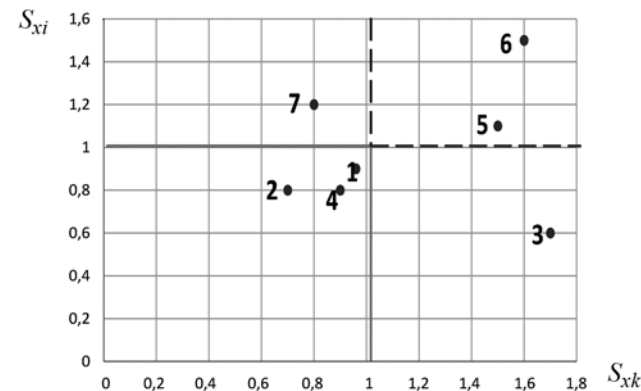


Рис. 2. График распределения коэффициентов экономичности расхода ресурсов X_i и X_k семи систем на достижение результата Y_j

где e_R — это нормированный весовой коэффициент важности коэффициента результативности, одинаковый для всех коэффициентов результативности оцениваемых систем (R_{16} , R_{26} , ..., R_{j6}), а e_C — это нормированный весовой коэффициент важности комплексного показателя экономичности, также одинаковый для всех комплексных показателей экономичности (C_1 , C_2 , ..., C_j) в таблице 3. В методе использование значений e_R и e_C не является обязательным. Значения e_R и e_C применяются при необходимости учета при составлении рейтинга специфических требований к системам, и их рекомендуется рассчитывать на основе мнений экспертов. Для этого каждому эксперту предлагается оценить важность R_{j6} и C_j для составления рейтинга эффективности систем путем распределения заранее определенного числа баллов B между двумя этими показателями таким образом, чтобы сумма распределенных баллов равнялась этому определенному числу баллов (B), т. е. $B = B_R + B_C$, где B_R — это число баллов, полученное коэффициентом результативности (R_{j6}), а B_C — это число баллов, полученное комплексным показателем экономичности (C_j). Тогда формулы расчетов нормированных значений e_R и e_C можно записать в следующем виде:

$$e_R = \frac{B_R}{B} \text{ и } e_C = \frac{B_C}{B},$$

$$\text{а следовательно, } e_R + e_C = \frac{B_R}{B} + \frac{B_C}{B} = 1.$$

В данном методе учитывается, что при комплексном подходе к анализу эффективности функционирования систем ЛПР получает достаточно большое количество информации, которую необходимо обработать и представить в виде, удобном для принятия рационального решения по повышению эффективности. Для этой цели применяются расчеты корреляционных зависимостей ($r_{x_i y}$ или $r_{x_i x_{(i-1)}}$) по формуле Пирсона [1, 2], используемой в разработанном методе для выявления существования зависимости и характера связи между следующими парами переменных:

1) между количественным значением достигнутого результата (Y) и каждым количественным значением затраченного на достижение этого результата ($r_{x_i y}$) вида ресурсов (X_i). В этом случае формула Пирсона имеет вид

$$r_{xy} = \frac{n \cdot \sum (X_i - Y) - (\sum X_i \cdot \sum Y)}{\sqrt{n \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum Y^2 - (\sum Y)^2}};$$

2) между парами количественных значений затраченных видов ресурсов ($X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i$) — $r_{x_i x_{(i-1)}}$, и для этих расчетов формула Пирсона преобразуется к виду

$$r_{x_i x_{(i-1)}} = \frac{n \cdot \sum (X_i - X_{i-1}) - (\sum X_i \cdot \sum X_{i-1})}{\sqrt{n \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum X_{i-1}^2 - (\sum X_{i-1})^2}}.$$

После выполнения расчетов коэффициента корреляции для каждой пары сравниваемых значений рекомендуется внести полученные данные в специально разработанную таблицу 4, составленную на основе общепринятых соотношений тесноты связи между переменными [1, 2].

Особенности данного метода заключаются в простоте его применения для должностных лиц и практической направленности на повышение эффективности управления. Систематизированная информация, полученная в результате расчетов, позволит ЛПР более детально провести анализ зависимостей ухудшения или улучшения значений корреляционной зависимости. Применение метода на практике может быть использовано для совершенствования управляющих воздействий, направленных на достижение цели функционирования системы.

По сути, разработанный модифицированный метод DEA — это инструмент бенчмаркинга, который позволяет определить наиболее эффективные подсистемы (элементы, изделия) в составе оцениваемой системы.

В идеале при применении модифицированного метода DEA анализ зависимостей ухудшения или улучшения согласованности по различным оцениваемым событиям (вариантам решений) поможет выявить проблемы в процессе управления и принять обоснованные решения по их исправлению.

Накопленная информация (информационные резервы системы [2, 10]) позволит не только оценить эффективность, но также выявить и сформулировать недостатки конкретных процессов функционирования систем. С помощью этой информации наиболее рационально сформулировать обоснованные управленческие решения по исправлению этих недостатков, что в конечном счете повысит эффективность оцениваемых систем. Кроме того, использование информационных резервов позволит заинтересованным ЛПР прогнозировать неблагоприятные события в системе и принимать забла-

Таблица 4
Степень корреляционной зависимости между парами значений переменных

Очень слабая корреляция $0 < r < 0,5$	Слабая корреляция $0,5 < r < 0,7$	Средняя корреляция $0,7 < r < 0,8$	Высокая корреляция $0,8 < r < 0,9$	Очень высокая корреляция $0,9 < r < 1$

современные управленческие решения по их устранению, что, в свою очередь, создаст объективные условия для существенного повышения эффективности функционирования систем.

2. Методика оценки эффективности технических систем и программа для ЭВМ "Анализ и оценка эффективности систем"

Метод является теоретическим базисом методики оценки эффективности технических систем совместно с программой для ЭВМ "Анализ и оценка эффективности систем" [2, 11]. Методика и программа предназначены для анализа и оценки эффективности систем и (или) одной системы в различные периоды времени ее функционирования.

Методика, реализованная в виде данной программы, выполняет все необходимые расчеты для построения таблиц, систематизации полученных значений корреляционных зависимостей показателей функционирования систем, графиков и диаграмм. Она позволяет сравнивать системы (периоды времени) по результату и (или) показателю функционирования систем, а также по соотношению израсходованных ресурсов (X) и результата (Y) и составлять рейтинги систем (см. рис. 1).

В программе используются количественные значения двух (X_1, X_2) и более видов ресурсов (X). Стоимость израсходованных ресурсов, единицы измерения полученного результата и общая стоимость полученного результата измеряются в тысячах рублей.

Краткая последовательность действий (алгоритм программы для ЭВМ) включает в себя:

1. Определение оцениваемых систем, выполняющих аналогичные функции, или периодов времени функционирования одной программной системы (комплекса из нескольких программных систем), например, до и после модернизации, или до и после совершенствования технического обеспечения, или до и после повышения квалификации персонала и т.д.

2. Определение достигнутого результата и его количественного значения (Y) для каждой системы (периода времени).

3. Составление списка затраченных на достижение результата ресурсов (показателей) для каждой оцениваемой системы (периода времени) и определение их количественных значений ($X_1, X_2, \dots, X_i$).

3. Проведение парных сравнений количественных значений ($X_1, X_2, \dots, X_i$) по принципу сравнения каждой оцениваемой системы (периода времени).

4. Сравнение затрат ресурсов ($X_1, X_2, \dots, X_i$) и результата (Y) для каждой оцениваемой системы (оцениваемого периода времени функционирования одной системы).

5. Составление рейтинга систем (периодов времени).

6. Расчет корреляционной зависимости и систематизация результатов.

Корреляционная зависимость рассчитывается по вышеприведенной формуле Пирсона. Для систематизации используется таблица 4.

7. Построение графиков и диаграмм с результатами всех сравнений затрат ресурсов ($X_1, X_2, \dots, X_i$), результата (Y), стоимости ресурсов и результата.

8. Представление отчета ЛПР: в программе предусмотрена возможность формирования отчетов в формате Word, а также визуализации полученных результатов в режиме реального времени.

Программа имеет интуитивно понятный интерфейс. Язык программирования: Python. Объем программы: 307 Кбайт [2, 11].

Основной положительный эффект, достигнутый от внедрения методики и программы: понятность и наглядность результатов, а также сокращение времени и ресурсов на оценку эффективности и повышение обоснованности управленческих решений за счет возможности сравнения и требуемой детализации израсходованных ресурсов (X) при анализе и оценке эффективности системы.

Заключение

Программная реализация методики позволила существенно снизить затраты времени и ресурсов на оценку эффективности технических систем и своевременное принятие обоснованных управленческих решений по результатам этой оценки. Методика оценки эффективности программных систем (объектов) совместно с программой для ЭВМ "Анализ и оценка эффективности систем" сокращает время на оценку при требуемой детализации израсходованных ресурсов и полученного результата, а также проводит анализ корреляционной зависимости всех используемых переменных и составляет рейтинг систем.

Разработанный модифицированный метод DEA и методика оценки эффективности в полной мере позволяют снизить время анализа и оценки в условиях увеличения объема используемой информации о системах. Кроме того, в модифицированном методе DEA для обеспечения универсальности и учета специфических требований предусмотрена возможность установления параметров, снижение (увеличение) которых категорически недопустимо.

Таким образом, разработанные модифицированный метод DEA и методика оценки эффективности систем совместно с программой для ЭВМ "Анализ и оценка эффективности систем" способствуют повышению эффективности управления техническими системами за счет своевременной и детальной оценки эффективности этих систем.

Список литературы

1. Билиятдинов К. З., Алейников А. А., Кривчун Е. А. Диаграмма разброса и расчет корреляции зависимости при оценке качества управления // Качество и жизнь. 2017. № 1 (13). С. 48–50.
2. Билиятдинов, К. З., Красов, А. В., Меньяйло, В. В. Исследование систем и анализ результатов испытаний. Санкт-Петербург: Астерион, 2019. 362 с.
3. Charnes A., Cooper W. W. Programming with linear fractional functionals // Naval Research Logistics Quarterly. 1962. N. 9. P. 181–185.
4. Cooper W. W. Data Envelopment Analysis. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. 318 p.

5. Cooper W. W., Charnes A., Golany B., Seiford L., Stutz J. Foundations of Data Envelopment Analysis for Pareto-Koopmans Efficient Empirical Production Functions // Journal of Econometrics. 1985. P. 91–107.
6. Dulá J. H. Computations in DEA // Pesquisa Operacional. 2002. Vol. 22, N. 2. P. 165–182.
7. Efficiency and Productivity Analysis in the 21st Century: Proceedings of International DEA Symposium (24–26 June 2002, Moscow, Russia). Moscow: International Research Institute of Management Sciences, 2002. 178 p.
8. Farrell M. J. The Measurement of Productive Efficiency // Journal of The Royal Statistical Society, Series A (General), Part III. 1957. Vol. 120. P. 253–281.
9. Krasov A. V., Arshinov A. S., Ushakov I. A. Embedding the hidden information into java byte code based on operands' interchanging // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, N. 8. P. 2746–2752.
10. Shterenberg S. I., Krasov A. V., Ushakov I. A. Analysis of using equivalent instructions at the hidden embedding of information into the executable files // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2015. Vol. 80, N. 1. P. 28–34.
11. Билиятдинов К. З. Анализ и оценка эффективности систем / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020610389, дата государственной регистрации 14.01.2020.

K. Z. Biliatdinov, Associate Professor, e-mail: k74b@mail.ru,
ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

V. V. Meniailo, Associate Professor, e-mail: menyaylo917@mail.ru,
National Research University Higher School of Economics, St. Petersburg, 190121, Russian Federation

Modified Method DEA and Methodology of Technical Systems Effectiveness Assessment

The article describes modified method DEA, supported by a calculation of correlation dependence of compared variables and use of veto index. The modified method DEA is developed on the basis of the classical method DEA but it uses basic (required) values for each of assessed systems in order to assess effectiveness and efficiency of contemporary technical systems. Moreover, for the purposes of practical application of the modified method DEA, the authors created methodology of effectiveness assessment and its software implementation. The main advantages of the proposed method and methodology are there universality, ease of software implementation and the fact that their practical application does not require considerable expenditures of time and resources. The authors propose to use the method and methodology for effectiveness assessment of technical systems of any nature and complexity, for making reports of systems functioning, for making justified managerial decisions in the deficit of time and resources and for keeping informational reserves of a system updated.

Keywords: modified method DEA, effectiveness of technical systems, efficiency of technical systems

DOI: 10.17587/it.26.611-617

References

1. Bilyatdinov K. Z., Aleinikov A. A., Krivchun E. A. Correlating diagram and calculation of dependence correlation when assessing quality of management, *Kachestvo i Zhizn'*, 2017, no. 1 (13), pp. 48–50 (in Russian).
2. Bilyatdinov K. Z., Krasov A. V., Menyailo V. V. Study of systems and analysis of testing results, St. Petersburg, Asterion, 2019, 362 p.
3. Charnes A., Cooper W. W. Programming with linear fractional functionals, *Naval Research Logistics Quarterly*, 1962, no. 9, pp. 181–185.
4. Cooper W. W. Data Envelopment Analysis, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2000, 318 p.
5. Cooper W. W., Charnes A., Golany B., Seiford L., Stutz J. Foundations of Data Envelopment Analysis for Pareto-Koopmans Efficient Empirical Production Functions, *Journal of Econometrics*, 1985, pp. 91–107.

6. Dulá J. H. Computations in DEA, *Pesquisa Operacional*, 2002, vol. 22, no. 2, pp. 165–182.
7. Efficiency and Productivity Analysis in the 21st Century: Proceedings of International DEA Symposium (24–26 June 2002, Moscow, Russia), Moscow, International Research Institute of Management Sciences, 2002, 178 p.
8. Farrell M. J. The Measurement of Productive Efficiency, *Journal of The Royal Statistical Society, Series A (General)*, Part III, 1957, vol. 120, pp. 253–281.
9. Krasov A. V., Arshinov A. S., Ushakov I. A. Embedding the hidden information into java byte code based on operands' interchanging, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 8, pp. 2746–2752.
10. Shterenberg S. I., Krasov A. V., Ushakov I. A. Analysis of using equivalent instructions at the hidden embedding of information into the executable files, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2015, vol. 80, no. 1, pp. 28–34.
11. Bilyatdinov K. Z. Analysis and assessment of systems effectiveness, Certificate of the state registration of software № 2020610389, 14.01.2020 (in Russian).

А. А. Лялинский, ст. науч. сотр., e-mail: zelyal@inbox.ru,
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Зеленоград

Распараллеливание в процессах характеризации библиотек цифровых элементов

Рассмотрены различные аспекты (запуск задач, мониторинг исполнения, сбор данных, их визуализация, формирование итоговых таблиц) задачи характеризации библиотек цифровых элементов, используемых в процессе создания и производства интегральных схем. Проанализировано применение распараллеливания на различных этапах задачи характеризации. Описана реализация предложенных методов на примере разработки системы веб-характеризации библиотек цифровых ячеек.

Ключевые слова: параллельные процессы, характеризация библиотек ячеек, веб-системы САПР

Введение

Сегодня невозможно представить разработку проекта электронного устройства, имеющего цифровой блок хотя бы небольшого размера, без заранее разработанной и протестированной библиотеки цифровых ячеек. Собственно процесс тестирования получил название "характеризация библиотеки". Его суть — это проведение на схемотехническом уровне расчета каждой ячейки библиотеки в целях получения основных функциональных характеристик ячейки (времени задержки, времени формирования выходных фронтов сигнала, потребляемой мощности; кроме того, для элементов памяти дополнительно вычисляются параметры, связанные с временем установки сигнала после переключения). Расчеты проводятся для определенного пользователем диапазона значений нагрузок на выходе элемента и для диапазона фронта входного сигнала. Кроме того, дополнительно рассчитываются варианты для различных значений температуры окружающей среды и при определенном разбросе напряжения питания. Результаты сохраняются в табличной форме. В простейшем случае аргументы таблицы — это значения нагрузки и наклона входного сигнала, значения таблицы — различные вычисленные функциональные параметры ячейки. Полученные таким образом таблицы позволяют при дальнейшем проектировании устройства использовать программы логического моделирования, имеющие

дело с макромоделями ячеек. Поведение ячейки определяется заложенным в нее функционалом, а характеристики прохождения сигнала и форма выходного импульса определяются из рассчитанных ранее таблиц. Такой подход позволяет на два-три порядка ускорить проектирование устройства в целом.

Следует отметить два важных момента при разработке библиотеки цифровых ячеек:

- определение состава библиотеки;
- вычисление характеристик входящих в ее состав ячеек (или кратко "характеризация библиотеки").

1. **Состав** библиотеки определяется как возможностями получения максимума различных логических функций и типов цифровых ячеек, так и стремлением охватить требуемый диапазон по быстродействию и нагрузочной способности ячеек. Отметим, что функциональное многообразие комбинационного раздела библиотеки не связано с технологическими ограничениями, накладываемыми процессом изготовления кристалла, а определяется только временем и ресурсами, выделенными на создание библиотеки. Понятно, что чем больше набор логических функций библиотеки, тем больше возможностей для создания оптимального устройства в целом предоставляется его разработчику.

2. Особенностью **процесса характеризации** является его большая временная продолжительность. Библиотека ячеек может содержать несколько сотен различных вариантов цифро-

вых ячеек. Вариативность обусловлена как различными логическими функциями, реализуемыми в библиотечных ячейках, так и необходимостью иметь для одной и той же функции линейку вариантов, различающихся быстродействием и нагрузочной способностью. Для каждой ячейки необходимо вычислить параметры как минимум для худшего, номинального и лучшего условий эксплуатации аппаратуры, под которыми понимаются температура окружающей среды и напряжение питания.

В соответствии с общепринятым в настоящее время форматом хранения данных в виде Liberty-файла [1] для каждой ячейки в зависимости от ее типа — комбинационная или ячейка памяти — необходимо вычислить набор табличных параметров, описывающих ее временные и мощностные характеристики. Каждая из таблиц вычисляется на сетке соответствующих параметров (например, вычисляется таблица значений задержки прохождения сигнала в зависимости от нагрузочной емкости и наклона входного сигнала). Для комбинационных схем временные затраты растут с увеличением сложности реализованной логической функции. Для ячеек памяти их сложность не оказывает такого существенного влияния, так как ее разброс не столь велик, как для комбинационных схем. Главным является то, что для них вычисляется большее число параметров, причем очень часто вычисление ряда параметров ячеек памяти связано с итерационными циклами. Поэтому временные затраты на характеризацию ячеек памяти существенно больше по сравнению с комбинационными схемами.

Совокупность перечисленных выше факторов приводит к тому, что для полноценного расчета всей библиотеки требуются 1...2 недели постоянной работы компьютера. Таким образом, задача ускорения характеризации библиотеки цифровых ячеек становится достаточно актуальной.

Одним из способов ускорения вычислений является подключение к процессу всего доступного пула компьютеров. Оценим возможности ускорения. Достаточно обычным является наличие во внутренней сети организации нескольких десятков вычислительных серверов. Предположим, что для выполнения задачи характеризации из них доступны хотя бы 4...6 серверов. Обычно каждый такой сервер имеет не менее 24 ядер. Тогда в предельном случае можно задействовать для расчетов примерно 100...150 независимых вычислительных ядер. Простой прямолинейный способ ускорения — вручную раскидать все задачи характеризации

на доступные ядра — имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, подготовка данных для задачи характеризации является достаточно трудоемким и тонким в настройке процессом. Во-вторых, отслеживание состояния запущенных задач и сбор результатов выполнения для такого огромного числа задач само по себе является непростой задачей. Как результат, становится актуальным исследование возможности распараллеливания задачи характеризации цифровой библиотеки на пуле вычислительных ядер.

В данной работе исследуются вопросы выделения отдельных задач из процесса характеризации в целом, а также оптимального построения системы характеризации, работающей с различными уровнями распараллеливания процессов.

Структура процесса характеризации

Как описано выше, процесс характеризации цифровых библиотек имеет несколько слоев (рис. 1).

Уровень L1 — это процесс характеризации библиотеки в целом, распараллеливание отсутствует.

Уровень L2 — получение всех параметров во всех точках сетки для отдельной ячейки, распараллеливание путем одновременного расчета всех ячеек.

Уровень L3 — вычисление всех параметров в одной точке сетки для отдельной ячейки, дополнительно к уровню L2 распараллеливание путем одновременного вычисления узлов сетки.

Уровень L4 — вычисление отдельного параметра в одной точке сетки для отдельной ячейки, дополнительно к уровню L3 распараллеливание путем одновременного вычисления всех требуемых параметров ячейки.

К счастью, все процессы на всех уровнях выполняются независимо друг от друга, поэтому их можно распараллелить вплоть до самого нижнего уровня.

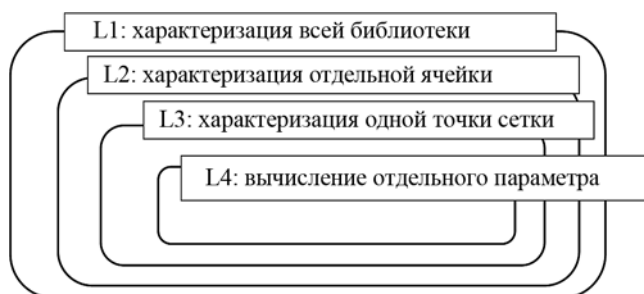


Рис. 1. Структура процесса характеризации библиотеки цифровых ячеек

Система веб-характеризации

В качестве примера для сравнения возьмем используемую много лет пакетную версию системы характеристики цифровых библиотек [2]. Некоторые из ее блоков вошли во вновь разработанную веб-систему характеристики библиотек цифровых ячеек, представляемую в этой работе.

В текущей версии эта веб-система ориентирована на библиотеку полузаказных ячеек [3] (все ячейки имеют одну и ту же топологию, выбор функциональности осуществляется путем подачи определенной совокупности сигналов на входы "прошивки"), в дальнейшем предполагается ее расширение для библиотек произвольных ячеек. Система реализована на основе управляющего веб-сервера, взаимодействующего с пулом из вычислительных ядер (рис. 2). Обмен данными осуществляется через общее дисковое пространство.

Система частично использует некоторые блоки ранее разработанной пакетной версии. Можно считать, что расчет на уровне L1 — это характеристика, проводимая в системе с пакетным исполнением. В предлагаемой системе веб-характеристики предусмотрены возможности распараллеливания на уровнях L2...L4 (уровни L2 и L3 реализованы, уровень L4 — в проекте будущих работ).

Последовательность операций при проведении процесса моделирования на уровнях L2...L4 состоит из следующих шагов:

1. Прием исходной информации от пользователя и формирование списка задач.
2. Получение списка доступных вычислительных ядер.
3. Работа блока подготовки и запуска отдельных задач. Новые задачи запускаются при соблюдении следующих условий:

- имеется свободное вычислительное ядро;
- не превышено максимальное время отклика на HTTP-запрос.

4. Передача управления в модуль визуализации и контроля исполнения. Проверка состояния запущенных задач. Показ текущих полученных результатов. Если есть хотя бы одна невыполненная задача, то передача управления на шаг 3.

5. Если все задачи выполнены, то перейти к формированию итоговых таблиц и завершению работы алгоритма.

Основная цель данного алгоритма — постараться выполнить все намеченные задачи в минимально возможное время на доступном ресурсе вычислительных ядер с максимальным подержанием собственной работоспособности.

Особенности разработанной системы

Имеет смысл описать две особенности системы, обусловленные ее реализацией в виде набора скриптов, размещенных на веб-сервере.

1. Ограничения работоспособности блоков системы

Реализация системы в виде веб-сайта накладывает определенные требования к рабочим характеристикам составляющих ее блоков [4]. Важнейшими являются три следующих, перечисленных по мере уменьшения их значимости:

- 1) ограничение времени работы блока;
- 2) ограниченный объем памяти ОЗУ;
- 3) ограниченный объем данных, которыми можно обмениваться между блоками.

Первое ограничение (на время работы) вытекает из протокола обмена по HTTP-запросам — ответ может ожидаться не более 30 с (есть два способа увеличить этот порог максимум до 5 мин, но отменить его нельзя). Ограничение продиктовано необходимостью недопущения ситуации, когда скрипт на веб-сервере по каким-либо причинам закикливается и не может самостоятельно прекратить свое выполнение. Но у скриптов разработанной системы есть достаточно большое число ситуаций, когда объем данных требует неизвестное заранее время на выполнение задачи. Для решения этой проблемы для критических блоков вводится самоконтроль времени исполнения и организация самостоятельного повторного вызова блока с предварительным сохранением и последующим восстановлением оперативных данных (аналогию можно найти с понятием организации "критических точек").

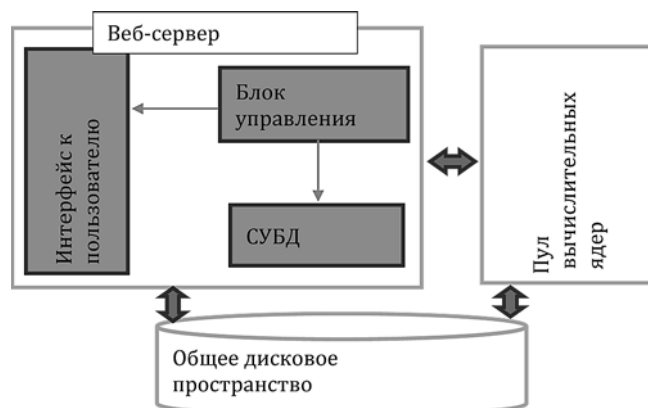


Рис. 2. Структура системы веб-характеризации

Второе ограничение (на объем памяти) вытекает из реализации блоков системы в виде PHP-скриптов, для которых всегда существует максимальный объем используемой динамической памяти ОЗУ. Опять же, этот предел можно самостоятельно увеличить, но нельзя отменить. Полноценного решения этой проблемы нет, при разработке любого скрипта необходимо держать в уме это ограничение. В критических случаях приходится отказываться от хранения всех данных в ОЗУ и вводить комплекс обменных операций с рабочими файлами. Частичным решением проблемы может быть установка в PHP-сервер расширения Memcached [5], позволяющего работать с неограниченной памятью ОЗУ, которое на самом деле заменяет хранение данных в памяти компьютера их хранением в файлах.

Третье ограничение (на объем обмениваемых данных) скорее имеет вторичный характер — слишком большой объем обрабатываемых данных приведет к тому, что вступят в действие ограничения по времени или памяти. Формальный момент — достаточно удобный способ обмена через глобальную PHP-переменную `$_SESSION` также имеет некое (но достаточно большое) ограничение. Выход — контролировать операции блока и не допускать долгих операций разработки с большими блоками данных. В критических случаях необходимо разделять операции на более мелкие процессы, выполняя их последовательно друг за другом, возможно, с организацией циклов.

2. Борьба с возникновением некорректных данных

В процессе отладки и эксплуатации системы были выявлены два источника некорректных данных.

1. При практически одновременном запуске большого числа небольших задач (например, это нормальная ситуация при характеристике комбинационных схем, когда в списке на запуск стоят рядом задачи расчета простейших комбинационных ячеек типа AND2) некоторая (до 5 %) часть задач получает некорректные исходные текстовые данные. Обычно это файл моделей, общий для всех задач. Исследование задач с некорректными данными показывает, что они получают файл с "обрубленной" хвостовой частью. Иными словами, часть задач отправляется на выполнение с неполностью полученным исходным файлом. Результатом является отказ программы Spice-моделирования рассчитывать схему с выдачей соответствующей диагностики.

Выявить такую ситуацию до начала моделирования не представляется возможным, но исправить это достаточно легко. Если при анализе результатов завершенной задачи мы видим сообщение об аварийном завершении, то данная задача ставится на повторное исполнение. Практика показывает, что запущенная при иных обстоятельствах, она удачно решается. Во избежание заикливания число повторов одной и той же задачи ограничено.

2. При расчете схем памяти могут возникать ситуации, когда из-за некорректно поставленных исходных данных (например, не совсем точно заданных напряжения питания или параметров измерительной сетки) не удастся получить корректные данные для части точек сетки. Пока это случалось достаточно редко, но теоретически такая ситуация возможна. Одним из выходов представляется подготовка результирующих данных с неполной сеткой, пустоты в сетке могут заполняться интер- и экстраполяцией с соседних узлов. Данная проблема требует своего исследования.

Описание основных блоков системы

Рассмотрим вкратце основные блоки. Кроме описанных ниже в системе имеется еще более десятка блоков, осуществляющих различные подготовительные и сервисные операции, их описание в данную статью не включено.

1. Интерфейс к пользователю

Данная система изначально спроектирована как интерактивная, ее интерфейс построен на основе веб-страниц, что позволяет вести общение с системой через любой веб-браузер (рис. 3, см. третью сторону обложки). Это позволяет иметь доступ к системе практически с любого компьютера в той сети, где доступна данная система, предустановки какого-либо программного обеспечения не требуется.

В данном блоке на основе полученной от пользователя информации формируется список намеченных к выполнению задач. Понятие "задача" зависит от выбранного текущего уровня распараллеливания. Это может быть полный расчет ячейки библиотеки, расчет одной точки сетки для одной ячейки или расчет одного типа параметров.

2. Блок подготовки задания на моделирование

Этот блок и описываемый за ним блок визуализации текущей информации вызывают друг

друга в цикле до тех пор, пока не закончится список намеченных к выполнению задач. На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлено стартовое меню задачи характеризации. Пользователь выбирает режим распараллеливания и набор ячеек для характеризации. Под конкретный случай расчета параметров формируются набор входных сигналов [6], файлы, определяющие вычисление параметров (обычно с помощью Spice-директивы measure) и, в завершение, исходный файл, после этого запускается Spice-моделирование.

В начале работы блока анализируется список разрешенных к использованию вычислительных серверов, определяется число вычислительных ядер на каждом сервере, после чего все ядра ранжируются по степени их текущей общей загрузки. Из полученного списка выбирается столько наименее загруженных ядер, сколько невыполненных задач имеется на данный момент. Для каждой задачи готовится полный пакет исходных файлов, и задача запускается на исполнение на выбранном ядре.

Отметим два важных момента:

1. Алгоритм выбора вычислительных ядер старается равномерно загрузить вычислительные серверы, что позволяет достичь максимальной производительности системы в целом.
2. Ведется контроль времени исполнения блока. При достижении отметки в 25 с запуск задач прекращается, и управление передается в блок визуализации текущей информации. Такой самоконтроль позволяет не допускать аварийного завершения работы данного скрипта, вызванного превышением разрешенного времени исполнения.

3. Блок визуализации текущей информации и контроля исполнения задания

Данный блок работает в тесной связке с предыдущим блоком и выполняет две важных задачи:

1. Анализируя различные факторы (предыдущее и текущее состояния задачи в CPU, наличие результирующих файлов), определяет "пользовательский" статус каждой задачи — стартовала ли она, в процессе выполнения или завершена. Если задача завершена, то анализируется корректность выходных данных, и если обнаружены ошибки, то данная задача ставится на повторное выполнение. Если выходные данные корректны, то в зависимости от уровня распараллеливания проводится их первичная обработка и сохранение во временном хранилище.

Степень текущей загрузки компьютеров: (compNN = 192.168.77.NN)					
в очереди на загрузку: 388					
	comp33	comp35	comp37	comp38	всего
индекс загрузки	0.93	0.89	0.97	0.82	
#по плану	23	21	23	25	92 из 480
#готовых	21	20	21	23	85 из 480
#в CPU	1	1	1	2	5

Отсутствует файл результатов - рестарт задачи al_and3fft_A0A2
Повторный старт вычислений 1 точки.

Рис. 5. Меню загрузки пула вычислительных ядер

Количество точек рассчитываемой сетки (для каждой маски): 40						
Примерное время завершения расчетов: 17:11:16						
N	маска	#заверш.	старт	заверш.	затрач.	результаты действие
задачи текущего проекта Almaz14_v22						
пакет в целом		201	16:55:00		6:07	
1	al_and2	40	16:55:16	17:01:07	5:51	
2	al_and2ft	0				
3	al_and3	40	16:55:01	16:58:09	3:08	
4	al_and3fft	40	16:55:42	16:58:51	3:09	
5	al_and3fft	40	16:57:51	17:00:34	2:43	
6	al_ao21	10	16:59:35		2:14	
7	al_nand3fft	31	17:00:41		1:08	
8	al_nand3	0				
9	al_nand2ft	0				
10	al_nand2	0				
11	al_mux2l	0				
12	al_mux2h	0				

N	маска	время расчета одной точки сетки (сек)			
		мин	среднее	макс	предельное
1	al_and2	5	28.7	62	2:35 мин
3	al_and3	7	21.6	53	2:12 мин
4	al_and3fft	1	21.1	42	1:45 мин
5	al_and3fft	7	21.4	49	2:02 мин
6	al_ao21	2	37.9	48	2 мин
7	al_nand3fft	9	18.1	26	1:05 мин

Рис. 6. Меню состояния вычисления задач

На рис. 5 и 6 представлены фрагменты выдачи текущей информации о выполнении задачи.

2. Достаточно большая часть работы этого блока связана с формированием данных для итогового хранения уже завершенных задач.

Кроме того, данный блок обеспечивает текущую визуализацию процесса — информирует о степени загрузки пула вычислительных ядер и состоянии всех намеченных к обработке задач.

4. Блок сохранения и визуализации итоговых данных

Данный блок работает после завершения расчетов всех задач и формирует данные для визуализации окончательных расчетов, позволяющих пользователю принять решение о сохранении полученных результатов в качестве Liberty-файлов.

Таблица 1

Сравнение способов подготовки исходной информации

Элементы	Существующая система (пакетное исполнение)	Новая интерактивная веб-система
Подготовка входных сигналов для измерения параметров		
Комбинационные ячейки	В ручном режиме	Полностью автоматизировано
Ячейки ввода-вывода		Автоматизировано, реализованы частично
Преобразователи уровня		
Ячейки памяти	Заранее приготовленные тесты	
Подготовка скриптов для измерения характеристик		
Комбинационные ячейки	Заранее подготовленные скрипты	Более быстрая собственная измерительная часть
Ячейки ввода-вывода		Заранее приготовленные тесты
Преобразователи уровня		
Ячейки памяти	Заранее приготовленные тесты	
Выбор множества ячеек для текущей задачи		
	В ручном режиме (в текстовом редакторе)	Интерактивно из предложенного списка

Результаты моделирования

Таблица 2

Сравнение скорости выполнения задачи характеристики

Сравнение системы характеристики с аналогами имеет смысл проводить по трем признакам:

- удобство подготовки исходной информации;
- скорость выполнения задачи в целом;
- удобство работы с полученными результатами.

Сравнение проведем с упомянутым выше пакетным вариантом системы характеристики, так как достаточно полной информации о других системах характеристики в открытом доступе не найдено.

1. Подготовка исходной информации

В табл. 1 сведены воедино различные аспекты, связанные с подготовкой исходных данных для задачи характеристики. Видно, что во многих случаях новая система удобнее за счет предоставления интерактивного режима. Наиболее заметно это для комбинационных схем, где за счет более высокого уровня формализации описания удалось достичь более высокого уровня автоматизации процессов.

2. Скорость выполнения задачи в целом

В табл. 2 дано сравнение скорости выполнения задачи характеристики. Для старой системы приведены оценочные данные, базирующиеся на имеющемся опыте эксплуатации этой системы. Из таблицы мы видим ускорение процесса вычислений в 10...20 раз.

Элементы	Существующая система (пакетное исполнение) Примерная оценка	Новая интерактивная веб-система
33 комбинационные ячейки	Более суток	2 ч
24 ячейки памяти	От 1,5 до 2 суток	2 ч

Таблица 3

Варианты представления выходной информации

Существующая система (пакетное исполнение)	Новая интерактивная веб-система
Основная выходная информация	
Liberty-файл	• Таблицы и 3D-изображения полученных данных • Liberty-файл
Служебная информация (протоколы моделирования и создания Liberty-файла)	
Доступ из Unix-каталога	Интерактивный доступ из меню системы
Варианты формирования составных Liberty-файлов	
Указанием списка в текстовом редакторе	Интерактивный выбор из меню системы
Сервисные функции	
Отсутствуют	• Оценка однородности полученных результатов • Оценка статистического разброса данных

3. Удобство работы с полученными результатами

В табл. 3 приведено сравнение различных способов обработки выходной информации данных систем. Видно, что новая система за счет интерактивности обеспечивает больше удобств и возможностей для пользователя. Результаты вычисления параметров ячейки представлены на рис. 7 в виде таблицы и на рис. 8 (см. третью сторону обложки) в виде цветного трехмерного изображения.

Заключение

Представлена новая веб-система характеризации библиотек цифровых схем. Описаны методы и приемы распараллеливания вычислительных процессов, что позволило ускорить данную работу в целом на 1...2 порядка. Показаны приемы, позволяющие преодолеть ограничения, вызванные реализацией данной системы в виде веб-сервера.

Список литературы

1. **Описание** формата Liberty-файла на сайте Synopsis. URL: <https://www.synopsys.com/> (дата проверки: 22.05.2020).

minimal value		maximal value						
cap								
input slew, ps	c_out, fF							
	1	20	50	75	100	125	150	200
20	0.00392106	0.00392106	0.00392106	0.00392106	0.00392106	0.00392106	0.00392106	0.00392106
200	0.00513706	0.00513706	0.00513706	0.00513706	0.00513706	0.00513706	0.00513706	0.00513706
500	0.0055124	0.0055124	0.0055124	0.0055124	0.0055124	0.0055124	0.0055124	0.0055124
1000	0.00560405	0.00560405	0.00560405	0.00560405	0.00560405	0.00560405	0.00560405	0.00560405
1200	0.00560612	0.00560613	0.00560613	0.00560613	0.00560613	0.00560613	0.00560613	0.00560613

Рис. 7. Таблица результатов вычисления задержки ячейки

2. **Хватов В. М., Гарбулина Т., Лялинская О. В.** Методы формирования и верификации библиотек стандартных элементов в составе маршрута проектирования ИС на базе ПЛИС отечественного производства // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. 2018. Вып. 1. С. 57—62.

3. **Ian Poole**, ASIC basics tutorial. URL: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/programmable-logic/what-is-an-asic-application-specific-integrated-circuit.php (дата обращения: 03.02.2020).

4. **Лялинский А. А.** Особенности построения прикладных программ с веб-доступом // Информатика. № 1(37). Январь-март 2013. С. 76—83. Минск. ОИПИ НАН Беларуси. 2013.

5. **Документация** по PHP. URL: <https://www.php.net/manual/ru/intro.memcached.php> (дата обращения: 22.05.2020).

6. **Лялинский А. А.** Автоматизированное формирование тестов при характеризации цифровых ячеек с использованием веб-доступа // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2012. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемповского. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 95—100.

A. A. Lyalinsky, Senior Researcher, e-mail: zelyal@inbox.ru,
Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS, Moscow

Parallelization in Characterization of Digital Cells Libraries

Various aspects (starting tasks, monitoring execution, collecting data, visualizing, forming final tables) of the problem of characterization of digital elements libraries used in the process of creating and manufacturing integrated circuits are considered. The analysis of parallelization application at various stages of the characterization problem is carried out. The implementation of the proposed methods is described using the example of developing a web-based characterization system for digital cell libraries.

Keywords: parallel processes, characterization of cell libraries, web-based CAD systems

DOI: 10.17587/it.26.618-624

References

1. **Description** of format of Liberty-file on Synopsis site, available at: <https://www.synopsys.com/> (access date: 22.05.2020) (in Russian).

2. **Khvatov V. M., Garbulina T., Lyalinskaya O. V.** Formation and Verification of Standard Element Libraries in the Design Flow for the Domestic FPGAs, *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems*, Development, 2018, iss. 1, pp. 57—62 (in Russian).

3. **Ian Poole**, ASIC basics tutorial, available at: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/programmable-logic/what-is-an-asic-application-specific-integrated-circuit.php (access date: 03.02.2020).

4. **Lyalinsky A.** Osobennosti postroeniya prikladnykh programm s veb-dostupom, *Informatika*, Jan.-March 2013, no. 1 (37), pp. 76—83, Minsk, OIPI NAN of Belarus, 2013 (in Russian).

5. **PHP documentation**, available at: <https://www.php.net/manual/ru/intro.memcached.php> (access date: 22.05.2020) (in Russian).

6. **Lyalinsky A. A.** Web-based automatic generation of input patterns at characterization of digital cells, *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development*, 2012, Proceedings, edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2012, pp. 95—100 (in Russian).

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ MAKING DECISIONS

УДК 004.942

DOI: 10.17587/it.26.625-630

О. М. Полещук, д-р техн. наук, проф., e-mail: olga.m.pol@yandex.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Модель принятия решений на основе Z -информации

Разработана модель многокритериального принятия решений с учетом достоверности полученных данных. Для формализации информации, содержащей данные и оценки их достоверности, используются Z -числа, определение которых было дано Лотфи Заде в 2011 г. Большинство известных моделей принятия решений на основе Z -чисел ограничены предположением о вероятностной оценке достоверности данных, что значительно сужает область их применения. Настоящая статья частично ликвидирует ограничительные требования при работе с Z -числами. Для компонент Z -чисел с помощью α -уровневых множеств вычисляются агрегирующие показатели, на основе которых определяется показатель сходства между Z -числами. Выбор лучшей альтернативы осуществляется на основе минимума показателя сходства с идеальной альтернативой. Приведен числовой пример, который показывает работу модели и ее эффективность в условиях многокритериального выбора.

Ключевые слова: Z -число, Z -информация, принятие решений, достоверность

Введение

В 2011 г. профессором Калифорнийского университета г. Беркли Лотфи Заде было дано определение Z -числа, которое позволило обрабатывать нечеткую информацию, учитывая ее достоверность (надежность) [1]. Это определение было логичным и актуальным результатом исследований в рамках мягких вычислений, которое вывело оперирование с неопределенностью типа нечеткости на новый, более высокий уровень. Лотфи Заде определил Z -число как пару нечетких чисел, идущих в определенной последовательности. Первое нечеткое число является оценкой некоторой характеристики (параметра, объекта), а второе нечеткое число является оценкой достоверности первого числа. Информация с Z -числами получила название Z -информации [2]. С 2011 г. исследования, связанные с Z -числами [2], и презентации Z -чисел на мировых симпозиумах занимали большую часть научных интересов профессора Лотфи Заде вплоть до его смерти 6 сентября 2017 г.

За прошедшие годы число публикаций, связанных с Z -числами, неуклонно растет. Существенный вклад в развитие теоретических основ Z -чисел и их практических применений внес профессор Р. А. Алиев (Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку) вместе со своими учениками [3–11]. В своих работах они огра-

ничиваются предположением, что вторая компонента Z -чисел является нечетким расширением вероятностной меры. В работах [3, 4, 6–8] авторы рассматривают задачи принятия решений на основе Z -чисел и применяют арифметические операции над Z -числами. В работе [9] предлагается модель формализации групповой экспертной информации на основе Z -чисел. В статье [11] строится первая регрессионная модель на основе исходной Z -информации.

В более поздних работах [5, 10] Р. А. Алиев вместе с соавторами разрабатывает теоретические основы оперирования дискретными и непрерывными Z -числами при условии вероятностной трактовки второй компоненты.

Дискретным Z -числом [5] называется пара нечетких чисел $Z = (\tilde{A}, \tilde{C})$, где $\tilde{A}$ — дискретное нечеткое число с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1]$ (нечеткое расширение значений некоторой действительной переменной) и $\tilde{C}$ — дискретное нечеткое число с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{C}}(x) : [c_1, \dots, c_n] \rightarrow [0, 1]$, $c_1, \dots, c_n \in [0, 1]$, которое является нечетким расширением вероятности C нечеткого числа $\tilde{A} : P(\tilde{A}) = C$ [12].

Дискретным нечетким числом $\tilde{A}$ называется пара $\{x, \mu_{\tilde{A}}(x)\}$, $x \in X$, где $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1]$ — дискретная функция принадлежности $\tilde{A}$ [11]. Дискретное нечеткое число имеет дискретное универсальное множество X (подмножество действительной прямой) [5].

Непрерывным Z -числом [10] называется пара нечетких чисел $Z = (\tilde{A}, \tilde{C})$, где $\tilde{A}$ — непрерывное нечеткое число с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1]$ (нечеткое расширение значений некоторой действительной переменной) и $\tilde{C}$ — непрерывное нечеткое число с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{C}}(x) : [c_1, \dots, c_n] \rightarrow [0, 1]$, $c_1, \dots, c_n \subset [0, 1]$, которое является нечетким расширением вероятности C нечеткого числа $\tilde{A} : P(A) = C$ [12].

Непрерывным нечетким числом $\tilde{A}$ называется пара $\{x, \mu_{\tilde{A}}(x)\}$, $x \in X$, где $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1]$ — непрерывная функция принадлежности $\tilde{A}$. Непрерывное нечеткое число имеет непрерывное универсальное множество X (подмножество действительной прямой) [10].

Нетривиальность определения арифметических операций при условии вероятностной природы второй компоненты состоит в том, что исходная функция распределения вероятностей неизвестна, а известно нечеткое расширение некоторых ее значений, поэтому неизбежны ограничительные предположения. В случае дискретных Z -чисел предполагается, что значения вероятностей связаны некоторой линейной зависимостью [5]. Аналогичного подхода придерживаются авторы работы [13]. В случае непрерывных Z -чисел предполагается, что нормальное распределение является исходным распределением вероятностей первой компоненты [4]. В работе [14], опираясь на определение Z -числа с вероятностной трактовкой [10], авторы разработали модель многокритериального принятия решений для непрерывных Z -чисел при отсутствии предположений о нормальном исходном распределении первой компоненты. В работе [15] Z -числа используются для формализации приближенных рассуждений. В статье [16] авторы предлагают оперировать с Z -числами, преобразуя их в одно нечеткое число, в работе [17] они используют свой подход для решения задач поддержки принятия решений.

В работе [18] рассмотрение Z -чисел не ограничивается вероятностной трактовкой второй компоненты, но ограничивается рассмотрением только треугольных нечетких чисел (нечетких чисел, графиком функции принадлежности которых является треугольник). Авторы преобразуют вторую компоненту в обычное число по методу центра тяжести [19]. Это число используется для определения арифметических операций над Z -числами, ранжирования Z -чисел и расстояния между двумя Z -числами.

Таким образом, к настоящему времени хорошо разработаны вопросы оперирования Z -числами и их использования в задачах принятия решений при условии вероятностной

трактовки вторых компонент. Работы, которые занимаются теоретическими и практическими исследованиями общего случая Z -чисел, немногочисленны, но при этом ограничены рассмотрением только треугольных нечетких чисел в качестве компонент Z -чисел.

Поэтому представленные в настоящей статье исследования, связанные с использованием Z -чисел в задачах принятия решений, являются актуальными.

1. Необходимые понятия и определения

Профессор Лотфи Заде дал следующее *определение Z -числа* [1]:

Z -числом называется упорядоченная пара нечетких чисел $Z = (\tilde{A}, \tilde{R})$, где $\tilde{A}$ — нечеткое число с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1]$, которое является нечетким расширением значений действительной переменной X , а $\tilde{R}$ — нечеткое число с функцией принадлежности $\mu_{\tilde{R}}(x) : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, которое является нечетким расширением значений меры достоверности первой компоненты $\tilde{A}$, такой как надежность, уровень доверия, вероятность, возможность.

В этом оригинальном определении подчеркивается, что оценки достоверности данных могут иметь разную природу, не ограниченную только вероятностной мерой.

В качестве компонент Z -чисел будем рассматривать треугольные и трапециевидальные нечеткие числа, графиками функций принадлежности которых являются соответственно треугольники и трапеции. Трапециевидальные нечеткие числа определяются четырьмя параметрами (абсциссы, соответственно, левой и правой вершин верхнего основания трапеции и длины, соответственно, левого и правого крыльев трапеции). Треугольное нечеткое число является частным случаем трапециевидального нечеткого числа, у которого первые два параметра равны. Поэтому треугольное нечеткое число определяется тремя параметрами.

Согласно работе [20] лингвистической переменной называется пятерка

$$\{X, T(X), U, V, S\},$$

где X — название переменной; $T(X) = \{X_i, i = \overline{1, m}\}$ — терм-множество переменной X ; V — синтаксическое правило, порождающее названия значений лингвистической переменной X ; S — семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной с названием из $T(X)$ нечеткое подмножество универсального множества U .

Семантическим пространством называется лингвистическая переменная с фиксированным терм-множеством.

Лингвистические переменные, функции принадлежности $\mu_l(x), l = \overline{1, m}$, которых удовлетворяют сформулированным ниже требованиям, получили название полных ортогональных семантических пространств [21].

1. Для каждого понятия $X_l, l = \overline{1, m}$, существует $\hat{U}_l \neq \emptyset$, где $\hat{U}_l = \{x \in U : \mu_l(x) = 1\}$ есть точка или отрезок.

2. Пусть $\hat{U}_l = \{x \in U : \mu_l(x) = 1\}$, тогда $\mu_l(x), l = \overline{1, m}$, не убывает слева от $\hat{U}_l$ и не возрастает справа от $\hat{U}_l$.

3. $\mu_l(x), l = \overline{1, m}$, имеют не более двух точек разрыва первого рода.

4. Для каждого $x \in U \sum_{l=1}^m \mu_l(x) = 1$.

Для нечетких чисел находятся агрегирующие показатели в виде обычных чисел (по аналогии с числовыми характеристиками для случайных величин). Один из самых известных показателей находится по методу центра тяжести [19] на основе функции принадлежности и является аналогом математического ожидания для случайной величины. Нечеткое число может быть задано с помощью функции принадлежности или с помощью α -уровневых множеств. Последнее особенно актуально, когда не известен аналитический вид функции принадлежности, и, соответственно, актуально определение агрегирующих показателей для нечетких чисел на основе α -уровневых множеств.

Рассмотрим нечеткое число $\tilde{A}$ с функцией принадлежности $\mu_A(x) = (a_1, a_2, a_L, a_R)$ и определим его α -уровневое множество:

$$A_\alpha = \{x \in R : \mu_A(x) \geq \alpha\} = [A_\alpha^1, A_\alpha^2] = [a_1 - (1 - \alpha)a_L, a_2 + (1 - \alpha)a_R], \alpha \in [0, 1].$$

В работе [22] для треугольного числа $\tilde{A}$ дано определение взвешенной точки Θ как агрегирующего показателя этого числа:

$$\Theta = \int_0^1 \left(\frac{a - (1 - \alpha)a_L + a + (1 - \alpha)a_R}{2} \right) 2\alpha d\alpha = a + \frac{1}{6}(a_R - a_L).$$

Взвешенная точка находится интегрированием середин α -уровневых множеств, умноженных на весовую функцию 2α .

Определим взвешенную точку для трапециoidalного числа с функцией принадлежности $\mu_A(x) = (a_1, a_2, a_L, a_R)$ аналогичным образом:

$$\Theta = \int_0^1 \left(\frac{a_1 - (1 - \alpha)a_L + a_2 + (1 - \alpha)a_R}{2} \right) 2\alpha d\alpha = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) + \frac{1}{6}(a_R - a_L)$$

Рассмотрим два Z -числа $Z_1 = (\tilde{A}_1, \tilde{C}_1), Z_2 = (\tilde{A}_2, \tilde{C}_2)$, где $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \tilde{C}_1, \tilde{C}_2$ — трапециoidalные числа с функциями принадлежности соответственно $\mu_{A_i}(x) = (a_1^i, a_2^i, a_L^i, a_R^i), \mu_{C_i}(x) = (c_1^i, c_2^i, c_L^i, c_R^i), i = \overline{1, 2}$. Обозначим взвешенные точки для чисел $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \tilde{C}_1, \tilde{C}_2$ соответственно $\theta_1, \theta_2, \vartheta_1, \vartheta_2$.

Найдем взвешенные точки ξ_1, ξ_2 для нечетких чисел $\vartheta_1 \tilde{A}_1, \vartheta_2 \tilde{A}_2$, которые получаются умножением нечетких данных $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2$ на агрегирующие показатели (взвешенные точки) достоверности этих данных:

$$\xi_1 = \int_0^1 \vartheta_1 \left(\frac{a_1^1 - (1 - \alpha)a_L^1 + a_2^1 + (1 - \alpha)a_R^1}{2} \right) 2\alpha d\alpha = \vartheta_1 \left(\frac{1}{2}(a_1^1 + a_2^1) + \frac{1}{6}(a_R^1 - a_L^1) \right) = \vartheta_1 \theta_1.$$

Аналогично можно показать, что $\xi_2 = \vartheta_2 \theta_2$.

Определим показатель сходства между Z_1, Z_2 следующим образом:

$$\rho(Z_1, Z_2) = \sqrt{(\theta_1 - \theta_2)^2 + (\theta_1 \vartheta_1 - \theta_2 \vartheta_2)^2 + (\vartheta_1 - \vartheta_2)^2}.$$

2. Постановка задачи и методы ее решения

Пусть $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ — множество альтернатив, $Y = \{Y_1, \dots, Y_n\}$ — множество критериев (характеристик). Каждая альтернатива $V_j, j = \overline{1, m}$, оценивается в рамках каждого критерия $Y_i, i = \overline{1, n}$, с некоторым уровнем достоверности (надежности). Эксперт оценивает альтернативу $V_j, j = \overline{1, m}$, в рамках критерия $Y_i, i = \overline{1, n}$, используя лингвистическую шкалу [23].

Ставится задача выбора лучшей альтернативы по результатам многокритериального оценивания. Под лучшей альтернативой понимается та альтернатива, которая в определенном смысле наиболее близка к некоторой идеальной альтернативе V^{id} .

Решение задачи на первом этапе включает в себя разработку модели формализации экспертной информации с учетом ее достоверности (надежности) на основе Z -чисел. Результаты экспертных данных представляются в виде $Z_{ji} = (\tilde{A}_{ji}, \tilde{C}_{ji}), j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$, где $\tilde{A}_{ji}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$ — нечеткие числа, формализующие термы полных ортогональных семантических

пространств с именами $Y_1, \dots, Y_n$; $\tilde{C}_{ji}$, $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$, — нечеткие числа, формализующие термы полного ортогонального пространства с именем "Достоверность". Построение полных ортогональных семантических пространств осуществляется на основе статистических данных или прямого экспертного опроса. Методы построения подробно изложены в работе [21].

Обозначим $Z_j = ((\tilde{A}_{j1}, \tilde{C}_{j1}), (\tilde{A}_{j2}, \tilde{C}_{j2}), \dots, (\tilde{A}_{jn}, \tilde{C}_{jn}))$, $j = \overline{1, m}$, — оценки альтернативы V_j в рамках критериев Y_i , $i = \overline{1, n}$, а $Z^{id} = ((\tilde{A}_1^{id}, \tilde{C}_1^{id}), (\tilde{A}_2^{id}, \tilde{C}_2^{id}), \dots, (\tilde{A}_n^{id}, \tilde{C}_n^{id}))$ — оценки идеальной альтернативы.

Обозначим $\mu_{ji}(x) = (a_{ji1}, a_{ji2}, a_{jiL}, a_{jiR})$, $\eta_{ji}(x) = (c_{ji1}, c_{ji2}, c_{jiL}, c_{jiR})$, $\mu_i^{id}(x) = (a_{i1}^{id}, a_{i2}^{id}, a_{iL}^{id}, a_{iR}^{id})$, $\eta_i^{id}(x) = (c_{i1}^{id}, c_{i2}^{id}, c_{iL}^{id}, c_{iR}^{id})$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, — функции принадлежности соответственно нечетких чисел $\tilde{A}_{ji}$, $\tilde{C}_{ji}$, $\tilde{A}_i^{id}$, $\tilde{C}_i^{id}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

Вычислим взвешенные точки θ_{ji} , ϑ_{ji} , θ_i^{id} , ϑ_i^{id} , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, соответственно для нечетких чисел $\tilde{A}_{ji}$, $\tilde{C}_{ji}$, $\tilde{A}_i^{id}$, $\tilde{C}_i^{id}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

Определим показатель сходства $\rho(V_j, V^{id})$ между альтернативой V_j , $j = \overline{1, m}$, и идеальной альтернативой V^{id} следующим образом:

$$\rho(V_j, V^{id}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i ((\theta_{ji} - \theta_i^{id})^2 + (\theta_{ji}\vartheta_{ji} - \theta_i^{id}\vartheta_i^{id})^2 + (\vartheta_{ji} - \vartheta_i^{id})^2)},$$

где ω_i , $i = \overline{1, n}$, — весовые коэффициенты критериев Y_i , $i = \overline{1, n}$.

Если $\rho(V_k, V^{id}) = \min_{j=\overline{1, m}} \rho(V_j, V^{id})$, то альтернатива V_k является лучшей.

2. Вычислительный эксперимент

В качестве примера рассмотрим вопрос принятия решений о модернизации оборудования на предприятии, выпускающем некоторую продукцию.

Пусть $V = \{V_1, V_2, V_3\}$ — множество альтернатив, где V_1 — "Модернизация не требуется"; V_2 — "Требуется модернизация без расширения производственных площадей"; V_3 — "Требуется модернизация с расширением производственных площадей".

Пусть $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$ — множество критериев, где Y_1 — "Снижение себестоимости продукции (в процентах)"; Y_2 — "Увеличение продаж (в процентах)"; Y_3 — "Риски (продление модернизации, увеличение реальных затрат на модернизацию, неэффективность,...)"; Y_4 — "Улучшение качества продукции". Построим лингвистические шкалы в виде полных

ортогональных семантических пространств для критериев Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 с термами VL — "Очень низкое", L — "Низкое", M — "Среднее", H — "Высокое", VH — "Очень высокое" [21, 23]. Универсальные множества для шкал выбираются на основе мнений экспертов и ожидаемых результатов. Обозначим функции принадлежности термов для критериев Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 соответственно $\mu_{ik}(x)$, $i = \overline{1, 4}$, $k = \overline{1, 5}$. Тогда

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= (0, 0, 15), \mu_{12} = (15, 15, 10), \\ \mu_{13} &= (25, 10, 15), \mu_{14} = (40, 15, 10), \mu_{15} = (50, 10, 0), \\ \mu_{21} &= (0, 0, 25), \mu_{22} = (25, 25, 20), \\ \mu_{23} &= (45, 20, 30), \mu_{24} = (75, 30, 25), \mu_{25} = (100, 25, 0), \\ \mu_{31} &= (0, 0, 0.25), \mu_{32} = (0.25, 0.25, 0.25), \\ \mu_{33} &= (0.5, 0.25, 0.25), \mu_{34} = (0.75, 0.25, 0.25), \\ \mu_{35} &= (1, 0.25, 0), \\ \mu_{41} &= (0, 0, 6.25), \mu_{42} = (6.25, 0, 6.25), \\ \mu_{43} &= (12.5, 6.25, 6.25), \mu_{44} = (18.75, 6.25, 6.25), \\ \mu_{45} &= (25, 6.25, 0). \end{aligned}$$

Построим лингвистическую шкалу в виде полного ортогонального пространства с именем "Достоверность", термами: U — "Не уверен"; NVL — "Не очень уверен"; L — "Уверен"; VL — "Очень уверен"; EL — "Полностью уверен" и их функциями принадлежности:

$$\begin{aligned} \mu_U &= (0, 0, 0.25), \mu_{NVL} = (0.25, 0.25, 0.25), \\ \mu_L &= (0.5, 0.25, 0.25), \mu_{VL} = (0.75, 0.25, 0.25), \\ \mu_{EL} &= (1, 0.25, 0). \end{aligned}$$

В таблице представлены данные по оценкам альтернатив.

Оценки альтернатив

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
V_1	VL, L	L, L	VL, EL	L, VL
V_2	H, VL	H, VL	M, L	H, EL
V_3	H, EL	VH, VL	H, VL	H, EL

Пусть оценки идеальной альтернативы выглядят следующим образом:

$$V^{id} = ((VH, VL), (VH, EL), (VH, VL), (H, EL)).$$

Для вычислений $\rho^2(V_j, V^{id})$, $j = \overline{1, 3}$, отобразим универсальные множества значений критериев на отрезок $[0, 1]$. Соответственно преобразуются функции принадлежности термов лингвистических шкал, используемых для

оценки критериев. Например, для критерия Y_1 функции принадлежности будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}\mu_{11} &= (0, 0, 0.3), \mu_{12} = (0.3, 0.3, 0.2), \\ \mu_{13} &= (0.5, 0.2, 0.3), \mu_{14} = (0.8, 0.3, 0.2), \\ \mu_{15} &= (1, 0.2, 0).\end{aligned}$$

Взвешенные точки для нечетких чисел с такими функциями принадлежности соответственно будут равны 0.05, 0.283, 0.517, 0.783, 0.967.

Будем предполагать, что все критерии имеют равные весовые коэффициенты. Вычислим $\rho^2(V_j, V^{id})$, $j = 1, 3$. Получим:

$$\begin{aligned}\rho(V_1, V^{id}) &= 1.257; \quad \rho(V_2, V^{id}) = 0.459; \\ \rho(V_3, V^{id}) &= 0.343.\end{aligned}$$

Лучшая альтернатива V_3 — "Требуется модернизация с расширением производственных площадей".

Заключение

Оценка достоверности поступающей информации играет существенную роль в задачах поддержки принятия решений. Однако долгие годы эта оценка не учитывалась должным образом из-за отсутствия адекватного математического аппарата. Как правило, эта оценка проводилась методами теории вероятностей, поэтому из всех типов неопределенности учитывалась только неопределенность случайного характера. Переломным моментом этой ситуации стало определение Z -числа, данное профессором Лотфи Заде в 2011 г., которое открыло дверь в мир новых возможностей для обработки информации с неопределенностью разных типов.

С 2011 г. начались исследования, связанные с оперированием Z -числами, их ранжированием, анализом, прогнозом и использованием в задачах принятия решений. К настоящему времени не существует единого подхода в рамках этих исследований. Каждый из известных подходов имеет свои недостатки, поэтому дальнейшие исследования, связанные с теоретическими основами Z -чисел и их практическими применениями, актуальны и своевременны.

В настоящей работе решается задача поддержки принятия решений при отсутствии ограничений на вторую компоненту Z -чисел, что дает новые возможности для обработки Z -информации с разными типами неопределенности. Оценки альтернатив по каждому критерию представляются в виде Z -чисел, а сами альтернативы в условиях многокритериальности формализуются в виде совокупности Z -чисел. Оригинальное

определение агрегирующих показателей для компонент Z -чисел, основанное на учете всех α -уровневых множеств, легло в основу определения показателя сходства между Z -числами и показателя сходства между альтернативами.

Выбор лучшей альтернативы в условиях многокритериальности осуществляется на основе минимума показателя сходства между альтернативами и идеальной альтернативой.

Приведенный числовой пример показывает простоту использования и эффективность решения задачи принятия решений по выбору лучшей альтернативы в условиях Z -информации.

Список литературы

1. Zadeh L. A. A Note on Z-numbers // Information Sciences. 2011. Vol. 181, N. 14. P. 2923–2932.
2. Zadeh L. A. Methods and Systems for Applications with Z-Numbers. United States Patent, Patent No.: US 8,311,973 B1, Date of Patent: Nov. 13, 2012.
3. Aliyev R. A., Huseynov O. H., Zeinalova L. M. Decision-making under Z-information // Human-centric decision-making models for social sciences. 2013. Springer-Verlag. P. 233–252.
4. Gardashova L. A. Application of Operational Approaches to Solving Decision Making Problem Using Z-Numbers // Applied Mathematics. 2014. Vol. 5, N. 9. P. 1323–1334.
5. Aliyev R. A., Alizadeh A. V., Huseynov O. H. The arithmetic of discrete Z-numbers // Information Sciences. 2015. Vol. 290, N. 1. P. 134–155.
6. Aliyev R. R. Similarity based multi-attribute decision making under Z-information // Proceedings of the Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. 2015. P. 33–39.
7. Aliyev R. R., Talal Mraizid D. A., Huseynov O. H. Expected utility based decision making under Z-information and its application // Computational Intelligence and Neuroscience. 2015. Vol. 3. P. 364512.
8. Sharghi P., Jabbarova K. Hierarchical decision making on port selection in Z-environment // Proceedings of the Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. 2015. P. 93–104.
9. Aliyev R. K., Huseynov O. H., Aliyeva K. R. Aggregation of an expert group opinion under Z-information // Proceedings of the Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control. 2015. P. 115–124.
10. Aliyev R. A., Huseynov O. H., Zeinalova L. M. The arithmetic of continuous Z-numbers // Information Sciences. 2016. Vol. 373. P. 441–460.
11. Zeinalova L. M., Huseynov O. H., Sharghi P. A Z-Number Valued Regression Model and its Application // Intelligent Automation and Soft Computing. 2017. Vol. 24. P. 187–192.
12. Zadeh L. A. Probability measures of fuzzy events // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 1968. Vol. 23, N. 2. P. 421–427.
13. Shahila Bhanu M., Velammal G. Operations on Zadeh's Z-numbers // IOSR Journal of Mathematics. 2015. Vol. 11, N. 3. P. 88–94.
14. Poleshchuk O. Novel approach to multicriteria decision making under Z-information // Proceedings of the 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. P. 8867607–8867612.
15. Yager R. R. On Z-valuations using Zadeh's Z-numbers // International Journal of Intelligent Systems. 2012. Vol. 27, N. 3. P. 259–278.
16. Kang B., Wei D., Li Y., Deng Y. A method of converting Z-number to classical fuzzy number // Journal of Information and Computational Science. 2012. Vol. 9, N. 3. P. 703–709.
17. Kang B., Wei D., Li Y., Deng Y. Decision making using Z-numbers under uncertain environment // Journal of Information and Computational Science. 2012. Vol. 8, N. 7. P. 2807–2814.

18. **Wang, F., Mao, J.** Approach to multicriteria group decision making with Z-numbers based on Topsis and Power Aggregation Operators // *Mathematical problems in Engineering*. 2019. P. 1–18.
19. **Yager R. R., Filev D. P.** On the issue of defuzzification and selection based on a fuzzy set // *Fuzzy Sets and Systems*. 1993. Vol. 55, N. 3. P. 255–272.
20. **Zadeh L. A.** The Concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // *Information Sciences*. 1975. Vol. 8. P. 199–249.

21. **Poleshchuk O., Komarov E.** Expert Fuzzy Information Processing // *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 2011. Vol. 268. P. 1–239.
22. **Chang Y.-H.** Hybrid fuzzy least- squares regression analysis and its reliability measures // *Fuzzy Sets and Systems*. 2001. N. 119. P. 225–246.
23. **Poleshchuk O.** Creation of linguistic scales for expert evaluation of parameters of complex objects based on semantic scopes // *Proceedings of the 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon* 2018. P. 8501686–8501691.

O. M. Poleshchuk, D.Sc., Professor, e-mail: olga.m.pol@yandex.ru,
Moscow Bauman State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Decision Making Model Based on the Z-Information

A model of multicriteria decision making is developed taking into account the reliability of the data obtained. To formalize the information containing the data and assess their reliability, Z-numbers are used, the definition of which was given by Lotfi Zadeh in 2011. Most of the well-known decision models based on Z-numbers are limited by the assumption of a probabilistic assessment of the reliability of the data, which significantly narrows the scope of these models. This article partially removes the restrictive requirements when working with Z-numbers. For components of Z-numbers, aggregate indicators are calculated using α -cuts, based on which the similarity indicator between Z-numbers is determined. Choosing the best alternative is based on the minimum indicator of similarity with the ideal alternative. A numerical example is presented that shows the operation of the model and its effectiveness under conditions of multi-criteria selection.

Keywords: Z-number, Z-information, decision making, reliability

DOI: 10.17587/it.26.625–630

References

1. **Zadeh L. A.** A Note on Z-numbers, *Information Sciences*, 2011, vol. 181, no. 14, pp. 2923–2932.
2. **Zadeh L. A.** Methods and Systems for Applications with Z-Numbers, *United States Patent*, Patent No.: US 8,311,973 B1, Date of Patent: Nov. 13, 2012.
3. **Aliiev R. A., Huseynov O. H., Zeinalova L. M.** Decision-making under Z-information, Human-centric decision-making models for social sciences, 2013, Springer-Verlag, pp. 233–252.
4. **Gardashova L. A.** Application of Operational Approaches to Solving Decision Making Problem Using Z-Numbers, *Applied Mathematics*, 2014, vol. 5 (9), pp. 1323–1334.
5. **Aliiev R. A., Alizadeh A. V., Huseynov O. H.** The arithmetic of discrete Z-numbers, *Information Sciences*, 2015, vol. 290 (1), pp. 134–155.
6. **Aliyev R. R.** Similarity based multi-attribute decision making under Z-information, *Proceedings of the Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control*, 2015, pp. 33–39.
7. **Aliyev R. R., Talal Mraizid D. A., Huseynov O. H.** Expected utility based decision making under Z- information and its application, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2015, vol. 3, p. 364512.
8. **Sharghi P., Jabbarova K.** Hierarchical decision making on port selection in Z-environment, *Proceedings of the Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control*, 2015, pp. 93–104.
9. **Aliiev R. K., Huseynov O. H., Aliyeva K. R.** Aggregation of an expert group opinion under Z-information, *Proceedings of the Eighth International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control*, 2015, pp. 115–124.
10. **Aliiev R. A., Huseynov O. H., Zeinalova L. M.** The arithmetic of continuous Z-numbers, *Information Sciences*, 2016, vol. 373, pp. 441–460.
11. **Zeinalova L. M., Huseynov O. H., Sharghi P.** A Z-Number Valued Regression Model and its Application, *Intelligent Automation and Soft Computing*, 2017, vol. 24, pp. 187–192.
12. **Zadeh L. A.** Probability measures of fuzzy events, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 1968, vol. 23 (2), pp. 421–427.
13. **Shahila Bhanu M., Velammal G.** Operations on Zadeh's Z-numbers, *IOSR Journal of Mathematics*, 2015, vol. 11 (3), pp. 88–94.
14. **Poleshchuk O.** Novel approach to multicriteria decision making under Z-information, *Proceedings of the 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon — 2019*, pp. 8867607–8867612.
15. **Yager R. R.** On Z-valuations using Zadeh's Z-numbers, *International Journal of Intelligent Systems*, 2012, vol. 27 (3), pp. 259–278.
16. **Kang B., Wei D., Li Y., Deng Y.** A method of converting Z-number to classical fuzzy number, *Journal of Information and Computational Science*, 2012, vol. 9(3), pp. 703–709.
17. **Kang B., Wei D., Li Y., Deng Y.** Decision making using Z-numbers under uncertain environment, *Journal of Information and Computational Science*, 2012, vol. 8 (7), pp. 2807–2814.
18. **Wang F., Mao J.** Approach to multicriteria group decision making with Z-numbers based on Topsis and Power Aggregation Operators, *Mathematical problems in Engineering*, 2019, pp. 1–18.
19. **Yager R. R., Filev D. P.** On the issue of defuzzification and selection based on a fuzzy set, *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, vol. 55 (3), pp. 255–272.
20. **Zadeh L. A.** The Concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Information Sciences*, 1975, vol. 8, pp. 199–249.
21. **Poleshchuk O., Komarov E.** Expert Fuzzy Information Processing, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2011, vol. 268, pp. 1–239.
22. **Chang Y.-H.** Hybrid fuzzy least- squares regression analysis and its reliability measures, *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, N. 119, pp. 225–246.
23. **Poleshchuk O.** Creation of linguistic scales for expert evaluation of parameters of complex objects based on semantic scopes, *Proceedings of the 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon — 2018*, pp. 8501686–8501691.

Т. К. Кравченко, д-р экон. наук, проф. департамента бизнес-информатики, tkravchenko@hse.ru,
С. Н. Брускин, канд. экон. наук, доц. департамента бизнес-информатики, sbruskin@hse.ru,
Д. В. Исаев, канд. экон. наук, доц. департамента финансового менеджмента, disaev@hse.ru,
Е. В. Кузнецова, канд. экон. наук, доц. департамента бизнес-информатики, ev.kuznetsova@hse.ru,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва

Приоритизация элементов бэклога ИТ-продукта с применением систем поддержки принятия решений

Рассматриваются вопросы применения систем поддержки принятия решений в ИТ-проектах, реализуемых с применением методологии Scrum. Выявлена ограниченность существующих методов приоритизации высокоуровневых элементов бэклога продукта (эпиков и тем). Предложен способ приоритизации элементов бэклога в условиях множественности критериев, неопределенности внешней среды проекта и наличия нескольких экспертов с применением системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова: Scrum, ИТ-проект, элемент бэклога продукта, эпик, тема, приоритизация, экспертный подход, критерий, риск, неопределенность, система поддержки принятия решений

Введение

В настоящее время наряду с традиционными подходами к реализации ИТ-проектов [1] все чаще применяются разнообразные "гибкие" (agile) методы. В соответствии с разработками Международного института бизнес-анализа ключевыми элементами гибкого мышления является проверка и адаптация, а также наличие обратных связей, влияющих на выполнение соответствующих работ [2]. К числу особенностей гибких методов также относятся динамический характер требований, которые регулярно корректируются и уточняются в ходе проекта, сочетание инкрементальных и итеративных операций, а также обязательное наличие постоянной обратной связи с заказчиком разработки [3].

Среди гибких подходов значительную популярность приобрела методология Scrum, представляющая собой "фреймворк, который помогает решать изменяющиеся в процессе работы задачи, чтобы продуктивно и творчески поставлять клиентам продукты с максимальной возможной ценностью" [4]. По данным эмпирических исследований применение Scrum при реализации проектов разработки программного обеспечения позволяет повысить эффективность командной работы, обеспечить достижение бизнес-целей и соблюдение требований к качеству продукта и, в целом, обеспечить общий успех проекта и высокую отдачу от инвестиций [5]. Гибкие подходы могут быть более эффективными, чем классические. Однако, начиная с определенного масштаба проекта, в условиях высокой неопределенности, а так-

же при отсутствии обоснованной приоритизации реализуемых требований они являются довольно рискованными.

В соответствии с методологией Scrum развитие программного продукта осуществляется посредством спринтов (sprints) — фиксированных во времени итераций, в ходе каждой из которых создается инкремент (increment) продукта — его новая версия, готовая к использованию. При этом одним из важнейших понятий является бэклог продукта (product backlog) — упорядоченный список требований к продукту, являющийся единственным источником изменений, которые подлежат реализации в ходе проекта [4]. Каждое из таких требований (функций) представляет собой элемент бэклога продукта (product backlog item).

Руководство по Scrum [4] не предусматривает какой-либо классификации элементов бэклога. Тем не менее, как в теории (например, [6]), так и на практике широко применяется деление элементов бэклога продукта на высокоуровневые и низкоуровневые в зависимости от степени укрупненности требований, а также времени, необходимого для их реализации. К низкоуровневым элементам относятся пользовательские истории (user stories) — наиболее детальные требования, реализация которых может быть выполнена в рамках одного спринта. Поскольку часто возникают ситуации, когда отдельно взятая пользовательская история не позволяет судить о ее ценности для продукта, несколько историй, дополняющих друг друга при создании ценности, должны рассматриваться в совокупности. При такой группировке

историй возникает эпик (epic) — высокоуровневый элемент бэклога, отражающий требования к продукту в укрупненном виде. Несколько эпиков могут быть сгруппированы в темы (themes), которые характеризуют соотношение разработки с бизнес-целями организации. Высокоуровневые элементы бэклога продукта (эпики и темы) также отличаются от пользовательских историй тем, что сроки их реализации составляют от нескольких недель до нескольких месяцев и, таким образом, не укладываются во временные рамки одного спринта.

Описанная трехуровневая структура, включающая пользовательские истории, эпики и темы, представлена на рис. 1. Такая структура описывает наиболее общий случай, соответствующий достаточно сложным и масштабным проектам.

Бэклог продукта трансформируется с течением времени: на регулярной основе происходит его уточнение, включая как состав элементов, так и их приоритеты. Ключевые аспекты управления бэклогом находятся в ведении владельца продукта (product owner), который несет ответственность за достижение его максимальной ценности в результате деятельности команды разработки. В Руководстве по Scrum [4] отмечается, что роль владельца продукта должен исполнять один человек (а не группа людей), поскольку только так можно избежать нежелательного эффекта размывания ответственности. В то же время при трансформации бэклога продукта владелец продукта может привлекать экспертов — как участников проекта, так и внешних специалистов.

В настоящее время необходимость приоритизации элементов бэклога продукта не подвергается сомнению, о чем свидетельствуют многочис-

ленные методы, применяемые на практике (некоторые из них рассмотрены ниже). Тем не менее, в ряде случаев для повышения обоснованности принимаемых решений приоритизацию необходимо осуществлять с особой тщательностью (будем называть такую приоритизацию "усиленной"). К факторам, обуславливающим необходимость "усиленной" приоритизации, относятся:

- важность принимаемых решений и, соответственно, высокая цена управленческих ошибок;
- масштаб проекта (число одновременно реализуемых эпиков, численность и число команд разработчиков, длительность проекта);
- сложный состав и изменчивость бэклога продукта, следствием чего является неочевидность принимаемых решений;
- наличие нескольких заинтересованных сторон и, соответственно, необходимость учета разных (возможно, противоречивых) интересов;
- изменчивость и степень неопределенности условий реализации проекта, оказывающих влияние на принимаемые решения и определяющих уровень рисков, связанных с проектом.

Сказанное означает, что "усиленная" приоритизация актуальна не во всех ситуациях, а только при наличии всех (или некоторых) перечисленных условий. Прежде всего, она относится лишь к проектам определенных типов (примером могут служить проекты цифровой трансформации бизнеса, которые характеризуются высокими рисками, быстрой динамикой изменений, а также взаимным влиянием технологий и используемых бизнес-решений). Также можно сделать вывод о том, что "усиленная" приоритизация относится только к высокоуровневым элементам бэклога продукта (эпикам и темам), что связано со свойствами таких элементов, представленными ниже.

Во-первых, высокоуровневые элементы бэклога имеют особую важность, поскольку именно они определяют планирование и реализацию детальных пользовательских историй в рамках отдельных спринтов.

Во-вторых, любой высокоуровневый элемент практически всегда может рассматриваться в разрезе разных аспектов. Это означает наличие нескольких критериев, в соответствии с которыми осуществляется приоритизация эпиков и тем.

В-третьих, реализация эпика или темы занимает большее время по сравнению с реализацией пользовательских историй. Поэтому в условиях высокой изменчивости внешней среды при приоритизации высокоуровневых



Рис. 1. Иерархическая структура бэклога продукта

элементов бэклога продукта следует принимать во внимание наличие нескольких проблемных ситуаций — возможных состояний внешней среды проекта в будущем.

В-четвертых, приоритизация эпиков и тем требует повышенной объективности и обоснованности. Поэтому представляется обоснованным участие в данном процессе нескольких экспертов, с последующим обобщением их мнений.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка рекомендаций в области приоритизации высокоуровневых элементов бэклога продукта (эпиков и тем) в условиях многокритериальности, неопределенности условий реализации и рамок проекта, а также плюрализма мнений лиц, задействованных в процедуре приоритизации.

1. Существующие методы приоритизации элементов бэклога продукта

Рассмотрим несколько наиболее известных методов, которые в настоящее время активно используются для решения задачи приоритизации элементов бэклога продукта.

В 1980-е годы группой японских ученых под руководством Н. Кано была предложена модель, связывающая качественные характеристики продуктов с удовлетворенностью клиентов [7]. Данная модель, получившая название модели Кано, впоследствии приобрела значительную популярность для оценки свойств продуктов и услуг в самых разных отраслях. Модель основана на предположении о том, что удовлетворенность клиентов зависит от набора характеристик (свойств или функциональных возможностей) продукта. В то же время отмечается, что зависимость удовлетворенности от предоставляемых характеристик имеет различный характер. Поэтому в рамках модели все качественные характеристики продукта подразделяются на пять категорий.

Одномерные (one-dimensional) характеристики влияют на удовлетворенность линейным образом: чем в большей степени они предоставляются — тем выше удовлетворенность клиентов. *Привлекающие* (attractive) характеристики вызывают одобрение клиентов, однако их отсутствие не приводит к отторжению продукта. Наличие *обязательных* (must-be) свойств рассматривается клиентами как необходимое условие, поэтому их отсутствие неизбежно приводит к неудовлетворенности и негативному мнению о продукте. К *несущественным* (indifferent) характеристикам относятся те, к которым клиенты относятся безразлично, и

которые никак не влияют на их удовлетворенность. Наконец, к *реверсивным* (reverse) относятся свойства продукта, не имеющие отношения к удовлетворенности клиентов.

Похожая классификация характеристик и функциональных возможностей продуктов применяется в рамках "московского" (MoSCoW) метода [8]. Данный метод предусматривает подразделение функций на четыре категории: обязательные (must have, M), важные, хотя и не критичные (should have, S), желательные (could have, C) и несущественные (won't have, W). При этом внутри каждой из категорий какая-либо дополнительная детализация не предусматривается.

Для приоритизации также может применяться показатель WSJF (weighted shortest job first) [9]. Он рассчитывается как отношение стоимости задержки (cost of delay) реализации той или иной функции к продолжительности соответствующих работ (job duration, job size). При этом и стоимость задержки, и продолжительность работ выражаются в условных баллах или пунктах. Стоимость задержки, в свою очередь, определяется совокупностью (суммой баллов) таких факторов, как ценность для клиента или бизнеса (user—business value), степень срочности (time criticality), а также снижение рисков или реализация возможностей (risk reduction or opportunity enablement).

Еще одним методом приоритизации является развертывание функции качества (quality function deployment, QFD) и его модификация для проектов разработки программного обеспечения (software quality function deployment, SQFD) [10]. Данный метод предусматривает формирование перечня потребностей клиентов, определение "голоса клиента" (наиболее важных требований, значимость которых выражается в баллах), определение "голоса компании" (функций продукта, направленных на удовлетворение требований), а также определение силы воздействия той или иной функции на удовлетворение того или иного требования (также в условных баллах). На этой основе для каждой функции рассчитывается сумма попарных произведений двух характеристик, имеющих место для каждого из требований. Первая из этих характеристик — важность требований, на удовлетворение которых направлена данная функция, а вторая — сила воздействия данной функции на соответствующие требования. В результате предпочтение отдается функциям с наибольшим значением суммы попарных произведений этих двух характеристик.

Систематизация традиционных методов приоритизации элементов бэклога продукта показывает, что они носят преимущественно

эвристический и качественный характер. Эти методы имеют два неоспоримых достоинства. Во-первых, это простота реализации, позволяющая решать задачу очень быстро (что представляется весьма важным в условиях ограниченности времени, выделяемого на подобные задачи). Второе — то, что эти методы в совокупности дают довольно полную картину в отношении критериев, на основе которых осуществляется приоритизация.

В то же время существующие методы имеют ряд ограничений, которые представляются актуальными для приоритизации высокоуровневых элементов бэклога продукта в свете обозначенных выше факторов сложности. Во-первых, они не предусматривают многокритериальность: как правило, применяется лишь обобщенная оценка элементов в соответствии с некоторым интегральным критерием. Во-вторых, существующие методы не принимают во внимание изменчивость внешней среды проекта, в результате чего не учитываются возможные различия в приоритизации элементов бэклога в зависимости от возможных состояний внешней среды в будущем. В-третьих, не учитывается возможность наличия нескольких экспертов, задействованных в процедуре приоритизации, и, соответственно, отсутствуют какие-либо процедуры обобщения разных экспертных мнений.

Сказанное свидетельствует о потребности в методах, предусматривающих многокритериальную оценку высокоуровневых элементов бэклога продукта, с учетом возможных состояний внешней среды проекта и возможностью обобщения оценок нескольких экспертов.

2. Постановка задачи принятия решения в контексте приоритизации элементов бэклога продукта

Для решения задачи приоритизации высокоуровневых элементов бэклога продукта представляется целесообразным применение методов многокритериальной поддержки принятия решений (multi-criteria decision making, MCDM), предусматривающих наличие нескольких проблемных ситуаций и нескольких экспертов. Соответственно, основными элементами задачи поддержки принятия решений помимо альтернатив (объектов оценки) являются критерии, проблемные ситуации (моделируемые состояния внешней среды) и эксперты. При этом применяемые методы принятия решений должны учитывать относительную значимость критериев, вероятности возникновения тех или иных ситу-

аций (либо отсутствие вероятностей в случае неопределенности в условиях принятия решения), а также степень компетентности экспертов.

Рассмотрим подробнее каждый из перечисленных элементов применительно к задаче приоритизации высокоуровневых элементов бэклога продукта — эпиков и тем.

В данной задаче в качестве альтернатив (объектов оценки) выступают сами элементы бэклога продукта. Каждой из альтернатив в конечном счете должна быть присвоена расчетная оценка, на основе которой впоследствии будут определяться приоритеты. При этом предполагается, что элементы бэклога являются независимыми (не связанными друг с другом), поэтому каждая из альтернатив оценивается отдельно, вне зависимости от оценок других элементов.

Критерии оценки альтернатив (т.е. элементов бэклога продукта) формируются с учетом специфики того или иного проекта. В частности, могут применяться такие критерии, как ценность для бизнеса, срочность, перспективность, влияние на социальную сферу. Кроме того, при формировании системы критериев оценки элементов бэклога продукта неизбежно возникает вопрос о том, каким образом следует учитывать ресурсы (трудовые, финансовые, ресурсы времени), необходимые для реализации каждого из элементов бэклога. Здесь можно выделить два подхода.

Первый подход предусматривает рассмотрение ресурсов в качестве одного (или даже нескольких) из критериев. Недостатком такого подхода является риск того, что ресурсоемкие элементы бэклога, даже если они действительно важны для бизнеса, будут иметь относительно низкий приоритет и в результате будут откладываться "на потом". При втором подходе (который представляется более адекватным) ресурсы не рассматриваются в качестве критериев. В этом случае приоритизация элементов бэклога осуществляется безотносительно ресурсов на их реализацию, а их выбор осуществляется путем решения известной задачи о рюкзаке, с учетом ресурсных ограничений [11].

Можно выделить два способа формирования системы критериев. Самым простым (и вполне уместным в большинстве случаев) является представление критериев в виде конечного списка (перечня). Кроме того, может использоваться иерархическая структура, когда критерии (все или некоторые) имеют нижестоящие элементы ("подкритерии"). Пример такой иерархии приведен в одной из работ Т. Саати [12], где в задаче принятия решения рассматриваются пять критериев, два из которых раз-

бываются на несколько подкритериев второго уровня.

Проблемные ситуации, которые принимаются во внимание при оценке альтернатив, также могут быть сформированы разными способами. Здесь, как и для критериев, самым простым является формирование списка (перечня). Данный подход является вполне уместным при наличии небольшого числа ситуаций, которые могут быть легко идентифицируемы. В более сложных случаях моделирование ситуаций основывается на сочетании нескольких факторов, в совокупности определяющих состояние внешней среды. При этом делается допущение, что каждому из факторов соответствует несколько возможных значений (условий). Если эти значения могут быть представлены в бинарной форме ("да" или "нет"), то общее число ситуаций составляет 2^m , где m — число факторов. В общем случае каждому фактору может соответствовать любое число возможных значений, и тогда общее число ситуаций равно произведению чисел значений каждого из факторов. При этом если некоторые комбинации представляются невозможными или маловероятными, то их можно исключить из рассмотрения.

Если рассматриваемые факторы являются независимыми и могут принимать свои значения с определенными вероятностями, то вероятность той или иной ситуации определяется произведением вероятностей условий, ее определяющих. При этом в случае исключения маловероятных комбинаций потребуется нормирование вероятностей остальных ситуаций, чтобы их сумма осталась равной единице. Если же факторы не являются независимыми (т.е. вероятности значений одного фактора зависят от значений другого), то можно построить иерархию, расположив значения каждого из факторов на своем уровне. В этом случае каждому из значений вышестоящего фактора инцидентны возможные значения нижестоящего, а соединяющим их дугам присваиваются условные вероятности.

Иногда определить вероятности значений факторов (и, соответственно, рассматриваемых ситуаций) не представляется возможным вследствие отсутствия релевантной статистической базы и накопленного опыта. В таких случаях может быть рассмотрено допущение о равной вероятности всех возможных проблемных ситуаций, либо задача может решаться в условиях неопределенности, без учета вероятностей.

В качестве экспертов, участвующих в процессе приоритизации, могут рассматриваться лица, специально приглашенные владельцем продукта. Например, это могут быть некоторые

участники проекта или внешние консультанты. Эксперты могут считаться равнозначными, либо для них могут применяться весовые коэффициенты, характеризующие значимость (компетентность) того или иного эксперта.

Таким образом, при постановке задачи приоритизации возникает потребность в определении весовых коэффициентов ее отдельных элементов — критериев, проблемных ситуаций и экспертов. Определение весов осуществляется экспертным путем — либо напрямую (в случае небольшого числа взвешиваемых элементов), либо на основе локальных (вспомогательных) задач ранжирования. В частности, во втором случае может быть использована двухуровневая или многоуровневая (в зависимости от представления критериев, ситуаций или экспертов) модель метода анализа иерархий, с попарным сравнением рассматриваемых элементов и их оценками с помощью "фундаментальной" вербально-числовой шкалы [13]. При этом для обеспечения процедур оценивания и выполнения соответствующих расчетов могут быть использованы специализированные программные продукты, поддерживающие метод анализа иерархий (например, Super Decisions, Expert Choice, Transparent Choice, Decision Lens и другие).

3. Методы и технологии решения задачи приоритизации элементов бэклога продукта

Приоритизация элементов бэклога продукта при наличии нескольких критериев, нескольких проблемных ситуаций и нескольких экспертов может быть выполнена с применением методов принятия решений, основанных на принципах большинства, пессимизма, оптимизма, Гурвица и Лапласа [14]. В любом случае в результате расчетов формируется интегральный показатель, на основе значений которого осуществляется ранжирование (приоритизация) сравниваемых объектов.

Метод, основанный на использовании принципа большинства, применяется в условиях риска, т.е. в случае, когда для каждой ситуации определяется ее вероятность. В соответствии с данным принципом более высокий приоритет имеют альтернативы, которые оцениваются экспертами наиболее высоко по совокупности всех критериев, с учетом всех рассматриваемых ситуаций. При этом принимаются во внимание такие характеристики, как относительная важность критериев, вероятности ситуаций и компетентность экспертов. Оценка альтерна-

Особенности постановки задачи при использовании разных принципов согласования экспертных оценок по проблемным ситуациям

Элементы задачи	Согласование оценок по совокупности проблемных ситуаций				
	Принцип большинства	Принцип пессимизма	Принцип оптимизма	Принцип Гурвица	Принцип Лапласа
Число альтернатив	2 и более				
Число критериев	2 и более				
Веса критериев	Да				
Число проблемных ситуаций	2 и более				
Вероятности проблемных ситуаций	Да	Нет			
Коэффициент пессимизма—оптимизма	Нет			Да	Нет
Число экспертов	2 и более				
Коэффициенты компетентности экспертов	Да				

тив может осуществляться в количественной (балльной) или порядковой (ранговой) шкалах.

Если задача решается в условиях неопределенности (когда определить вероятности проблемных ситуаций не представляется возможным), то обобщение оценок альтернатив по совокупности ситуаций может быть выполнено на основе принципов пессимизма, оптимизма, Гурвица и Лапласа. При этом обобщение оценок по экспертам по-прежнему проводится в соответствии с принципом большинства, с учетом коэффициентов их компетентности.

При использовании принципа пессимизма ранжирование альтернатив осуществляется с максимальной осмотрительностью: итоговая оценка альтернативы равна наименьшей из обобщенных оценок, рассчитанных для каждой из проблемных ситуаций. В соответствии с принципом оптимизма, наоборот, итоговая оценка альтернативы представляет собой наибольшую из обобщенных оценок по проблемным ситуациям.

Принцип Гурвица предусматривает определенное сочетание принципов пессимизма и оптимизма, поэтому его также называют принципом пессимизма-оптимизма. Для определения степени сочетания "пессимистической" и "оптимистической" парадигм применяется специальный весовой коэффициент (коэффициент пессимизма-оптимизма), значения которого могут находиться в диапазоне от нуля до единицы. Данный параметр характеризует преобладание принципа оптимизма (если значение коэффициента ближе к нулю) или пессимизма (если его значение ближе к единице). В частности, нулевое значение коэффициента означает применение принципа оптимизма в чистом виде, единица соответствует чистому принципу пессимизма, а значение 0,5 означает, что принципы оптимизма и пессимизма принимаются во внимание в равной мере.

Что касается принципа Лапласа, то он основан на допущении о равенстве вероятностей всех проблемных ситуаций.

Особенности постановки задачи принятия решений с использованием перечисленных принципов представлены в табл. 1.

Схема процесса приоритизации альтернатив (элементов бэклога) с использованием перечисленных принципов представлена на рис. 2, подробные алгоритмы расчетов содержатся в работе [14].

Все перечисленные принципы обобщения экспертных оценок (большинства, пессимизма, оптимизма, Гурвица, Лапласа) поддерживаются Экспертной системой

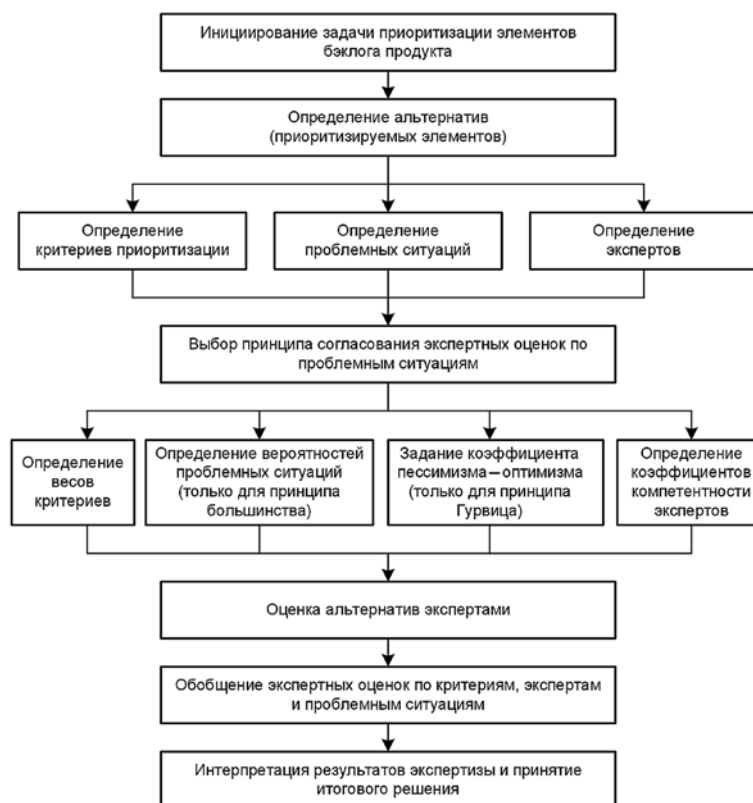


Рис. 2. Процесс приоритизации элементов бэклога продукта

поддержки принятия решений (ЭСППР) — программным комплексом, разработанным специалистами кафедры бизнес-аналитики НИУ ВШЭ [15, 16]. Следует отметить, что по сравнению с существующими методами приоритизации элементов бэклога продукта представленные методы более сложны в вычислительном плане. Тем не менее, они обеспечивают более глубокую аналитику и позволяют повысить обоснованность результатов, причем (благодаря автоматизации) за время, приемлемое для решения задач приоритизации элементов бэклога на практике.

4. Пример постановки и решения задачи приоритизации элементов бэклога продукта

В качестве иллюстративного примера рассмотрим проект развития платформы управления обучением (Learning Management System, LMS) учебного центра компании, работающей в сфере информационных технологий. В качестве альтернатив, подлежащих приоритизации, выступают эпик, представленные в табл. 2. Все перечисленные эпик являются независимыми.

Для приоритизации будем рассматривать такие критерии, как ценность для бизнеса (C_1), срочность реализации (C_2) и методологическая проработанность соответствующего решения (C_3). Коэффициенты относительной значимости критериев составляют 0,4, 0,4 и 0,2 соответственно. Что касается ресурсов (стоимости решения), то предполагается, что они рассматриваются в качестве ограничений и поэтому в качестве критериев не фигурируют.

Будем считать, что множество проблемных ситуаций формируется на основе воздействия двух факторов. Первым фактором является эпидемиологическая ситуация и жесткость предпринимаемых в регионе карантинных мер. С точки зрения учебного центра это влияет на возможность (или невозможность) проведения аудиторных занятий

в очном режиме. Данный фактор может принимать два значения:

- улучшение эпидемиологической ситуации, сопровождающееся смягчением карантина и возможностью организации очного аудиторного обучения слушателей (оценочная вероятность данного сценария составляет 0,3);
- сохранение (или эскалация) эпидемиологической ситуации, сохранение жестких карантинных мер и, соответственно, возможность обучения только в онлайн-режиме (оценочная вероятность составляет 0,7).

В качестве второго фактора выступает выход на российский рынок крупной зарубежной компании — разработчика систем управления цепями поставок, заключение партнерского соглашения с этим вендором и организация в ИТ-компании новой консалтинговой практики. Для учебного центра это будет означать необходимость организации нового образовательного направления, связанного с управлением цепями поставок. Этот фактор также имеет два возможных значения:

- выход зарубежного вендора на российский рынок, заключение партнерского соглашения, организация новой консалтинговой практики и формирование нового образовательного блока (оценочная вероятность — 0,6);
- отказ зарубежного вендора от выхода на российский рынок и, соответственно, отказ от организации новой консалтинговой практики (оценочная вероятность — 0,4).

Таким образом, оба фактора являются бинарными (принимающими по два значения). Также делается допущение, что факторы являются независимыми. В этом случае число рассматриваемых проблемных ситуаций, образуемых сочетанием значений факторов, равно четырем, а их вероятности представляют собой произведения вероятностей соответствующих значений факторов (табл. 3).

Таблица 3

Проблемные ситуации и их вероятности

Проблемная ситуация	Факторы, определяющие проблемные ситуации				Вероятность проблемной ситуации
	Улучшение эпидемиологической ситуации		Партнерство с зарубежным вендором		
	Значение	Вероятность	Значение	Вероятность	
S_1	Да	0,3	Да	0,6	0,18
S_2	Да	0,3	Нет	0,4	0,12
S_3	Нет	0,7	Да	0,6	0,42
S_4	Нет	0,7	Нет	0,4	0,28

Таблица 2

Эпик, подлежащие приоритизации

Эпик	Описание
X_1	Внедрение автоматизированной системы составления расписаний
X_2	Внедрение системы электронного тестирования слушателей учебного центра
X_3	Организация новых учебных курсов по управлению цепями поставок
X_4	Разработка аналитического дэшборда для общего управления деятельностью учебного центра

Приоритеты эпиков

Эпики	Интегральные оценки и ранги эпиков в зависимости от применяемого принципа обобщения оценок по проблемным ситуациям				
	Принцип большинства	Принцип пессимизма	Принцип оптимизма	Принцип Гурвица	Принцип Лапласа
X_1	0,250 (2—3)	0,273 (1)	0,300 (4)	0,286 (2)	0,279 (1—2)
X_2	0,250 (2—3)	0,091 (3—4)	0,364 (2—3)	0,227 (3—4)	0,256 (3)
X_3	0,167 (4)	0,091 (3—4)	0,364 (2—3)	0,227 (3—4)	0,186 (4)
X_4	0,333 (1)	0,182 (2)	0,400 (1)	0,291 (1)	0,279 (1—2)

Для решения задачи приоритизации привлекаются три эксперта (E_1 , E_2 и E_3) со значениями коэффициентов компетентности 0,4 у первого эксперта и по 0,3 у двух остальных. Каждый из экспертов оценивает приоритеты всех альтернатив (эпиков) по каждому из критериев в каждой проблемной ситуации. Оценка осуществляется в порядковой шкале: ранг 1 соответствует наиболее приоритетной альтернативе, ранг 4 — наименее приоритетной.

Коэффициент пессимизма—оптимизма, предусмотренный методом Гурвица, полагается равным 0,5.

Результаты расчетов, выполненные с помощью программного обеспечения "Экспертная система поддержки принятия решений" (ЭСППР), представлены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, результаты приоритизации, полученные с использованием разных принципов обобщения оценок по проблемным ситуациям, в целом не противоречат друг другу. В частности, наиболее приоритетным по совокупности всех методов представляется эпик X_4 (разработка аналитического дэшборда для общего управления деятельностью учебного центра). В то же время не исключены определенные "выбросы": например, эпик X_1 (внедрение автоматизированной системы составления расписаний), как правило, занимающий лидирующие позиции, при использовании принципа оптимизма занял последнее, четвертое место. Данный эффект объясняется особенностью принципа оптимизма, в соответствии с которой высокая итоговая оценка альтернативы может быть получена за счет высокой оценки всего по одной из нескольких проблемных ситуаций. Аналогичный (хотя и противоположный) эффект возникает при использовании принципа пессимизма: низкая оценка для всего лишь одной из проблемных ситуаций обеспечивает низкую итоговую оценку элемента.

При интерпретации результатов, полученных разными методами, следует учитывать,

что многовариантные расчеты отражают разные подходы к обработке экспертных оценок, выполненных для разных проблемных ситуаций. Это особенно актуально для элементов, получивших разные оценки в результате применения разных методов (как, например, в случае эпика X_1 в представленном расчетном примере). В таких случаях можно придерживаться следующих рекомендаций.

Прежде всего, рекомендуется ответить на вопрос, являются ли вероятности проблемных ситуаций известными (т.е. прогнозируемыми с достаточной надежностью). Если это так, то в первую очередь рекомендуется принимать во внимание результаты, полученные с применением принципа большинства. При этом результаты, полученные с помощью остальных методов, могут носить второстепенный, "справочный" характер.

Если вероятности проблемных ситуаций не могут быть спрогнозированы с высокой надежностью, то интерес представляют результаты, полученные с применением принципов пессимизма, оптимизма и Гурвица. При этом в случае существенных расхождений (как в случае эпика X_1) имеет смысл проанализировать промежуточные расчеты, а именно — обобщенные оценки эпиков, рассчитанные отдельно для каждой из проблемных ситуаций. Это позволит уточнить, за счет чего сложилась общая оценка, отличная от результатов, полученных другими методами. Например, для эпика X_1 низкая оценка, полученная с применением принципа оптимизма, объясняется тем, что для каждой из остальных альтернатив имеется ситуация, в которой оценка этой альтернативы превосходит максимальную оценку эпика X_1 .

Что же касается принципа Лапласа, то его применение уместно лишь в тех случаях, когда все проблемные ситуации ожидаются с более или менее одинаковой вероятностью, что на практике бывает довольно редко. В частности, в приведенном расчетном примере вероятности

ситуаций могут различаться в несколько раз, что ставит под сомнение ценность результатов, полученных с применением принципа Лапласа.

Заключение

В ходе исследования были выявлены особенности приоритизации разных элементов бэклога продукта, рассмотрены достоинства и недостатки существующих методов приоритизации, обоснована целесообразность применения методов и систем поддержки принятия решений для решения задачи приоритизации, а также даны рекомендации в части интерпретации результатов, получаемых с использованием разных методов поддержки принятия решений. Исследование основано на многолетнем опыте авторов в части реализации ИТ-проектов, а также на авторских исследованиях в области систем поддержки принятия решений.

Основной вывод, который может быть сделан в связи с использованием методов и систем поддержки принятия решений для приоритизации элементов бэклога продукта, состоит в том, что их применимость относится именно к высокоуровневым элементам бэклога — эпикам и темам. Это объясняется повышенной важностью приоритизации эпиков и тем (и, соответственно, необходимостью применения разных критериев и привлечения разных экспертов), а также среднесрочным характером их реализации (из чего вытекает необходимость рассмотрения возможных проблемных ситуаций). Кроме того, более высокие (по сравнению с традиционными методами) затраты времени и ресурсов, необходимых для постановки и решения задач поддержки принятия решений, для высокоуровневых элементов бэклога представляются вполне допустимыми.

Таким образом, предложенный подход не означает отказ от использования традиционных методов приоритизации элементов бэклога продукта, но позволяет повысить обоснованность принимаемых решений (за счет многокритериальности и учета проблемных ситуаций) и их объективность (за счет привлечения нескольких экспертов), с приемлемыми затратами времени и ресурсов.

Предложенный подход к решению задачи приоритизации элементов бэклога продукта, основанный на использовании систем поддержки принятия решений, может применяться на регулярной основе с учетом временных рамок высокоуровневых элементов бэклога продукта (эпиков и тем) и жизненного цикла проекта. Это позволит получать с помощью си-

стемы поддержки принятия решений рекомендации, адаптивные к изменениям в проекте.

В качестве возможного направления дальнейших исследований можно отметить рассмотрение задачи приоритизации для случая, когда элементы бэклога продукта являются взаимосвязанными, и их оценки зависят от оценок других элементов. Также представляет интерес изучение применимости для решения задачи приоритизации других методов поддержки принятия решений и соответствующих информационных систем.

Список литературы

1. Pervoukhin D. V., Isaev E. A., Rytikov G. O., Filyugina E. K., Hayrapetyan D. A. Theoretical comparative analysis of cascading, iterative, and hybrid approaches to IT project life cycle management // *Business Informatics*. 2020. Vol. 14, N. 1. P. 32–40. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.1.32.40.
2. *Agile extension to the BABOK Guide*. V.2. Toronto, Canada: IIBA, 2017. 140 p.
3. *Agile practice guide*. Newton Square, PA: PMI, 2017. 167 p.
4. Schwaber K., Sutherland J. The Scrum Guide. The definitive guide to Scrum: The rules of the game. 2017. URL: <https://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v2017/2017-Scrum-Guide-US.pdf#zoom=100> (дата обращения 11.03.20).
5. Lei H., Ganjezadeh F., Jayachandran P. K., Ozcan P. A statistical analysis of the effects of Scrum and Kanban on software development projects // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2017. N. 43. P. 59–67.
6. Rubin K. S. *Essential Scrum: A practical guide to the most popular agile process*. Addison-Wesley, 2012.
7. Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. Attractive quality and must-be quality // *Journal of Japanese Society for Quality Control*. 1984. Vol. 14, N. 2. P. 39–48.
8. Clegg D., Barker R. CASE method fast-track: A RAD approach. Addison-Wesley, 1994. 207 p.
9. Cantor M., MacIsaac B., Mannan R. Steering software development workflow: Lessons from the Internet // *IEEE Software*. 2016. Vol. 33, N. 5. P. 96–102.
10. Sener Z., Karsak E. E. A decision model for setting target levels in software quality function deployment to respond to rapidly changing customer needs // *Concurrent Engineering: Research and Applications*. 2012. Vol. 20, N. 1. P. 19–29. DOI: 10.1177/1063293X11435344.
11. Martello S., Toth P. *Knapsack problems: Algorithms and computer implementations*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1990.
12. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process // *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, N. 1. P. 83–98.
13. Saaty T. L. *Decision making with dependence and feedback. The Analytic Network Process*. Pittsburgh, PA: RWS Publications, 1996.
14. Кравченко Т. К., Исаев Д. В. Системы поддержки принятия решений. М.: Юрайт, 2017. 292 с.
15. Кравченко Т. К. Экспертная система поддержки принятия решений // *Открытое образование*. 2010. № 6. С. 147–156.
16. Кравченко Т. К. Принятие групповых решений с использованием Экспертной системы поддержки принятия решений // *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2015. № 2. С. 68–75.

T. K. Kravchenko, Dr. Sci. (Econ.),
Professor, Department of Business Informatics, e-mail: tkravchenko@hse.ru,
S. N. Bruskin, Cand. Sci. (Econ.),
Associate Professor, Department of Business Informatics, e-mail: sbruskin@hse.ru,
D. V. Isaev, Cand. Sci. (Econ.),
Associate Professor, Department of Financial Management, e-mail: disaev@hse.ru,
E. V. Kuznetsova, Cand. Sci. (Econ.),
Associate Professor, Department of Business Informatics, e-mail: ev.kuznetsova@hse.ru,
National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000, Russian Federation

Prioritization of IT Product Backlog Items Using Decision Support Systems

The article focuses on the application of decision support systems for prioritization of product backlog items in IT projects implemented using the Scrum methodology. The study identified the features of prioritization of different types of the product backlog items — user stories, epics and themes. It is justified that high-level product backlog items (epics and themes) require comprehensive prioritization, due to the following reasons. First, high-level product backlog items are particularly important because they determine the planning and implementation of detailed user stories within individual sprints. Second, any high-level item can be considered in terms of different criteria. Third, the implementation of epics and themes takes longer time compared to the implementation of user stories, so it is necessary to take into account possible future states of the project's environment. Fourth, prioritizing epics and themes requires increased objectivity and validity, so group decision making with participation of several experts seems reasonable. Taking into consideration the aforementioned features the conclusion regarding limitations of existing methods of prioritization is made. It is argued that prioritization of high-level product backlog items (epics and themes) may be performed using multi-criteria decision making methods with availability of several problem situations (possible future states of the environment), as well as involvement of several experts. The idea of applying decision support methods and systems is illustrated on the appropriate example. It is also argued that increased consumption of time and resources related with setting and solving decision support tasks may be considered as acceptable for high-level product backlog items.

Keywords: Scrum, IT project, product backlog item, epic, theme, prioritization, expert-based approach, criterion, risk, uncertainty, decision support system

DOI: 10.17587/it.26.631-640

References

1. Pervoukhin D. V., Isaev E. A., Rytikov G. O., Filyugina E. K., Hayrapetyan D. A. Theoretical comparative analysis of cascading, iterative, and hybrid approaches to IT project life cycle management, *Business Informatics*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 32–40, DOI: 10.17323/2587-814X.2020.1.32.40.
2. Agile extension to the BABOK Guide. V. 2. Toronto, Canada, IIBA, 2017. 140 p.
3. Agile practice guide. Newton Square, PA: PMI, 2017. 167 p.
4. Schwaber K., Sutherland J. *The Scrum Guide. The definitive guide to Scrum: The rules of the game*, 2017, available at: <https://www.scrumguides.org/docs/scrumguide/v2017/2017-Scrum-Guide-US.pdf#zoom=100> (date of access 11.03.20).
5. Lei H., Ganjeizadeh F., Jayachandran P. K., Ozcan P. A statistical analysis of the effects of Scrum and Kanban on software development projects, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, no. 43, pp. 59–67.
6. Rubin K. S. *Essential Scrum: A practical guide to the most popular agile process*, Addison-Wesley, 2012.
7. Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. Attractive quality and must-be quality, *Journal of Japanese Society for Quality Control*, 1984, vol. 14, no. 2, pp. 39–48.
8. Clegg D., Barker R. *CASE method fast-track: A RAD approach*. Addison-Wesley, 1994. 207 p.
9. Cantor M., MacIsaac B., Mannan R. Steering software development workflow: Lessons from the Internet, *IEEE Software*, 2016, vol. 33, no. 5, pp. 96–102.
10. Sener Z., Karsak E. E. A decision model for setting target levels in software quality function deployment to respond to rapidly changing customer needs, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, 2012, vol. 20, no. 1, pp. 19–29. DOI: 10.1177/1063293X11435344.
11. Martello S., Toth P. *Knapsack problems: Algorithms and computer implementations*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1990.
12. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal of Services Sciences*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 83–98.
13. Saaty T. L. *Decision making with dependence and feedback. The Analytic Network Process*. Pittsburgh, PA, RWS Publications, 1996.
14. Kravchenko T. K., Isaev D. V. *Sistemy podderzhki priyatiya reshenij* (Decision support systems), Moscow, Urait, 2017, 292 p. (in Russian).
15. Kravchenko T. K. Expert Decision Support System, *Otkrytoe Obrazovanie*, 2010, no. 6, pp. 147–156 (in Russian).
16. Kravchenko T. K. Group decision making using the Expert Decision Support System, *Informacionnye tehnologii v proektirovanii i proizvodstve*, 2015, no. 2, pp. 68–75 (in Russian).

Д. И. Милосердов, аспирант, e-mail: dmmil94@yandex.ru,
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН)

Архитектурные особенности программных систем нейросетевого прогнозирования с непрерывным обучением

Рассматривается задача поиска целесообразной программной архитектуры, реализующей перспективный метод нейросетевого прогнозирования с непрерывным обучением. Предложен усовершенствованный метод такого прогнозирования, а также процедура ускоренного расчета весов синапсов нейронной сети. Показано, что предложенные архитектурные решения многократно снижают необходимые объемы памяти и вычислений в программных реализациях.

Ключевые слова: рекуррентная нейронная сеть, прогнозирование, программная реализация, оптимизация затрат, аппаратные ресурсы

Введение

В настоящее время идет бурное развитие технологий искусственного интеллекта, направленное на наделение машин широкими когнитивными возможностями [1]. Среди задач, возлагаемых на когнитивные машины, большое внимание уделяют прогнозированию ими различных событий.

Известно большое число методов прогнозирования, использующих как традиционные подходы, так и машинное обучение [2–7]. Основным преимуществом подходов на основе нейронных сетей является их способность к обучению, которая позволяет выявлять скрытые факторы исследуемой среды. Архитектуры нейронных сетей прямого распространения [9–15] просты в реализации и обучении. Они демонстрируют достаточно хорошие результаты в краткосрочном прогнозировании, но по мере увеличения горизонта прогноза их точность снижается. Такие сети не могут учитывать изменений факторов внешней среды, что приводит к необходимости их переобучения. В отличие от них рекуррентные нейронные сети (РНС) [16–22] обладают более высоким потенциалом, но они остаются во многом не исследованными. Не отработаны до конца механизмы ассоциатив-

ного вызова ранее сохраненной информации из памяти таких сетей. Одним из путей преодоления указанных недостатков выступает объединение различных архитектур в гибридные модели [23–26]. Это позволяет несколько расширить возможности систем прогнозирования, но не решает принципиальных проблем, характерных как для сетей прямого распространения, так и для РНС. Кроме того, усложнение общей архитектуры затрудняет управление системой прогнозирования.

К перспективным инструментам прогнозирования следует отнести решения на основе рекуррентных нейронных сетей с управляемыми элементами [27, 28]. В работах [29–31] раскрыт перспективный метод нейросетевого прогнозирования с непрерывным обучением этих РНС. Для полноценной системы, реализующей его, нужна целесообразная программная реализация. С одной стороны, требуется минимизировать объем оперативной памяти, затрачиваемый на функционирование таких систем. С другой стороны, необходимо обеспечить их работу в режиме реального времени. При этом важно не допустить снижения точности прогнозирования. Необходим поиск целесообразных программных решений по реализации перспективного метода нейросетевого прогнозирования событий с непрерывным обучением.

Постановка задачи

Известна [31] обобщенная структура программной системы (рис. 1), реализующей метод нейросетевого прогнозирования событий с непрерывным обучением когнитивных машин.

В этой системе используются две идентичные РНС с управляемыми элементами [27, 28], обозначенные РНС-1 и РНС-2. Сигналы на вход РНС-1 подаются после предобработки. Предобработка предусматривает преобразование исходных сигналов в последовательность совокупностей единичных образов. РНС-1 функционирует непрерывно в режиме обучения. В ней формируется и постоянно обновляется модель воспринимаемых сетью сигналов. Когда необходимо выполнить прогноз, блок управления копирует состояние РНС-1 в РНС-2. После этого в ускоренном времени РНС-2 выполняет прогнозирование. Полученные на выходе РНС-2 последовательные совокупности единичных образов в блоке постобработки преобразуются обратно в соответствующие им исходные сигналы — результаты прогнозирования. Такой подход позволяет, во-первых, одновременно обучаться и выполнять прогнозы, а во-вторых, исключает искажение обучаемой модели из-за переключения между режимами обучения и прогнозирования.

К особенностям РНС с управляемыми элементами относятся следующие их свойства. Эти двухслойные импульсные рекуррентные нейронные сети наделены прозрачными логическими структурами. Такое наделение осуществляется за счет реализации пространственных сдвигов сигналов при передаче их от слоя к слою. В результате сигналы продвигаются вдоль слоев от входа к выходу по заданной (линейной, спиральной, петлевой или другой) схеме. Однозначность между входом и выходом в РНС обеспечивается за счет приоритетности коротких связей между нейронами. Нейронные сети могут находиться в трех состояниях:



Рис. 1. Структура программной системы нейросетевого прогнозирования с непрерывным обучением

ожидание, возбуждение и невосприимчивость. Каждый нейрон одного слоя в общем случае связан со всеми нейронами другого слоя. Связи между нейронами одного и того же слоя отсутствуют. Время задержки сигналов в образуемых двухслойных контурах сети меньше времени невосприимчивости нейронов после их возбуждения. В РНС также предусмотрено управление вызовом сигналов из памяти за счет изменения направлений их ассоциативного взаимодействия в зависимости от текущих состояний слоев сети.

На эмуляцию РНС с N нейронами в каждом слое требуется хранить как минимум один массив длиной $2N^2$. В то же время, дублирование нейросетевого ядра требует почти двукратного увеличения объема памяти. При этом расчет остальных параметров "на ходу" снижает скорость реализации предусмотренных функций нейросетевой обработки сигналов. При ограниченных возможностях применяемых вычислительных средств и больших размерах РНС система может перестать удовлетворять требованиям реального времени, что недопустимо. Необходимо конкретизировать данную структуру таким образом, чтобы оптимизировать затраты памяти и вычислений при сохранении точности прогнозирования.

Усовершенствованный метод нейросетевого прогнозирования

Рассмотренный в предыдущем разделе метод предусматривает копирование состояния элементов РНС-1 в РНС-2 для выполнения прогнозов без прерывания обучения. Согласно ему необходимо дублировать как нейроны РНС-1, так и ее синапсы, что требует увеличения объема памяти почти в два раза.

В целях снижения объема занимаемой оперативной памяти предлагается усовершенствованный метод нейросетевого прогнозирования (рис. 2). Этот метод позволяет отказаться от выделения памяти на хранение синапсов РНС-2.

Согласно методу РНС-2 фактически моделируется РНС-1, память выделяется только под запоминание состояний нейронов для РНС-2. Предлагается как обучение, так и прогнозирование рекуррентной нейронной сети осуществлять в ускоренном времени, а входные сигналы накапливать в буфере. В режиме обучения сети рекомендуется по командам с блока управления быстро считывать и обрабатывать накопленные сигналы. Когда необходимо вы-

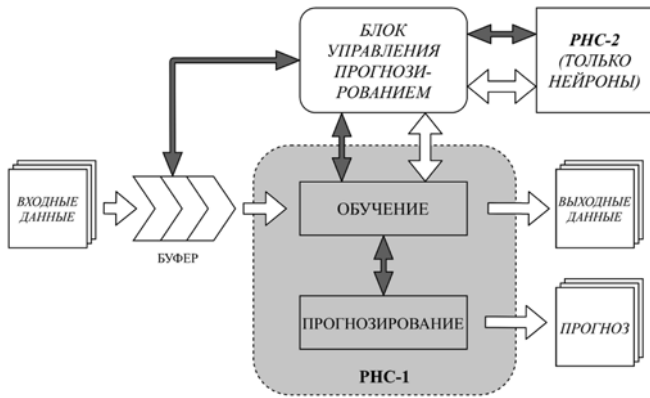


Рис. 2. Усовершенствованный метод нейросетевого прогнозирования с непрерывным обучением

полнить прогноз, подача сигналов с буфера в РНС-1 прерывается, веса ее синапсов замораживаются, а состояния нейронов копируются для последующего использования. Далее РНС-1 выполняет прогноз таким же образом, как РНС-2 в методе-прототипе. После выполнения прогноза сеть инициализируется запомненными на момент прерывания обучения состояниями нейронов. Веса синапсов размораживаются, начинается подача на вход сети сигналов с буфера. РНС-1 снова начинает функционировать в режиме обучения.

В идеале прогнозирование должно осуществляться быстрее, чем время, за которое в РНС-1 поступит следующая последовательность совокупностей единичных образов. Однако теоретически возможны ситуации, когда интервал поступления сигналов невелик, а горизонт прогноза значителен. В этом случае важно не допустить "разрывов" в обучающей выборке — этим оправдано наличие буфера.

Ускоренный расчет весов синапсов

В предлагаемом методе, как и в прототипе, веса синапсов $w_{ij}(t)$, связывающих i -е нейроны с j -ми нейронами, зависят от весового коэффициента $k_{ij}(t)$, определяющего историю обучения, а также от функции $\beta(r_{ij}(t))$ ослабления расходящихся и функции $\eta(r_{ij}(t))$ ослабления сходящихся единичных образов:

$$\begin{aligned} w_{ij}(t) &= k_{ij}(t)\beta(r_{ij}(t))\eta(r_{ij}(t)), \\ k_{ij}(t) &= \text{th}(\gamma g_{ij}(t)/2), \\ g_{ij}(t) &= g_{ij}(t - \Delta t) + \Delta g_{ij}(t), \\ g_{ij}(0) &= 0, \\ \beta(r_{ij}(t)) &= 1/(1 + \alpha(r_{ij}(t))^{1/h}), \end{aligned}$$

где $r_{ij}(t)$ — расстояние между взаимодействующими нейронами; $g_{ij}(t)$, $g_{ij}(t - \Delta t)$ — история

обучения на моменты времени t и $t - \Delta t$ соответственно; γ , α , h — некоторые положительные коэффициенты. Величина $\Delta g_{ij}(t)$ определяется в зависимости от состояний i -го и j -го нейронов в моменты времени t и $t - \Delta t$. Если i -й нейрон сгенерировал единичный образ, и после этого возбудился j -й нейрон, то $\Delta g_{ij}(t)$ положительна. В случае, когда возбуждение j -го нейрона произошло при отсутствии возбуждения на i -го нейрона, $\Delta g_{ij}(t)$ отрицательна. В остальных случаях $\Delta g_{ij}(t) = 0$.

Для ускоренного расчета весов синапсов предлагается учитывать следующее обстоятельство. Весовые коэффициенты $k_{ij}(t)$ являются функциями гиперболического тангенса. Их особенность заключается в том, что при выходе параметра $g_{ij}(t)$ за пределы некоторого интервала $[G^-, G^+]$ его изменения становятся пренебрежимо малы.

Одновременно, поскольку $\Delta g_{ij}(t)$ может принимать определенное положительное (Δg^+) либо отрицательное (Δg^-) значение, существует дискретное множество возможных значений параметра $g_{ij}(t)$.

Принимая во внимание эти два условия, можно вычислить конечное множество $G = \{g_{ij}(t) | g_{ij}(t) = \pm nR(\Delta g^+, \Delta g^-), n = 1, 2, \dots; g_{ij}(t) \in [G^-, G^+]\}$ и соответствующее ему множество $K = \{k_{ij}(t) | k_{ij}(t) = \text{th}(\gamma g_{ij}(t)/2), g_{ij}(t) \in G\}$ значений возможных весовых коэффициентов синапсов. Здесь $R(\Delta g^+, \Delta g^-)$ есть наибольшее значение, на которое нацело делятся Δg^+ и Δg^- .

В случаях, когда множество G невелико, предлагается при инициализации сети рассчитывать значения множеств G и K и хранить их в отдельных массивах. При этом отсутствует необходимость в выделении памяти под полноценный массив элементов $k_{ij}(t)$ для каждого синапса, а весовые коэффициенты рассчитываются в процессе выполнения тактов РНС следующим образом. Для ij -го синапса, у которого необходимо вычислить весовой коэффициент $k_{ij}(t)$, оценивается величина $g_{ij}(t)$. Если $g_{ij}(t) > G^+$, то $k_{ij}(t) = 1$; когда $g_{ij}(t) < G^-$, $k_{ij}(t) = -1$. В остальных случаях определяется элемент множества G , равный $g_{ij}(t)$, после чего определяется соответствующий ему элемент множества K . Значение этого элемента и является весовым коэффициентом ij -го синапса.

Оценка эффективности программных реализаций

Для определения целесообразной архитектуры программной системы нейросетевого

прогнозирования оценивали четыре варианта их реализации.

Первый вариант программного обеспечения (ПО-1) предусматривал реализацию согласно прототипу, раскрытому в постановке задачи. В этом варианте элементы $k_{ij}(t)$ и $\beta(r_{ij}(t))$ хранятся в массивах, элементы $w_{ij}(t)$ рассчитываются "на ходу". Данный вариант приводится для сравнения.

Варианты ПО-2, ПО-3 и ПО-4 предусматривают реализацию с учетом оптимизационных решений, включая использование усовершенствованного метода прогнозирования. Их отличие друг от друга заключается в подходе к соотношению "память—вычисления".

Во втором варианте (ПО-2) значения $\beta(r_{ij}(t))$, $k_{ij}(t)$, $w_{ij}(t)$ хранятся в массивах. Этот вариант отражает стремление максимально сократить объем вычислений, необходимых для функционирования программной системы прогнозирования.

Третий вариант (ПО-3) аналогичен варианту ПО-2, за тем исключением, что для хранения значений $k_{ij}(t)$ и $w_{ij}(t)$ память не выделяется, и они рассчитываются по ходу выполнения тактов. Иными словами, ПО-3 отражает идею максимальной экономии памяти.

Четвертый вариант (ПО-4) использует ускоренный расчет весов синапсов. Весовые коэффициенты $k_{ij}(t)$ хранятся в массиве, но хранение организовано специальным образом, что позволяет без потери точности сократить размер массива. Данный вариант отражает комбинированный подход между оптимизацией памяти и вычислительных затрат.

Для проведения экспериментов использовали компьютер под управлением ОС Windows 7 x64, с процессором Intel Core i7-4790 CPU 3.6 GHz, 32 ГБ ОЗУ. Программное обеспечение разрабатывали на языке программирования C++, с применением фреймворка Qt 5.14.1. Сборку проводили компиляторами MinGW 7.3.0 64bit и MSVC 14.0 amd64.

Тесты проводили на примере прогнозирования наборов слов. Для этого наборы слов кодируются на матрицах размером 20×50 (размер словаря равен 1000 слов), в которых за каждым нейроном закрепляется определенное слово из словаря. Размер РНС для прогнозирования — 4×6 логических полей, число тактов рефракторности нейронов равно 7. Таким образом, число нейронов в слое равняется 24000. Сеть обучается на выборке из 50 наборов, прогнозируются следующие 10 наборов.

Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели эффективности ПО (компилятор MinGW)

Показатели эффективности	ПО-1	ПО-2	ПО-3	ПО-4
Объем памяти, Мбайт	21975,0	2153,8	1078,1	1078,4
Время инициализации ядра, мс	88216	15585	521	541
Время копирования ядра, мс	6322	77	76	77
Время обучения, мс	774133	88960	119104	52133
Время прогнозирования, мс	11655	698	40260	7823

Таблица 2

Показатели эффективности ПО (компилятор MSVC)

Показатели эффективности	ПО-1	ПО-2	ПО-3	ПО-4
Объем памяти, Мбайт	21975,0	2153,8	1078,1	1078,4
Время инициализации ядра, мс	108738	19185	430	464
Время копирования ядра, мс	4730	71	65	72
Время обучения, мс	531297	45745	151093	148211
Время прогнозирования, мс	13244	1240	39604	7074

Как видно из табл. 1 и 2, предложенные архитектурные решения позволяют заметно снизить затраты памяти и вычислений в системах нейросетевого прогнозирования. Так, варианты ПО-2, ПО-3, ПО-4 продемонстрировали, что по сравнению с ПО-1 требуется в среднем в 15 раз меньше оперативной памяти, инициализация ядра происходит быстрее примерно в 16 раз, на копирование нейросетевых ядер затрачивается в среднем в 77 раз меньше времени. Процесс обучения ускоряется в среднем в 6 раз.

Ситуация с временем прогнозирования не так однозначна. Результаты показывают, что расчет параметров синапсов "на ходу" (вариант ПО-3) является слишком дорогостоящим с точки зрения быстродействия. Это свидетельствует о нецелесообразности применения стратегии максимальной экономии памяти. В то же время, комбинированный метод (ПО-4) демонстрирует практически столь же низкие затраты памяти, при этом на прогнозирование затрачивается времени меньше, чем в ПО-1. Однако в ситуациях, когда критерий времени является определяющим, предпочтительно использовать вариант ПО-2, несмотря на то, что

он требует в два раза больше памяти. Таким образом, выбор оптимальной программной структуры имеет смысл осуществлять между ПО-2 и ПО-4, и он сводится к удовлетворению конкретных требований и условий, существующих в среде внедрения программной системы. В системах с высокими требованиями ко времени предпочтительнее использование варианта ПО-2, в обратных ситуациях целесообразнее использовать ПО-4.

Следует отметить, что возможности по оптимизации программно-аппаратных реализаций нейросетевых систем прогнозирования еще не исчерпаны. Все рассмотренные варианты использовали стандартные средства Qt без привлечения дополнительных пакетов обработки данных. В перспективе предполагается рассмотреть дополнительные варианты, использующие как средства распараллеливания вычислений на центральном процессоре, так и графические процессоры.

Заключение

В настоящей работе рассмотрена задача поиска целесообразной программной реализации нейросетевой системы прогнозирования на основе РНС с управляемыми элементами. В основе таких систем лежит метод прогнозирования с непрерывным обучением, предполагающий использование двух нейросетевых ядер, одно из которых непрерывно функционирует в режиме обучения. В момент, когда необходимо выполнить прогноз, блок управления прогнозированием копирует состояние первого ядра во второе ядро, которое выполняет прогноз одновременно с продолжением обучения первого ядра.

В статье рассмотрена типовая программная реализация нейросетевых систем прогнозирования, а затем предложены и оценены архитектурные решения, направленные на ее оптимизацию. Предложен усовершенствованный метод нейросетевого прогнозирования с непрерывным обучением машин и улучшены правила расчета весов синапсов.

Для проведения тестов на языке C++ разработаны различные варианты программных систем прогнозирования. Первый вариант представляет собой "типовую" неоптимизированную реализацию (ПО-1). Варианты ПО-2, ПО-3, ПО-4 разрабатывались с учетом предложенных архитектурных решений. Показано, что они многократно превосходят ПО-1 по

показателям эффективности. Среди них наилучшим образом показали себя реализации ПО-2 и ПО-4. Ответ на вопрос о том, какая из них более эффективна, может быть определен только с учетом конкретных требований и условий, имеющих место в среде внедрения программной системы.

Список литературы

1. Kotseruba Y., Tsotsos J. 40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications // *Artificial Intelligence Review*. 2018. doi: 10.1007/s10462-018-9646-y.
2. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
3. Singh P. Applications of Soft Computing in Time Series Forecasting. Cham, Springer International Publishing Switzerland, 2016. doi:10.1007/978-3-319-26293-2.
4. Timmermann A. Forecasting methods in finance (Review) // *Annual Review of Financial Economics*. 2018. Vol. 10. P. 449–479. doi: 10.1146/annurev-financial-110217-022713.
5. Brockwell P., Davis R. Introduction to Time Series and Forecasting. Springer, 2016. 425 p. doi:10.1007/978-3-319-29854-2.
6. Nagy A., Simon V. Survey on traffic prediction in smart cities. // *Pervasive and Mobile Computing*. 2018. Vol. 50. P. 148–163. doi:10.1016/j.pmcj.2018.07.004.
7. Bok B., Caratelli D., Giannone D., Sbordon A., Tambalotti A. Macroeconomic Nowcasting and Forecasting with Big Data. // *Annual Review of Economics*. 2018. Vol. 10. P. 615–643. doi:10.1146/annurev-economics-080217-053214.
8. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М.: ДМК-Пресс, 2018. 652 с.
9. Скоробогатченко Д. А., Степанова П. Ю. Применение искусственных нейронных сетей при краткосрочном прогнозировании уровня загрузки городских автомобильных дорог // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2015. № 14(209). С. 24–30.
10. Zhou T., Han G., Xu X., Lin Z., Han C., Huang Y., Qin J. δ -agree AdaBoost stacked autoencoder for short-term traffic flow forecasting // *Neurocomputing*. 2017. Vol. 247. P. 31–38. doi:10.1016/j.neucom.2017.03.049.
11. Egrioglu E., Yolcu U., Bas E., Dalar A. Median-Pi artificial neural network for forecasting // *Neural Computing & Applications*. 2019. Vol. 31. P. 307–316. doi: 10.1007/s00521-017-3002-z.
12. Herrera I., Chicaiza J., Herrera E., Lorente-Leyva L., Caraguay-Procel J., García-Santillán I., Peluffo D. Artificial Neural Networks for Bottled Water Demand Forecasting: A Small Business Case Study // *Advances in Computational Intelligence (IWANN 2019), Lecture Notes in Computer Science*. 2019. Vol. 11507. doi:10.1007/978-3-030-20518-8_31.
13. Chawla A., Singh A., Lamba A., Gangwani N., Soni U. Demand Forecasting Using Artificial Neural Networks—A Case Study of American Retail Corporation // *Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019. Vol. 697. doi:10.1007/978-981-13-1822-1_8.
14. Wu W., Wang X. The Coal Demand Prediction Based on the Grey Neural Network Model // *LISS 2014*. Springer, Heidelberg, 2015. doi:10.1007/978-3-662-43871-8_194.
15. Christopher J., Mou J., Yin D. Convolutional Neural Network Deep-Learning Models for Prediction of Shared Bicycle Demand // *International Conference on Applications and Techniques in Cyber Security and Intelligence (ATCI 2018)*.

Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019. Vol. 842. doi:10.1007/978-3-319-98776-7_1.

16. Bianchi F., Maiorino E., Kampffmeyer M., Rizzi A., Jensen R. Recurrent Neural Networks for Short-Term Load Forecasting. Springer, 2017. 72 p. doi:10.1007/978-3-319-70338-1.

17. Yang B., Sun S., Li J., Lin X., Tian Y. Traffic flow prediction using LSTM with feature enhancement // Neurocomputing. 2019. Vol. 332. P. 320–327. doi:10.1016/j.neucom.2018.12.016.

18. Tian Y., Zhang K., Li J., Lin X., Yang B. LSTM-based traffic flow prediction with missing data // Neurocomputing. 2018. Vol. 318. P. 297–305. doi:10.1016/j.neucom.2018.08.067.

19. Prokoptsev N. G., Alekseenko A. E., Kholodov Ya. A. Traffic flow speed prediction on transportation graph with convolutional neural networks // Computer research and modeling. 2018. Vol. 10, N. 3. P. 359–367. doi:10.20537/2076-7633-2018-10-3-359-367.

20. Goudarzi S., Kama M., Anisi M., Soleymani S., Doctor F. Self-organizing traffic flow prediction with an optimized deep belief network for Internet of vehicles // Sensors. 2018. Vol. 18. P. 3459. doi:10.3390/s18103459.

21. Krichene E., Masmoudi Y., Alimi A., Abraham A., Chabchoub H. Forecasting Using Elman Recurrent Neural Network. // Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2016). Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2017. Vol. 557. doi:10.1007/978-3-319-53480-0_48.

22. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview // Neural Networks. 2015. Vol. 61, P. 85–117. doi:10.1016/j.neunet.2014.09.003.

23. Shen Z., Zhang Y., Lu J., Xu J., Xiao G. A novel time series forecasting model with deep learning // Neurocomputing. 2019. doi:10.1016/j.neucom.2018.12.084.

24. Fan C., Ding C., Zheng J., Xiao L., Ai Z. Empirical Mode Decomposition based Multi-objective Deep Belief Network for short-term power load forecasting // Neurocomputing. 2020. doi:10.1016/j.neucom.2020.01.031.

25. Junxiu L., Tiening S., Yuling L., Su Y., Yi C., Jia Z. An echo state network architecture based on quantum logic gate and its optimization // Neurocomputing. 2020. Vol. 371. P. 100–107. doi:10.1016/j.neucom.2019.09.002.

26. Haitao L. Research on prediction of traffic flow based on dynamic fuzzy neural networks // Neural Computing & Applications. 2016. Vol. 27. P. 1969–1980. doi:10.1007/s00521-015-1991-z.

27. Осипов В. Ю. Нейронная сеть с прошедшим, настоящим и будущим временем // Информационно-управляющие системы. 2011. № 4. С. 30–33.

28. Osipov V., Osipova M. Space–time signal binding in recurrent neural networks with controlled elements // Neurocomputing. 2018. Vol. 308. P. 194–204. doi:10.1016/j.neucom.2018.05.009.

29. Osipov V., Miloserdov D. Neural network forecasting of traffic congestion // Digital Transformation and Global Society (DTGS 2019). Communications in Computer and Information Science, 2020. Vol. 1038. doi:10.1007/978-3-030-37858-5_20.

30. Osipov V., Zhukova N., Miloserdov D. Neural Network Associative Forecasting of Demand for Goods // Experimental Economics and Machine Learning, 2019. Vol. 2479.

31. Osipov, V., Nikiforov, V., Zhukova, N., Miloserdov D. Urban traffic flows forecasting by recurrent neural networks with spiral structures of layers // Neural Computing and Applications. 2020. doi:10.1007/s00521-020-04843-5.

D. I. Miloserdov, PhD Student, e-mail: dmmil94@yandex.ru,

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Architectural Features of Neural Network Forecasting Software Systems with Continuous Training

In recent years, a method of neural network event forecasting has been developed, based on the use of a pair of recurrent neural networks with controlled elements. This method allows you to make predictions without interrupting training. However, for its full use, a reasonable software implementation is necessary. This study considers the problem of searching for a software architecture that implements the method of neural network forecasting with continuous learning. Offers an improved prediction method that significantly reduces the required amount of memory. A procedure for accelerated calculation of the weights of neural network synapses has been developed. To assess the effectiveness of the proposed architectural solutions, a comparative analysis of various variants of software implementations was conducted. In systems developed with the proposed innovations, the requirements for memory and computing resources are much lower than in software implementations of the prototype method. For example, the amount of memory required has decreased by an average of 15 times, and system initialization has taken 16 times less time. At the same time, the strategy of maximum memory saving in such systems proved to be unproductive compared to the combined approach. Based on the obtained comparison results, recommendations are given for the use and choice of architectures depending on the specific tasks facing the end user, and the hardware and software environment in which the forecasting systems are supposed to operate.

Keywords: recurrent neural network, forecasting, software implementation, costs optimization, hardware resources

DOI: 10.17587/it.26.641-647

References

1. Kotseruba Y., Tsotsos J. 40 years of cognitive architectures: core cognitive abilities and practical applications, *Artificial Intelligence Review*, 2018, doi: 10.1007/s10462-018-9646-y.

2. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.

3. Singh P. Applications of Soft Computing in Time Series Forecasting, Cham, Springer International Publishing Switzerland, 2016, doi:10.1007/978-3-319-26293-2.

4. Timmermann A. Forecasting methods in finance (Review), *Annual Review of Financial Economics*, 2018, vol. 10, pp. 449–479, doi: 10.1146/annurev-financial-110217-022713.

5. Brockwell P., Davis R. Introduction to Time Series and Forecasting, Springer, 2016, 425 p. doi:10.1007/978-3-319-29854-2.
6. Nagy A., Simon V. Survey on traffic prediction in smart cities, *Pervasive and Mobile Computing*, 2018, vol. 50, pp. 148–163, doi:10.1016/j.pmcj.2018.07.004.
7. Bok B., Caratelli D., Giannone D., Sbordon A., Tam-balotti A. Macroeconomic Nowcasting and Forecasting with Big Data, *Annual Review of Economics*, 2018, vol. 10, pp. 615–643, doi:10.1146/annurev-economics-080217-053214.
8. Goodfellow Ya., Bengio I., Kourville A. Deep Learning, Moscow, DMK-Press, 2018, 652 p. (in Russian).
9. Skorobogatchenko D. A., Stepanova P. Yu. Application of artificial neural networks with short-term prediction of the level of loading of urban automobile roads, *Izvestiya VolGTU*, no. 14 (209), pp. 24–30 (in Russian).
10. Zhou T., Han G., Xu X., Lin Z., Han C., Huang Y., Qin J. δ -agree AdaBoost stacked autoencoder for short-term traffic flow forecasting, *Neurocomputing*, 2017, vol. 247, pp. 31–38, doi:10.1016/j.neucom.2017.03.049.
11. Egrioglu E., Yolcu U., Bas E., Dalar A. Median-Pi artificial neural network for forecasting, *Neural Computing & Applications*, 2019, vol. 31, pp. 307–316, doi: 10.1007/s00521-017-3002-z.
12. Herrera I., Chicaiza J., Herrera E., Lorente-Leyva L., Caraguay-Procel J., García-Santillán I., Peluffo D. Artificial Neural Networks for Bottled Water Demand Forecasting: A Small Business Case Study, *Advances in Computational Intelligence (IWANN 2019)*, Lecture Notes in Computer Science, 2019, vol. 11507, doi:10.1007/978-3-030-20518-8_31.
13. Chawla A., Singh A., Lamba A., Gangwani N., Soni U. Demand Forecasting Using Artificial Neural Networks—A Case Study of American Retail Corporation, *Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering*, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019, vol. 697, doi:10.1007/978-981-13-1822-1_8.
14. Wu W., Wang X. The Coal Demand Prediction Based on the Grey Neural Network Model, *LISS 2014*, Springer, Heidelberg, 2015, doi:10.1007/978-3-662-43871-8_194.
15. Christopher J., Mou J., Yin D. Convolutional Neural Network Deep-Learning Models for Prediction of Shared Bicycle Demand, *International Conference on Applications and Techniques in Cyber Security and Intelligence (ATCI 2018)*, Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019, vol. 842, doi:10.1007/978-3-319-98776-7_1.
16. Bianchi F., Maiorino E., Kampffmeyer M., Rizzi A., Jensen R. Recurrent Neural Networks for Short-Term Load Forecasting, Springer, 2017, 72 p., doi:10.1007/978-3-319-70338-1.
17. Yang B., Sun S., Li J., Lin X., Tian Y. Traffic flow prediction using LSTM with feature enhancement, *Neurocomputing*, 2019, vol. 332, pp. 320–327. doi:10.1016/j.neucom.2018.12.016.
18. Tian Y., Zhang K., Li J., Lin X., Yang B. LSTM-based traffic flow prediction with missing data // *Neurocomputing*, 2018, vol. 318, pp. 297–305. doi:10.1016/j.neucom.2018.08.067.
19. Prokoptsev N. G., Alekseenko A. E., Kholodov Ya. A. Traffic flow speed prediction on transportation graph with convolutional neural networks, *Computer research and modeling*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 359–367, doi:10.20537/2076-7633-2018-10-3-359-367.
20. Goudarzi S., Kama M., Anisi M., Soleymani S., Doctor F. Self-organizing traffic flow prediction with an optimized deep belief network for Internet of vehicles, *Sensors*, 2018, vol. 18, pp. 3459, doi:10.3390/s18103459.
21. Krichene E., Masmoudi Y., Alimi A., Abraham A., Chab-choub H. Forecasting Using Elman Recurrent Neural Network, *Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2016)*, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2017, vol. 557, doi:10.1007/978-3-319-53480-0_48.
22. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: An overview, *Neural Networks*, 2015, vol. 61, pp. 85–117, doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
23. Shen Z., Zhang Y., Lu J., Xu J., Xiao G. A novel time series forecasting model with deep learning, *Neurocomputing*, 2019, doi: 10.1016/j.neucom.2018.12.084.
24. Fan C., Ding C., Zheng J., Xiao L., Ai Z. Empirical Mode Decomposition based Multi-objective Deep Belief Network for short-term power load forecasting, *Neurocomputing*, 2020, doi:10.1016/j.neucom.2020.01.031.
25. Junxiu L., Tiening S., Yuling L., Su Y., Yi C., Jia Z. An echo state network architecture based on quantum logic gate and its optimization, *Neurocomputing*, 2020, vol. 371, pp. 100–107, doi:10.1016/j.neucom.2019.09.002.
26. Haitao L. Research on prediction of traffic flow based on dynamic fuzzy neural networks, *Neural Computing & Applications*, 2016, vol. 27, pp. 1969–1980, doi:10.1007/s00521-015-1991-z.
27. Osipov V. Yu. Neural network with past, present and future time, *Information and Control Systems*, 2011, no. 4, pp. 30–33 (in Russian).
28. Osipov V., Osipova M. Space–time signal binding in recurrent neural networks with controlled elements, *Neurocomputing*, 2018, vol. 308, pp. 194–204, doi:10.1016/j.neucom.2018.05.009 (in Russian).
29. Osipov V., Miloserdov D. Neural network forecasting of traffic congestion, *Digital Transformation and Global Society (DTGS 2019)*, Communications in Computer and Information Science, 2020, vol. 1038, doi:10.1007/978-3-030-37858-5_20.
30. Osipov V., Zhukova N., Miloserdov D. Neural Network Associative Forecasting of Demand for Goods, *Experimental Economics and Machine Learning*, 2019, vol. 2479.
31. Osipov V., Nikiforov V., Zhukova N., Miloserdov D. Urban traffic flows forecasting by recurrent neural networks with spiral structures of layers, *Neural Computing and Applications*, 2020, doi:10.1007/s00521-020-04843-5.

С. М. Иванова, канд. техн. наук, доц., e-mail: sm-ivanova@yandex.ru,
З. В. Ильиченкова, канд. техн. наук, доц., e-mail: zilyichenkova@yandex.ru,
А. А. Антонова, канд. техн. наук, доц., e-mail: antonova.an.an@gmail.com,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
"МИРЭА — Российский технологический университет", Москва

Проверка подлинности пользователя при работе в обучающих системах

Рассматривается проблема проверки подлинности личности обучающегося, работающего в образовательной среде. Анализ проводится на основе сформированного кластерного клавиатурного почерка. Рассматриваются способы посимвольного и общего контроля, проверки отдельных символов и средних значений при различных комбинациях символов. Представлены экспериментальные данные, показавшие работоспособность предложенного метода проверки.

Ключевые слова: клавиатурный почерк, обучающие системы, кластеризация символов, контроль пользователя

Введение. Подходы к проверке подлинности обучающихся

На сегодняшний день дистанционные образовательные технологии становятся все более популярными. Возможность изучать весь материал или его часть удаленно позволяет повысить эффективность занятий за счет наиболее удобного распределения времени обучения в соответствии с собственными образовательными потребностями [1, 2]. К несомненным достоинствам использования дистанционных образовательных технологий относятся:

- возможность планирования времени обучения, отводящегося на тот или иной раздел курса, согласно индивидуальной скорости овладения материалом;
- допустимость выбора тем для изучения или их последовательности в процессе обучения;
- возможность организации обучения по личному, а не групповому графику;
- мобильность за счет индивидуализации стратегии взаимодействия с преподавателем;
- возможность использования современных образовательных технологий;
- равные образовательные возможности вне зависимости от объективных возможностей, связанных с полом обучающегося, удаленностью места жительства от места обучения, состоянием его здоровья и т.д.;
- повышение объективности в силу использования формального оценивания и отсутствия персонализированного отношения к обучающемуся.

К недостаткам использования дистанционных образовательных технологий следует отнести:

- возможность подмены легитимного обучающегося сторонним пользователем на этапе обучения в случае, когда доступ к курсу организуется с применением разграничения полномочий (например, по логину и паролю);
- возможность подмены экзаменуемого на этапе проведения аттестации по курсу;
- невозможность осуществления непосредственного общения для получения ответов на возникающие вопросы при некоторых формах организации обучения [3, 4].

Данные проблемы заметным образом нивелируют значительные достоинства обучения в дистанционном режиме. Поэтому необходимо разрабатывать такие вспомогательные методы при организации образовательного процесса, которые позволят исключить перечисленные недостатки.

В связи с тем, что достоинства использования дистанционных образовательных технологий значительны, необходимо направить усилия на сглаживание или ликвидацию перечисленных выше недостатков.

В настоящее время уже существуют различные механизмы контроля обучающихся при проведении итоговой аттестации [5, 6]. Однако в связи с тем, что данные мероприятия требуют хотя и удаленного, но присутствия человека-проктора, осуществляющего визуальный контроль за учащимся, непосредственно процесс обучения и выполнение текущих заданий остается без внимания организаторов курса и

требует создания автоматических методов проверки подлинности.

Существующие методы прокторинга дают возможность лишь сигнализировать о возможном нарушении, но не позволяют принять взвешенное решение о доступе к среде обучения.

1. Формирование клавиатурного почерка.

Кластерный подход

Так как обучающие системы всегда содержат информацию об обучающихся, имеющих право на прохождение курса, представляется целесообразным при разработке способа контроля подлинности использовать данные, хранящиеся в системе.

Поскольку чаще всего аутентификация в среде обучения осуществляется с использованием логина и пароля, то имеет смысл использовать при организации контроля какой-либо механизм, основанный на тех же данных. Например, для указанной цели можно сформировать на этапе регистрации пользователя его клавиатурный почерк, основанный, например, на длительности нажатия на клавиатурные символы. Тогда при занятиях ученика в образовательной среде появляется возможность опираться на полученные данные [7–9].

Использование компьютерного почерка в процессе обучения предполагает периодический ввод какой-либо информации, который осуществляется либо в постоянном режиме (при выполнении заданий), либо может быть инициирован при переходе от одного блока обучения к другому. Таким образом, использование биометрических характеристик позволит проводить мониторинг учащихся в автоматическом режиме в течение всего периода обучения [10].

Однако работа с использованием всех символов клавиатуры, характерная для выполнения различного рода заданий во время обучения, не позволяет ограничиться только парольной фразой для формирования компьютерного почерка.

Недостаточность этого определяется различными характеристиками почерка, создаваемого при использовании различных знаков. Также нельзя характеристики почерка, сформированного по ограниченному набору символов, применять для проверки подлинности по любой другой фразе.

Поэтому предлагается при исходном определении почерка использовать кластерный подход, т. е. символы с похожими характеристиками объединить в наборы и хранить информацию о среднем значении и среднеквадратичном отклонении для знаков каждого из сформированных кластеров. Данный метод является

эффективным в силу того, что проведение экспериментов показало различие в длительности нажатия на часто используемые символы клавиатуры и прочие знаки. Иными словами, использование ограниченного набора символов или создание единого почерка, полученного при использовании всей клавиатуры, не является целесообразным для решаемой задачи.

При формировании клавиатурного почерка учащегося с формированием кластеров все символы клавиатуры объединяются в группы согласно близости их статистических характеристик. Если говорить о вводе в процессе обучения данных, содержащих только слова, состоящие из букв русского алфавита, то требуется распределить по кластерам 31 соответствующий знак (без букв "ё" и "ь"). Сформированный подобным образом клавиатурный почерк будет хранить информацию о числе кластеров, наборе символов в каждом кластере, среднем значении и среднеквадратичной ошибке. Данная информация является достаточной для характеристики индивидуальных особенностей клавиатурного почерка конкретного пользователя.

Например, для данных, полученных в процессе формирования клавиатурного почерка пользователя, представленных в табл. 1, при делении на 5 кластеров по формуле минимизации расстояния между двумя символами

Таблица 1

Символ	Число нажатий	Среднее значение длительности (10^{-6} с)	Среднеквадратичное отклонение (10^{-6} с)	Символ	Число нажатий	Среднее значение длительности (10^{-6} с)	Среднеквадратичное отклонение (10^{-6} с)
й	6	46483,83	280,807	р	2	46819,50	123,744
ц	3	46289,67	334,378	о	5	47112,20	235,093
у	6	46467,83	296,569	л	5	46049,40	265,168
к	2	46968,50	402,344	д	6	45951,67	186,370
е	4	47063,25	273,778	ж	4	46182,00	166,775
н	4	46892,75	386,125	э	2	46201,00	295,571
г	5	46953,20	355,546	я	4	46607,75	433,556
ш	2	45793,50	382,545	ч	5	46556,20	330,595
щ	4	46016,75	398,044	с	2	46152,00	197,990
з	2	46273,00	229,103	м	4	47134,75	390,416
х	6	45908,33	338,797	и	3	46843,33	314,475
ф	6	46495,67	369,703	т	5	47020,40	247,824
ы	4	46395,00	422,176	ь	4	46035,75	124,759
в	6	46660,83	341,338	б	6	46003,50	158,054
а	2	46204,00	203,647	ю	5	46127,40	354,528
п	6	46987,00	345,979				

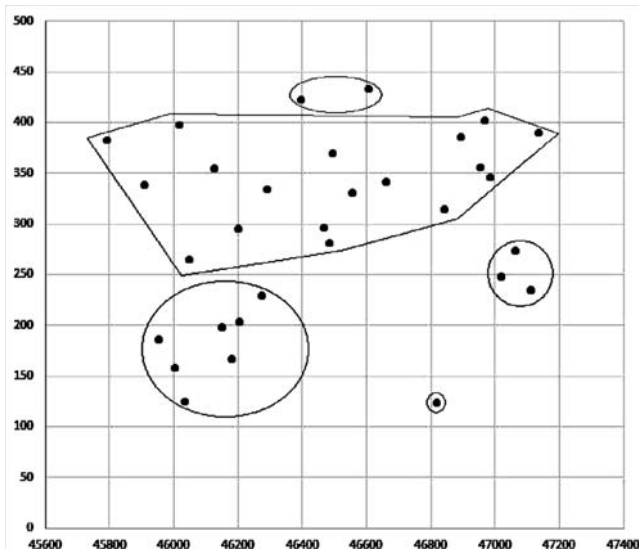


Рис. 1. Распределение символов по кластерам (по оси x расположены длительности, по оси y — СКО)

$$\rho_{ij} = \sqrt{(d_i - d_j)^2 + (s_i - s_j)^2},$$

где d_i — среднее значение длительности нажатия на i -й символ; s_i — значение среднеквадратичного отклонения (СКО) для i -й символа, получаются кластер 1 "й у в ч ф к н г п м и ц ю э л щ ш х", кластер 2 "е о т", кластер 3 "з а с ж д б ь", кластер 4 "ы я", кластер 5 "р" (рис. 1).

Средние значения и СКО, рассчитанные согласно данным табл. 1, для кластеров 1—5 соответственно равны 46499,43 и 489,121 (кластер 1), 47065,43 и 234,143 (кластер 2), 46071,54 и 189,172 (кластер 3), 46501,38 и 412,160 (кластер 4), 46819,50 и 123,744 (кластер 5).

2. Проверка почерка пользователя при кластерном подходе

Имея сформированный клавиатурный почерк, необходимо определить подлинность обучающихся в процессе работы. Иными словами, требуется проверить, соответствуют ли характеристики вводимой фразы сформированному клавиатурному почерку. В данном случае нет необходимости пытаться отнести находящегося в системе ученика к тому или иному пользователю, так как он авторизовался на сайте. Следовательно, необходимо принять решение, является ли ученик именно тем субъектом, за которого он себя выдает.

На основании общих принципов проверки клавиатурного почерка задача сводится к отношению текущих характеристик к ранее сформированному классу почерка. Нужно определить, попадают ли длительности символов $\tilde{x}$, вводимых с клавиатуры в процессе работы

в системе, в некоторый допустимый интервал $(x_{k,\min}, x_{k,\max})$, формируемый согласно статистической модели для соответствующего кластера k . Указанные диапазоны предварительно формируются для каждого кластера согласно его статистическим характеристикам. Одним из хорошо зарекомендовавших себя способов является определение границ диапазона с помощью функции Лапласа, которая дает возможность учитывать имеющуюся информацию о среднем значении длительности нажатия на соответствующие символы, входящие в кластер, и среднеквадратичном отклонении:

$$P(x_{k,\min} < \tilde{x} < x_{k,\max}) = \Phi\left(\frac{x_{k,\max} - \bar{x}_k}{\sigma_k}\right) - \Phi\left(\frac{\bar{x}_k - x_{k,\min}}{\sigma_k}\right),$$

где $\Phi(\cdot)$ — функция Лапласа; $\bar{x}_k$ — среднее значение длительности нажатия на символы кластера k ; σ_k — СКО для кластера k .

В зависимости от необходимой жесткости принятия решения можно варьировать значение вероятности. Его увеличение позволяет принимать решение в пользу находящегося в системе ученика (увеличивается число ошибок второго рода — постороннее лицо может быть принято за авторизованного пользователя). Снижение вероятности повышает число отказов добросовестному пользователю (увеличивается число ошибок первого рода).

Так как искомый диапазон должен быть симметричным, то вероятность можно записать в виде

$$P(x_{k,\min} < \tilde{x} < x_{k,\max}) = 2\Phi\left(\frac{x_{k,\max} - \bar{x}_k}{\sigma_k}\right).$$

Для заранее определенного значения вероятности при заданных среднем и среднеквадратичном отклонении определяются границы диапазона.

В классическом варианте проверки подлинности пользователя решение о его добросовестности принимается на основе информации о том, попадают ли текущие значения в найденный диапазон. При кластерном подходе может возникнуть ситуация, когда по некоторым кластерам решение положительное, а по другим — отрицательное. В этом случае необходимо определить механизм, определяющий, считать обучающегося подлинным или злоумышленником.

Существуют несколько подходов к решению данной проблемы. К наиболее перспективным можно отнести принятие решения:

- по всем результатам (личность подтверждается, только когда по всем кластерам принято положительное решение);

- по большинству результатов (если кластеров, подтверждающих почерк, не меньше, чем остальных, то личность пользователя подтверждается).

Так как решение принимается по разным наборам, то оно может также зависеть от частоты проверки, т. е. от той комбинации символов, которые проверяются одновременно. Контроль может идти после:

- ввода каждого символа;
- ввода одного ответа, являющегося словом.

В первом случае учитывается длительность нажатия на каждый знак. Во втором случае определяется среднее значение для разных нажатий на один и тот же символ или на все символы одного кластера.

Различные подходы к принятию решения предлагается рассмотреть на конкретных экспериментальных данных, полученных при анализе информации о работе добросовестного и постороннего пользователей в системе.

3. Принятие решения о подлинности пользователя

В обоих случаях пользователям предлагалось ввести слово "сложносочиненное", являющиеся ответом на вопрос задания. В данном слове содержатся символы только из трех первых кластеров, поэтому статистическую информацию (допустимый диапазон длительности нажатия) будем рассматривать только для них.

Согласно среднему значению и СКО, рассчитанному для каждого из наборов данных, допустимые интервалы при вероятностях попадания, равных 0,95 и 0,85 соответственно, представлены в табл. 2.

Рассмотрим соотношение экспериментальных данных с полученными диапазонами при разных подходах к анализу статистической информации.

Для добросовестного пользователя были получены данные о длительности нажатия на клавиши, представленные в табл. 3.

Упорядочивание по кластерам для облегчения обработки данных показано в табл. 4.

Средние длительности нажатий на каждый символ показаны в табл. 5, а на все символы одного кластера целиком — в табл. 6.

Рассмотрим попадание в требуемые диапазоны всех нажатых символов ответа согласно полученным значениям длительности в зависимости от выбранного допустимого диапазона вероятности (0,85 и 0,95).

Как видно из диаграммы (рис. 2), все символы, кроме одного, попали в требуемые интервалы для обоих значений вероятности. Зна-

Таблица 2

Кластеры	Вероятность			
	0,85		0,95	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
1	46450,53	46548,33	46432,88	46565,98
2	46973,31	47157,55	46940,05	47190,81
3	46028,36	46114,72	46012,77	46130,31

Таблица 3

Сим-вол	Значение длительности (10^{-6} с)	Сим-вол	Значение длительности (10^{-6} с)	Сим-вол	Значение длительности (10^{-6} с)
с	46142,0	с	46277,0	е	48004,25
л	46246,4	о	46915,2	н	46812,75
о	47164,2	ч	46480,2	н	46902,75
ж	45998,0	и	46943,33	о	47360,2
н	46666,75	н	46675,75	е	46828,25
о	46914,2				

Таблицы 4

Сим-вол	Значение длительности (10^{-6} с)	Сим-вол	Значение длительности (10^{-6} с)	Сим-вол	Значение длительности (10^{-6} с)
л	46246,4	и	46943,33	е	48004,25
н	46666,75	о	47164,2	е	46828,25
н	46675,75	о	46914,2	с	46142,0
н	46812,75	о	46915,2	с	46277,0
н	46902,75	о	47360,2	ж	45998,0
ч	46480,2				

Таблица 5

Символ	Число нажатий	Среднее значение длительности (10^{-6} с)
л	1	46246,4
н	4	46764,5
ч	1	46480,2
и	1	46943,33
о	4	47088,45
е	2	47416,25
с	2	46209,5
ж	1	45998,0

Таблица 6

Символ кластера	Число нажатий	Среднее значение длительности (10^{-6} с)
Кластер 1	7	46675,4
Кластер 2	6	47197,7
Кластер 3	3	46139,0

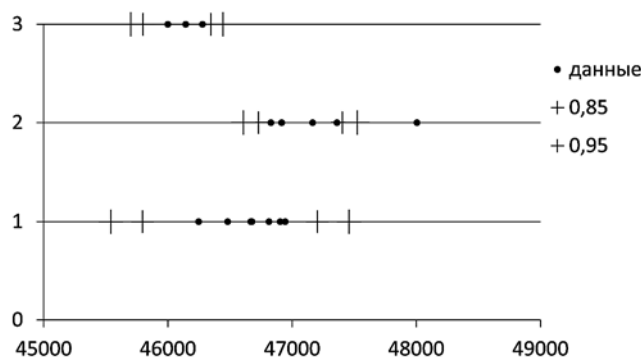


Рис. 2. Диаграмма попадания длительности нажатия на символы добросовестным пользователем в доверительный интервал (по оси x расположены длительности, по оси y — кластеры)

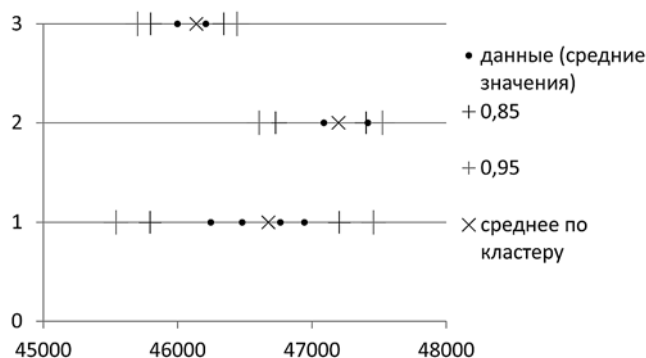


Рис. 3. Диаграмма попадания средних значений длительности нажатия на символы добросовестным пользователем в доверительный интервал (по оси x расположены длительности, по оси y — кластеры)

чение, не попавшее в интервал, может быть отнесено к "грубой ошибке", так как значение сильно отличается (по абсолютной величине) ото всех данных по длительности. Таким образом, подтвердить подлинность обучающегося можно только при условии игнорирования данного выброса. Данный анализ позволяет говорить о нецелесообразности контроля почерка после ввода каждого символа в ответе, так как случайные выбросы будут приводить к принятию неправильного решения для добросовестного пользователя.

Анализ данных по каждому символу позволяет принять правильное решение при условии игнорирования "грубых ошибок". Альтернативой данному методу является анализ средних значений, полученных для одних и тех же символов или для знаков всего кластера в целом.

На диаграмме (рис. 3) отражены значения, полученные при нахождении указанных средних. Почерк можно идентифицировать как соответствующий добросовестному пользователю при условии построения доверительного интервала с вероятностью 0,95 для средних значений по символам или при рассмотрении средних значений по всему кластеру.

Для того чтобы принять решение о наиболее адекватном способе принятия решения, необходимо проанализировать данные "злоумышленника" (другого пользователя) относительно характеристик почерка исследуемого обучающегося.

Для злоумышленника были получены данные о длительности нажатия на клавиши, представленные в табл. 7.

Упорядочивание по кластерам для облегчения обработки данных показано в табл. 8.

Так же, как и для добросовестного пользователя, вычислим необходимые для анализа средние длительности нажатий на каждый символ (табл. 9) и на все символы одного кластера целиком (табл. 10).

Диаграмма попадания в требуемые диапазоны (они сформированы относительно данных

Таблица 7

Символ	Значение длительности (10^{-6} с)	Символ	Значение длительности (10^{-6} с)	Символ	Значение длительности (10^{-6} с)
с	46104,0	с	46259,0	е	46500,2
л	46237,4	о	47258,2	н	46758,75
о	47077,2	ч	47177,25	н	46698,75
ж	46225,0	и	46668,33	о	46888,2
н	46695,75	н	47044,75	е	46704,2
о	46868,2				

Таблица 8

Символ	Значение длительности (10^{-6} с)	Символ	Значение длительности (10^{-6} с)	Символ	Значение длительности (10^{-6} с)
л	46237,4	и	46668,33	е	46500,2
н	46695,75	о	47077,2	е	46704,2
н	47044,75	о	46868,2	с	46104,0
н	46758,75	о	47258,2	с	46259,0
н	46698,75	о	46888,2	ж	46225,0
ч	47177,25				

Таблица 9

Символ	Число нажатий	Среднее значение длительности (10^{-6} с)
л	1	46237,4
н	4	46799,5
ч	1	47177,25
и	1	46668,33
о	4	47022,95
е	2	46602,2
с	2	46181,5
ж	1	46225,0

Таблица 10

Символ кластера	Число нажатий	Среднее значение длительности (10^{-6} с)
Кластер 1	7	46754,4
Кластер 2	6	46882,7
Кластер 3	3	46196

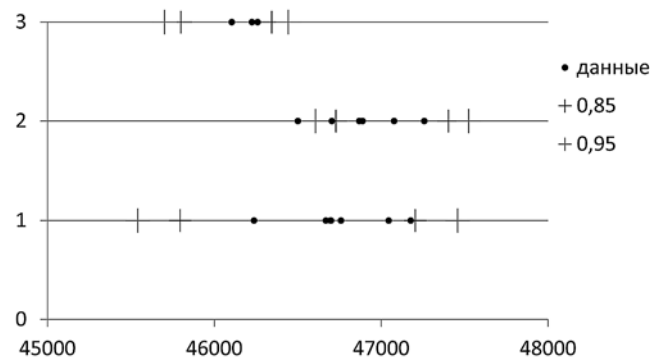


Рис. 4. Диаграмма попадания длительности нажатия на символы "злоумышленником" в доверительный интервал (по оси x расположены длительности, по оси y — кластеры)

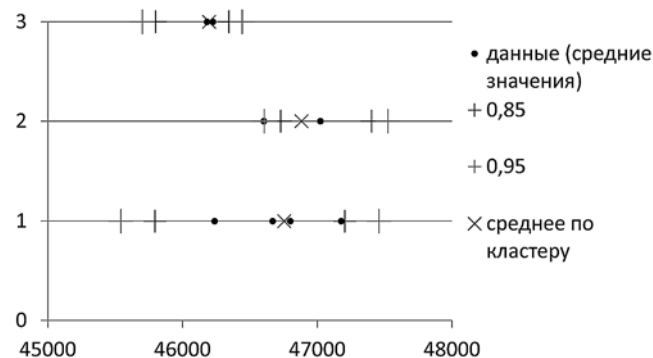


Рис. 5. Диаграмма попадания средних значений длительности нажатия на символы "злоумышленником" в доверительный интервал (по оси x расположены длительности, по оси y — кластеры)

почерка добросовестного пользователя) представлена на рис. 4.

"Грубые ошибки" при вводе отсутствуют (или можно считать таковой одно значение из кластера 1 — значение для символа "л", — которое, тем не менее, попало в требуемый диапазон). Одно из значений второго кластера не попало в диапазон при вероятности 0,95, и два значения — при вероятности 0,85. Таким образом, как и в случае добросовестного пользователя, в кластере 2 присутствуют посторонние значения, однако их характер отличается от ошибок, наблюдаемых в первом случае.

Анализ средних значений, полученных для одних и тех же символов или для знаков всего кластера в целом (рис. 5) дает непопадание одного среднего значения (по символу "е") ни в один, ни в другой доверительный интервалы в кластере 2. Средние значения по кластерам

позволяют сделать неверный вывод о том, что "злоумышленник" является добросовестным пользователем.

Заключение

Проанализировав все полученные данные, можно сделать вывод о возможности проверки подлинности пользователя по кластерному клавиатурному почерку.

Из рассмотренных методов не является удовлетворительным способ оценивания по среднему значению по всем символам кластера. Вероятнее всего, это определяется тем, что комбинация нескольких различных символов дает значительный разброс данных и увеличивает, тем самым, СКО. Поэтому допустимый интервал получается большим и включает усредненные значения практически любого пользователя.

Также, видимо, следует исключить способ принятия окончательного решения по наибольшему числу принятых решений для кластеров в отдельности. Пример показывает, что и в том, и в другом случае почерк подтверждается только по кластерам 1 и 3 и не подтверждается только по кластеру 2, что составляет меньшую часть, т. е. будет принято неверное решение относительно "злоумышленника".

Принятие решения по среднему для нескольких одинаковых символов возможно при использовании доверительного интервала, полученного для вероятности 0,95. Однако следует понимать, что для символов, употребляемых однократно, средние значения будут совпадать с исходными данными, и "грубые ошибки", попадающие на такие знаки, не будут нивелированы.

Использование всех знаков как самостоятельных позволяет принять верное решение при игнорировании "грубых ошибок". Для этого необходимо проводить анализ после ввода ответа целиком, чтобы иметь возможность оценить характер значения, не попавшего в диапазон. Также в этом случае отрицательное решение может быть принято, если в доверительный интервал не попало более одного значения длительности.

Таким образом, достоинством предложенного метода проверки подлинности пользователя является повышение точности принятия решения в автоматическом режиме. Недостатком метода является необходимость хранения большего объема данных по каждому обучающемуся, характеризующих его клавиатурный почерк. Однако возможность использования предложенного метода для проверки подлинности обучаемого во время его работы в образовательной среде дает возможность сделать вывод о перспективности его использования.

Список литературы

1. Антонова И. И., Магомедов Ш. Г., Сумкин К. С., Ко-быш А. Н. Повышение качества электронного образования методами бенчмаркинга // Развитие современного образования: теория, методика и практика. 2017. № 1 (11). С. 38–41.
2. Саркисова И. О. Использование специализированной ЭОС для повышения эффективности обучения мультиязычных групп // Ученые записки института социальных и гуманитарных знаний. 2019. № 1(17). С. 439–443.
3. Мотозов А. В., Иванова И. А. Проблемы реализации и работы с пиринговыми сетями // Телекоммуникации и информационные технологии. 2018. Т. 5, № 1. С. 122–125.
4. Ефромеева Е. В., Смирнова И. А. Автоматизированная система для управления работой по поиску информации на основе анализа обработанных обращений // Вестник МГТУ Станкин. 2019. № 1 (48). С. 118–121.
5. Бахвалова Т. Н., Белкин М. Е., Гладышев И. В., Кудж С. А., Сигов А. С. Фотонная технология как способ совершенствования ключевых технических показателей устройств задержки радиосигналов // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5, № 3 (17). С. 4–21.
6. Иванова С. М., Ильиченкова З. В. Идентификация аттестационных работ при реализации электронного обучения с применением дистанционных образовательных технологий // Вестник МГТУ Станкин. 2015. № 2 (33). С. 116–118.
7. Брюхомицкий Ю. А. Гистограммный метод распознавания клавиатурного почерка. // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. С. 55–62. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/gistogrammnyy-metod-raspoznavaniya-klaviaturnogo-pocherka>.
8. Иванова С. М., Ильиченкова З. В. Аутентификация пользователей мобильных устройств по клавиатурному почерку // Вестник МГТУ Станкин. 2018. № 2 (45). С. 85–89.
9. Шарипов Р. Р., Ситников А. Н. Проблемы при разработке систем распознавания пользователей по клавиатурному почерку // Вестник технологического университета, 2019. Т. 22, № 10. С. 143–147.
10. Алешникова Е. А., Чащина Ю. А. Аксиологизация работы с текстом на уроках русского языка в старшей школе // Русский язык в школе. 2019. Т. 80, № 1. С. 46–49.

S. M. Ivanova, Assistant Professor, e-mail: sm-ivanova@yandex.ru,
Z. V. Ilyichenkova, Assistant Professor, e-mail: zilyichenkova@yandex.ru,
A. A. Antonova, Assistant Professor, e-mail: antonova.an.an@gmail.com,
MIREA — Russian Technological University, Moscow

User Authentication in Training Systems

The problem of verifying the identity of a student who works in an online educational system is discussed in the article. This is necessary to prohibit the substitution of one user for another upon receipt of information or in the process of performing certification work. Verification is carried out on the basis of the student's keyboard handwriting, formed according to the cluster principle. Symbols with similar characteristics are clustered. For each cluster, statistical characteristics are calculated. The authentication method in the process is very important. It is proposed to consider the methods of character-by-character data control or verification after entering the entire answer in order to ensure the correct decision. For this, approaches were used to analyze each symbol individually or average values for various combinations of symbols. During the study, a number of experiments were carried out and the data obtained are presented in the work. Studies have shown efficiency of the proposed user authentication method. Monitoring cluster average values was considered impractical, since large confidence intervals almost always include the average. The most successful is checking after entering the whole word. Next, you should remove the "glaring errors" or calculate the average values for each character, if there are several of them in the answer. In the latter case, the confidence interval must be constructed, based on the probability of occurrence, equal to 0.95.

Keywords: keyboard handwriting, learning systems, character clustering, user control

DOI: 10.17587/it.26.648-654

References

1. Antonova I. I., Magomedov Sh.G., Sumkin K. S., Kobysh A. N. Improving the quality of electronic education using benchmarking methods, *Development of modern education: theory, methodology and practice*, 2017, no. 1 (11), pp. 38–41 (in Russian).
2. Sarkisova I. O. The use of specialized EOS to increase the effectiveness of teaching multilingual groups, *Scientific notes of the Institute of Social and Humanitarian Knowledge*, 2019, no. 1(17), pp. 439–443 (in Russian).
3. Motozov A. V., Ivanova I. A. Problems of implementation and work with peer-to-peer networks, *Telecommunications and Information Technologies*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 122–125 (in Russian).
4. Efremeeva E. V., Smirnova I. A. Automated system for managing information retrieval based on the analysis of processed calls, *Vestnik MGTU Stankin*, 2019, no. 1 (48), pp. 118–121 (in Russian).
5. Bakhvalova T. N., Belkin M. E., Gladyshev I. V., Kuj S. A., Sigov A. S. Photon technology as a way to improve key technical indicators of radio signal delay devices, *Russian Technology Journal*, 2017, vol. 5, no. 3 (17), pp. 4–21 (in Russian).
6. Ivanova S. M., Ilyichenkova Z. V. Identification of certification work in the implementation of e-learning using distance educational technologies, *Vestnik MGTU Stankin*, 2015, no. 2 (33), pp. 116–118 (in Russian).
7. Bryukhomitsky Yu. A. Histogram method of recognition of keyboard handwriting, *News of SFU. Technical science*, Thematic issue, pp. 55–62, available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/gistogrammnyy-metod-raspoznavaniya-klaviaturnogo-pocherka/> (in Russian).
8. Ivanova S. M., Ilyichenkova Z. V. Authentication of users of mobile devices by keyboard handwriting, *Vestnik MSTU Stankin*, 2018, no. 2 (45), pp. 85–89 (in Russian).
9. Sharipov R. R., Sitnikov A. N. Problems in the development of user recognition systems by keyboard handwriting, *Bulletin of the Technological University*, 2019, vol. 22, no. 10, pp. 143–147 (in Russian).
10. Aleshnikova E. A., Chadina Y. A. Axiological working with text on lessons of the Russian language in high school, *Russian language in school*, 2019, vol. 80, no. 1, pp. 46–49 (in Russian).

М. М. Гурарий, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., gourary@yandex.ru,
С. Г. Русаков, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, гл. науч. сотр. —
советник научного руководителя, rusakov@ippm.ru,
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Зеленоград

Анализ установившихся колебаний в автогенераторе при многочастотном возбуждении¹

Представлен анализ квазипериодических режимов произвольного автогенератора при многочастотном возбуждении. Определены три основных возможных режима. В режиме многочастотной синхронизации спектр генератора содержит те же фундаментальные частоты, что и спектр сигнала возбуждения. При недостаточной амплитуде возбуждения возникает режим биений, в спектре которого присутствуют гармоники некоторой дополнительной частоты, определяемой как внутренними свойствами самого генератора, так и амплитудой гармоник возбуждения. Внутренняя частота, как правило, становится дополнительной фундаментальной за исключением особых точек, в которых она становится рациональной комбинацией фундаментальных частот внешнего возбуждения. Численные примеры представлены анализом генератора при квазипериодическом двухчастотном возбуждении на основе фазовой макромоделли. Рассмотрены основные проблемы нахождения стационарного решения фазового уравнения возбужденного генератора методом гармонического баланса.

Ключевые слова: квазипериодические колебания, автогенератор, модель Адлера, фазовые макромоделли, многочастотная синхронизация

Введение

Моделирование явления синхронизации является основной проблемой при анализе систем слабо связанных автогенераторных схем [1, 2]. При этом особый интерес для исследований представляют условия синхронизации в автогенераторных ансамблях [3]. Однако поведение ансамбля генераторов не исчерпывается режимом полной синхронизации, поскольку в ансамбле могут существовать частично синхронизированные (кластерные) состояния [4], которые характеризуются квазипериодическими колебаниями.

Каждый генератор в ансамбле находится под воздействием других генераторов, поэтому его поведение определяется колебательными процессами в одиночном генераторе при квазипериодическом внешнем возбуждении. Поэтому задача анализа такой элементарной конфигурации может стать базовой для анализа более сложных систем взаимодействующих генераторов.

Публикации, непосредственно посвященные этой проблеме, ограничены частными случаями. Работы по квазипериодическому возбуждению лазеров [5] ориентированы на их специфику и не позволяют получить результаты для произвольного генератора. В работе [6] исследованы частотно-модулированные возбуждения одиночного колебательного нейрона, представленного пороговым устройством на основе генератора Ван-дер-Поля. Однако такой подход не позволяет анализировать произвольный генератор при стационарном квазипериодическом возбуждении. В некоторых работах рассматриваются автономные генераторы с многочастотными колебаниями при чисто периодическом возбуждении [7], но этот случай не относится к анализируемой проблеме.

Целью данной работы является анализ характера поведения произвольного периодического (одночастотного) генератора при многочастотном возбуждении. Обсуждается зависимость числа фундаментальных частот генератора от уровня возбуждения и дается определение трех квазипериодических режимов работы генератора. Обоснованность предложенной концепции подтверждается числен-

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-07-00733).

ными экспериментами с использованием фазовой макромодели.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 представлены основы теории квазипериодических колебаний. Раздел 2 описывает применение модели Адлера к анализу генератора при периодическом возбуждении. В разделе 3 представлены три основных режима поведения генератора при квазипериодическом многочастотном возбуждении. Некоторые аналитические выражения для случая двухчастотного возбуждения получены в разделе 4. Результаты численного моделирования, представленные в разделе 5, демонстрируют существование представленных режимов работы генератора при квазипериодическом возбуждении. Раздел 6 посвящен проблемам получения уравнений гармонического баланса для нахождения стационарных решений фазового уравнения.

1. Квазипериодические сигналы

Любое многочастотное колебание может быть определено через функцию тора $u(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$, которая является 2π -периодической по каждой из переменных $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ [8, 9]. Соответствующий сигнал выражается как $x(t) = u(\omega_1 t, \omega_2 t, \dots, \omega_n t)$, где ω_i — несоизмеримые значения фундаментальных частот. Фундаментальные частоты допускают неоднозначное определение: если любую ω_i заменить на

$$\omega'_i = \omega_i + k\omega_j \quad (1)$$

с любым целым числом k , то полученные значения также образуют набор фундаментальных частот, поскольку функция $u(\dots, \tau'_i - m\tau_j, \dots)$ 2π -периодична по τ'_i и также представляет функцию тора.

Частный случай квазипериодической функции представляет сумма синусоид. Другим примером является модулированное колебание с фундаментальными частотами $\omega_1 = \omega_{car}$ (несущая частота), $\omega_2 = \omega_{mod}$ (частота модуляции). Для амплитудной модуляции (АМ) с индексом модуляции m функция тора при синусоидальных сигналах имеет вид

$$u(\tau_{car}, \tau_{mod}) = A_{car}(1 + m \sin(\tau_{mod}) \sin(\tau_{mod})). \quad (2)$$

Функцию тора можно разложить в ряд Фурье:

$$u(\tau) = U_0 + \sum_k U_k \cos(\langle \mathbf{k}\tau \rangle + \phi_k). \quad (3)$$

Здесь мы используем векторную форму обозначений $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_n)$, $\mathbf{k} = (k_1, \dots, k_n)$.

Из выражения (3) получаем многомерный ряд Фурье для $x(t)$ с вектором фундаментальных частот $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$

$$x(t) = u(\Omega t) = U_0 + \sum_k U_k \cos(\langle \mathbf{k}\Omega \rangle t + \phi_k). \quad (4)$$

Постоянный член U_0 равен среднему значению $\bar{x}$ функции $x(t)$:

$$U_0 = \bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt. \quad (5)$$

Производная по времени от ряда (4) также является квазипериодической функцией:

$$\dot{x}(t) = -\sum_k \mathbf{k}\Omega U_k \sin(\langle \mathbf{k}\Omega \rangle t + \phi_k). \quad (6)$$

В отличие от производной (6) интеграл от выражения (4) дополнительно содержит линейную функцию с множителем $\bar{x}$, определенным в соотношении (5):

$$\int_0^t x(\vartheta) d\vartheta = \bar{x}t + \sum_k \frac{U_k}{\langle \mathbf{k}\Omega \rangle} \sin(\langle \mathbf{k}\Omega \rangle t + \phi_k). \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что $\tilde{x}(t) = \int_0^t x(\vartheta) d\vartheta - \bar{x}t$ также является квазипериодической функцией, имеющей то же число фундаментальных частот, что и $x(t)$.

Теперь рассмотрим фазово-модулированное колебание, определенное как $W(t) = F(\theta(t))$ с 2π -периодической функцией F и мгновенной фазой $\theta(t)$. Мгновенная частота колебаний — это производная по времени $\omega_{ins}(t) = d\theta(t)/dt$. Пусть $\omega_{ins}(t)$ представляет собой n -периодическую функцию со средним значением $\bar{\omega}_{ins}$ и вектором фундаментальных частот Ω^{ins} . Результат, полученный из (7) для функции вида $\tilde{x}(t)$, справедлив и для функции $\tilde{\theta}(t) = \theta(t) - \bar{\omega}_{ins}t$, имеющей аналогичный вид. Эта функция поэтому также является n -периодической. При этом, если $\tilde{\theta}(t)$ определяется функцией тора $u_{ins}(\tau^{ins})$, то колебание

$$W(t) = F(\theta(t)) = F(\bar{\omega}_{ins}t + \tilde{\theta}(t)) \quad (8)$$

является $(n+1)$ -периодической функцией с вектором фундаментальных частот $(\bar{\omega}_{ins}, \Omega^{ins})$ и функцией тора $U(\tau_{mean}, \tau^{ins}) = F(\tau_{mean} + u_{ins}(\tau^{ins}))$.

2. Уравнение Адлера

Хорошо известное уравнение Адлера [10] было предложено для получения условий захвата частоты и фазы LC-генератора с собственной частотой ω внешним синусоидальным сигналом с частотой $\omega_{ex} = \omega - \Delta\omega$:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Delta\omega - bA \sin \varphi, \quad (9)$$

где A — это амплитуда внешнего сигнала возбуждения; $b = \omega_{osc}/2QA_{osc}$ — чувствительность генератора к возбуждению; Q — добротность контура.

Поведение синхронизированного генератора соответствует решению (9) в виде постоянного фазового сдвига φ_0 . Подставив $\varphi(t) = \varphi_0$ в выражение (9), получим алгебраическое уравнение относительно φ_0 :

$$\Delta\omega = bA \sin \varphi_0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) существует в том случае, если выполняется условие синхронизации $\Delta\omega \leq bA$. Поэтому амплитуда синхронизации (A_{syn}) в точке захвата определяется как

$$A_{syn} = \Delta\omega/b. \quad (11)$$

Если амплитуда возбуждения меньше, чем A_{syn} (11), то в генераторе возникает двухчастотный режим биений с сигналом генератора вида

$$V(t) = A_{osc} \sin(\theta(t)) = A_{osc} \sin(\omega_{ex}t + \varphi(t)). \quad (12)$$

Здесь $\theta(t) = \omega_{ex}t + \varphi(t)$ — это полная фаза, а ее производная по времени — это мгновенная частота генератора:

$$\omega_{ins}(t) = \frac{d\theta}{dt} = \omega_{ex} + d\varphi/dt. \quad (13)$$

Из выражений (9), (13) получаем

$$\omega_{ins}(t) = \omega_{osc} - bA \sin \varphi. \quad (14)$$

Детальный анализ режима биений для генератора Адлера позволил получить в работе [11] сложное неявное выражение для фазы на основе решения (10).

Здесь мы выведем простую явную формулу для случая малой величины возбуждения $A \ll A_{syn}$ или $bA \ll 1$. В этом случае, отбросив член $bA \sin \varphi$ в выражении (9), полу-

чим приближенное уравнение $d\tilde{\varphi}/dt \approx \Delta\omega$ с решением $\tilde{\varphi}(t) \approx \Delta\omega t$. Подставив $\tilde{\varphi}(t)$ в уравнение (14), найдем отклонение $\Delta\omega_{ins} = \omega_{ins} - \omega_{osc}$ в виде

$$\Delta\omega_{ins} = -bA \sin(\Delta\omega t). \quad (15)$$

Таким образом, малое синусоидальное возбуждение приводит к синусоидальной форме мгновенной частоты. Частота синусоиды равна $\Delta\omega$, а ее амплитуда пропорциональна амплитуде возбуждения с коэффициентом, равным чувствительности генератора к возбуждению. Из уравнения (15) имеем $\Delta\omega_{ins} = 0$, поэтому фундаментальными частотами колебания (12) являются ω_{ex} и $\Delta\omega$ в силу (8).

На рис. 1 показаны результаты моделирования переходного процесса (9) с достаточным временем моделирования для достижения стационарного решения. Параметры модели: $b = 100$, $\omega = 100$ Гц, $\Delta\omega = 4.8$ Гц, $b = 100$, $\omega = 100$ Гц, $\Delta\omega = 4.8$ Гц. Из выражения (11) получаем, что $A_{syn} = 0.048$. Моделирование проводили для разных уровней возбуждения, определяемых относительным параметром $a = A/A_{syn}$.

Для малых значений возбуждения ($a = 0.1; 0.3$) формы сигналов близки к асимптотическим выражениям (15). Графики мгновенных частот для $a = 0.7; 0.9; 0.99$ заметно отличаются от синусоид, и их периоды увеличиваются с ростом a .

Из периодичности мгновенной частоты (рис. 1) следует, что колебания (12) являются двухпериодическими из-за указанных выше свойств фазово-модулированного колебания (8).

Периоды T_{int} сигналов мгновенной частоты соответствуют внутренней частоте генератора, представленной в виде [11]

$$\omega_{int} = \omega_{ex} - \Delta\omega_{int}, \quad \Delta\omega_{int} = \Delta\omega \sqrt{1 - a^2},$$

а соответствующий период представляется в виде $T_{int} = 2\pi/\Delta\omega_{int}$.

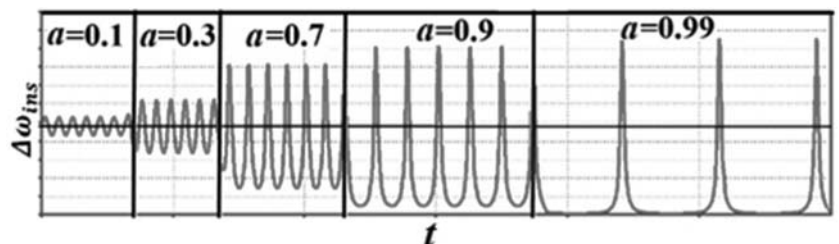


Рис. 1. Сигналы мгновенного отклонения частоты для различных амплитуд возбуждений с относительными величинами a

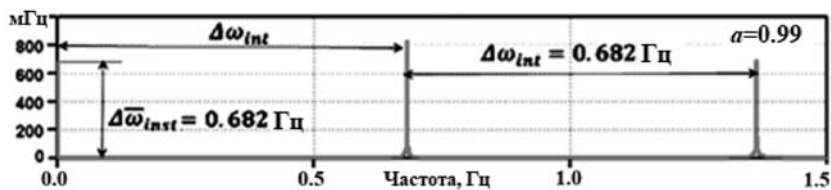


Рис. 2. Начальные три гармоники спектра сигнала для $a = 0,99$

Здесь мы используем $\Delta\omega_{int}$ в качестве фундаментальной частоты вместо ω_{int} в соответствии с выражением (1). Фаза $\varphi(t)$ в соотношениях (9), (13) увеличивается на 2π за период T_{int} . Из (9), (13) можно получить среднее отклонение частоты как $\Delta\omega_{ins} = 2\pi / T_{int} = \Delta\omega_{int}$. Это равенство подтверждается спектром $\Delta\omega_{ins}$, полученным численно методом БПФ (рис. 2). Нулевая гармоника ($\Delta\omega_{ins}$) равна частоте $\Delta\omega_{int}$.

3. Квазипериодические режимы в возбужденном автогенераторе

Указанные выше особенности поведения LC-генератора характерны для произвольной генераторной схемы при периодическом возбуждении (см., например, работу [12]) и могут быть описаны следующим образом.

В автономных генераторах частота определяется свойствами системы, и в системе существует неоднозначное периодическое решение с произвольной фазой. Если к генератору приложено достаточно большое периодическое возбуждение, то происходит синхронизация. Поведение генератора при синхронизации аналогично поведению системы с вынужденными колебаниями — частота совпадает с частотой возбуждения, а фиксированная фаза колебаний определяется амплитудой и формой сигнала возбуждения.

Если амплитуда возбуждения меньше уровня синхронизации, то в генераторе возникают квазипериодические колебания с двумя фундаментальными частотами. Одна из них

всегда является частотой возбуждения ω_{ex} , а другая — это внутренняя частота генератора ω_{int} , зависящая как от значения возбуждения, так и от свойств генератора (рис. 3, а). При малом возбуждении внутренняя частота близка к собственной частоте генератора ω_{osc} . В точке бифуркации, равной амплитуде синхронизации, внутренняя частота становится равной частоте внешнего возбуждения, что приводит к одночастотным колебаниям режима синхронизации. Точки бифуркации для разных частот возбуждения образует границу области захвата (язык Арнольда, рис. 3, б).

Следует отметить, что периодические колебания могут также существовать в некоторых особых точках при сигнале возбуждения ниже уровня синхронизации, если внутренняя частота в такой точке является рациональной дробью относительно частоты возбуждения $\omega_{int} = (p/q)\omega_{ex}$, где p, q — взаимно простые целые числа. В этом случае частоту возбуждения и внутреннюю частоту можно рассматривать как гармоники чисто периодического колебания с общей фундаментальной частотой

$$\omega_{com} = \omega_{ex}/q = \omega_{int}/p. \quad (16)$$

Мы считаем естественным предположить, что генератор при многочастотном квазипериодическом возбуждении ведет себя аналогично представленному выше периодически возбужденному генератору:

1. Если сигнал возбуждения содержит K фундаментальных частот, то в сигнале генератора имеется либо K , либо $K + 1$ фундаментальных частот.

2. В режиме биений колебания содержат $K + 1$ фундаментальных частот, из которых K совпадают с фундаментальными частотами возбуждения, а дополнительная внутренняя частота зависит от свойств генератора и амплитуды возбуждения. Фазы гармоник генератора содержат произвольный сдвиг фазы гармоники внутренней частоты.

3. K -периодические колебания всегда появляются при достаточно большой амплитуде возбуждения. Такое поведение генератора аналогично вынужденным K -периодическим колебаниям в неавтономной системе: фундаментальные частоты генератора и возбуждения совпадают, и фазы гармоник генератора однозначно определяются фазами гармоник возбуждения.

4. Режим генератора со спектром, однозначно зависящим от спектра квазипериодического возбуждения, можно рассматривать как режим



Рис. 3. Генератор с собственной частотой f_{osc} при частоте возбуждения f_{ex} :

а — зависимость фундаментальных частот генератора от амплитуды возбуждения A_{ex} ; б — язык Арнольда для малых возбуждений

многочастотной синхронизации. Предложенное определение является естественным обобщением понятия синхронизации генератора, возбуждаемого периодическим сигналом на генератор при квазипериодическом возбуждении.

5. Вектор амплитуд гармоник возбуждения, при котором генератор переходит в синхронизированное состояние, представляет точку бифуркации. Множество точек бифуркации образует поверхность области синхронизации (захвата) генератора в пространстве амплитуд гармоник возбуждения.

6. K -периодические колебания могут возникать не только в режиме синхронизации, но и в некоторых особых точках режима биений. В этих точках внутренняя частота принимает значение рациональной комбинации фундаментальных частот возбуждения. Колебания в особых точках содержат произвольную фазу, определяемую начальным значением уравнений генератора.

Далее мы рассмотрим некоторые аналитические и численные примеры, чтобы продемонстрировать состоятельность предлагаемой концепции.

4. Асимптотические выражения для двухчастотного возбуждения

Для анализа генератора при многочастотном возбуждении можно применить сглаженную фазовую макромодель для произвольного генератора [13]. Макромодель описывает поведение генератора при возбуждении, определяемом гармониками с медленно меняющимися амплитудами и фазами. Для слабо нелинейного синусоидального генератора при синусоидальном возбуждении макромодель совпадает с моделью Адлера (9). Для входной синусоиды с частотой ω_{ex} и медленно меняющимися амплитудой $A(t)$ и фазой $\psi(t)$ уравнение сводится к обобщению (9) в виде обыкновенного дифференциального уравнения (ОДУ):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Delta\omega - bA(t) \sin(\psi(t) + \varphi). \quad (17)$$

Здесь мы рассмотрим генератор при двухпериодическом возбуждении сигналом АМ (2), для которого решение (17) не может быть получено в аналитическом виде. Поэтому применим асимптотические подходы, основанные на соотношении для узкополосного модулированного сигнала $\omega_{mod} \ll \omega_{car}$, что дает возможность применить многоскоростные методы [14].

При малой амплитуде возбуждения можно использовать формулу (15) к каждой гармо-

нике возбуждения, что позволяет записать аналогичное выражение для случая изменяющейся во времени амплитуды: $\Delta\omega_{inst} = -bA(t)\sin\Delta\omega t$. Это выражение можно записать в несколько иной форме, обозначив $\Delta\tilde{\omega}_{inst}(t, A_0)$ — сигнал мгновенной частоты, полученный из периодического решения (9) и применения (13) для возбуждения с амплитудой A_0 . Тогда с учетом (15) легко получить

$$\Delta\omega_{inst} = \Delta\tilde{\omega}_{inst}(A(t)/A_0, A_0). \quad (18)$$

Выражение (18) справедливо для любого малого A_0 , но чтобы обеспечить лучшую точность, следует взять A_0 , которое наилучшим образом аппроксимирует модулированное возмущение. В наших экспериментах значение A_0 брали равным амплитуде несущей частоты. Результаты расчетов (19), (20) объединены на двух графиках на рис. 4, а (см. четвертую сторону обложки). Глубина АМ-возбуждения $m = 0,5$. Графики $\Delta\omega_{inst}$ для $a = 0,3$ показаны в верхнем ряду, а для $a = 0,8$ — в нижнем. На каждом из графиков даны две кривые: красная — полученная решением (17), и синяя — полученная аппроксимацией (18). При $a = 0,3$ обе кривые практически совпадают, а при $a = 0,8$ формы кривых существенно различаются, но их амплитуды имеют близкие значения.

Другой вариант получения асимптотического решения (17) был рассмотрен для большой амплитуды возбуждения: $A(t) \gg A_{syn}$ для всех t . В этом случае можно рассматривать поведение генератора как медленно меняющийся режим синхронизации и заменять фиксированное значение фазы захвата φ_0 в (10) медленной функцией $\psi(t)$:

$$\Delta\omega = bA(t) \sin \psi(t). \quad (19)$$

Продифференцировав (19) по времени, найдем

$$b \frac{dA}{dt} \sin \psi(t) + bA(t) \cos \psi(t) \frac{d\psi}{dt} = 0. \quad (20)$$

Отсюда получим отклонение мгновенной частоты $\Delta\omega_{inst} = d\psi/dt + \Delta\omega$:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{inst} - \Delta\omega &= \\ &= -\frac{\Delta\omega \cdot dA/dt}{A(t)\sqrt{b^2 A(t)^2 - \Delta\omega^2}} \approx -\frac{\Delta\omega \cdot dA/dt}{bA(t)^2}. \end{aligned} \quad (21)$$

Для синусоидального АМ-сигнала $A(t)$ (2) найдем из (21)

$$\Delta\omega_{inst} - \Delta\omega = -\frac{\Delta\omega \cos \omega_{mod} t}{bA(1 + m \sin \omega_{mod} t)}. \quad (22)$$

Обратная пропорциональность величины $\Delta\omega_{inst} - \Delta\omega$ амплитуде несущей A подтверждается результатами моделирования (рис. 4, б, см. четвертую сторону обложки).

5. Численные эксперименты по определению точек бифуркации и сингулярных точек

Приведенные выше асимптотические выражения были получены на основе использования медленного характера модуляции для случаев, когда сигнал возбуждения либо всегда ниже (см. (19)), либо всегда выше (см. (22)) уровня синхронизации. Такой подход в принципе не может применяться для получения решения в тех случаях, когда сигнал модуляции в некоторые моменты времени пересекает уровень синхронизации. Когда возбуждение достаточно близко к уровню синхронизации, частота возникающих биений намного меньше частоты модуляции (см., например, рис. 1, график для $a = 0,99$). В таком случае модуляция не может рассматриваться как медленный сигнал, и поэтому нельзя применять много-скоростные методы для получения выражений в аналитической форме. Для проведения анализа поведения генератора в этих условиях требуются численные эксперименты.

Для анализа наличия точек бифуркации при переходе генератора в режим синхронизации выбирались те же параметры модели, которые приведены перед рис. 1: $b = 100$, $\omega = 100$ Гц. Использовались следующие параметры АМ-возбуждения: отклонение несущей частоты $\Delta\omega = 4,8$ Гц, частота модуляции $\omega_{mod} = 0,5$ Гц, индекс модуляции $m = 0,5$.

Результаты моделирования для относительных амплитуд несущей частоты возбужде-

ния — $a = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ показаны на рис. 5, а (см. четвертую сторону обложки). Из кривых во временной области мгновенного отклонения частоты (левые графики) затруднительно определить число фундаментальных частот, поэтому оценивали также спектры сигналов (правые графики) с помощью БПФ.

На графиках видно, что в спектрах для $a = 0,7...0,8$ гармоники распределены равномерно с шагом, равным частоте модуляции (0,5 Гц). Таким образом, эти спектры представляют собой чисто периодические колебания мгновенной частоты. Нерегулярное распределение гармоник при $a = 0,5... 0,6$, свидетельствует о квазипериодичности мгновенной частоты, т. е. о режиме биений. Таким образом, можно сделать вывод, что точка бифуркации между областями и биений синхронизации находится в интервале $a = [0,6, 0,7]$.

Более точная оценка точки бифуркации на рис. 5, б (см. четвертую сторону обложки) определяет узкий интервал вокруг точки $[0,6666; 0,6667]$. Спектр для $a = 0,6667$ содержит только гармоники, кратные частоте модуляции (0,5 Гц), а для $a < 0,6667$ имеются дополнительные гармоники, полученные в результате смешения частоты модуляции с внутренней частотой генератора.

Для тестирования существования сингулярных точек в пространстве параметров возбуждения была взята следующая модель: $b = 100$, $\omega = 100$ Гц, $\Delta\omega = 1,5$ Гц, частота модуляции $\omega_{mod} = 1$ Гц, относительная амплитуда несущей $a = 0,5$. Индекс модуляции m был использован в качестве управляющего параметра. С помощью экспериментов, аналогичных приведенным на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки), рис. 7, рис. 8 (см. четвертую сторону обложки), значение точки бифуркации было определено

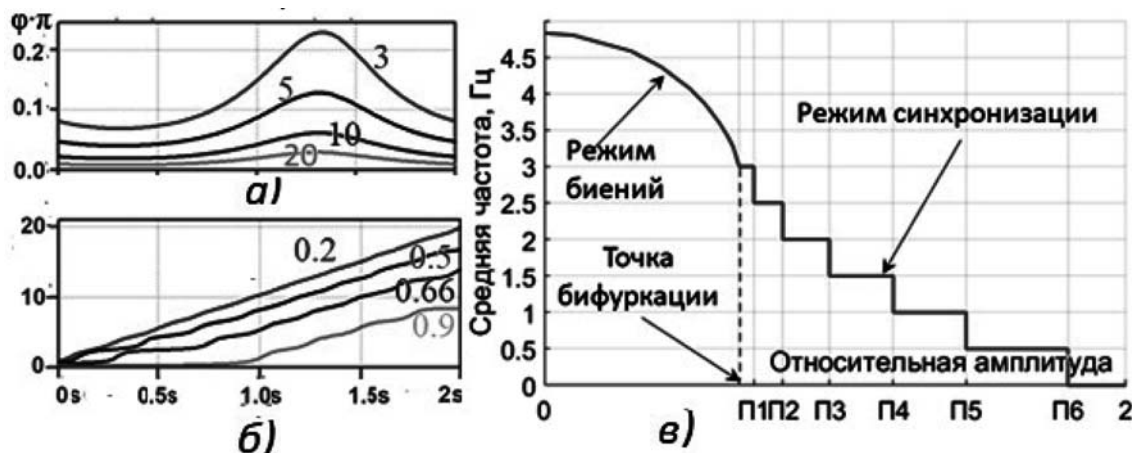


Рис. 7. Временные графики отклонения фазы:

a — для больших амплитуд; b — для малых амплитуд; c — зависимость средней частоты от амплитуды

как $m \in [0,66, 0,67]$. Существование сингулярной точки подтверждается экспериментальными результатами на рис. 6, а (верхние графики для $m = 0,3675$ и нижние графики для синхронизированного генератора при $m = 0,67$), представленными кривыми мгновенного отклонения частоты как во временной (левые графики), так и в частотной областях (правые участки). Сравнение периодических спектров для точки $m = 0,3675$ и для режима синхронизации при $m = 0,67$ показывает соотношение 4:1 между частотами. Таким образом, найдена сингулярная точка $m = 0,3675$, соответствующая рациональной дроби $p/q = 1/4$ (см. (16)) с фундаментальной частотой $\omega_{com} = \omega_{mod}/4 = 0,25$ Гц.

Следующий эксперимент демонстрирует (рис. 6, б, см. четвертую сторону обложки) изолированный характер сингулярной точки (средние графики на рис. 6, б), которой соответствуют во временной области периодические колебания с постоянной амплитудой, а в частотной области — единственная гармоника в узкой полосе вблизи 1 Гц.

Очень небольшие отклонения ($\Delta m = \pm 0,0075$) от особой точки приводят к модуляции временного сигнала (левые графики на рис. 6, б) и появлению дополнительной гармоники внутренней частоты вблизи гармоники модуляции 1 Гц (правые графики).

6. Применение метода гармонического баланса для нахождения квазипериодического решения фазового уравнения

В представленных выше численных экспериментах гармоники квазипериодического решения фазового уравнения (17) определялись путем моделирования переходного процесса на длительном интервале и последующего применения БПФ. Но такой способ часто не обеспечивает требуемую точность расчетов, а для больших ансамблей, кроме того, требует существенных вычислительных затрат. Поэтому мы рассмотрим возможность прямого получения спектра решения методом гармонического баланса (ГБ) [14].

Метод ГБ используется для решения ОДУ с внешним возбуждением $v(t)$

$$\frac{dx}{dt} = g(x, v) \quad (23)$$

для определения стационарного квазипериодического решения в виде усеченного до $N + 1$ гармоники ряда Фурье (4). После подстановки (17) в уравнение (23) и приравнивания к нулю

соответствующих гармоник невязки формируется система алгебраических уравнений порядка $N + 1$ относительно гармоник ($U_0, U_k, \phi_k, k = 1, \dots, N$). Для решения системы используется какой-либо из вариантов метода Ньютона. Уравнения ГБ для свободных колебаний автогенератора включают его собственную частоту как дополнительную переменную и условие фиксации фазы как дополнительное уравнение [15].

Особенностью фазового уравнения (17) по сравнению со стандартным ОДУ (23) является то, что правая часть (17) содержит 2π -периодическую функцию $\sin(\psi(t) + \phi)$. Другая особенность состоит в том, что решение (17) может не представляться рядом (4), а содержать линейный член подобно интегралу (7). Так как решение (17) — это фаза генератора $\phi(t)$, то коэффициент при линейном члене — это отклонение его средней частоты $\Delta\omega$, поэтому можно записать

$$\phi(t) = \overline{\Delta\omega} \cdot t + \bar{\phi}(t). \quad (24)$$

Здесь $\bar{\phi}(t)$ — квазипериодическая функция, а $\Delta\omega$ может быть определено нулевой гармоникой в спектре мгновенной частоты (см. рис. 2). Такой способ был использован в экспериментах по моделированию (17) с теми же параметрами, что и в примере на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки), и с различными значениями относительной амплитуды возбуждения a . Примеры временных графиков отклонения фазы проведены на рис. 7, а, б, на которых видно, что при больших значениях a , соответствующих кривым на рис. 4, б (см. четвертую сторону обложки), величина $\overline{\Delta\omega}$ нулевая, и фаза является чисто периодической функцией без линейного члена (рис. 7, а), а при малых амплитудах явно видно присутствие линейного члена (рис. 7, б).

Подробно зависимость $\Delta\omega$ от амплитуды представлена кривой на рис. 7, в. До точки бифуркации ($a < 0,67$) это гладкая непрерывная кривая, представляющая внутреннюю фундаментальную частоту в области биений: $\Delta\omega = \omega_{int}$. После подстановки выражения (24) в (17) можно получить ОДУ относительно квазипериодической функции $\bar{\phi}(t)$. Для этого ОДУ аналогично уравнениям ГБ для автогенератора [15] можно сформировать систему уравнений, включающую дополнительную неизвестную ω_{int} .

В области синхронизации кривая на рис. 7, в является кусочно-постоянной с точками переключения П1(0,71), П2(0,82), П3(0,98), П4(1,19), П5(1,45), П6(1,9). Разрывный характер этой зависимости объясняется на рис. 8 (см. четвер-

тую сторону обложки), где показаны кривые мгновенной частоты (на одном периоде) вблизи (слева и справа) от точек П1, ..., П6. Видны качественные изменения в точке — после каждого переключения одна из полувольт исчезает. Значение скачка в каждой точке равно в данном случае частоте модуляции $\omega_{mod} = 0,5$ Гц, поэтому в (24) линейный член $\Delta\omega = k(a)$ — целое число, зависящее от амплитуды возбуждения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработка метода определения целочисленного значения k является необходимым условием для получения алгоритма решения фазового уравнения методом ГБ.

Заключение

Три стационарных режима могут существовать при многочастотном возбуждении автогенератора. Режим многочастотной синхронизации характеризуется совпадением фундаментальных частот генератора с фундаментальными частотами возбуждения при достаточно большой амплитуде возбуждения. Многочастотный режим биений находится вне области синхронизации, и его спектр помимо фундаментальных частот возбуждения содержит дополнительную внутреннюю фундаментальную частоту. Режим особых точек в некоторых изолированных точках вне области синхронизации характеризуется равенством числа фундаментальных частот генератора и числа фундаментальных частот возбуждения.

Проведенные численные эксперименты подтвердили появление точек бифуркации при переходе генератора в режим синхронизации. Существование особых точек вне области синхронизации и их изолированный характер также были продемонстрированы экспериментально.

Рассмотрены проблемы применения метода ГБ для фазового уравнения генератора, связанные с наличием в решении линейного члена. Представлено преобразование для формирования уравнений ГБ в стандартном виде. Указаны трудности применения метода ГБ в режиме многочастотной синхронизации.

Список литературы

1. Maffezzoni P., Bahr B., Zhang Z., Daniel L. Reducing Phase Noi in Multi-Phase Oscillators // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2016. Vol. 63, N. 3. P. 379—388. DOI: 10.1109/TCSI.2016.2525078.
2. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M. Macromodeling approaches for simulation of coupled oscillator

networks // In Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. MWENT 2018 — Proceedings 1. P. 1—4. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337277.

3. Ashwin P., Coombes S., Nicks R. Mathematical Frameworks for Oscillatory Network Dynamics in Neuroscience // J. Math. Neuroscience. 2016. Vol. 6, N. 2 DOI: 10.1186/s13408-015-0033-6.

4. Kumar P., Verma D., Parmananda P. Partially synchronized states in an ensemble of chemo-mechanical oscillators // Physics Letters A. 2017. Vol. 381, N. 29. P. 2337—2343. DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.032.

5. Malinowski M. et al. Towards On-Chip Self-Referenced Frequency-Comb Sources Based on Semiconductor Mode-Locked Lasers // Micromachines. 2019. Vol. 10, N. 6. P. 391. DOI: 10.3390/mi10060391.

6. Peleshchak R., Lytvyn V., Bihun O., Peleshchak I. Structural Transformations of Incoming Signal by a Single Nonlinear Oscillatory Neuron or by an Artificial Nonlinear Neural Network // International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). 2019. Vol. 11, N.8. P. 1—10. DOI: 10.5815/ijisa.2019.08.01.

7. Kuznetsov A. P., Sataev I. R., Tyuryukina L. V. Synchronization of quasi-periodic oscillations in coupled phase oscillators // Tech. Phys. Lett. 2010. Vol. 36, N.5. P. 478—481. DOI: 10.1134/S1063785010050263.

8. Самойленко А. М. Элементы математической теории многочастотных колебаний. Ивариантные торы. М.: Наука, 1987. 301 с.

9. Schilder F., Vogt W., Schreiber S., Osinga H. M. Fourier methods for quasi-periodic oscillations // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2006. 67(5). P. 629—67. DOI: 10.1002/nme.163.

10. Adler N. R. A study of locking phenomena in oscillators // Proceedings of the IEEE. 1973. Vol. 61, N. 10. P. 1380—1385. DOI: 10.1109/PROC.1973.9292.

11. Razavi B. A study of injection locking and pulling in oscillators // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2004. Vol. 39, N. 9. P. 1415—1424. DOI: 10.1109/JSSC.2004.831608.

12. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M. Injection Locking/Pulling Analysis of Oscillators Under Fractional Excitation Frequency // 20th European Conf. on Circuit Theory and Design ECCTD 2011. Linköping, Sweden. P. 545—548. DOI: 10.1109/ECCTD.2011.6043404.

13. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli K. K., Mulvaney B. J. Smoothed form of nonlinear phase macromodel for oscillators // 2008 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, San Jose, CA. P. 807—814. DOI: 10.1109/ICCAD.2008.4681669.

14. Desroches M., Guckenheimer J., Krauskopf B., Kuehn C., Christian O. Mixed-Mode Oscillations with Multiple Time Scales // SIAM Review. 2012. Vol. 54, N. 2. P. 211—288. DOI: 10.1137/100791233.

15. Kundert K. S., White J., Sangiovanni-Vincentelli A. Steady-State Methods for Simulating Analog and Microwave Circuits. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990. 247 p.

16. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli K. K., Mulvaney B. J. A robust and efficient oscillator analysis technique using harmonic balance // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2000. Vol. 181(4). P. 451—466. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00184-X.

Analysis of Steady-State Oscillations in an Autonomous Oscillator under Multi-Frequency Excitation

The analysis of the behavior of an oscillator under multi-frequency excitation is considered in the paper. The investigation is based on the phase macromodel. The paper shows that three steady-state modes can exist in oscillator under multi-frequency excitation. The synchronized (locked) mode can be defined as the coincidence of the oscillator fundamentals with the excitation fundamentals in the region of sufficiently large excitation magnitude. The unsynchronized (unlocked) mode exists outside the synchronized region and its spectrum contains additional intrinsic fundamental besides the excitation ones. Singular points mode in some isolated points outside the synchronized region is characterized by the equality of the number of the oscillator fundamentals with the number of the excitation fundamentals. Performed numerical experiments confirmed the appearance of bifurcation points while transition of oscillator into the synchronization mode. The existence of singular points outside the synchronization region and their isolated character was also experimentally demonstrated. The problems of finding a steady-state solution of the phase equation of an excited oscillator by the Harmonic Balance (HB) method are considered. It is shown that main difficulties are connected with the presence of linear term in the steady-state solution. A transformation is proposed to provide the formation of HB equations for the phase micromodel in a standard form. Additional difficulties of HB simulations of synchronized oscillator phase equations are discussed.

Keywords: Adler model, multi-frequency synchronization, phase macromodels, quasiperiodic oscillations, oscillator

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-07-00733

DOI: 10.17587/it.26.655-663

References

1. Maffezzoni P., Bahr B., Zhang Z., Daniel L. Reducing Phase Noi in Multi-Phase Oscillators, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2016, vol. 63, no. 3, pp. 379–388, DOI: 10.1109/TCSI.2016.2525078.
2. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M. Macromodeling approaches for simulation of coupled oscillator networks, in *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. MWENT 2018 — Proceedings 1*, pp. 1–4, DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337277.
3. Ashwin P., Coombes S., Nicks R. Mathematical Frameworks for Oscillatory Network Dynamics in Neuroscience, *J. Math. Neuroscience*, 2016, vol. 6, no. 2, DOI: 10.1186/s13408-015-0033-6.
4. Kumar P., Verma D., Parmananda P. Partially synchronized states in an ensemble of chemo-mechanical oscillators, *Physics Letters A*, 2017, vol. 381, no. 29, pp. 2337–2343, DOI: 10.1016/j.physleta.2017.05.032.
5. Malinowski M., et al. Towards On-Chip Self-Referenced Frequency-Comb Sources Based on Semiconductor Mode-Locked Lasers, *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 6, pp. 391, DOI: 10.3390/mi10060391.
6. Peleshchak R., Lytvyn V., Bihun O., Peleshchak I. Structural Transformations of Incoming Signal by a Single Nonlinear Oscillatory Neuron or by an Artificial Nonlinear Neural Network, *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2019, vol. 11, no. 8, pp. 1–10, DOI: 10.5815/ijisa.2019.08.01.
7. Kuznetsov A. P., Sataev I. R., Tyuryukina L. V. Synchronization of quasi-periodic oscillations in coupled phase oscillators, *Tech. Phys. Lett.*, 2010, vol. 36, no. 5, pp. 478–481, DOI: 10.1134/S1063785010050263.
8. Samoilenko A. M. Elements of the Mathematical Theory of Multi-Frequency Oscillations, Kluwer, Dordrecht, 1991.
9. Schilder F., Vogt W., Schreiber S., Osinga H. M. Fourier methods for quasi-periodic oscillations, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, vol. 67, no. 5, pp. 629–67, DOI: 10.1002/nme.163.
10. Adler N. R. A study of locking phenomena in oscillators, *Proceedings of the IEEE*, 1973, vol. 61, no. 10, pp. 1380–1385, DOI: 10.1109/PROC.1973.9292.
11. Razavi B. A study of injection locking and pulling in oscillators, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2004, vol. 39, no. 9, pp. 1415–1424, DOI: 10.1109/JSSC.2004.831608.
12. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M. Injection Locking/Pulling Analysis of Oscillators Under Fractional Excitation Frequency, *20th European Conf. on Circuit Theory and Design ECCTD 2011*, Linköping, Sweden, pp. 545–548, DOI: 10.1109/ECCTD.2011.6043404.
13. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli K. K., Mulvaney B. J. Smoothed form of nonlinear phase macromodel for oscillators, *2008 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*, San Jose, CA, pp. 807–814, DOI: 10.1109/ICCAD.2008.4681669.
14. Desroches M., Guckenheimer J., Krauskopf B., Kuehn C., Christian O. Mixed-Mode Oscillations with Multiple Time Scales, *SIAM Review*, 2012, vol. 54, no. 2, pp. 211–288, DOI: 10.1137/100791233.
15. Kundert K. S., White J., Sangiovanni-Vincentelli A. Steady-State Methods for Simulating Analog and Microwave Circuits, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1990, 247 p.
16. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli K. K., Mulvaney B. J. A robust and efficient oscillator analysis technique using harmonic balance, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, vol. 181(4), pp. 451–466, DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00184-X.



31 мая – 21 июня 2020 г.



в Санкт-Петербурге
на базе ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»
состоится конференции:

XXVIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57

Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала **(499) 269-5510**

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 10.09.2020. Подписано в печать 28.10.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT1120. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье А. А. Лялинского
**«РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ В ПРОЦЕССАХ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ
 БИБЛИОТЕК ЦИФРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ»**

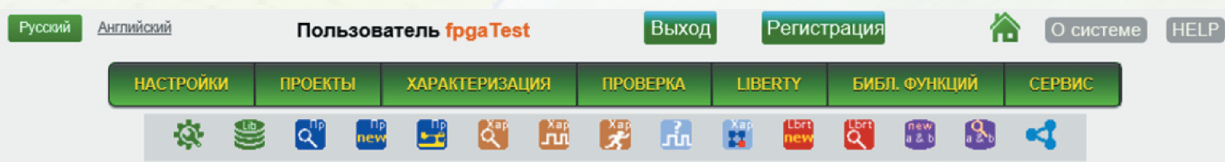


Рис. 3. Меню команд системы веб-характеризации

режим распараллеливания: ☒ по схемам ☐ по схемам и узлам сетки ☐ по всему

- есть данные для создания Liberty-файла

- есть Liberty-файл

- обрабатываемая

- в списке ожидания

Флип-флоп триггеры

прошивка	функция	прошивка	функция
al_dff	!/clk & q /clk & data	al_dfflci	(!clk & q) (clk & !data) clr
al_dffc	(!/clk & q & !clr) (/clk & data & !clr)	al_dffli	!clk & q clk & !data
al_dffci	(!/clk & q) (/clk & !data) clr	al_dffls	(!clk & q) (clk & data) stn
al_dffli	!/clk & q /clk & !data	al_dfflsi	(!clk & q & !stn) (clk & !data & !stn)
al_dffl	!clk & q clk & data	al_dffs	(!/clk & q) (/clk & data) stn
al_dfflc	(!clk & q & !clr) (clk & data & !clr)	al_dffsi	(!/clk & q & !stn) (/clk & !data & !stn)

Рис. 4. Стартовое меню задачи характеризации

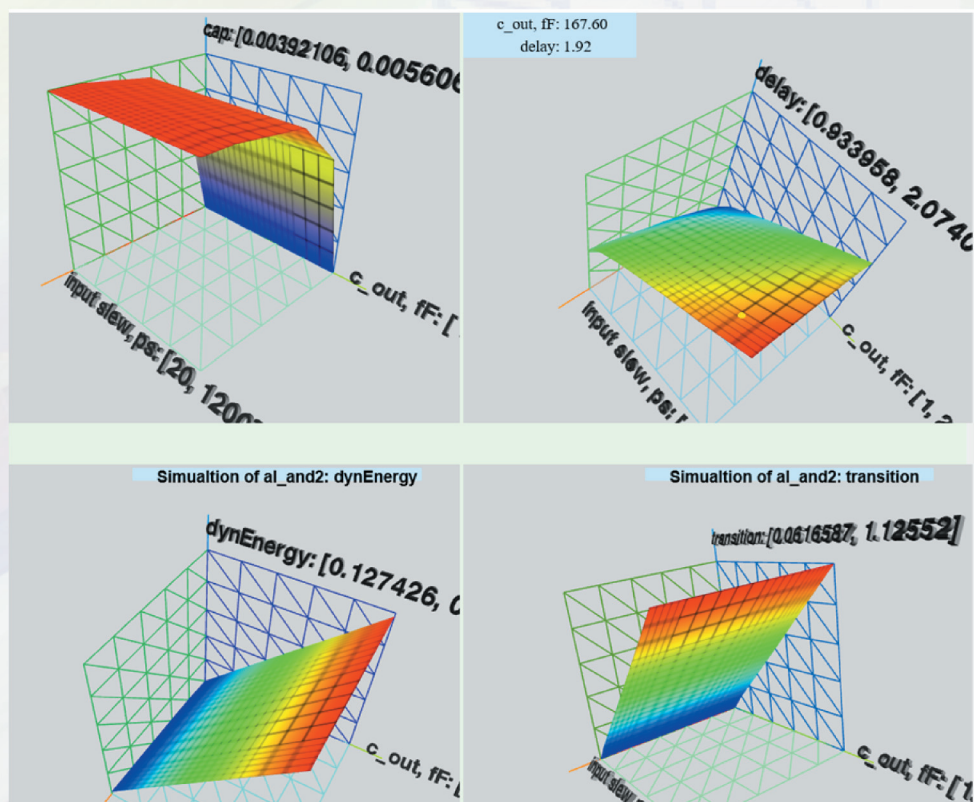


Рис. 8. 3D-плоскости результатов вычисления параметров ячейки

Рисунки к статье М. М. Гурария, С. Г. Русакова
**«АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ В АВТОГЕНЕРАТОРЕ
 ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ»**

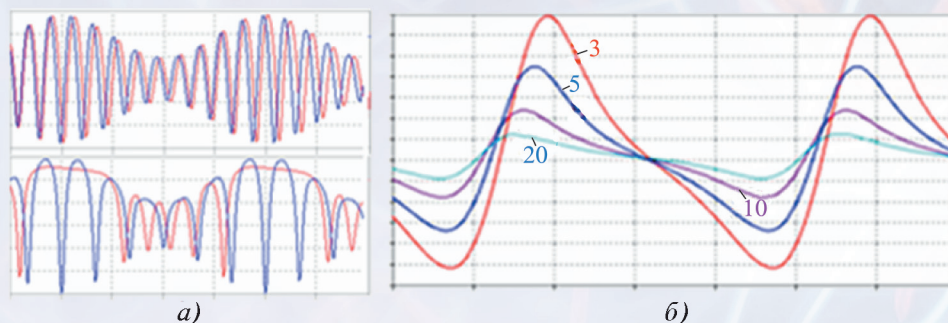


Рис. 4. Моделирование при АМ-возбуждении:

a – верхний график $a = 0,3$, нижний – $a = 0,8$; *б* – большие амплитуды $a = 3; 5; 10; 20$

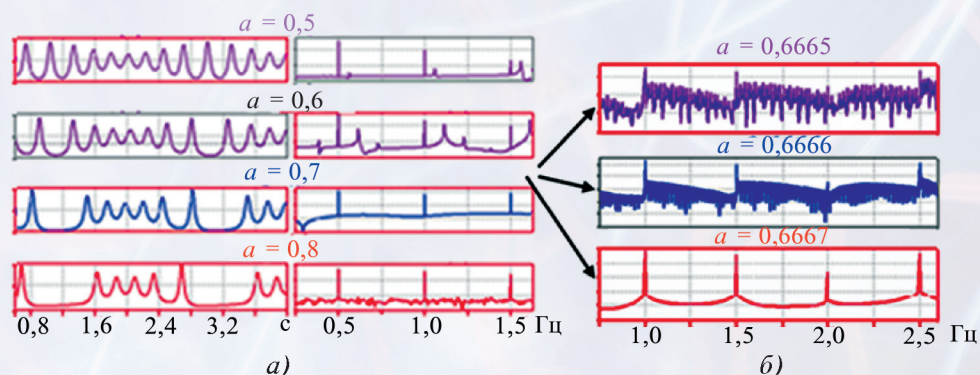


Рис. 5. Графики мгновенной частоты при АМ-возбуждении:

a – временные кривые (слева) и спектры (справа) для амплитуд $a = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$;

б – спектры для амплитуд $a = 0,6665; 0,6666; 0,6667$

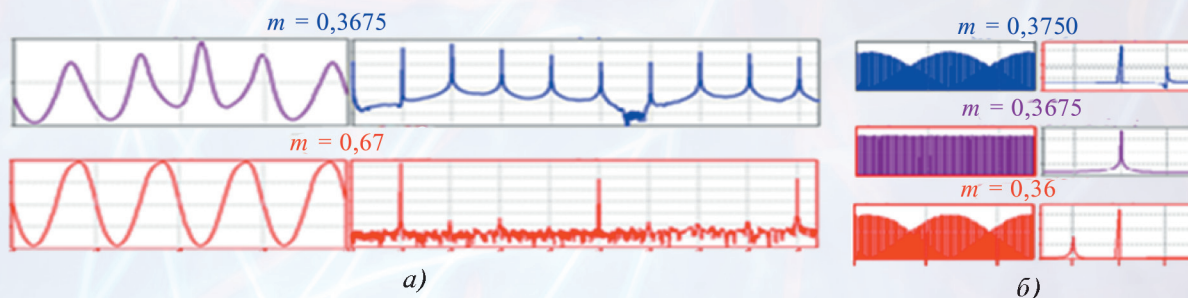


Рис. 6. Временные графики (слева) и спектры (справа) отклонения мгновенной частоты:

a – для сингулярной точки ($m = 0,3675$) и для синхронизированного генератора ($m = 0,67$);
б – для сингулярной точки (средние) и для малых отклонений от нее ($\Delta m = \pm 0,0075$, верхние и нижние графики)

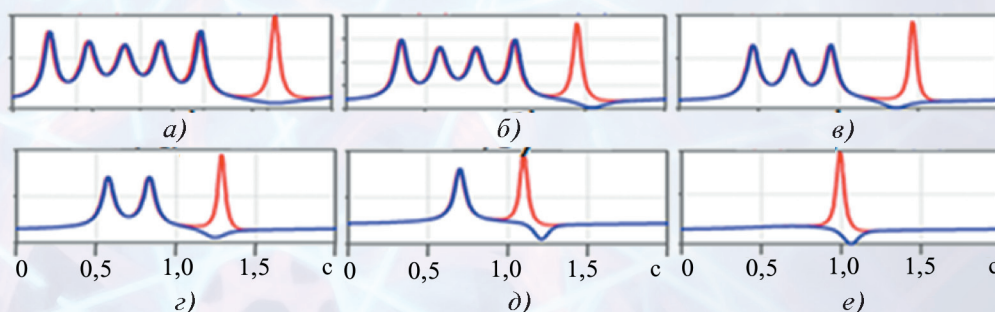


Рис. 8. Формы кривых мгновенной частоты слева (красная кривая) и справа (синяя кривая) от точек переключения:

a – П1; *б* – П2; *в* – П3; *г* – П4; *д* – П5; *е* – П6