

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 4 (68)

2023

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<i>Добротин С. А., Косырева О. Н.</i> Целесообразность использования «исправленных» дисперсий при оценке неопределенности результата измерения.....	5
<i>Волчихин В. И., Иванов А. И., Щербаков М. А.</i> Использование программной поддержки эффектов квантовой суперпозиции для ускорения решения задачи направленного перебора биометрических данных при извлечении знаний из нейросети.....	18
<i>Волчихин В. И., Иванов А. И., Безяев А. В., Филипов И. А.</i> Распознавание малых выборок с заданным распределением данных при использовании искусственных нейронов, предсказывающих доверительные вероятности собственных решений	31
<i>Макарычев П. П., Слепцов Н. В.</i> Формализация базовых преобразований моделей эволюционных вычислений	40
<i>Зефиоров С. Л., Аккуратнов А. Н.</i> Графоаналитический метод анализа событий информационной безопасности.....	52
<i>Щербаков М. А.</i> Особенности дискретизации и восстановления сигналов в нелинейных системах	59
<i>Кирилюк М. А., Парамонов Н. Б., Суминов К. А.</i> Программная модель вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор	70

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

<i>Хелвех К., Кобозев А. А., Никоноров А. В.</i> Оценка эффективности идентификации цели интеллектуальным тепловизионным прибором на основе предварительно обученной сверточной нейронной сети	84
<i>Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Кузнецова М. В., Кукушкин А. Н., Бадеев В. А.</i> Волоконно-оптическая система измерения больших углов наклона крупногабаритных испытательных стендов ракетно-космической и авиационной техники	94

Рыблова Е. А., Волков В. С., Базыкин С. Н., Мясникова Н. В. Исследование влияния технологического разброса параметров на температурную погрешность выходного сигнала тензодатчика давления, применяемого в составе информационно-измерительных систем	106
--	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Попок Н. Н., Анисимов В. С. Формообразование поверхностей деталей режущим инструментом с касательным движением на станках с числовым программным управлением.....	115
Бушуев В. В., Еремьянц В. А., Молодцов В. В., Новиков В. А. Особенности переноса угловых погрешностей привода стола зубофрезерного станка на профиль зуба обрабатываемого колеса.....	126
Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М. Перспективы модернизации технологического станочного оборудования в формате концепции Индустрия 4.0	136
Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимозависимость сил при проходном бесцентровом шлифовании	149
Воячек И. И., Кочетков Д. В., Илюхин А. С. Рациональное обеспечение функциональных свойств соединений с натягом при индивидуальной селективной сборке.....	160
Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Повышение точности настольных станков с числовым программным управлением путем применения пространственных демпферов в их станинах	172

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 4 (68)

2023

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

Dobrotin S.A., Kosyreva O.N. Expediency of using “corrected” variances when evaluating measurement result uncertainty.....	5
Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Shcherbakov M.A. Using software support for quantum superposition effects to speed up the solution of the targeted enumeration issue in biometric data when extracting knowledge from a neural network.....	18
Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Filipov I.A. Recognition of small samples with a given data distribution using artificial neurons that predict the confidence probabilities of their own decisions.....	31
Makarychev P.P., Sleptsov N.V. Formalization of basic transformations models of evolutionary computing.....	40
Zefirov S.L., Akkuratnov A.N. Graph-analytical method for analysing information security events	52
Shcherbakov M.A. Features of signal sampling and reconstruction in nonlinear systems	59
Kirilyuk M.A., Paramonov N.B., Suminov K.A. Software model of a computer with a quantum coprocessor.....	70

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

Helveh K., Kobozev A.A., Nikonorov A.V. Evaluation of the target identification effectiveness by an intelligent thermal imaging device based on a pre-trained convolutional neural network.....	84
Murashkina T.I., Badeeva E.A., Kuznetsova M.V., Kukushkin A.N., Badeev V.A. Fiber-optic system for measuring large inclination angles of large-sized test benches for rocket, space and aviation technology	94
Ryblova E.A., Volkov V.S., Bazykin S.N., Myasnikova N.V. Studying the effect of technological scatter of parameters on the temperature error of the output signal of a pressure strain gauge used as part of information-measuring systems.....	106

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

Popok N.N., Anisimov V.S. Shaping the surfaces of parts using a cutting tool with tangential movement on CNC machines.....	115
Bushuev V.V., Eremyants V.A., Molodtsov V.V., Novikov V.A. Features of transferring the angular errors of the gear hobbing machine`s table drive to the tooth profile of the machined wheel	126
Chigirinskiy Yu.L., Kraynev D.V., Tikhonova Zh.S., Frolov E.M. Prospects for modernization of technological machine tools in the format of the Industry 4.0 concept.....	136
Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. The interdependence of forces during continuous centerless grinding	149
Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Ilyukhin A.S. Rational provision of functional properties of interference joints during individual selective assembly	160
Voronov R.D., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Increasing the accuracy of desktop numerically controlled machines by using spatial dampers in their beds.....	172

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

УДК 51-74

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-1

Целесообразность использования «исправленных» дисперсий при оценке неопределенности результата измерения

С. А. Добротин¹, О. Н. Косырева²

^{1,2}Дзержинский филиал Российской академии народного хозяйства
и государственной службы при Президенте Российской Федерации,
Дзержинск, Россия

¹dobrotin59@mail.ru, ²elia7@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При оценке неопределенности результата измерения используются «исправленные» дисперсии. Это приводит к нарушению правила сложения дисперсий, имеющему большое прикладное значение в метрологических расчетах. Цель работы – статистическая проверка значимости отличия выборочных дисперсий, получаемых осреднением сумм квадратов отклонений как по объему выборки, так и по числам степеней свободы, по сравнению с их отличием от генеральной дисперсии. Объектом исследования являются малые выборки нормально распределенной случайной величины. Предметом исследования являются средние суммы квадратов отклонений. *Материалы и методы.* Исследования выполнены с использованием метода численного имитационного эксперимента (метод Монте-Карло), метода сопоставления (сравнения) и метода тестирования статистических гипотез. *Результаты.* По большому количеству выборок (10^4) малого объема стандартной нормально распределенной случайной величины определялись выборочные дисперсии и стандартные отклонения с осреднением по объему выборки или по числам степеней свободы. Проведено их сравнение друг с другом и с генеральными параметрами. *Выводы.* В случае малых выборок, характерных для проведения измерений по стандартизованным методикам, установлено: наличие смещения выборочного «исправленного» стандартного отклонения относительно генерального; статистическая незначимость способа осреднения сумм квадратов отклонений (по объему выборки или по числам степеней свободы). Способ осреднения по объему выборки приводит к точному выполнению правила сложения дисперсий и, следовательно, более предпочтителен при вычислении дисперсий в нисходящем методе оценки неопределенности результатов измерений.

Ключевые слова: дисперсия, неопределенность, смещенность оценки, имитационный эксперимент, статистическая гипотеза

Для цитирования: Добротин С. А., Косырева О. Н. Целесообразность использования «исправленных» дисперсий при оценке неопределенности результата измерения //

Expediency of using “corrected” variances when evaluating measurement result uncertainty

S.A. Dobrotin¹, O.N. Kosyreva²

^{1,2}Dzerzhinsk branch of The Russian Presidential Academy of National
Economy and Public Administration, Dzerzhinsk, Russia

¹dobrotin59@mail.ru, ²lelia7@list.ru

Abstract. *Background.* When estimating the uncertainty of the measurement result, “corrected” variances are used. This leads to a violation of the rule for adding dispersions, which is of great practical importance in metrological calculations. The purpose of the work is a statistical test of the significance of the difference in sample variances obtained by averaging the sums of squared deviations both over the sample size and the number of degrees of freedom, compared with their difference from the general variance. The object of the study is small samples of a normally distributed random variable. The subject of the study is the average sums of squared deviations. *Materials and methods.* The studies were carried out using: the method of numerical simulation experiment (Monte Carlo method), the method of comparison (comparison), the method of testing statistical hypotheses. *Results.* Using a large number of samples (104) of a small volume of a standard normally distributed random variable, sample variances and standard deviations were determined with averaging over the sample size or over the number of degrees of freedom. They are compared with each other and with general parameters. *Conclusions.* In the case of small samples, typical for measurements by standardized methods, it was found: the presence of a bias of sample “corrected” standard deviation relative to the general one; statistical insignificance of the method of averaging the sums of squared deviations (by sample size or by degrees of freedom). The method of averaging over the sample size leads to the exact implementation of the rule of addition of variances and, therefore, is more preferable when calculating variances in the top-down method for estimating the uncertainty of measurement results.

Keywords: variance, uncertainty, estimate bias, simulation experiment, statistical hypothesis

For citation: Dobrotin S.A., Kosyreva O.N. Expediency of using “corrected” variances when evaluating measurement result uncertainty. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeni. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):5–17. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-1

Введение

При представлении результата измерения должна быть указана его расширенная неопределенность как характеристика качества¹. Она определяется как величина, кратная суммарному стандартному отклонению. При восходящем подходе оно определяется как квадратный корень из взвешенной суммы дисперсий величин, определяющих результат измерения². Обязательным условием при этом является наличие уравнения измерения, после чего можно выполнить все необходимые процедуры и расчеты [1].

¹ ПМГ 96-2009. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления. М. : Стандартиформ, 2010. 14 с.

² ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М. : Стандартиформ. 2017. 83 с.

При нисходящем подходе суммарная дисперсия разбивается на составляющие, соответствующие отдельным факторам. Эти составляющие определяются в соответствии с правилами дисперсионного анализа, который основывается на правиле сложения дисперсий. Для случая наличия одного фактора для генеральных параметров это правило имеет вид [2]:

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_{\text{вг}}^2 + \sigma_{\text{мг}}^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{общ}}^2$, $\sigma_{\text{вг}}^2$ и $\sigma_{\text{мг}}^2$ – соответственно общая, внутри- и межгрупповая дисперсии.

При обработке выборок малого объема, что характерно для практики проведения измерений в самых различных областях [3, 4], получают оценки дисперсий. Считается, что при выполнении требований несмещенности и состоятельности оценок данное правило должно выполняться и для соответствующих выборочных дисперсий, т.е.

$$s_{\text{общ}}^2 = s_{\text{вг}}^2 + s_{\text{мг}}^2, \quad (2)$$

где $s_{\text{общ}}^2$, $s_{\text{вг}}^2$ и $s_{\text{мг}}^2$ – соответственно общая, внутригрупповая и межгрупповая выборочные дисперсии.

Применение данной формулы в области метрологии приводит к ряду частных, но (с точки зрения практической значимости) важных случаев (табл. 1).

Таблица 1

Частные случаи формулы сложения дисперсий

Формула	Назначение	Источник информации
$s_R^2 = s_r^2 + s_L^2$	Оценка воспроизводимости стандартного метода измерений	ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений
$s_{\text{meas}}^2 = s_{\text{sampling}}^2 + s_{\text{analytical}}^2$	Оценка неопределенности пробоотбора	Руководство Eurachem/CITAC. Неопределенность измерения, связанная с отбором пробы. Руководство по методам и подходам
$s_R^2 = s_r^2 + s_{(1)}^2 + s_{(0)}^2$	Оценка составляющих общей дисперсии, характеризующих вклад отдельных факторов в нисходящем методе расчета неопределенности стандартного метода измерений	ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений. Приложение В.1

Примечание. Расшифровка подстрочных индексов у выборочных дисперсий: R – воспроизводимость; r – повторяемость; L – межлабораторное различие; meas – измерение; sampling – пробоотбор; analytical – единичный анализ; (1) и (0) – уровни факторов.

Дисперсия случайной величины по определению является математическим ожиданием квадрата отклонения случайной величины от своего математического ожидания, поэтому оценка дисперсии этой величины, получаемая по результатам единичных определений, может быть найдена как среднее арифметическое квадратов отклонений. При осреднении по числу элементов выборки полученная оценка дисперсии является смещенной [2], поэтому осреднение в практике измерений производится по числу степеней свободы данной статистики

$$s^2 = \frac{SS}{f}, \quad (3)$$

где s^2 – оценка дисперсии; SS – сумма квадратов отклонений; f – число степеней свободы (ЧСС) дисперсии.

У такого подхода есть несколько негативных последствий. Во-первых, как показано в [5], при работе с выборками ограниченного объема правило сложения оценок дисперсий, выражаемое формулой (2), не выполняется. В этом случае выполняется только правило сложения сумм квадратов отклонений:

$$SS_{\text{общ}} = SS_{\text{вг}} + SS_{\text{мг}}, \quad (4)$$

где $SS_{\text{общ}}$, $SS_{\text{вг}}$ и $SS_{\text{мг}}$ – соответственно общая, внутригрупповая и межгрупповая суммы квадратов отклонений.

Указанные суммы определяются следующим образом:

$$SS_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x})^2; \quad (5)$$

$$SS_{\text{вг}} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x}_j)^2; \quad (6)$$

$$SS_{\text{мг}} = q \sum_{j=1}^p (\bar{x}_j - \bar{x})^2, \quad (7)$$

где q – количество элементов в отдельной группе; p – количество групп; x_{ij} – i -е значение величины x в j -й группе; $\bar{x}$ – общая средняя; $\bar{x}_j$ – средняя в j -й группе.

Множитель q в формуле (7) присутствует, поскольку межгрупповую сумму квадратов отклонений нужно, аналогично формулам (5), (6), находить как двойную сумму, а именно:

$$SS_{\text{мг}} = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^p (\bar{x}_j - \bar{x})^2, \quad (8)$$

что и приводит к равенству (7).

Причиной невыполнения формулы (2) является различие ЧСС отдельных составляемых в формуле сложения квадратов отклонений. ЧСС общей, внутригрупповой и межгрупповой выборочных дисперсий определяются [2] как

$$f_{\text{общ}} = pq - 1; \quad (9)$$

$$f_{\text{вг}} = p(q - 1); \quad (10)$$

$$f_{\text{мг}} = p - 1, \quad (11)$$

что и приводит к нарушению равенства (2).

Во-вторых, в силу случайного характера формирования выборки любая статистика, рассчитываемая по этой выборке, будет являться случайной величиной. При выполнении измерений по стандартизованным методикам число единичных определений, по которым рассчитывается результат измерения, очень мало. Часто результат измерения рассчитывается всего по двум единичным определениям. Требование же несмещенности оценки не гарантирует близости полученного значения параметра, рассчитанного по отдельной выборке, к генеральному. По этой причине используются не точечные, а интервальные оценки. Границы интервальной оценки генерального стандартного отклонения случайной величины относительно точечной оценки можно определить предельным отклонением величины

$$\Delta = |s_x - \sigma_x|, \quad (12)$$

где s_x и σ_x – соответственно «исправленное» выборочное и генеральное стандартные отклонения случайной величины x .

Данная величина, представленная в относительном виде

$$q = \frac{\Delta}{s_x}, \quad (13)$$

для случая нормально распределенной случайной величины зависит от доверительной вероятности γ и от объема выборки n . При доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ ее значение при объеме выборки в 5 элементов будет больше единицы [2], не говоря уже о меньших объемах выборки. Все это указывает на возможную незначимость различия в способах осреднения при расчете выборочных стандартных отклонений.

В связи с этим для случая малых выборок актуальной задачей является статистическая проверка значимости отличия выборочных стандартных отклонений, получаемых осреднением сумм квадратов отклонений как по объему выборки, так и по ЧСС рассчитываемых статистик, по сравнению с отличием выборочного стандартного отклонения от соответствующего генерального параметра. Формулируемая гипотеза такова: «В случае малых выборок отклонение «исправленной» оценки дисперсии от генерального параметра имеет такое значение, что смещенность оценки, получаемая при осреднении суммы квадратов по объему выборки, является незначимой».

Материалы и методы

Для формирования выборки, необходимой для дальнейших расчетов, использовался метод Монте-Карло, широко применяемый при аналогичных

статистических исследованиях и, в частности, при сравнении дисперсий [6, 7].

В ходе численного эксперимента с помощью генератора случайных чисел, имеющегося в пакете Microsoft Excel, формировалась малая выборка стандартной нормально распределенной случайной величины объемом q элементов. Параметры закона распределения: математическое ожидание $m_x = 0$, стандартное отклонение $\sigma_x = 1$.

При осреднении по числу степеней свободы выборочная дисперсия определялась следующим образом:

$$s1_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^q (x_i - \bar{x})^2}{q-1}, \quad (14)$$

где x_i – значение случайной величины в выборке; $\bar{x}$ – среднее значение случайной величины в выборке.

При осреднении по объему выборки выборочная дисперсия имеет вид

$$s2_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^q (x_i - \bar{x})^2}{q}. \quad (15)$$

По полученным значениям оценок дисперсий находились соответствующие стандартные отклонения.

Поскольку при расчете расширенной неопределенности результатов измерений используется стандартная неопределенность, то при проверке гипотезы можно сопоставить между собой, с одной стороны: различие оценок стандартных отклонений, получаемых из дисперсий по формулам (14), (15), т.е.

$$\Delta s = s1_x - s2_x, \quad (16)$$

и, с другой стороны, различие между «исправленным» выборочным и генеральным стандартным отклонением, т.е.

$$\Delta \sigma = |s1_x - \sigma_x|. \quad (17)$$

Общее количество формируемых выборок и, соответственно, величин Δs и $\Delta \sigma$ равнялось 10^4 . По полученному массиву значений строились гистограммы этих величин и определялись средние значения этих смещений как средневзвешенные арифметические величины. Например, среднее смещение выборочного стандартного отклонения относительно генерального:

$$\overline{\Delta \sigma} = \Delta \sigma_j \cdot w_j, \quad (18)$$

где $\Delta \sigma_j$ – значение величины $\Delta \sigma$ в j -м интервале гистограммы; w_j – относительная частота в j -м интервале гистограммы.

Аналогичным образом определялось среднее смещение оценок стандартных отклонений $\overline{\Delta s}$. Полученные значения сопоставлялись друг с другом.

Также по критерию Фишера проверялась статистическая гипотеза об однородности выборочных дисперсий, получаемых по формулам (14), (15). Наблюдаемое значение критерия рассчитывалось по формуле

$$F = \frac{s1_x^2}{s2_x^2}. \quad (19)$$

Дисперсии будут считаться однородными при выполнении условия

$$F < F_{кр}(\alpha, f1, f2), \quad (20)$$

где $F_{кр}(\alpha, f1, f2)$ – критическое значение критерия Фишера при уровне значимости α , и числе степеней свободы дисперсии соответственно стоящей в числителе – $f1$ и в знаменателе – $f2$.

Кроме того, проверялась статистическая гипотеза о равенстве математических ожиданий выборочных дисперсий $s1_x^2$ и $s2_x^2$ генеральному параметру σ^2 . В случае одностороннего ограничения нулевая H_0 и альтернативная $\bar{H}$ статистические гипотезы формулируются следующим образом:

- 1) $H_0: E(s^2) = \sigma^2$;
- 2) $\bar{H}: E(s^2) > \sigma^2$,

где E – символ операции нахождения математического ожидания.

В этом случае нулевая гипотеза не отвергается при выполнении следующего условия¹:

$$\frac{s^2}{\sigma^2} < \frac{\chi^2(1-\alpha, v)}{v}, \quad (21)$$

где $\chi^2(1-\alpha, v)$ – квантиль χ^2 -распределения уровня $(1 - \alpha)$ с v степенями свободы; α – уровень значимости.

Число степеней свободы равно

$$v = q - 1. \quad (22)$$

В случае двустороннего ограничения в альтернативной гипотезе выборочная дисперсия может быть как больше, так и меньше генеральной. В этом случае условие принятия нулевой гипотезы выглядит следующим образом:

$$\frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, v\right)}{v} < \frac{s^2}{\sigma^2} < \frac{\chi^2\left(1-\frac{\alpha}{2}, v\right)}{v}. \quad (23)$$

Таким образом, нулевая гипотеза не отвергается при попадании выборочной дисперсии в интервал, определяемый неравенством

¹ ГОСТ Р ИСО 5725-6–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике. М. : Стандартиформ, 2009. 88 с.

$$\frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, \nu\right)}{\nu} \cdot \sigma^2 < s^2 < \frac{\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu\right)}{\nu} \cdot \sigma^2. \quad (24)$$

Результаты проверок позволяют принять или отвергнуть выдвинутую гипотезу об отсутствии различия в способе осреднения сумм квадратов отклонений в случае малых выборок.

Результаты

Гистограмма распределения величины смещения $\Delta\sigma$ показана на рис. 1.

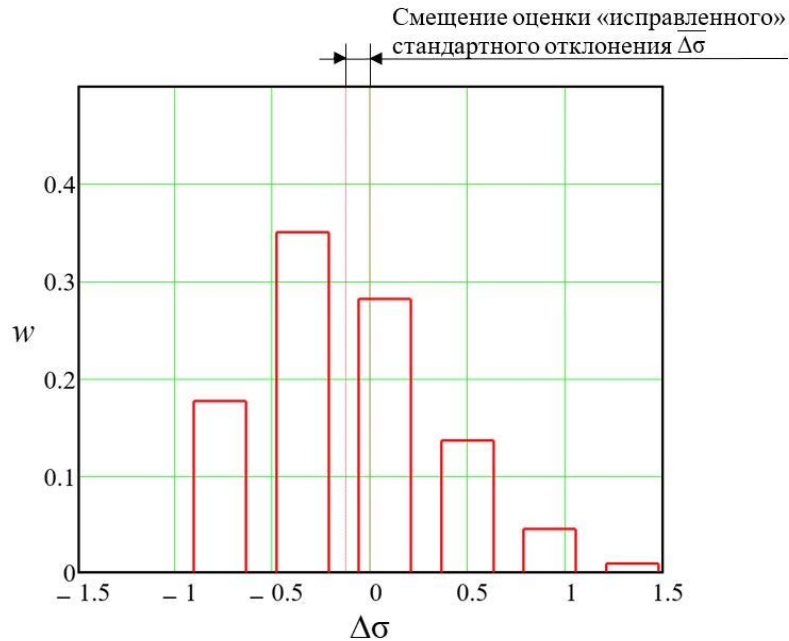


Рис. 1. Гистограмма отклонения выборочного стандартного отклонения от генерального

Результаты имитационных экспериментов показали зависимость величин $\overline{\Delta\sigma}$ и $\overline{\Delta s}$ от объема выборки (рис. 2).

Данные графики получены по большому количеству единичных выборок (10^4 шт.), но в условиях реальных измерений всегда имеют дело с ограниченным количеством выборок малого объема. Поэтому встает вопрос о соотношении величин Δs и $\Delta\sigma$ в отдельной малой выборке. Для этого в каждой полученной выборке по формулам (16), (17) находились смещения Δs и $\Delta\sigma$, рассчитывалось их отношение $\Delta\sigma/\Delta s$ и определялась доля выборок δ , в которой это отношение было больше единицы. Полученные результаты представлены на рис. 3.

При проверке однородности выборочных дисперсий по критерию Фишера, применяемому в случае двух сравниваемых дисперсий [8, 9], результаты обработки имитационного эксперимента в объеме 10^4 серий показаны на рис. 4, из которого следует однородность анализируемых дисперсий.

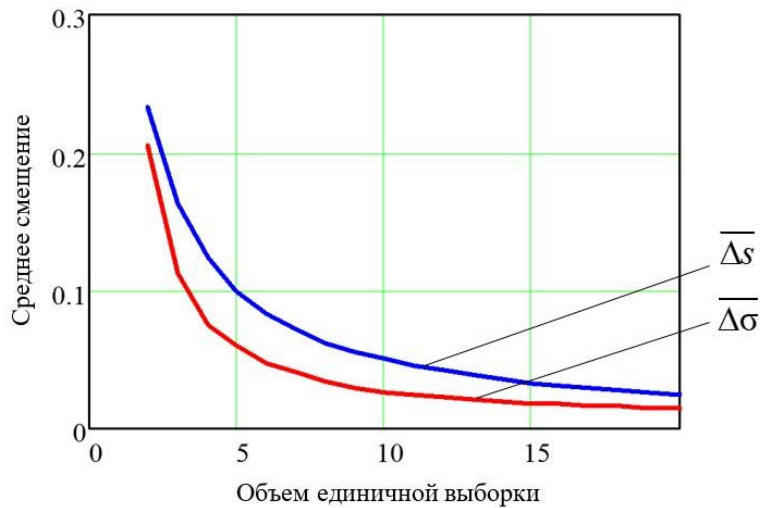
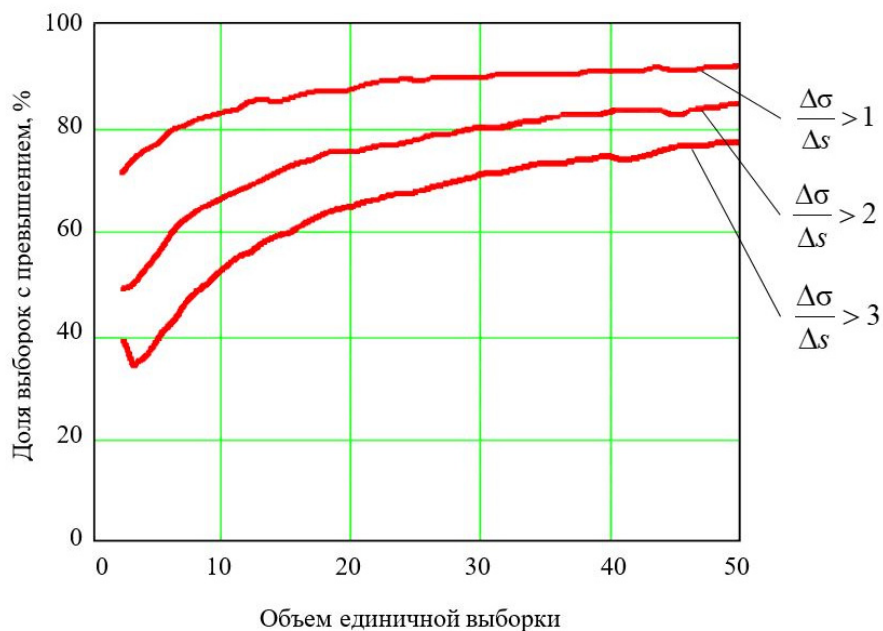


Рис. 2. Зависимость смещения от объема единичной выборки

Рис. 3. Относительная частота превышения смещения $\Delta \sigma$ над смещением Δs

Графическая интерпретация расчетов по проверке статистической гипотезы о равенстве математических ожиданий выборочных дисперсий одному и тому же генеральному параметру, проводимому с помощью условия (24), для одной из серий экспериментов показана на рис. 5. При повторном запуске генератора случайных чисел вид реализации случайного процесса менялся, однако он всегда оставался в пределах границ принятия нулевой гипотезы. Полученные результаты (рис. 5) показывают приемлемость нулевой гипотезы для обеих рассматриваемых дисперсий.

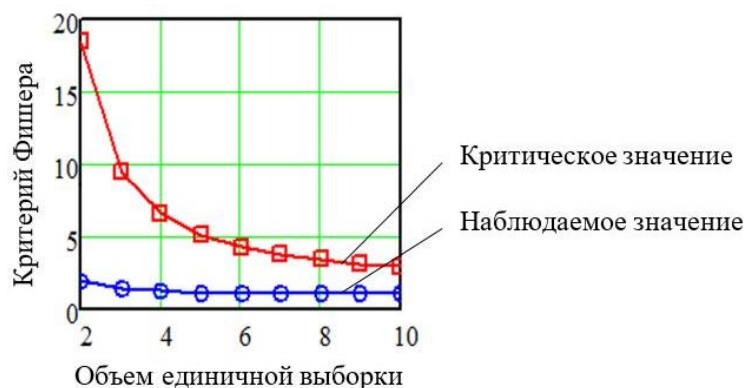


Рис. 4. Сравнение наблюдаемых и критических значений критерия Фишера

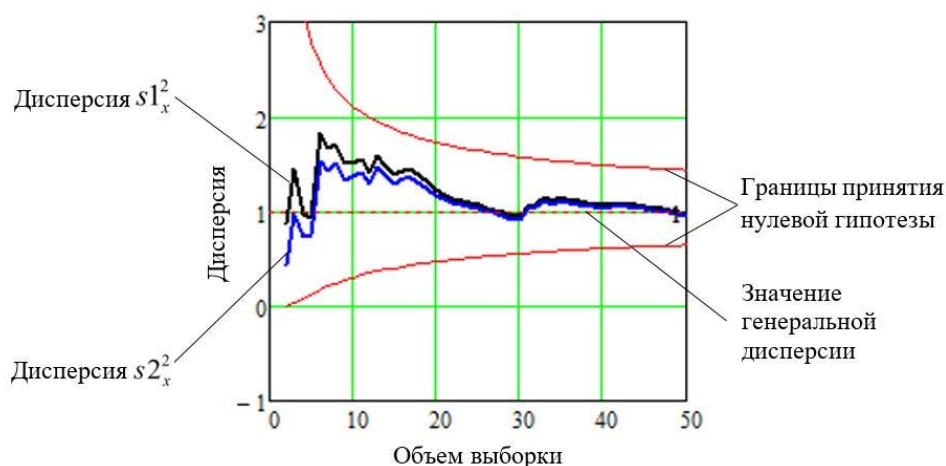


Рис. 5. Зависимость дисперсий от объема единичной выборки в одной серии экспериментов

Обсуждение

Полученные результаты (рис. 1, 2) показали наличие смещенности оценки «исправленного» стандартного отклонения случайной величины, хотя она всегда была меньше, чем смещение оценки стандартного отклонения, получаемого осреднением по объему выборки.

Из графиков (рис. 3) следует, что не менее чем в 75 % выборок наблюдается превышение смещения $\Delta\sigma$ «исправленного» стандартного отклонения от генерального значения над смещением Δs между стандартными отклонениями, получаемыми из дисперсий по формулам (14), (15). Это показывает, что различие в способе осреднения суммы квадратов отклонений нельзя считать значимым.

Данный вывод подтверждается результатами тестирования следующих статистических гипотез:

- 1) об однородности оценок дисперсий, получаемых разными способами осреднения;
- 2) о равенстве их математических ожиданий одному и тому же генеральному значению.

Заключение

Полученные результаты показывают, что при проведении измерений по стандартизованным методикам, предусматривающим проведение единичных определений очень малого количества, получение выборочной дисперсии как отношения суммы квадратов отклонений к числу степеней свободы данной статистики совершенно не уточняют ее значение по сравнению со способом осреднения по объему выборки. Известные исследования по оценке мощности статистических критериев при проверке однородности выборочных дисперсий малых выборок показывают ее крайне малое значение [10]. Это говорит о невозможности уточнения значения выборочной дисперсии за счет различных способов осреднения. Данный вывод согласуется с известными теоретическими интервальными оценками выборочных дисперсий, определяемых по малым выборкам [2]. В то же время способ осреднения по объему выборки приводит к точному выполнению правила сложения дисперсий и, следовательно, более предпочтителен при вычислении дисперсий в нисходящем методе оценки неопределенности результатов измерений¹.

Список литературы

1. Абдрахманов В. И., Добротин С. А., Косырева О. Н., Логотов В. И. Оценка неопределенности измерений линейных индексов удерживания при повышении температуры капиллярной хроматографической колонки // Измерительная техника. 2023. № 1. С. 54–63. doi: 10.32446/0368-1025it.2023-1-54-63
2. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для вузов. М. : Юрайт, 2023. 479 с.
3. Синегубова С. В., Синегубов С. В. О сравнении выборочных дисперсий // Охрана, безопасность, связь. 2020. № 5-2. С. 92–95. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43098084_26579415.pdf
4. Иголинская М. К., Смирнова Е. М., Лебединская Н. А. Математическая статистика в ветеринарии. Малые независимые выборки // Международный вестник ветеринарии. 2016. № 3. С. 177–181. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26740186_96694161.pdf
5. Попов А. А., Косырева О. Н., Добротин С. А. Оценка показателей прецизионности результатов измерений в научных исследованиях на основе правила сложения дисперсий // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 32–43. doi: 10.46960/1816-210X_2022_3_32
6. Лемешко Б. Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению : монография. М. : ИНФРА-М, 2021. 248 с. doi: 10.12737/986695
7. Алдобаев В. Н., Артемьева А. Д., Масликов А. А. Исследование поведения классических критериев множественных сравнений на ненормальных неоднородных распределениях методом Монте-Карло // Вестник Воронежского государственного университета. Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 3. С. 72–80. doi: 10.17308/sait.2021.3/3737
8. Бахарев Д. В. Оценка методом имитационного моделирования статистики критерия Фишера для смеси нормально распределенных случайных величин // Решетневские чтения : сб. тр. по материалам XXIV Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева : в 2 ч. Красноярск, 2020. С. 14–15. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44458806_96963326.pdf

¹ ГОСТ Р ИСО 21748–2021. Статистические методы. Руководство по использованию оценок повторяемости, воспроизводимости и правильности при оценке неопределенности измерений. М. : Стандартинформ, 2014. 39 с.

9. Баяндин Н. Л., Васильев К. Н., Моисеев А. А. Статистическое оценивание значимости клинических факторов // Медицина и высокие технологии. 2018. № 1. С. 5–13.
10. Борбаць Н. М., Школина Т. В. Сравнение критериев однородности дисперсий для целей управления качеством // Современные научные исследования: теория, методология, практика : сб. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2019. С. 74–82.

References

1. Abdrakhmanov V.I., Dobrotin S.A., Kosyreva O.N., Logutov V.I. Estimation of the measurement uncertainty of linear retention indices with increasing temperature of a capillary chromatographic column. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2023;(1):54–63. (In Russ.). doi: 10.32446/0368-1025it.2023-1-54-63
2. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnik dlya vuzov = Probability theory and mathematical statistics: textbook for universities*. Moscow: Yurayt, 2023:479. (In Russ.)
3. Sinegubova S.V., Sinegubov S.V. On the comparison of sample variances. *Okhrana, bezopasnost', svyaz' = Security, safety, communications*. 2020;(5-2):92–95. (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43098084_26579415.pdf
4. Igolinskaya M.K., Smirnova E.M., Lebedinskaya N.A. Mathematical statistics in veterinary medicine. Small independent samples. *Mezhdunarodnyy vestnik veterinarii = International Veterinary Bulletin*. 2016;(3):177–181. (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26740186_96694161.pdf
5. Popov A.A., Kosyreva O.N., Dobrotin S.A. Assessment of precision indicators of measurement results in scientific research based on the rule of adding variances. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev*. 2022;(3):32–43. (In Russ.). doi: 10.46960/1816-210X_2022_3_32
6. Lemeshko B.Yu. *Kriterii proverki gipotez ob odnorodnosti. Rukovodstvo po primeneniyyu: monografiya = Criteria for testing hypotheses about homogeneity. Instructions for use: monograph*. Moscow: INFRA-M, 2021:248. (In Russ.). doi: 10.12737/986695
7. Aldobaev V.N., Artem'eva A.D., Maslikov A.A. Study of the behavior of classical multiple comparison tests on non-normal heterogeneous distributions using the Monte Carlo method. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii = Bulletin of Voronezh State University. System analysis and information technology*. 2021;(3):72–80. (In Russ.). doi: 10.17308/sait.2021.3/3737
8. Bakharev D.V. Estimation of the Fisher test statistics using a simulation method for a mixture of normally distributed random variables. *Reshetnevskie chteniya: sb. tr. po materialam XXIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva: v 2 ch. = Reshetnev readings: proceedings of the 24th International scientific and practical conference commemorating general designer of rocket and space systems, academician M.F. Reshetnev: in 2 parts*. Krasnoyarsk, 2020:14–15. (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44458806_96963326.pdf
9. Bayandin N.L., Vasil'ev K.N., Moiseev A.A. Statistical assessment of the significance of clinical factors. *Medsina i vysokie tekhnologii = Medicine and high technology*. 2018;(1):5–13. (In Russ.)
10. Borbats' N.M., Shkolina T.V. Comparison of homogeneity of variance criteria for quality management purposes. *Sovremennye nauchnye issledovaniya: teoriya, metodologiya, praktika: sb. tr. po materialam Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern scientific research: theory, methodology, practice: proceedings of the International scientific and practical conference*. Ufa, 2019:74–82. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Алексеевич Добротин

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных,
естественнонаучных и гуманитарных
дисциплин, Дзержинский филиал
Российской академии народного
хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
(Россия, Нижегородская область,
г. Дзержинск, ул. Черныховского, 24)

E-mail: dobrotin59@mail.ru

Sergey A. Dobrotin

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of information,
natural sciences and humanities,
Dzerzhinsk branch of The Russian
Presidential Academy of National
Economy and Public Administration
(24 Chernyakhovskogo street, Dzerzhinsk,
Nizhny Novgorod region, Russia)

Ольга Николаевна Косырева

доцент кафедры информационных,
естественнонаучных и гуманитарных
дисциплин, Дзержинский филиал
Российской академии народного
хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации
(Россия, Нижегородская область,
г. Дзержинск, ул. Черныховского, 24)

E-mail: lelia7@list.ru

Olga N. Kosyreva

Associate professor of the sub-department
of information, natural sciences
and humanities, Dzerzhinsk branch
of The Russian Presidential Academy
of National Economy and Public
Administration (24 Chernyakhovskogo
street, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod
region, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 06.03.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 24.05.2023

Принята к публикации / Accepted 30.06.2023

УДК 519.24; 53; 57.017
doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-2

Использование программной поддержки эффектов квантовой суперпозиции для ускорения решения задачи направленного перебора биометрических данных при извлечении знаний из нейросети

В. И. Волчихин¹, А. И. Иванов², М. А. Щербаков³

^{1,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

¹cnit@pnzgu.ru, ²ivan@pneci.penza.ru, ³mashcherbakov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается континуально-дискретная обработка информации естественными нейронами и искусственными нейронами. Целью работы является демонстрация возможностей неограниченно длительной поддержки эффектов квантовой суперпозиции искусственными нейронами. *Материалы и методы.* В качестве примера используется сеть из 256 искусственных бинарных нейронов (персептронов). При упрощении вычислительной сложности оценок энтропии используется стандарт России ГОСТ Р 52633.3–2011. При разномножении данных используется ГОСТ Р 52633.2–2010. Обращение матриц нейросетевых функционалов размерностью 416×256 выполняется итерационно по критерию снижения энтропии выходных кодов нейросети. *Результаты и выводы.* Показано, что поддержка эффектов квантовой суперпозиции длительностью порядка 20 мин на обычном компьютере позволяет решать обратную задачу нейросетевой биометрии. Удастся извлекать знания из нейросети с доверительной вероятностью 0,97 о криптографическом ключе пользователя «Свой» и о параметрах биометрического образа пользователя «Свой».

Ключевые слова: естественные нейроны, искусственные нейроны, квантовая суперпозиция, быстрые алгоритмы оценки энтропии, ускорение направленного перебора

Для цитирования: Волчихин В. И., Иванов А. И., Щербаков М. А. Использование программной поддержки эффектов квантовой суперпозиции для ускорения решения задачи направленного перебора биометрических данных при извлечении знаний из нейросети // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 18–30. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-2

Using software support for quantum superposition effects to speed up the solution of the targeted enumeration issue in biometric data when extracting knowledge from a neural network

V.I. Volchikhin¹, A.I. Ivanov², M.A. Shcherbakov³

^{1,3}Penza State University, Penza, Russia

²Penza Scientific Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

¹cnit@pnzgu.ru, ²ivan@pneci.penza.ru, ³mashcherbakov@yandex.ru

Abstract. *Background.* The continuum/discrete processing of information by natural neurons and artificial neurons is considered. The purpose of the work is to demonstrate the possibilities of unlimitedly long-term support of the effects of quantum superposition by artificial neurons. *Materials and methods.* As an example, a network of 256 artificial binary

neurons (perceptrons) is used. When simplifying the computational complexity of entropy estimates, the state standard GOST R 52633.3–2011 is used. When duplicating data, GOST R 52633.2–2010 is used. The inversion of matrices of neural network functionals with dimensions of 416×256 is performed iteratively according to the criterion of reducing the entropy of the output codes of the neural network. *Results and conclusions.* It is shown that the support of the effects of quantum superposition with a duration of about 20 minutes on a conventional computer makes it possible to solve the inverse problem of neural network biometrics. It is possible to extract knowledge from the neural network with a confidence probability of 0.97 about the cryptographic key of the user “Svoy” and about the parameters of the biometric image of the user “Svoy”.

Keywords: natural neurons, artificial neurons, quantum superposition, fast entropy estimation algorithms, directed enumeration acceleration

For citation: Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Shcherbakov M.A. Using software support for quantum superposition effects to speed up the solution of the targeted enumeration issue in biometric data when extracting knowledge from a neural network. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):18–30. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-2

Введение

Парадигма бинарных нейробиологических вычислений впервые была сформулирована У. Питтсом и У. Маккалоком в 1943 г. [1] и послужила стартом для ряда последующих исследований. В 1949 г. Дональд Хэбб [2] опубликовал первый работоспособный алгоритм обучения искусственных нейронов. Еще один значимый шаг сделал нейрофизиолог Фрэнк Розенблатт в 1957 г., создавший в Корнуэльской лаборатории авионики персептрон. Он же создал первый программный эмулятор нейрокомпьютера «Марк-1» на цифровой вычислительной машине IBM-704 в 1960 г. Это оказало огромное влияние на общественное внимание к тематике создания нейрокомпьютеров.

Параллельно в 40-х и 50-х гг. прошлого века быстро развивалась ветвь обычных компьютеров с обычной булевой логикой (ламповые ЭВМ, транзисторные ЭВМ, компьютеры на микросхемах). К настоящему времени вычислительных ресурсов цифровой логики вполне достаточно, однако их возможности значительно уступают возможностям естественных вычислителей людей и живых существ. Так, люди способны в реальном времени решать 10 000-мерные задачи. У людей и у животных есть большие пирамидальные естественные нейроны с 10 000 входами.

Во многом теория искусственных нейронов строилась дублированием логики развития цифровых компьютеров. Это обусловлено простотой моделирования персептронов и искусственных нейронов с непрерывными выходными функциями. При моделировании на обычных компьютерах не возникает проблемы обеспечения питания вычисляющих элементов, нет проблемы поддержания состояний «0» или состояний «1» на выходах обычной булевой логики или на выходе персептрона Розенблатта.

Совершенно иная ситуация возникает в живых организмах, естественные нейроны не имеют доступа к общему источнику электропитания. Каждый нейрон вынужден самостоятельно вырабатывать энергию на каждый выходной импульс. Передача данных между естественными нейронами живых существ выполняется пачками импульсов [3, 4], как это отражено на рис. 1.

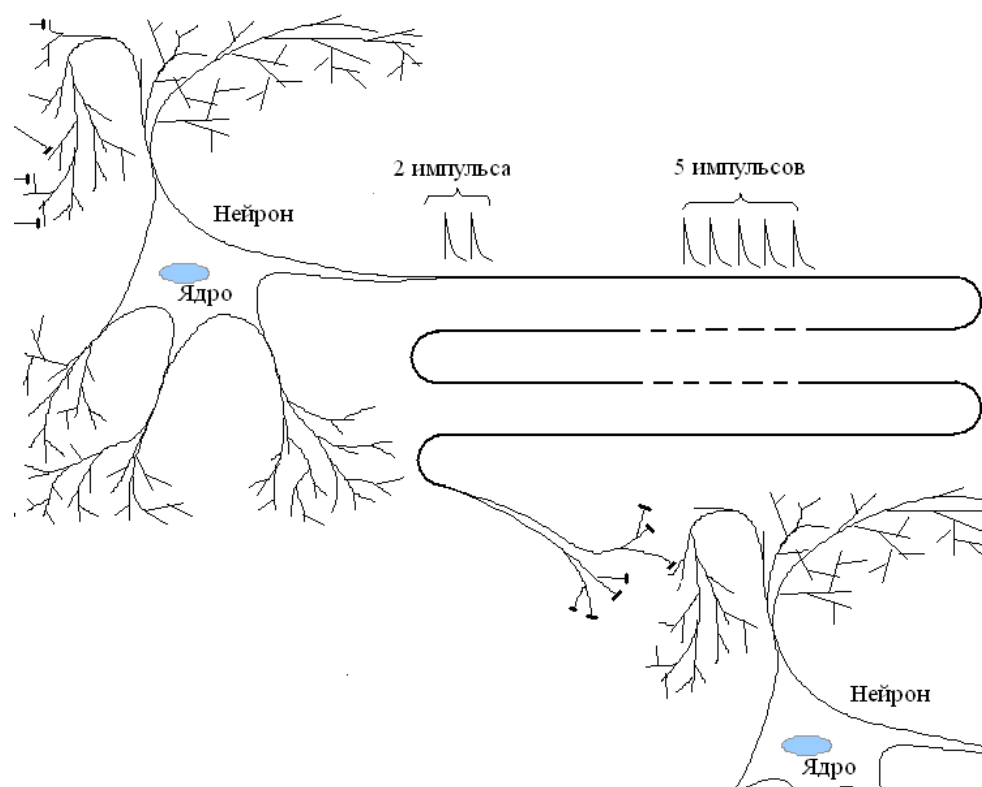


Рис. 1. Естественный нейрон одновременно является и вычислителем, и «модемом» передачи данных по длинной линии – аксону (импульсы – это вынужденный прием, являющийся следствием отсутствия «батареек» внутри «нейромодема»)

Выходной отросток естественного нейрона (аксон) имеет длину в десятки раз больше тела нейрона. Аксоны играют роль длинных проводов передачи информации. Формально естественный нейрон одновременно выполняет вычисления и играет роль «модема», передающего и принимающего информацию. Так как проводящие свойства аксонов хуже проводящих свойств медных проводов, аксоны нейронов не могут быть слишком длинными. В первом приближении импульсы в аксонах можно рассматривать как реализацию некоторых протоколов передачи информации «нейромодемов/электрогенераторов». Видимо, какая-то часть нейронов может почти не заниматься вычислениями, а играет основную роль только как ретранслятор.

Заметим, что если бы была верна бинарная гипотеза Питтса – Маккалока [1], то физиологи могли бы наблюдать только отклики бинарных естественных нейронов. В этом случае нейроны должны выдавать один импульс, соответствующий состоянию «0», либо должны выдавать два импульса, соответствующие состоянию «1». Физиологи же наблюдают пачки импульсов (на рис. 1 изображена пачка из двух импульсов и пачка из 5 импульсов). То есть оставаясь в рамках парадигмы Питтса – Маккалока [1], мы должны констатировать, что логика естественных нейронов является Q-арной, а не бинарной [4, 5]. Тем не менее мы всегда можем упростить задачу, заменяя Q-арную нейробиологию на бинарную нейробиологию.

Промышленное применение сетей искусственных нейронов, автоматически обученных по ГОСТ Р 52633.5–2011 на малых выборках

Одной из актуальных задач Интернета современности является надежная биометрико-криптографическая аутентификация личности человека. Так как рынок средств криптографии и биометрии во всех странах регулируется государством, необходимо иметь национальные и международные стандарты. Под международные биометрические паспорта был создан в 2002 г. комитет по стандартизации биометрии ISO/IEC JTC1 sc37, который к настоящему времени создал 179 стандартов, часть из которых гармонизована и введена в действие на территории России. К сожалению, техническая политика, проводимая США и странами НАТО через ISO/IEC JTC1 sc37, ущербна. «Большой брат» не заинтересован в развитии международной цифровой «демократии». Страны, опирающиеся только на международные биометрические стандарты, фактически отдают биометрию своих граждан под контроль США.

В связи с крайне неудовлетворительным уровнем защиты персональных биометрических данных по международным стандартам Россия вынуждена создавать собственные национальные стандарты по биометрико-нейросетевой аутентификации. На рис. 2 представлена общая схема применения стандарта ГОСТ Р 52633.5–2011 «Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа», регламентирующего автоматическое обучение нейросети на малых выборках образа «Свой».

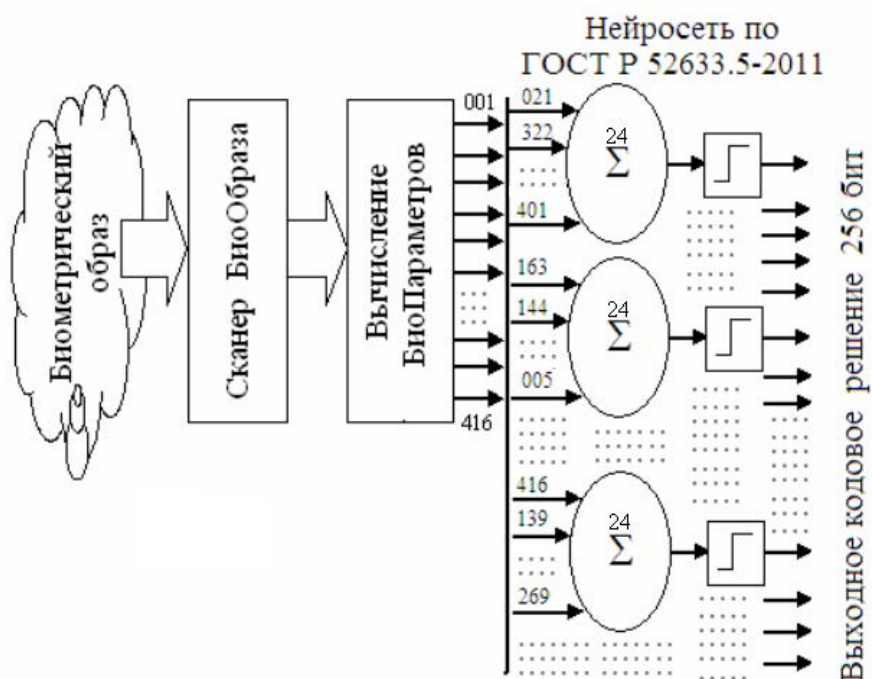


Рис. 2. Блок-схема применения нейросети, обученной преобразовывать 416 биометрические параметры в код криптографического ключа длиной в 256 бит

Следует отметить, что на рис. 2 приведены данные, соответствующие среде моделирования «БиоНейроАвтограф», свободно распространяемой Пензенским государственным университетом среди других русскоязычных университетов. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф» ориентирована на распознавание рукописных букв, воспроизводимых манипулятором «мышь». Нейросеть анализирует 416 биометрических параметров почерка, являющихся старшими коэффициентами двумерного преобразования Фурье. Обучение нейросети выполняется автоматически на выборках в 8 и более примеров рукописной буквы.

На данный момент среда моделирования «БиоНейроАвтограф» является единственным легальным источником достоверной биометрической информации, не подпадающей под национальные ограничения на сбор, хранение и применение персональных биометрических данных. Студент, выполняющий лабораторные работы с использованием среды «БиоНейроАвтограф», не передает свою биометрию университету, после защиты лабораторной работы студент уничтожает данные о биометрии своего рукописного почерка.

Быстрое тестирование качества обучения сетей персептронов по ГОСТ Р 52633.3–2011 на малых выборках

Одной из проблем нейросетевой аутентификации является проблема тестирования качества работы нейросети, достигнутого при ее обучении. Обычно криптографические процедуры оценки качества ключа строятся на оценках его энтропии по Шеннону. Для биометрии рукописного почерка среды моделирования «БиоНейроАвтограф» вероятность ошибок второго рода может достигать значения $P_2 \approx 0,000001$. В этом случае по требованиям международного стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1–2007 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура» потребуется примерно 30 млн примеров образов «Чужие». Университеты не имеют права собирать, хранить, использовать базы биометрических образов большого объема.

Из положения можно выйти, воспользовавшись отечественным стандартом ГОСТ Р 52633.3–2011 «Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора». Его содержание иллюстрируется рис. 3.

Стандарт рекомендует после обучения нейросети, когда ключ «Свой» еще не уничтожен, выполнить тестирование нейросети на малом числе примеров образов «Чужие». При этом следует вычислять расстояния Хэмминга:

$$"h" = \sum_{i=1}^{256} ("c_i") \oplus ("x_i"), \quad (1)$$

где $"c_i"$ – состояние i -го разряда кода «Свой»; $"x_i"$ – состояние i -го разряда кода «Чужой»; $\oplus$ – операция сложения по модулю два.

В силу того, что выходные коды образов «Чужой» и состояния разрядов ключа случайны, операция по вычислению свертки Хэмминга (1) является хорошим нормализатором. Поэтому распределение расстояний Хэмминга

для примеров каждого образа «Чужой» является нормальным, как это показано на рис. 3. То есть, располагая примерно 20 кодами-откликами на примеры образа «Чужой-1», мы можем вычислить их математическое ожидание $E(h)$ и их стандартное отклонение $\sigma(h)$. В рамках гипотезы нормального распределения этих двух статистических моментов достаточно, чтобы оценить вероятность ситуации $P_2(h=0)$ {вероятность появления ошибки второго рода при выполнении условия $h=0$ }, когда один из примеров образа «Чужой-1» точно даст код «Свой».

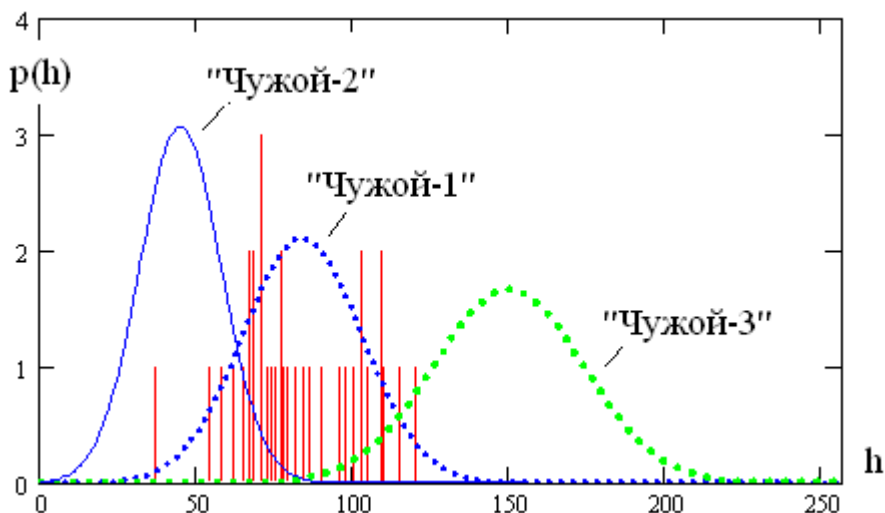


Рис. 3. Эффект нормального распределения откликов нейросети на биометрические образы «Чужой» в пространстве расстояний Хэмминга

В этом случае мы можем оценить энтропию кодов образа «Чужой-1» по следующей простой формуле:

$$H = -\log_2(P_2(h=0)). \quad (2)$$

Отметим, что оценка энтропии по Хэммингу (2) уже не требует тестовых баз огромного объема и не требует расчетов высокой вычислительной сложности, как при оценках энтропии по Шеннону. Последнее является предпосылкой относительно простой сортировки биометрических образов «Чужой» по их энтропии Хемминга.

Извлечение знаний из нейросетевого «черного ящика» направленным перебором

В силу того, что национальные стандарты России по биометрико-нейросетевой аутентификации должны обеспечивать уровень защиты персональных данных много выше международных стандартов, отечественные регуляторы рынка средств информационной безопасности потребовали решить обратную задачу по извлечению знаний из нейросети. При этом задачу нужно было решить без знания ключа «Свой», рассматривая нейросеть как «черный ящик».

Решить эту задачу удастся в силу того, что технически возможно сформировать базу из 10 000 тестовых образов «Чужой», каждый из которых содержит не менее 20 примеров (ГОСТ Р 52633.1–2009 «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации»). Для 20 и более примеров каждого образа удастся выполнить так называемую «проявку» центра образа «Чужой». Проявка выполняется голосованием по большинству обнаруженных состояний в i -м разряде ключа при нечетном числе примеров в выборке. Если большинство примеров имеет состояние « c_i » = «0», то именно это состояние и принимается как результат «проявки».

В итоге мы получаем некоторый код центра образа «Чужой», который в первом приближении можно использовать для оценок расстояний Хэмминга (1). Далее следует вычислить энтропию каждого из 10 000 образов «Чужой», тогда мы получим распределение образов по их энтропии и расстоянию Хэмминга между «проявленными» центрами образов. Пример такого распределения дан на рис. 4.

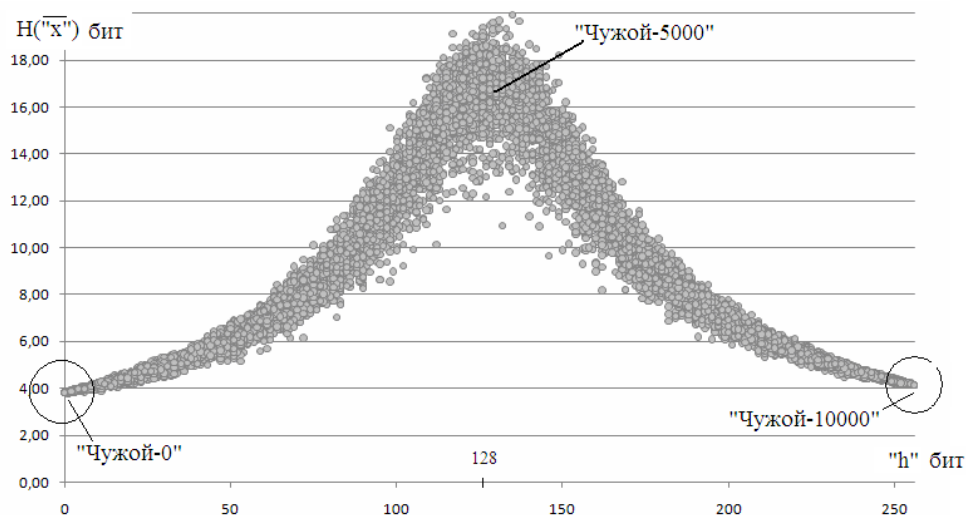


Рис. 4. Распределение образов «Чужой» по значениям их энтропии в пространстве расстояний между «проявленными» центрами образов

Нейросеть, обученная по ГОСТ Р 52633.5–2011 «Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа», всегда имеет два минимума энтропии распознаваемых образов. Энтропия образов «Чужой» снижается по мере приближения их «проявленного» центра к коду ключа «Свой» либо к инверсии этого кода. На рис. 4 левому образу с минимальной энтропией присвоено новое обозначение «Чужой-0». Самому правому образу с минимальной энтропией присвоено обозначение «Чужой-10 000». Мы не знаем, какой из этих образов близок к коду «Свой», а какой – к его инверсии. Тем не менее мы всегда можем выбрать две группы по 50 образов с минимальной энтропией без уточнения появления причины их минимальной энтропии. На рис. 4 группы образов с минимальной энтропией помечены окружностями.

Экономия памяти нейровычислителя с использованием синтетических образов «Чужой», полученных алгоритмом по ГОСТ Р 52633.2–2010

Из рис. 4 видно, что проверка первого поколения 10 000 реальных биометрических образов не дает возможности извлечь знания из нейросети полностью. Для этого необходимо убрать из тестовой выборки большинство реальных образов, оставив для дальнейших преобразований первые 50 образов и последние 50 образов. После такой селекции база образов сокращается в 100 раз, остается от нее всего 1 %.

Чтобы продолжить процедуру извлечения знаний, нейросети необходимо восстановить численность биометрических образов «Чужой» до первоначального объема в 10 000. Для этой цели необходимо воспользоваться рекомендациями ГОСТ Р 52633.2–2010 «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации». Исходные 50 естественных образов дополняются до 5 000 синтетическими образами. Синтетические образы формируют морфинг-скрещиванием двух образов-родителей, принадлежащих одной группе. Примеры полученных от них образов-потомков приведены на рис. 5.

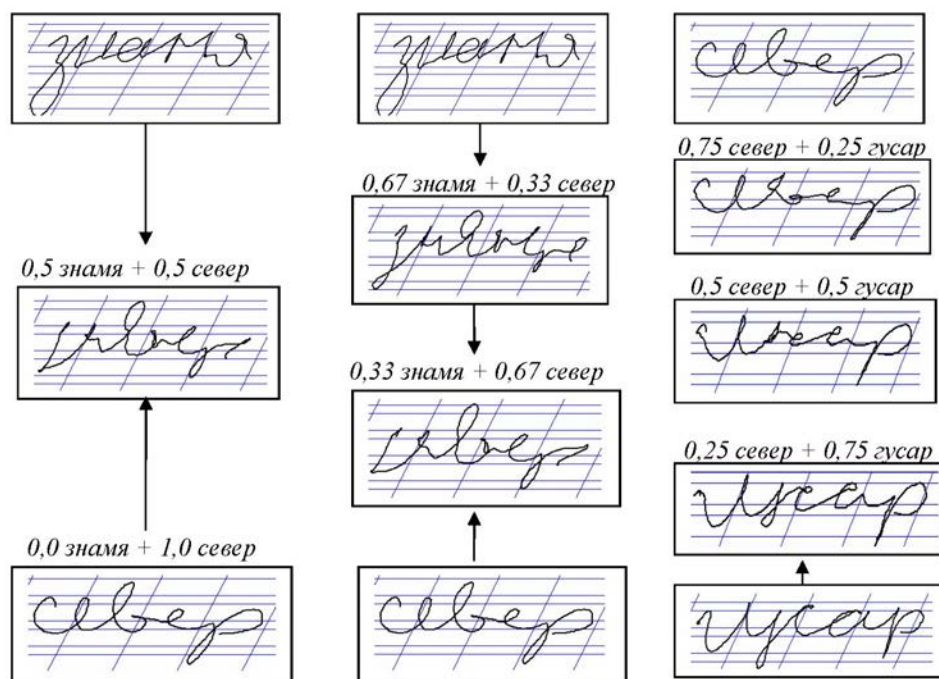


Рис. 5. Морфинг-скрещивание рукописных образов для получения от двух образов-родителей 1, 2, 3 и более образов-потомков по ГОСТ Р 52633.2–2010

Если получать от одной пары образов родителей по одному образу-потомку, то мы получим:

$$(50 - 1) + (50 - 2) + \dots + (50 - 49) = \sum_{i=1}^{49} (50 - i) = 1225 \text{ образов-потомков.}$$

То есть для восстановления численности до первоначальной от каждой пары образов-родителей нужно получать по три либо четыре образа-потомка.

Такая же операция размножения данных должна быть применена и для второй группы 50 естественных образов. В итоге мы получим второе поколение в 10 000 образов, которое следует вновь отсортировать по их энтропии Хэмминга (2). Далее мы вновь можем выполнить сортировку образов «Чужой» по значениям их энтропии.

Практика показала, что для сетей, сформированных и обученных средой моделирования «БиоНейроАвтограф», возможно итерационное снижение минимальной энтропии с 4 бит (рис. 4) до 0,04 бит примерно за 50 поколений размножения и селекции. При этом в вычислительной машине оперативной памяти должно быть достаточно для работы с 5000 векторами длиной по 416 биометрических параметров. В этом случае время вычислений составит примерно 20 мин на обычной вычислительной машине. Если оперативной памяти будет недостаточно, то операционная система будет хранить данные промежуточных вычислений на магнитном диске. Использование долговременной памяти магнитного диска многократно увеличивает время извлечения знаний из сети искусственных нейронов.

После 50 поколений вычислений удастся восстановить до 97 % верных разрядов неизвестного ключа «Свой» и с доверительной вероятностью 0,97 восстановить значения 416 биометрических параметров образа «Свой».

Принципиально важным является то, что в каждом из 50 поколений примерно в 100 раз снижается объем тестовой базы. То есть если бы мы пошли обычным путем предварительного сбора и записи полной тестовой базы, то нам потребовалась бы долговременная память в 100^{50} раз больше. Фактически мы получили экономию памяти в один ГУГЛ раз: $100^{50} = 10^{100}$. Примерно такое же получается и ускорение вычислений за счет того, что мы отказались от вычислений энтропии по Шеннону и перешли к вычислению энтропии по Хэммингу (2). Кроме того, мы получили огромный выигрыш по времени направленного перебора за счет того, что при анализе каждого образа «Чужой» в неявной форме мы поддерживали в течение 20 мин 256-кубитную суперпозицию длинных выходных кодов сети 256 искусственных нейронов.

Корректировка парадигмы Питтса – Маккалока 1943 г. под Q-арные естественные нейроны с промежуточными модемами для передачи данных по «плохим» длинным линиям аксонов

Следует отметить, что У. Питтс и У. Маккалок в 1943 г. создавали свою парадигму нейросетевой бинарной логики, опираясь на представления своего времени. На тот момент бинарные вычисления и бинарные логические автоматы активно исследовались. Казалось, что они универсальны. Взгляд на бинарные логические вычислительные устройства изменился уже в XXI в. с началом попыток создать квантовые вычислительные элементы [6].

Как квантовый вычислительный элемент, например, можно рассматривать молекулу водорода. При любом нагреве молекулы водорода ее излучение всегда дискретно (хорошо изучены спектральные линии водорода). В этом контексте каждый естественный нейрон следует рассматривать как некоторую нейромолекулу. Любой естественный нейрон или эквивалентная

ему нейромолекула на любые входные континуальные воздействия отвечает дискретными откликами. Например, в рамках современных представлений мы можем представить некоторый искусственный нейрон с Q-арным выходным квантователем. Если моделировать естественные нейроны, то в состав искусственного нейрона придется ввести модем, предназначенный для передачи по «плохой» длинной линии его аксона. Как результат, скорость света при распространении сигналов по медным проводам сменяется скоростью звука в «плохих» длинных линиях нейроаксонов. Тем не менее вычислительные ресурсы естественных мозгов огромны.

Обычные многослойные сети искусственных нейронов глубокого обучения [7] между слоев искусственных нейронов не имеют Q-арных квантователей и модемов. Видимо, в сетях глубокого обучения модемы как таковые не нужны, так как в них отсутствует проблема «плохих» длинных линий связи. Тем не менее введение континуально-квантовых туннелей между слоями искусственных нейронов, видимо, может стать эффективной мерой программной поддержки эффектов квантовой суперпозиции. Более чем 10-летняя практика использования нейросетей с программной поддержкой эффектов квантовой суперпозиции [8] показала, что они присутствуют во всех случаях на границах перехода от непрерывной обработки данных к дискретным алгоритмам (протоколам). Поочередный переход от аналоговой к дискретной обработке всегда технически выгоден, однако если размерность решаемой задачи низка, то и выигрыш от циклических переходов от аналоговой обработки к дискретной обработке информации незначителен. Выигрыш становится значительным, если растет число входов у нейронов, если растет число состояний у их выходных Q-арных квантователей и если растет число последовательных переходов через континуально-квантовые туннели внутри каждой цепочки нейромолекул (рис. 6).

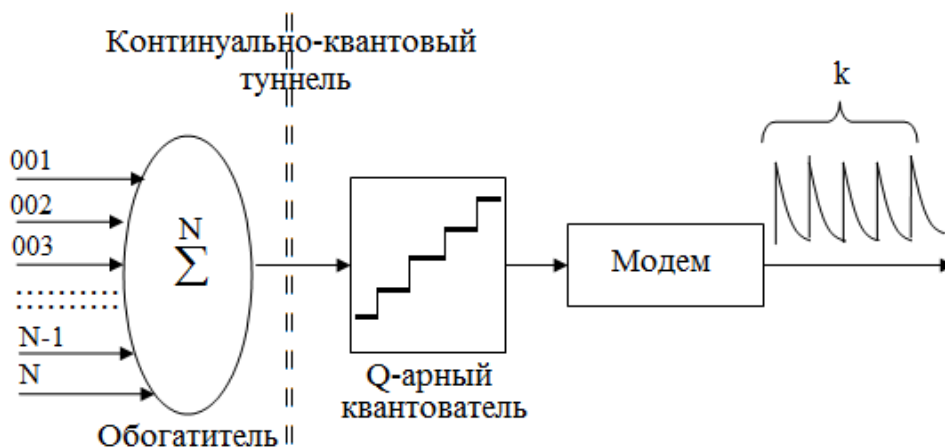


Рис. 6. Представление естественных нейронов в виде условной нейромолекулы, воспроизводящей эффект континуально-квантовых переходов

Заключение

Бионика является весьма и весьма эффективным направлением развития техники. Даже если мы до конца не понимаем, зачем природа использует

ту или иную структуру и какой выигрыш получается из-за ее повсеместного применения, желательно копировать природу. В статье мы попытались показать наличие значительных технических преимуществ при извлечении знаний из однослойных нейросетей, когда процесс замкнут в кольцо и происходит периодический переход от континуальных (аналоговых) вычислений к дискретным вычислениям. Видимо, естественные нейроны в наших головах изначально используют положительные свойства многократных континуально-квантовых переходов. Опираясь на эти взгляды, можно предположить, что популярные сегодня глубокие нейронные сети могут быть существенно улучшены, если между слоями искусственных нейронов будут использованы континуально/дискретные вставки Q-арных квантователей.

Одним из преимуществ такой модификации является снижение энергопотребления большой нейросети. Известно, что мозг человека является самым энергопотребляющим органом. Мозг постоянно потребляет порядка 40 ватт, даже когда человек спит. В работах [9, 10] показано, что замена бинарных нейронов на троичные нейроны приводит к 10-кратному снижению числа нейронов нейросети и, соответственно, к 10-кратному снижению энергопотребления. При этом сети бинарных нейронов и сети троичных нейронов имеют одинаковую доверительную вероятность 0,99.

Расплатой за нововведение является усложнение обучения. При обучении искусственных нейронов придется оптимизировать параметры не только континуальной (аналоговой) части, выполняющей обогащение (накопления) входных данных. Придется дополнительно уделять внимание настройке (оптимизации) параметров выходных нелинейных элементов и в том числе Q-арных выходных квантователей.

Список литературы

1. McCulloch W. S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1943. Vol. 5 (4). P. 115–133. doi: 10.1007/bf02478259
2. Donald Olding Hebb. *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Wiley, 1949.
3. Николлс Д., Мартин Р., Валлас Б., Фукс П. От нейрона к мозгу / пер. с англ. П. М. Балабана, А. В. Галкина, Р. А. Гиниатуллина, Р. Н. Хазипова, Л. С. Хируга. М. : Едиториал УРСС, 2003. 672 с.
4. Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А., Малыгина Е. А. Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2013. № 4. С. 88–99.
5. Малыгина Е. А. Биометрико-нейросетевая аутентификация: перспективы применения сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 114 с.
6. Нильсон М., Чанг И. *Квантовые вычисления и квантовая информация*. М. : Мир, 2006. 821 с.
7. Николенко С., Кудрин А., Архангельская Е. *Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей*. СПб. : Питер, 2018.
8. Иванов А. И. *НейроДинамика: гиперускорение направленных переборов или повышение достоверности статистических оценок на малых выборках* : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 106 с.

9. Волчихин В. И., Иванов А. И., Иванов А. П., Еременко Р. В., Савинов К. Н. Номограммы для сравнения корректирующих способностей бинарных и троичных нейронов, используемых при многокритериальной проверке гипотезы независимости данных малых выборок // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4. С. 5–16.
10. Иванов А. И., Савин К. Н., Еременко Р. В. Эффект перехода от применения бинарных искусственных нейронов к троичным нейронам при совместном использовании пяти классических статистических критериев проверки гипотез нормальности или равномерности распределений малых выборок // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2022. № 3. С. 59–67. doi: 10.17072/1993-0550-2022-3-59-67

References

1. McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1943;5(4):115–133. doi: 10.1007/bf02478259
2. Donald Olding Hebb. *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Wiley, 1949.
3. Nikolls D., Martin R., Vallas B. et al. *Ot neyrona k mozgu = From neuron to brain*. Translated from English P.M. Balabana, A.V. Galkina, R.A. Giniatullina, R.N. Khashipova, L.S. Khiruga. Moscow: Editorial URSS, 2003:672. (In Russ.)
4. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A., Malygina E.A. Prospects for the use of artificial neural networks with multilevel quantizers in biometric-neural network authentication technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2013;(4):88–99. (In Russ.)
5. Malygina E.A. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: perspektivy primeneniya setey kvadraticznykh neyronov s mnogourovnevnyim kvantovaniem biometricheskikh dannykh: preprint = Biometric-neural network authentication: prospects for the use of networks of quadratic neurons with multilevel quantization of biometric data: preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:114. (In Russ.)
6. Nil'son M., Chang I. *Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya = Quantum computing and quantum information*. Moscow: Mir, 2006:821. (In Russ.)
7. Nikolenko S., Kudrin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnykh setey = Deep learning. Immersion in the world of neural networks*. Saint Petersburg: Piter, 2018. (In Russ.)
8. Ivanov A.I. *NeyroDinamika: giperuskorenie napravlennykh pereborov ili povyshenie dostovernosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh: preprint = NeuroDynamics: hyper-acceleration of directed searches or increasing the reliability of statistical estimates on small samples: preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:106. (In Russ.)
9. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Ivanov A.P., Eremenko R.V., Savinov K.N. Nomograms for comparing the corrective abilities of binary and triple neurons used in multi-criteria testing of the hypothesis of independence of small sample data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(4):5–16. (In Russ.)
10. Ivanov A.I., Savin K.N., Eremenko R.V. The effect of the transition from the use of binary artificial neurons to ternary neurons with the combined use of five classical statistical criteria for testing hypotheses of normality or uniformity of distributions of small samples. *Vestnik Permskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer science*. 2022;(3):59–67. (In Russ.). doi: 10.17072/1993-0550-2022-3-59-67

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Иванович Волчихин

доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cnit@pnzgu.ru

Vladimir I. Volchikhin

Doctor of engineering sciences, professor,
president of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, профессор,
научный консультант, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of engineering sciences, professor,
scientific adviser, Penza Scientific
Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Михаил Александрович Щербаков

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматики
и телемеханики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mashcherbakov@yandex.ru

Mikhail A. Shcherbakov

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of automation
and remote control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 31.07.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 01.09.2023

Принята к публикации / Accepted 09.10.2023

УДК 004.056:519.24

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-3

**Распознавание малых выборок с заданным
распределением данных при использовании
искусственных нейронов, предсказывающих
доверительные вероятности собственных решений**

В. И. Волчихин¹, А. И. Иванов², А. В. Безяев³, И. А. Филипов⁴

^{1,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

¹cnit@pnzgu.ru, ²ivan@pniei.penza.ru, ³tsib@pnzgu.ru, ⁴re.wolf@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение достоверности статистической обработки данных на малых выборках является актуальной задачей. *Материалы и методы.* Предложено использовать три искусственных нейрона, являющихся аналогами хи-квадрат критерия, критерия четвертого статистического момента и критерия Гири. Также использована процедура дополнительного обучения выходных нелинейных функций искусственных нейронов для прогнозирования доверительных вероятностей относительно принимаемых нейронами решений. *Результаты.* Показан существенный рост числа обнаруживаемых и исправляемых ошибок при свертывании избыточных кодов нейросетевого классификатора. *Выводы.* Подтверждено, что использование параллельно нескольких статистических критериев дает более достоверный результат в сравнении с одним критерием, и для их объединения могут быть использованы сложные конструкции кодов, способных обнаруживать и исправлять ошибки. Численным экспериментом подтверждено, что двухслойная нейросеть позволяет снизить уровень обнаруженных, но не подлежащих исправлению ошибок до вероятности 0,141. Линейная экстраполяция результатов численного эксперимента позволяет ожидать доверительной вероятности 0,9 уже при использовании 5 искусственных нейронов первого слоя. Тем самым наблюдается существенное снижение затрат на защиту приложений за счет использования в доверенной вычислительной среде SIM-карт, RFID-карт, microSD-карт, USB-Бю Токенов, ПЛИС, DSP-контроллеров.

Ключевые слова: хи-квадрат критерий, критерий четвертого статистического момента, критерий Гири, малые выборки, проверка гипотезы нормальности

Для цитирования: Волчихин В. И., Иванов А. И., Безяев А. В., Филипов И. А. Распознавание малых выборок с заданным распределением данных при использовании искусственных нейронов, предсказывающих доверительные вероятности собственных решений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 31–39. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-3

**Recognition of small samples with a given data distribution
using artificial neurons that predict the confidence
probabilities of their own decisions**

V.I. Volchikhin¹, A.I. Ivanov², A.V. Bezyaev³, I.A. Filipov⁴

^{1,3,4}Penza State University, Penza, Russia

²Penza Scientific Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

¹cnit@pnzgu.ru, ²ivan@pniei.penza.ru, ³tsib@pnzgu.ru, ⁴re.wolf@mail.ru

Abstract. *Background.* Improving the reliability of statistical data processing on small samples. Materials and methods - it is proposed to use three artificial neurons, which are analogues of the chi-square test, the fourth statistical moment test and the Geary test. Additionally, the procedure for additional training of output nonlinear functions of artificial neurons was used to predict the confidence probabilities regarding decisions made by neurons. *Results.* A significant increase in the number of detected and corrected errors during the convolution of redundant codes of the neural network classifier is shown. *Conclusions.* It has been confirmed that the use of several statistical criteria in parallel gives a more reliable result in comparison with one criterion, and complex code designs capable of detecting and correcting errors can be used to combine them. A numerical experiment confirmed that a two-layer neural network can reduce the level of detected, but not correctable, errors to a probability of 0.141. Linear extrapolation of the results of a numerical experiment allows us to expect a confidence probability of 0.9 already when using 5 artificial neurons of the first layer. Thus, there is a significant reduction in the cost of protecting applications due to the use of SIM cards, RFID cards, microSD cards, USB BioTokens, FPGAs, DSP controllers in a trusted computing environment.

Keywords: chi-square test, fourth statistical moment test, Geary's test, small samples, testing of the normality hypothesis

For citation: Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Filipov I.A. Recognition of small samples with a given data distribution using artificial neurons that predict the confidence probabilities of their own decisions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):31–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-3

Введение

Известные итерационные алгоритмы обучения сетей искусственных нейронов [1, 2] неустойчивы из-за неустойчивости вычисления производных приращения либо снижения показателя качества обучения. Как следствие, итерационные алгоритмы обучения трудно полностью автоматизировать. Проблему полной автоматизации обучения нейронов удастся решить, если отказаться от итерационных процедур оптимизации и воспользоваться детерминированными процедурами приближенного вычисления весовых коэффициентов однослойной сети персептронов [3]¹.

При решении задач нейросетевой биометрико-криптографической аутентификации необходимо использовать доверенную вычислительную среду (SIM-карт, RFID-карт, microSD-карт, USB-БиоТокенов, ПЛИС, DSP-контроллеров). Как правило, доверенные контроллеры имеют ограниченные вычислительные ресурсы (ограниченный объем памяти, ограниченное число аппаратно реализованных криптографических функций, ограниченное энергопотребление). Предположительно, параллельно с аппаратной реализацией криптографических функций в доверенной вычислительной среде должны появиться аппаратно реализованные функции нейросетевых преобразований. В частности, перспективой является использование в контроллерах аппаратных реализаций искусственных нейронов, являющихся аналогами статистических критериев [4–6], построенных на проверке гипотез о нормальном и равномерном распределении малых выборок.

Например, вектор из нескольких сотен биометрических параметров может быть использован для формирования малых выборок по 16 опытов

¹ ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

с нормальным законом распределения значений и с равномерным распределением значений. Если воспользоваться классическим хи-квадрат критерием для проверки гипотезы нормального распределения данных, то мы получим распределение откликов, отображенное на рис. 1. В левой части рисунка дана программа, воспроизводящая критерий хи-квадрат при воздействии на него нормально распределенными данными.

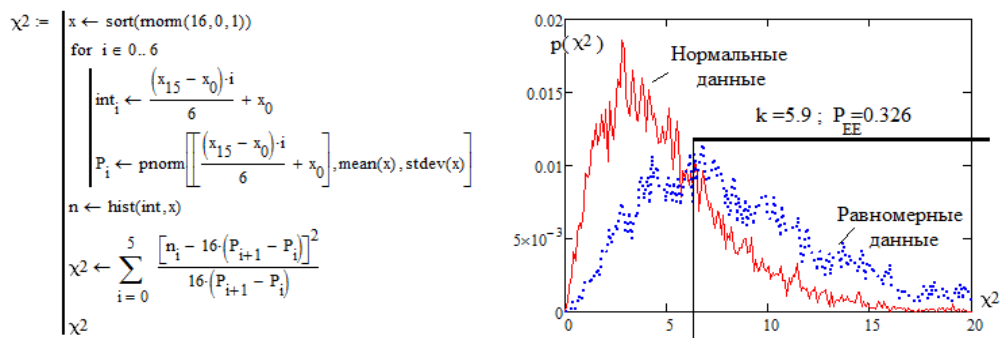


Рис. 1. Отклики хи-квадрат критерия, настроенного проверять гипотезу нормального распределения малой выборки в 16 опытов

В правой части рисунка отображены распределения откликов хи-квадрат критерия на нормальные и равномерные данные (для получения откликов на равномерные данные следует первую строку программы заменить на другую: $x \leftarrow \text{sort}(\text{runif}(16, -1, 1))$). Формально мы можем поставить в соответствие хи-квадрат критерию эквивалентный ему искусственный нейрон, поставив поле хи-квадрат обогатителя данных квантователь с порогом $k = 5,9$. В этом случае искусственный нейрон будет откликаться состоянием «0» при обнаружении нормальных данных и состоянием «1» при обнаружении равномерно распределенных данных. Значение порога квантователя подобрано так, чтобы вероятности ошибок первого и второго рода искусственного нейрона совпадали $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,326$. То есть одиночный искусственный хи-квадрат нейрон, настроенный на проверку гипотезы нормальности, позволяет принимать решения с низкой достоверительной вероятностью 0,674.

Очевидно, что несколько статистических критериев, использованных параллельно, должны давать более достоверный результат в сравнении с одним критерием. Для их объединения могут быть использованы простейшие избыточные коды, способные обнаруживать и исправлять ошибки [6]. Очевидно также, что замена простейших кодов на более сложные конструкции должна приводить к росту достоверности принимаемых решений.

Дообучение искусственного хи-квадрат нейрона введением двух дополнительных функций прогноза уровня доверия

В случае снижения обнаруженного значения хи-квадрат отклика растет доверие к выходному состоянию «0». При росте значения хи-квадрат увеличивается доверие к выходному состоянию «1». Рассуждая формально, мы можем параллельно с бинарным квантователем использовать две непрерывные монотонные выходные функции хи-квадрат нейрона, выходное состояние которых оценивает уровень доверия к дискретному решению искус-

ственного нейрона. В итоге получается хи-квадрат нейрон с тремя выходами, отображенный на рис. 2.

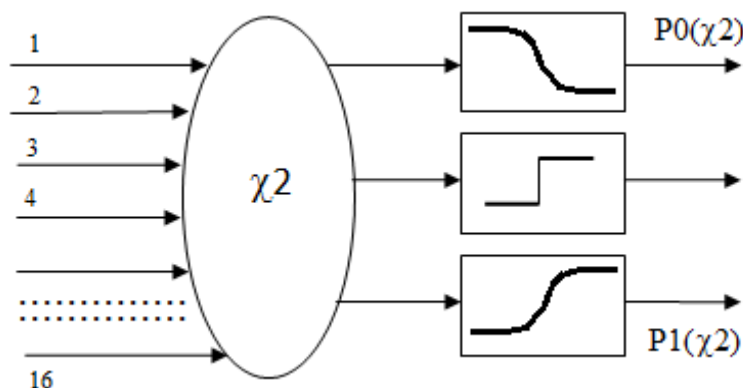


Рис. 2. Хи-квадрат нейрон с тремя выходами, два из которых непрерывные и дают оценку доверительной вероятности состояний третьего дискретного выхода

Очевидно, что дополнительные функции доверия $P0(\chi^2)$ и $P1(\chi^2)$ могут быть получены интегрированием плотностей распределения вероятностей, представленных на рис. 1. В частности, результаты интегрирования могут быть отображены таблицами доверительной вероятности, что является обычной формой для статистических справочников [7] и стандартов¹.

Ниже приведена таблица доверительных вероятностей для решения «0» хи-квадрат искусственного нейрона на малых выборках в 16 опытов (табл. 1).

Таблица 1
Таблица доверительных вероятностей для состояния «0» хи-квадрат нейрона

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
χ^2	0	1	1,5	2,3	2,9	4,4	6,1	7,3	9,4	11,3	22,2
$P0$	1	0,954	0,9	0,8	0,705	0,505	0,302	0,202	0,1	0,052	$1 \cdot 10^{-3}$

Если хи-квадрат нейрон принимает иное решение «1», то таблица доверительных вероятностей к этому решению оказывается иной (табл. 2).

Таблица 2
Таблица доверительных вероятностей для состояния «1» хи-квадрат нейрона

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
χ^2	0	1	1,5	2,3	2,9	4,4	6,1	7,3	9,4	11,3	22,2
$P1$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,052	0,099	0,201	0,304	0,505	0,701	0,8	0,903	0,95	0,999

Так как плотности распределения вероятностей выходных состояний для нормальных данных и равномерных данных разные, таблицы доверительных вероятностей существенно различаются. При необходимости табли-

¹ Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 . М. : Госстандарт России, 2001. 140 с.

цы могут быть использованы для восстановления непрерывных функций вероятности через использование кусочно-линейной аппроксимации. На рис. 3 даны примеры восстановленных по таблицам непрерывных кусочно-линейных функций доверительной вероятности.

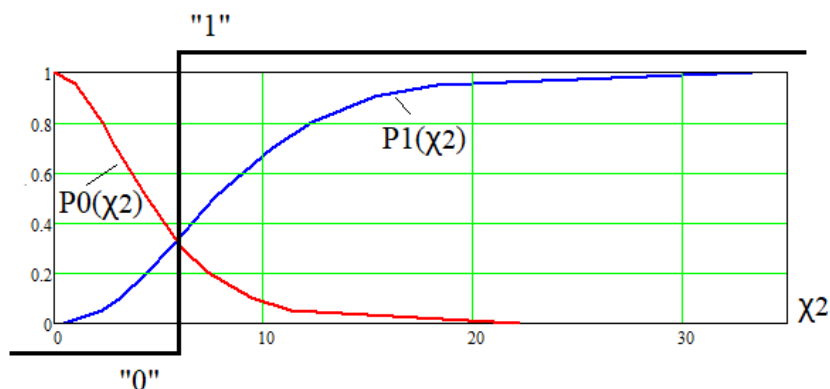


Рис. 3. Три выходных нелинейных функции модифицированного хи-квадрат нейрона для малых выборок в 16 опытов

Из рис. 3 видно, что функции доверия $P1(G)$ и $P0(G)$ не совпадают. В этом отношении многослойные сети искусственных нейронов Галушкина – Хинтона [8, 9] являются некоторым упрощением реально существующих статистических ситуаций. Многослойные сети искусственных нейронов не учитывают разницу функций доверительных вероятностей у двух разделяемых соседних классов.

Параллельное использование трех и более искусственных нейронов сетью с одним слоем

Очевидно, что при параллельном использовании трех разных статистических критериев мы можем обобщить их результаты [4–6] нейросетью. Выходной код нейросети будет обладать трехкратной избыточностью. Эта ситуация отражена на рис. 4.

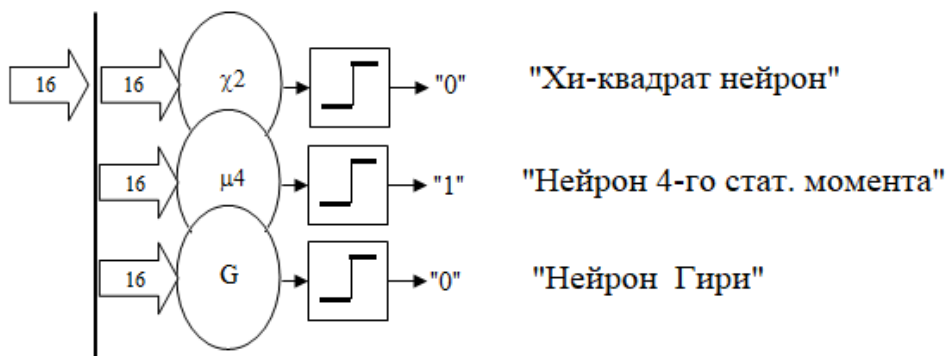


Рис. 4. Однослойная сеть из трех искусственных нейронов

Как итог – мы можем воспользоваться некоторым избыточным кодом, способным обнаруживать и исправлять ошибки. В простейшем случае это

может быть код, построенный «голосованием» по большинству состояний в его разрядах. Если мы наблюдаем код «000», то с высокой вероятностью можем считать входные данные малой выборки нормальными.

Если только в одном разряде код будет иметь состояние «1», то такие коды следует рассматривать как допустимые для выборок с нормально распределенными данными.

Синдромами обнаруженных ошибок следует считать коды с двумя состояниями «1» в их разрядах кода и код «111». Подобная кодовая конструкция дает среднее геометрическое значение вероятностей ошибок для нейронов 0,216. Корректировка синдромов допустимых ошибок позволяет трем, рассматриваемым нейронам снизить вероятности выходных ошибок до величины 0,165. Эта ситуация отображена на рис. 5 (верхняя линия, соединяющая две точки).

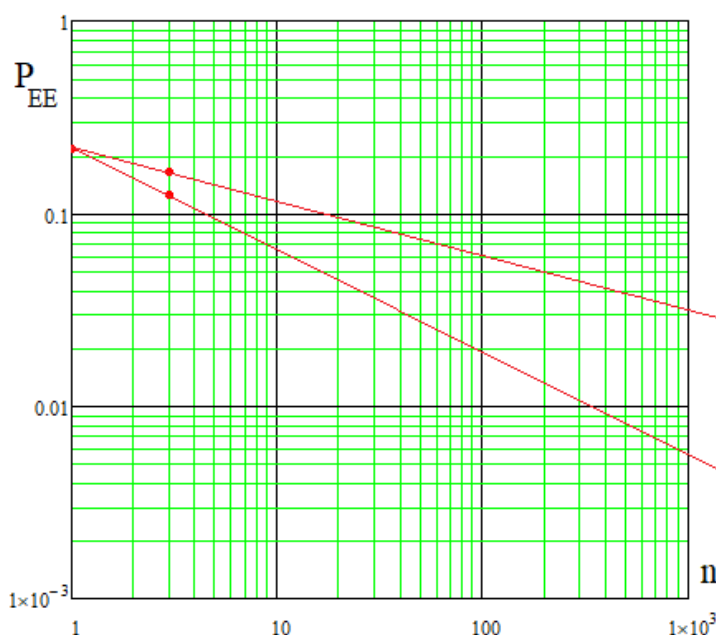


Рис. 5. Параллельное использование трех и более искусственных нейронов, эквивалентных трем классическим критериям

Из рис. 5 следует, что трех искусственных нейронов недостаточно для обеспечения доверия к принимаемым решениям 0,9. Однако, если число нейронов увеличить до 20, то доверительная вероятность на уровне 0,9 оказывается вполне достижима даже для малых выборок в 16 опытов.

Повышение эффективности нейросетевого обнаружения и исправления ошибок при учете достоверности состояний каждого из разрядов избыточного кода

Простейшие самокорректирующиеся коды «голосования по большинству» рассматривают код «110» как синдром обнаружения неисправимой ошибки. В нашем случае, когда искусственные нейроны дают не только выходной код, но и информацию о доверии к состоянию каждого из разрядов,

появляются новые возможности. Для учета дополнительной информации мы должны усложнить структуру нейросетевой обработки, перейдя к использованию двухслойных нейронных сетей (рис. 6).

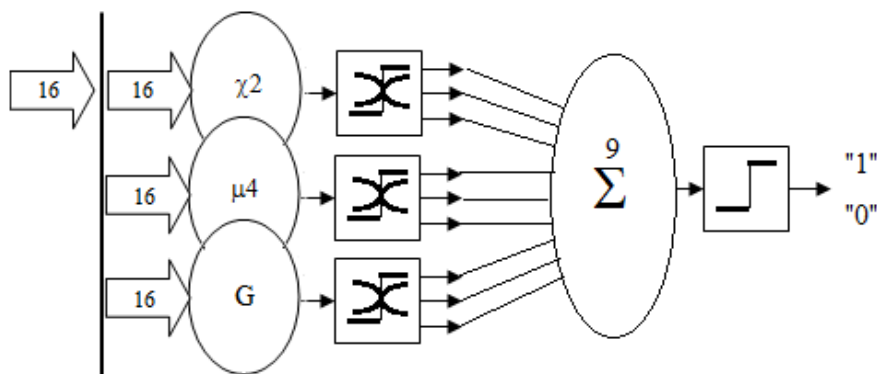


Рис. 6. Двухслойная сеть искусственных нейронов, учитывающая уровни доверия к состояниям персептронов первого слоя

В новой математической конструкции нейроны первого слоя имеют три выхода, а единственный нейрон второго слоя должен обобщать 9 выходных состояний нейронов первого слоя. Кроме синдрома ошибки «110» с выходов нейронов первого слоя мы получаем дополнительную информацию $\{P1(\chi^2), P1(\mu_4), P0(G)\}$. Ее учет позволяет либо подтвердить обнаружение неисправляемой ошибки, либо ее исправить. Появляется возможность подсчитать уровень доверия к первым двум разрядам $(P1(\chi^2) + P1(\mu_4))$ и сравнить его с доверием к третьему разряду $P0(G)$. В случае, если $(P1(\chi^2) + P1(\mu_4)) \geq P0(G)$, обнаружение синдрома неисправимой ошибки подтверждается. В ином случае, когда $(P1(\chi^2) + P1(\mu_4)) < P0(G)$, состояния первых двух разрядов рассматривается как ошибочное, подлежащее исправлению. В итоге мы получаем более сложную кодовую конструкцию, способную обнаруживать и исправлять большее число ошибок.

Численный эксперимент показал, что двухслойная нейросеть позволяет снизить уровень обнаруженных, но не подлежащих исправлению ошибок до вероятности 0,141. Эта ситуация отображена на рис. 5. Линейная экстраполяция результатов численного эксперимента (нижняя линия) позволяет ожидать доверительной вероятности 0,9 уже при использовании 5 искусственных нейронов первого слоя. Мы наблюдаем существенное снижение аппаратно-программных затрат на защиту приложений нейросетевого искусственного интеллекта путем использования малопотребляющих доверенных контроллеров (SIM-карт, RFID-карт, microSD-карт, USB-БиоТокенов, ПЛИС, DSP-контроллеров).

Список литературы

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М. : Вильямс, 2006. 1104 с.
2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход / пер. с англ. и под ред. К. А. Птицына. 2-е изд. М. : Вильямс, 2006. 1048 с.
3. Язов Ю. К., Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А., Назаров И. Г. Нейросетевая защита персональных биометрических данных. М. : Радиотехника, 2012. 157 с.

4. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке mathcad) : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 36 с.
5. Иванов А. П., Иванов А. И., Малыгин А. Ю. [и др.]. Альбом из девяти классических статистических критериев для проверки гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 20–29. doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-3
6. Иванов А. И. Нейросетевой многокритериальный статистический анализ малых выборок : справочник. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 160 с.
7. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
8. Николенько С., Кудрин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб. : Питер, 2018. 480 с.
9. Аггарвал Ч. Нейронные сети и глубокое обучение. СПб. : Диалектика, 2020. 756 с.

References

1. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs = Neural networks: a complete course*. Moscow: Vil'yams, 2006:1104. (In Russ.)
2. Rassel S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod / per. s angl. i pod red. K. A. Ptitsyna. 2-e izd. = Artificial intelligence. Modern approach / translated from English and edited by K.A. Ptitsyn. The 2nd edition*. Moscow: Vil'yams, 2006:1048. (In Russ.)
3. Yazov Yu.K., Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A., Nazarov I.G. *Neyrosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh = Neural network protection of personal biometric data*. Moscow: Radiotekhnika, 2012:157. (In Russ.)
4. Ivanov A.I. *Iskusstvennye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke mathcad): preprint = Artificial mathematical molecules: increasing the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in mathcad): preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
5. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Malygin A.Yu. et al. An album of nine classic statistical tests for testing the hypothesis of normal or uniform distribution of data from small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):20–29. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-3
6. Ivanov A.I. *Neyrosetevoy mnogokriterial'nyy statisticheskiy analiz malykh vyborok: spravochnik = Neural network multicriteria statistical analysis of small samples: reference book*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:160. (In Russ.)
7. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: FIZMATLIT, 2006:816. (In Russ.)
8. Nikolenko S., Kudrin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neyronnykh setey = Deep learning. Dive into the world of neural networks*. Saint Petersburg: Piter, 2018:480. (In Russ.)
9. Aggarval Ch. *Neyronnye seti i glubokoe obuchenie = Neural networks and deep learning*. Saint Petersburg: Dialektika, 2020:756. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Иванович Волчихин

доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cnit@pnzgu.ru

Vladimir I. Volchikhin

Doctor of engineering sciences, professor,
president of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, профессор,
научный консультант, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт (Россия,
г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of engineering sciences, professor,
scientific adviser, Penza Scientific
Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Александр Викторович Безяев

кандидат технических наук, докторант,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: tsib@pnzgu.ru

Aleksandr V. Bezyaev

Candidate of engineering sciences,
doctor's degree student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Иван Александрович Филипов

преподаватель Военного учебного
центра, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: re.wolf@mail.ru

Ivan A. Filipov

Lecturer of the Military Training Center,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 06.07.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 08.09.2023

Принята к публикации / Accepted 04.10.2023

УДК 681.3.- 621.3

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-4

Формализация базовых преобразований моделей эволюционных вычислений

П. П. Макарычев¹, Н. В. Слепцов²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹pm@pnzgu.ru, ²NBS_NBS@km.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предложен подход к формализованному представлению моделей генетических алгоритмов как разновидности эволюционных вычислений. Обсуждаются вопросы представления данных для повышения эффективности эволюционного поиска, выбора операций при формализованном представлении генетических преобразований и построения математических моделей вычислений. Отмечено, что организация эволюционных вычислений в рамках наиболее распространенных разновидностей генетических алгоритмов приводит к необходимости формализованного представления достаточно большого набора параметров, влияющих на эффективность процесса эволюционных вычислений применительно к конкретной задаче. Рассмотрены два подхода к заданию бинарных представлений. Первый подход предполагает двоичное представление, второй подход – двоичное кодированное представление. Обсуждены модели для неограниченной и ограниченной популяции, обеспечивающие применение широкого спектра операторов преобразования и отбора. Предложенный подход наиболее эффективен при решении задачи эволюционных вычислений с учетом максимизации ключевых шаблонов. *Результаты.* Выполнено теоретическое обоснование структуры и параметров моделей эволюционных вычислений для решения задач идентификации и прогнозирования состояния технических объектов и социально-экономических систем. *Выводы.* Предложенный подход обеспечивает формализованное описание базовых преобразований для моделей эволюционных вычислений с ограниченными и неограниченными популяциями. Подход может быть использован при формализованной постановке задачи максимизации ключевых шаблонов в эволюционирующей модели.

Ключевые слова: эволюционные вычисления, генетические операции, модели, ключевые шаблоны

Для цитирования: Макарычев П. П., Слепцов Н. В. Формализация базовых преобразований моделей эволюционных вычислений // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 40–51. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-4

Formalization of basic transformations models of evolutionary computing

P.P. Makarychev¹, N.V. Sleptsov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹pm@pnzgu.ru, ²NBS_NBS@km.ru

Abstract. *Background.* An approach to the formalized representation of models of genetic algorithms as a kind of evolutionary calculations is proposed. The issues of data representa-

tion to improve the efficiency of evolutionary search, the choice of operations in the formalized representation of genetic transformations and the construction of mathematical models of calculations are discussed. It is noted that the organization of evolutionary calculations within the framework of the most common varieties of genetic algorithms leads to the need for a formalized representation of a sufficiently large set of parameters that affect the efficiency of the process of evolutionary calculations in relation to a specific task. Two approaches to the task of binary representations are considered. The first approach assumes a binary representation, the second approach assumes a binary encoded representation. Models for unlimited and restricted populations providing the use of a wide range of transformation and selection operators are discussed. The proposed approach is most effective in solving the problem of evolutionary calculations, taking into account the maximization of key patterns. *Results.* The theoretical substantiation of the structure and parameters of models of evolutionary calculations for solving problems of identification and forecasting of the state of technical objects and socio-economic systems is carried out. *Conclusions.* The proposed approach provides a formalized description of the basic transformations for models of evolutionary calculations with limited and unlimited populations. The approach can be used in the formalized formulation of the problem of maximizing key patterns in an evolving model.

Keywords: Evolutionary calculations, genetic operations, models, key patterns

For citation: Makarychev P.P., Sleptsov N.V. Formalization of basic transformations models of evolutionary computing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = University proceedings. Volga region. Engineering sciences. 2023;(4):40–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-4

Введение

Достигнутое на настоящий момент понимание принципов построения систем искусственного интеллекта (ИИ) объединяет среды обработки и технологии вычислений, основанные на использовании квазибиологических подходов, включая аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), эволюционных вычислений и нечеткой логики. Эволюционные вычисления в общем случае определяются как методика поиска оптимальных решений в многомерной среде, основанная на определенных преобразованиях над наборами множеств возможных решений и применении в качестве прототипов главных факторов эволюционного развития.

Общая схема процесса эволюционных вычислений приведена на рис. 1. Эта схема предполагает достаточную свободу выбора реализаций отдельных составляющих общей модели. Так, для выбора способа эволюционного давления, задающего направление развития в популяции решений, можно для различных обстоятельств внешнего окружения предложить классический набор механизмов эволюции [1].

Эволюционное давление реализуется воздействием на популяцию решений некоторым множеством преобразований (генетических операций).

Примером реализации процесса так называемой видовой эволюции может служить следующая схема:

ЦЕЛЬ: минимизация функции $Q(X)$

НАСЛЕДСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ:

ПОПУЛЯЦИЯ $\rightarrow$ набор точек $\{x_i, \dots, x_{ir}, \dots, x_{ll}\}$

РАЗМНОЖЕНИЕ $\rightarrow$ в каждой из K популяций по своей процедуре:

$$x_{is}^{(t)} = x_{ir}^{(t-1)} + \Delta x_i; \quad r = \overline{1, l}; \quad s = \overline{1, N_r},$$

где Δx_i – случайный вектор, порождаемый своей процедурой, N_r – число потомков, зависящее от значений $Q(X)$.

КОНКУРЕНЦИЯ: по значению функции $Q(X)$.

ОТБОР: по значению функции $Q(X)$.

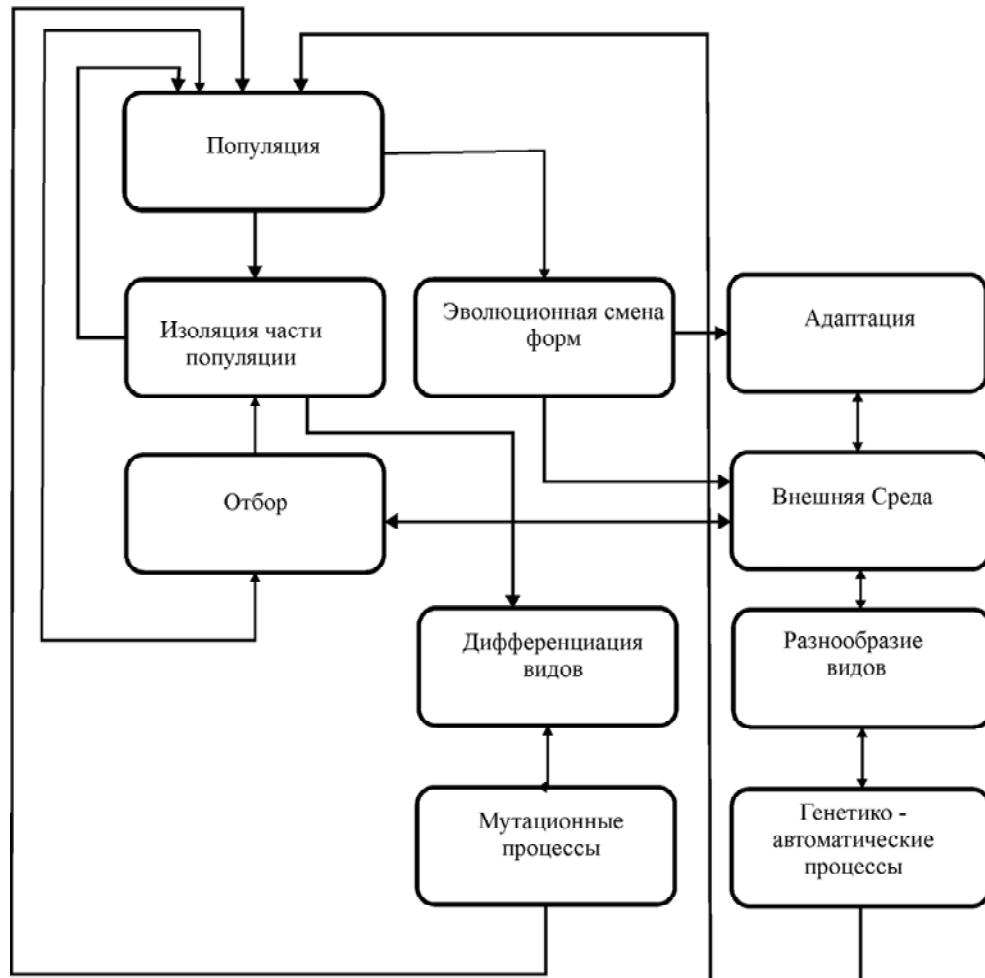


Рис. 1. Общая схема эволюционных вычислений

В известных формализованных постановках задач схемы главных факторов эволюции имеют значительно более сложный вид (связанный со спецификой решаемых задач) аналогов популяций и особей, оптимизируемых функций и т.п. Например, структура отдельной «особи» может быть крайне сложна и быть представленной эволюционирующим гиперграфом. Как показано в [2], при соблюдении определенных условий эволюционные вычисления обладают свойствами универсальной вычислительной среды. Реализация подобной схемы вычислений возможна в виде генетических алгоритмов (ГА), генетического программирования (ГП) и других подходов.

1. Проблемы организации процесса эволюционных вычислений

Детальное рассмотрение процесса организации эволюционных вычислений (ЭВ) в рамках наиболее распространенных их разновидностей в виде ГА (рис. 2) приводит к необходимости максимально формализованного определения достаточно большого набора параметров, влияющих на эффективность процесса эволюционных вычислений применительно к конкретной задаче.

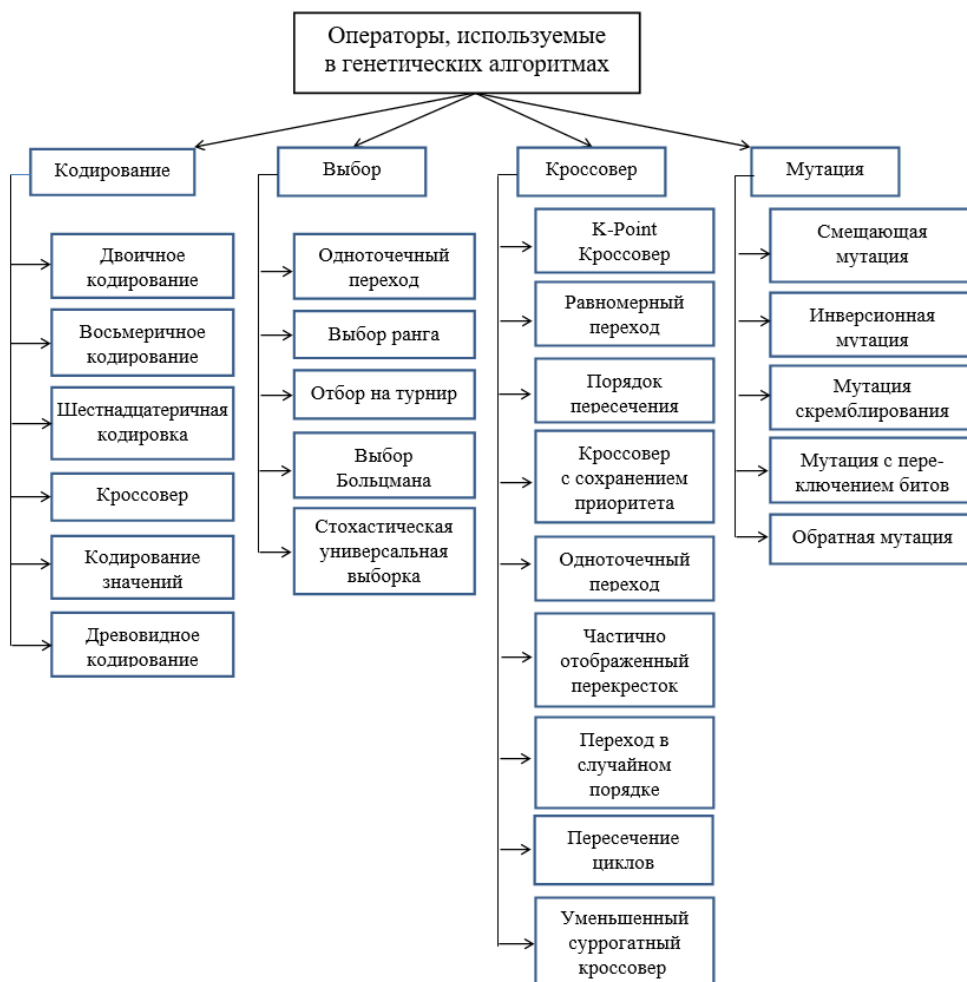


Рис. 2. Допустимые преобразования в генетических алгоритмах

Дело в том, что и глобальные в плане управления процессом, и локальные, управляющие частными преобразованиями, параметры определены достаточно нечетко, согласно лишь общей парадигме вычислений, следовательно, для решения задачи оптимизации процесса ЭВ необходимо решить ряд задач, которые в первом приближении можно представить в следующем перечне:

- 1) определение возможного варианта кодирования представления задачи;
- 2) формирование исходной популяции;

3) выбор критерия оценки решения и завершения процесса вычисления;
4) задание набора генетических операций, условий и параметров их применения;

5) задание (определение) величины эволюционирующей популяции (множества решений);

6) определение вероятностных параметров эволюционных преобразований;

7) переход от параметрического представления задачи в виде генома к реальному представлению и оценка фенотипа;

8) дополнительные процедуры, связанные с возможным кодированием не параметров решения задачи, а некоторого набора правил его генерации.

Последующее рассмотрение будет в основном касаться проблем 1 и 4 в связи с тем, что их решение касается базовых преобразований и оказывает максимальное воздействие на все последующие, а также в связи с невозможностью подробного рассмотрения всего набора (1–8) вследствие ограниченности места.

2. Проблемы представления данных в ГА

Эволюционный поиск с точки зрения практической реализации основан на применении триады основных генетических операций (мутации – скрещивания (кроссовера) – селекции) по отношению к случайно выбранным фрагментам некоторой кодировки, которая либо сама является решением задачи, либо таковым является ее развитие/расширение. При этом результаты работы эволюционирующей системы, как и ее математической модели, соответствуют фундаментальной теореме естественного отбора [2], которую коротко можно было бы сформулировать так: в панмиктической популяции достаточного размера средняя приспособленность популяции возрастает, достигая в одном из состояний стационарного значения.

В основе реализации механизма эффективного поиска лежат две составляющие – кодирование решения проблемы (представление генома) и реализация преобразований. Рассматривая первую составляющую, отметим, что критично не столько кодирование всего решения (всей цепочки), сколько сохранение внутри кодирующих строк существенных фрагментов (в естественных природных система – аллелей). Отображения аллелей (шаблоны, шимы) включают кроме бинарных символов дополнительный признак (#), являющийся групповым, он может принимать произвольное значение из множества $\{0,1\}$.

Характеристиками шаблона являются порядок и разрешение. Порядок соответствует списку фиксированных в шаблоне аллелей, не заданных как #, а разрешение – это фактически расстояние от первой до последней разрешенной аллели. Соответственно вероятность уничтожения шаблона как единого фрагмента при мутации связана с порядком – большее значение порядка означает и большую вероятность мутации в шаблоне. Разрешение соответствует аналогичной возможности для операции кроссовера.

При применении к популяции строк генетических операций разрушение строк происходит значительно чаще, чем шаблонов. Если удачные свойства, отраженные в шаблоне, закрепить в особях с повышенной оценкой пригодности, эволюционный процесс может закрепить это обстоятельство в по-

пуляции и позволить улучшить ее качество (в конечном варианте – оценку пригодности).

Унифицированные преобразования, ключевые шаблоны и неявный параллелизм. Опираясь на строки, мы одновременно производим и операции над множеством шаблонов. Аналогично тому, что при селекционном отборе остаются наиболее приспособленные особи (в модели – строки), тот же эффект наблюдается в отношении множества шаблонов. Это фактически можно интерпретировать как параллельную обработку шаблонов (она же – неявный параллелизм). Оценки для популяции размером n дают число обработанных шаблонов на уровне $O(n^3)$. Реализуемая в рамках такой разновидности внутреннего параллелизма обработка аналогична параллелизму, реализованному при обработке двоичных деревьев, хотя конкретно в этом случае обработка имеет вероятностные характеристики и более сложный характер. Кроме того, вероятностный характер обуславливает и дополнительную погрешность. Однако при этом суть сохраняется – как в двоичном дереве выбор направления означает отказ от рассмотрения в среднем половины элементов этого же уровня и одновременно фактически неявную их обработку, так и обработка одних шаблонов неявно влечет и обработку множества других.

Одновременно и цели ГА также меняются – их удобно изменить указанием в качестве цели формирования не множества строк, а множества шаблонов, причем с дополнительными свойствами. Эти свойства ничего не меняют в исходной формулировке проблемы, но указывают, что ключевые шаблоны должны быть обязательно обработаны для всех шаблонов, участвующих в преобразованиях данного этапа эволюционного моделирования. Особенностью ключевых шаблонов является то, что они фактически задают существенные свойства фрагментов решения, а не решений в целом, как строки. Поэтому в связи с изменением целей реализации и оценки ГА представляется необходимым модифицировать стандартные для ГА преобразования, поскольку введение ключевых шаблонов обеспечивает повышение степени параллелизма и, как следствие, повышение эффективности реализации ГА.

Возможности двоичного и двоично-кодированного представления задачи. Принципиально возможные подходы к кодированию бинарного представления с помощью чисто двоичного и двоично-кодированного представлений предполагают различные возможности и ограничения. Если традиционное двоичное кодирование предполагает принципиальную простоту реализации, оценки и интерпретации, то двоично-кодированное (далее – кодированное) представление при возможном усложнении преобразований может обеспечить представление задачи принципиально любым набором символов при некотором усложнении базовых операций. Очевидно при этом, что аллели могут содержать гены, не являющиеся (по крайней мере частично) двоичными.

Двоичное и кодированное представления дают шаблоны с различными свойствами. В частности, кодированное представление обеспечивает работу с меньшим числом шаблонов, при этом порядок у шаблонов выше. Двоичное представление получает большее число шаблонов, качество которых ниже – они короче, в совокупности с большим числом это ухудшает сходимость процесса.

Кодированное представление обеспечивает при меньшем фактическом числе шаблонов существенно большее число обрабатываемых благодаря так

называемой альтернативной интерпретации. Суть альтернативной интерпретации дополнительных символов «#» в том, что если для кодированного представления их рассматривать как «0 или 1», то число обрабатываемых шаблонов при длине строк t и порядке генов c^* возрастает от значения $(c^* + 1)^t$ при двоичном кодировании до $(2^{c^*} - 1)^t$ при альтернативной интерпретации.

Предельным случаем для кодированного представления и альтернативной интерпретации является вырожденная ситуация, для которой решение задачи кодируется одним геном с размером, позволяющим охватывать все пространство поиска.

Очевидным преимуществом альтернативной интерпретации является возможность более свободной обработки при отсутствии ограничений на свойства ключевых шаблонов, т.е. множества ключевых шаблонов при любых интерпретациях сохраняются.

Это вновь возвращает к пониманию кодирования представлений как зафиксированных шаблонов и приводит к одновременности обработки всех строк, содержащих в общей сложности 2^{n_s} шаблонов.

Оснований для выявления серьезных предпочтений какого-либо одного подхода кодирования нет, поэтому наиболее предпочтительным в такой ситуации будет некоторый унифицированный подход к кодированию, особенно если он обеспечит приемлемую сложность манипуляций в рамках генетических преобразований.

3. Модели популяций генетического алгоритма

В рамках построения моделей популяций ГА возможны различные интерпретации процессов эволюционного моделирования [3, 4]. Эти интерпретации предполагают соблюдение базовых и отражающих глубинную суть черт ГА, развитие или лимитацию менее существенных особенностей, учет которых важен в конкретных приложениях. Важнейшей особенностью при этом является легкость формализации, интерпретации и анализа основных параметров и модели, и анализируемой задачи. В рамках такого подхода рассмотрим две модели.

3.1. Модель неограниченной популяции

Модель неограниченной популяции обеспечивает применение широкого спектра операторов преобразования и отбора. Базовой характеристикой для популяции выступает удельный вес строки. Для n_s строк и для эпохи g популяция представляется как $r^g \in R^{n_s}$, при этом s -му компоненту соответствует удельный вес строки s в популяции. Индексация векторов в данном случае допустима, если строкам s сопоставить в соответствие номера. Преобразования отображаются использованием матриц M для генетических операторов и F для отбора (селекции).

Поскольку процесс эволюционных изменений фактически представляется сменой эпох, в каждой из которых существует своя популяция, то в основе процесса лежит механизм генерации новых популяций. Он запускается выбором строк s для деления, который для каждой строки возможен с некоторой вероятностью r . Поэтому множество вероятностей будет существенной характеристикой для генерации. В обозначении $r^g \in R^{n_s}$ компонент s – это

вероятность выбора строки s для деления. Вычисление σ^g из r^g обеспечивается применением матрицы F .

Дополнительно в эквивалентные отношения для R и S нужно ввести масштабирующие коэффициенты для учета особенностей пропорциональной селекции. Эти коэффициенты не являются постоянными для различных эпох, соответственно для смены эпох: $a \sim b$, если $\exists_{k>0} a = kb$.

В приведенных обозначениях имеем следующие соотношения между строками для деления и популяцией:

$$\sigma^g \sim Fr^g.$$

Над множеством строк s , выбранных для последующего деления случайным образом, проводятся генетические преобразования, в результате которых с вероятностью $p_{s,s'}(t)$ генерируется строка t из исходных s и s' . Базовая характеристика новой строки t – удельный вес в очередном поколении $(g+1)$, определяемая как

$$\varepsilon r_t^{g+1} = \sum_{s,s'} \sigma_s^g \sigma_{s'}^g p_{s,s'}(t),$$

где ε – математическое ожидание.

Поскольку действие генетических операторов над строками s и s' отображается матрицей M , то $M_{s,s'} = p_{s,s'}(s^0)$ и для очередной популяции $(g+1)$ оценка удельного веса строки s^0 задается как

$$\varepsilon r_0^{g+1} = \sigma^{g^T} M \sigma^g.$$

Поскольку $p_{s,s'}(t \oplus u) = p_{s \oplus t, s' \oplus t}(u)$, где $\oplus$ – исключающее ИЛИ, то с изменением в σ^g порядка элементов можно использовать M для определения удельного веса любой строки t в новой популяции, однако особенность операции $\oplus$ позволяет применить эти свойства чисто к двоичным представлениям. Для кодированных представлений интерпретацию свойства необходимо будет модифицировать.

Поскольку в результате применения M строка t преобразуется в s^0 , то это же свойство возможно применить для отображения строк в строки, которое применяется в виде перестановки S_t из σ^g :

$$(S_t \sigma^g)_s = \sigma_{s \oplus t}^g.$$

Окончательно полностью преобразования для генерации пропорции каждой строки в новом поколении объединены в $\underline{M}$:

$$\underline{M}(\sigma)_s = (S_s \sigma)^T M S_s \sigma.$$

С помощью $\underline{M}$, отражающей генерацию новых строк и F , соответствующей селективным механизмам, действие ГА представляется как

$$\sigma^{g+1} \sim F \underline{M}(\sigma^g).$$

Это позволяет описать ГА для случая популяции без наложения ограничений на размер.

Заполнение матриц M и F . Пусть ГА преобразует двоичные строки с использованием простейших преобразований – одноточечного кроссовера и пропорциональной селекции. Так как оценка строки определяет возможность участия в делении и последующих преобразованиях, то F является диагональной матрицей с $F_{s,s} = f_s$, f – вектор оценок. В приведенной ранее зависимости σ^g (r^g) имеет место отношение эквивалентности. Для перехода к точному соотношению и исключению масштабирующего фактора преобразуем зависимость следующим образом:

$$\sigma^g = \frac{Fr^g}{|Fr^g|}.$$

В матрице M каждый элемент $M_{s,s'}$ – значение вероятности образования строки s^0 из s и s' . Она определяется взаимодействием двух факторов – от комбинации строк s и s' , обеспечивающей получение определенного количества единиц в s^0 , и от мутаций, с определенной вероятностью переводящей именно эти единицы в 0 при сохранении остальных битов. Обозначим количество 1 в строке s как $|s|$.

Вероятность перехода $s \rightarrow s^0$: $(1-\mu)^{l-|s|}\mu^{|s|}$. Общее количество 1 при пересечении s и s' в точке k не изменяется, меняется лишь их расположение. Для строки и ее потомка изменение числа 1 задается как

$$d_{s,s',k} = |(2^k - 1) \otimes s| - |(2^k - 1) \otimes s'|,$$

где $\otimes$ – операция И. Поскольку $(2^k - 1)$ – это 00..011...11, то при кроссовере строка из $(2^k - 1)$ определяет биты в участке строки до 1 от k -й позиции справа и выражение позволяет определить разность в числе единиц для конечных отрезков строк s и s' .

При объединении родительских строк число единиц в строке-потомке будет отличаться от родительского на $d_{s,s',k}$, а именно $|s_{n1}| = |s| - d_{s,s',k}$, $|s_{n2}| = |s| + d_{s,s',k}$.

Для строки вероятность мутации, превращающая ее в s^0 , есть

$$(1-\mu)^{l-(|s|-d_{s,s',k})}\mu^{|s'|-d_{s,s',k}}.$$

Суммируя по возможным точкам кроссовера и с учетом вероятности кроссовера в данной точке, получим

$$\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^{l-1} (1-\mu)^{l-(|s|-d_{s,s',k})}\mu^{|s'|-d_{s,s',k}}.$$

Подставляя $\eta = \mu / (1-\mu)$, получим:

$$\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^{l-1} (1-\mu)^{l-(|s|-d_{s,s',k})}\mu^{|s'|-d_{s,s',k}} = (1-\mu)^l \eta^{|s|} \frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^{l-1} \eta^{-d_{s,s',k}}.$$

Вероятность кроссовера χ . При его отсутствии вероятность изменения 1 в 0 для родительской строки s мутацией равна

$$(1-\mu)^{l-|s|}\eta^{|s|} = (1-\mu)^l \eta^{|s|}.$$

Объединяя кроссовер и мутацию, получаем для первого потомка:

$$\begin{aligned} (1-\chi)(1-\mu)^l \eta^{|s|} + \chi(1-\mu)^l \eta^{|s|} \frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^{l-1} \eta^{-d_{s,s'k}} = \\ = (1-\mu)^l \eta^{|s|} \left(1-\chi + \frac{\chi}{l-1} \sum_{k=1}^{l-1} \eta^{-d_{s,s'k}} \right). \end{aligned}$$

Применяя те же действия для второго потомка другого предка – s' , получаем в итоге:

$$M_{s,s'} = \frac{(1-\mu)^l}{2} \left\{ \eta^{|s|} \left(1-\chi + \frac{\chi}{l-1} \sum_{k=1}^{l-1} \eta^{-d_{s,s'k}} \right) + \eta^{|s'|} \left(1-\chi + \frac{\chi}{l-1} \sum_{k=1}^{l-1} \eta^{d_{s,s'k}} \right) \right\}.$$

3.2. Модель ограниченной популяции

Названия моделей – ограниченной и неограниченной популяции – достаточно условны, поскольку они предполагают различные траектории развития. Если модель неограниченной популяции определяет ожидаемое развитие во времени, то для модели ограниченной популяции предполагается отсутствие ограничений на траекторию популяции. Это предполагает отличающийся подход и к формальному описанию.

Для модели любая потенциально достижимая популяция рассматривается как состояние марковской цепи [5]. У популяции из n_p строк в n_s , из которых производится выбор, возможное число популяций n_p составит:

$$n_p = \binom{n_p + n_s - 1}{n_s - 1}.$$

Множество состояний марковской цепи – возможный набор популяций – отображается матрицей P $n_p \times n_s$, элементы $P_{s,i}$ соответствуют числу строк s , наблюдаемых в популяции p_i . Так как столбцы являются вектором инцидентности (i -й столбец – для матрицы p_i), то они отражают структуру каждой популяции.

Вторая матрица, используемая в модели – матрица переходов Θ размера $n_p \times n_p$, содержит вероятности переходов из состояния i в j , а фактически перехода от популяции p_i к p_j .

Если $\varphi_i(s)$ – вероятность формирования s из популяции p_i и следующей популяцией является p_j , то в p_j s будет сформирована с вероятностью $P_{s,j}$, а вероятность такого события составит $\varphi_i(s) P_{s,j}$.

Вероятность генерации полной популяции p_i из p_i будет определяться выражением $\prod_{s \in S} \varphi_i(s)^{P_{s,j}}$.

Популяция сама по себе представлена множеством строк и их порядок не имеет значения, но представленное выражение дает оценку генерации именно упорядоченной популяции. Поэтому дополнительно следует учесть число перестановок строк:

$$\frac{n_p!}{P_{0,j}!P_{1,j}!\dots P_{np-1,j}!},$$

и тогда для $\Theta_{i,j}$ получим:

$$\Theta_{i,j} = n_p! \prod_{s \in S} \frac{\varphi_i(s)^{P_{s,j}}}{P_{s,j}!}.$$

В свою очередь для определения $\varphi_i(s)$ условия выполнения генетических операций формируются с использованием результатов из предшествующей модели:

$$\varphi_i(s) = \underline{M} \left(\frac{FP^{\downarrow i}}{|FP^{\downarrow i}|} \right)_s,$$

где π^g – вектор-строка, i -й компонент которого дает вероятность, что g -м поколением будет p_i .

Для любого поколения распределение вероятностей при начальном распределении π^0 может быть определено из следующего выражения:

$$\pi^g = \pi^0 \Theta^g.$$

Заключение

Представленный подход к формальному описанию моделей генетических алгоритмов как разновидности эволюционных вычислений дает возможность строгого описания базовых преобразований для моделей как ограниченных популяций, так и неограниченных при постановке задачи максимизации ключевых шаблонов в эволюционирующей модели. Дальнейшее развитие предложенного подхода предполагает распространение его на унифицированное представление данных с одновременным уменьшением вычислительной сложности предлагаемых преобразований.

Список литературы

1. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М. : Физматлит, 2003. 432 с.
2. Букатова И. Л. Эволюционное моделирование и его приложения. М. : Наука, 1979. С. 31–77.
3. Handbook of genetic algorithms. Complex coding systems / ed. by D. L. Chambers. CRC, 1999. 659 p.

4. Das A. K., Pratihari D. K. A direction-based exponential mutation operator for real-coded genetic algorithm // IEEE International Conference on Emerging Applications of Information Technology, 2018. P. 1–4.
5. Zhai R. Solving the optimization of physical distribution routing problem with hybrid genetic algorithm // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1550. P. 1–6.

References

1. Emel'yanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M. *Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya = Theory and practice of evolutionary modeling*. Moscow: Fizmatlit, 2003:432. (In Russ.)
2. Bukatova I.L. *Evolutsionnoe modelirovanie i ego prilozheniya = Evolutionary modeling and its applications*. Moscow: Nauka, 1979:31–77. (In Russ.)
3. Chambers D.L. (ed.). *Handbook of genetic algorithms. Complex coding systems*. CRC, 1999:659.
4. Das A.K., Pratihari D.K. A direction-based exponential mutation operator for real-coded genetic algorithm. *IEEE International Conference on Emerging Applications of Information Technology*. 2018:1–4.
5. Zhai R. Solving the optimization of physical distribution routing problem with hybrid genetic algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1550:1–6.

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Петрович Макарычев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: pm@pnzgu.ru

Petr P. Makarychev

Doctor of engineering sciences,
professor, professor of the sub-department
of mathematical support for computer
applications, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николай Владимирович Слепцов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры вычислительной
техники, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: NBS_NBS@km.ru

Nikolay V. Sleptsov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of computer
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 14.07.2023

Принята к публикации / Accepted 04.10.2023

УДК 004.056

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-5

Графоаналитический метод анализа событий информационной безопасности

С. Л. Зефирова¹, А. Н. Аккуратнов²

¹Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Научно-производственная фирма «Кристалл», Пенза, Россия

¹sergeizefirov@mail.ru, ²akkalexnick@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются журналы событий информационной безопасности. Предметом исследования являются методы сигнатурного анализа и профилирования событий информационной безопасности. Цель работы – определение недостатков вышеуказанных методов при выявлении инцидентов информационной безопасности и разработка метода, устраняющего выявленные недостатки. *Материалы и методы.* Анализ событий информационной безопасности осуществлялся с использованием методов сигнатурного анализа, цифрового профилирования и нового графоаналитического метода, предложенного в рамках исследования. *Результаты.* Определены недостатки методов сигнатурного анализа и профилирования событий информационной безопасности. Выявлены типы инцидентов информационной безопасности, не входящие в зону видимости вышеуказанных методов. Применение предложенного графоаналитического метода позволяет устранять выявленные недостатки, выявлять неизвестные типы инцидентов информационной безопасности, а также расширять функциональные возможности систем мониторинга информационной безопасности в целом. *Выводы.* Применение предлагаемого графоаналитического метода анализа событий информационной безопасности позволяет выявлять инциденты информационной безопасности, не входящие в зону видимости сигнатурных методов и методов профилирования, а также использовать для получения знаний об изучаемой системе, что невозможно при визуальном анализе самого журнала. Результаты применения метода можно в дальнейшем использовать для выявления инцидентов информационной безопасности в реальном времени.

Ключевые слова: информационная безопасность, события информационной безопасности, корреляция событий, инцидент информационной безопасности, цифровой профиль, ориентированный граф, анализ числовых рядов

Для цитирования: Зефирова С. Л., Аккуратнов А. Н. Графоаналитический метод анализа событий информационной безопасности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 52–58. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-5

Graph-analytical method for analysing information security events

S.L. Zefirova¹, A.N. Akkuratnov²

¹Penza State University, Penza, Russia

²Scientific and Production Company “Kristall”, Penza, Russia

¹sergeizefirov@mail.ru, ²akkalexnick@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is information security event logs. The subject of the research is the methods of signature analysis and profiling of information

© Зефирова С. Л., Аккуратнов А. Н., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

security events. The purpose of the research is to identify the shortcomings of the above methods in identifying information security incidents and to develop a method that eliminates the identified shortcomings. *Materials and methods.* The analysis of information security events was carried out using the methods of signature analysis, digital profiling and a new graphic-analytical method proposed in the framework of the study. *Results.* The shortcomings of the methods of signature analysis and profiling of information security events are determined. Identified types of information security incidents that are not included in the visibility of the above methods. The application of the proposed graphic-analytical method makes it possible to eliminate the identified shortcomings, identify unknown types of information security incidents, and expand the functionality of information security monitoring systems in general. *Conclusions.* The use of the proposed graphic-analytical method for analyzing information security events makes it possible to identify information security incidents that are not included in the visibility zone of signature methods and profiling methods, and also to use them to gain knowledge about the system under study, which is impossible with a visual analysis of the journal itself. The results of applying the method can be further used to identify information security incidents in real time.

Keywords: information security, information security events, event correlation, information security incident, digital profile, oriented graph, analysis of numerical series

For citation: Zefirov S.L., Akkuratnov A.N. Graph-analytical method for analyzing information security events. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):52–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-5

Одним из компонентов современных систем мониторинга информационной безопасности (ИБ) является модуль корреляции событий, предназначенный для поиска общих значений атрибутов связи событий между собой. Корреляция событий используется в сигнатурных методах анализа, которые отражают накопленные знания о сценариях вторжений и атак, сбоях в правилах корреляции. Для получения знаний используются моделирование, поведенческий анализ, данные реальных атак и т.д. Зафиксированный набор событий в журнале событий изучается, нормализуется, определяется набор параметров для корреляции и реализуется в форме набора правил. Правила анализа представляют собой описание последовательностей событий информационной безопасности с условиями корреляции, а также условий, выполнение которых характеризует наличие инцидента информационной безопасности. Фактически правило корреляции описывает ситуацию, которую можно охарактеризовать как «случилось что-то конкретное, что не должно было случиться».

Такой подход не позволяет выявлять инциденты ИБ, которые находятся вне области накопленных знаний.

Выявление таких инцидентов частично позволяет применение цифровых профилей. Цифровой профиль – это поведенческая модель, построенная на статистических закономерностях хронологических данных о количестве событий в единицу времени. Сигналом о возможном инциденте ИБ является превышение количества событий за текущую единицу времени определенных и установленных пороговых значений. Превышение пороговых значений, установленных в цифровом профиле, рассматривается как отклонение от найденных закономерностей при построении профиля. Для построения цифрового профиля не требуется предварительная нормализация, требуется только один параметр – время возникновения события. Этот метод позволяет выявлять инциденты автоматизированным способом, основываясь на законо-

мерностях, найденных в исторических данных мониторинга и не используя базу знаний сигнатурного анализа. Но цифровой профиль не сработает, если инцидент ИБ характеризуется небольшим количеством событий, не превышающим пороговых значений.

Для выявления таких инцидентов автоматизированным способом предлагается объединить возможности сигнатурного анализа и цифровых профилей. Смысл применения такого подхода заключается в выявлении закономерностей или зависимостей появления нормализованных событий ИБ. В качестве исходных данных используются журналы событий. На первом этапе закономерности устанавливаются по последовательности или порядку появления событий, а также по относительным (интервал времени между появлениями) временным параметрам событий. По найденным закономерностям создается модель данных (аналогичная эталонной модели цифрового профиля, но со своими характеристиками). На втором этапе проводится анализ на предмет выявления отклонений от характеристик модели. Предполагается, что возможные инциденты ИБ, а точнее последовательности событий их составляющих, содержатся в перечне найденных отклонений.

На первом шаге реализации предлагаемого метода следует провести категоризацию событий [1], т.е. определить набор параметров, которые отвечают за соответствие события определенной категории. Каждая категория соответствует уникальному набору значений параметров события и составляет так называемый алфавит типов событий (A, B, C и т.д.).

На втором шаге осуществляется создание основы модели данных. Для этого весь журнал событий преобразовывается в последовательность типов событий следующего вида: $ABCEAEADE$. Вся последовательность разбивается на пары по принципу (по номеру события) 1-2, 2-3, 3-4 и т.д. Из вышеуказанной последовательности рассмотрим пары событий AB, BC, CE и т.д. В качестве структуры данных выбрана структура данных ориентированного графа. Пример визуализации модели показан на рис. 1, где вершинами графа являются множество типов событий, а ребра графа указывают на наличие присутствия пары событий в исходных данных. Направления ребер указывают последовательность появления событий.

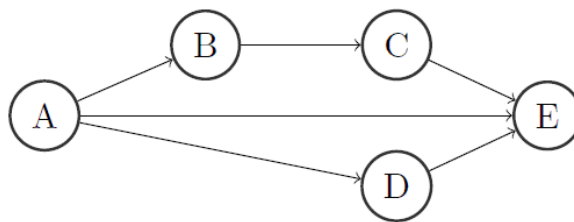


Рис. 1. Пример визуализации модели

На третьем шаге осуществляется подсчет количественных характеристик модели. Для каждой вершины определяется количество появлений события данного типа в исходном журнале. Для каждого ребра определяется количество появлений пар событий в исходной последовательности. На рис. 2 представлен пример модели с количественными характеристиками. Видно, что количество событий типа A составляет 10. Количество пар событий AB и AE по 3.

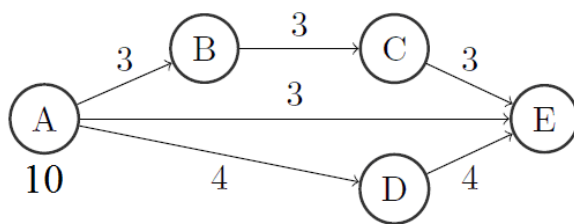


Рис. 2. Пример визуализации модели с количественными характеристиками

На четвертом шаге осуществляется расчет частот появления пар событий относительно общего количества появления первого события из пары. Например, для событий A и B частота рассчитывается по формуле

$$t_{AB} = \frac{N_{AB}}{N_A}, \quad (1)$$

где N_{AB} – количество пар событий AB ; N_A – количество событий типа A .

Расчет частот производится для каждой пары (каждого ребра графа).

Результаты расчетов добавляются в данные ребер модели. На рис. 3 показан пример модели с частотными характеристиками.

Аналогичным способом вычисляются частоты появления пар событий относительно общего количества появления второго события из пары.

Кроме частотных характеристик, предлагается использовать коэффициент зависимости событий, который вычисляется эвристическим методом технологии интеллектуального анализа процессов (*ProcessMining*) [2, 3]. Описание эвристического метода приведено в [4]. Коэффициент отражает долю появления пары событий AB относительно появления пары событий BA . Коэффициент для пары разнотипных событий вычисляется следующим образом:

$$a \Rightarrow w_b = \left(\frac{|a > w_b| - |b > w_a|}{|a > w_b| + |b > w_a| + 1} \right), \quad (2)$$

где $|a > w_b|$ – количество появлений пары событий ab ; $|b > w_a|$ – количество появлений пары событий ba .

Коэффициент для пары однотипных событий вычисляется так:

$$a \Rightarrow w_a = \left(\frac{|a > w_a|}{|a > w_a| + 1} \right), \quad (3)$$

где $|a > w_a|$ – количество повторений события a .

На рис. 4 изображен пример модели с рассчитанным коэффициентом зависимости событий.

Пятым шагом является фильтрация модели. Фильтрация модели осуществляется установкой нижних пределов количества появлений событий, пар событий, частот и коэффициента зависимости событий. Пределы устанавливаются экспертным путем. Если частоты в ребре и коэффициент зависимости ниже установленных пределов, то ребро удаляется из графа. Вершины, у которых удалены все ребра, также удаляются из графа модели. Например, на рис. 3 таким ребром является ребро $S-E$ (частота 0,03).

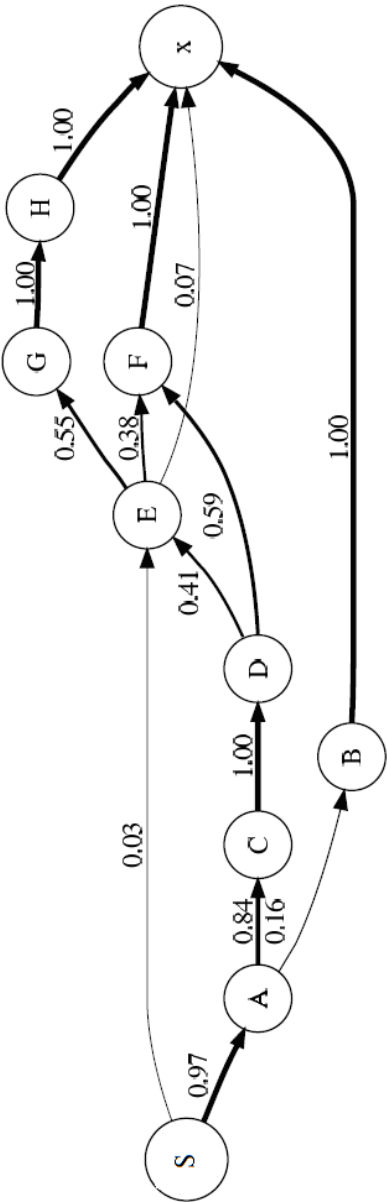


Рис. 3. Пример визуализации модели с частотными характеристиками выходов из вершины предшествующего события

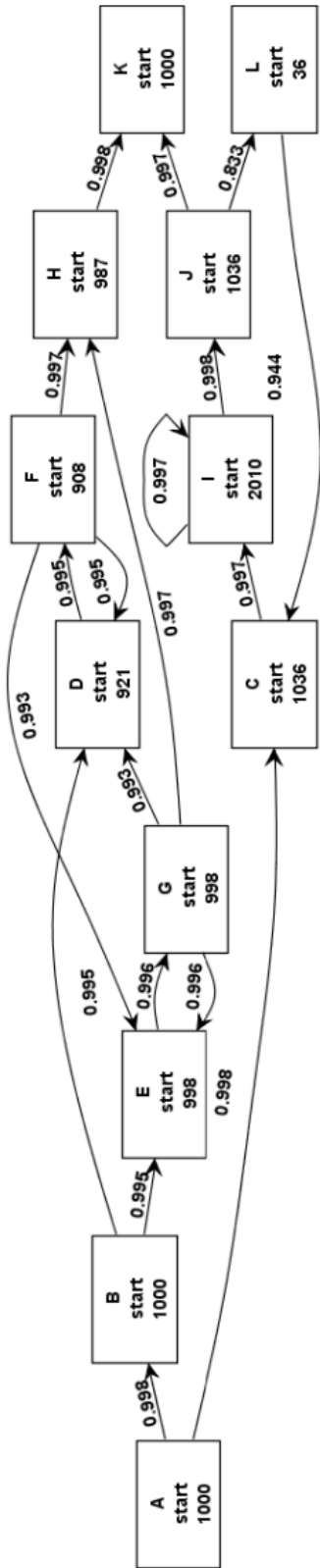


Рис. 4. Пример модели с рассчитанным коэффициентом зависимости событий

Шестым шагом является установление относительных временных зависимостей или закономерностей. Для этого вычисляются интервалы времени для каждой пары событий, полученных на шаге 2. Дальнейший анализ сводится к анализу числовых рядов. Сначала числовой ряд анализируется на предмет выбросов. Способ обнаружения выбросов основан на межквартильном расстоянии [5]. Из числового ряда удаляются значения, не попадающие в диапазон:

$$[(x_{25} - 1,5(x_{75} - x_{25})), (x_{75} + 1,5(x_{75} - x_{25}))], \quad (4)$$

где x_{75} и x_{25} – значения третьего и первого квартиля соответственно.

Возьмем для примера числовой ряд 2,3,2,4,90,2,4,3. Запишем вариационный ряд 2,2,2,3,3,4,90. Значение первого квартиля равно 2. Значение 3 квартиля 3.5. Выбросами будут считаться значения, не попавшие в диапазон [0,5.75]. Значение 90 будет удалено как несоответствующее найденной закономерности.

Из оставшихся значений выбирается минимальное и максимальное значения в качестве допустимого интервала между появлением пары событий и добавляется в модель.

В итоге модель представляет собой набор правил-закономерностей, характеризующих последовательность и временные зависимости появления событий. Самый простой пример такого правила: «после события A должно появиться событие B ». Следующее правило для события B : «после появления события B должно появиться событие C или D » и т.д. Применительно к временным характеристикам правило звучит так: «после события A должно появиться событие B в течение 5 минут» и т.д.

Седьмым шагом является поиск отклонений от модели данных. Для этого исходную последовательность разбивают на пары событий – аналогично шагу 2 предлагаемого метода. Далее проводится поиск в модели данных ребра графа, соединяющего вершины, составляющие пару событий. Если такое ребро отсутствует, то фиксируется отклонение несоответствия модели. Также используется счетчик текущего времени для выявления отсутствующих событий (не соответствующих интервалу). Выявленные отклонения изучаются экспертами на предмет наличия инцидентов ИБ.

Предлагаемый метод анализа событий ИБ позволяет построить модель для выявления инцидентов ИБ. Представление модели в виде графа позволяет компактно отобразить найденные закономерности независимо от размера исходного журнала событий. Поэтому модель можно использовать для получения знаний об изучаемой системе, что невозможно при визуальном анализе самого журнала. Также анализ модели позволяет выявлять и фильтровать спам-события, не имеющие ценности для анализа, что существенно снижает нагрузку на систему мониторинга. Построенную модель данных можно в дальнейшем использовать для выявления инцидентов ИБ в реальном времени. Причем для поиска отклонений как по появлению, так и отсутствию событий с использованием счетчика реального времени.

Список литературы

1. Заводцев И. В., Гайнов А. Е. Разработка механизмов сбора и преобразования формата представления исходной информации для систем мониторинга событий

- информационной безопасности // Программные системы и вычислительные методы. 2015. № 1. С. 21–31.
2. Van der Aalst W. M. P., Weijters A. J. M. M., Maruster L. Workflow Mining: Discovering Process Models from Event Logs // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2004. Vol. 16, № 9. P. 1128–1142.
 3. Van der Aalst W. M. P. Process Mining. Data Science in Action. 2nd ed. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2016. 486 с.
 4. Weijters A. J. M. M., Ribeiro J. T. S. Flexible Heuristics Miner (FHM). (BETA) : Working Paper Series. Eindhoven : Eindhoven University of Technology, 2011. Vol. 334. 31 p.
 5. Сальникова К. В. Анализ массива данных с помощью инструмента визуализации «ящик с усами» // Universum: экономика и юриспруденция. 2021. № 6 (81). С. 11–17.

References

1. Zavodtsev I.V., Gaynov A.E. Development of mechanisms for collecting and converting the presentation format of source information for information security event monitoring systems. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody = Software systems and computational methods*. 2015;(1):21–31. (In Russ.)
2. Van der Aalst W.M.P., Weijters A.J.M.M., Maruster L. Workflow Mining: Discovering Process Models from Event Logs. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2004;16(9):1128–1142.
3. Van der Aalst W.M.P. *Process Mining. Data Science in Action. 2nd ed*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016:486.
4. Weijters A.J.M.M., Ribeiro J.T.S. *Flexible Heuristics Miner (FHM). (BETA): Working Paper Series*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2011;334:31.
5. Sal'nikova K.V. Analyzing a dataset using a visualization tool “yaschik s usami”. *Universum: ekonomika i yurisprudentsiya = Universum: economics and jurisprudence*. 2021;(6):11–17. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Львович Зефиров

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационной
безопасности систем и технологий,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: sergeizefirov@mail.ru

Sergey L. Zefirov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of information security of systems
and technologies, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Николаевич Аккуратнов

старший научный сотрудник,
Научно-производственная фирма
«Кристалл» (Россия, г. Пенза,
пр-т Победы, 13)

E-mail: akkalexnick@yandex.ru

Aleksandr N. Akkuratnov

Senior staff scientist, Scientific
and Production Company “Kristall”
(13 Pobedy avenue, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 10.11.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.07.2023

Принята к публикации / Accepted 22.09.2023

УДК 681.5.015

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-6

Особенности дискретизации и восстановления сигналов в нелинейных системах

М. А. Щербаков

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

mashcherbakov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цифровая обработка сигналов предполагает дискретизацию непрерывных сигналов. В отличие от линейных систем, выполнение данной операции в нелинейных системах имеет ряд особенностей, связанных с расширением спектра выходного сигнала. Целью настоящей работы является исследование дискретизации сигналов в нелинейных системах при решении задач моделирования динамики системы и восстановления выходного сигнала. *Материалы и методы.* Рассматривается класс нелинейных систем, определяемых разложением Вольтерра. Для цифрового моделирования поведения системы используются дискретные нелинейные фильтры. Используется спектральное представление нелинейных систем через многомерные характеристики (ядра) в частотной области. *Результаты и выводы.* Выбор частоты дискретизации в нелинейных системах определяется типом решаемой задачи. При этом выделяются задачи идентификации динамических характеристик системы и восстановления выходного сигнала системы. Для линейного случая данные задачи тождественны, и их решение достигается выбором частоты дискретизации входного сигнала в соответствии с теоремой Котельникова. Показано, что эффект расширения спектра выходного сигнала накладывает различные требования к выбору частоты дискретизации при решении задач идентификации и восстановления выходного сигнала в нелинейных системах.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, нелинейная фильтрация, дискретизация сигналов, полиномиальные фильтры, ряды Вольтерра, спектр сигнала

Для цитирования: Щербаков М. А. Особенности дискретизации и восстановления сигналов в нелинейных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 59–69. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-6

Features of signal sampling and reconstruction in nonlinear systems

M.A. Shcherbakov

Penza State University, Penza, Russia

mashcherbakov@yandex.ru

Abstract. *Background.* Digital signal processing involves sampling continuous signals. Unlike linear systems, performing this operation in nonlinear systems has a number of features associated with expanding the spectrum of the output signal. The purpose of this research is to study the sampling of signals in nonlinear systems when solving problems of modeling the dynamics of the system and restoring the output signal. *Materials and methods.* A class of nonlinear systems defined by the Volterra expansion is considered. Discrete nonlinear filters are used to digitally simulate system behavior. The spectral representation of nonlinear systems through multidimensional characteristics (kernels) in the frequency domain is used. *Results and conclusions.* The choice of sampling frequency in nonlinear systems is determined by the type of problem being solved. At the same time, the tasks of

identifying the dynamic characteristics of the system and restoring the output signal of the system are highlighted. For the linear case, these problems are identical and their solution is achieved by choosing the sampling frequency of the input signal in accordance with Kotelnikov's theorem. It is shown that the effect of expanding the spectrum of the output signal imposes different requirements on the choice of sampling frequency when solving problems of identifying and restoring the output signal in nonlinear systems.

Keywords: digital signal processing, nonlinear filtering, signal sampling, polynomial filters, Volterra series, signal spectrum

For citation: Shcherbakov M.A. Features of signal sampling and reconstruction in nonlinear systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):59–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-6

Введение

В последнее время в области цифровой обработки сигналов все шире начинают применяться цифровые нелинейные фильтры [1–3]. Причиной их использования является то, что традиционная линейная обработка сигналов не всегда приводит к приемлемым результатам на практике. В частности, необходимость использования нелинейной обработки сигналов возникает в задачах фильтрации и обнаружения сигналов при наличии мультипликативных шумов, плотность распределения которых отлична от гауссовой [1]. Известны также многочисленные примеры использования нелинейных фильтров для моделирования и идентификации сложных систем [4], управления нелинейными объектами [5], обработки сигналов и изображений [2, 6], моделирования физиологических систем [7].

Применение цифровой нелинейной фильтрации для обработки непрерывных сигналов сопряжено с их предварительной дискретизацией и последующим восстановлением. В связи с этим целесообразно рассмотреть особенности выполнения данных операций в нелинейных системах, связанные с расширением спектра входного сигнала, а также сформулировать требования к выбору частоты дискретизации в зависимости от типа решаемой задачи.

Для наглядности ограничимся рассмотрением класса одномерных нелинейных систем S . Пусть имеется непрерывная система с нелинейностью степени M , допускающая представление в виде отрезка функционального ряда Вольterra вида [8]:

$$y(t) = \sum_{m=0}^M y_m(t) = \sum_{m=0}^M \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_m(\tau_1, \dots, \tau_m) \prod_{j=1}^m x(t - \tau_j) d\tau_j, \quad (1)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – входной и выходной сигналы системы соответственно; $y_m(t)$ – составляющая выходного сигнала от нелинейности m -го порядка; $h_m(\tau_1, \dots, \tau_m)$ – нелинейная импульсная характеристика (ядро) m -го порядка.

Тогда соотношение для цифрового нелинейного фильтра, моделирующего зависимость (1) для дискретизированного процесса $x(nT)$, имеет вид [9]:

$$y'(nT) = \sum_{m=0}^M y'_m(nT) = \sum_{m=0}^M \sum_{n_1=0}^{\infty} \cdots \sum_{n_m=0}^{\infty} h'_m(n_1T, \dots, n_mT) \prod_{j=1}^m x(nT - n_jT), \quad (2)$$

где T – шаг дискретизации.

При решении вопроса о выборе шага дискретизации в (2) необходимо исходить из целей моделирования. При этом можно выделить следующие типы задач:

– моделирование динамических характеристик системы таким образом, чтобы его выходной сигнал $y'(nT)$ совпадал с дискретизированным сигналом $y(nT)$ непрерывной нелинейной системы S ;

– восстановление выходного сигнала $y(t)$ системы S по дискретному выходному сигналу $y'(nT)$ цифрового моделирующего фильтра.

Следует заметить, что в линейном случае (при $M = 1$) данные задачи тождественны и их решение достигается выбором частоты дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова [10], что обеспечивает возможность последующего восстановления как выходного сигнала $y(t)$ системы, так и импульсной характеристики $h_1(\tau)$. Присутствие нелинейности в системе и связанный с ней эффект расширения спектра выходного сигнала накладывают, как будет показано ниже, различные требования на выбор частоты дискретизации при решении задач восстановления выходного сигнала $y(t)$ системы и ее нелинейных импульсных характеристик $h_m(\tau_1, \dots, \tau_m)$, $m > 1$.

Задача моделирования динамики нелинейной системы

Рассмотрим сначала задачу моделирования динамики системы. Частотное представление для составляющей $y_m(t)$ от нелинейности m -го порядка в разложении (1) имеет вид [11]:

$$Y_m(\omega) = \frac{1}{(2\pi)^{m-1}} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_m(\omega_1, \dots, \omega_m) \delta\left(\omega - \sum_{i=1}^m \omega_i\right) \prod_{j=1}^m X(\omega_j) d\omega_j, \quad (3)$$

где $X(\omega)$ и $Y_m(\omega)$ – преобразования Фурье сигналов $x(t)$ и $y_m(t)$.

Как известно [10], дискретизация сигнала во временной области приводит к суммированию его спектров в частотной области, сдвинутых на величины $k\Omega$, кратные частоте дискретизации $\Omega = 2\pi/T$. В результате спектры дискретизированных входного $x(nT)$ и выходного $y(nT)$ сигналов системы будут представлять собой периодические функции вида

$$\bar{X}(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(\omega + k\Omega), \quad (4)$$

$$\bar{Y}(\omega) = \sum_{m=0}^M \bar{Y}_m(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{m=0}^M \sum_{k=-\infty}^{\infty} Y_m(\omega + k\Omega). \quad (5)$$

Здесь и далее черта сверху используется для обозначения спектров дискретизированных сигналов.

В качестве примера на рис. 1 показано формирование спектра дискретизированного сигнала согласно выражениям (4) и (5) на выходе нелинейной системы второго порядка ($m = 2$). При этом значение спектра сигнала $y_2(nT)$ на некоторой частоте ω_0 представляет собой сумму значений спектра непрерывного процесса $y_2(t)$ на частотах $\pm(k\Omega - \omega_0)$, полученных путем интегрирования произведения $H_2(\omega_1, \omega_2)X(\omega_1)X(\omega_2)$ вдоль прямых $\omega_1 + \omega_2 = \pm(k\Omega - \omega_0)$.

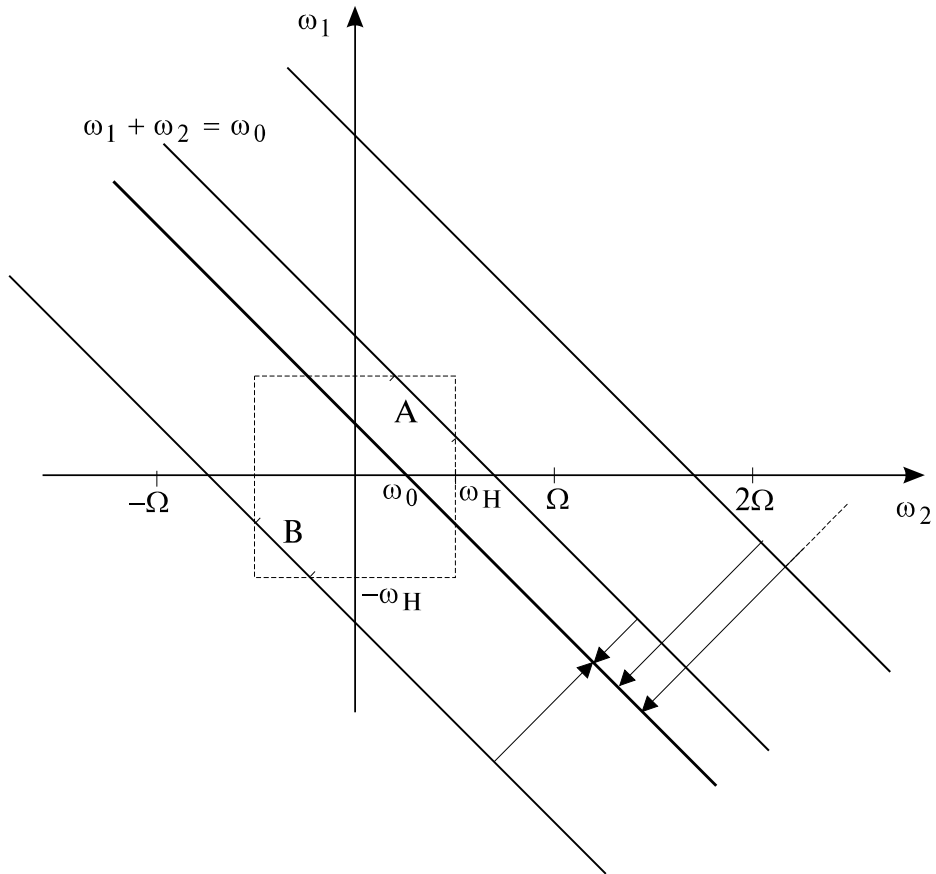


Рис. 1. Формирование спектра выходного сигнала квадратичной системы в результате дискретизации

Выходной спектр $Y'(\omega)$ нелинейного фильтра (2) равен

$$Y'(\omega) = \sum_{m=0}^M Y'_m(\omega).$$

Можно показать, что при шаге T дискретизации выражение, определяющее спектры отдельных составляющих фильтра, будет выглядеть следующим образом:

$$Y'_m(\omega) = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^{m-1} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \dots \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} H'_m(\omega_1, \dots, \omega_m) \delta\left(\omega - \sum_{i=1}^m \omega_i\right) \prod_{j=1}^m \bar{X}(\omega_j) d\omega_j. \quad (6)$$

Из данного выражения следует, что в дискретном случае на значение спектра $Y'_m(\omega)$ оказывают влияние лишь составляющие, находящиеся в ограниченной области интегрирования, представляющей собой гиперкуб со стороной равной Ω . Как хорошо видно из рис. 1, для нелинейности второго порядка эти составляющие образуются путем интегрирования вдоль отрезков A и B, находящихся внутри выделенного пунктиром квадрата. Для нелинейно-

стей высших порядков формирование спектра осуществляется аналогично в области, ограниченной m -мерным кубом. Следует подчеркнуть, что рассмотренное явление частотного наложения, обусловленное расширением спектра входного сигнала, присуще лишь нелинейным системам и отсутствует в линейных.

Относительно спектров $\bar{Y}(\omega)$ и $Y'(\omega)$ дискретных выходных сигналов $y(nT)$ системы и $y'(nT)$ моделирующего фильтра справедливо следующее утверждение.

Утверждение 1. Если частота Ω дискретизации выбрана из условия $\Omega \geq 2\Omega_x$, где Ω_x – верхняя граничная частота входного сигнала $x(t)$, то спектр $\bar{Y}(\omega)$ дискретизированного выходного сигнала $y(nT)$ непрерывной системы, определяемой разложением (1), будет тождественно равен спектру $Y'(\omega)$ выходного сигнала $y'(nT)$ дискретного нелинейного фильтра вида (2) тогда и только тогда, когда преобразования Фурье ядер моделируемой системы и дискретного фильтра совпадают в частотном диапазоне входного сигнала, т.е.

$$H_m(\omega_1, \dots, \omega_m) = H'_m(\omega_1, \dots, \omega_m) \quad (7)$$

для $-\Omega_x \leq \omega_i \leq \Omega_x$, $i = 1, \dots, m$ и $m = 1, \dots, M$.

Доказательство. Подставляя выражение (4) для спектра $\bar{X}(\omega)$ дискретизированного входного процесса в (6), получим

$$\begin{aligned} Y'_m(\omega) = & \frac{1}{(2\pi)^{m-1} T} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \dots \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} H'_m(\omega_1, \dots, \omega_m) \delta\left(\omega - \sum_{i=1}^m \omega_i\right) \times \\ & \times \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{k_m=-\infty}^{\infty} \prod_{j=1}^m X(\omega_j + k_j \Omega) d\omega_j. \end{aligned} \quad (8)$$

Используя подстановку вида $\lambda_j = \omega_j + k_j \Omega$ и учитывая периодичность частотной характеристики $H'_m(\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ фильтра, преобразуем (8) к виду

$$\begin{aligned} Y'_m(\omega) = & \frac{1}{(2\pi)^{m-1} T} \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{k_m=-\infty}^{\infty} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \dots \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} H'_m(\lambda_1, \dots, \lambda_m) \times \\ & \times \delta\left(\omega - \sum_{i=1}^m \lambda_i + \sum_{i=1}^m k_i \Omega\right) \prod_{j=1}^m X(\lambda_j) d\lambda_j. \end{aligned} \quad (9)$$

Значение спектра $Y'_m(\omega)$ не изменится, если в выражении (9) m -кратное суммирование заменить на сумму по $k = k_1 + \dots + k_m$:

$$Y'_m(\omega) = \frac{1}{(2\pi)^{m-1} T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \dots \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} H'_m(\lambda_1, \dots, \lambda_m) \times$$

$$\times \delta \left(\omega - \sum_{i=1}^m \lambda_i + k\Omega \right) \prod_{j=1}^m X(\lambda_j) d\lambda_j. \quad (10)$$

Так как спектр входного процесса ограничен частотой $\Omega_x \leq \Omega/2$, бесконечные пределы интегрирования в (3) можно заменить на $\pm \Omega/2$. На основании (5) получаем следующее выражение для спектра $\bar{Y}_m(\omega)$:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_m(\omega) = & \frac{1}{(2\pi)^{m-1} T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \cdots \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} H_m(\omega_1, \dots, \omega_m) \times \\ & \times \delta \left(\omega - \sum_{i=1}^m \omega_i + k\Omega \right) \prod_{j=1}^m X(\omega_j) d\omega_j. \end{aligned} \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) отличаются лишь частотными ядрами. Следовательно, если выполняется условие (7), суммарные спектры $\bar{Y}(\omega)$ и $Y'(\omega)$ будут равны. Справедливость обратного утверждения легко доказывается методом от противного.

Полученное утверждение дает необходимое теоретическое обоснование для выбора частоты дискретизации при идентификации динамических характеристик нелинейных систем по дискретным данным. Выберем частоту дискретизации по входному сигналу из условия $\Omega \geq 2\Omega_x$ и допустим, что в результате идентификации системы нелинейные импульсные характеристики $h'_m(n_1T, \dots, n_mT)$ моделирующего фильтра определены таким образом, что реакция фильтра $y'(nT)$ совпадает с дискретизированным выходным сигналом $\bar{y}(nT)$ непрерывной системы. В этом случае выходные спектры $\bar{Y}(\omega)$ и $Y'(\omega)$ также совпадают, и на основании утверждения 1 можно заключить, что частотные характеристики дискретного фильтра $H'_m(\omega_1, \dots, \omega_m)$ будут равны соответствующим ядрам $H_m(\omega_1, \dots, \omega_m)$ непрерывной системы в диапазоне частот входного сигнала.

В частности, если нелинейные частотные характеристики системы являются финитными функциями в частотной области и выполняется условие $H_m(\omega_1, \dots, \omega_m) = 0$ при $|\omega_i| > \Omega_H$, $i = 1, \dots, m$ и $m = 1, \dots, M$, то, выбирая верхнюю граничную частоту входного сигнала $\Omega_x \geq \Omega_H$ и частоту дискретизации $\Omega \geq 2\Omega_x$, можно осуществить полную идентификацию системы, т.е. определить частотные характеристики системы во всем частотном диапазоне.

Таким образом, выбор частоты дискретизации по входному сигналу при условии $\Omega_x \geq \Omega_H$ обеспечивает возможность восстановления ядер $h_m(\tau_1, \dots, \tau_m)$ непрерывной нелинейной системы по дискретным характеристикам $h'_m(n_1T, \dots, n_mT)$ моделирующего фильтра. В то же время, в отличие от линейных систем, такой выбор частоты дискретизации не позволяет восстановить выходной сигнал системы $y(t)$ по дискретному процессу $y'(nT)$ на выходе фильтра.

Действительно, согласно выражению (6) значения спектра $Y'_m(\omega)$ формируются путем интегрирования вдоль плоскостей $\omega_1 + \dots + \omega_m = \omega$ в области,

ограниченной гиперкубом со стороны, равной Ω . При этом выбор частоты дискретизации по входному сигналу приводит к наложению спектров, обусловленных нелинейными составляющими различного порядка. Для наглядности рассмотрим это явление на примере квадратичного фильтра, выходной спектр которого может быть представлен в виде

$$\begin{aligned} Y_2'(\omega) &= \frac{1}{2\pi T} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} \int H_2'(\omega_1, \omega_2) \delta(\omega - \omega_1 - \omega_2) \bar{X}(\omega_1) \bar{X}(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2 = \\ &= \frac{1}{2\pi T} \int_{-\Omega/2}^{\Omega/2} H_2'(\omega_1, \omega - \omega_1) \bar{X}(\omega_1) \bar{X}(\omega - \omega_1) d\omega_1, \end{aligned} \quad (12)$$

где подынтегральное выражение является периодической функцией по каждой из частот ω_1, ω_2 с периодом Ω .

Формирование спектра согласно (12) иллюстрируется рис. 2. Здесь периодичность подынтегрального выражения приводит к тому, что на величину выходного спектра $Y_2'(\omega)$ на частоте $\omega = \omega_0$, получаемую путем интегрирования вдоль прямой $\omega_1 + \omega_2 = \omega_0$ на отрезке I, накладывается значение, определяемое интегрированием по отрезку II, которое соответствует величине спектра на частоте $\omega_0 - \Omega$. Еще раз подчеркнем, что рассмотренное явление частотного наложения, связанное с расширением спектра входного сигнала, присуще лишь нелинейным системам и отсутствует в линейных.

Задача восстановления выходного сигнала нелинейной системы

Для восстановления выходного сигнала $y(t)$ нелинейной системы по дискретным отсчетам $y'(nT)$ на выходе фильтра частота дискретизации должна выбираться по отношению к выходному сигналу $y(t)$ и удовлетворять условию $\Omega \geq 2\Omega_y$, где Ω_y – верхняя граничная частота сигнала $y(t)$. Из выражений (1) и (3) следует, что для нелинейной системы порядка M справедливо неравенство $\Omega_y \leq M\Omega_x$. Поэтому, выбирая частоту дискретизации по отношению к входному сигналу (как это делается для линейных систем), в общем случае мы не сможем восстановить выходной сигнал $y(t)$ нелинейной системы из-за перекрытия выходных спектров нелинейных составляющих.

Из рис. 2 можно видеть, что для квадратичной составляющей нелинейной системы избежать наложения спектра, обусловленного интегрированием вдоль отрезка II, можно, увеличив частоту дискретизации в два раза. При этом подынтегральное выражение в (9) будет отлично от нуля лишь в опорной области, представляющей собой квадрат, обозначенный на рис. 2 пунктирной линией.

Полезно выделить также частный случай, в котором не происходит расширения спектра входного сигнала ($\Omega_y = \Omega_x$). Это будет наблюдаться тогда, когда опорная область будет ограничена контуром $ABCDEG$, т.е. выполняется условие $H_2(\omega_1 + \omega_2) = 0$ при $|\omega_1 + \omega_2| > \Omega_H$, и можно положить $\Omega \geq 2\Omega_H$.

Сказанное легко распространяется на случай нелинейности произвольного порядка m . Если опорная область нелинейной частотной характеристики

$H_m(\omega_1, \dots, \omega_m)$ ограничена гиперкубом со стороны $2\Omega_H$, то восстановление $y(t)$ возможно при выборе $\Omega_x \geq \Omega_H$ и $\Omega \geq m\Omega_H$. При ограничении опорной области дополнительным условием $|\omega_1 + \dots + \omega_m| \leq \Omega_H$, например при наличии на выходе нелинейной системы фильтра нижних частот с частотой среза Ω_H , дискретизация может выполняться согласно условию $\Omega \geq 2\Omega_H$.

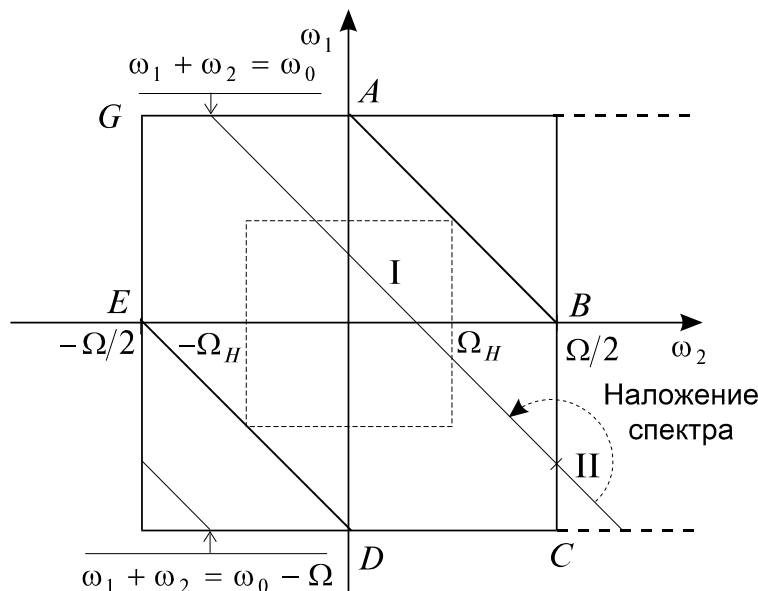


Рис. 2. Получение выходного спектра нелинейного фильтра второго порядка

Таким образом, относительно выходных сигналов непрерывной системы $y(t)$ и дискретного фильтра $y'(nT)$ справедливо следующее утверждение.

Утверждение 2. Пусть нелинейные частотные характеристики определены в областях, ограниченных системой неравенств $|\omega_i| \leq \Omega_H, i = 1, \dots, m$ и $|\omega_1 + \dots + \omega_m| \leq \Omega_m, m = 1, \dots, M$, а верхняя граничная частота входного сигнала $x(t)$ равна Ω_x . Если частота Ω дискретизации выбрана из условия $\Omega \geq 2\Omega_y$, где верхняя граничная частота Ω_y выходного сигнала $y(t)$ определяется как

$$\Omega_y = \min \left\{ M\Omega_x, \quad M\Omega_H, \quad \max_m \Omega_m \right\},$$

а преобразования Фурье ядер моделируемой системы и фильтра совпадают в частотном диапазоне входного сигнала, то непрерывный сигнал $y(t)$ может быть восстановлен из выходного сигнала $y'(nT)$ дискретного полиномиального фильтра по формуле Котельникова.

Важно заметить, что сформулированное выше требование к увеличению частоты дискретизации при восстановлении выходного сигнала $y(t)$ нелинейной системы может быть обеспечено исключительно вычислительным путем без физического изменения шага дискретизации T . Действительно, как мы уже убедились, для определения динамических характеристик нелиней-

ной системы вполне достаточно осуществить дискретизацию исходя из верхней граничной частоты входного сигнала $x(t)$, положив $\Omega_1 \geq 2\Omega_x$ ($\Omega_x \geq \Omega_H$). Используя полученные частотные характеристики $H_m(\omega_1, \dots, \omega_m)$, $m = 1, \dots, M$, и определив аналитически либо экспериментально верхнюю граничную частоту Ω_y выходного сигнала системы, можно пересчитать дискретный фильтр (2) для частоты дискретизации $\Omega_2 \geq 2\Omega_y$, достаточной для восстановления непрерывного сигнала $y(t)$.

Для выполнения такого пересчета необходимо дополнить функции $H_m(\omega_1, \dots, \omega_m)$ нулями в диапазонах частот $\Omega_1/2 \leq \omega_i \leq \Omega_2/2$, $i = 1, \dots, m$, и вычислить обратное преобразование Фурье для определения импульсных характеристик $h_m(n_1T, \dots, n_mT)$ скорректированного фильтра с уменьшенным шагом дискретизации $T = 2\pi/\Omega_2$. Используя далее известный метод [10], можно восстановить искомый непрерывный сигнал $y(t)$ на выходе нелинейной системы по дискретному выходному сигналу $y(nT)$ полученного фильтра.

Заключение

Использование методов цифровой обработки сигналов сопряжено с дискретизацией непрерывных сигналов. В отличие от линейных систем, выполнение операции дискретизации в нелинейных системах имеет ряд особенностей, связанных с расширением спектра выходного сигнала системы. При этом исходя из целей моделирования можно выделить следующие типы задач:

1) определение динамических характеристик дискретного нелинейного фильтра таким образом, чтобы его выходной сигнал совпадал с дискретизированным сигналом моделируемой системы;

2) восстановление выходного сигнала моделируемой системы по дискретному выходному сигналу цифрового нелинейного фильтра.

Для линейного случая данные задачи тождественны, и их решение достигается выбором частоты дискретизации входного сигнала в соответствии с теоремой Котельникова.

При решении первой задачи выбор частоты дискретизации осуществляется относительно входного сигнала нелинейной системы. Сформулированы требования к выбору частоты дискретизации, позволяющие осуществить полную идентификацию системы, т.е. определить ее частотные характеристики во всем диапазоне частот.

При решении второй задачи частота дискретизации должна выбираться по отношению к выходному сигналу системы. Получены требования к выбору частоты дискретизации исходя из граничных частот опорных областей нелинейных частотных характеристик системы. При этом требование к увеличению частоты дискретизации при восстановлении выходного сигнала нелинейной системы может быть обеспечено исключительно вычислительным путем за счет дополнения нулями частотных характеристик моделирующего фильтра с последующим обратным преобразованием Фурье.

Список литературы

1. Pitas I., Venetsanopoulos A. N. Nonlinear digital filters. Kluwer Academic Publishers, 1990. 391 p.
2. Mathews V. J., Sicuranza G. L. Polynomial signal processing. John Wiley & Sons, Inc., 2000. 452 p.

3. Щербаков М. А., Панов А. П. Нелинейная фильтрация с адаптацией к локальным свойствам изображения // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 4. С. 818–824.
4. Щербаков М. А. Управление и идентификация в системах автоматизации испытаний нелинейных объектов // Автоматизация в энергетике. 2010. № 5 (10). С. 17–25.
5. Doyle III F. J., Pearson R. K., Ogunnaike B. A. Identification and control using Volterra models. Springer, 2002. 314 p.
6. Mitra S. K., Sicuranza G. L. Nonlinear image processing. Academic Press, 2001. 455 p.
7. Мармарелис П., Мармарелис В. Анализ физиологических систем: метод белого шума. М. : Мир, 1981. 480 с.
8. Пупков К. А., Капалин В. И., Ющенко А. С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. М. : Наука, 1976. 448 с.
9. Щербаков М. А. Классификация цифровых нелинейных фильтров по виду дискретных сверток // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 4. С. 108–125.
10. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М. : Мир, 1978. 848 с.
11. Щербаков М. А., Сорокин С. В. Метод синтеза цифровых полиномиальных фильтров с помощью базисных частотных функций // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. № 4. С. 74–86.

References

1. Pitas I., Venetsanopoulos A.N. *Nonlinear digital filters*. Kluwer Academic Publishers, 1990:391.
2. Mathews V.J., Sicuranza G.L. *Polynomial signal processing*. John Wiley & Sons, Inc., 2000:452.
3. Shcherbakov M.A., Panov A.P. Nonlinear filtering with adaptation to local image properties. *Komp'yuternaya optika = Computer optics*. 2014;38(4):818–824. (In Russ.)
4. Shcherbakov M.A. Control and identification in test automation systems of nonlinear objects. *Avtomatizatsiya v energetike = Automation in the energy sector*. 2010;(5):17–25. (In Russ.)
5. Doyle III F.J., Pearson R.K., Ogunnaike B.A. *Identification and control using Volterra models*. Springer, 2002:314.
6. Mitra S.K., Sicuranza G.L. *Nonlinear image processing*. Academic Press, 2001:455.
7. Marmarelis P., Marmarelis V. *Analiz fiziologicheskikh sistem: metod belogo shuma = Analysis of physiological systems: white noise method*. Moscow: Mir, 1981:480. (In Russ.)
8. Pupkov K.A., Kapalin V.I., Yushchenko A.S. *Funktsional'nye ryady v teorii nelineynykh system = Functional series in the theory of nonlinear systems*. Moscow: Nauka, 1976:448. (In Russ.)
9. Shcherbakov M.A. Classification of digital non-linear filters by discrete convolutions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;(4):108–125. (In Russ.)
10. Rabiner L., Gould B. *Teoriya i primenenie tsifrovoy obrabotki signalov = Theory and application of digital signal processing*. Moscow: Mir, 1978:848. (In Russ.)
11. Shcherbakov M.A., Sorokin S.V. Method for synthesizing digital polynomial filters using basis frequency functions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2007;(4):74–86. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Александрович Щербаков

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизации
и телемеханики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mashcherbakov@yandex.ru

Mikhail A. Shcherbakov

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of automation
and remote control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 01.08.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 05.09.2023

Принята к публикации / Accepted 10.10.2023

УДК 004.27

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-7

Программная модель вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор

М. А. Кирилюк¹, Н. Б. Парамонов², К. А. Суминов³

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹mkiriliouk@mail.ru, ²paramonov_n_b@mail.ru, ³suminov.ka@phystech.edu

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются специализированные вычислительные комплексы, содержащие в составе квантовый сопроцессор. Предметом исследования является процесс организации вычислений в специализированных вычислительных комплексах с учетом взаимодействия квантовых и классических компьютеров. Цель работы – оценка эффективности решения вычислительно сложных задач с использованием специализированных вычислительных систем с квантовым сопроцессором посредством разработки программной модели вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор. *Материалы и методы.* Исследования процесса организации вычислений в специализированных вычислительных комплексах с учетом взаимодействия квантовых и классических компьютеров выполнены методами имитационного моделирования и эксперимента. *Результаты.* Разработана программная модель. Программная модель вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор, выполнена в виде комплекса экспериментальных программ и размещена на моделирующем стенде на базе российской аппаратно-программной платформы «Эльбрус». Разработанный программный комплекс состоит из трех частей: интерфейсной, вычислительной и веб-приложения. *Выводы.* С использованием разработанной программной модели, размещенной на моделирующем стенде, получены оценки эффективности решения ряда задач с использованием квантового сопроцессора. Показано, что для некоторых задач ускорение, полученное при использовании квантового сопроцессора, может достигать экспоненциального.

Ключевые слова: квантовые вычисления, Эльбрус, симулятор, программная модель, сопроцессор, ускорение

Для цитирования: Кирилюк М. А., Парамонов Н. Б., Суминов К. А. Программная модель вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 70–83. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-7

Software model of a computer with a quantum coprocessor

M.A. Kirilyuk¹, N.B. Paramonov², K.A. Suminov³

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹mkiriliouk@mail.ru, ²paramonov_n_b@mail.ru, ³suminov.ka@phystech.edu

Abstract. *Background.* The object of the study is specialized computing systems containing a quantum coprocessor. The subject of the study is the process of organizing calculations in specialized computing systems, taking into account the interaction of quantum and classical computers. The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of solving computationally complex problems using specialized computing systems with a quantum coprocessor by developing a software model of a computing complex that includes a quantum co-

processor. *Materials and methods.* Studies of the process of organizing calculations in specialized computing systems, taking into account the interaction of quantum and classical computers, were carried out using simulation and experimental methods. *Results.* A software model has been developed. The software model of the computing complex, which includes a quantum coprocessor, is made in the form of a set of experimental programs and placed on a modeling stand based on the Russian hardware and software platform “Elbrus”. The developed software package consists of three parts: interface, computing and web applications. *Conclusions.* Using the developed software model placed on the simulation stand, estimates of the efficiency of solving a number of problems using a quantum coprocessor were obtained. It is shown that for some tasks the acceleration obtained using a quantum coprocessor can reach exponential levels.

Keywords: quantum computing, Elbrus, simulator, software model, coprocessor, speedup

For citation: Kirilyuk M.A., Paramonov N.B., Suminov K.A. Software model of a computer with a quantum coprocessor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):70–83. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-7

Введение

В настоящее время происходит активное развитие вычислительных средств нового поколения, основанных на квантовых подходах к обработке информации [1]. Исследования в области квантовых вычислений направлены на создание полезного квантового компьютера (т.е. квантового компьютера, позволяющего решать практические вычислительные задачи), на выявление задач, которые могут быть решены быстрее при помощи квантового компьютера, создание квантовых алгоритмов для решения таких задач, а также на определение величины потенциального ускорения при решении таких задач на квантовых компьютерах относительно классических компьютеров. Два наиболее известных квантовых алгоритма, а именно алгоритм неструктурированного поиска Гровера [2] и алгоритм факторизации числа Шора [3], позволяют получить полиномиальное и экспоненциальное ускорения соответственно, однако существует также множество других алгоритмов и перспективных областей применения квантовых компьютеров [4–7].

На данный момент считается, что квантовые компьютеры будут использоваться параллельно с классическими в качестве сопроцессоров для решения специализированных задач [8]. Квантовые алгоритмы чаще всего носят гибридный характер, требуя выполнения вспомогательных классических вычислений до, во время и/или после работы квантовой части программы. Хорошим примером этого является вышеупомянутый алгоритм факторизации Шора. Фактически на квантовом компьютере выполняется только самая вычислительно сложная часть алгоритма, которая используется для нахождения периода конкретной функции. Все остальные вычисления, необходимые для нахождения простых множителей некоторого числа, выполняются классическим компьютером. При этом, несмотря на то, что создание полезного квантового компьютера остается нерешенной задачей, на данный момент уже существует большое количество прототипов квантовых компьютеров, способных выполнять некоторые простые алгоритмы. В то же время разработка программных моделей квантовых вычислений остается актуальным направлением развития области, так как такие модели используются для моделирования работы и отладки квантовых алгоритмов для решения задач малой размерности. В будущем при появлении полезного квантового компь-

ютера данные алгоритмы могут быть масштабированы для решения более сложных вычислительных задач. Таким образом, разработка программной модели вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор и учитывающая возможность подключения реальных прототипов квантовых компьютеров, является актуальной.

1. Описание программной модели

Программная модель вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор, выполнена в виде комплекса экспериментальных программ и размещена на моделирующем стенде на базе российской аппаратно-программной платформы «Эльбрус». При разработке программного комплекса учитывался опыт зарубежных разработок в области моделирования квантовых вычислений, таких как QuEST [9], Intel Quantum Simulator [10], Qiskit [11], Quantum Inspire [12], а также разработанные ранее программная модель квантовых вычислений [13, 14] и метод формирования потока исходных данных задач на квантовый сопроцессор [15]. Разработанный программный комплекс состоит из трех частей: интерфейсной, вычислительной и веб-приложения. Структура программного комплекса представлена на рис. 1.

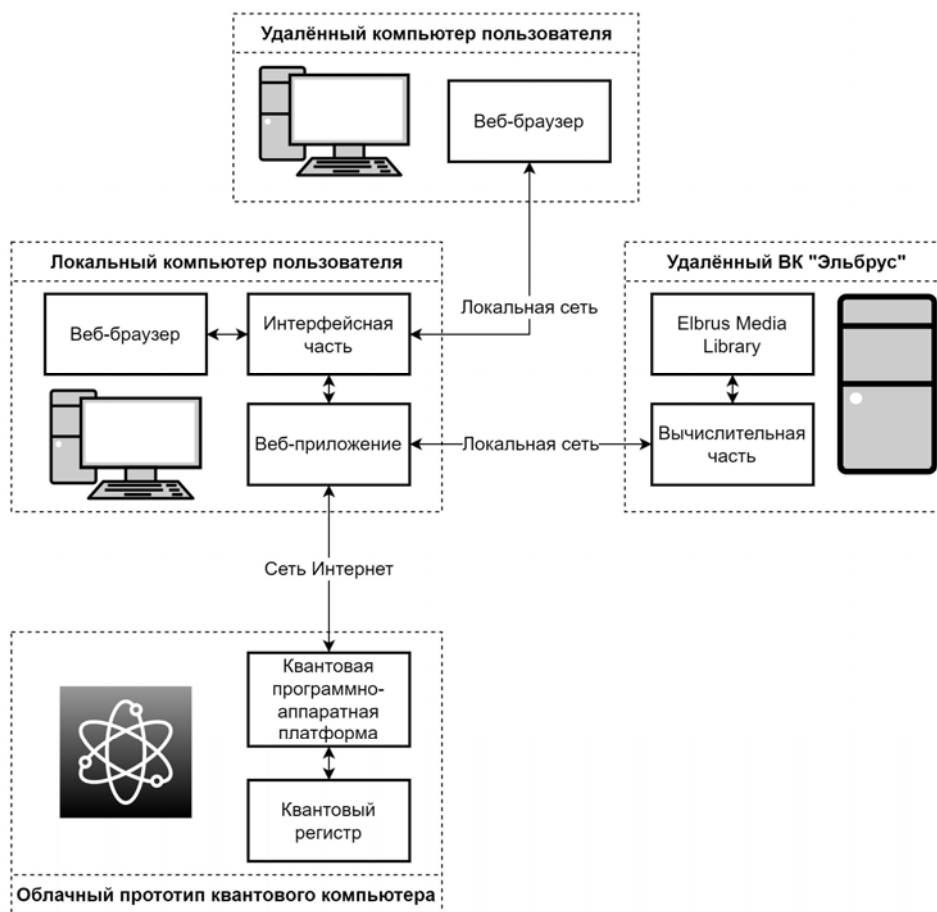


Рис. 1. Структура программного комплекса

В качестве локального компьютера пользователя (т.е. компьютера, на котором запущен программный комплекс) может выступать как вычислительный комплекс «Эльбрус», так и любой другой компьютер, соответствующий системным требованиям для работы с комплексом, однако для подключения прототипов квантовых компьютеров моделирующий стенд должен быть запущен на компьютере с процессором Intel в связи с необходимостью использования архитектурно зависимых библиотек для взаимодействия с квантовой аппаратурой. При этом взаимодействовать с моделирующим стендом можно с любого другого компьютера, соединенного по локальной сети с тем, на котором запущен моделирующий стенд.

2. Вычислительная часть

Вычислительная часть реализована с использованием языка C++. Вычислительная часть принимает на вход конфигурационные файлы .json, генерируемые веб-приложением на основании запросов пользователя из интерфейсной части. Результатом работы вычислительной части является строка, которая содержит пары «измеренное значение» – «количество измерений», после чего результат работы моделирующего стенда выводится пользователю в интерфейсной части. Кроме стандартных библиотек, при разработке использовалась библиотека JSON for Modern C++ для работы с файлами .json и библиотека Elbrus Media Library – высокопроизводительная математическая и мультимедийная библиотека, представляющая собой набор разнообразных функций для обработки сигналов, изображений, видео и математических вычислений [16]. Для работы в режиме использования матриц плотности и моделирования смешанных квантовых состояний в вычислительной части моделирующего стенда реализованы шесть функций, моделирующих декогеренцию квантовых состояний:

– `mixDamping(short target_qubit, float damping)`: смешивает матрицу плотности (регистр) `reg`, чтобы вызвать демпфирование амплитуды одного кубита `target_qubit`. С вероятностью `damping` применяется демпфирование (переход из состояния 1 в состояние 0);

– `mixDensityMatrix(empl_32fc *other, float otherProb)`: модифицирует матрицу `reg` так, что она становится равна

$$(1 - otherProb) \times regProb + otherProb \times other, \quad (1)$$

то есть смешивает две матрицы. Обе матрицы должны быть матрицами плотности одинаковой размерности, а значение `otherProb` должно быть в диапазоне $[0, 1]$;

– `mixDephasing(short target_qubit, float dephase)`: смешивает матрицу плотности (регистр) `reg`, чтобы вызвать дефазирующий шум на одном кубите `target_qubit`. С вероятностью `dephase` применяет гейт Паули Z к кубиту `target_qubit`;

– `mixDepolarising(short target_qubit, float depol_level)`: смешивает матрицу плотности (регистр) `reg`, чтобы вызвать однородный деполяризующий шум на кубите `target_qubit`. Это эквивалентно равномерному случайному применению гейтов Паули X, Y или Z с вероятностью `depol_level` к целевому кубиту `target_qubit`;

– `mixTwoQubitDephasing(short target_qubit1, short target_qubit2, float dephase)`: смешивает матрицу плотности (регистр) `reg`, чтобы вызвать дефазированный шум на двух кубитах `target_qubit1` и `target_qubit2`. С вероятностью `dephase` применяет гейт Паули Z к одному либо обоим кубитам;

– `mixTwoQubitDepolarising(short target_qubit1, short target_qubit2, float depol_level)`: смешивает матрицу плотности (регистр) `reg`, чтобы вызвать двухкубитный однородный деполяризующий шум на кубитах `target_qubit1` и `target_qubit2`. С вероятностью `depol_level` применяет к целевым кубитам один из операторов из множества $\{IX, IY, IZ, XI, YI, ZI, XX, XY, XZ, YX, YY, YZ, ZX, ZY, ZZ\}$.

3. Веб приложение

Веб-приложение реализовано при помощи библиотеки Django на языке Python. Веб-приложение обеспечивает взаимодействие между интерфейсной и вычислительной частями моделирующего стенда посредством обработки запросов пользователя.

После того как пользователь выставил в интерфейсной части все необходимые гейты, выбрал нужные настройки и правильно их установил, а затем нажал на кнопку «Запустить», на основании результата работы функции запуска формируется запрос, который обрабатывается веб-приложением. При поступлении запроса сначала определяется, в каком режиме и с какими настройками необходимо его выполнить, после чего происходит запуск вычислительной части. После получения выходных данных от вычислительной части они обрабатываются веб-приложением, после чего формируется ответ и отправляется в интерфейсную часть для вывода пользователю.

4. Интерфейсная часть

Интерфейсная часть представляет собой веб-страницу формата .html, которая может быть открыта в большинстве современных веб-браузеров. При разработке интерфейсной части были использованы языки HTML и JavaScript, а также программная платформа Node.js и сборщик проектов Grunt. Интерфейсная часть обеспечивает взаимодействие пользователя с моделирующим стендом, обеспечивает возможность создания, редактирования и сохранения квантовых схем, их запуск с различными настройками, переключение режимов работы, а также подключение к прототипам квантовых компьютеров. На рис. 2 приведено основное окно программы.



Рис. 2. Основное окно программы

Основное окно программы состоит из нескольких частей: панели управления и области редактирования и отрисовки квантовых схем, которая

содержит панель гейтов и кубиты для создания квантовых схем и область отображения результата.

Панель управления содержит ряд кнопок, которые позволяют сохранять и загружать квантовые схемы, запускать их на выполнение, открывать окно настроек, а также упрощают работу с квантовыми схемами. Помимо кнопок панель управления содержит настройку количества запусков квантовых схем. Из-за случайной природы квантовых вычислений при выполнении многих квантовых схем невозможно гарантированно получить правильный результат, поэтому любую квантовую схему выполняют многократно (рекомендуемое количество выполнений – не менее 1000).

В интерфейсной части реализованы различные режимы работы (рис. 3).

☒ Выводить нулевые столбцы
☐ Показывать нижнюю панель
☐ Использовать матрицы плотности
☐ Включить режим оценки точности:
 Алгоритм Гровера – 9 кубитов ▾
☐ Особые алгоритмы:
 Задача Коммивояжёра 1 – 14 кубитов ▾
☐ Включить режим оценки мин. количества запусков:
 Необходимая точность: 90 %
 Искомое состояние: 0
 Мин. и макс. кол-во запусков: 100 - 1000
☐ Подключиться к прототипам квантовых компьютеров:
 QuTech Starmon-5 – 5 кубитов ▾ Токен:
 1f0b2e6d50807ec5c8x6180ab7e868e8ad6274de
 Конвертировать конфиг в квантовые языки программирования:
 OpenQASM ▾
 Конвертировать в
☐ Выполнять вычислительную часть удалённо:
 Удалённый адрес: user@192.168.xx.xxx
 Пароль:
 Путь к файлу:
 /test/ElbrusExec

Рис. 3. Окно настроек

Отдельно стоит отметить следующие режимы:

- Использование матриц плотностей при вычислении вместо векторов состояния.

- Режим оценки точности, позволяющий получить количественные оценки: необходимое число итераций для обеспечения точности выполнения квантового алгоритма.

- Режим оценки минимального количества запусков, которое необходимо для получения заданного искомого состояния с заданной точностью.

- Режим подключения прототипов квантовых компьютеров, позволяющий выполнить квантовую схему не с помощью вычислительной части моделирующего стенда, размещенной на классическом компьютере, а на удаленном или виртуальном прототипе квантового компьютера. Все прототипы имеют ряд ограничений по сравнению с выполнением квантовой схемы при помощи вычислительной части моделирующего стенда. Прототипы QuTech Starmon-5 и QX-34-L имеют 5 и 34 кубита соответственно и поддерживают урезанный набор гейтов по сравнению со стандартным режимом.

- Конвертирование квантовой программы между квантовыми языками программирования: OpenQASM, cQASM, Qiskit. Также предусмотрена возможность обратной конвертации из языка OpenQASM.

Область редактирования и отрисовки состоит из трех частей: панели гейтов, кубитов и области вывода результата. Панель гейтов (рис. 4) содержит набор квантовых гейтов, а также некоторых вспомогательных операций, которые можно выполнять на кубитах.



Рис. 4. Панель гейтов

После размещения всех необходимых гейтов можно запустить получившуюся квантовую схему на выполнение. Максимальное количество кубитов, которое можно запустить на выполнение, зависит от доступного объема оперативной памяти и составляет порядка 30 кубит для вычислительного комплекса «Эльбрус-801». Не рекомендуется запускать квантовые схемы, содержащие более 20 кубитов из-за большой вычислительной сложности перемножения матриц состояния таких размеров. В случае создания квантовой схемы с количеством кубитов, превышающим максимальное, моделирующий стенд перейдет в трассирующий режим. Трассирующий режим можно использовать для создания, сохранения и отладки квантовых схем с большим количеством кубитов, однако такие схемы нельзя запустить на выполнение.

Результатом работы моделирующего стенда в стандартном режиме является гистограмма распределения состояний кубитов после серии измерений. На рис. 5 представлено основное окно программы после выполнения алгоритма Гровера для 9 кубитов.

Результатом работы моделирующего стенда в режиме оценки точности является необходимое число итераций для обеспечения точности выполнения оцениваемого квантового алгоритма, его точность, замеренная во время процесса оценки, а также гистограмма распределения состояний кубитов.

Результатом работы моделирующего стенда в режиме оценки минимального количества запусков является информация о количестве запусков, которое потребовалось для того, чтобы измерить заданное состояние с заданной точностью.

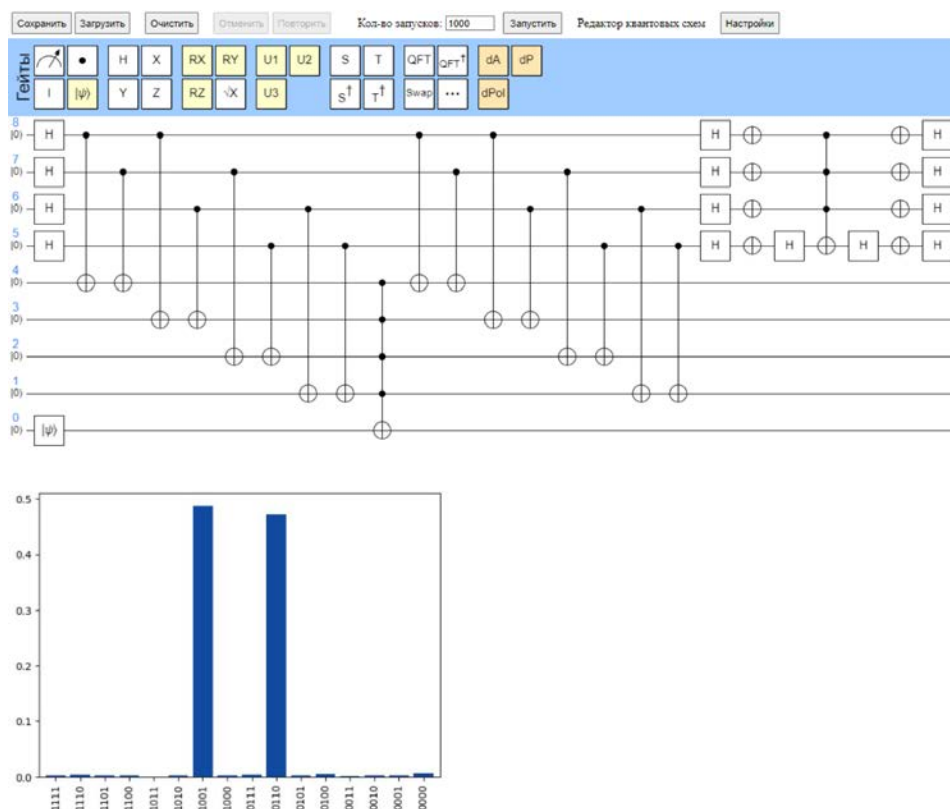


Рис. 5. Основное окно программы после выполнения алгоритма Гровера для 9 кубитов

В моделирующем стенде был также реализован квантовый поиск границ на изображении, результаты работы которого для различных входных изображений приведены на рис. 6.

5. Оценка эффективности

С использованием моделирующего стенда можно проводить оценки ускорения решения вычислительно сложных задач с использованием квантового сопроцессора. В качестве примера рассмотрим алгоритм решения задачи коммивояжера при помощи квантового компьютера. Временная сложность алгоритма составляет $O(\sqrt{(N-1)!})$, где N – количество городов. При этом

классический алгоритм имеет сложность $O((N-1)!)$. Таким образом, разли-

ца между классическим и квантовым алгоритмами составит $\frac{(N-1)!}{\sqrt{(N-1)!}}$. Соот-

ветственно даже при небольших значениях N квантовый алгоритм имеет преимущество (табл. 1).

На рис. 7 приведен график зависимости ускорения при решении задачи коммивояжера на квантовом компьютере от количества городов для N от 3 до 15.

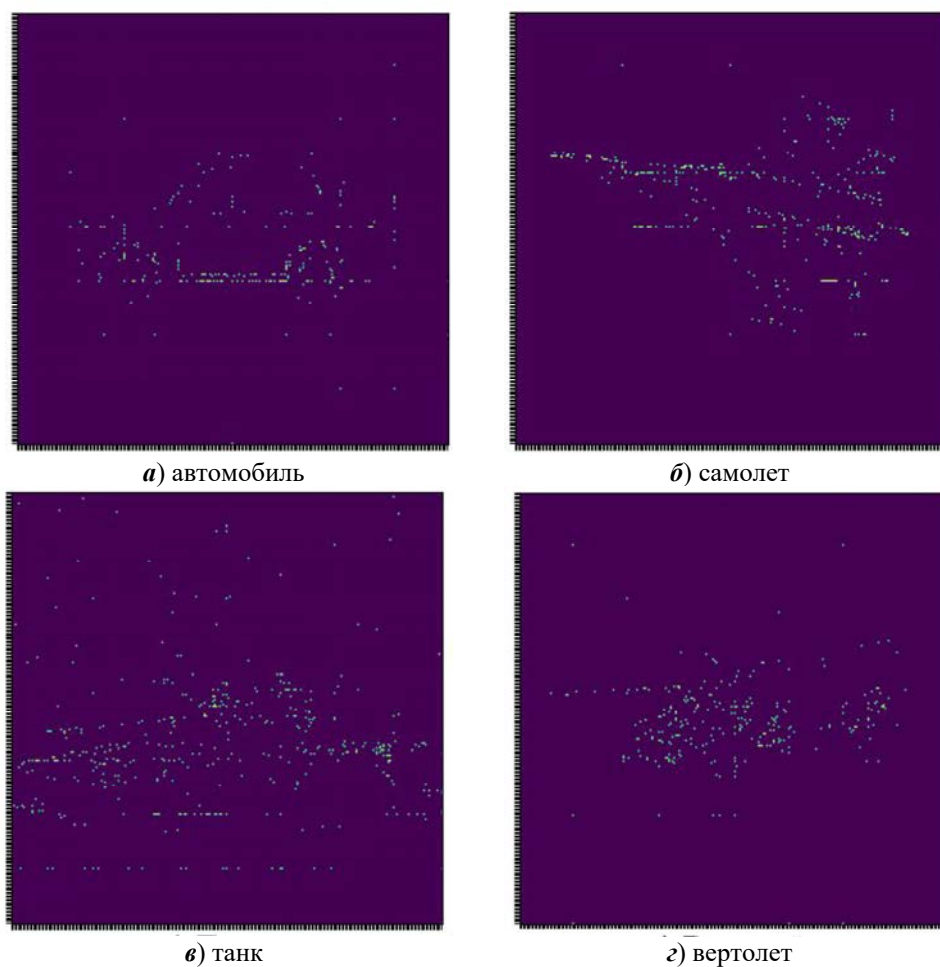


Рис. 6. Результаты работы квантового алгоритма поиска границ на изображении

Таблица 1

Результаты оценки эффективности для решения задачи коммивояжера

N	Ускорение
3	$\approx 1,4$
4	$\approx 2,5$
8	≈ 71
16	$\approx 1,14 \times 10^6$
32	$\approx 9 \times 10^{16}$
64	$\approx 4,5 \times 10^{43}$
128	$\approx 5,5 \times 10^{106}$

Рассмотрим также квантовый алгоритм поиска границ на изображении. Временная сложность классических алгоритмов обнаружения границ составляет порядка $O(2^n)$, где $n = \log_2 N$, N – количество пикселей. Временная сложность самой процедуры обнаружения границ составляет $O(1)$, однако,

как правило, требуется $O(n^2)$ измерений для получения достаточной точности решения и сам процесс кодирования изображения в квантовый регистр имеет временную сложность $O(n^2)$. Таким образом, разница между классическим и квантовым алгоритмами составит $\frac{2^n}{n^4}$ (табл. 2).

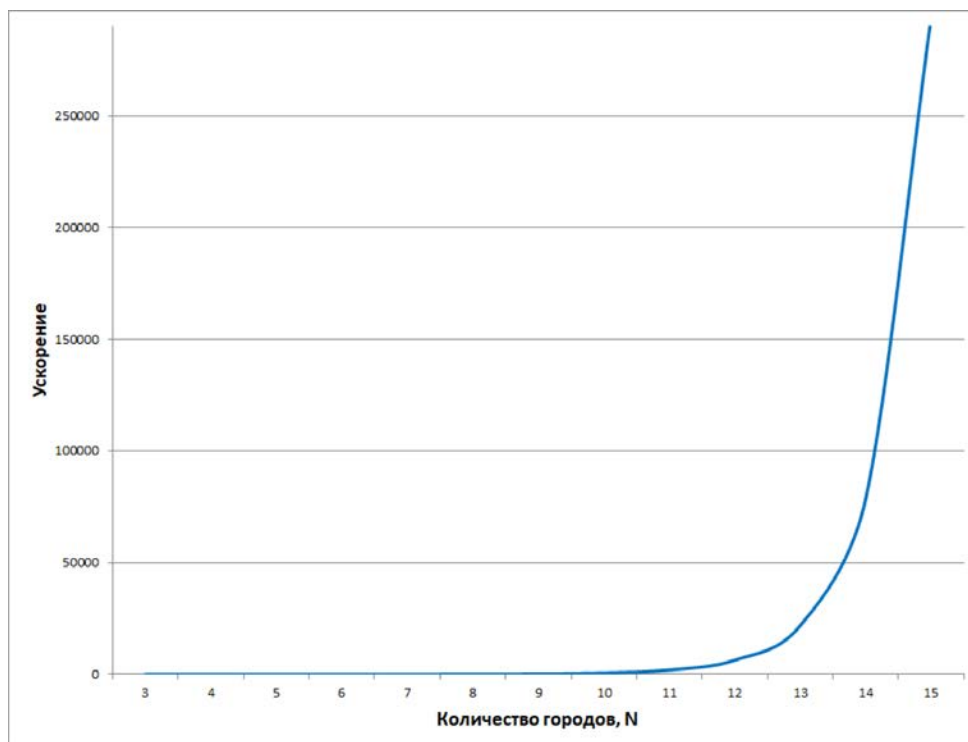


Рис. 7. График зависимости ускорения при решении задачи коммивояжера на квантовом компьютере от количества городов для N от 3 до 15

Таблица 2

Результаты оценки эффективности
для решения задачи поиска границ на изображении

$n = \log_2 N$	Ускорение
3	≈ 0,1
4	0,0625
8	0,0625
16	1
32	4096
64	≈ 1,1 × 10 ¹²
128	≈ 1,268 × 10 ³⁰

Как видно из табл. 2, при $n = 16$ алгоритмы работают с одинаковой скоростью, а при больших значениях n квантовый алгоритм работает быстрее.

На рис. 8 приведен график зависимости ускорения при решении задачи поиска границ на изображении на квантовом компьютере от количества пикселей.

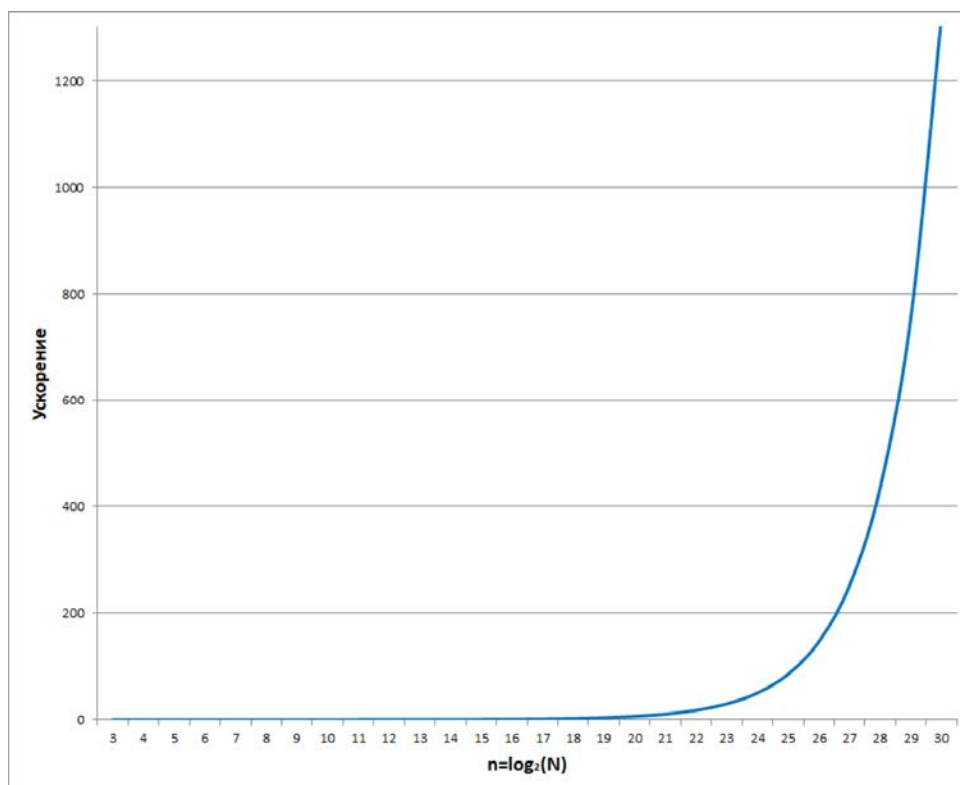


Рис. 8. График зависимости ускорения при решении задачи поиска границ на изображении на квантовом компьютере от количества пикселей

Заключение

В данной работе представлена программная модель вычислительного комплекса, имеющего в составе квантовый сопроцессор, которая была реализована в виде моделирующего стенда. Разработанный моделирующий стенд обладает следующими особенностями и возможностями: 26 квантовых гейтов для создания квантовых схем; моделирование работы квантовых схем, содержащих до 30 кубитов; создание и отладка квантовых схем, содержащих более 100 кубитов в трассирующем режиме; конвертация программного кода квантовых языков программирования, таких как QASM и Qiskit, в квантовые схемы, совместимые с моделирующим стендом; подключение прототипов квантовых компьютеров; установка таких настроек, как количество выполнений квантовой схемы, использование матриц плотности для моделирования смешанных состояний и моделирование декогеренции квантовых состояний.

С использованием моделирующего стенда могут быть решены следующие основные задачи: выполнение квантовых программ, представленных в виде квантовых схем; оценка минимального необходимого числа итераций для получения определенного результата выполнения квантовой схемы с за-

данной вероятностью; создание и сохранение квантовых схем; выполнение квантовых программ на удаленных прототипах квантовых компьютеров; разработка и отладка квантовых кодов коррекции ошибок.

Разработанный моделирующий стенд может быть развернут как на зарубежных средствах вычислительной техники, так и на российской высокопроизводительной аппаратной-программной среде «Эльбрус».

С использованием моделирующего стенда получены оценки эффективности решения ряда задач с использованием квантовых сопроцессоров. Показано, что для некоторых задач ускорение, полученное при использовании квантового сопроцессора, может достигать экспоненциального.

Список литературы

1. Сигов А. С., Андрианова Е. Г., Жуков Д. О., Зыков С. В., Тарасов И. Е. Квантовая информатика: обзор основных достижений // *Russian Technological Journal*. 2019. Т. 7, № 1. С. 5–37.
2. Grover L. K. A fast quantum mechanical algorithm for database search // *Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC) (May 1996)*. 1996. P. 212–219.
3. Shor P. W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer // *SIAM Journal on Computing*. 1997. Vol. 26. P. 1484–1509.
4. Liu Y., Arunachalam S., Temme K. A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning // *Nature Physics*. 2021. Vol. 17. P. 1013–1017.
5. Peyman G., Daley A. J., Mavriplis D., Mujeeb M. Quantum Speedup for Aerospace and Engineering // *AIAA Journal*. 2020. Vol. 58, № 8. P. 3715.
6. Magano D., Kumar A., Kalis M. [et al.]. Quantum speedup for track reconstruction in particle accelerators // *Physical Review D*. 2022. Vol. 105. P. 076012.
7. Pokharel B., Lidar D. A. Demonstration of Algorithmic Quantum Speedup // *Physical Review Letters*. 2023. Vol. 130. P. 210602.
8. Damiani F., Paolini L., Roversi L. Programming the Interaction with Quantum Coprocessors // *ERCIM News* 128. 2022. URL: <https://ercim-news.ercim.eu/en128/special/programming-the-interaction-with-quantum-coprocessors>
9. Jones T., Brown A., Bush I. [et al.]. QuEST and High Performance Simulation of Quantum Computers // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 10736.
10. Guerreschi G. G., Hogaboam J., Sawaya N. P. D. Intel Quantum Simulator: a cloud-ready high-performance simulator of quantum circuits // *Quantum Science and Technology*. 2020. Vol. 5. P. 034007.
11. Wille R., Van Meter R., Naveh Y. IBM's Qiskit Tool Chain: Working with and Developing for Real Quantum Computers // *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*. Florence, Italy, 2019. P. 1234–1240.
12. Last T., Samkharadze N., Eendebak P. T. [et al.]. Quantum inspire – Qutech's platform for co-development and collaboration in quantum computing // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2020.
13. Кирилук М. А., Бочаров Н. А. Разработка программной модели квантовых вычислений и моделирование работы квантовых алгоритмов на платформе «Эльбрус» // *Вестник Концерна ПВО «Алмаз – Антей»*. 2022. № 1. С. 93–101.
14. Программная модель квантовых вычислений : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2022660308 / Кирилук М. А., Бочаров Н. А., Парамонов Н. Б., Суминов К. А. 01.06.2022. Заявка № 2022617425 от 19.04.2022.
15. Кирилук М. А. Формирование потока исходных данных задач на квантовый сопроцессор // *Вестник Концерна ПВО «Алмаз – Антей»*. 2023. № 1. С. 90–106.

16. Нейман-заде М. И., Королев С. Д. Руководство по эффективному программированию на платформе «Эльбрус». М., 2020.

References

1. Sigov A.S., Andrianova E.G., Zhukov D.O., Zykov S.V., Tarasov I.E. Quantum information science: overview of major achievements. *Russian Technological Journal*. 2019;7(1):5–37. (In Russ.)
2. Grover L.K. A fast quantum mechanical algorithm for database search. *Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC) (May 1996)*. 1996:212–219.
3. Shor P.W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*. 1997;26:1484–1509.
4. Liu Y., Arunachalam S., Temme K. A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning. *Nature Physics*. 2021;17:1013–1017.
5. Peyman G., Daley A.J., Mavriplis D., Mujeeb M. Quantum Speedup for Aerospace and Engineering. *AIAA Journal*. 2020;58(8):3715.
6. Magano D., Kumar A., Kalis M. et al. Quantum speedup for track reconstruction in particle accelerators. *Physical Review D*. 2022;105:076012.
7. Pokharel B., Lidar D.A. Demonstration of Algorithmic Quantum Speedup. *Physical Review Letters*. 2023;130:210602.
8. Damiani F., Paolini L., Roversi L. Programming the Interaction with Quantum Coprocessors. *ERCIM News 128*. 2022. Available at: <https://ercim-news.ercim.eu/en128/special/programming-the-interaction-with-quantum-coprocessors>
9. Jones T., Brown A., Bush I. et al. QuEST and High Performance Simulation of Quantum Computers. *Scientific Reports*. 2019;9:10736.
10. Guerreschi G.G., Hogaboam J., Sawaya N.P.D. Intel Quantum Simulator: a cloud-ready high-performance simulator of quantum circuits. *Quantum Science and Technology*. 2020;5:034007.
11. Wille R., Van Meter R., Naveh Y. IBM's Qiskit Tool Chain: Working with and Developing for Real Quantum Computers. *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*. Florence, Italy, 2019:1234–1240.
12. Last T., Samkharadze N., Eendebak P.T. et al. Quantum inspire – Qutech's platform for co-development and collaboration in quantum computing. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2020.
13. Kirilyuk M.A., Bocharov N.A. Development of a software model for quantum computing and modeling of the operation of quantum algorithms on the Elbrus platform. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz – Antey» = Bulletin of Air Defense Concern «Almaz-Antey»*. 2022;(1):93–101. (In Russ.)
14. *Programmnaya model' kvantovykh vychisleniy: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RU 2022660308 = Software model of quantum computing: Certificate of state registration of a computer program RU 2022660308*. Kirilyuk M.A., Bocharov N.A., Paramonov N.B., Suminov K.A. 01.06.2022. Application № 2022617425 of 19.04.2022. (In Russ.)
15. Kirilyuk M.A. Formation of a stream of initial task data to a quantum coprocessor. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz – Antey» = Bulletin of Air Defense Concern «Almaz-Antey»*. 2023;(1):90–106. (In Russ.)
16. Neyman-zade M.I., Korolev S.D. *Rukovodstvo po effektivnomu programmirovaniyu na platforme «El'brus» = Guide to effective programming on the Elbrus platform*. Moscow, 2020. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Андреевич Кирилюк

старший преподаватель базовой
кафедры № 234 – управляющих ЭВМ,
аспирант, МИРЭА – Российский
технологический университет (Россия,
г. Москва, пр-т Вернадского, 78)

E-mail: mkiriliouk@mail.ru

Mikhail A. Kirilyuk

Senior lecturer of the base sub-department
No. 234 – Control Computers, postgraduate
student, MIREA – Russian Technological
University (24 Vavilova street, Moscow,
Russia)

Николай Борисович Парамонов

доктор технических наук, профессор,
заведующий базовой кафедрой № 234 –
управляющих ЭВМ, МИРЭА –
Российский технологический
университет (Россия, г. Москва,
пр-т Вернадского, 78)

E-mail: paramonov_n_b@mail.ru

Nikolay B. Paramonov

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the base sub-department No. 234 –
Control Computers, MIREA – Russian
Technological University (24 Vavilova
street, Moscow, Russia)

Константин Александрович Суминов

старший преподаватель базовой
кафедры № 234 – управляющих ЭВМ,
аспирант, МИРЭА – Российский
технологический университет (Россия,
г. Москва, пр-т Вернадского, 78)

E-mail: suminov.ka@phystech.edu

Konstantin A. Suminov

Senior lecturer of the base sub-department
No. 234 – Control Computers, postgraduate
student, MIREA – Russian Technological
University (24 Vavilova street, Moscow,
Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 03.10.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 19.11.2023

Принята к публикации / Accepted 10.12.2023

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 681.78: 004.032.26
doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-8

Оценка эффективности идентификации цели интеллектуальным тепловизионным прибором на основе предварительно обученной сверточной нейронной сети

К. Хелвех¹, А. А. Кобозев², А. В. Никоноров³

^{1,2}Пензенский филиал военной академии материально-технического
обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, Пенза, Россия

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²kobo81@yandex.ru, ³Nikonorovv62@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Стремительное развитие технологии последних лет значительно расширило номенклатуру предлагаемой элементной базы тепловизионных приборов и позволило применять различные автоматизированные системы идентификации целей, в том числе и на основе сверточных нейронных сетей. Существующие методики оценки дальности действия тепловизионных приборов основаны на критерии Джонсона, используемого для оценки системы «цель – тепловизионный прибор – оператор». Вопрос применения их к системам «цель – тепловизионный прибор – система распознавания» в настоящее время не решен. В условиях повышения доли задач, решаемых интеллектуальными системами технического зрения на основе сверточных нейронных сетей, важной проблемой остается обоснование к ним рациональных требований с использованием критериев, учитывающих особенности восприятия изображений нейронными сетями. Целью работы является определение критериев, позволяющих достоверно оценивать способность идентифицировать цель интеллектуальным тепловизионным прибором на основе сверточных нейронных сетей. *Материалы и методы.* На основе наиболее эффективных моделей сверточных нейронных сетей, предварительно обученных на достаточном количестве тепловизионных изображений семи типов целей, статистическими методами проанализированы такие параметры изображения цели, как SNR, PSNR и SCR. На основе полученной статистической базы проанализированы коэффициенты корреляции вероятности распознавания от параметров изображения для целей, находящихся на различной дальности и имеющих различную площадь относительно всего изображения. *Результаты.* Получены уравнения регрессии, позволяющие на основе геометрических параметров цели $S_{ц}$ и пикового отношения сигнала к шуму изображения PSNR определять вероятностью 50 и 100 % идентификации цели сверточной нейронной сетью. Уточнена методика оценки 50 и 100 % дальности идентификации цели интеллектуальным

© Хелвех К., Кобозев А. А., Никоноров А. В., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

тепловизионным прибором на основе предварительно обученной сверточной нейронной сети. **Выводы.** Полученные зависимости позволяют на основе так называемых «геометрических параметров», а именно фокусного расстояния объектива, размера пикселя матрицы приемника излучения, а также размеров цели, достаточно точно рассчитывать значения минимальной дальности идентификации целей с вероятностью 50 и 100 %, ошибка не превышает 14 %, а также определять минимально необходимое отношение PSNR-изображения, при котором нейронная сеть способна обеспечивать стабильность при идентификации целей.

Ключевые слова: тепловизионные приборы, дальность идентификации, фокусное расстояние, размер пикселя фотоприемного устройства, сверточная нейронная сеть, качество изображения

Для цитирования: Хелвех К., Кобозев А. А., Никоноров А. В. Оценка эффективности идентификации цели интеллектуальным тепловизионным прибором на основе предварительно обученной сверточной нейронной сети // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 84–93. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-8

Evaluation of the target identification effectiveness by an intelligent thermal imaging device based on a pre-trained convolutional neural network

K. Helveh¹, A.A. Kobozev², A.V. Nikonorov³

^{1,2}Penza branch of Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev, Penza, Russia

³Penza State University, Penza, Russia

²kobo81@yandex.ru, ³Nikonorovv62@mail.ru

Abstract. Background. The rapid development of technology in recent years has significantly expanded the range of the proposed element base of thermal imaging devices and allowed the use of various automated target identification systems, including those based on convolutional neural networks. The existing methods for assessing the range of thermal imaging devices are based on the Johnson criterion used to evaluate the “target – thermal imaging device – operator” system; the issue of their application to the “target – thermal imaging device – recognition system” systems is currently unresolved. In the conditions of increasing the share of tasks performed by intelligent vision systems based on convolutional neural networks, an important task remains to substantiate rational requirements for them, using criteria that take into account the peculiarities of image perception by neural networks. The purpose of the study is to determine criteria that allow to reliably assess the ability to identify a target with an intelligent thermal imaging device based on convolutional neural networks. **Materials and methods.** Based on the most effective models of convolutional neural networks, previously trained on a sufficient number of thermal imaging images of seven types of targets, such parameters of the image containing the target images as SNR, PSNR and SCR were analyzed by statistical methods. On the basis of the obtained statistical base, the correlation coefficients of the recognition probability from the image parameters for targets located at different ranges and having different areas relative to the entire image are analyzed. **Results.** Regression equations are obtained that allow, based on the geometric parameters of the target – S_{Π} and the peak signal-to-noise ratio of the image – PSNR, to determine the probability of 50% and 100% identification of the target by a convolutional neural network. The methodology for estimating 50% and 100% of the target identification range by an intelligent thermal imaging device based on a pre-trained convolutional neural network has been refined. **Conclusions.** The obtained dependencies make it possible, based on the so-called “geometric parameters”, namely the focal length of the

lens, the pixel size of the radiation receiver matrix, as well as the size of the target, to accurately calculate the values of the minimum target identification range with a probability of 50% and 100%, the error does not exceed 14%, and also to determine the minimum required PSNR ratio of the image, in which the neural network is able to provide stability when identifying targets.

Keywords: thermal imaging devices, identification range, focal length, pixel size of the photodetector, convolutional neural network, image quality

For citation: Helveh K., Kobozev A.A., Nikonorov A.V. Evaluation of the target identification effectiveness by an intelligent thermal imaging device based on a pre-trained convolutional neural network. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):84–93. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-8

Одним из направлений повышения эффективности тепловизионных приборов (ТВИ) является применение автоматизированных систем идентификации объектов (целей) на основе нейронных сетей различной архитектуры, имеющих ошибки идентификации от 3 до 5 %. Отношение дальности обнаружения к дальности идентификации в системах с применением нейронных сетей может быть выше, чем у систем без их применения примерно на 30 %. Так же как и для человека, при обнаружении и идентификации изображений нейронными сетями существенное значение будут иметь равномерность фона и наличие шумов [1, 2]. В работах [1, 2] были проведены исследования по оценке отношения сигнал/шум (SNR) в зависимости от дальности и теплового контраста цели и влияния контраста изображения и отношения SNR на вероятность распознавания цели нейронной сетью. Кроме отношения SNR и контраста изображения на вероятность идентификации цели как человеком, так и нейронной сетью, по нашему мнению, могут оказывать влияние такие параметры, как:

– пиковое отношение сигнал/шум (PSNR), которое представляет собой выражение для соотношения между максимально возможным значением (мощностью) сигнала и мощностью искажающего шума, влияющего на качество его представления;

– обобщенная характеристика неравномерности изображения (отношение сигнал/неравномерность – SCR), учитывающая влияние неравномерности фона и расположение цели на возможность ее обнаружения [3]:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ((I(i, j) - K(i, j))^2)} \right), \quad (1)$$

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{255}{MSE} \right), \quad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{t=1}^M \sum_{f=1}^N [I(i, j) - K(i, j)]^2, \quad (3)$$

$$SCR = \frac{|\max I_t - \text{mean} I_b|}{clutter}, \quad (4)$$

$$clutter = \left(\frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где I – сигнал (яркость пикселя по i -й строке и j -му столбцу) изображения, содержащий шум; K – яркость пикселя исходного изображения; MSE – среднеквадратическая ошибка яркости по всему изображению; σ_i – стандартное отклонение сигнала (яркости пикселя) n -й ячейки; M, N – размер изображения в пикселях по высоте и ширине соответственно; N_C – количество смежных ячеек на изображении, ячейка определена как квадрат со стороной, равной двум критическим размерам цели.

В результате проведения вычислительных экспериментов по распознаванию изображений были подобраны параметры обучения (табл. 1), при которых точность обучения была наилучшей. Средняя точность обнаружения вырастает до своего уровня максимум в течение первых нескольких часов, все остальное время прирост точности может составить максимум 5–10 %. Скорость повышения точности изменяется с количеством просчитанных итераций. Скорость расчета итераций напрямую зависит от аппаратной части. Для проведения эксперимента была использована видеокарта GeForce GTX 980 4 GB. Результаты распознавания сверточными нейронными сетями с различной архитектурой объектов тестовой выборки представлены на рис. 1.

Таблица 1

Параметры сети, используемые при обучении

Сеть	Размер входного изображения	Время обучения (мин)	Размер сети (МБ)	Max Epochs	Minibatch	Initial Learn Rate	Тип функции активации
alex	227×227	320	206,8	100	5	0,0001	sgdm
google	224×224	550	21,8	90	10	0,0001	sgdm
Vgg-19	224×224	1070	155,2	110	10	0,0001	sgdm
Resnet-101	224×224	850	507,5	100	10	0,001	sgdm

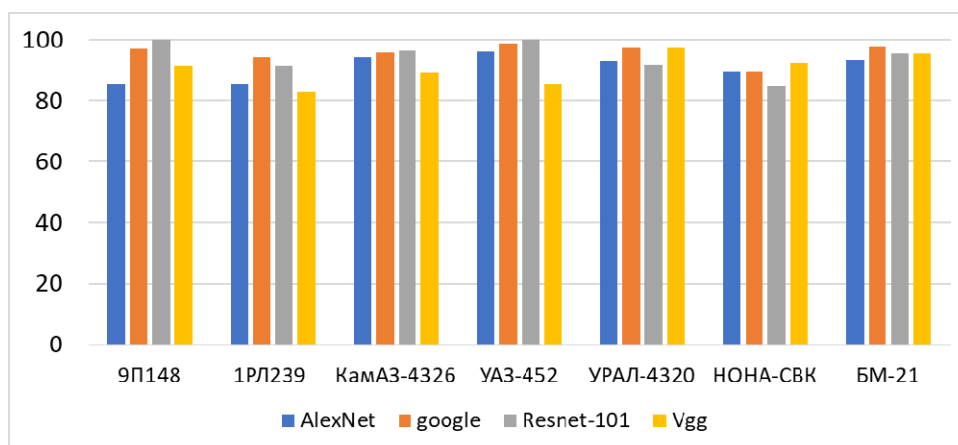


Рис. 1. Результаты распознавания сверточными нейронными сетями с различной архитектурой объектов тестовой выборки (не входящей в обучающую базу данных)

Результаты, полученные при создании и обучении нейронных сетей с различной архитектурой, показывают, что все они имеют достаточно высокую вероятность распознавания объектов – в пределах от 89,9 до 94,8 %.

Наиболее высокие результаты получены с использованием нейронных сетей на базе архитектур Resnet-101 и Google net, которые показали вероятность распознавания в среднем выше на 4 % по отношению к нейронным сетям на базе архитектур Alex net и VGG-19. В дальнейшем при проведении исследований использовалась архитектура сети на основе Google net. Для отбора наиболее значимых факторов были проведены исследования влияния SNR, PSNR и SCR на вероятность распознавания изображения нейронной сетью.

Пример значения величины 50 % и более вероятности распознавания цели нейронной сетью в зависимости от таких параметров, как площадь цели, величина пикового отношения сигнала к шуму PSNR, стандартного отношения сигнала к шуму SNR, а также неравномерности изображения SCR, представлен в табл. 2. Значения коэффициентов корреляции вероятности распознавания цели сверточной нейронной сетью от значений PSNR, SNR и SCR для целей с различной площадью представлены в табл.3.

Таблица 2

Пример части статистических данных по анализу вероятности идентификации цели УРАЛ 4320 от различных параметров изображения

Площадь цели, % от всего изображения	Высота, пк	Ширина, пк	PSNR	SNR	SCR	Вероятность распознавания, %
26	100	200	19,25	10,08	6,85	100
	100	200	12,68	3,51	6,85	99,59
	100	200	12,09	2,92	6,85	97,48
	100	200	11,64	2,47	6,85	71
	100	200	11,39	2,23	6,85	59,16
	100	200	11,18	2,17	6,85	52,57
7,5	54	108	27,97	18,8	11,84	99,95
	54	108	13,99	4,82	11,84	95,7
	54	108	12,61	3,44	11,84	85,27
	54	108	11,64	2,47	11,84	66,12
	54	108	11,51	2,33	11,84	50,02
1	20	37	36,91	27,74	12,06	95
	20	37	19,96	10,8	12,06	92,51
	20	37	19,96	10,8	12,06	80
	20	37	18,29	9,24	12,06	50

Таблица 3

Значение коэффициентов корреляции вероятности распознавания от параметров изображения для различных площадей цели

Параметр	Площадь цели, % от всего изображения					
	26	14	7,5	3,5	1	0,5
PSNR	0,59	0,63	0,63	0,61	0,66	0,58
SNR	0,44	0,55	0,60	0,53	0,66	0,54
SCR	0,04	-0,02	-0,05	0,07	-0,07	0,04

Анализ полученных результатов показывает, что коэффициент корреляции неравномерности изображения SCR не является статистически значимым (при уровне значимости 0,05). Коэффициенты корреляции пикового отношения сигнала к шуму PSNR и стандартного отношения сигнала к шуму SNR имеют примерно одинаковые значения, но корреляция PSNR выше на 5–34 % (в зависимости от площади цели) величины корреляции SNR. Кроме того, параметр PSNR имеет меньший в 1,4–2,7 раза коэффициент вариации, чем параметр SNR. Построение уравнения регрессии производилось в соответствии с общепринятыми методиками [4]. Оценка параметров выбранной модели проводилась с использованием специализированного программного обеспечения CurveExpert, которое имеет большое количество моделей регрессионного анализа. Пример зависимости (рис. 2) величины PSNR от площади изображения для 100 % вероятности распознавания целей, у которой наилучшие значения R^2 :

– для $P = 50 \%$ и более, $R^2 = 96 \%$:

$$\text{PSNR}_{50}(S_{ц\%}) = \frac{1}{3,1 \cdot 10^{-2} + 11,3 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(S_{ц\%})}; \quad (6)$$

– для $P \geq 100 \%$, $R^2 = 97 \%$:

$$\text{PSNR}_{100}(S_{ц\%}) = \frac{1}{2,6 \cdot 10^{-2} + 7,3 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(S_{ц\%})}. \quad (7)$$

Пространственное разрешение ТВП оценивается пороговым значением пространственной частоты штриховой эквивалентной миры, при которой наступает порог идентификации цели [5]. При этом принимается, что вероятности разрешения эквивалентной миры и идентификации цели одинаковы.

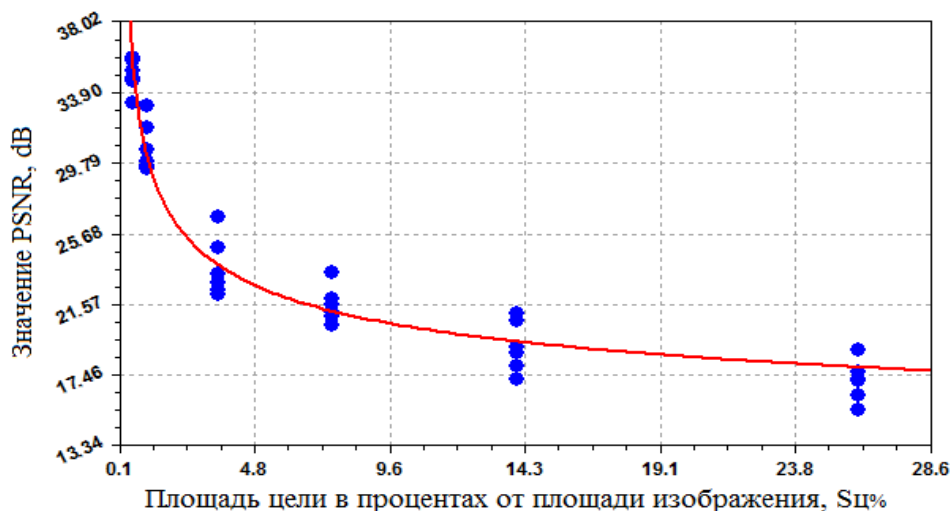


Рис. 2. Зависимость величины PSNR от S цели для $P \geq 100 \%$

Штриховая мира для тепловизионных приборов изготавливается путем создания отверстий (полос) высокой точности в металлических листах раз-

личной формы. Если эту миру поместить перед излучателем (абсолютно черным телом), то тепловизор может видеть все полосы отдельно друг от друга или полосы могут сливаться. В первом случае считается, что мира разрешима, т.е. цель идентифицирована, а во втором – неразрешима, т.е. цель не идентифицирована.

Вследствие этого пороговый уровень идентификации цели в ТПВ-приборе определяется значением пространственной частоты эквивалентной миру при условии равенства разности радиационных температур «цель-фон» и соседних полупериодов мира. Пространственная частота f имеет смысл как величина, обратная размеру объекта, и связана с дальностью l :

$$L(N) = \frac{v \cdot f' \cdot h_{кр}}{N}, \quad (8)$$

где L – дальность распознавания (дистанция до объекта), м; v – пространственная частота 1 пикселя, 1/мм; f' – фокусное расстояние; $h_{кр}$ – критический размер объекта; N – количество активных элементов (пикселей), шт.

Для описания условий восприятия информации нейронными сетями для 50 и 100 % вероятности идентификации цели в зависимости от размеров цели и уровня шума предлагаются зависимости (7) и (8). Тогда дальность идентификации цели может быть найдена по зависимости

$$L(S_{ц\%}) = v \cdot f \sqrt{\frac{S_{ц}}{a \cdot b \cdot S_{ц\%}}} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $S_{ц}$ – площадь цели, м²; $S_{ц\%}$ – площадь цели, % от всего поля зрения прибора; a и b – количество пикселей матрицы по горизонтали и вертикали; v – пространственная частота 1 пк, 1/мм.

Для оценки возможности повышения дальности идентификации целей ТВП за счет применения сверточных нейронных сетей и проверки работоспособности полученных уравнений регрессии было проведено экспериментальное исследование автономной системы идентификации на основе ТВП Flir E40 длинноволновой части инфракрасного диапазона и алгоритма распознавания на базе сверточной нейронной сети. Для изображений вычислялось отношение площади цели относительно площади всего изображения $S_{ц\%}$ и по найденному значению для 50 и 100 % вероятности идентификации по зависимостям (6) и (7) определялось минимально необходимое значение отношения сигнала к шуму $PSNR_{расч}$ в распознаваемом изображении, которое затем сравнивалось с реальным значением $PSNR_{экс}$ распознаваемого изображения.

Анализ результатов (рис. 3 и 4) показывает, что дальность 50 % вероятности идентификации целей нейронной сетью (CNN) больше дальности идентификации по критерию Джонсона (человеком) на 30–50 % в зависимости от типа цели: для цели КАМАЗ – на 50 % относительно дальности по критерию Джонсона, БМ-21 на 30 %, НОНА-СВК на 40 %, УРАЛ на 50 %, МТЛБ на 30 %, УАЗ на 40 %, 9П148 на 30 %. В среднем по всем типам целей сверточная нейронная сеть показывает большую на 38,57 % дальность идентификации, относительно дальности идентификации по критерию Джонсона.

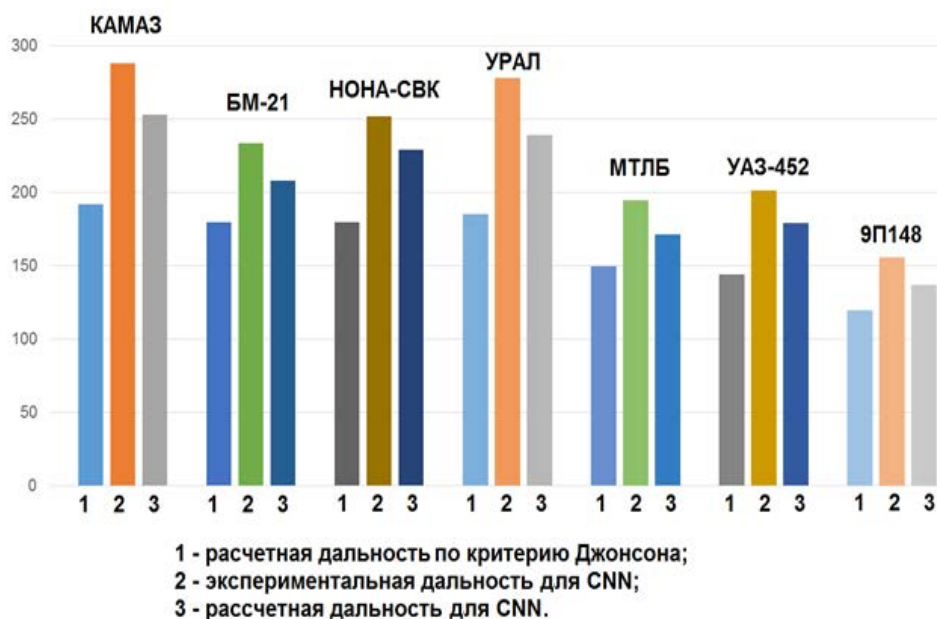


Рис. 3. Дальности 50 % (α) вероятности идентификации целей по критерию Джонсона и нейронной сетью (CNN)

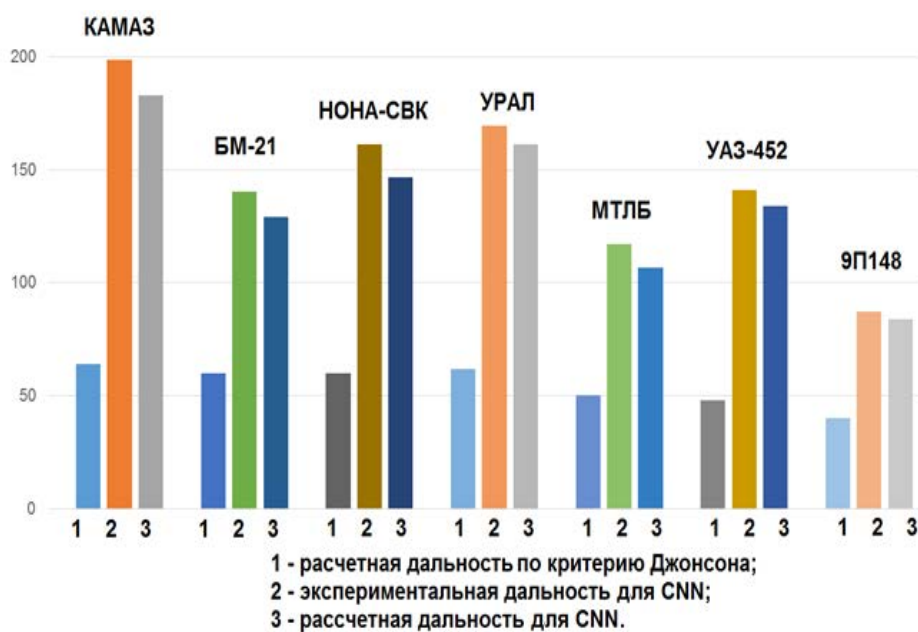


Рис. 4. Дальности 100 % вероятности идентификации целей по критерию Джонсона и нейронной сетью (CNN)

Дальность 100 % идентификации целей нейронной сетью значительно больше дальности идентификации по критерию Джонсона (человеком), для некоторых целей (например, КАМАЗ) – в 3,1 раза, для других типов целей – от 2,2 до 2,9 раза: для БМ-21 дальность 100 % идентификации нейронной сетью больше в 2,3 раза дальности 100 % по критерию Джонсона; для НОНА-

СВК и УРАЛ – в 2,7 раза; МТЛБ – в 2,3 раза; УАЗ – в 2,9 раза и для 9П148 – в 2,2 раза. Площадь цели не всегда оказывает существенное влияние на увеличение дальности идентификации цели нейронной сетью. Так, наибольшие площади цели 25,28; 23,7; 23,58 м² имеют цели КАМАЗ, БМ-21 и НОНА-СВК соответственно, а меньшие (более чем в 2 раза) площади 10,6 и 11,4 м² УАЗ и 9П148. Однако разница в увеличении дальности в среднем отличается всего лишь в 1,06 раза. Расчетные значения дальности идентификации цели нейронной сетью отличаются от экспериментальных не более чем на 14 % (для цели УРАЛ), наименьший разброс в 9 % у цели НОНА-СВК, среднее по всем целям 11,57 %, причем во всех случаях расчетная дальность меньше экспериментальной.

Пиковое отношение сигнал/шум PSNR для изображений, на которых нейронная сеть идентифицировала цели с вероятностью 50 %, составляла от 39,55 до 41,24 dB, а для 100 % вероятности от 42,53 до 44,34 dB. В среднем PSNR для 50 % вероятности составил 40,41 dB, а для 100 % вероятности 43,45 dB.

Расчетные значения минимального необходимого значения PSNR для 50 % вероятности идентификации цели отличались от значения PSNR для реальных изображений в среднем на 4 %, а для вероятности идентификации на 5 %. Причем во всех случаях расчетные значения отношения PSNR были меньше реальных.

Заключение

Таким образом, полученные зависимости позволяют на основе так называемых «геометрических параметров», а именно фокусного расстояния объектива, размера пикселя матрицы приемника излучения, а также размеров цели, достаточно точно рассчитывать значения минимальной дальности идентификации целей с вероятностью 50 и 100 %, ошибка не превышает 14 %, а также определять минимально необходимое отношение PSNR-изображения, при которых нейронная сеть способна обеспечивать стабильность при идентификации целей. Недостатком полученных зависимостей является отсутствие так называемых «энергетических параметров» тепловизионной системы: $\Delta T_{\text{пор}}$ – разность температур, эквивалентная шуму и минимально разрешаемая разница температур $\text{MPPT} - \Delta T_{\text{раз}}$, которые позволяют более точно подбирать параметры приемников излучения при проектировании и оценке эффективности тепловизионных систем.

Список литературы

1. Ашуров Д. А., Исламов В. К. Неохлаждаемые тепловизионные приборы для обнаружения малоразмерных воздушных целей // Молодой ученый. 2017. № 46 (180). С. 40–44.
2. Чивонго В. Е. С. Влияние контраста и шума на распознавание изображений нейронной сетью YOLOv3 // Молодой ученый. 2021. № 23 (365). С. 117–120.
3. Malleswari P. Naga, Renuka B., Sriram Ch. H. S., Jyothirmai A., Srinivas Ch. EMD-DWT Based ECG Denoising Technique using Soft Thresholding // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2020. Vol. 8, № 6. P. 4891–4892.
4. Шанченко Н. И. Лекции по эконометрике : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2008. 139 с.
5. Студитский А. С. Исследование и разработка многофункционального оптико-электронного средства наблюдения и разведки : дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 112 с.

References

1. Ashurov D.A., Islamov V.K. Uncooled thermal imaging devices for detecting small airborne targets. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2017;(46):40–44. (In Russ.)
2. Chivongo V.E.S. The effect of contrast and noise on image recognition by a neural network YOLOv3. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2021;(23):117–120. (In Russ.)
3. Malleswari P. Naga, Renuka B., Sriram Ch.H.S., Jyothirmai A., Srinivas Ch. EMD-DWT Based ECG Denoising Technique using Soft Thresholding. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020;8(6):4891–4892.
4. Shanchenko N.I. *Lektsii po ekonometrike: ucheb. posobie = Lectures on econometrics: textbook*. Ul'yanovsk: UIGTU, 2008:139. (In Russ.)
5. Studitskiy A.S. *Research and development of multifunctional optical-electronic surveillance and reconnaissance equipment*. PhD dissertation. Moscow, 2013:112. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Камел Хелвех

адъюнкт, Пензенский филиал военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева (Россия, г. Пенза-5, военный городок)

Kamel Khelveh

Postgraduate student, Penza branch of Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev (Voyenniy gorodok, Penza-5, Russia)

Алексей Альбертович Кобозев

кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры военных приборов, Пензенский филиал военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева (Россия, г. Пенза-5, военный городок)

Aleksey A. Kobozev

Candidate of engineering sciences, associate professor, deputy head of the sub-department of military optic devices, Penza branch of Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev (Voyenniy gorodok, Penza-5, Russia)

E-mail: kobo81@yandex.ru

Андрей Вячеславович Никоноров

преподаватель кафедры № 3, Военный учебный центр, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Andrey V. Nikonorov

Lecturer of the sub-department No.3, Military Training Center, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

E-mail: Nikonorovv62@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 22.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.08.2023

Принята к публикации / Accepted 10.10.2023

УДК 681.786.4

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-9

Волоконно-оптическая система измерения больших углов наклона крупногабаритных испытательных стендов ракетно-космической и авиационной техники

**Т. И. Мурашкина¹, Е. А. Бадеева²,
М. В. Кузнецова³, А. Н. Кукушкин⁴, В. А. Бадеев⁵**

^{1,2,3,4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru, ³kmvnio@yandex.ru,

⁴Kukushkin.97@mail.ru, ⁵vladbadeev4464@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время при модернизации отечественной ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) особое внимание уделяется точности измерения пространственного положения крупногабаритных испытательных стендов. От точности измерения угла наклона стенда зависят конструктивно-технологические параметры изделий РК и АТ. Используемые средства измерений, в том числе и угла наклона, не должны создавать дополнительных электромагнитных помех при проведении испытаний изделий РК и АТ, поэтому более предпочтительным считается применение волоконно-оптических средств измерений. Объектом исследования являются волоконно-оптические информационно-измерительные системы (ВОИИС) крупногабаритных испытательных стендов РК и АТ. Предметом исследования являются научно-технические решения волоконно-оптических датчиков угла наклона (ВОДУН) аттенюаторного типа, входящие в состав ВОИИС крупногабаритных испытательных стендов. Цель работы – расширение функциональных возможностей ВОИИС при измерении углов наклона крупногабаритных стендов в диапазоне $\pm 20^\circ$. *Материалы и методы.* Основным подходом для достижения поставленной цели является адаптация известных технических решений волоконно-оптических датчиков (ВОД) линейных и угловых перемещений к условиям измерения угла наклона путем модернизации оптико-механической системы (МОМС) ВОДУН. При проведении исследований использовались положения теории измерений, методы геометрической оптики, математическая обработка полученных результатов, моделирование и графические построения в программах Microsoft Office, MathCAD. *Результаты.* Разработана структурная схема ВОИИС на базе ВОДУН аттенюаторного типа, отличающаяся возможностью одновременного измерения угла наклона, угловой скорости и углового ускорения с помощью одного датчика угла наклона, так как изменение положения стендов в пространстве – процесс инерционный. Представлено схематичное изображение взаимного пространственного положения лучей света и элементов волоконно-оптического преобразователя угла наклона при отклонении маятника при наклоне стенда, на основании которого доказана возможность измерения угла в диапазоне $\pm 20^\circ$. Определена структура двухканального маятникового ВОДУН аттенюаторного типа. *Выводы.* Внедрение ВОИИС на крупногабаритных испытательных стендах РК и АТ обеспечивает их абсолютную искро-взрыво-пожаробезопасность. Совершенствование МОМС, в котором аттенюатор сформирован в теле маятника, позволило расширить диапазон измерения угла ВОДУН до $\pm 20^\circ$. Новая структура ВОИИС позволит существенно снизить аппаратные затраты на измерение таких параметров, как угол наклона, угловая скорость и угловое ускорение крупногабаритного испытательного стенда.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, угол наклона, угловая скорость, угловое ускорение, волоконно-оптический датчик, крупногабаритный испытательный стенд, аттенюатор, маятник, структурная схема

© Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Кузнецова М. В., Кукушкин А. Н., Бадеев В. А., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Финансирование: исследование выполняется при финансовой поддержке ректорского гранта Пензенского государственного университета.

Для цитирования: Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Кузнецова М. В., Кукушкин А. Н., Бадеев В. А. Волоконно-оптическая система измерения больших углов наклона крупногабаритных испытательных стендов ракетно-космической и авиационной техники // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 94–105. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-9

Fiber-optic system for measuring large inclination angles of large-sized test benches for rocket, space and aviation technology

**T.I. Murashkina¹, E.A. Badeeva²,
M.V. Kuznetsova³, A.N. Kukushkin⁴, V.A. Badeev⁵**

^{1,2,3,4,5}Penza State University, Penza, Russia

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elen@mail.ru, ³kmvnio@yandex.ru,

⁴Kukushkin.97@mail.ru, ⁵vladbadeev4464@gmail.com

Abstract. *Background.* Nowadays during modernization of domestic rocket-space and aviation equipment (RS and AT) special attention is paid to the accuracy of measurement of spatial position of large-size test stands. Design and technological parameters of RS and AE products depend on the accuracy of measuring the stand inclination angle. The used measuring instruments, including the tilt angle, should not create additional electromagnetic interference during testing of RS and AT products; therefore, the use of fiber-optic measuring instruments is considered more preferable. The object of the research is fiber-optic information-measuring systems (FIMS) of large-size RS and AT test benches. The subject of the research are scientific and technical solutions of fiber-optic tilt angle sensors (FOTAS) of attenuator type, which are a part of FOTAS of large-size test benches. The purpose of the study is to extend the functionality of FIMS in measuring the tilt angles of large-size test benches in the range of ± 20 degrees. *Materials and methods.* The main approach to achieve the set goal is adaptation of known technical solutions of fiber-optic sensors (FOS) of linear and angular displacements to the conditions of tilt angle measurement by modernization of optical-mechanical system (MOMS) of FOTAS. The provisions of the theory of measurements, methods of geometrical optics, mathematical processing of the obtained results, modeling and graphical constructions in Microsoft Office, MathCAD programs were used in the research. *Results.* The structural scheme of FIMS on the basis of attenuator-type FOTAS has been developed, which is characterized by the possibility of simultaneous measurement of inclination angle, angular velocity and angular acceleration with the help of one inclination angle sensor, since the change of stand position in space is an inertial process. A schematic representation of the mutual spatial position of the light rays and elements of the FOTAS when the pendulum is deflected when the stand is tilted is presented, on the basis of which the possibility of measuring the angle in the range of ± 20 degrees is proved. The structure of a two-channel pendulum-type attenuator-type FOTAS is determined. *Conclusions.* Implementation of FIMS on large-size RS and AT test benches provides their absolute spark-explosion-fire safety. Improvement of the MOMS, in which the attenuator is formed in the body of the pendulum, allowed to extend the range of measurement of the FIMS angle up to ± 20 degrees. The new structure of FIMS will allow to significantly reduce hardware costs for measurement of such parameters as tilt angle, angular velocity and angular acceleration of a large-size test stand.

Keywords: information-measuring system, tilt angle, angular velocity, angular acceleration, fiber-optic sensor, large-size test bench, attenuator, pendulum, structural scheme

Financing: the research was financed by the Rector's grant of Penza State University.

For citation: Murashkina T.I., Badeeva E.A., Kuznetsova M.V., Kukushkin A.N., Badeev V.A. Fiber-optic system for measuring large inclination angles of large-sized test benches for rocket, space and aviation technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):94–105. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-9

Введение

Испытательные крупногабаритные стенды, предназначенные для мало-масштабных и крупномасштабных испытаний и отработки аппаратуры ракетно-космической техники и авиационной техники (РК и АТ) – это стендовые комплексы со сложной системой электротехнического оборудования, подземными галереями с сотнями метров кабельных каналов, усилительным и преобразующим оборудованием, бункером управления и центральной измерительной лабораторией, заполненной различной аппаратурой аналого-цифровой регистрации и обработки сигналов [1, 2].

В связи с большими габаритными размерами стендов, порой занимающих целые залы испытательных участков, они подвергаются постоянному воздействию колебаний земной поверхности. Поэтому их устанавливают на виброизоляторы, которые частично компенсируют эти колебания (рис. 1) [1, 3].

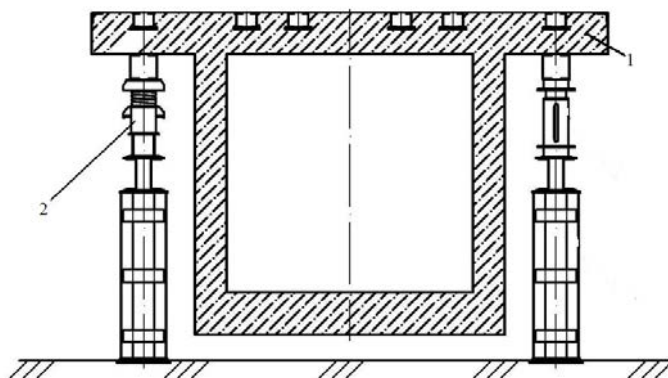


Рис. 1. Пример конструктивной схемы крепления стенда на виброизоляторах [1]:
1 – стол крупногабаритного стенда (вид поперечный); 2 – виброизолятор

При испытаниях надо учитывать остаточные изменения положения стендов в пространстве, поэтому стенды оснащаются датчиковой, регистрирующей, обрабатывающей аппаратурой [4]. Например, в работах [5, 6] дано описание аппаратно-программного комплекса, успешно эксплуатировавшегося в составе газодинамических стендов при проведении модельных испытаний элементов ракет космического назначения и пусковых установок «Энергия-Буран», «Союз», «Зенит» и др. Но существующие аппаратно-программные средства автоматизации измерений выработали свой ресурс – морально и физически устарели.

Одной из основных проблем при испытаниях и эксплуатации аппаратуры РК и АТ, устанавливаемой на крупногабаритных наземных испытательных стендах, является точное определение положения стендов для обеспечения прецизионных метрологических характеристик испытываемой аппаратуры [1]. Поэтому стенды оснащаются информационно-измерительными си-

стемами (ИИС), в состав которых обязательно входят датчики угла наклона, угловой скорости и углового ускорения, линейных и угловых микроперемещений, давления, силы, температуры и др.

Одним из основных требований, предъявляемых к оборудованию стендов, является применение датчиков в искробезопасном исполнении, параметры которых не зависят от электромагнитных помех любой интенсивности [7, 8]. Существенными недостатками электрических систем измерения параметров пространственного положения испытательных стендов, которые используются в настоящее время, являются чувствительность применяемых в них датчиков к помехам, вызванным электромагнитными импульсами различной природы, их дороговизна и схемно-конструктивная сложность, связанная со сложной системой искробезопасности и ее сертификацией.

Совершенствование существующих электрических ИИС не ведет к решению проблемы дальнейшего повышения точности и надежности измерений при наземных испытаниях изделий РК и АТ, так как их резервы практически исчерпаны. Кроме того, применение систем на основе «электрических» датчиков не обеспечивает исключения несанкционированного доступа к измерительной информации.

Для исключения перечисленных недостатков, а также для уменьшения массы измерительных средств и кабельных сетей целесообразно внедрение волоконно-оптических ИИС (ВОИИС), которые, в отличие от традиционных «электрических» систем, способны удовлетворить постоянную потребность РК и АТ и других отраслей народного хозяйства в улучшении их метрологических и эксплуатационных характеристик [1, 9, 10].

Крупногабаритные стенды при испытаниях меняют свое угловое положение. Поэтому для улучшения технических характеристик испытываемой аппаратуры в составе ВОИИС обязательно применение датчиков угла наклона (ВОДУН) (рис. 2).

ВОДУН в общем случае состоит из волоконно-оптического преобразователя угла наклона (ВОПУН), волоконно-оптического кабеля (ВОК) и оптоэлектронного блока (ОЭБ). ОЭБ включает в себя согласующее устройство (СУ), подстыкованное с помощью электрического разъема к модулю сбора и преобразования информации (МСПИ). В СУ установлены источник (ИИ) и приемники (ПИ) излучения. МСПИ с помощью электрического кабеля К1 подключается к источнику питания и электрическому средству измерения (вольтметру V) и, при необходимости, с помощью кабеля К2 – к промышленному компьютеру для визуализации информации, а с помощью кабеля К3 через конвектор интерфейсов RS485 или RS232 КОИ – к сети предприятия, на котором проводятся испытания.

В состав ВОИИС могут входить волоконно-оптические датчики (ВОД) других физических величин, например, ВОД температуры (ВОДТ), давления (ВОДД), базовыми элементами которых являются волоконно-оптические преобразователи температуры (ВОПТ), давления (ВОДП) соответственно. Общее количество ВОД может достигать пяти.

Благодаря разделению ВОДУН на оптико-механический измерительный блок и ОЭБ, разнесенных с помощью ВОК на расстояние от нескольких метров до километра, достигаются основные ВОД перед электрическими дат-

чиками [11, 12]. Можно проводить измерения в предельно жестких условиях окружающей и измеряемой среды – в условиях высоких температур и радиации, в условиях жесткой электромагнитной обстановки, в условиях пожарной и взрывоопасной обстановки, при этом обеспечивается гальваническая развязка [12].

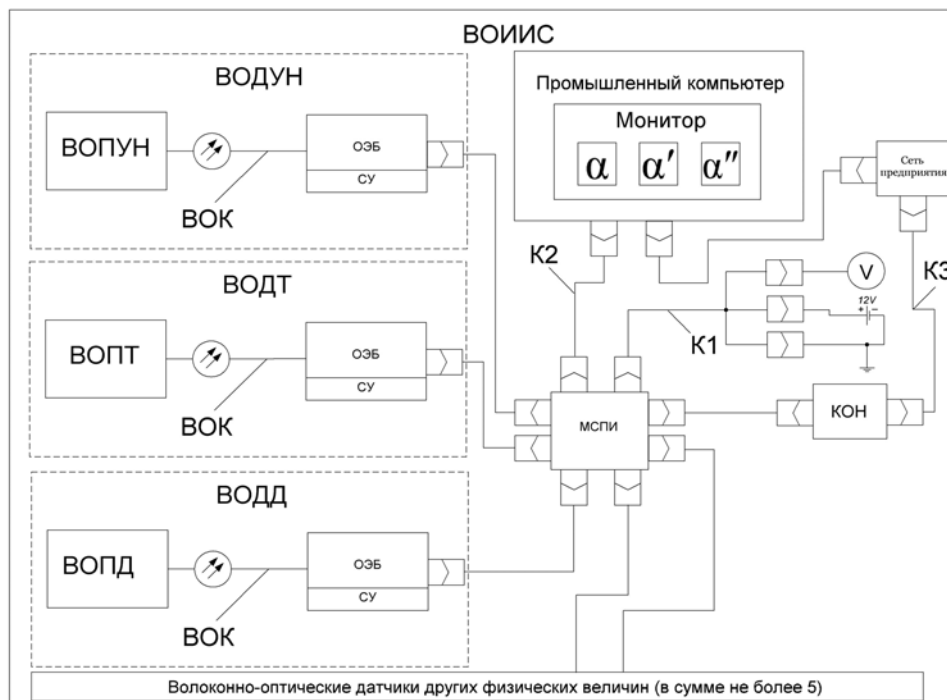


Рис. 2. Структурная схема ВОИИС для крупногабаритных стендов

На основании анализа метрологической и механической надежности известных ВОД [13] сделан важный методологический вывод: для повышения надежности ВОИИС на основе ВОДУН в сложных условиях эксплуатации необходимо исключить механические информативные и неинформативные изгибы волоконно-оптического кабеля, что возможно на пути применения микро-оптико-механических систем (МОМС) ВОПУН, в которых оптические волокна не деформируются [14]. На основании такого вывода происходил выбор принципа действия ВОПУН. Были исключены технические решения на основе брегговских решеток [15, 16] и рассматривались измерительные преобразователи, в которых модуляция оптического сигнала может осуществляться с помощью различных оптико-модулирующих элементов: зеркально отражающей поверхности, предельного аттенюатора, шарообразной или цилиндрической линзы [14]. Большинство рассмотренных технических решений волоконно-оптических преобразователей (ВОП), отвечающих требованиям РК и АТ [7, 8], предназначены для измерения линейных микроперемещений [14]. Поэтому необходимо адаптировать известные технические решения для измерения угла наклона.

Был рассмотрен волоконно-оптический преобразователь углового перемещения, содержащий подводящий (ПОВ) и отводящие (ООВ) оптические

волокна, относительно общего торца которых на определенном расстоянии установлена перемещающаяся на угол α отражающая поверхность [14]. Но недостаток указанного преобразователя – в малом диапазоне измерения (не более 5°), соответственно и диапазон измерения ВОДУН не превышает $\pm 5^\circ$. Для увеличения диапазона измеряемых углов требуется увеличение количества используемых ВОДУН от двух до четырех, устанавливаемых под разными углами к стенду.

Одновременно с измерением угла наклона стенов есть ситуации, при которых необходимо измерять угловую скорость и ускорение, а это требует также введения дополнительных датчиков.

Целью работы является расширение функциональных возможностей ВОИИС при измерении углов наклона крупногабаритных стенов в диапазоне $\pm 20^\circ$.

Методы и подходы

Основным подходом для достижения поставленной цели является адаптация известных технических решений ВОД линейных и угловых перемещений к условиям измерения угла наклона путем модернизации оптико-механической системы ВОДУН. При проведении исследований использовались положения теории измерений, методы геометрической оптики, математическая обработка полученных результатов, моделирование и графические построения в программах Microsoft Office, MathCAD.

Наиболее отработанным является ВОП линейных перемещений с предельным аттенюатором с круглым отверстием, когда модуляция оптического сигнала осуществляется за счет перемещения границы «непрозрачный экран – воздух» аттенюатора в вертикальном направлении относительно торцов ПОВ и ООВ [17]. Для измерения угла наклона предлагается осуществлять угловое перемещение аттенюатора относительно ПОВ и ООВ, для этого в работе [18] предложено сформировать аттенюатор в теле маятника.

Результаты

Для расширения функциональных возможностей ВОИИС на основе ВОДУН впервые предлагается для измерения разнородных физических величин использовать только датчики угла наклона, в нашем случае маятникового типа. Ввиду того, что изменение положения стенов в пространстве – процесс инерционный, возможно на основе одного ВОДУН проводить измерения не только угла наклона α , но угловой скорости α' и углового ускорения α'' .

Для этого в ВОИИС предусмотрено специальное программное обеспечение (ПО), с помощью которого микропроцессор (МП) осуществляет процедуры нахождения первой и второй производной от найденного в результате измерения угла наклона α , соответственно, определяются угловая скорость и угловое ускорение стенов.

Для доказательства возможности измерения угла наклона в диапазоне $\pm 20^\circ$ и более разработано схематичное изображение взаимного пространственного положения лучей света и элементов ВОПУН при отклонении маятника (рис. 3).

Графические построения, выполненные в соответствии с рис. 3 для оптического волокна с диаметром сердцевины, равным 200 мкм, и апертурным

углом 14° , показали, что диапазон отклонения маятника, при котором лучи света от ПОВ будут попадать на ООВ, может составлять $\pm 30^\circ$. Но с учетом апертурного угла ООВ целесообразно диапазон измерения уменьшить до $\pm 20^\circ$.

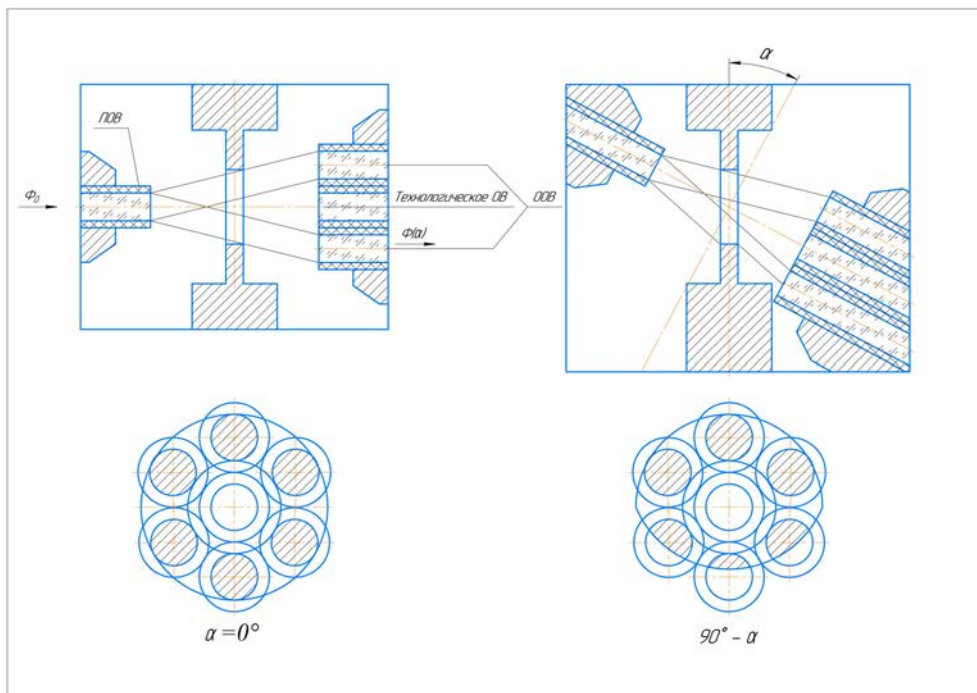


Рис. 3. Ход лучей при изменении угла наклона

Структурная схема ВОДУН приведена на рис. 4.

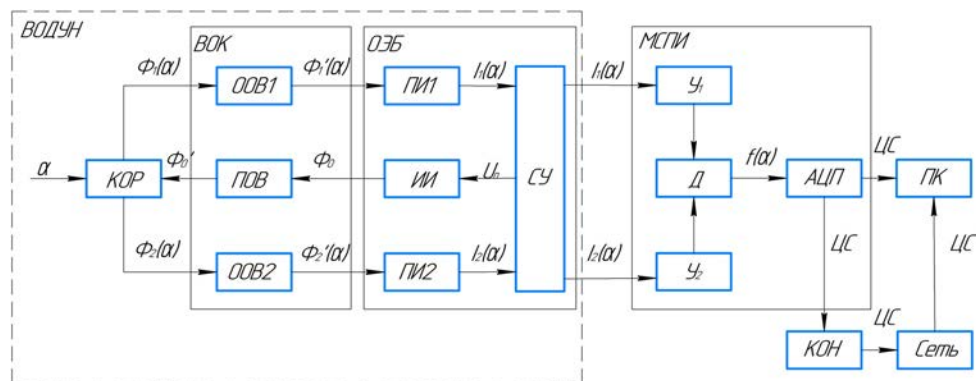


Рис. 4. Структурная схема маятникового ВОДУН

Датчик угла наклона работает следующим образом.

Световой поток Φ_0 , сформированный источником излучения ИИ (например, светодиодом), по подводящему оптическому волокну ПОВ направляется в зону измерения, выходит под апертурным углом Θ_{NA} на излучающем торце ПОВ в виде конуса [14], передается в направлении отверстия в аттенуаторе, сформированном в теле маятника (см. рис. 4 и 5) [18].

В нейтральном положении, когда угол $\alpha = 0$, световой поток Φ_0' , прошедший через отверстие в аттенюаторе, поступает на отводящие оптические волокна ООВ1 и ООВ2 первого и второго измерительных каналов (ИК), по которым передается на приемники излучения ПИ1 и ПИ2 (например, фотодиоды) первого и второго ИК соответственно.

При изменении углового положения стенда, на котором закреплен датчик, гравитационная масса ГМ (маятник с грузом и предельным аттенюатором) датчика сохраняет свое вертикальное положение, но меняется угловое расположение ПОВ и ООВ1 и ООВ2 относительно отверстия в аттенюаторе, сформированном в теле маятника [18]. В этом случае на приемники излучения ПИ1 и ПИ2 поступают оптические сигналы $\Phi_1'(\alpha)$ и $\Phi_2'(\alpha)$, пропорциональные измеряемому углу α , где преобразуются в электрические сигналы $I_1(\alpha)$ и $I_2(\alpha)$ соответственно. Данные сигналы поступают на вход электронного модуля сбора и преобразования информации МСПИ, где они предварительно усиливаются на усилителях У1 и У2 соответственно, так как сигналы с выхода оптических волокон ООВ 1 и ООВ 2 ничтожно малы. Здесь же происходит их дальнейшее преобразование, например, выполняется операция деления $I(\alpha) = k \frac{I_1(\alpha)}{I_2(\alpha)}$, где k – коэффициент пропорциональности. На рис. 4 в струк-

турной схеме сигналы подвергаются процедуре деления на делителе Д.

Если датчик подключается к промышленному компьютеру (см. рис. 2), то в состав МСПИ вводится аналогово-цифровой преобразователь АЦП и конвектор интерфейса RS232 КОИ.

Применение двух ООВ позволяет реализовать двухканальное преобразование оптических сигналов, что снижает дополнительные погрешности от воздействия внешних влияющих факторов (например, от изгибов оптических волокон, от изменения мощности источника излучения ИИ при изменении температуры и пр.) [19]. В этом случае целесообразно сформировать функцию преобразования в виде отношения разности сигналов на выходе к их сумме, т.е. реализовать операцию, соответствующую логометрическому преобразованию $I(\alpha) = k \frac{I_1(\alpha) - I_2(\alpha)}{I_1(\alpha) + I_2(\alpha)}$, с учетом того, что используются один источник излучения и два приемника излучения одного типа [19, 20].

Заключение

Разработана структурная схема ВОИИС, в состав которой входит маятниковый ВОДУН аттенюаторного типа. ВОИИС отличается возможностью одновременного измерения угла наклона, угловой скорости и углового ускорения с помощью одного датчика угла наклона, так как изменение положения стендов в пространстве процесс инерционный. Представлено схематичное изображение взаимного пространственного положения лучей света и элементов ВОПУН при отклонении маятника при наклоне стенда, на основании которого доказана возможность измерения угла в диапазоне $\pm 20^\circ$. Определена структура двухканального маятникового ВОДУН аттенюаторного типа. Совершенствование МОМС, заключающееся в том, что аттенюатор сформирован в теле маятника, позволило расширить диапазон измерения угла ВОДУН до $\pm 20^\circ$.

Новая структура ВОИИС позволит существенно снизить аппаратные затраты на измерение таких параметров, как угол наклона, угловая скорость и угловое ускорение крупногабаритного испытательного стенда.

Внедрение ВОИИС на крупногабаритных испытательных стендах РК и АТ обеспечивает их абсолютную искро-взрыво-пожаробезопасность.

Практическая значимость. ВОДУН может быть использован для измерения угла наклона сооружений относительно горизонта, например, для определения углового положения ферм на стартовой площадке в ракетно-космической технике, для определения угловых перемещений деталей, рычагов управления и других элементов в условиях сильных электромагнитных помех, повышенных температур и больших загрязнений воздуха, в геодезии, строительстве, горном деле, нефтяной и газовой промышленности при бурении скважин, в системах контроля и управления различными подвижными объектами, в приборах охранной сигнализации и сейсмоакустического контроля и пр.

Список литературы

1. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Серебряков К. Д., Удалов А. Ю. Перспективы создания ВОИИС для определения параметров движения крупногабаритных стендов // Современная электроника. 2015. № 6. С. 70–72.
2. Лисейкин В. А., Милютин В. В., Сайдов Г. Г., Тожокин И. А. Информационно-управляющие системы для стендовых испытаний ЖРД и двигательных установок. М. : Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2012. 404 с.
3. Патент Российской Федерации 169812. Устройство центрирования крупногабаритных объектов в ограниченном пространстве / Панов Д. В., Вайцехович С. М., Кривенко Г. Г., Емельянов В. В., Овечкин Л. М., Прусаков М. А., Скрыльникова А. Г. № 2016142253 ; заявл. 27.10.2016 ; опубл. 03.04.2017, Бюл. № 10.
4. Лебига В. А., Самсонов А. В., Птушкин О. М., Боткин С. Е. Опыт модернизации информационно-измерительного комплекса испытательного стенда с применением цифрового регистратора сигналов (НИИХСМ). URL: www.nppmera.ru/opytmodernizaczii-informaczionno-izmeritelnogo-kompleksa-ispytatelnogo-stendas-primeneniem-cifrovogo-registratorasignalov-niixsm
5. Бирюков Г. П., Бут А. Б., Хотулев В. А., Фадеев А. С. Газодинамика стартовых комплексов. М. : Рестарт, 2012. 364 с.
6. Дядькин А. А. Аэрогазодинамика ракетно-космического комплекса «МОРСКОЙ СТАРТ» // Космическая техника и технология. 2014. № 2 (5). С. 14–31.
7. Полякова Е. А., Бадеева Е. А. Тенденции развития ИИС в РК и АТ // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018) : сб. тр. VI Междунар. науч. конф. / под. ред. А. А. Львова, М. С. Светлова. Саратов : Лоди, 2019. С. 551–556.
8. Рубцов И. С. Основные требования, предъявляемые к датчикам физических параметров для изделий РКТ // Информационно-измерительная техника : сб. тр. науч.-техн. конф. / под ред. Д. В. Панова. М. : РУДН, 2014. С. 108–112.
9. Инверсия-Сенсор. URL: https://i-sensor.ru/images/docs/specs/Angle_sensors_isensor.pdf
10. Зеленский В. А. Развитие теории и разработка мультиплексированных волоконно-оптических информационно-измерительных систем мониторинга сложных технических объектов : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.11.16. М., 2010. 32 с.
11. Коломиец Л. Н. Волоконно-оптические датчики в информационно-измерительных системах // Датчики и системы. 2006. № 1. С. 8–14.
12. Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н., Неугольников А. П., Потапов В. Т., Поспелов В. И., Рубцов И. В. Теоретические и экспериментальные аспекты строительного мони-

- торинга на базе волоконно-оптических информационно-измерительных систем // Датчики и системы – 2005 : сборник докладов МНТК. Пенза, 2005. С. 133–141.
13. Бадеева Е. А., Пивкин А. Г., Гориш А. В. Анализ механической надежности волоконно-оптического кабеля для датчиков // Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг : сб. науч. тр. Вып. 6. М. : Росавиакосмос : МГУЛ, 2003. С. 243–254.
 14. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета : монография. СПб. : Политехника, 2018. Ч. I. 187 с. doi: 10.25960/7325-1132-1
 15. Буймистряк Г. Я. Мониторинг технического состояния композитных изделий на основе встраиваемой интеллектуальной волоконно-оптической сенсорики // Композиты и наноструктуры. 2020. Т. 12, № 1 (45). С. 21–24.
 16. Бутов О. И., Томышев К. А., Волоконно-оптические датчики на основе брэгговских решеток с наклонными штрихами : сб. спецвыпуск «Фотон-экспресс-наука 2019». 2019. № 6. doi: 10.24411/2308-6920-2019-16006
 17. Патент Российской Федерации 2290605. Волоконно-оптический преобразователь перемещения / Пивкин А. Г., Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. № 2005109815/28 ; заявл. 05.04.2005 ; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36.
 18. Патент Российской Федерации 2807094 Волоконно-оптический маятниковый датчик угла наклона / Кукушкин А. Н., Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Серебряков Д. И., Бадеев В. А. № 2021133847; заявл. 31.05.2022 ; опубл. 09.11.2023, Бюл. № 31.
 19. Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Полякова Е. А., Славкин И. Е., Кукушкин А. Н. Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 87–98.
 20. Murashkina T. I., Badeeva E. A., Yurova O. V., Savochkina M. M., Motin A. V. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11, № 13. P. 2853–2857.

References

1. Murashkina T.I., Badeeva E.A., Serebryakov K.D., Udalov A.Yu. Prospects for the creation of fiber-optic information-measuring systems for determining the movement parameters of large-sized stands. *Sovremennaya elektronika = Modern electronics*. 2015;(6):70–72. (In Russ.)
2. Liseykin V.A., Milyutin V.V., Saydov G.G., Tozhokin I.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy dlya stendovykh ispytaniy ZhRD i dvigatel'nykh ustanovok = Information and control systems for bench tests of rocket engines and propulsion systems*. Moscow: Mashinostroenie/Mashinostroenie-Polet, 2012:404. (In Russ.)
3. Patent Russian Federation 169812. *Ustroystvo tsentrirovaniya krupnogabaritnykh ob"ektov v ogranichenom prostranstve = Device for centering large objects in limited space*. Panov D.V., Vaytsekhovich S.M., Krivenko G.G., Emel'yanov V.V., Ovechkin L.M., Prusakov M.A., Skryl'nikova A.G. № 2016142253; appl. 27.10.2016; publ. 03.04.2017, Bull. № 10. (In Russ.)
4. Lebiga V.A., Samsonov A.V., Ptushkin O.M., Botkin C.E. *Opyt modernizatsii informatsionno-izmeritel'nogo kompleksa ispytatel'nogo stenda s primeneniem tsifrovogo registratora signalov (NIKHSM) = Experience in modernizing the information-measuring complex of a test bench using a digital signal recorder*. (In Russ.). Available at: www.nppmera.ru/opyitmodernizatsii-informatsionno-izmeritelnogo-kompleksa-ispytatelnogo-stendas-primeneniem-tsifrovogo-registratorasignalov-niixsm
5. Biryukov G.P., But A.B., Khotulev V.A., Fadeev A.S. *Gazodinamika startovykh kompleksov = Gas dynamics of launch complexes*. Moscow: Restart, 2012:364. (In Russ.)

6. Dyad'kin A.A. Aerogasdynamics of the “Morskpy start” rocket and space complex. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya = Space engineering and technology*. 2014;(2):14–31. (In Russ.)
7. Polyakova E.A., Badeeva E.A. Development trends of information-measuring systems in RS and AT. *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii (UOPI-2018): sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. konf. = Problems of management, processing and transmission of information: proceedings of the 6th International scientific conference*. Ed. by A.A. L'vov, M.S. Svetlov. Saratov: Lodi, 2019:551–556. (In Russ.)
8. Rubtsov I.S. Basic requirements for sensors of physical parameters for RKT products. *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika: sb. tr. nauch.-tekhn. konf. = Information and measuring technology: proceedings of the scientific and engineering conference*. Ed. by D.V. Panov. Moscow: RUDN, 2014:108–112. (In Russ.)
9. *Inversiya-Sensor = Inversion-Sensor*. (In Russ.). Available at: https://i-sensor.ru/images/docs/specs/Angle_sensors_isensor.pdf
10. Zelenskiy V.A. *Development of theory and development of multiplexed fiber-optic information-measuring systems for monitoring complex technical objects*. DSc abstract: 05.11.16. Moscow, 2010:32. (In Russ.)
11. Kolomiets L.N. Fiber optic sensors in information measurement systems. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2006;(1):8–14. (In Russ.)
12. Egorov F.A., Kolomiets L.N., Neugodnikov A.P., Potapov V.T., Pospelov V.I., Rubtsov I.V. Theoretical and experimental aspects of construction monitoring based on fiber-optic information and measuring systems. *Datchiki i sistemy – 2005: sbornik dokladov MNTK = Sensors and systems – 2005: proceedings of the International scientific and engineering conference*. Penza, 2005:133–141. (In Russ.)
13. Badeeva E.A., Pivkin A.G., Gorish A.V. Mechanical Reliability Analysis of Fiber Optic Cable for Sensors. *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika, ekologiya i monitoring: sb. nauch. tr. Vyp. 6 = Information and measuring technology, ecology and monitoring: proceedings. Issue 6*. Rosaviakosmos: MGUL, 2003:243–254. (In Russ.)
14. Murashkina T.I., Badeeva E.A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTTs «Nanotekhnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta: monografiya = Fiber-optic devices and systems: Scientific developments of the Scientific and Technical Center “Nanotechnologies of fiber-optic systems” of Penza State University: monograph*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2018;Pt.I:187. (In Russ.). doi: 10.25960/7325-1132-1
15. Buymistryuk G.Ya. Monitoring the technical condition of composite products based on built-in intelligent fiber-optic sensors. *Kompozity i nanostruktury = Kompozity and nanostructure*. 2020;12(1):21–24. (In Russ.)
16. Butov O.I., Tomyshchev K.A., *Volokonno-opticheskie datchiki na osnove breggovskikh reshetok s naklonnymi shtrikhami: sb. spetsvypusk «Foton-ekspress-nauka 2019» = Fiber optic sensors based on Bragg gratings with oblique bars: proceedings of “Photon Express Science 2019”*. 2019;(6). (In Russ.). doi: 10.24411/2308-6920-2019-16006
17. Patent Russian Federation 2290605. *Volokonno-opticheskiy preobrazovatel' peremeshcheniya = Fiber optic displacement transducer*. Pivkin A.G., Murashkina T.I., Badeeva E.A. № 2005109815/28; appl. 05.04.2005; publ. 27.12.2006, Bull. № 36. (In Russ.)
18. Patent Russian Federation 2807094. *Volokonno-opticheskiy mayatnikovyy datchik ugla naklona = Fiber Optic Pendulum Angle Sensor*. Kukushkin A.N., Murashkina T.I., Badeeva E.A., Serebryakov D.I., Badeev V.A. № 2021133847; appl. 31.05.2022; publ. 09.11.2023, Bull. № 31. (In Russ.)
19. Badeeva E.A., Murashkina T.I., Polyakova E.A., Slavkin I.E., Kukushkin A.N. The implementation of the two-channel principle in fiber-optic information-measuring systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;(2):87–98. (In Russ.)

20. Murashkina T.I., Badeeva E.A., Yurova O.V., Savochkina M.M., Motin A.V. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(13):2853–2857.

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: timurashkina@mail.ru

Tat'yana I. Murashkina

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Russia, Penza)

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры бухгалтерского
учета, налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of engineering sciences,
associate professor, professor
of the sub-department of accounting,
taxation and audit,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Russia, Penza)

Марина Владимировна Кузнецова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационно-
вычислительных систем,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kmvnio@yandex.ru

Marina V. Kuznetsova

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of information
and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Russia, Penza)

Алексей Николаевич Кукушкин

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: Kukushkin.97@mail.ru

Aleksey N. Kukushkin

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Russia, Penza)

Владислав Александрович Бадеев

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vladbadeev4464@gmail.com

Vladislav A. Badeev

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Russia, Penza)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 28.09.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 19.10.2023

Принята к публикации / Accepted 05.11.2023

УДК 629.7.067.8

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-10

Исследование влияния технологического разброса параметров на температурную погрешность выходного сигнала тензодатчика давления, применяемого в составе информационно-измерительных систем

Е. А. Рыблова¹, В. С. Волков², С. Н. Базыкин³, Н. В. Мясникова⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹elizaveta.ryblova@mail.ru, ²vadimv_1978@mail.ru,

³cbazykin@yandex.ru, ⁴avitel@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается аналитический метод определения погрешности выходного сигнала полупроводникового тензодатчика давления, применяемого в составе информационно-измерительных систем. Целью работы является определение зависимости температурной составляющей погрешности выходного сигнала мостовой схемы полупроводникового тензодатчика давления, применяемого в составе информационно-измерительных систем различного назначения, от разброса значений концентрации легирующей примеси при изготовлении интегральных кремниевых тензорезисторов, легированных бором. *Материалы и методы.* Исследование проводится методом составления алгоритма для расчета относительной погрешности выходного сигнала в зависимости от разброса значений концентрации легирующей примеси в программном пакете MathCAD. *Результаты.* Получены численные значения относительной температурной погрешности выходного сигнала полупроводникового тензодатчика давления и определена зависимость погрешности от отклонения значений концентрации от номинальных на $\pm 10\%$. *Выводы.* На основе анализа полученных данных определено значение концентрации легирующей примеси, при котором погрешность выходного сигнала минимальна.

Ключевые слова: концентрация легирующей примеси, полупроводниковый тензорезистивный датчик давления, погрешность выходного сигнала, относительная погрешность

Финансирование: статья публикуется по материалам исследований, проводимых в рамках участия автора (Рыбловой Елизаветы Анатольевны) в программе «У.М.Н.И.К.», договор № 18348ГУ/2023 от 04.08.2023.

Для цитирования: Рыблова Е. А., Волков В. С., Базыкин С. Н., Мясникова Н. В. Исследование влияния технологического разброса параметров на температурную погрешность выходного сигнала тензодатчика давления, применяемого в составе информационно-измерительных систем // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 106–114. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-10

Studying the effect of technological scatter of parameters on the temperature error of the output signal of a pressure strain gauge used as part of information-measuring systems

E.A. Ryblova¹, V.S. Volkov², S.N. Bazykin³, N.V. Myasnikova⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

© Рыблова Е. А., Волков В. С., Базыкин С. Н., Мясникова Н. В., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

¹elizaveta.ryblova@mail.ru, ²vadimv_1978@mail.ru,
³cbazykin@yandex.ru, ⁴avitel@pnzgu.ru

Abstract. Background. An analytical method for determining the error of the output signal of a semiconductor pressure transducer used in information-measuring systems (hereinafter - IMS) is considered. The purpose of the study is to determine the dependence of the temperature component of the output signal error of the bridge circuit of a semiconductor pressure transducer used in information-measuring systems of various purposes, on the spread of doping impurity concentration values when manufacturing integrated silicon tensile resistors doped with boron. **Materials and methods.** The study is carried out by the method of compiling an algorithm for calculating the relative error of the output signal depending on the spread of the values of the dopant concentration in the MathCAD software package. **Results.** Numerical values of the relative temperature error of the output signal of a semiconductor pressure transducer have been obtained, and the dependence of the error on the deviation of concentration values from nominal values by $\pm 10\%$ has been determined. **Conclusions.** Based on the analysis of the data obtained, the value of the dopant concentration was determined, at which the error of the output signal is minimal.

Keywords: concentration of dopant, semiconductor strain-resistant pressure sensor, output signal error, relative error

Financing: the article is based on the research conducted by the author (Ryblova Elizaveta Anatolyevna) in the framework of "U.M.N.I.K." program, contract No 18348GU/2023 from August 4, 2023.

For citation: Ryblova E.A., Volkov V.S. Bazykin S.N., Myasnikova N.V. Studying the effect of technological scatter of parameters on the temperature error of the output signal of a pressure strain gauge used as part of information-measuring systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):106–114. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-10

Введение

Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления широко применяются в составе информационно-измерительных систем (ИИС), применяемых в авиапромышленности, ракетостроении и на железнодорожном транспорте. Такие датчики отличаются относительно невысокой стоимостью, надежностью и стабильностью работы. Однако одним из недостатков таких датчиков является значительная температурная погрешность выходного сигнала, которая обусловлена зависимостью главного тензорезистивного коэффициента от температуры и уровня легирования. Температурная составляющая погрешности является существенным недостатком, так как зачастую такие датчики в составе ИИС работают в широком температурном диапазоне. Например, в тормозной системе локомотива диапазон рабочих температур составляет от минус 40 °С до плюс 50 °С.

Применение полупроводникового кремния для изготовления тензорезисторов, лежащих в основе мостовой схемы, позволяет улучшить ряд характеристик датчиков давления: уменьшить массу и габариты, энергопотребление, повысить чувствительность преобразования давления в выходное напряжение. Современные чувствительные элементы полупроводниковых датчиков давления деформационного типа представляют собой интегральные устройства в виде упругого элемента (мембраны круглой, квадратной или прямоугольной формы), на поверхности которого с применением микроэлектронных технологий сформированы полупроводниковые тензорезисторы,

объединенные в полную мостовую схему. Такое конструктивно-технологическое решение позволяет использовать преимущества микроэлектроники (групповой метод изготовления, высокая воспроизводимость геометрических размеров, низкая себестоимость и т.д.). Кроме того, формирование тензорезисторов совместно с поверхностью упругого элемента улучшает передачу деформации тензорезистору под действием давления на мембрану, тогда как в конструкциях с отдельным закреплением на мембране деформация обычно передается через слой клея. Это снижает чувствительность и вносит дополнительную погрешность в выходной сигнал за счет ползучести клея и его низкой стойкости к колебаниям температуры.

При этом остается актуальной проблема высокой температурной погрешности выходного сигнала. Анизотропная кристаллическая структура монокристаллического кремния является причиной того, что механизм его тензочувствительности отличается от тензочувствительности металлов. Если в металлах тензоэффект обусловлен прежде всего изменением линейных размеров тензорезистора, то в полупроводниках тензоэффект является следствием изменения под действием механической нагрузки удельного электрического сопротивления. По этой причине коэффициент тензочувствительности кремния может достигать 200, тогда как у металлов типичным значением является 2, что позволяет получить на 2 порядка повышенную чувствительность тензодатчиков и преобразователей. При этом характеристики кремния в гораздо более высокой степени зависят от температуры, в частности, кремниевые тензорезисторы имеют достаточно высокий температурный коэффициент сопротивления. Кроме того, кремний характеризуется значительной температурной зависимостью тензочувствительности, что является причиной значительной мультипликативной составляющей погрешности выходного сигнала.

Для снижения температурной составляющей погрешности выходного сигнала полупроводникового тензодатчика давления применяется физико-технологический метод, который заключается в определении значения концентрации легирующей примеси в процессе изготовления полупроводниковых тензорезисторов, обеспечивающего минимальную температурную зависимость тензочувствительности, и, как следствие, минимальную температурную составляющую выходного сигнала датчика. При легировании полупроводникового кремния бором используются два основных метода: метод диффузии и метод ионного легирования, каждый из которых имеет свою погрешность введения примеси в полупроводник. То есть рассчитанное значение концентрации легирующей примеси и значение концентрации легирующей примеси в полупроводниковый кремний могут отличаться.

Цель исследования: разработка алгоритма определения зависимости относительной погрешности выходного сигнала полупроводникового тензодатчика давления, применяемого в составе ИИС, от разброса значений концентрации легирующей примеси.

Материалы и методы

Для определения зависимости погрешности выходного сигнала от разброса значений концентрации легирующей примеси был разработан алгоритм расчета, основанный на положениях физики твердого тела и физики полупроводников и представленный в виде программного кода в пакете MathCAD.

Результаты

Наибольшее влияние на характеристики кремниевых полупроводниковых тензорезисторов оказывает концентрация легирующей примеси. Влияние температуры и уровня легирования на тензосопротивление монокристалла кремния характеризует модель Канда, в основе которой лежит графическая зависимость характеристик кремния от концентрации бора и температуры, имеющая сложный нелинейный характер. По данной графической зависимости можно приближенно определить значение концентрации, при котором температурная зависимость коэффициента, учитывающего влияние температуры и концентрации, минимальна, что означает минимальную зависимость тензочувствительности кремния от температуры.

Метод, основанный на модели Канда, не является достаточно точным, так как значение концентрации легирующей примеси, позволяющей минимизировать температурную составляющую погрешности, можно найти только приближенно. Именно поэтому для определения оптимального значения концентрации легирующей примеси был разработан аналитический метод, основанный на составлении алгоритма расчета через такие параметры, как температурный коэффициент сопротивления, подвижность носителей заряда, удельное сопротивление и др. Подробное описание алгоритма приведено в статье [1].

Значения концентрации легирующей примеси и соответствующие значения температурной погрешности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метод определения концентрации легирующей примеси	Численное значение концентрации	Температурная погрешность выходного сигнала
Графический метод	$5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	2,14 %
Аналитический метод (алгоритм)	$5,13 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	0,41 %

Легирующая примесь (бор) вводится в полупроводник (кремний) методом диффузии или ионного легирования. Следует отметить, что при введении примеси в полупроводник существует разброс значений (погрешность метода) и реальное значение примеси, введенной в полупроводник, может отличаться от заданного значения, следовательно, и температурная составляющая погрешности выходного сигнала также будет меняться.

Для определения погрешности выходного сигнала полупроводникового чувствительного элемента с учетом разброса значений концентрации легирующей примеси задавалось значение относительной погрешности введения примеси в полупроводник (разброс значений) от минус 5 % до плюс 5 % с шагом 0,5 %; для каждого значения проводился расчет относительной погрешности выходного сигнала мостовой схемы.

Алгоритм расчета погрешности выходного сигнала представлен на рис. 1:

1. Задается диапазон значений концентрации легирующей примеси N .
2. Проверяется условие $N \leq N_{\max}$ нахождения текущего значения концентрации в заданном диапазоне.
3. Задается температурный диапазон 293–393 К с шагом 0,2 К.
4. Проверяется условие нахождения текущего значения температуры в заданном диапазоне $T \leq T_{\max}$.

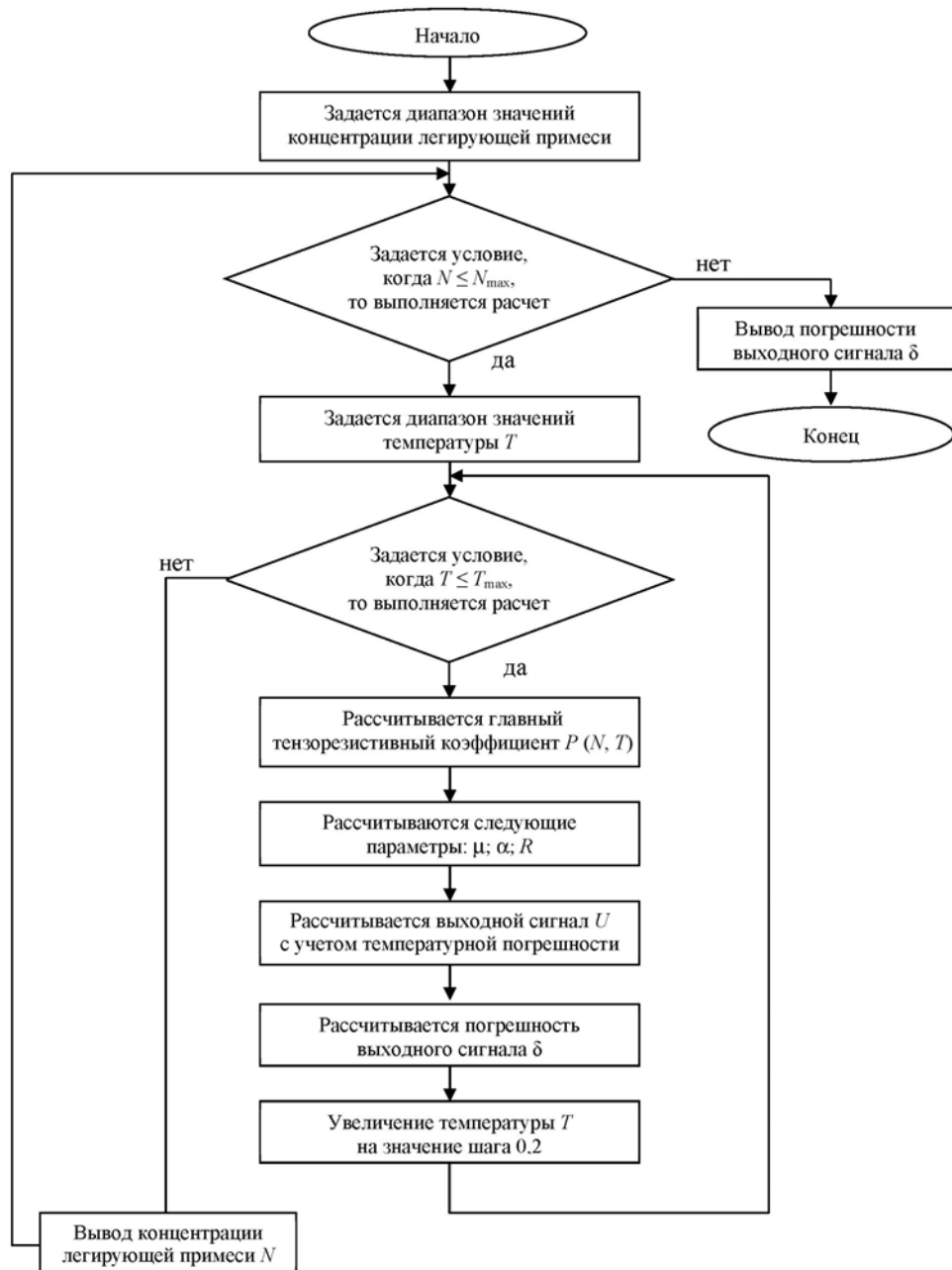


Рис. 1. Алгоритм определения температурной погрешности при разбросе значений концентрации легирующей примеси N

5. Определяется коэффициент $P(N, T)$ по следующей формуле:

$$P(N, T) = \frac{300}{T} \cdot \frac{1}{(1 + \exp(-\eta_f(N, T))) \cdot (\ln(1 + \exp(\eta_f(N, T))))}, \quad (1)$$

где N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} ; T – абсолютная температура, К; η_f – уровень Ферми.

6. Рассчитываются подвижность дырок, температурный коэффициент сопротивления и сопротивление каждого из тензорезисторов мостовой схемы с учетом температурной зависимости по следующим формулам соответственно:

$$\mu = 54,3 \cdot T^{-0,57} + \frac{1,36 \cdot 10^8 \cdot T^{-2,23}}{1 + \left[\frac{N}{2,35 \cdot 10^{17} \cdot T^{24}} \right] \cdot 0,88 \cdot T^{-0,146}}, \quad (2)$$

$$\alpha(N) = \frac{\rho(N, T_{\max}) - \rho(N, T_{\min})}{(T_{\max} - T_{\min}) \cdot \rho(N, 293)}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление тензорезистора, Ом·м;

$$R_1(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 + \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma \right), \quad (4)$$

$$R_2(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 - \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma \right), \quad (5)$$

$$R_3(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 + \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma \right), \quad (6)$$

$$R_4(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 + \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma \right), \quad (7)$$

где σ – нормальное напряжение в поперечном сечении; π_{44} – главный тензорезистивный коэффициент.

7. Рассчитывается выходной сигнал (выходное напряжение мостовой схемы U) с учетом температурной составляющей погрешности по формуле

$$U_{\max} = U_p \cdot \frac{R_1(T) \cdot R_4(T) - R_2(T) \cdot R_3(T)}{(R_1(T) + R_2(T)) \cdot (R_3(T) + R_4(T))}, \quad (8)$$

где U_p – напряжение питания, В; значения сопротивлений $R_i(T)$ вычисляются по формулам (4)–(7).

8. Затем определяется относительная погрешность выходного сигнала δ по формуле

$$\delta = \left| \frac{U_i - U_{\max}}{U_{\max}} \right| \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где U_i – найденное значение выходного напряжения, В; $U_{\max}$ – максимальное значение выходного напряжения, В.

9. После определения относительной погрешности выходного сигнала к заданному значению температуры прибавляется 0,2 К (шаг изменения температуры) и происходит переход к шагу 4.

10. Как только значение температуры становится равно $T_{\max}$, происходит переход к шагу 2.

11. Если значение концентрации легирующей примеси N превышает максимально заданное $N_{\max}$, то выводится значение относительной погрешности выходного сигнала.

Расчет, представленный в виде алгоритма на рис. 1, проводится при каждом значении относительной погрешности введения примеси в полупроводник (разброс значений) от минус 5 % до плюс 5 % с шагом 0,5 % (рис. 2).

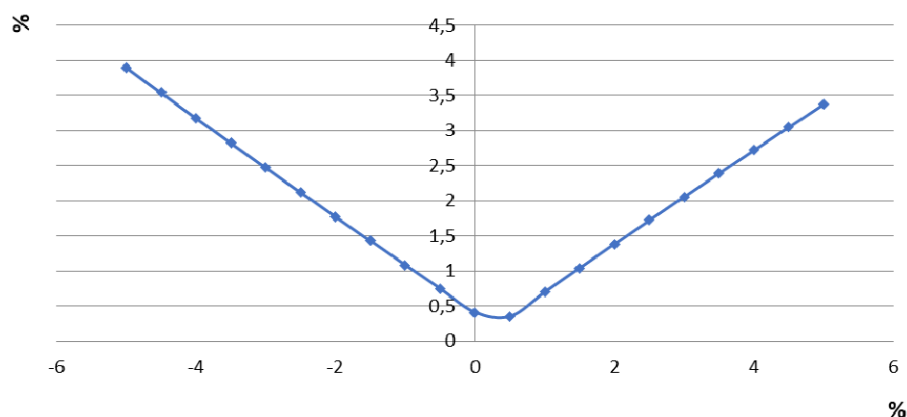


Рис. 2. Зависимость температурной погрешности от разброса значений концентрации легирующей примеси

Из графика, представленного на рис. 2, видно, что наименьшая погрешность выходного сигнала соответствует значению погрешности концентрации легирующей примеси, равной 0,5 %, и составляет 0,349 %. При этом незначительное положительное отклонение концентрации примеси менее 0,5 % вызывает даже небольшое снижение погрешности, так как в предложенной методике определения учитывается температурная и концентрационная зависимость не только коэффициентов тензочувствительности, но и номинальных сопротивлений тензорезисторов и их температурных коэффициентов.

Соответствие значений погрешности концентрации легирующей примеси (разброса значений) и соответствующее ему значение относительной погрешности выходного сигнала сведены в табл. 2.

Таблица 2

Погрешность N , %	Погрешность U , %
-5	3,902
-4,5	3,539
-4	3,179
-3,5	2,822
-3	2,469
-2,5	2,118
-2	1,77
-1,5	1,426
-1	1,084
-0,5	0,745
0	0,409
0,5	0,349

Окончание табл. 2

Погрешность N , %	Погрешность U , %
1	0,696
1,5	1,04
2	1,382
2,5	1,721
3	2,057
3,5	2,391
4	2,723
4,5	3,052
5	3,379

Заключение

Из полученных данных видно, что разброс значений погрешности выходного сигнала составляет от 0,349 до 3,902 %, т.е. максимальная погрешность выходного сигнала полупроводникового чувствительного элемента не превышает 4 %. При этом превышение оптимального значения концентрации примеси на 1 % от номинального вызывает появление значения температурной погрешности порядка 0,7 %, а уменьшение концентрации на ту же величину вызывает погрешность более 1 %.

Список литературы

1. Волков В. С., Волкова Н. В., Рыблова Е. А. Совершенствование методики определения оптимальной концентрации бора при создании кремниевых тензопреобразователей давления // Актуальные проблемы химического образования : материалы Всерос. науч.-практ. конф. учителей химии и преподавателей вузов / под общ. ред. Н. В. Волковой. Пенза, 2020. С. 93–96.

References

1. Volkov V.S., Volkova N.V., Ryblova E.A. Improving the methodology for determining the optimal boron concentration when creating silicon strain gauge pressure transducers. *Aktual'nye problemy khimicheskogo obrazovaniya: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. uchiteley khimii i prepodavateley vuzov = Current issues in chemical education: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*. Ed. by N.V. Volkova. Penza, 2020:93–96. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елизавета Анатольевна Рыблова
аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Elizaveta.ryblova@mail.ru

Elizaveta A. Ryblova
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Вадим Сергеевич Волков
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov
Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of instrument
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

Doctor of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of instrument
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нина Владимировна Мясникова

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматики
и телемеханики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Nina V. Myasnikova

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of automation and telemechanics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.09.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 30.10.2023

Принята к публикации / Accepted 19.11.2023

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621.01/02(04)

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-11

Формообразование поверхностей деталей режущим инструментом с касательным движением на станках с числовым программным управлением

Н. Н. Попок¹, В. С. Анисимов²

^{1,2}Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Республика Беларусь

¹n.popok@psu.by, ²v.anisimov@psu.by

Аннотация. *Актуальность и цели.* Приведены схемы обработки различных поверхностей деталей, которые описываются трехэлементными кинематическими схемами резания, а также рассмотрено формирование этих поверхностей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) при реализации линейной и круговой интерполяции. Целью работы является выбор кинематической схемы резания, обеспечивающей повышение производительности и качество формирования номинальной поверхности детали. *Материалы и методы.* Использовались методы теории резания материалов, в частности анализа кинематики обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки и дискретном перемещении детали и режущего инструмента на станках с ЧПУ. *Результаты.* Разработаны кинематические схемы резания при двух вращательных и поступательном, а также вращательном и поступательном элементарных движениях резания; предложена схема обработки плоской поверхности детали на токарном станке с ЧПУ при дискретном поступательном перемещении режущего инструмента и подвороте детали, что обеспечивает повышение производительности и качества обработки. *Выводы.* Результаты исследований позволяют выбрать рациональную кинематическую схему резания и разработать расчетно-технологическую карту формирования плоской и цилиндрической поверхностей деталей на токарных станках с ЧПУ, обеспечивающую повышение производительности и качества обработки.

Ключевые слова: схемы обработки, кинематические схемы резания, линейная и круговая интерполяция, дискретные перемещения, расчетно-технологическая карта

Для цитирования: Попок Н. Н., Анисимов В. С. Формообразование поверхностей деталей режущим инструментом с касательным движением на станках с числовым программным управлением // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 115–125. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-11

Shaping the surfaces of parts using a cutting tool with tangential movement on CNC machines

N.N. Popok¹, V.S. Anisimov²

© Попок Н. Н., Анисимов В. С., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

^{1,2}Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,
Novopolotsk, Republic of Belarus

¹n.popok@psu.by, ²v.anisimov@psu.by

Abstract. *Background.* The processing schemes of various surfaces of parts, which are described by three-element kinematic cutting schemes, are given, and the formation of these surfaces on CNC machines during the implementation of linear and circular interpolation is also considered. The purpose of the work is to select a kinematic cutting scheme that provides increased productivity and quality of forming the nominal surface of the part. *Materials and methods.* The methods of the theory of cutting materials were used, in particular, the analysis of the kinematics of surface treatment of parts with a rotating cutting tool with tangential movement of the cutting edge and discrete movement of the part and the cutting tool on CNC machines. *Results.* Kinematic cutting schemes have been developed for two rotational and translational, as well as rotational and translational elementary cutting movements; a scheme for processing a flat surface of a part on a CNC lathe with discrete translational movement of the cutting tool and turning of the part is proposed, which provides an increase in productivity and processing quality. *Conclusions.* The results of the research allow us to choose a rational kinematic cutting scheme and develop a computational and technological map for the formation of flat and cylindrical surfaces of parts on CNC lathes, which provides an increase in productivity and processing quality.

Keywords: processing schemes, kinematic cutting schemes, linear and circular interpolation, discrete displacements, calculation and technological map

For citation: Popok N.N., Anisimov V.S. Shaping the surfaces of parts using a cutting tool with tangential movement on CNC machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):115–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-11

Введение

При механической обработке материалов реализуются две основные функции режущего инструмента – формообразование номинальной поверхности и срезание припуска режущими кромками с формированием шероховатости обработанной поверхности детали. Первая функция обеспечивается кинематической схемой резания, в которой указываются необходимые элементарные движения заготовки и инструмента и получаемые траектории резания. Реализация второй функции достигается наряду с принятым движением резания, назначением элементов режима резания и применением соответствующих типов режущих инструментов [1].

Формообразование номинальной поверхности описывается известными математическими формулами и достигается предлагаемыми способами обработки. Для срезания припуска и получения требуемой точности и шероховатости поверхности также используются различные способы обработки [2]. Доказано [3, 4], что повышению производительности и точности обработки способствует применение вращающихся многолезвийных режущих инструментов, имеющих касательное по отношению к обрабатываемой поверхности и поверхности резания движение. Наличие касательного движения снижает нормальную силу и силу трения, действующие на режущую кромку, а также температуру в зоне резания. Поэтому имеется возможность увеличить частоту вращения инструмента, уменьшить толщину слоя срезаемого каждым лезвием и за счет этого увеличить минутную подачу инструмента и производительность обработки. При этом более рационально используется мощность привода станка.

Тенденция использования вращающихся инструментов четко прослеживается при обработке поверхностей деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), где все чаще используются фрезы, зенкеры, круговые протяжки и тому подобные типы режущих инструментов. В данной статье предлагается оценить возможности систем управления, быстродействия датчиков, точности перемещения механизмов станков с ЧПУ в сопоставлении с получаемой при формообразовании и задаваемой точностью обработки.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач в работе использовались исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения, кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки, элементы геометрии и моделирования.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим некоторые схемы обработки, реализующие касательные движения режущих кромок (рис. 1). При обработке цилиндрической или конической поверхностей деталей (рис. 1,а) реализуется схема резания с главным вращательным движением резания D_r , сообщаемым инструменту 1, поступательным (вдоль оси главного вращательного движения) движением подачи D_{s1} также сообщаемым инструменту и круговым движением подачи D_{s2} , сообщаемым заготовке 2. Так реализуется схема осевой обработки (зенкерования) или плунжерного фрезерования. При этом за счет двух вращательных и поступательного движений, применения многолезвийного режущего инструмента обеспечивается касательное движение режущей кромки, увеличение его линейной скорости и, как следствие, повышение производительности и качества обработки.

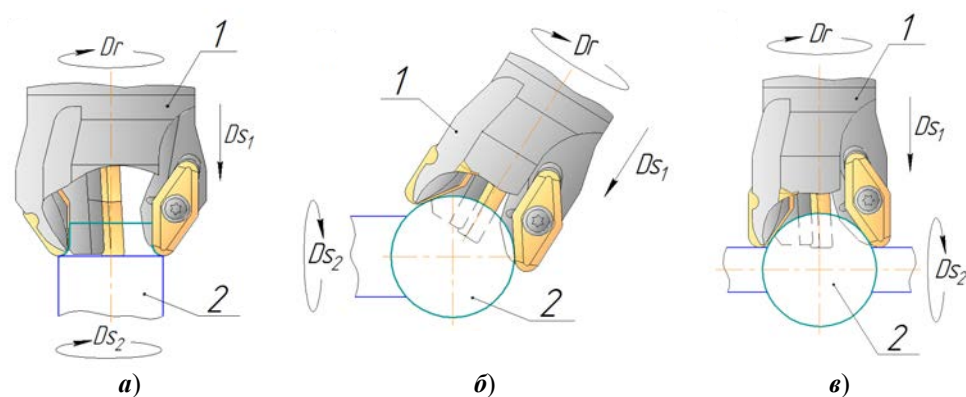


Рис. 1. Схемы обработки охватывающими фрезами (зенкерами) поверхностей:
а – цилиндрической или конической; б, в – неполной сферической

При обработке неполных сферических поверхностей деталей (рис. 1,б,в) реализуются схемы плунжерного фрезерования, при которых одно из движений подачи D_{s2} направлено под углом или перпендикулярно к оси главного

вращательного движения D_r . Результирующая скорость резания равна скорости касательного движения. За счет высокой скорости вращательного движения D_r (порядка 10–20 м/с) обеспечивается как режим резания, так и режим выглаживания сферической поверхности с параметрами шероховатости, сопоставимыми со шлифованными поверхностями. Выглаживание поверхности обеспечивается уменьшением значений углов в плане и заднего угла, которые могут принимать нулевые значения, за счет существенного увеличения скорости касательного движения.

При обработке плоских поверхностей деталей, например уступов, полостей и т.п. (рис. 2, *а, б*), реализуется схема резания с главным вращательным движением D_r и двумя поступательными движениями подачи D_{S1} и D_{S2} , что обеспечивает врезание фрезы по касательной с результирующей скоростью резания, равной скорости касательного движения.

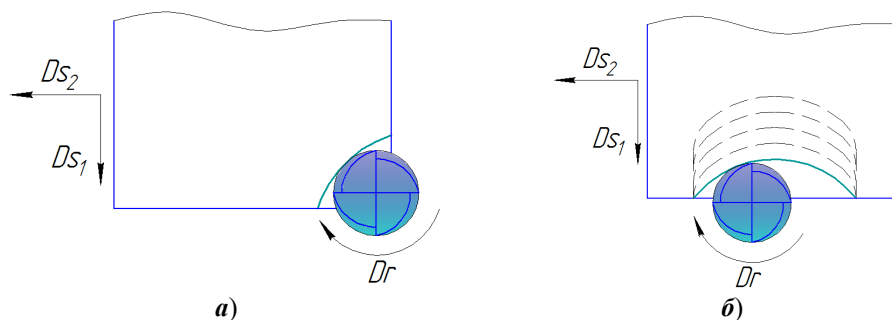


Рис. 2. Схемы обработки с врезанием фрезы по дуге:
а – уступа; *б* – полукруглой полости

Реализация трехэлементных кинематических схем с обработкой поверхностей по касательной, отличающихся или двумя поступательными движениями подачи D_{S1} и D_{S2} (рис. 3, *а*), или одним поступательным D_{S1} и одним вращательным D_{S2} (рис. 3, *б*) движениями подачи, представлена на рис. 3. При этом формируются как плоская, так и цилиндрическая поверхности детали высокого качества.

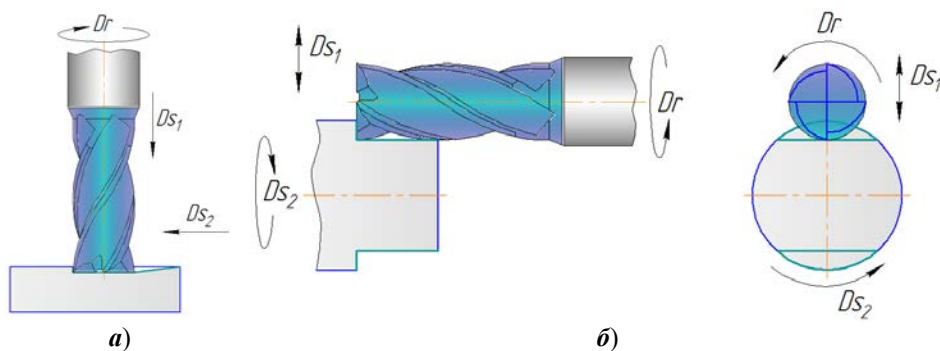


Рис. 3. Схемы обработки с врезанием фрезы по касательной: *а* – плоской поверхности детали; *б* – плоской и цилиндрической поверхностей детали

Каждая из рассмотренных схем обработки может быть представлена трехэлементными кинематическими схемами резания (рис. 4).

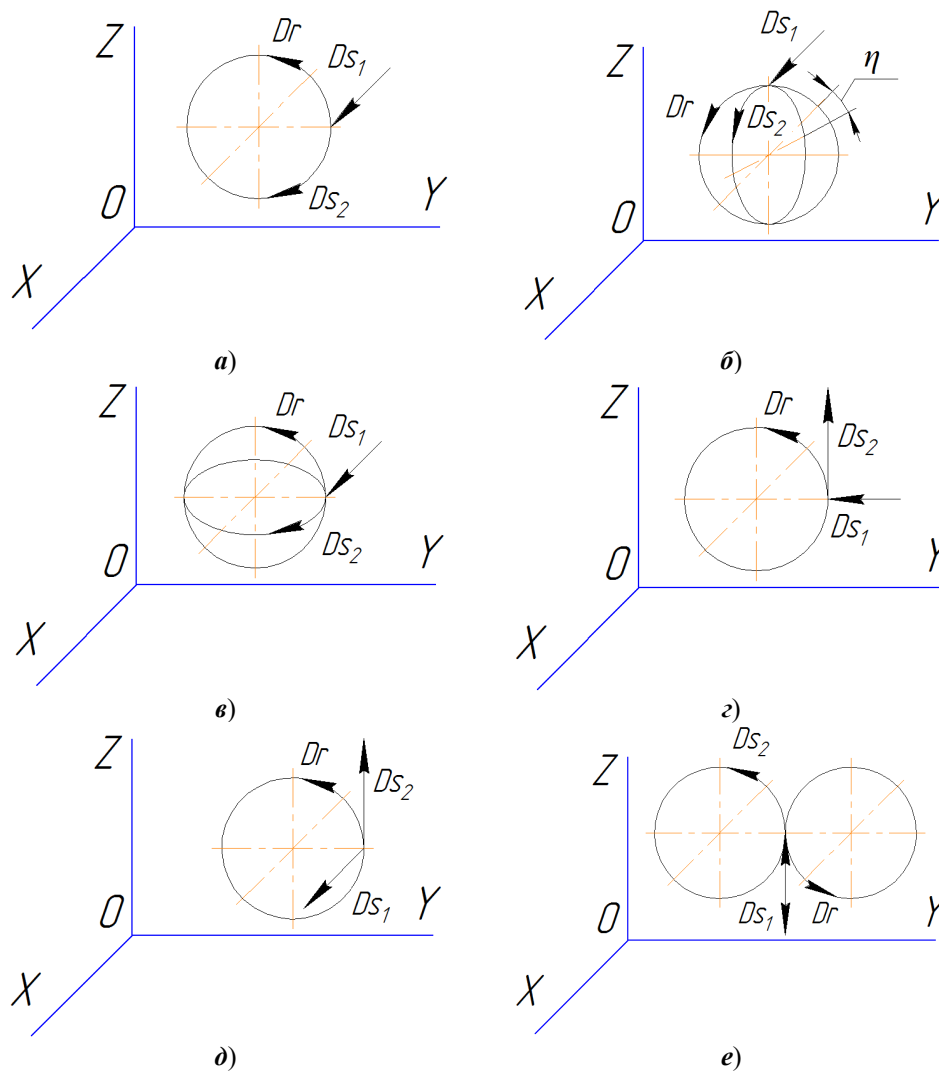


Рис. 4. Кинематические схемы резания: **а** – обработка охватывающими фрезами (зенкерами) цилиндрической или конической поверхности; **б, в** – обработка охватывающими фрезами (зенкерами) неполной сферической поверхности; **г** – обработка с врезанием фрезы по дуге уступа или полузакрытой полости; **д** – обработка с врезанием фрезы по касательной плоской поверхности детали; **е** – обработка с врезанием фрезы по касательной плоской и цилиндрической поверхностями детали

В отличие от кинематических схем профессора Г. И. Грановского и обобщенной кинематической схемы пятиэлементных движений резания [2], в представленных кинематических схемах на рис. 4, **а–в** уточнен тип режущего инструмента, который является охватывающим, и, соответственно, траектория вращательного движения подачи изображена внутри траектории главного вращательного движения в виде окружностей (рис. 4, **а**), а в случае расположения оси главного вращательного движения под углом (рис. 4, **б**) или перпендикулярно (рис. 4, **в**) направлению вращательного движения подачи – в виде эллипса. Данные схемы позволяют определить направление векторов

скоростей составляющих движений и результирующего движения резания, при необходимости производить расчет их значений, а также представить траекторию перемещений инструмента и заготовки, что важно при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

Как известно [5], при получении поверхностей деталей на станках с ЧПУ производится интерполяция траекторий резания прямолинейными перемещениями по осям X и Y (рис. 5).

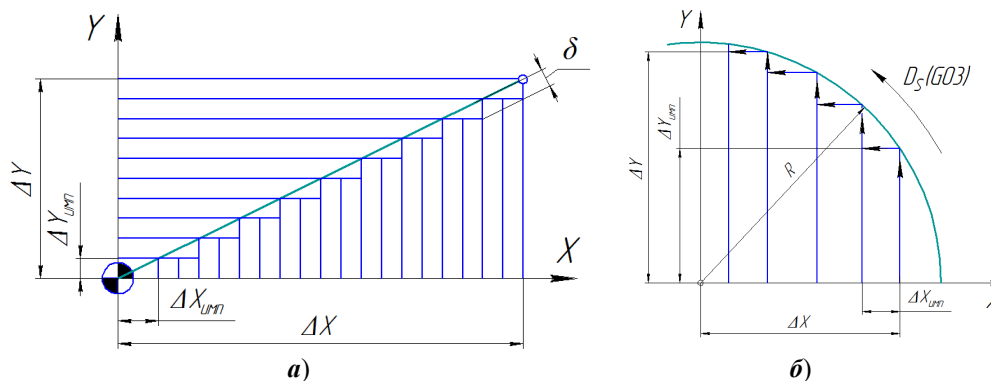


Рис. 5. Варианты реализации линейной (а) и круговой (б) интерполяции на станках с ЧПУ

Перемещение инструмента по заданной траектории резания осуществляется приближенно, путем включения подачи попеременно – то вдоль одной, то вдоль другой оси. При этом интерполятор системы управления непрерывно оценивает отклонения от заданной траектории и стремится свести эти отклонения к минимуму. Значения отклонений равны или кратны цене одного управляющего импульса ($\Delta X_{\text{имп}}$, $\Delta Y_{\text{имп}}$), формируемого датчиком обратной связи. Например, прямая наклонная линия может формироваться попеременной подачей на приводы импульсов в такой последовательности: один импульс по оси Y и два импульса по оси X (рис. 5,а). Поскольку в современных станках наиболее часто цена импульса принимается равной 0,001 мм, то перемещение между двумя соседними опорными точками практически можно рассматривать как плавное. Интерполяция может быть также круговой (рис. 5,б), с помощью полиномов второй и высших степеней и др. Круговая интерполяция также предусматривает попеременное включение приводов, но при этом величина перемещений по осям не является равномерной по величине. При круговой интерполяции начало системы координат совмещается с центром окружности радиуса R . Интерполятор направляет импульсы $\Delta X_{\text{имп}}$ и $\Delta Y_{\text{имп}}$ в привод подачи то по оси X , то по оси Y . Помимо расчета количества импульсов для подачи в систему приводов той или иной оси, интерполятор обеспечивает и выдачу этого количества для управления. Современные станки с ЧПУ, как правило, имеют линейно-круговые интерполяторы.

При шаге перемещений 0,01–0,02 мм и при большом количестве кадров дискретность отсчета перемещений рабочего органа может составлять 0,07 нм, или 7×10^{-8} мм. Максимальную подачу, которую способна обеспечить конкретная система ЧПУ, можно определить по формуле

$$F_{\max} = \frac{\text{длина перемещения в кадре}}{\text{время обработки кадра}} \times 60.$$

Следовательно, при перемещениях 0,01 мм и времени обработки кадра 2 мс максимальная подача ограничена значением 0,3 м/мин. При этом система ЧПУ должна иметь возможность просматривать данные как минимум на 100–200 блоков в минуту вперед для обеспечения непрерывного движения инструмента.

Если принять значения результирующей скорости резания равной 100 м/мин и угол наклона режущей кромки фрезы равным 45°, то значение линейной скорости касательного движения будет равно 70 м/мин. Так как линейная скорость касательного движения в несколько сот раз больше скорости подачи в кадре, то подачей в кадре с точки зрения формирования криволинейной поверхности детали можно пренебречь. Также можно пренебречь влиянием величины прямолинейных перемещений в кадре или шагом интерполяции 0,01–0,02 мм. Так как, например, при подаче фрезы равной 0,1 мм/об и угле в плане режущего инструмента равном 90° толщина срезаемого слоя будет равна 0,1 мм. То есть толщина срезаемого слоя в десятки раз больше шага интерполяции и выполняется еще одно условие выбора значения подачи, при котором оно должно изменяться обратно пропорционально объему удаляемого материала для сохранения постоянной нагрузки на инструмент. При рекомендованном [5] соблюдении соотношения глубины резания (ширины срезаемого слоя) и подачи (толщины срезаемого слоя) не более 0,2 и высокой скорости резания (порядка 600 м/мин) обеспечивается получение поверхности с шероховатостью по параметру Ra 1,6–3,2 мкм сопоставимому со шлифованными поверхностями.

Рассмотрим частный случай обработки плоской поверхности (рис. 6,а,б) на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45, при котором линейная интерполяция (рис. 6,2) осуществляется путем совмещения прямолинейного перемещения инструмента вдоль оси X и кругового движения (подворота) детали относительно своего геометрического центра (рис. 6,в,2). Инструмент 2 (рис. 6,а,б) снимает припуск по ширине a_e и глубине резания a_p «послойно» до получения номинальной плоской поверхности длиной $l_{\text{л}}$. Количество необходимых проходов выбирается с учетом диаметра режущего инструмента и задается системе ЧПУ, которая затем рассчитывает и реализует обработку плоской поверхности на станке с промежуточными значениями ширины резания a_{ei} и длины плоской поверхности $l_{\text{ли}}$.

Круговое движение детали в процессе резания имеет равный шаг подворота (равный угол подворота), в отличие от прямолинейного перемещения инструмента, при котором по мере приближения инструмента к геометрическому центру детали (середине обрабатываемой плоской поверхности) величины его проходов изменяются. Эти разные величины проходов можно определить по теореме синусов.

При врезании инструмента (рис. 7) обрабатываемая поверхность расположена под углом α_1 к оси Y . Соединив концы проекции обрабатываемой поверхности параллельными линиями вдоль геометрических осей детали, получим прямоугольный треугольник с катетами ΔX_1 и ΔY_1 и гипотенузой $l_{\text{л1}}$, в котором длина катета $\Delta X_1 = l_{\text{л1}} \cdot \sin \alpha_1$. При дальнейшем перемещении ин-

струмента вдоль оси X обрабатываемая поверхность подвернется на некоторый угол и достигнет значения угла α_2 к оси Y , где $\alpha_2 < \alpha_1$. Также соединив концы проекции обрабатываемой поверхности параллельными линиями вдоль геометрических осей детали, получим другой прямоугольный треугольник с катетами ΔX_2 и ΔY_2 и гипотенузой l_{n2} , в котором длина катета $\Delta X_2 = l_{n2} \cdot \sin \alpha_2$. Так как в процессе резания получаем плоскую поверхность, которая на различных углах подворота детали будет одинаковой, то можно утверждать, что $l_{n1} = l_{n2} = l_{n3}$. Следовательно через синус угла можно найти катеты прямоугольных треугольников ΔX_1 и ΔX_2 . Отсюда получаем, что $\Delta X_2 = l_{n2} \cdot \sin \alpha_2 < \Delta X_1 = l_{n1} \cdot \sin \alpha_1$.

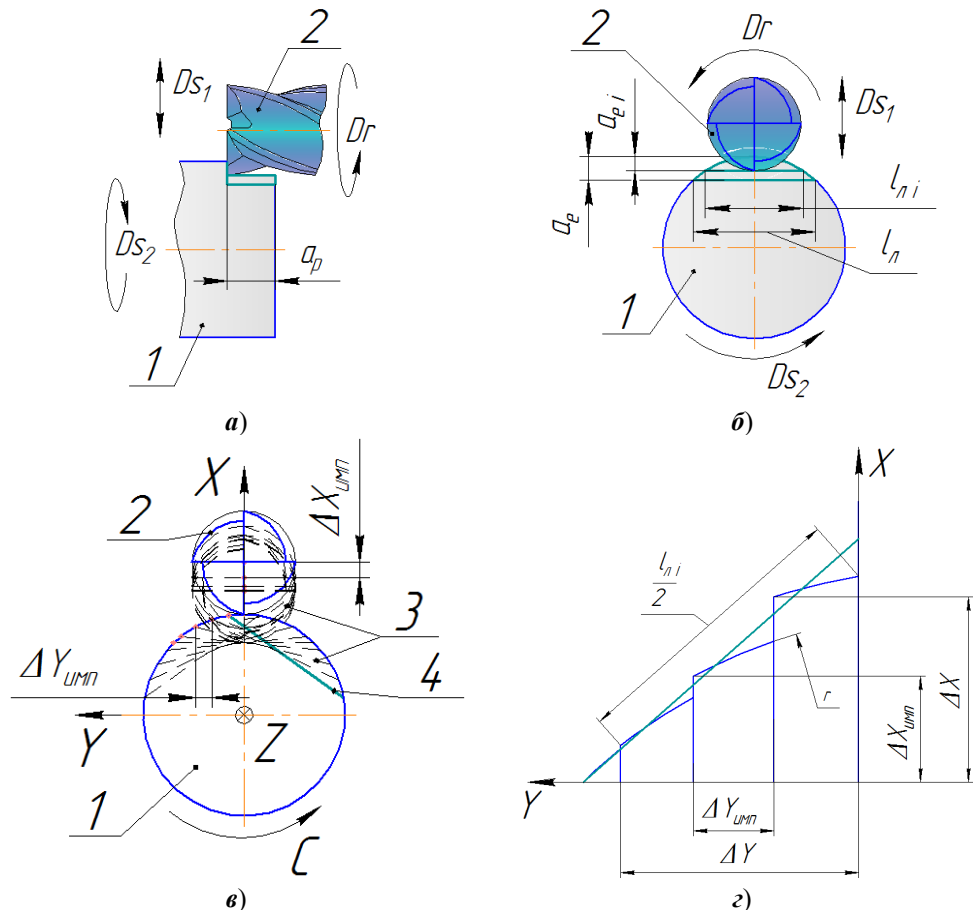


Рис. 6. Схемы обработки (а, б) и формирования плоской поверхности (в) с реализацией линейной интерполяции (з) на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45: 1 – деталь; 2 – инструмент; 3 – промежуточные положения детали и инструмента; 4 – номинальная плоская поверхность

Следует отметить, что при каждом последующем подвороте детали угол наклона обрабатываемой поверхности $\alpha \rightarrow 0$, а значит, каждое последующее перемещение инструмента $\Delta X \rightarrow 0$ до того момента, пока угол наклона обрабатываемой поверхности не начнет увеличиваться, а следовательно, начнет увеличиваться и прямолинейное перемещение инструмента.

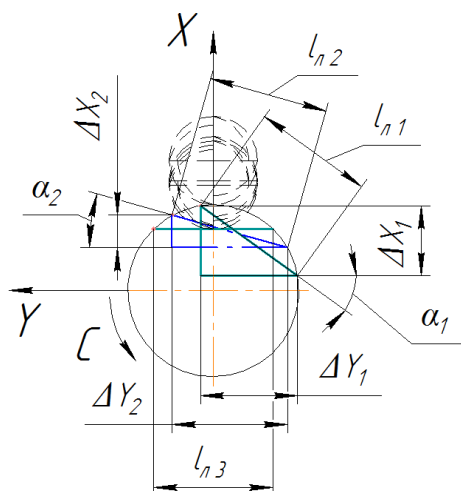


Рис. 7. Схема для расчета обработки плоской поверхности на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45

Расчетно-технологическая карта обработки плоской поверхности детали (см. рис. 6,*а*) иллюстрируется рис. 8.

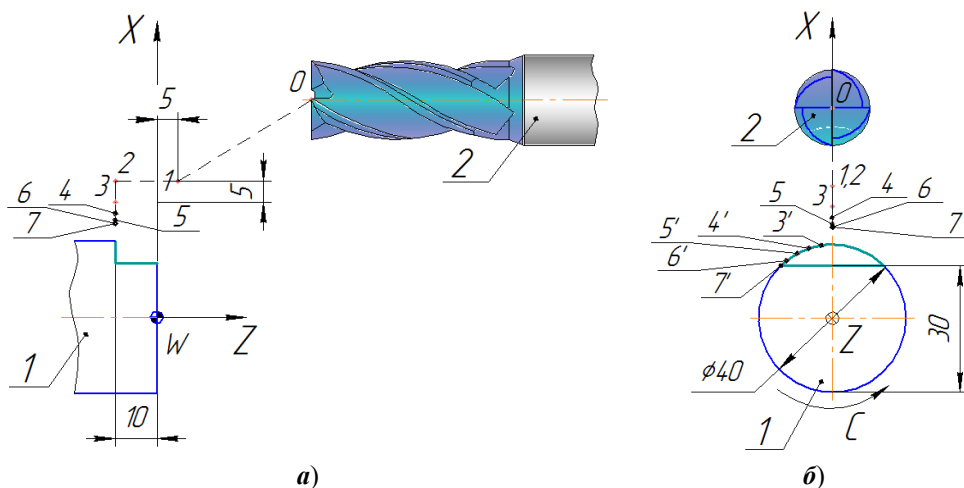


Рис. 8. Расчетно-технологическая карта обработки плоской поверхности детали:
a – главный вид; *б* – вид сбоку; 1 – деталь; 2 – инструмент

Приняты следующие условия реализации технологии:

- Станок токарный с ЧПУ модели EMCO S45;
- Материал заготовки: сталь 40Х ГОСТ 4543;
- Режущий инструмент: концевая фреза Guhring #19978 12 WNR-N (Ø 12 мм);
- Материал инструмента: твердый сплав VHM;
- Число зубьев: 4;
- Угол наклона лезвия фрезы, λ° : 30°;
- Режимы резания:
 - скорость резания, v – 160 м/мин;
 - ширина резания, a_{ei} – 0,5 мм;

- глубина резания, a_p – 10 мм;
- подача, f_z – 0,05 мм/зуб.

При обработке плоской поверхности детали (см. рис. 8) перемещение инструмента 2 осуществляется с точки «0» на ускоренном ходу в точку «1» одновременно по двум координатным осям X и Z . После этого происходит «поворот» детали 1 по направлению оси C (вокруг оси Z) до точки начала формирования плоской поверхности и затем инструмент 2 на рабочем ходу достигает точки «2» – устанавливается на заданную глубину резания a_p . Далее происходит одновременное синхронное движение детали 1 и инструмента 2 на рабочем ходу, где деталь и инструмент занимают промежуточные положения, характеризуемые точками «3'–7'» и «3–7» соответственно, в результате формируется плоская поверхность детали. После этого инструмент 2 на ускоренном ходу вначале выходит в точку «1» параллельно оси Z , а затем одновременно по двум осям X и Z занимает исходную точку «0».

Заключение

Анализ схем обработки различных поверхностей деталей с касательным движением режущих инструментов позволяет выбрать рациональную кинематическую схему резания, обеспечивающую повышение производительности и качество формирования номинальной поверхности детали.

Рассмотрены частные случаи обработки поверхностей деталей на станках с ЧПУ с дискретным перемещением режущего инструмента и детали, особенностью которых является формирование плоской поверхности детали путем совмещения прямолинейного перемещения инструмента вдоль одной оси и кругового движения (поворота) детали относительно другой оси, что обеспечивает получение реальных поверхностей детали в пределах заданных параметров точности и шероховатости.

Предложена расчетно-технологическая карта формирования плоской поверхности детали на токарном станке с ЧПУ модели EMCO S45 с рекомендованными условиями реализации данной технологии, позволяющие повысить качество получаемой номинальной поверхности по параметру R_a в пределах 1,6–3,2 мкм.

Список литературы

1. Русецкий А. М., Витязь П. А., Хейфец М. Л. [и др.]. Конструирование и оснащение технологических комплексов : монография / под общ. ред. А. М. Русецкого. Минск : Беларуская наука, 2014. 315 с.
2. Попок Н. Н. Методология исследования процесса резания материалов в современных условиях развития машиностроения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2019. № 3. С. 21–30.
3. Попок Н. Н., Анисимов В. С. Кинематика обработки поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом с касательным движением режущей кромки // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2019. № 11. С. 31–38.
4. Попок Н. Н., Анисимов В. С. Деформация и стружкообразование при обработке плоских и криволинейных поверхностей деталей вращающимся режущим инструментом на токарных и фрезерных станках с ЧПУ // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2020. № 3. С. 28–34.

5. Звонцов И. Ф., Иванов К. М., Серебrenицкий П. П. Разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2017. 588 с.

References

1. Rusetskiy A.M., Vityaz' P.A., Kheyfets M.L. et al. *Konstruirovaniye i osnashcheniye tekhnologicheskikh kompleksov: monografiya* = *Design and equipment of technological complexes: monograph*. Ed. by A.M. Rusetskiy. Minsk: Belarusskaya nauka, 2014:315. (In Russ.)
2. Popok N.N. Methodology for studying the process of cutting materials in modern conditions of mechanical engineering development. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* = *Bulletin of Polotsk State University. Series 5. Industry. Applied sciences*. 2019;(3):21–30. (In Russ.)
3. Popok N.N., Anisimov V.S. Kinematics of machining the surfaces of parts using a rotating cutting tool with tangential movement of the cutting edge. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* = *Bulletin of Polotsk State University. Series 5. Industry. Applied sciences*. 2019;(11):31–38. (In Russ.)
4. Popok N.N., Anisimov V.S. Deformation and chip formation when processing flat and curved surfaces of parts with a rotating cutting tool on CNC lathes and milling machines. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* = *Bulletin of Polotsk State University. Series 5. Industry. Applied sciences*. 2020;(3):28–34. (In Russ.)
5. Zvontsov I.F., Ivanov K.M., Serebrenitskiy P.P. *Razrabotka upravlyayushchikh programm dlya oborudovaniya s ChPU: ucheb. posobie* = *Development of control programs for CNC equipment: textbook*. Saint Petersburg: Lan', 2017:588. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Николаевич Попок

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии
и оборудования машиностроительного
производства, Полоцкий
государственный университет имени
Евфросинии Полоцкой (Республика
Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29)

E-mail: n.popok@psu.by

Nikolay N. Popok

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of technology
and equipment of machine-building
production, Euphrosyne Polotskaya
State University of Polotsk (29 Blokhina
street, Novopolotsk, Republic of Belarus)

Виталий Сергеевич Анисимов

инженер-исследователь, заведующий
лабораториями кафедры технологии
и оборудования машиностроительного
производства, Полоцкий
государственный университет имени
Евфросинии Полоцкой (Республика
Беларусь, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29)

E-mail: v.anisimov@psu.by

Vitaliy S. Anisimov

Research engineer, head of the laboratories
of the sub-department of technology
and equipment of machine-building
production, Euphrosyne Polotskaya
State University of Polotsk (29 Blokhina
street, Novopolotsk, Republic of Belarus)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.06.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 17.08.2023

Принята к публикации / Accepted 02.10.2023

УДК 67.05

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-12

Особенности переноса угловых погрешностей привода стола зубофрезерного станка на профиль зуба обрабатываемого колеса

В. В. Бушуев¹, В. А. Еремянц², В. В. Молодцов³, В. А. Новиков⁴

^{1,2,3,4}Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН», Москва, Россия

¹busheck@yandex.ru, ²vladimir_eremyanc@mail.ru,

³v_molodtsov@mail.ru, ⁴9bobah@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные зубофрезерные станки проектируются на базе мехатронных приводов, что порождает вопросы о влиянии погрешностей, возникающих в структуре прямых приводов главного движения, на процесс формирования эвольвентного профиля зуба. *Материалы и методы.* В теоретическом исследовании рассмотрена методика построения математической модели, описывающей перенос угловой погрешности, возникающей в процессе работы привода заготовки вертикального зубофрезерного станка, на эвольвентный профиль зуба. *Результаты.* Возникновение изломов на эвольвентном профиле зуба, воспринимаемых как огранка, связано не только с прерывистым характером процесса резания червячными фрезами, но и с угловыми колебаниями, неизбежно сопровождающими процесс работы прямого привода заготовки зубофрезерного станка. Величина погрешности профиля, возникающей в результате наличия погрешности углового положения, определяется амплитудами и частотами синусоидальных составляющих угловых колебаний. *Выводы.* Получена математическая модель, описывающая механизм формирования профиля зуба прямозубого зубчатого колеса с учетом влияния только угловой погрешности привода стола, безотносительно иных погрешностей, неизбежно возникающих в процессе обработки зубчатого колеса. Вклад данной погрешности в общий процесс формирования профиля зуба при обработке на станке требует дальнейшего изучения.

Ключевые слова: зубчатое колесо, угловая погрешность, цепь обката, подрезание, погрешность профиля, особая точка

Для цитирования: Бушуев В. В., Еремянц В. А., Молодцов В. В., Новиков В. А. Особенности переноса угловых погрешностей привода стола зубофрезерного станка на профиль зуба обрабатываемого колеса // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 126–135. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-12

Features of transferring the angular errors of the gear hobbing machine's table drive to the tooth profile of the machined wheel

V.V. Bushuev¹, V.A. Eremyants², V.V. Molodtsov³, V.A. Novikov⁴

^{1,2,3,4}Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

¹busheck@yandex.ru, ²vladimir_eremyanc@mail.ru,

³v_molodtsov@mail.ru, ⁴9bobah@gmail.com

Abstract. *Background.* Modern gear hobbing machines design is based on mechatronic drives, which prompts questions about the influence of errors that occur in the main motion direct drives structure on the process of involute tooth profile forming. *Materials and methods.* Theoretical research has considered a methodology for constructing a mathematical model that describes the transfer of angular errors that occur during the operation of the vertical hobbing machine's workpiece drive to the involute tooth profile. *Results.* The occurrence of notches on the involute tooth profile, perceived as roughness, is associated not only with the intermittent nature of the hobbing process but also with angular oscillations inevitably accompanying the operation of the vertical hobbing machine's workpiece drive. The magnitude of the profile error resulting from angular position errors is determined by the amplitudes and frequencies of the sinusoidal components of the angular oscillations. *Conclusions.* A mathematical model has been developed that describes the mechanism of forming the tooth profile of a spur gear, taking into account only the influence of angular errors in the table drive, without considering other errors that inevitably occur during the gear machining process. The contribution of this error to the overall process of forming the tooth profile during machining on a machine tool requires further study.

Keywords: gear wheel, angular error, generating train, undercutting, profile deviation, special point

For citation: Bushuev V.V., Eremyants V.A., Molodtsov V.V., Novikov V.A. Features of transferring the angular errors of the gear hobbing machine's table drive to the tooth profile of the machined wheel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):126–135. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-12

Введение

Угловые погрешности, возникающие в приводах цепи обката зубофрезерного станка под воздействием процесса резания и трения в элементах их конструкции, влияют в первую очередь на показатели плавности работы зубчатого зацепления, так как проявляются несколько раз за период работы каждого зуба [1–6]. На качество боковой поверхности оказывает влияние целый комплекс погрешностей технологического оборудования, инструмента и оснастки. При этом вклад составляющих, связанных с технологической оснасткой и инструментом, достаточно хорошо изучен [7]. Также известно описание взаимосвязей погрешностей эвольвентного профиля зуба с кинематическими погрешностями, возникающими в делительной цепи зубофрезерного станка с механическими кинематическими связями, в совокупности с прерывистым характером процесса резания [5]. В частности, приведена взаимосвязь между кинематической погрешностью профиля зуба и числом зубьев червячного колеса делительной цепи станка.

Изменение кинематической структуры станка и применение прямых приводов в цепях приводов главного движения современных зубофрезерных станков привело к исключению механической связи между заготовкой и инструментом. Что, в свою очередь, говорит о необходимости рассмотрения процесса переноса кинематической погрешности цепи обката зубофрезерного станка с мехатронными приводами на погрешности профиля зуба.

Особенностью привода с встраиваемым двигателем является обязательное условие наличия углового энкодера в его структуре. В связи с этим предлагается оценивать составляющую, вносимую в общую погрешность колеса угловыми погрешностями приводов цепи обката, косвенным методом, по результатам ее измерения на выходном звене привода.

Для решения этой задачи необходимо разработать математические модели, описывающие перенос угловых погрешностей приводов цепи обката на профиль зуба как по отдельности, так и в совокупности. В статье [3] авторами приведена математическая модель, описывающая процесс формирования профиля при наличии угловой погрешности только в приводе инструмента. В настоящем труде сформирована методика построения и возможности такой модели при наличии погрешности в приводе стола.

1. Анализ плоского эвольвентного зацепления

Для описания плоского зацепления построена расчетная схема (рис.1,*а*). Две системы координат подвижные – связаны с нарезаемым колесом ($y_2O_2x_2$) и инструментальной рейкой ($y_1O_1x_1$), и одна система координат – неподвижная (yOx), связана со станком [6]. Поскольку окружная скорость постоянная при обработке и в случае отсутствия погрешностей полюс зацепления не перемещается, то начало неподвижной системы координат удобно совместить с полюсом зацепления, точкой O .

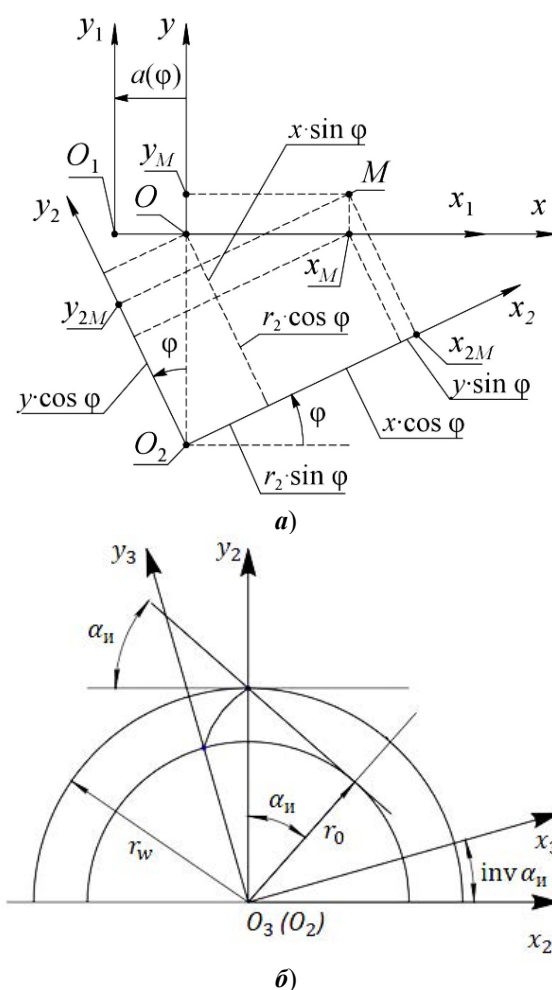


Рис. 1. Системы координат плоского зацепления инструментальной рейки и нарезаемого колеса: *а* – жестко связанные со станком, инструментом и заготовкой системы; *б* – вспомогательная система $O_3x_3y_3$

Ось O_1x_1 подвижной системы координат совпадает с делительной прямой рейки, а начало координат лежит в точке O_1 на режущей кромке. Точка O_2 находится в центре вращения нарезаемого колеса. В неподвижной системе координат перемещению рейки $a(\varphi)$ соответствует поворот нарезаемого колеса (угол развернутости φ).

Связь между системами координат инструментальной рейки $O_1x_1y_1$ и обрабатываемого колеса $O_2x_2y_2$ имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x_1(\varphi) &= x_2(\varphi) \cos(\varphi + \delta(\varphi)) - y_2(\varphi) \sin(\varphi + \delta(\varphi)) + r_w \varphi, \\ y_1(\varphi) &= x_2(\varphi) \sin(\varphi + \delta(\varphi)) + y_2(\varphi) \cos(\varphi + \delta(\varphi)) - r_w, \end{aligned} \right\} \quad (1, a)$$

$$\left. \begin{aligned} x_2(\varphi) &= x_1(\varphi) \cos(\varphi + \delta(\varphi)) + y_1(\varphi) \sin(\varphi + \delta(\varphi)) + \\ &+ r_w [\sin(\varphi + \delta(\varphi)) - \varphi \cos(\varphi + \delta(\varphi))], \\ y_2(\varphi) &= -x_1(\varphi) \sin(\varphi + \delta(\varphi)) + y_1(\varphi) \cos(\varphi + \delta(\varphi)) + \\ &+ r_w [\cos(\varphi + \delta(\varphi)) + \varphi \sin(\varphi + \delta(\varphi))], \end{aligned} \right\} \quad (1, b)$$

где $\delta(\varphi)$ – погрешность угла поворота стола; r_w – радиус делительной окружности нарезаемого колеса.

Для составления уравнения контактной точки на профиле зуба колеса воспользовались методом, предложенным Х. И. Гохманом [6]. Запишем уравнения перемещений зубьев инструментальной рейки в параметрической форме, когда заданным профилем является грань зуба инструментальной рейки:

$$\left. \begin{aligned} x_1(\varphi) &= u(\varphi) \sin \alpha_u, \\ y_1(\varphi) &= u(\varphi) \cos \alpha_u, \\ \frac{\partial x_1(\varphi)}{\partial \varphi} \cos \alpha_u - \frac{\partial y_1(\varphi)}{\partial \varphi} \sin \alpha_u &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $u(\varphi)$ – параметр, определяющий положение точки контакта на профиле зубьев инструментальной рейки; α_u – угол профиля зубьев рейки.

Продифференцировав по φ первое и второе уравнения системы (1), получим

$$\frac{\partial x_1(\varphi)}{\partial \varphi} = -(1 + \delta'(\varphi)) y_1(\varphi) - \delta'(\varphi) r_w \quad \text{и} \quad \frac{\partial y_1(\varphi)}{\partial \varphi} = (1 + \delta'(\varphi)) (x_1(\varphi) - r_w \varphi).$$

Подставив их в третье уравнение системы (2), выразим зависимость параметра от φ :

$$u(\varphi) = r_w \varphi \sin \alpha_u - \frac{\delta'(\varphi)}{1 + \delta'(\varphi)} r_w \cos \alpha_u.$$

И, наконец, подставив ее в первое и второе уравнения системы (2), получим выражение, определяющее положение точки контакта рейки и нарезаемого колеса в системе координат $O_1x_1y_1$:

$$\left. \begin{aligned} x_1(\varphi) &= r_w \left[\varphi \sin^2 \alpha_u - \frac{\delta'(\varphi)}{1 + \delta'(\varphi)} \sin \alpha_u \cos \alpha_u \right], \\ y_1(\varphi) &= r_w \left[\varphi \sin \alpha_u \cos \alpha_u - \frac{\delta'(\varphi)}{1 + \delta'(\varphi)} \cos^2 \alpha_u \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3,a)$$

Подставляя выражение (3,a) в (1,б), получим выражение для определения координат контактных точек рейки и колеса в системе $O_2x_2y_2$:

$$\left. \begin{aligned} x_2(\varphi) &= r_w \sin(\varphi + \delta(\varphi)) - r_w \varphi \cos \alpha_u \cos(\varphi + \delta(\varphi) + \alpha_u) - \\ &\quad - \frac{\delta'(\varphi)}{1 + \delta'(\varphi)} r_w \cos \alpha_u \sin(\varphi + \delta(\varphi) + \alpha_u), \\ y_2(\varphi) &= r_w \cos(\varphi + \delta(\varphi)) + r_w \varphi \cos \alpha_u \sin(\varphi + \delta(\varphi) + \alpha_u) - \\ &\quad - \frac{\delta'(\varphi)}{1 + \delta'(\varphi)} r_w \cos \alpha_u \cos(\varphi + \delta(\varphi) + \alpha_u). \end{aligned} \right\} \quad (3,b)$$

Так как радиус основной окружности определяется через радиус делительной окружности $r_0 = r_w \cos \alpha_u$ и $\varphi = \varphi_0 - \operatorname{tg} \alpha_u$ [6], а $\varphi_0 \geq 0$ – угол развернутости, измеренный от основной окружности, $\operatorname{tg} \alpha_u - \alpha_u = \operatorname{inv} \alpha_u$ – инволюта угла профиля инструментальной рейки, и для функции погрешности поворота стола справедливы выражения $\delta(\varphi) = \delta(\varphi_0 - \operatorname{tg} \alpha_u) = \delta_0(\varphi_0)$ и $\delta'(\varphi) = \delta'(\varphi_0 - \operatorname{tg} \alpha_u) = \delta'_0(\varphi_0)$, получим выражения, определяющие положение точки контакта инструментальной рейки и нарезаемого колеса в системе координат $O_2x_2y_2$:

$$\left. \begin{aligned} x_2(\varphi_0) &= r_0 \left[\sin(\varphi_0 - \operatorname{inv} \alpha_u + \delta_0(\varphi_0)) - \varphi_0 \cos(\varphi_0 - \operatorname{inv} \alpha_u + \delta_0(\varphi_0)) \right] - \\ &\quad - r_0 \frac{\delta'_0(\varphi_0)}{1 + \delta'_0(\varphi_0)} \sin(\varphi_0 - \operatorname{inv} \alpha_u + \delta_0(\varphi_0)), \\ y_2(\varphi_0) &= r_0 \left[\cos(\varphi_0 - \operatorname{inv} \alpha_u + \delta_0(\varphi_0)) + \varphi_0 \sin(\varphi_0 - \operatorname{inv} \alpha_u + \delta_0(\varphi_0)) \right] - \\ &\quad - r_0 \frac{\delta'_0(\varphi_0)}{1 + \delta'_0(\varphi_0)} \cos(\varphi_0 - \operatorname{inv} \alpha_u + \delta_0(\varphi_0)). \end{aligned} \right\} \quad (3,e)$$

Здесь $\delta_0(\varphi_0)$ и $\delta'_0(\varphi_0)$ – функция погрешности поворота стола от угла развернутости и ее производная.

Для приведения зависимостей профиля зацепления от угла поворота колеса к каноническому виду введем вспомогательную систему координат $O_3x_3y_3$ (рис. 1,б), повернутую против часовой стрелки относительно $O_2x_2y_2$ на постоянный угол $\operatorname{inv} \alpha_u = \operatorname{tg} \alpha_u - \alpha_u$. Точка начала отсчета эвольвенты совпадает с координатами $(0, r_0)$. Выражение для определения положения контактной точки на эвольвентном профиле в системе $O_3x_3y_3$ имеет вид

$$\left. \begin{aligned} x_3(\varphi_0) &= x_2(\varphi_0) \cos(\text{inv}\alpha_u) + y_2(\varphi_0) \sin(\text{inv}\alpha_u), \\ y_3(\varphi_0) &= -x_2(\varphi_0) \sin(\text{inv}\alpha_u) + y_2(\varphi_0) \cos(\text{inv}\alpha_u). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Угол поворота заготовки нарезаемого колеса φ_0 в данной системе координат откладывается от основной окружности r_0 и $\varphi_0 = \varphi + \text{tg}\alpha_u$.

Подставив выражения (3,6) в (4), после алгебраических преобразований получим зависимости, определяющие координаты точек контакта инструментальной рейки и нарезаемого колеса в каноническом виде

$$\left. \begin{aligned} x_3(\varphi_0) &= r_0 \left[\frac{1}{1 + \delta'_0(\varphi_0)} \sin(\varphi_0 + \delta_0(\varphi_0)) - \varphi_0 \cos(\varphi_0 + \delta_0(\varphi_0)) \right], \\ y_3(\varphi_0) &= r_0 \left[\frac{1}{1 + \delta'_0(\varphi_0)} \cos(\varphi_0 + \delta_0(\varphi_0)) + \varphi_0 \sin(\varphi_0 + \delta_0(\varphi_0)) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Искажение эвольвентного профиля в зависимостях (5) определяется видом и величиной вносимой погрешности. С целью понимания характера искажения профиля необходимо оценить влияние параметров погрешности на изменения кривизны. Для этого найдем функцию радиуса кривизны искаженного профиля.

Выражение для определения радиуса кривизны профиля нарезаемого зуба $\rho_k(\varphi_0)$, заданного в параметрической форме (5), в произвольной точке, используя зависимость для функции кривизны [6], получим

$$\kappa(\varphi_0) = \frac{1}{\rho_k(\varphi_0)} = \pm \frac{x'_3(\varphi_0)y''_3(\varphi_0) - x''_3(\varphi_0)y'_3(\varphi_0)}{\left[(x'_3(\varphi_0))^2 + (y'_3(\varphi_0))^2 \right]^{3/2}}. \quad (6)$$

Знак кривизны определяет направление вогнутости функции на рассматриваемом участке. Будем считать положительной кривизну рабочего профиля зуба обрабатываемого колеса.

Выполнив алгебраические преобразования (для выражений (5), (6)), получим зависимость для нахождения радиуса кривизны $\rho_k(\varphi_0)$ профиля зуба:

$$\rho_k(\varphi_0) = r_0 \left[\varphi_0 - \frac{\delta''_0(\varphi_0)}{(1 + \delta'_0(\varphi_0))^3} \right]. \quad (7)$$

Для случая, когда $\delta_0(\varphi_0) = 0$ при любых допустимых значениях φ_0 , выражение (7) приобретает вид $\rho_k(\varphi_0) = r_0\varphi_0$, соответствующий радиусу кривизны идеальной эвольвенты [6, 7].

2. Моделирование переноса угловых погрешностей привода заготовки на эвольвентный профиль зуба

Кинематические погрешности в приводах цепи обката зуборезных станков принято аппроксимировать тригонометрическим рядом вида

$\sum_{k=1}^n \Delta_k \sin(k\varphi_0 + \beta_k)$ [7]. Для случая, когда вся погрешность определяется одной k -й синусоидальной гармоникой ($1 < k \leq n$), функция погрешности приобретает вид

$$\delta_0(\varphi_0) = \Delta_k \sin(k\varphi_0 + \beta_k), \quad (8)$$

где Δ_k – амплитуда k -й гармоники; β_k – начальная фаза k -й гармоники.

При определенных сочетаниях φ_0 , k и Δ_k радиус кривизны может принимать нулевые и даже отрицательные значения, так как точки образуемого профиля зуба могут касаться профиля режущей кромки червячной фрезы с обеих сторон. Однако в действительности участков на эвольвентном профиле с отрицательным значением кривизны ($\rho_k(\varphi_0) < 0$) существовать не может, они располагаются только с одной стороны и срезаются режущими кромками фрезы при их последующих положениях.

Рассмотрим, как погрешность привода стола влияет на формирование профиля зуба. Будем считать, что вся погрешность определяется одной k -й синусоидальной гармоникой. На рис. 2 показан фрагмент участка профиля зуба $y_3 = f(x_3)$ расположенный между основной и делительной окружностями обрабатываемого колеса.

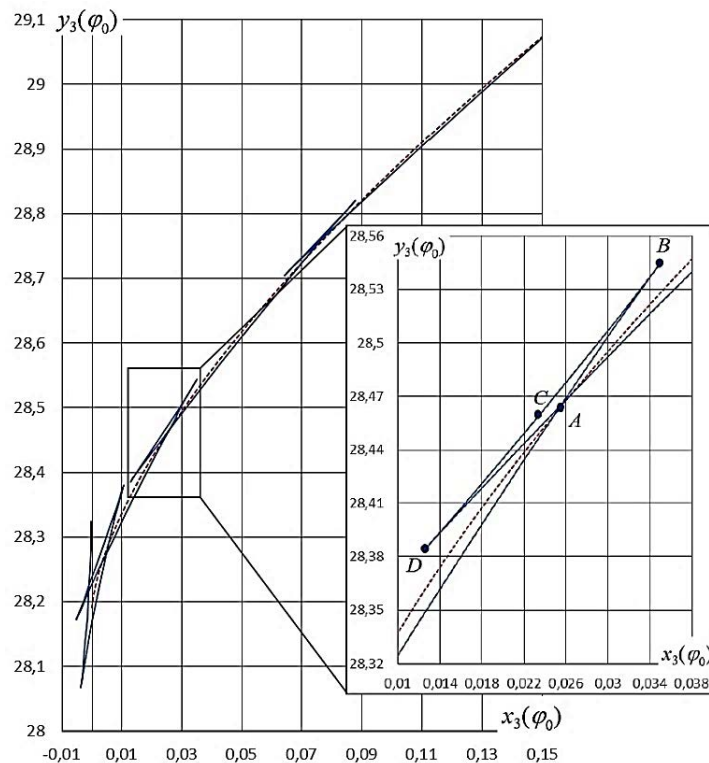


Рис. 2. Участок теоретического профиля зуба при наличии синусоидальной кинематической погрешности при $m = 3$ мм, $z = 20$, $\alpha_u = 20^\circ$, $k = 100$, $\Delta_k = 10''$ и $\beta_k = 192,8^\circ$

Точки A , B и D этого контура являются особыми [6]. В точках B и D (точки возврата) радиус кривизны профиля имеет нулевые значения. В этих точках функция $y_3 = f(x_3)$ меняет знак кривизны: с положительного на участке $A-B$, на отрицательный на участке $B-D$ и снова на положительный на участке $D-A$. В точке C радиус кривизны достигает максимального по модулю отрицательного значения.

Наибольший интерес представляет точка самопересечения профиля зуба – A . В этой точке выполняются условия $x_3(\varphi_{i1}) = x_3(\varphi_{i2})$ и $y_3(\varphi_{i1}) = y_3(\varphi_{i2})$, где φ_{i1} и φ_{i2} – значения угла развернутости, соответствующие двум последовательным точкам касания режущих кромок фрезы и зуба колеса. Однако через точку A проходят две несовпадающие касательные, так как тангенс угла ϕ между касательной к кривой $y_3 = f(x_3)$ и положитель-

ным направлением оси Ox_3 равен $\operatorname{tg}\phi = \frac{dy_3(\varphi_0)}{dx_3(\varphi_0)} = \operatorname{ctg}\varphi_0$; учитывая, что

$\varphi_{i1} \leq \varphi_{i2} < \pi/2$, приходим к заключению: $\operatorname{ctg}\varphi_{i1} \neq \operatorname{ctg}\varphi_{i2}$ и $\phi_A(\varphi_{i1}) \neq \phi_A(\varphi_{i2})$. В результате на рабочем профиле после удаления подрезаемых участков остается излом с углом заострения $\gamma_i = \pi - (\varphi_{i2} - \varphi_{i1})$. Визуально они представляют собой огранку профиля зуба, но механизм их формирования не связан с прерывистым характером процесса зубофрезерования. Наличие подобных изломов профиля зуба приводит к мгновенному изменению окружной скорости и возникновению ударных нагрузок в момент зацепления.

Заключение

Моделирование переноса угловых погрешностей привода заготовки на эвольвентный профиль зуба показало, что на некоторых участках профиля зуба его функция образует ломаный замкнутый контур, который удаляется с формируемой поверхности колеса в процессе обработки. Наличие подобного контура определяется величиной амплитуды и частоты синусоидальной погрешности. Установлено, что в определенной точке выпадающего участка с отрицательной кривизной радиус кривизны достигает максимального по модулю значения и эта точка находится у основания зуба. Через точку самопересечения подрезаемого участка проходят две несовпадающие касательные. В результате после зубофрезерования на участке профиля зуба между начальной и конечной точками образуется излом, который воспринимается как огранка, но механизм искажения профиля не связан с прерывистым характером процесса резания червячными фрезами.

Список литературы

1. Антонюк В. Е., Басинюк В. Л., Серенков П. С. Зубчатые передачи: нормативно-методическое обеспечение точности зубчатых передач на этапе проектирования : монография. Минск : Белорусская наука, 2016. 252 с.
2. Гинзбург Е. Г., Голованов Н. Ф., Фирун Н. Б., Халевский Н. Т. Зубчатые передачи : справочник / под общ. ред. Е. Г. Гинзбурга. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Машиностроение, 1980. 416 с.
3. Еремьянц В. А., Молодцов В. В., Новиков В. А. Особенности переноса угловых погрешностей привода инструмента зуборезного станка, реализующего формооб-

разование методом обката, на профиль зуба обрабатываемого колеса // Вестник МГТУ «Станкин». 2023. № 2 (65). С. 46–54.

4. Калашников А. С. Технология изготовления зубчатых колес. М. : Машиностроение, 2004. 480 с.
5. Лившиц Г. А., Швецова Г. Д. Циклическая погрешность зубофрезерования и выбор числа зубьев делительных колес прецизионных зубофрезерных станков. М., 1959. 21 с.
6. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1968. 584 с.
7. Тайц Б. А., Марков Н. Н. Точность и контроль зубчатых передач. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Машиностроение. 1978. 136 с.

References

1. Antonyuk V.E., Basinyuk V.L., Serenkov P.S. *Zubchatye peredachi: normativno-metodicheskoe obespechenie tochnosti zubchatykh peredach na etape proektirovaniya: monografiya = Gears: normative and methodological ensuring the accuracy of gears at the design stage: monograph.* Minsk: Belorusskaya nauka, 2016:252. (In Russ.)
2. Ginzburg E.G., Golovanov N.F., Firun N.B., Khalebskiy N.T. *Zubchatye peredachi: spravochnik / pod obshch. red. E.G. Ginzburga. 2-e izd., pererab. i dop. = Gears: reference book / under the edition of E.G. Ginzburg. The 2nd edition, revised and supplemented.* Leningrad: Mashinostroenie, 1980:416. (In Russ.)
3. Erem'yants V.A., Molodtsov V.V., Novikov V.A. Features of the transfer of angular errors of the tool drive of a gear-cutting machine, which implements shaping by the rolling method, to the tooth profile of the wheel being processed. *Vestnik MGTU «Stankin» = Bulletin of MSTU “Stankin”.* 2023;(2):46–54. (In Russ.)
4. Kalashnikov A.S. *Tekhnologiya izgotovleniya zubchatykh koles = Gear manufacturing technology.* Moscow: Mashinostroenie, 2004:480. (In Russ.)
5. Livshits G.A., Shvetsova G.D. *Tsiklicheskaya pogreshnost' zubofrezirovaniya i vybor chisla zub'ev delitel'nykh koles pretzionnykh zubofreznykh stankov = Cyclic error of gear hobbing and selection of the number of teeth of index wheels of precision gear hobbing machines.* Moscow, 1959:21. (In Russ.)
6. Litvin F.L. *Teoriya zubchatykh zatseplenyi. 2-e izd., pererab. i dop. = The theory of gearing. The 2nd edition, revised and supplemented.* Moscow: Nauka, 1968:584. (In Russ.)
7. Tayts B.A., Markov N.N. *Tochnost' i kontrol' zubchatykh peredach. 2-e izd., pererab. i dop. = Precision and control of gears. The 2nd edition, revised and supplemented.* Leningrad: Mashinostroenie. 1978:136. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Валерьевич Бушуев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры станков, Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН» (Россия,
г. Москва, Вадковский переулок, 3а)

E-mail: busheck@yandex.ru

Viktor V. Bushuev

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the sub-
department of machine tools, Moscow State
University of Technology “STANKIN”
(3a Vadkovskiy lane, Moscow, Russia)

Владимир Александрович Еремьянц

аспирант, Московский государственный
технологический университет
«СТАНКИН» (Россия, г. Москва,
Вадковский переулок, 3а)

E-mail: vladimir_eremyanc@mail.ru

Vladimir A. Eremyants

Postgraduate student, Moscow State
University of Technology “STANKIN”
(3a Vadkovskiy lane, Moscow, Russia)

Владимир Владимирович Молодцов

доктор технических наук, заведующий
кафедрой станков, Московский
государственный технологический
университет «СТАНКИН» (Россия,
г. Москва, Вадковский переулок, 3а)

E-mail: v_molodtsov@mail.ru

Vladimir V. Molodtsov

Doctor of engineering sciences,
head of the sub-department of machine
tools, Moscow State University
of Technology “STANKIN”
(3a Vadkovskiy lane, Moscow, Russia)

Владимир Александрович Новиков

старший преподаватель кафедры
станков, Московский государственный
технологический университет
«СТАНКИН» (Россия, г. Москва,
Вадковский переулок, 3а)

E-mail: 9bobah@gmail.com

Vladimir A. Novikov

Senior lecturer of the sub-department
of machine tools, Moscow State
University of Technology “STANKIN”
(3a Vadkovskiy lane, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 03.07.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.09.2023

Принята к публикации / Accepted 14.10.2023

УДК 62-52; 621.09.06; 621.09.08; 621.09
doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-13

Перспективы модернизации технологического станочного оборудования в формате концепции Индустрия 4.0

Ю. Л. Чигиринский¹, Д. В. Крайнев², Ж. С. Тихонова³, Е. М. Фролов⁴

^{1,2,3,4}Волгоградский государственный технический университет, Волгоград Россия

¹julio-tchigirinsky@yandex.ru, ²krainevdv@mail.ru,

³tikhonovazhs@yandex.ru, ⁴e_frolov@vstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цифровая трансформация создает возможности перехода промышленности на новый уровень производства, но требует модернизации технологического оборудования до цифровой технологической системы. Это предполагает рост уровня автоматизации и автономности производственной позиции в результате повышения эффективности производства, что и является целью работы. *Материалы и методы.* Экспериментальные исследования процесса резания проводились на станке с числовым программным управлением Okuma Genos L300-M с применением обычных и наномодифицированных твердосплавных пластин с многослойным покрытием фирмы Sandvik Coromant и CVD и фирмы Korloy. Морфологические и металлографические исследования выполнялись с использованием FIB микроскопа FEI VERSA 3D. *Результаты.* Подтверждена взаимосвязь стойкости режущих пластин с многослойным износостойким покрытием и величиной термоЭДС пробного прохода, а также уровня сил резания и их колебаний с параметрами шероховатости обработанной поверхности. Предложен способ интеграции устройств числового программного управления со сторонними приложениями и измерительными устройствами для управления процессом резания в режиме реального времени. Предлагается способ повышения эффективности обработки за счет внедрения методов предварительной и оперативной диагностики. *Выводы.* Предложен способ повышения автономности и уровня автоматизации технологического оборудования.

Ключевые слова: интеллектуальная технологическая система, адаптивное управление, диагностика процесса резания, технологический интеллект

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00101.

Для цитирования: Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М. Перспективы модернизации технологического станочного оборудования в формате концепции Индустрия 4.0 // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 136–148. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-13

Prospects for modernization of technological machine tools in the format of the Industry 4.0 concept

Yu.L. Chigirinskiy¹, D.V. Kraynev², Zh.S. Tikhonova³, E.M. Frolov⁴

^{1,2,3,5}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹julio-tchigirinsky@yandex.ru, ²krainevdv@mail.ru,

³tikhonovazhs@yandex.ru, ⁴e_frolov@vstu.ru

Abstract. *Background.* Digital transformation creates opportunities for the transition of industry to a new level of production, but requires the modernization of technological

© Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Фролов Е. М., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

equipment to a digital technological system. This implies an increase in the level of automation and autonomy of the production position and, as a result, an increase in production efficiency, which is the purpose of the work. *Materials and methods.* Experimental studies of the cutting process were carried out on an Okuma Genos L300-M CNC machine using conventional and nanomodified carbide plates with a multilayer coating from Sandvik Coromant and CVD and Korloy. Morphological and metallographic studies were performed using the FEI VERSA 3D FIB microscope. *Results.* The relationship between the durability of cutting plates with a multilayer wear-resistant coating and the value of the thermal EMF of the test pass, as well as the level of cutting forces and their fluctuations with the roughness parameters of the treated surface is confirmed. A method for integrating the CNC with third-party applications and measuring devices for controlling the cutting process in real time is proposed. Proposed method increases the efficiency of processing through the introduction of methods of preliminary and operational diagnostics. *Conclusion.* A method of increasing the autonomy and automation level of technological equipment is proposed.

Keywords: intelligent technological system; adaptive control; diagnostics of the cutting process; technological intelligence

Financing: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 19-19-001.

For citation: Chigirinskiy Yu.L., Kraynev D.V., Tikhonova Zh.S., Frolov E.M. Prospects for modernization of technological machine tools in the format of the Industry 4.0 concept. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):136–148. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-13

Введение

Общая направленность технического прогресса на повышение уровня жизни в условиях ограниченных ресурсов ведет к необходимости поиска путей повышения эффективности промышленного производства. На достижение указанной цели направлена концепция Индустрия 4.0, предполагающая повышение уровня проникновения информационных технологий в производственные процессы машиностроения и переосмысление принципов организации производства.

Суть предлагаемой цифровой трансформации заключается в создании многоуровневой интегрированной ИТ-инфраструктуры, автоматизации процессов, переводе информационных потоков в цифровую среду с большей доступностью и в общей оптимизации операционной деятельности.

В качестве основных преимуществ подобной трансформации выделяют: повышение производительности при общем сокращении затрат; повышение гибкости и кастомизация производства; повышение оперативности и надежности производства за счет роста уровня автоматизации; повышение безопасности производства за счет непрерывного контроля [1, 2].

Описанная трансформация предполагает целый комплекс цифровых технологий: промышленные платформы IoT; большие данные и аналитика; облачные вычисления; аддитивное производство; дополненная реальность; цифровые двойники; машинное обучение. Все они находятся на разном уровне реализации и практического применения, но с точки зрения реального производства уже сейчас позволяют автоматизировать некоторые производственные процессы [3].

Если же сконцентрироваться непосредственно на уровне механического цеха и направлении создания «умного / безлюдного производства» с пере-

дачей определенного функционала от человека к машине – в данном случае к технологической системе (оборудованию с числовым программным управлением), то возникает вопрос о наделении ее технологическим интеллектом, позволяющим решать текущие технологические задачи: обеспечение заданного качества производимой продукции, поддержание стабильности процесса обработки, нивелирование неблагоприятных внешних воздействий, превентивное определение момента времени смены инструмента и т.д. Практическая реализация осуществима при использовании идеологии цифровых технологических систем [4, 5] (в терминах Industry 4.0 – киберфизических систем). Такая система представляет собой совокупность физических и компьютерных компонентов, которые интегрированы друг с другом для безопасного и эффективного управления технологической операцией [6], например процессом резания.

Современное технологическое оборудование, оснащенное системами числового программного управления (ЧПУ), представляет собой достаточно технологичные и наукоемкие машины, снабженные целым рядом систем контроля и диагностики. Это системы компенсации тепловых деформаций, активный контроль вибраций, контроль усилий на приводах, контроль эффективной мощности резания и др. В данном контексте слово «контроль» не является смысловым аналогом английского *control* (управление), а подразумевает полноценный мониторинг с возможностью корректировки условий и, следовательно, результатов процесса. Следует заметить, что названные системы, как правило, используются только для оценки работоспособности станка – в качестве индикаторов аварийных ситуаций и минимизации поломок, – и не реализуют полный потенциал своих возможностей [7].

Целью работы является повышение эффективности процесса обработки посредством модернизации станков с ЧПУ до уровня цифровой технологической системы, что позволит не только повысить уровень автоматизации и автономности производственной позиции, но и обеспечить частичный перенос задач технологической подготовки (в частности, назначение режимов резания) непосредственно в производство [4].

Достижение указанной цели на первом этапе требует решения следующих задач:

- разработка универсального инструмента мониторинга процесса резания, учитывающего наиболее значимые факторы, оказывающие существенное влияние на закономерности процесса резания и формирования качества обработанной поверхности, применимые в производственных условиях и не требующие глубокой модернизации технологического оборудования;
- разработка механизма интеграции модулей мониторинга процесса резания и адаптивного регулирования режимов обработки, обеспечивающих поддержание параметров процесса резания в допустимых границах формирования требуемых параметров качества обработки.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования процесса резания проводились на токарном обрабатывающем центре Okuma Genos L300-M. В процессе исследований проводились стойкостные испытания обычных и модифицированных твердосплавных пластин с многослойным CVD-покрытием фирмы

Sandvik Coromant (Швеция) и CVD- и PVD-покрытиями фирмы Korloy (Республика Корея) при точении материалов групп обрабатываемости «Р» и «М» с различными сочетаниями скорости резания и подачи. Перед испытаниями была проведена оценка режущих свойств пластин измерением термоЭДС пробного рабочего хода E , которая является комплексным показателем электро- и теплофизических свойств различных материалов [8].

Для измерения составляющих силы резания использовался токарный динамометр DKM 2010 фирмы TeLC (Германия). Конструкция динамометра и измерительная схема обеспечивали повышенную точность измерения составляющих силы резания (погрешность измерения 0,1 %).

Морфологические исследования рабочих поверхностей пластин, а также химико-спектральный анализ поперечных срезов режущего клина, полученных методом локального жесткого ионно-лучевого травления, проводились с использованием FIB микроскопа FEI VERSA 3D.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований стойкости режущего инструмента проведена по методике регрессионного моделирования полного факторного эксперимента [9, 10].

Результаты

Процесс резания – это синергичная совокупность множества элементарных физических и химических явлений: деформационных, термических, диффузионных и т.д. Стохастический характер этой сложной системы определяется существенной неоднозначностью химического состава, теплофизических и механических свойств материалов инструмента и обрабатываемой заготовки.

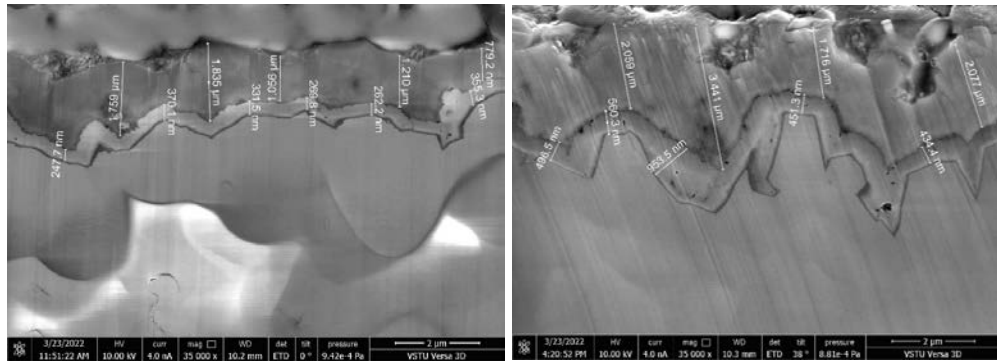
Разброс химического состава, а также физико-механических свойств определяется воздействием различных факторов в процессе производства, регламентируется требованиями стандартов или технических условий и в настоящее время неустраним. Вследствие этого возникает необходимость учета фактических характеристик контактной пары инструмент-заготовка.

Режущие свойства инструмента определяются не только геометрическими параметрами, но также и физико-механическими, теплофизическими, электрическими свойствами инструментального материала, которые в свою очередь зависят от ряда факторов [11, 12]. Они же определяют форму и характер износа инструмента, а также уровень оптимальных режимов резания. Немаловажное значение в данном контексте имеет температурная составляющая [13].

В результате исследований [9, 14], были выявлены неоднородность и непостоянство толщин износостойких покрытий (рис. 1) в пределах одной партии инструмента, структуры твердосплавной матрицы (рис. 2), а также наличие внутренних дефектов матрицы – микротрещин (рис. 3), оказывающих влияние на режущую способность сменных многогранных пластин. Режущая способность инструмента оценивается периодом стойкости инструмента – временем работы до образования на задней поверхности пластины фаски износа заданной ширины.

Установлено, что результирующая режущая способность инструмента определяется совокупностью факторов, включающих параметры многослойных износостойких покрытий (в том числе непостоянство размеров, неравномерность распределения слоев и их взаимосвязь), свойствами твердосплавной

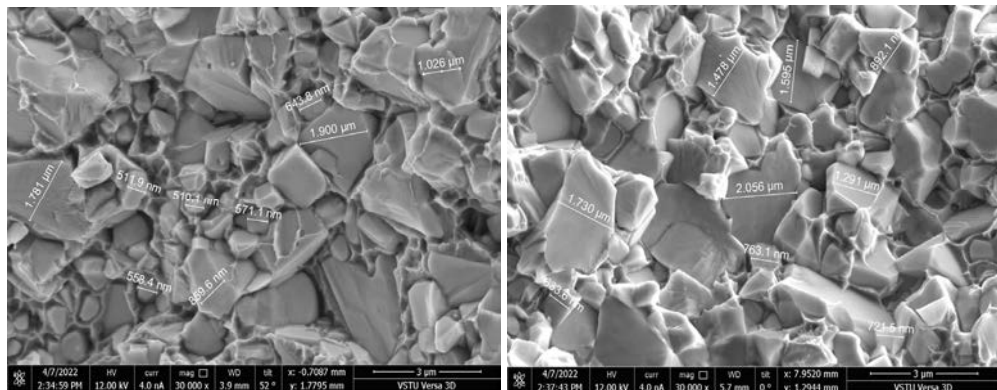
матрицы (структура, зернистость и др.), а также наличием внутренних дефектов (микротрещин и пр.).



а) термоЭДС $E = 4,9$ мВ

б) термоЭДС $E = 5,3$ мВ

Рис. 1. Непостоянство размеров износостойких покрытий наномодифицированной пластины



а) термоЭДС $E = 4,9$ мВ

б) термоЭДС $E = 5,3$ мВ

Рис. 2. Внутренняя структура твердосплавной матрицы

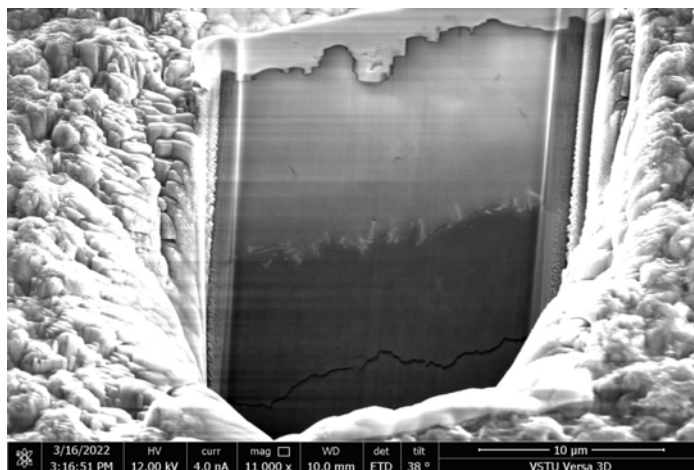


Рис. 3. Микротрещина в объеме твердосплавной матрицы инструмента, обнаруженная методом FIB-микроскопии

В результате проведенных исследований была подтверждена взаимосвязь периода стойкости сменных многогранных пластин с многослойным износостойким покрытием и величиной термоЭДС пробного прохода. Так, оценка значимости технологических факторов в регрессионных моделях при обработке сталей группы Р (рис. 4) и группы обрабатываемости М (рис. 5) иллюстрирует существенную взаимосвязь величины термоЭДС и периода стойкости как при работе режущими пластинами без модификации, так и подвергнутыми наномодификации. Кроме того, термоЭДС контактной пары «инструмент-заготовка», измеряемая на определенных режимах резания, обеспечивает хорошую повторяемость и, следовательно, статистически однородные результаты.

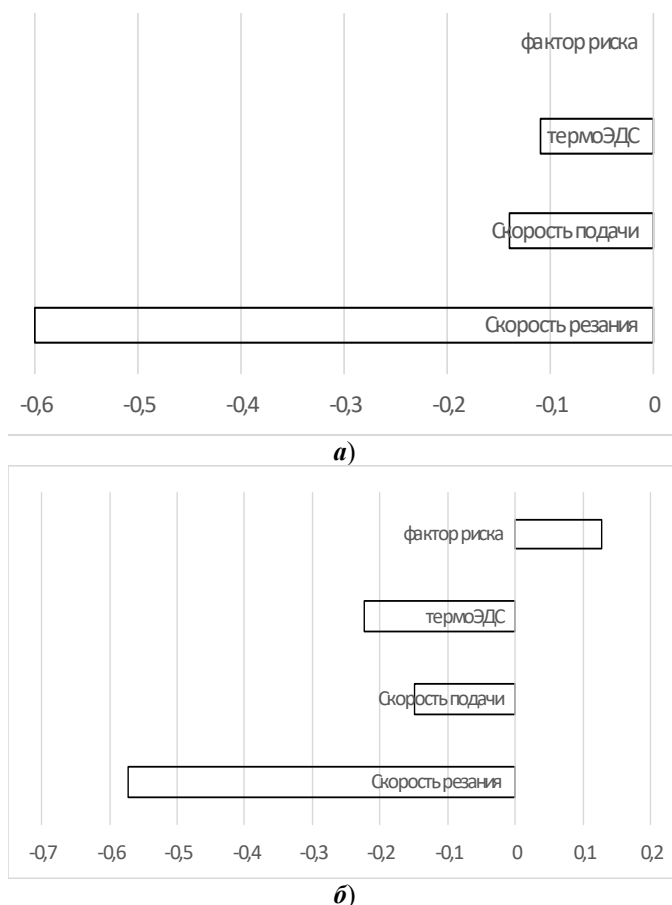


Рис. 4. Оценка значимости технологических факторов на период стойкости сменных твердосплавных пластин Sandvik при обработке стали группы Р:

а – пластины без модификации; *б* – наномодифицированные пластины

Установлена существенная взаимосвязь уровня составляющих сил резания, их колебаний (оценка по величине стандартного отклонения) с параметрами шероховатости обработанной поверхности (рис. 6).

Помимо того, установлено, что наличие упрочненного поверхностного слоя при прочих равных условиях вызывает изменение не только уровня, но и амплитуды колебания сил резания (рис. 7).

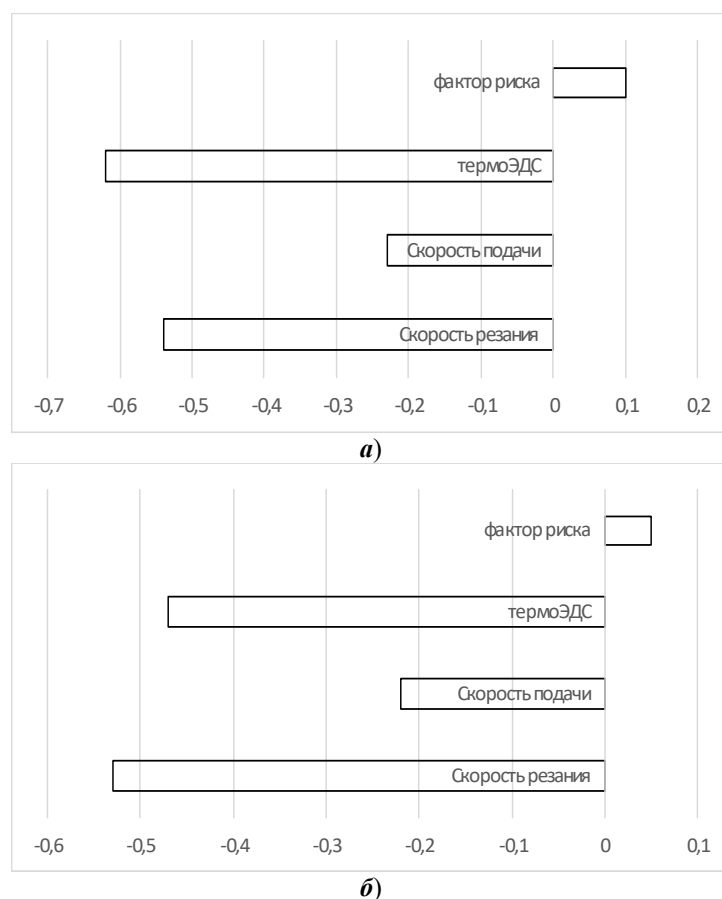


Рис. 5. Оценка значимости технологических факторов на период стойкости сменных твердосплавных пластин Sandvik при обработке стали группы М:
а – пластины без модификации; **б** – наномодифицированные пластины

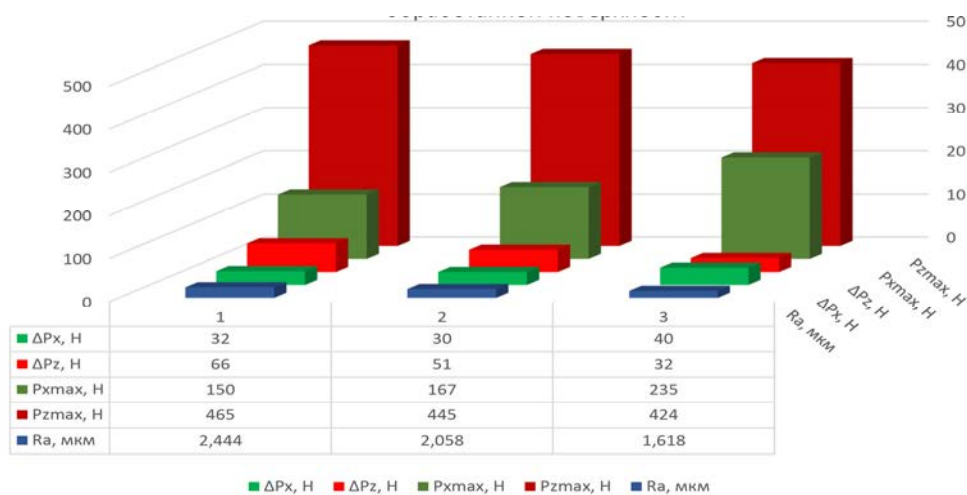


Рис. 6. Влияние величины и амплитуды колебания составляющих силы резания на шероховатость обработанной поверхности (сталь 12Х18Н10Т – сплав Korloy NC5330; $t = 0,5$ мм; $V = 270$ м/мин; $S = 0,25$ мм/об)

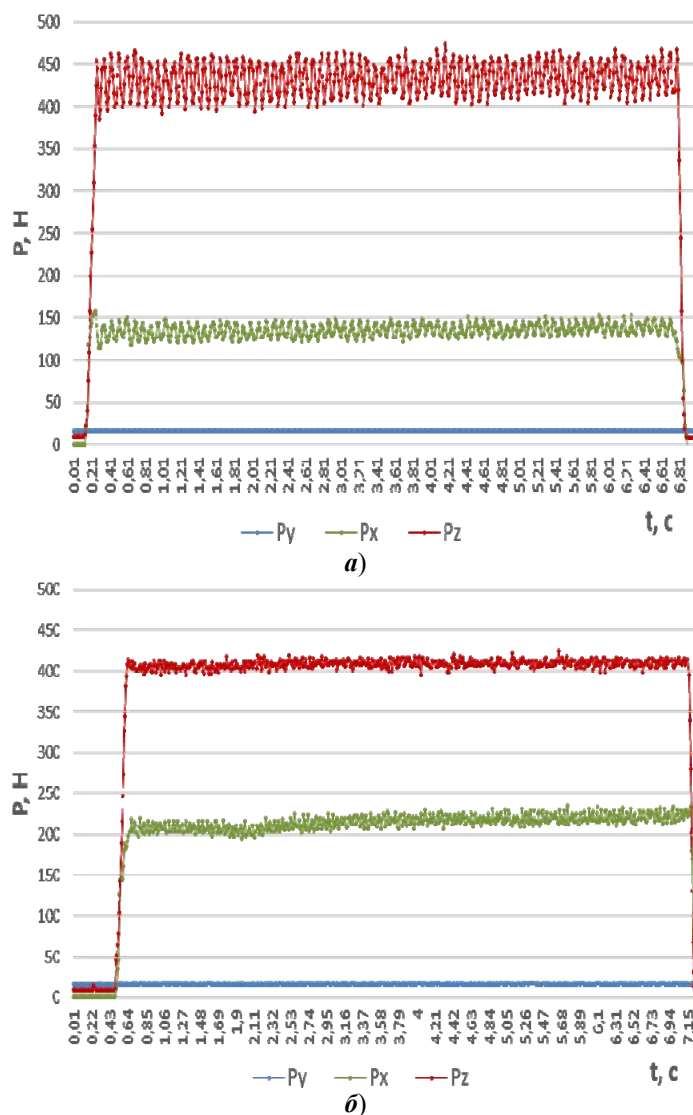


Рис. 7. Динамика составляющих силы резания при точении (сталь 12Х18Н10Т – сплав Korloy NC5330; $t = 0,5$ мм; $V = 270$ м/мин; $S = 0,25$ мм/об):
а – без упрочненного слоя; **б** – упрочненный слой глубиной 1,2 мм

Интеграцию модуля корректировки режимов резания на основании диагностического сигнала из зоны резания предлагается реализовать посредством интерфейса RS-232C, который позволяет осуществлять информационный обмен со сторонним программным обеспечением и измерительными датчиками, записывая необходимую информацию в системные переменные блока ЧПУ, как это было осуществлено на базе токарного обрабатывающего центра Okuma Genos L300-M (рис. 8).

Данный способ интеграции ядра устройств ЧПУ со сторонними приложениями и измерительными устройствами представляется наиболее удобным для управления процессом резания в режиме реального времени, использует стандартизованный открытый интерфейс информационного обмена и не требует значительной модернизации технологического оборудования [4, 15].

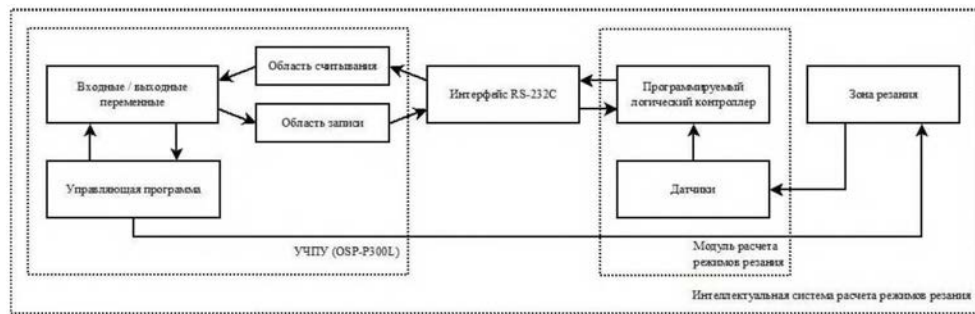


Рис. 8. Принципиальная схема интеллектуальной технологической системы на базе устройств ЧПУ Okuma OSP-P300L [4, 15]

Обсуждение

Практическая реализация концепции Industry 4.0 и цифровая трансформация производства вызывают необходимость совершенствования технологического оборудования, в частности станков с ЧПУ, за счет увеличения уровня автоматизации существующих и формирования новых функциональных возможностей. И в данном случае рост автономности и адаптивности не может быть осуществлен без развития систем обратной связи. Развитие инструментального производства позволяет повысить надежность производства, но не способно полностью исключить вариативность рассогласующих факторов, и лишь определяет области допустимых режимов обработки. Корректировка требует нахождения фактических количественных значений отдельных показателей, которые возможно найти с помощью разрушающих методов исследования. Это может быть осуществлено в лабораторных условиях, но для производства является излишне трудоемким и практически неприменимым процессом [7, 13].

В данном случае задача может быть решена за счет сочетания методов предварительной и оперативной диагностики. Так, в качестве достоверного информационного канала, позволяющего осуществлять предварительную диагностику фактических свойств контактной пары, инструмент-деталь предлагается использовать термоЭДС пробного рабочего прохода. Если сигнал термоЭДС позволяет судить о физико-механических свойствах контактной пары, то силы резания являются чувствительными не только к свойствам поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, но и позволяют динамически отслеживать ход процесса резания. Кроме того, дублирование каналов обратной связи позволяет повысить не только информативность, но и надежность управления процессом обработки. Это также позволяет выполнять часть задач технологической подготовки непосредственно на этапе производства [4].

Модульная реализация диагностическо-адаптивной компоненты системы ЧПУ позволяет произвести модернизацию оборудования на основе станочной оснастки без существенного изменения и вмешательства в конструкцию станка с ЧПУ.

Заключение

Таким образом, в работе предложен инструментарий повышения эффективности операций механической обработки на станках с ЧПУ. Предло-

жены принципы и метод модернизации оборудования за счет повышения автономности и уровня автоматизации.

Существенное повышение эффективности процессов механической обработки может быть получено за счет полного использования ресурсов цифровых технологических систем, в качестве прототипов которых можно рассматривать современные станки с ЧПУ, оснащенные достаточно функциональным набором сенсоров. Следует признать, что функциональные возможности таких сенсоров на современном этапе развития станочных систем используются не в полной мере – преимущественно для мониторинга состояния отдельных элементов технологической системы и сигнализации о наступлении аварийной ситуации. Интеграция математических моделей физических процессов формирования качества изготавливаемой продукции и изнашивания режущего инструмента в программное обеспечение систем ЧПУ позволит сформировать «технологический интеллект» цифровой технологической системы и полноценно использовать идеи концепции Industry 4.0.

Список литературы

1. Цифровизация промышленности: задачи, преимущества внедрения. 2023. URL: <https://adeptik.com/blog/cifrovizaciya-promyshlennosti/?ysclid=lhkdv9l0sq181533403>
2. Сонных М. В. Индустрия 4.0 – реализация цифровой трансформации производств. 2019. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/industriya-4-0-realizaciya-cifrovoj-transformacii-proizvodstv/?ysclid=lhkg4o7488871835533>
3. Сабитов О. 7 ключевых технологий Индустрии 4.0: от машинного обучения до 3D-печати. 2020. URL: <https://hightech.fm/2020/03/19/industry-4-0>
4. Чигиринский Ю. Л., Крайнев Д. В., Фролов Е. М. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48 EDN: PFVKOK.
5. Ингеманссон А. Р. Цифровая производственная система для механообрабатывающего производства: структура, функционирование, программный производственно-технологический комплекс и анализ технико-экономической эффективности // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 11 (113). С. 30–39.
6. Tiwari D. D., Naskar S., Sai A. S., Palleti V. R. Attack Detection Using Unsupervised Learning Algorithms in Cyber-Physical Systems / ed. by Metin Türkay, Rafiqul Gani // Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, 2021. Vol. 50. P. 1259–1264. doi: 10.1016/B978-0-323-88506-5.50194-7
7. Крайнев Д. В., Тихонова Ж. С., Капустин М. В., Палкин Д. А. Перспективы технологической подготовки в условиях современного производства // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 1 (272). С. 16–19. doi: 10.35211/1990-5297-2023-1-272-16-19 EDN: MAJJAC.
8. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // Conference proceedings ICIE 2019 (Sochi, Russia, 25–29 march 2019). Switzerland, AG : Springer International Publishing, 2020. P. 1097–1105. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_117 EDN: YEAGZO
9. Определение рациональных условий эксплуатации твердосплавного инструмента с наноструктурированным поверхностным слоем рабочей части по критерию повышения долговечности при точении конструкционных материалов различных групп : заключительный отчет о НИР № 101-01/2021 (26/365-21) ; ВолгГТУ, ИМАШ РАН, 2021.
10. Чигиринская Н. В., Чигиринский Ю. Л., Горобцов А. С. Моделирование неперiodических стохастических процессов : учеб. пособие. Волгоград : ВолгГТУ, 2020. 107 с.

11. Лоладзе Т. Н. Основы создания эффективных инструментальных материалов для обработки жаропрочных сплавов и специальных сталей : конспект лекций. Тбилиси : Грузинск. политехн. ин-т, 1976. 44 с.
12. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М. : Машиностроение, 1976. 278 с.
13. Постнов В. В., Хадиуллин С. Х., Малахов Е. Н., Старовойтов С. В. Исследование показателей, определяющих режущие свойства инструментальных твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16, № 8 (53). С. 118–125. EDN: PXALAF
14. Изучение свойств наноструктурированного режущего инструмента и его контактных взаимодействий с обрабатываемым материалом : заключительный отчет о НИР № 101П-01/2022 (26/448-22) ; ВолгГТУ, ИМАШ РАН, 2022.
15. Frolov E. M., Krainev D. V., Tikhonova Zh. S. Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment // Proceedings at 2018 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9–16 September, 2018) / Institute of Electrical and Electronics Engineers, South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section, IEEE Russia Section, South Ural IEEE Chapter. [Publisher: IEEE Xplore], 2018. 4 p. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501684

References

1. *Tsifrovizatsiya promyshlennosti: zadachi, preimushchestva vnedreniya = Digitalization of industry: challenges, advantages of implementation*. 2023. (In Russ.). Available at: <https://adeptik.com/blog/cifrovizatsiya-promyshlennosti/?ysclid=lhkdv9l0sq181533403>
2. Sonnykh M.V. *Industriya 4.0 – realizatsiya tsifrovoy transformatsii proizvodstv = Industry 4.0 – implementation of digital transformation of production*. 2019. (In Russ.). Available at: <https://www.secuteck.ru/articles/industriya-4-0-realizatsiya-cifrovoy-transformatsii-proizvodstv?ysclid=lhkg4o7488871835533>
3. Sabitov O. *7 klyuchevykh tekhnologiy Industrii 4.0: ot mashinnogo obucheniya do 3D-pechati = 7 key technologies of Industry 4.0: from machine learning to 3D printing*. 2020. (In Russ.). Available at: <https://hightech.fm/2020/03/19/industry-4-0>
4. Chigirinskiy Yu.L., Kraynev D.V., Frolov E.M. Digitalization of mechanical engineering production: technological preparation, production, tracking. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = High technology in mechanical engineering*. 2022;(8):39–48. (In Russ.). doi: 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48 EDN: PFVKOK
5. Ingemansson A.R. Digital production system for machining production: structure, operation, software production and technological complex and analysis of technical and economic efficiency. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = High technology in mechanical engineering*. 2020;(11):30–39. (In Russ.)
6. Tiwari D.D., Naskar S., Sai A.S., Palleti V.R. Attack Detection Using Unsupervised Learning Algorithms in Cyber-Physical Systems / ed. by Metin Türkay, Rafiqul Gani. *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, 2021;50:1259–1264. doi: 10.1016/B978-0-323-88506-5.50194-7
7. Kraynev D.V., Tikhonova Zh.S., Kapustin M.V., Palkin D.A. Prospects for technological training in modern production conditions. *Izvestiya Volgo-gradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University*. 2023;(1):16–19. (In Russ.). doi: 10.35211/1990-5297-2023-1-272-16-19 EDN: MAJJAC
8. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs. *Conference proceedings ICIE 2019 (Sochi, Russia, 25–29 march 2019)*. Switzerland, AG: Springer International Publishing, 2020:1097–1105. doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_117 EDN: YEAGZO
9. Determination of rational operating conditions for carbide tools with a nanostructured surface layer of the working part according to the criterion of increasing durability when

- turning structural materials of various groups: final research report No. 101-01/2021 (26/365-21); VolgGTU, IMASh RAN, 2021.
10. Chigirinskaya N.V., Chigirinskiy Yu.L., Gorobtsov A.S. *Modelirovanie neperiodicheskikh stokhasticheskikh protsessov: ucheb. posobie = Modeling of non-periodic stochastic processes: textbook*. Volgograd: VolgGTU, 2020:107. (In Russ.)
 11. Loladze T.N. *Osnovy sozdaniya effektivnykh instrumental'nykh materialov dlya obrabotki zharoprochnykh splavov i spetsial'nykh staley: konspekt lektsiy = Fundamentals of creating effective tool materials for processing heat-resistant alloys and special steels: lecture notes*. Tbilisi: Gruzinsk. politekhn. in-t, 1976:44. (In Russ.)
 12. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya = Optimization of cutting processes*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976:278. (In Russ.)
 13. Postnov V.V., Khadiullin S.Kh., Malakhov E.N., Starovoytov S.V. Study of indicators that determine the cutting properties of tool hard alloys when processing difficult-to-cut materials. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2012;16(8):118–125. (In Russ.). EDN: PXALAF
 14. Study of the properties of a nanostructured cutting tool and its contact interactions with the material being processed: final research report No. 101P-01/2022 (26/448-22) ; VolgGTU, IMASh RAN, 2022.
 15. Frolov E.M., Krainev D.V., Tikhonova Zh.S. Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment. *Proceedings at 2018 Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9–16 September, 2018) / Institute of Electrical and Electronics Engineers, South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section, IEEE Russia Section, South Ural IEEE Chapter*. [Publisher: IEEE Xplore], 2018:4. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501684

Информация об авторах / Information about the authors

Юлий Львович Чигиринский

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии
машиностроения, Волгоградский
государственный технический
университет (Россия, г. Волгоград,
пр-т Ленина, 28)

E-mail: Julio-Tchigirinsky@yandex.ru

Yuliy L. Chigirinskiy

Doctor of engineering sciences,
professor, head of the sub-department
of machinery technology,
Volgograd State Technical University
(28 Lenina avenue, Volgograd, Russia)

Дмитрий Владимирович Крайнев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Волгоградский
государственный технический
университет (Россия, г. Волгоград,
пр-т Ленина, 28)

E-mail: krainevdv@mail.ru

Dmitriy V. Kraynev

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of machinery
technology, Volgograd State
Technical University (28 Lenina
avenue, Volgograd, Russia)

Жанна Сергеевна Тихонова

кандидат технических наук, доцент
кафедры технологии машиностроения,
Волгоградский государственный
технический университет
(Россия, г. Волгоград,
пр-т Ленина, 28)

E-mail: tikhonovazhs@gmail.com

Zhanna S. Tikhonova

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of machinery technology, Volgograd State
Technical University (28 Lenina
avenue, Volgograd, Russia)

Евгений Михайлович Фролов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Волгоградский
государственный технический
университет (Россия, г. Волгоград,
пр-т Ленина, 28)

E-mail: eltar1983@yandex.ru

Evgeniy M. Frolov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of machinery
technology, Volgograd State
Technical University (28 Lenina
avenue, Volgograd, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 26.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 07.07.2023

Принята к публикации / Accepted 10.10.2023

УДК 621.923

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-14

Взаимозависимость сил при проходном бесцентровом шлифовании**П. В. Малинин¹, П. Ю. Бочкарев², И. И. Артемов³, М. О. Гончаров⁴**^{1,2}Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия

^{2,4}Саратовский государственный университет генетики,

биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru, ⁴mixgoncharov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Особенностью реализации метода бесцентрового шлифования является условие силового замыкания в местах контакта обрабатываемой поверхности и элементов технологической системы, соблюдение которого во многом определяет стабильность протекания процесса обработки. Определяющее значение в обеспечении этого требования имеют вопросы, связанные с установлением схемы действующих сил и расчетом их величин. *Материалы и методы.* Представлена последовательность разработки зависимостей определения составляющих сил и их значений с учетом характеристик обрабатываемой поверхности, оборудования и оснастки во всем пространстве рабочей зоны. *Результаты.* Создана обобщенная модель для расчета составляющих сил резания и сил в местах взаимодействия обрабатываемой детали с ведущим кругом и плоскостью опорного ножа, установлены взаимосвязи между ними и факторами, влияющими на процесс обработки. *Выводы.* Представленные модели позволяют назначать обоснованные параметры наладки оборудования и определять рациональные режимы обработки с обеспечением стабильности протекания процесса проходного бесцентрового шлифования.

Ключевые слова: технологическая подготовка механообрабатывающих производств, операции бесцентрового шлифования, проходное бесцентровое шлифование, схема силового замыкания, режимы резания, абразивная обработка

Для цитирования: Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимозависимость сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 149–159. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-14

The interdependence of forces during continuous centerless grinding**P.V. Malinin¹, P.Yu. Bochkarev², I.I. Artemov³, M.O. Goncharov⁴**^{1,2}Kamyshin Technological Institute (branch)

Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia

^{2,4}Saratov State University of Genetics, Biotechnology

and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

³Penza State University, Penza, Russia¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru, ⁴mixgoncharov@gmail.com

Abstract. *Background.* A distinctive feature of the implementation of the centerless grinding method is the condition of power closure at the contact points of the treated surface and the elements of the technological system, compliance with which largely determines the

stability of the processing process. Of decisive importance in ensuring this requirement are issues related to the establishment of the scheme of acting forces and the calculation of their values. *Materials and methods.* The sequence of developing dependencies for determining the components of forces and their values, taking into account the characteristics of the treated surface, equipment and tooling in the entire space of the working area, is presented. *Results.* A generalized model has been created for calculating the components of cutting forces and forces at the points of interaction of the workpiece with the leading circle and the plane of the support knife, the relationships between them and the factors affecting the processing process have been established. *Conclusions.* The models presented in the article make it possible to assign reasonable parameters for setting up equipment and determine rational processing modes to ensure the stability of the flow of the process of centerless grinding.

Keywords: technological preparation of machining industries, centerless grinding operations, continuous centerless grinding, power circuit circuit, cutting modes, abrasive treatment

For citation: Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. The interdependence of forces during continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):149–159. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-14

Введение

Качественное и эффективное выполнение технологических операций невозможно без полного комплексного учета влияющих факторов на всех стадиях их проектирования и реализации. Применительно к операциям проходного бесцентрового шлифования установление взаимосвязей между назначением технологической оснастки, определением режимов резания, методов настройки оборудования и управления ходом реализации обработки невозможно без детального установления и исследования сил, возникающих в местах контакта обрабатываемой детали и элементов технологической системы. Результаты известных исследований по данному направлению [1–6] преимущественно направлены на установление движения детали в процессе обработки, что не только не учитывает ряд факторов (изменение диаметра обрабатываемой поверхности с учетом величины снимаемого припуска, постоянная корректировка расположения точек контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа, шлифовальном и ведущем кругами и др.), но и не позволяет создать модель взаимовлияния составляющих сил между собой. Учитывая требование силового замыкания в схеме обработки деталей при бесцентровом шлифовании и отсутствие таких методик, можно утверждать, что развитие рассматриваемых методов обработки, выделяющихся высокой производительностью и обеспечением повышенных требований к геометрическим характеристикам обрабатываемых поверхностей [7, 8], серьезно сдерживается.

Материалы и методы

Предлагается метод, который на основе установления составляющих сил, действующих в точках контакта, и определения значения этих сил обеспечивает создание обобщенной модели, позволяющей установить взаимовлияние между этими силами. Контакт обрабатываемой поверхности и технологической оснастки осуществляется в трех точках (рис. 1): со шлифовальным кругом (точка А), ведущим кругом (точка В), опорным ножом (точка Р).

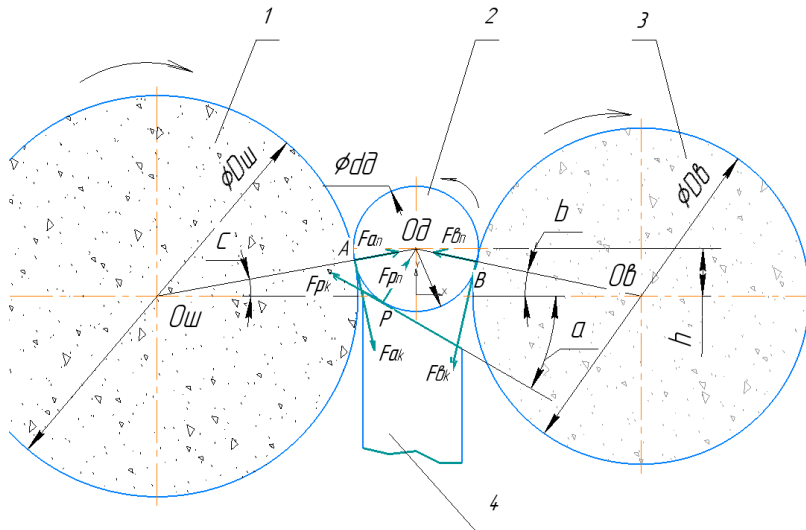


Рис. 1. Схема сил при проходном бесцентровом шлифовании (центры осей кругов расположены на горизонтальной прямой): 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – ведущий круг; 4 – опорный нож

При рассмотрении контактов в поперечных сечениях зоны обработки проходного бесцентрового шлифования наружных цилиндрических поверхностей, когда центры ведущего и шлифовального кругов расположены не на одной горизонтальной прямой, видно, что направления сил изменяются (рис. 2).

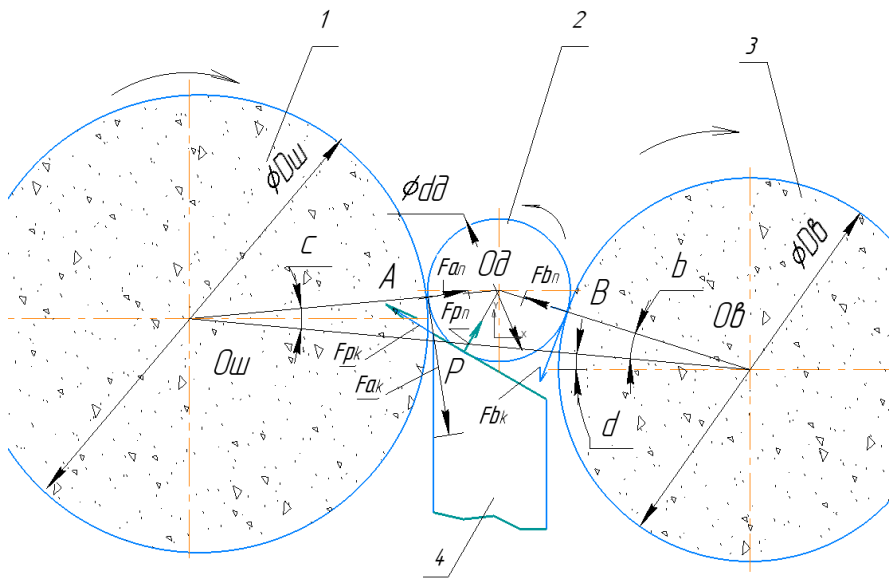


Рис. 2. Схема сил при проходном бесцентровом шлифовании (центры осей кругов расположены не на горизонтальной прямой): 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – ведущий круг; 4 – опорный нож

При определении составляющих сил в местах контакта на координатные оси сделано допущение, позволяющее не учитывать составляющую сил

на ось X . Данное допущение прямо исходя из относительно малых составляющих сил на ось X по отношению к составляющим сил на оси Y и Z , а также формулировки поставленной задачи настоящих исследований, заключающихся в установлении отличий силовых факторов в местах контакта в отдельных рабочих зонах обработки. Направления нормальных и тангенциальных составляющих этих сил представлены для случая, когда центры ведущего и шлифовального кругов расположены на одной горизонтальной прямой. Определение их направления представлено в работе [9] и зависит от размерных характеристик кругов и обрабатываемой поверхности в рассматриваемом сечении зоны обработки, угла наклона плоскости опорного ножа.

Зависимости для определения составляющих сил для случаев расположения центров кругов на одной горизонтальной линии на оси Y и Z и поясняющий иллюстративный материал представлены на рис. 3–5.

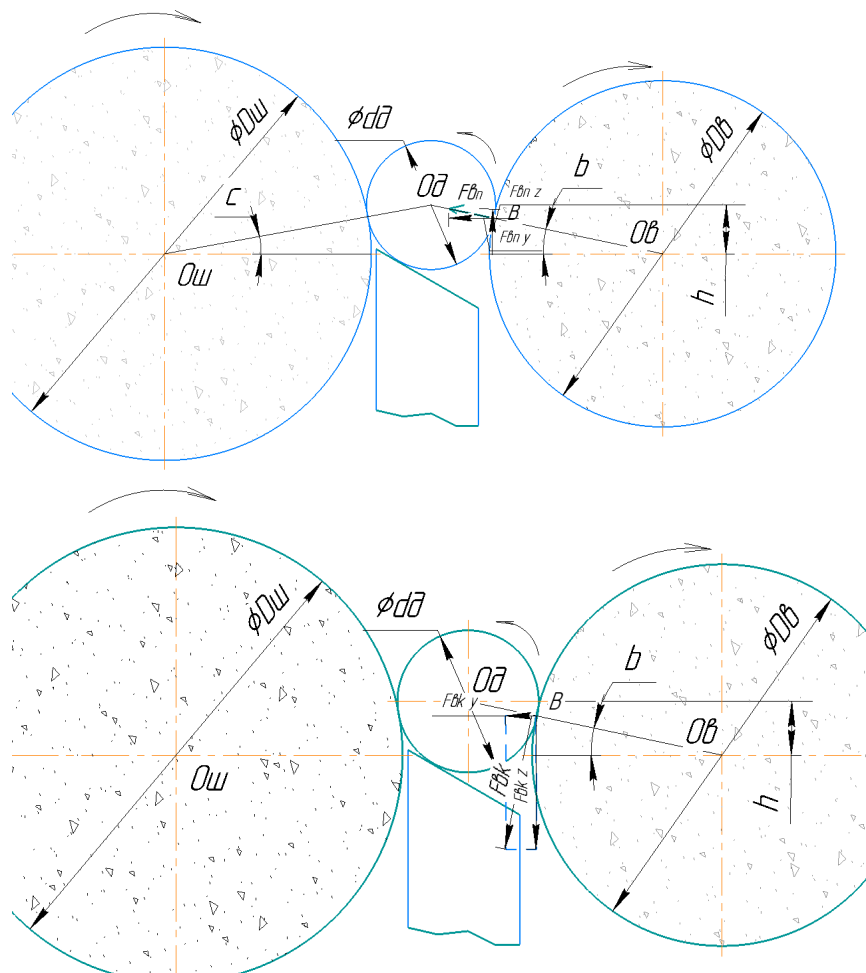


Рис. 3. Нормальные и тангенциальные составляющие сил, действующих в месте контакта обрабатываемой поверхности и ведущего круга:

$$F_{bn\ y} = F_{bn} \times \cos b ; F_{bn\ z} = F_{bn} \times \cos(90^\circ - b) ;$$

$$F_{bk\ z} = F_{bk} \times \cos b ; F_{bk\ y} = F_{bk} \times \cos(90^\circ - b)$$

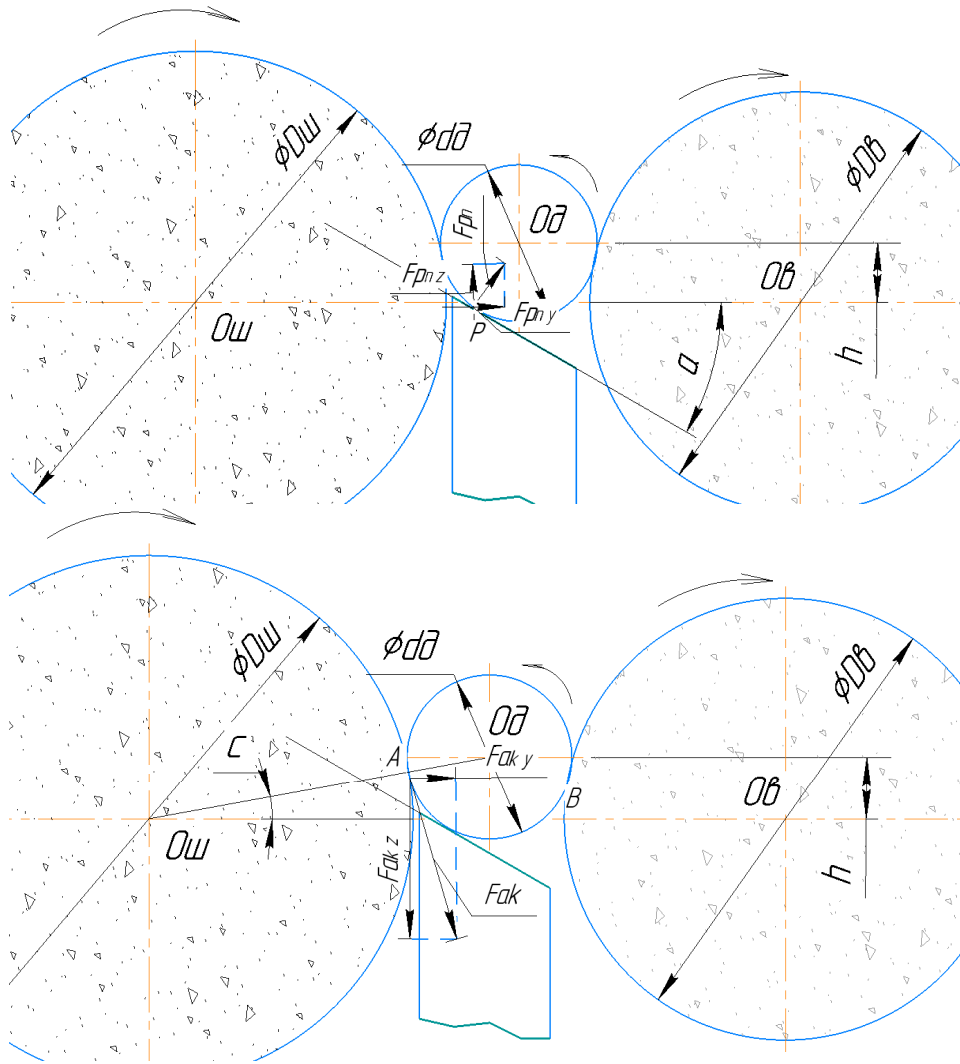


Рис. 4. Нормальные и тангенциальные составляющие сил, действующих в месте контакта обрабатываемой поверхности и шлифовального круга:

$$F_{an\,z} = F_{an} \times \cos c ; F_{an\,y} = F_{an} \times \cos(90^\circ - c) ;$$

$$F_{ak\,y} = F_{ak} \times \cos c ; F_{ak\,z} = F_{ak} \times \cos(90^\circ - c)$$

Аналогичным образом установлены зависимости для определения составляющих сил для случаев расположения центров кругов не на одной горизонтальной линии на оси Y и Z с учетом угла наклона линии, соединяющей центры кругов к горизонтальной плоскости (d).

Представленные выражения в совокупности с исследованиями, связанными с определением мест контакта обрабатываемой поверхности с технологическими элементами оснастки, позволяют сформировать уточненную силовую схему воздействия на обрабатываемую деталь и обеспечивают переход к методической разработке определения значений, возникающих в процессе реализации проходного бесцентрового шлифования сил.

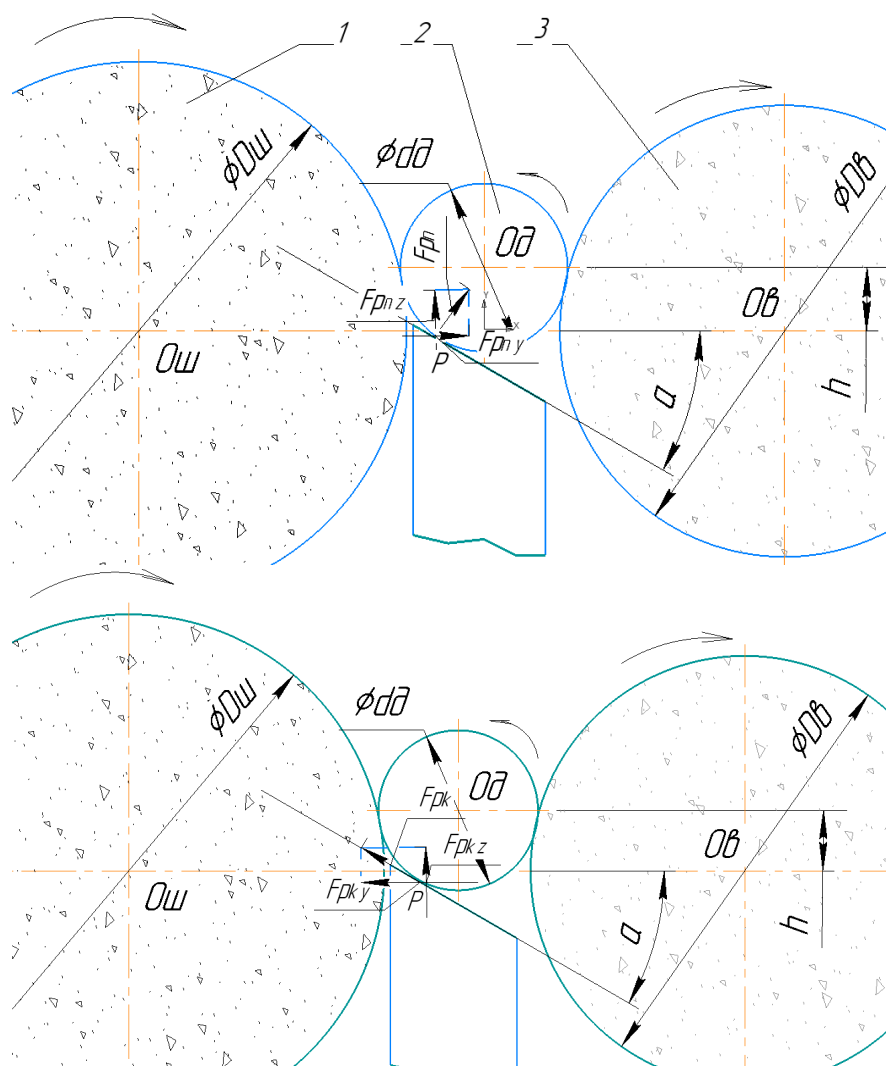


Рис. 5. Нормальные и тангенциальные составляющие сил, действующих в месте контакта обрабатываемой поверхности и плоскости опорного ножа

$$F_{pn\ y} = F_{pn} \times \cos(90^\circ - \alpha); F_{pn\ z} = F_{pn} \times \cos \alpha;$$

$$F_{pk\ y} = F_{pk} \times \cos \alpha; F_{pk\ z} = F_{pk} \times \cos(90^\circ - \alpha)$$

В месте контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом:

$$F_{bk} = \frac{T_b \times \beta}{f \times D_b}; F_{bn} = \frac{2D_b \times T_b}{D_b},$$

где T_b – крутящий момент ведущего круга; β – коэффициент сцепления; f – коэффициент трения; D_b – диаметр ведущего круга.

В месте контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа:

$$F_{pk} = \tau \times \sin(90^\circ - \alpha); F_{pn} = \sigma \times \cos(90^\circ - \alpha),$$

$$\tau = \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \times e^{\frac{n}{1.5} \ln k}, \quad k = \left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{4 + \varepsilon^2} \right).$$

где σ – среднее нормальное напряжение; σ_o – условный предел текучести; ε – относительный сдвиг; τ – среднее касательное напряжение; n – коэффициент, отражающий свойства материала.

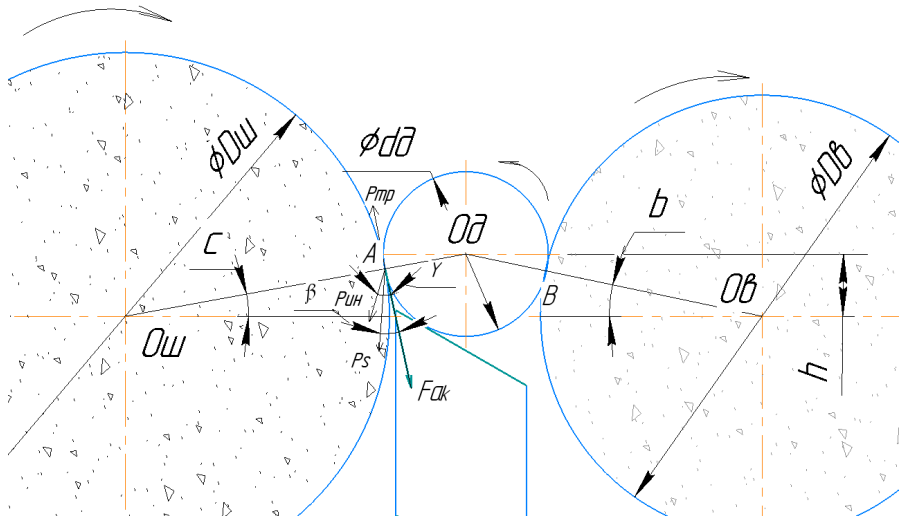


Рис. 6. Схема сил при микрорезании единичным абразивным зерном при бесцентровом шлифовании наружных цилиндрических поверхностей

В месте контакта обрабатываемой поверхности со шлифовальным кругом:

$$F_{ak} = \frac{T_a \times \beta}{f \times D_{ш}}; \quad F_{an} = \frac{2D_{ш} \times T_a}{D_{ш}},$$

где T_a – крутящий момент шлифовального круга; $D_{ш}$ – диаметр шлифовального круга.

Применен расчетно-экспериментальный метод поэлементного расчета силы резания, действующей на единичное зерно, нахождения числа зерен, совершающих работу стружкообразования в пределах контакта круга с заготовкой, числа зерен, совершающих работу упруго пластической деформации, расчета значения действующих на них сил резания, суммирования полученных значений составляющих силы резания [10–12]. Возникающая сила резания – геометрическая сила двух составляющих: тангенциальной и нормальной. Каждая составляющая включает в себя: силу сдвига F_{aks} , силу трения $F_{актр}$, инерционную силу стружки $F_{акин}$:

$$F_{akzs} = \frac{\tau_s \times F_{cp} \times \sin(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \times \sin \varphi_s}, \quad F_{akys} = \frac{\tau_s \times F_{cp} \times \cos(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \times \sin \varphi_s};$$

$$F_{akzтр} = \sigma_{cp} \frac{\pi \times b^2}{4}, \quad F_{akyтр} = \frac{\pi \times \tau_s \times \rho \times a_z}{\mu_s};$$

$$F_{akz\text{ ин}} = F_{\text{ср}} \times q_m \times V_{\text{кр}}^2 \left[\frac{1 - \sin \beta \times \sin \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} \right];$$

$$F_{aky\text{ ин}} = F_{\text{ср}} \times q_m \times V_{\text{кр}}^2 \left[\frac{\sin \beta \times \sin \gamma}{\cos(\beta - \gamma)} \right],$$

где τ_s – напряжение сдвига; $F_{\text{ср}}$ – площадь сечения среза; $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение; b – диаметр площадки износа режущих кромок в круге; ρ – средний радиус округления вершин зерен в круге; a_z – глубина резания; μ_s – коэффициент внешнего трения на задней поверхности зерна; $\varphi_s = \tan^{-1}(\mu_s)$ – угол трения; q_m – плотность материала.

Поэлементный расчет составляющих сил резания выполняется с учетом разделения сил, действующих на зерна, совершающие пластическую деформацию металла и режущих зерен [10]. Число зерен, находящихся в контакте с обрабатываемой поверхностью и приходящихся на единицу площади рабочей поверхности круга [11, 12], зависит от поперечной подачи, диаметра круга, глубины резания и длины дуги контакта.

Результаты

Представленные зависимости позволили на основе развития известных в настоящее время результатов научных исследований создать обобщенную модель расчета составляющих сил резания и взаимодействия обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы при проходном бесцентровом шлифовании во всех поперечных сечениях зоны обработки деталей. Важным является установление возникающих в процессе обработки сложных взаимосвязей между всеми составляющими сил и учет множества факторов, влияющих на них: размерные характеристики обрабатываемой поверхности и элементов технологической системы во всем пространстве рабочей зоны; структура и материал абразивного зерна шлифовального круга; материал ведущего круга; частоты вращения ведущего и шлифовальных кругов; относительная скорость резания абразивными зернами для рассматриваемого случая попутного шлифования; режущая способность шлифовального круга; наладочные размеры; форма ведущего круга; использование технологических жидкостей; материал и величина припусков обрабатываемой детали.

Обсуждение

Результаты исследований, представленные в статье, кроме возможности самостоятельного научно-практического использования при наладке оборудования и назначения режимов обработки имеют значение для создания целостной системной формализованной модели, обеспечивающей автоматизацию всего комплекса проектных процедур технологической подготовки и реализации операций проходного бесцентрового шлифования. Они позволяют совершенствовать подходы к разработке математических моделей, описывающих методики, связанные с обеспечением стабильности протекания процесса бесцентрового шлифования и формирования условий устойчивого вращения обрабатываемой детали.

Заключение

Методический подход, заключающийся в анализе составляющих сил, возникающих в местах контакта обрабатываемой детали с элементами технологической системы, позволяет установить взаимозависимости между ними и сформировать систему формализованных моделей влияния широкого комплекса факторов на качественные показатели и технико-экономические характеристики проходного бесцентрового шлифования. Представленные зависимости обеспечивают объективное установление с учетом реального состояния и конструктивных особенностей оборудования и средств технологического оснащения рациональных параметров настройки и управления реализацией проходных бесцентрово-шлифовальных операций.

Список литературы

1. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Сулова. М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. Слонимский В. И. Теория и практика бесцентрового шлифования. 2-е изд., перераб. и доп. М. ; Л. : Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1952. 286 с.
3. Черпаков Б. И., Годович Г. М., Волков Л. П., Прохоров А. Ф. Бесцентровые круглошлифовальные станки. М. : Машиностроение, 1973. 169 с.
4. Муцянюк В. И. Бесцентровое шлифование. М. : Машиностроение [Ленингр. отд-ние], 1986. 95 с.
5. Васильев А. С., Дальский А. М., Золотаревский Ю. М., Кондаков А. И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / под ред. А. И. Кондакова. М. : Машиностроение, 2005. 352 с.
6. Ашкиназий Я. М. Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкция, обработка и правка. М. : Машиностроение, 2003. 352 с.
7. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 8 (267). С. 36–39.
8. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Ульянова Л. Д., Шалунов В. В. Совершенствование технологической подготовки операций бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4. С. 147–160.
9. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Определение наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 144–153.
10. Зубарев Ю. М., Приемышев А. В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. СПб. : Лань, 2010. 304 с.
11. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М. : Машиностроение, 1974. 279 с.
12. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. Л. : Машиностроение, 1979. 246 с.

References

1. Suslov A.G. (ed.). *Spravochnik tekhnologa = Reference book of production engineer*. Moscow: Innovatsionnoe mashi-nostroenie, 2019:800. (In Russ.)
2. Slonimskiy V.I. *Teoriya i praktika bestsentrovogo shlifovaniya. 2-e izd., pere-rab. i dop. = Theory and practice of centerless grinding. The 2nd edition, revised and supplemented*. Moscow; Leningrad: Mashgiz. [Leningr. otd-nie], 1952:286. (In Russ.)
3. Cherpakov B.I., Godovich G.M., Volkov L.P., Prokhorov A.F. *Bestsentrovye krugloshlifoval'nye stanki = Centerless cylindrical grinding machines*. Moscow: Mashi-nostroenie, 1973:169. (In Russ.)

4. Mutsyanko V.I. *Bestsentrovoye shlifovanie = Centerless grinding*. Moscow: Mashinostroenie [Leningr. otd-nie], 1986:95. (In Russ.)
5. Vasil'ev A.S., Dal'skiy A.M., Zolotarevskiy Yu.M., Kondakov A.I. *Napravlennoe formirovanie svoystv izdeliy mashinostroeniya = Directed formation of properties of mechanical engineering products*. Moscow: Mashinostroenie, 2005:352. (In Russ.)
6. Ashkinaziy Ya.M. *Bestsentrovye shlifoval'nye stanki. Konstruktsiya, obrabotka i pravka = Centerless grinding machines. Construction, processing and editing*. Moscow: Mashinostroenie, 2003:352. (In Russ.)
7. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Structuring of centerless grinding methods using cluster analysis. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University*. 2022;(8):36–39. (In Russ.)
8. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Ul'yanova L.D., Shalunov V.V. Improving the technological preparation of centerless grinding operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(4):147–160. (In Russ.)
9. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Determination of agjustment parameters for continuous centerless grinding operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(3):144–153. (In Russ.)
10. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. *Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov = Theory and practice of increasing the efficiency of grinding materials*. Saint Petersburg: Lan', 2010:304. (In Russ.)
11. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley = Performance of steel grinding process*. Moscow: Mashinostroenie, 1974:279. (In Russ.)
12. Filimonov L.N. *Vysokoskorostnoye shlifovanie = High speed grinding*. Leningrad: Mashinostroenie, 1979:246. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Витальевич Малинин

аспирант, Камышинский
технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного
технического университета (Россия,
г. Камышин, ул. Ленина, 6А)

E-mail: mpv92@yandex.ru

Pavel V. Malinin

Postgraduate student, Kamyshin
Technological Institute (branch)
Volgograd State Technical University
(6A Lenina street, Kamyshin, Russia)

Петр Юрьевич Бочкарев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
машиностроения и прикладной механики,
Камышинский технологический
институт (филиал) Волгоградского
государственного технического
университета (Россия, г. Камышин,
ул. Ленина, 6А); профессор кафедры
технического обеспечения АПК,
Саратовский государственный
университет генетики, биотехнологии
и инженерии имени Н. И. Вавилова
(Россия, г. Саратов, ул. Советская, 60)

E-mail: bpy@mail.ru

Petr Yu. Bochkarev

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of engineering technology and applied
mechanics, Kamyshin Technological
Institute (branch) Volgograd State
Technical University (6A Lenina street,
Kamyshin, Russia); professor
of the sub-department of technical
support of the agro-industrial complex,
Saratov State University of Genetics,
Biotechnology and Engineering named
after N.I. Vavilov (60 Sovetskaya street,
Saratov, Russia)

Игорь Иосифович Артемов

доктор технических наук, профессор,
директор Научно-исследовательского
института фундаментальных
и прикладных исследований, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

Igor' I. Artemov

Doctor of engineering sciences, professor,
director of the Research Institute
of Fundamental and Applied Research,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Михаил Олегович Гончаров

инженер, Саратовский государственный
университет генетики, биотехнологии
и инженерии имени Н. И. Вавилова
(Россия, г. Саратов,
ул. Советская, 60)

E-mail: mixgoncharov@gmail.com

Mikhail O. Goncharov

Engineer, Saratov State University
of Genetics, Biotechnology and Engineering
named after N.I. Vavilov (60 Sovetskaya
street, Saratov, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.09.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 24.10.2023

Принята к публикации / Accepted 18.11.2023

УДК 621.81: 621.88

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-15

Рациональное обеспечение функциональных свойств соединений с натягом при индивидуальной селективной сборке

И. И. Воячек¹, Д. В. Кочетков², А. С. Илюхин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru, ³tmshpu@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сборку партий соединений с натягом (ССН) можно осуществлять различными способами. Индивидуальная селективная сборка (ИСС) имеет ряд преимуществ по сравнению с обычной случайной сборкой и групповой селективной сборкой. Технология ИСС изучена недостаточно, хотя ее применение при мелкосерийном и среднесерийном производстве весьма перспективно. Статья посвящена выявлению преимуществ ИСС. *Материалы и методы.* Путем компьютерного статистического моделирования исследуются различные способы сборки партий ССН и новый подход к проектированию ССН при ИСС, также используются аналитические методы. *Результаты.* Проведено статистическое моделирование различных способов сборки партий ССН, проведена их сравнительная оценка. Выявлены преимущества ИСС, предложен новый подход к проектированию ССН при ИСС, позволяющий снизить уровень натягов в соединении и расширить допуски на размеры сопрягаемых деталей. Предлагается использовать технологию упрочнения путем применения анаэробных материалов для тех ССН, которые не обладают заданной прочностью. *Выводы.* При применении ИСС существует возможность рационально обеспечить заданные функциональные требования к ССН, снизить себестоимость изготовления соединяемых деталей при незначительном увеличении затрат на реализацию ИСС с упрочнением путем применения анаэробных материалов.

Ключевые слова: соединения с натягом, организация сборки, селективная сборка, проектирование, упрочнение, анаэробные материалы

Для цитирования: Воячек И. И., Кочетков Д. В., Илюхин А. С. Рациональное обеспечение функциональных свойств соединений с натягом при индивидуальной селективной сборке // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 160–171. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-15

Rational provision of functional properties of interference joints during individual selective assembly

I.I. Voyachek¹, D.V. Kochetkov², A.S. Ilyukhin³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹voyachek@list.ru, ²denis.kochetkov80@yandex.ru, ³tmshpu@mail.ru

Abstract. *Background.* Assembling batches of interference joints can be carried out in various ways. Individual selective assembly (ISA) has a number of advantages over conventional random assembly and group selective assembly. ISA technology has not been sufficiently studied, although its use in small-scale and medium-scale production is very promising. The article is devoted to identifying the benefits of ISA. *Materials and methods.* By means of computer statistical modeling, various methods for assembling batches of inter-

ference joints and a new approach to the design of interference joints in ISA are investigated, and analytical methods are also used. *Results.* Statistical modeling of various methods for assembling batches of interference fit joints was carried out, and their comparative assessment was carried out. The advantages of ISA have been revealed, and a new approach to the design of joints with interference in ISA has been proposed, which makes it possible to reduce the level of interference in the connection and expand the tolerances on the dimensions of mating parts. It is proposed to use strengthening technology by using anaerobic materials for those tension connections that do not have the specified strength. *Conclusions.* Using ISA, it is possible to rationally ensure the specified functional requirements for joints with interference, reduce the cost of manufacturing the parts to be connected with a slight increase in the cost of implementing ISA with strengthening through the use of anaerobic materials.

Keywords: interference connections, assembly organization, selective assembly, design, strengthening, anaerobic materials

For citation: Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Ilyukhin A.S. Rational provision of functional properties of interference joints during individual selective assembly. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):160–171. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-15

Введение

При изготовлении партий соединений с натягом (СН) реализуются два случайных процесса, оказывающих решающее влияние на параметры соединений, их вариацию и, естественно, на уровень дефектности партии:

1. Случайное распределение сопрягаемых размеров деталей в партии при изготовлении.
2. Случайное сочетание пар деталей при сборке.

Отметим, что влияние указанных выше случайных процессов на уровень дефектности в партии СН полностью исключается при их проектировании и изготовлении на основе метода полной взаимозаменяемости при условии нахождения сопрягаемых размеров деталей в пределах допуска.

При проектировании соединений с натягом методом полной взаимозаменяемости применяется стандартная методика [1–3], согласно которой определяется минимально необходимый расчетный натяг $N_{\min}^P$ для передачи эксплуатационной нагрузки P , с заданным запасом прочности (коэффициент n_3) $P = n_3 P_3$. Затем выбирается стандартная посадка с натягом по условию (метод полной взаимозаменяемости) $N_{\min}^n \geq N_{\min}^P$, где $N_{\min}^n$ – минимальный натяг посадки. Таким образом, практически все соединения с натягом в партии деталей, у которых действительный натяг находится в диапазоне $N_{\min}^n < N_d \leq N_{\max}^n$, имеют избыточный запас прочности. При максимальных натягах посадки коэффициент запаса прочности может достигать значений $n_{\max} = (3 \dots 4)n_3$. Это приводит к повышенным затратам при сборке СН из-за неоправданного увеличения усилия запрессовки или энергозатрат при поперечной сборке. Часто СН с большими натягами невозможно собрать из-за пластических деформаций деталей и схватывания сопрягаемых поверхностей при сборке.

Уменьшить влияние случайного распределения сопрягаемых размеров деталей в партии на изменение натяга можно путем повышения статистической стабильности технологических процессов их изготовления, исключения особых причин изменчивости, достижения идентичного закона распределе-

ния сопрягаемых размеров соединяемых деталей. Этот путь достаточно труден, затратен и связан с совершенствованием технологических процессов изготовления деталей ССН.

Управление сочетанием пар деталей при сборке более эффективно. С этой целью разработана методика групповой селективной сборки (ГСС) [4], согласно которой детали сортируют по действительным сопрягаемым размерам на n групп (допуск делится на n частей). Собираются детали из парных групп, причем внутри группы сопрягаемые пары комплектуются случайным образом. Таким образом, рассеивание натяга уменьшается по сравнению с обычной случайной сборкой по крайней мере в n раз. Однако процесс ГСС имеет существенный недостаток – незавершенное производство, возникающее из-за различия распределения сопрягаемых размеров вала и отверстия в партии, когда в парных группах оказывается разное количество деталей. Чтобы обеспечить заданный объем партии ССН, необходимо изготавливать увеличенное количество деталей.

Если предположить, что количество групп увеличивается до объема партии, то реализуется индивидуальная селективная сборка (ИСС). Технология ИСС изучена недостаточно, однако ИСС имеет ряд преимуществ, и ее применение, особенно в мелкосерийном и среднесерийном производстве, может быть весьма эффективным.

Статистическое моделирование и сравнительная оценка процессов организации сборки партий ССН

На рис. 1 показана схема формирования натягов в партии сборочных единиц при реализации указанных выше случайных процессов. Для простоты и наглядности предполагается, что распределения размеров валов и отверстий подчиняются закону Гаусса, хотя данная схема применима к любому распределению размеров.

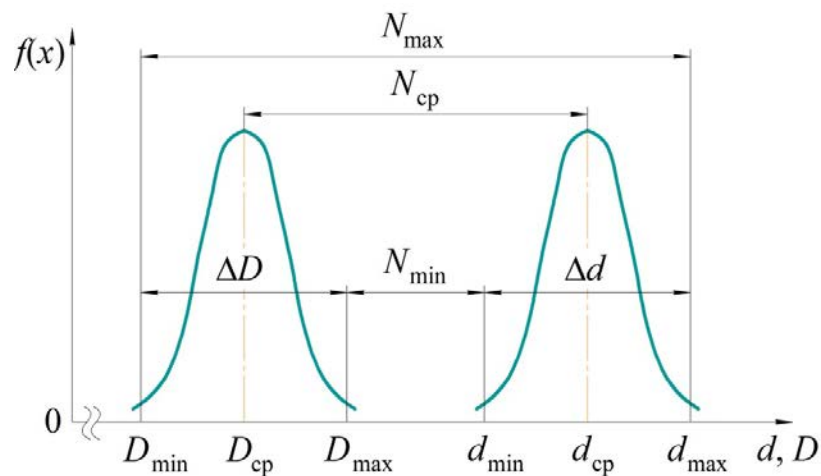


Рис. 1. Схема формирования натягов в партии сборочных единиц

Максимально возможное изменение натяга в партии ССН:

$$\Delta N = N_{\max} - N_{\min} = \Delta d + \Delta D,$$

где ΔN , Δd и ΔD – изменение натяга, диаметра вала и диаметра отверстия в партии.

Средний натяг в партии находится как разность средних размеров валов $d_{\text{ср}}$ и отверстий $D_{\text{ср}}$:

$$N_{\text{ср}} = d_{\text{ср}} - D_{\text{ср}}.$$

Максимально возможное изменение натяга в партии ССН, связанное с назначаемыми квалитетами на сопрягаемые размеры деталей и допуском посадки:

$$TN = N_{\text{max}}^{\text{п}} - N_{\text{min}}^{\text{п}} = Td + TD,$$

где TN – допуск посадки; $N_{\text{max}}^{\text{п}}$ и $N_{\text{min}}^{\text{п}}$ – минимальный и максимальный натяги посадки; Td и TD – допуски вала и отверстия.

В связи с тем, что появление предельных допускаемых размеров деталей в партии маловероятно, а также маловероятно их сочетание в сборочной единице, то практически всегда действительное изменение натяга ($\Delta N_{\text{д}}$): $\Delta N_{\text{д}} < \Delta N < TN$.

Данная работа посвящена сравнительной оценке различных организационных способов сборки партий ССН: обычная случайная сборка, групповая селективная сборка и индивидуальная селективная сборка. Применялась методика статистического моделирования процессов сборки в приложении *Excel*.

Основной задачей при реализации ИСС является разработка эффективной технологии подбора пар деталей на основе критерия минимальной разности (по абсолютной величине) их сопрягаемых размеров. При статистическом анализе используются вариационные ряды массивов данных, в частности, от минимального к максимальному размеру. Предлагается при ИСС сортировку деталей также вести на основе вариационных рядов их сопрягаемых размеров и в сборочные единицы комплектовать детали с одинаковыми номерами в вариационных рядах.

Моделирование проводилось по следующему алгоритму:

1. Проводился расчет и выбор стандартной посадки с натягом, определялись параметры сопрягаемых деталей и натягов в посадке.

Выбрана посадка $\text{Ø}30\text{H}7/\text{u}7$, которая имеет следующие параметры: минимальный и максимальный натяги $N_{\text{min}}^{\text{п}} = 0,027$ мм, $N_{\text{max}}^{\text{п}} = 0,069$ мм; средний натяг $N_{\text{м}}^{\text{п}} = 0,048$ мм; допуск посадки $TN = 0,042$ мм. В соответствии с назначенными допусками для вала – минимальный и максимальный размеры: $d_{\text{min}} = 30,048$ мм, $d_{\text{max}} = 30,069$ мм; средний размер $d_{\text{м}} = 30,0585$ мм; допуск $Td = 0,021$ мм; расчетное стандартное отклонение $S_d = Td/6 = 0,0035$ мм; для отверстия: $D_{\text{min}} = 30,0$ мм; $D_{\text{max}} = 30,021$ мм; $D_{\text{м}} = 30,0105$ мм; $TD = 0,021$ мм; $S_D = TD/6 = 0,0035$ мм.

Важным для дальнейших исследований является расчетное значение натяга, связанное с передачей заданной эксплуатационной нагрузки, которое равно $N_{\text{р}} = 0,027$ мм.

2. В приложении *Excel* в соответствии с нормальным и равномерным распределениями размеров, которые наиболее часто встречаются при изго-

товлении деталей в пределах 5–8 квалитетов, с помощью генератора случайных чисел формировались массивы размеров диаметров вала и отверстия во втулке в пределах указанных выше допусков (по две генерации, объем партии 30 шт.). Определялись статистические параметры распределений: средние, минимальные, максимальные значения размеров, размахи, стандартные отклонения.

3. При обычной сборке сопрягаемые пары деталей формировались случайным образом, в частности, в соответствии с порядком генерации чисел, соответствующих их сопрягаемым размерам.

4. При моделировании ИСС массивы размеров деталей располагались в виде вариационных рядов и сборочные единицы формировались в соответствии с одинаковыми порядковыми номерами вариационного ряда.

5. Определялись статистические параметры распределения натягов в партии сборочных единиц (табл. 1, параметры двух генераций разделены знаком //).

6. При моделировании групповой селективной сборки допуски сопрягаемых деталей делились на 5 и 3 интервала, определялись количество размеров (деталей) в каждом интервале (группе) и объем незавершенного производства.

В табл. 1 представлены статистические данные по натягам.

Для наглядности результаты компьютерного статистического моделирования распределения натягов в партии ССН представлены на рис. 2.

По результатам моделирования (табл. 1 и 2, рис. 2) можно сделать следующие выводы:

1. При обычной случайной сборке и равномерном распределении размеров деталей может существенно увеличиваться диапазон изменения натяга, а средний натяг в партии ССН может смещаться относительно среднего натяга посадки.

2. При ИСС по сравнению с обычной сборкой существенно уменьшается диапазон изменения натягов (в 3,8–8,1 раза в зависимости от вида и относительного смещения распределения размеров деталей).

3. Диапазон вариации натягов в партии при ИСС уменьшается относительно допуска посадки TN в 4,6–10,5 раза в зависимости от вида и относительного смещения распределения размеров деталей. При этом натяг варьируется относительно среднего натяга посадки в достаточно узком интервале.

4. При ИСС имеется возможность выбирать стандартную посадку, у которой минимальный натяг меньше расчетного значения, а максимальный натяг больше расчетного значения, что связано с минимальной вероятностью появления в партии ССН минимальных и максимальных значений натягов выбранной посадки. При этом проектирование ССН методом полной взаимозаменяемости и даже теоретико-вероятностным методом [3] нецелесообразно.

5. При моделировании подтверждено, что при групповой селективной сборке остается значительное количество соединений в незавершенном производстве (табл. 2), от 4 до 24 соединений из 30 (в зависимости от вида распределения). Объем незавершенного производства снижается при уменьшении количества групп.

Таблица 1
Результаты компьютерного статистического моделирования распределения натягов в партии ССН, посадка Ø30H7/u7

Статистические параметры натягов, мм	Обычная случайная сборка		Индивидуальная селективная сборка	
	Нормальное распределение	Равномерное распределение	Нормальное распределение	Равномерное распределение
1	2	3	4	5
Средний натяг	0,0488 // 0,0474	0,0439 // 0,0477	0,0488 // 0,0474	0,0439 // 0,0477
Минимальный / максимальный натяги	0,0340/0,0580 // 0,0332/0,0596	0,0306/0,0660 // 0,0295/0,06	0,0456/0,0511 // 0,0458/0,0506	0,0402/0,0494 // 0,0453/0,0493
Диапазон изменения натяга	0,024 // 0,0264	0,0354 // 0,0325	0,0055 // 0,0048	0,0092 // 0,004
Изменение натяга относительно среднего натяга посадки	0,048 (+0,01, -0,014) // (+0,012, -0,0148)	0,048 (+0,018, -0,0174) // (+0,014, -0,0186)	0,048 (+0,0031, -0,0024) // (+0,0026, -0,0022)	0,048 (+0,0014, -0,0078) // (+0,0013, -0,0027)

Таблица 2
Количество сборочных единиц в незавершенном производстве при групповой селективной сборке

Количество групп сортировки	Нормальное распределение	Равномерное распределение
Пять групп	10 // 16	24 // 6
Три группы	4 // 8	22 // 2

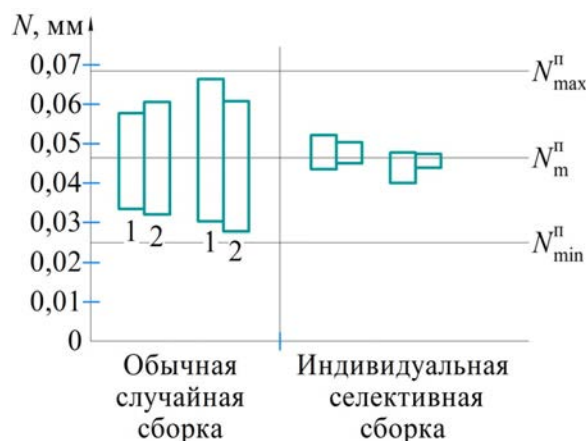


Рис. 2. Изменение действительного (измеренного) натяга в партии ССН по отношению к параметрам посадки (посадка Ø30H7/u7)

Новый подход к проектированию ССН при ИСС партий соединений

Согласно системе конструкторско-технологического обеспечения качества неподвижных соединений, разработанной И. И. Воячком [3], для рационального обеспечения свойств соединений необходимо учитывать взаимовлияние их конструкции и технологии сборки. Если предположить, что при сборке ССН будет применяться технология сборки и упрочнения ССН с применением анаэробных материалов (АМ), то можно существенно снизить уровень натягов в посадке, стабилизировать прочность ССН в партии и снизить затраты на упрочнение и сборку.

На основе проведенных исследований был сделан вывод, что при ИСС натяг в сборочных единицах стремится к среднему значению в посадке, причем варьируется в достаточно узком интервале значений. Предлагается новый подход к проектированию ССН при ИСС. Выбор стандартной посадки следует вести не по минимальному натягу, а по среднему натягу посадки, т.е. $N_p \approx N_m$.

При этом предполагается, что соединения, у которых не реализуется условие прочности, можно упрочнить путем применения при сборке анаэробных материалов [3, 5–7], причем при ИСС количество соединений, требующих упрочнения, будет минимальным.

Для подтверждения возможности реализации нового подхода к проектированию ССН при ИСС проводился статистический анализ процесса сборки при следующих исходных данных.

Расчетный натяг соответствует предыдущему примеру $N_p = 0,027$ мм. Выбрана стандартная посадка с натягом Ø30H8/s7, которая имеет следующие параметры: $d_{\min} = 30,035$ мм, $d_{\max} = 30,056$ мм; $d_m = 30,0455$ мм; допуск $Td = 0,021$ мм; $S_d = Td/6 = 0,0035$ мм; $D_{\min} = 30$ мм, $D_{\max} = 30,033$ мм, $D_m = 30,0165$ мм, $TD = 0,033$ мм, $S_D = TD/6 = 0,0055$ мм; $N_{\min}^n = 0,002$ мм, $N_{\max}^n = 0,056$ мм; $N_m^n = 0,029$ мм; $TN = 0,054$ мм. Таким образом, средний натяг посадки $N_m \approx N_p$ (превышение составляет 0,002 мкм).

При компьютерном статистическом моделировании дополнительно определялось количество соединений с натягами меньше расчетного значения на определенную величину. В табл. 3 представлены результаты компьютерного статистического моделирования распределения натягов в партии ССН.

Таблица 3
Результаты компьютерного статистического моделирования распределения натягов в партии ССН, посадка Ø30H8/s7

Статистические параметры натягов, мм	Обычная случайная сборка		Индивидуальная селективная сборка	
	Нормальное распределение	Равномерное распределение	Нормальное распределение	Равномерное распределение
Средний натяг	0,0307 // 0,0295	0,0257 // 0,0308	0,0307 // 0,0295	0,0257 // 0,0308
Минимальный/ максимальный натяги	0,0153/0,0459 //	0,0061/0,0468 //	0,0268/0,0332 //	0,0230/0,0328 //
Диапазон изменения натяга	0,0157/0,0422	0,0051/0,0529	0,0254/0,0364	0,0240/0,0384
Изменение натяга относительно среднего натяга посадки	0,0306 // 0,0265	0,0407 // 0,0478	0,0064 // 0,0110	0,0098 // 0,0144
Изменение натяга относительно расчетного натяга	0,029 (+0,0169, -0,0137) //	0,029 (+0,0178, -0,0229) //	0,029 (+0,0042, -0,0022) //	0,029 (+0,0038, -0,0006) //
	(+0,0132, -0,0134)	(+0,0239, -0,0239)	(+0,0073, -0,0036)	(+0,0095, -0,0049)
	0,027 (+0,0189, -0,0117) //	0,027 (+0,0198, -0,0209) //	0,027 (+0,0062, -0,0002) //	0,027 (+0,0058, -0,0004) //
	(+0,0152, -0,0114)	(+0,00259, -0,0219)	(+0,0093, -0,0016)	(+0,0115, -0,0029)

По результатам моделирования (табл. 3 и 4) можно сделать следующие выводы:

1. Подтверждено, что при ИСС по сравнению с обычной случайной сборкой существенно уменьшается диапазон рассеивания натягов от 2,4 до 4,8 раза в зависимости от вида распределения.

2. При ИСС по сравнению с обычной случайной сборкой уменьшается количество соединений, у которых $N_i < N_p$ или формально не обеспечивается условие прочности (от 1,33 до 8 раз при нормальном распределении). При равномерном распределении размеров (первая реализация, табл. 4) реализовался маловероятный вариант, когда при ИСС условие $N_i < N_p$ встречалось чаще, чем при случайной сборке. Это связано с тем, что размеры отверстий были существенно сдвинуты в сторону больших значений, чем размеры вала (рис. 3 и 4).

Таблица 4

Количество соединений с натягами меньше
расчетного значения на определенную величину

Способ сборки партий соединений с натягом	Вид распределений размеров деталей	Разность расчетного натяга и натяга в конкретном соединении		
		$N_p - N_i \geq 0$	$N_p - N_i \geq 1$ мкм	$N_p - N_i \geq 3$ мкм
Обычная случайная сборка	Нормальное	8 // 12	8 // 10	5 // 7
	Равномерное	18 // 13	16 // 11	14 // 7
Индивидуальная селективная сборка	Нормальное	1 // 9	0 // 3	0 // 0
	Равномерное	25 // 7	20 // 5	2 // 0

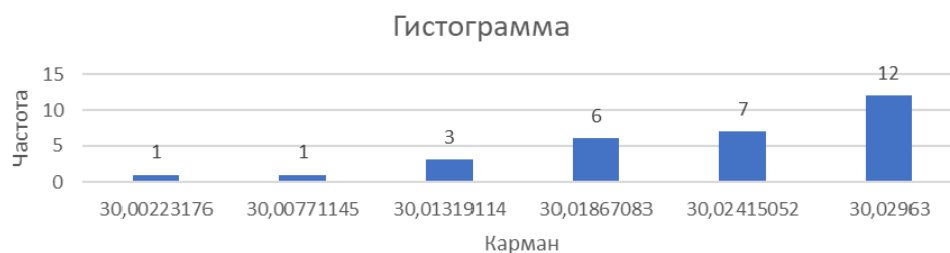


Рис. 3. Действительное распределение размеров отверстия
в соответствии с равномерным законом распределения



Рис. 4. Действительное распределение размеров вала в соответствии
с равномерным законом распределения

3. Рекомендуется упрочнение ССН реализовывать только в том случае, когда $N_p - N_i \geq 3$ мкм или отличие натяга в сборочной единице составляет больше 10 % от уровня расчетного натяга, так как при определении расчетного натяга применяется существенный коэффициент запаса прочности. При ИСС условие $N_p - N_i \geq 3$ мкм реализуется только у двух соединений (из 60), требующих упрочнения (табл. 4).

Соединения, у которых не реализуется условие прочности, предлагается упрочнять путем применения анаэробных материалов, которые наносятся на сопрягаемые поверхности при сборке [3, 5–7] и полимеризуются в зоне контакта деталей без доступа воздуха. По формуле можно определить рациональную длину соединения l_i , где в зоне контакта должен находиться АМ:

$$l_i = \frac{l p_{\min} f (N_p - N_i)}{N_p \tau_m k},$$

где l – посадочная длина соединения; $p_{\min}$ – расчетное минимально допустимое контактное давление, необходимое при передаче нагрузки и определяемое по известной методике [1–3]; f – коэффициент трения; τ_m – сдвиговая прочность упрочняющего АМ; $k = 0,5 \dots 0,7$ – коэффициент, учитывающий долю номинальной площади контакта деталей, где находится АМ.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что несмотря на определенные дополнительные затраты на измерение и подбор пар деталей индивидуальная селективная сборка партий ССН имеет следующие преимущества.

По сравнению с обычной случайной сборкой при ИСС существенно (в несколько раз) уменьшается диапазон изменения натягов в партии сборочных единиц, натяги в конкретной сборочной единице стремятся к среднему, наиболее вероятному, значению натяга в посадке, что позволяет реализовать новый подход к проектированию ССН.

В отличие от групповой селективной сборки при ИСС полностью отсутствует незавершенное производство.

Как и при ГСС, можно существенно расширить допуски на изготовление сопрягаемых деталей, что компенсирует некоторое увеличение затрат на измерение деталей и реализацию ИСС. Однако, в отличие от групповой селективной сборки, при ИСС полностью отсутствует незавершенное производство.

Так как натяги в сборочных единицах партии при ИСС стремятся к среднему значению в посадке, то предлагается новый подход к проектированию ССН, ориентированный на соответствие расчетного значения натяга и среднего натяга посадки. При этом предполагается упрочнение определенной части соединений путем применения анаэробных материалов. Однако при ИСС с использованием вариационных рядов для подбора пар упрочнение требуется для незначительной части соединений. Предлагается упрочнять соединения, у которых натяги отличаются от расчетного значения более чем на 10 %, что существенно уменьшает дополнительные затраты и не приводит

к снижению надежности соединений из-за запаса прочности, который назначается при проектировании.

Список литературы

1. Орлов П. И. Основы конструирования : справочно-методическое пособие : в 2 кн. 3-е изд. М. : Машиностроение, 1988. Кн. 2. 544 с.
2. Палей М. А., Романов А. Б., Брагинский В. А. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. 9-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2011. Ч. 1. 530 с.
3. Воячек И. И. Обеспечение качества неподвижных соединений на основе интеграционной системы конструкторско-технологического проектирования : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Пенза, 2006. 401 с.
4. Бонч-Осмоловский М. А. Селективная сборка. М. : Машиностроение, 1974. 142 с.
5. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Митясов С. Г. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. № 2. С. 192–204.
6. Воячек И. И., Кочетков Д. В., Митясов С. Г. Избирательное упрочнение соединений с натягом при сборке деталей путем запрессовки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3. С. 113–123.
7. Voyachek I. I., Kochetkov D. V., Sobrino D. R. D. [et al.]. Rational Provision of Functional Properties of Interference Fit Joints in Case of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials // Novel Trends in Production Devices and Systems V. Materials Science Forum. Switzerland : Trans Tech Publications, 2019. Vol. 952. P. 123–132. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.952.123

References

1. Orlov P.I. *Osnovy konstruirovaniya: spravochno-metodicheskoe posobie: v 2 kn. 3-e izd. = Fundamentals of design: reference manual: in 2 books. The 3rd edition.* Moscow: Mashinostroenie, 1988;Bk.2:544. (In Russ.)
2. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. *Dopuski i posadki: spravochnik: v 2 ch. 9-e izd., pererab. i dop. = Tolerances and landings: reference book: in 2 parts. The 9th edition, revised and supplemented.* Saint Petersburg: Politekhnik, 2011;Pt.1:530. (In Russ.)
3. Voyachek I.I. *Ensuring the quality of fixed connections based on an integrated system of design and technological design.* DSc dissertation: 05.02.08. Penza, 2006:401. (In Russ.)
4. Bonch-Osmolovskiy M.A. *Selektivnaya sborka = Selective assembly.* Moscow: Mashinostroenie, 1974:142. (In Russ.)
5. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Mityasov S.G. Selective hardening of pressure couplings at assemblage with anaerobic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2015;(2):192–204. (In Russ.)
6. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Mityasov S.G. Electrode termination of tightening connections while assembling the parts by wrapping. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2018;(3):113–123. (In Russ.)
7. Voyachek I.I., Kochetkov D.V., Sobrino D.R.D. et al. Rational Provision of Functional Properties of Interference Fit Joints in Case of Assembly with Implementation of Anaerobic Materials. *Novel Trends in Production Devices and Systems V. Materials Science Forum.* Switzerland: Trans Tech Publications, 2019;952:123–132. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.952.123

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Иванович Воячек

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: voyachek@list.ru

Igor' I. Voyachek

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of mechanical engineering technologies
and equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Денис Викторович Кочетков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: denis.kochetkov80@yandex.ru

Denis V. Kochetkov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of mechanical
engineering technologies and equipment,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Александр Сергеевич Илюхин

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: alex.iluhin1999@yandex.ru

Aleksandr S. Ilyukhin

Master's degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 12.07.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 24.10.2023

Принята к публикации / Accepted 26.11.2023

УДК 62-932.4

doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-16

Повышение точности настольных станков с числовым программным управлением путем применения пространственных демпферов в их станинах

Р. Д. Воронов¹, Д. Г. Левашкин², Д. Ю. Воронов³

^{1,2,3}Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

¹Smr.rom@yandex.ru, ²denis.levden@yandex.ru, ³dmitridmitrie@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель работы состоит в разработке конструкции пространственного демпфера, интегрируемого в станину настольного станка для повышения жесткости и демпфирующих способностей системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ), и обосновании целесообразности его применения. Актуальность темы обусловлена проблемным характером обеспечения и повышения жесткости металлообрабатывающих станков, особенно малогабаритных. При проектировании любого станка с возможностью обработки твердых и прочных материалов вопросы жесткости и демпфирования колебаний системы СПИЗ имеют решающее значение. Поскольку главным несущим узлом станка является его станина, то акцент был сделан именно на данный узел станка. *Материалы и методы.* Для обоснования целесообразности применения предложенного технического решения выполнен анализ математической модели станка и ее расчетной схемы исходя из сведений о металлоемкости и конструктивных особенностях рассматриваемого пространственного демпфера. Исходным материалом для исследования служит ранее разработанная конструкция станины и научный задел авторов по данному направлению. *Результаты.* Показано, что применение пространственных демпферов в станине настольного станка технически осуществимо и положительно влияет на жесткость и демпфирование всей системы СПИЗ. *Выводы.* Предложенный подход позволит изготавливать настольные станки с требуемой комбинацией показателей демпфирования и жесткости без значительных изменений в их массе и габаритах и повысить точность работы станков.

Ключевые слова: жесткость, демпфирование, интеграл, полимербетон, настольный ЧПУ-станок, точность обработки, армирующие элементы, демпфер

Для цитирования: Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Повышение точности настольных станков с числовым программным управлением путем применения пространственных демпферов в их станинах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 172–181. doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-16

Increasing the accuracy of desktop numerically controlled machines by using spatial dampers in their beds

R.D. Voronov¹, D.G. Levashkin², D.Yu. Voronov³

^{1,2,3} Tolyatti State University, Tolyatti, Russia

¹Smr.rom@yandex.ru, ²denis.levden@yandex.ru, ³dmitridmitrie@yandex.ru

Abstract. *Background.* The purpose of this work is to describe the proposed design of a spatial damper integrated into the bed of a desktop machine to increase the rigidity and

© Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

damping capabilities of the “machine – device – instrument – workpiece” system, and substantiate the feasibility of its use from a technical point of view. The relevance of the study is due to the problematic nature of ensuring and increasing the rigidity of metalworking machines, especially small ones. When designing any machine tool capable of processing hard and durable materials, the issues of rigidity and vibration damping of the “machine – device – instrument – workpiece” system are critical. Since the main load-bearing unit of the machine is its bed, the emphasis was placed on this particular unit of the machine. *Materials and methods.* To justify the feasibility of using the proposed technical solution, an analysis of the mathematical model of the machine and its design diagram was performed based on information about the metal consumption and design features of the spatial damper under consideration. The source material for the study is the previously developed design of the frame and the scientific groundwork of the authors in this area. *Results.* It has been shown that the use of spatial dampers in the bed of a table-top machine is technically feasible and has a positive effect on the stiffness and damping of the entire “machine – device – instrument – workpiece” system. *Conclusions.* The proposed approach will make it possible to manufacture desktop machines with the required combination of damping and stiffness indicators without significant changes in their weight and dimensions and to improve the accuracy of machine operation.

Keywords: rigidity, damping, synthetic grain, polymer concrete, desktop of numerically controlled machines, precision machining, reinforcing elements, damper

For citation: Voronov R.D., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Increasing the accuracy of desktop numerically controlled machines by using spatial dampers in their beds. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(4):172–181. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-4-16

Введение

Вопросы обеспечения и повышения жесткости станков являются актуальными, поскольку данная характеристика определяет точность работы и спектр возможного применения станочного оборудования. Это подтверждается современными научными исследованиями [1–3]. И если для крупногабаритных промышленных станков существует обилие конструкторских и технических решений, повышающих жесткость и демпфирование системы станка [4, 5], то для сегмента настольных металлообрабатывающих станков достижение требуемой точности ограничено их пониженной жесткостью и виброустойчивостью. В настоящее время в станкостроении используют различные композитные материалы, из которых изготавливают некоторые узлы станков [6]. Поэтому применение композитных материалов в станкостроении для повышения точности и жесткости станков является перспективным направлением, реализация которого невозможна без научных исследований. Данная работа посвящена исследованию процесса армирования станины станка, которая выполнена в виде интегрированного блока с предварительно напряженными элементами [7]. Таким образом, целью статьи является теоретическое обоснование разработанной конструкции демпфера и анализ возможностей его практического применения для повышения точности обработки на настольных станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Материалы и методы

Настоящая публикация является развитием основных теоретических положений и разработок, изложенных в работе [8], где предложен способ по-

вышения жесткости настольного станка путем внедрения в его полимербетонную станину армирующих элементов особой формы в состоянии предварительного натяга. В данной работе сохраняется концепция особой формы армирующих элементов, но, в отличие от известной конструкции, предлагается в синтеграновой станине размещать специальные закладные элементы, так называемые пространственные демпферы (рис. 1).

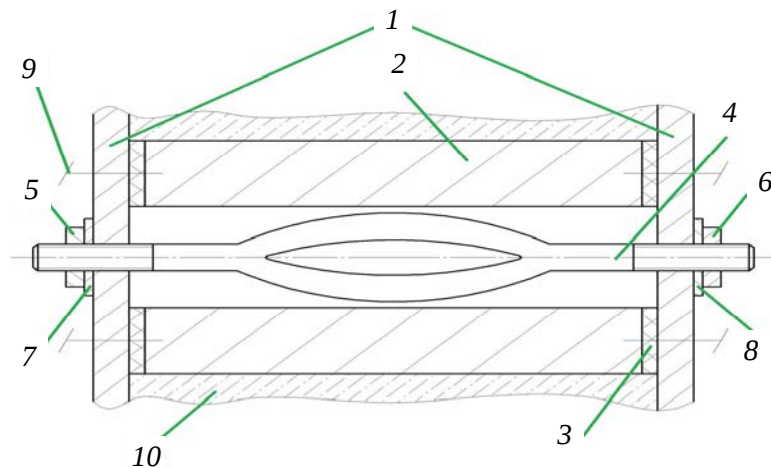


Рис. 1. Схема пространственного демпфера: 1 – базовые плиты станины; 2 – корпус-труба; 3 – уплотнение; 4 – пространственный демпфер; 5, 6 – гайки; 7, 8 – шайбы, 9 – винты, 10 – синтегран (полимербетон)

Пространственный демпфер устанавливают в отверстия, выполненные в боковых элементах станины (стальных торцах) 1 настольного фрезерного станка с ЧПУ. Пространственный демпфер имеет различную геометрию и конфигурацию в зависимости от требований по обеспечению жесткости, например, содержит жесткую часть в виде корпуса-трубы 2, уплотнения 3 и демпфирующей части, выполненной в виде пространственного демпфера 4 специальной формы. Более подробно конструктивная форма демпфера представлена на рис. 2. При этом пространственный демпфер 4 устанавливают с предварительным натягом, который создают при помощи резьбовых поверхностей демпфера (рис. 1) и гаек 5 и 6, а также шайб 7 и 8, причем торцы шайб упираются в боковые элементы станины 1 и обеспечивают силовое замыкание контура, что обуславливает повышенную жесткость конструкции и сохранение напряженного состояния пространственного демпфера 4.

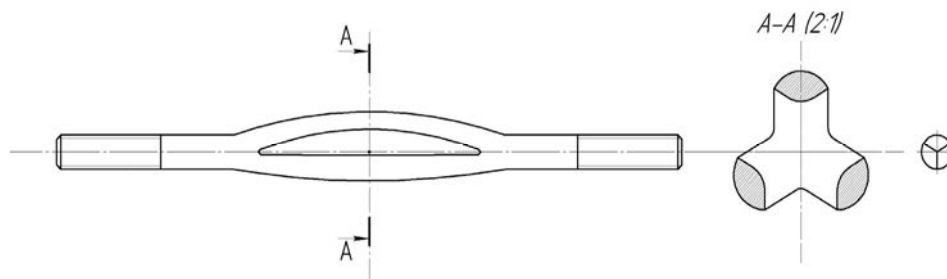


Рис. 2. Форма пространственного демпфера

Величина натяга демпфера 4 (рис. 1) может варьироваться в достаточно широких пределах, она устанавливается исходя из предполагаемой амплитуды колебаний технической системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ). Чем выше амплитуда колебаний системы, тем больше должна быть величина предварительного натяга. Так как колебания системы СПИЗ носят гармонический характер, то натяг пространственного демпфера 4 будет гасить как положительную, так и отрицательную составляющие возникающих колебаний. В отличие от армирующих элементов с эллипсоидным участком, приведенных в работе [8], за счет своей формы (см. рис. 2) пространственный демпфер 4 позволит гасить колебания не по двум, а сразу по трем осям, обеспечивая, таким образом, пространственное демпфирование. Корпус-трубу 2 прикрепляют к боковым элементам станины 1 при помощи винтов 9. После этого производят заливку синтеграновой смеси 10 в полость станины фрезерного станка с ЧПУ, при этом внутренняя полость пространственных демпферов в сборе окажется свободной от синтегранов 10. Таким образом, синтегран 10 будет непосредственно контактировать только с наружной частью корпуса-трубы 2, которая является неподвижной. Благодаря этому со временем не будет происходить разрушение приграничных слоев синтегранов от колебаний напряженного пространственного демпфера. Количество пространственных демпферов зависит от массово-габаритных характеристик станка и требуемой величины жесткости системы СПИЗ, но не может быть менее двух.

Изучим влияние армирующих элементов в виде пространственных демпферов на точность, жесткость и демпфирующие возможности настольных фрезерных станков, используя математическую модель. Расчетную схему фрезерного станка с ЧПУ (рис. 3) и математическую модель примем аналогичной, представленной в работе [8], так как объект исследования один и тот же. Параметры математической модели были определены на основе исходных данных о материале демпфирующего элемента и его геометрии.

Разработанная математическая модель соответствует компоновке горизонтально-фрезерного настольного станка. Ее расчетная схема представляет собой дискретную упруго-массовую систему, описываемую следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -m_6\ddot{x}_6 + b_6(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) + c_6(x_7 - x_6) = F_{\text{рез}}, \\ m_4\ddot{x}_4 + b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + c_4(x_4 - x_3) = F_{\text{рез}}, \\ m_3\ddot{x}_3 - b_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + b_3(x_3 - x_2) - c_4(x_4 - x_3) + c_3(x_3 - x_2) = 0, \\ m_2\ddot{x}_2 - b_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + b_2(x_2 - x_1) + c_2(x_2 - x_1) - c_3(x_3 - x_2) = 0, \\ m_1\ddot{x}_1 - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + b_1\dot{x}_1 - c_2(x_2 - x_1) + c_1x_1 - c_9(x_1 - x_9) - b_9(\dot{x}_1 - \dot{x}_9) = 0, \\ m_9\ddot{x}_9 - b_9(\dot{x}_1 - \dot{x}_9) + b_8(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) + c_8(x_9 - x_8) - c_9(x_1 - x_9) = 0, \\ m_8\ddot{x}_8 - b_8(\dot{x}_9 - \dot{x}_8) + b_7(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) - c_8(x_9 - x_8) + c_7(x_8 - x_7) = 0, \\ m_7\ddot{x}_7 + b_6(\dot{x}_7 - \dot{x}_6) - b_7(\dot{x}_8 - \dot{x}_7) + c_6(x_7 - x_6) - c_7(x_8 - x_7) = 0, \end{cases}$$

где m – масса элемента; x – перемещение элемента и производные перемещения; b – коэффициент демпфирования узла; c – коэффициент жесткости.

Два уравнения из системы содержат параметр $F_{рез}$, который обозначает величину силы резания, пространственно ориентированной при фрезеровании и имеющей наибольшую составляющую в продольном направлении [9].

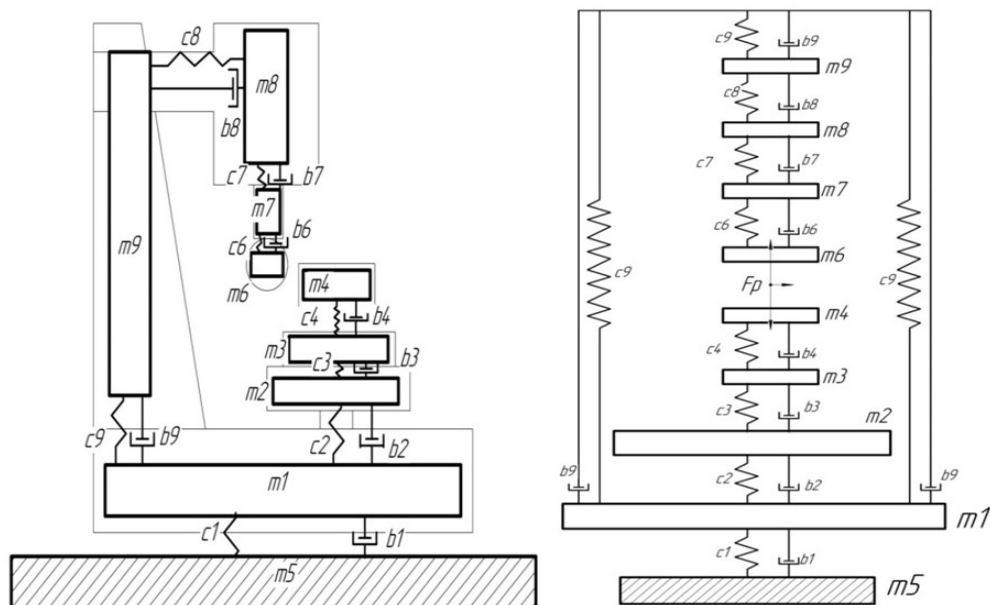


Рис. 3. Расчетная схема математической модели настольного станка:
1 – станина; 2 – столик; 3 – приспособление; 4 – заготовка; 5 – основание;
6 – инструмент; 7 – шпиндель; 8 – фрезерная бабка; 9 – стойки

С помощью математической модели оценим изменение демпфирующих свойств системы СПИЗ после замены интеграновой станины с известными прямыми армирующими элементами на ту же станину, но с установкой предложенных пространственных демпферов, при неизменности прочих входных данных модели. Для этого необходимо приложить к системе возмущающую силу, которой является сила резания.

В обоих случаях приложенные силы выбраны специально не равными друг другу, так как жесткости систем не одинаковы, но требуется получить одинаковую амплитуду на входе для количественной оценки демпфирования. Величины прикладываемых сил составляют 2 кН для пространственных демпферов и 1,4 кН для прямых стержней в станине соответственно. Разница прикладываемых сил для получения равных амплитуд на входе зависит от выбранной толщины стенки трубы в конструкции демпфера. Конструктивно примем минимальную толщину стенки, необходимую для надежного закрепления труб на торцах станины равную 9 мм. Диаметр демпфера и диаметры прямолинейных армирующих элементов принимаем равными 30 мм. Полученные для заданных выше условий графики перемещений отображены на рис. 4.

Данные графические зависимости были построены при использовании САЕ-системы *Simulation X* в результате последовательного приложения двух возмущающих сил в точке между блоками с индексациями 4 и 6 (инструмента и заготовки) на расчетной схеме математической модели.

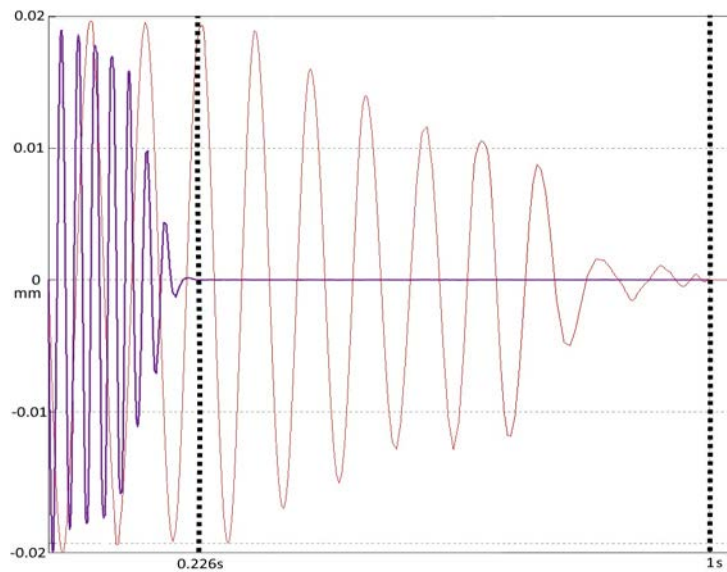


Рис. 4. Зависимости перемещений в системе СПИЗ от времени:
 темный график – синтеграновая станина с предложенными
 пространственными демпферами; светлый – синтеграновая станина
 с армирующими элементами в виде прямолинейных стержней

Для оценки возможности установки пространственного демпфера в уже разработанную конструкцию станины станка проведем ее расчет на жесткость методом конечных элементов. Поскольку конструкция станины симметрична и имеет на своих торцах одинаковые базовые стальные плиты, то допустимо провести расчет лишь одной из плит. Соответствующий результат расчета представлен на рис. 5.

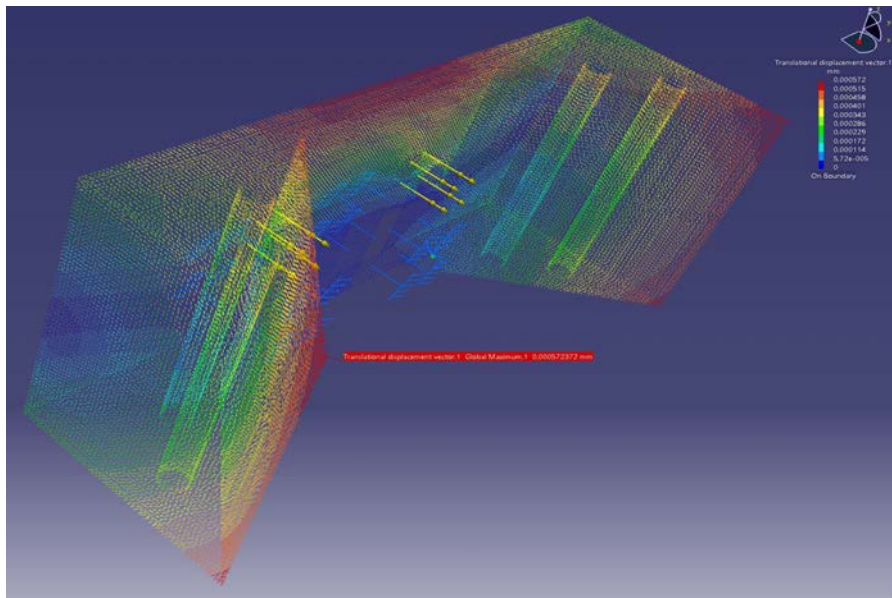


Рис. 5. Результат расчета на жесткость несущего элемента станины
 методом конечных элементов (наибольшее перемещение – 0,0006 мм)

Данный расчет соответствует установке в станину станка двух пространственных демпферов, каждый из которых нагружен силой 1 кН. В качестве материала торцевой плиты использовалась конструкционная сталь.

Результаты

В результате анализа расчетной и математической моделей установлено: во-первых, масса станины m_1 за счет применения закладных элементов в виде пространственных демпферов существенно не возрастает (не более чем на 10 %), что положительно сказывается на массово-габаритных параметрах станка и не предъявляет дополнительных требований к местам установки таких станков; во-вторых, форма демпферов существенно увеличивает величину коэффициента демпфирования b за счет пространственного демпфирования, обеспечивая быструю компенсацию перемещений x (применение пространственных демпферов увеличивает демпфирующие свойства приблизительно в 4,5–5 раз по сравнению со станиной с известными закладными элементами); в-третьих, за счет применения предложенных армирующих элементов обеспечивается реализация силового замыкания на несущие элементы конструкции станины.

Станина в таком случае не потребует доработок и внесения конструктивных изменений, поскольку применение пространственного демпфера не приводит к значительным деформациям или перегрузке ее базовых торцевых элементов, что подтверждают результаты расчета на жесткость станины станка методом конечных элементов.

Обсуждение

Полученные результаты могут быть применены в сферах станкостроения и металлообработки на настольных станках, широко используемых средними и малыми промышленными предприятиями [10]. Предложенный способ повышения жесткости при разработке станка позволяет обеспечить любое сочетание показателей жесткости и точности при сохранении массово-габаритных показателей станка практически неизменными. Последующие исследования будут направлены на разработку технологии изготовления пространственных конструкций демпферов, оптимизацию их геометрии и конфигурации применительно к разным требованиям для обеспечения требуемой жесткости станка, а также будет уделено внимание вопросам количественной оценки его технических характеристик, поскольку необходимо более точно выявить влияние геометрии и формы демпфера на другие динамические характеристики станка, в том числе частотные.

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что применение закладных элементов в виде пространственных демпферов в конструкции интегральной станины настольного станка способнократно повысить точность настольных фрезерных станков с ЧПУ за счет увеличения жесткости и демпфирующей способности станины. Предложенная конструкция пространственных демпферов позволяет осуществлять демпфирование по трем осям, что в совокупности с высокими демпфирующими свойствами самого интеграла приводит к значительному снижению вибраций. Демпфирующие способности системы СПИЗ от применения предложенных демпферов повышаются в 4–5 раз. При

использовании корпуса-трубы демпфера с толщиной стенки 9 мм жесткость системы повышается на 40 %. Кроме того, данная конструкция позволяет увеличить срок службы станины из данного композита за счет изоляции колеблющихся элементов демпфера от хрупкого синтегранна, что предотвращает внутреннее растрескивание полимербетонной основы. Изучение влияния формы и геометрии армирующих элементов синтеграновой станины создает предпосылки для проектирования станков с заданными параметрами точности и жесткости.

Список литературы

1. Кудояров Р. Г., Башаров Р. Р., Пыркова О. Д. Методы определения и повышения технологической жесткости токарных станков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18, № 3. С. 87–92.
2. Денисенко А. Ф., Якимов М. В., Борисова К. Р. Анизотропия радиальной жесткости расточки корпуса под опоры шпинделя токарного станка // Транспортное машиностроение. 2021. № 5. С. 23.
3. Гаймалов А. Ф., Кудояров Р. Г., Башаров Р. Р., Красников И. П., Сайдуганов А. Р. Методика измерения жесткости станков с ЧПУ // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста. Уфа : Изд-во Уфимский государственный авиационный технический университет, 2019. С. 313–317.
4. Nikonova T., Sinko A., Yurchenko V., Berg A. Analysis of the use of the polymer concrete for the production of machine tool base parts // Труды университета. 2022. № 1. Р. 24.
5. Жуковец П. Г., Жолобов А. А., Шатуров Г. Ф. К вопросу эффективного использования современных токарных центров // Вестник Белорусско-Российского университета. 2020. № 1. С. 36.
6. Абикеев А. Возможности применения композиционных материалов в машиностроении // Инновации в технологиях и образовании : сб. ст. участников VIII Междунар. науч.-практ. конф. : в 5 ч. (Белово, 5–6 марта 2015 г.). Белово : Филиал «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в г. Белово, Великотырновский университет им. Святых Кирилла и Мефодия, 2015. Ч. 1. С. 65–69.
7. Кибенко А. С., Берг А. А. Композиционные материалы для изготовления металло-режущих станков // International Innovation Research : сб. ст. XIX Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2019. С. 27–29.
8. Воронов Р. Д., Левашкин Д. Г., Воронов Д. Ю. Повышение точности настольных станков с ЧПУ путем применения нагруженных армирующих элементов в их станине // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 3 (129). С. 1–11. doi: 10.23670/IRJ.2023.129.27
9. Завистовский С. Э. Обработка материалов резанием : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2023. 448 с.
10. Шевелев И. В. Разработка трехкоординатного фрезерного станка с ЧПУ центра «Формула Станок» : магистерская диссертация / Тольяттинский государственный университет. Тольятти, 2019. 124 с.

References

1. Kudoyarov R.G., Basharov R.R., Pyrkova O.D. Methods for determining and increasing the technological rigidity of lathes. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* = *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2014;18(3):87–92. (In Russ.)
2. Denisenko A.F., Yakimov M.V., Borisova K.R. Anisotropy of the radial rigidity of the body boring for lathe spindle supports. *Transportnoe mashinostroyeniye* = *Transport engineering*. 2021;(5):23. (In Russ.)

3. Gaymalov A.F., Kudoyarov R.G., Basharov R.R., Krasnikov I.P., Sayduganov A.R. Methodology for measuring the stiffness of numerical controlled machines. *Stankostroenie i innovatsionnoe mashinostroenie. Problemy i točki rosta = Machine tool building and innovative mechanical engineering. Problems and growth points*. Ufa: Izd-vo Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskyy universitet, 2019:313–317. (In Russ.)
4. Nikonova T., Sinko A., Yurchenko V., Berg A. Analysis of the use of the polymer concrete for the production of machine tool base parts. *Trudy universiteta = Proceedings of the University*. 2022;(1):24.
5. Zhukovets P.G., Zholobov A.A., Shaturov G.F. On the issue of effective use of modern turning centers. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2020;(1):36. (In Russ.)
6. Abikeev A. Possibilities of using composite materials in mechanical engineering. *Innovatsii v tekhnologiyakh i obrazovanii: sb. st. uchastnikov VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: v 5 ch. (Belovo, 5–6 marta 2015 g.) = Innovation in technology and education: proceedings of the 8th International scientific and practical conference: in 5 parts (Belovo, March 5-6, 2015)*. Belovo: Filial «Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet imeni T.F. Gorbacheva» v g. Belovo, Velikotymovskiy universitet im. Svyatykh Kirilla i Mefodiya, 2015;Pt.1:65–69. (In Russ.)
7. Kibenko A.S., Berg A.A. Composite materials for the manufacture of metal cutting machines. *International Innovation Research: sb. st. XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = International Innovation Research: proceedings of the 19th International scientific and practical conference*. Penza, 2019:27–29. (In Russ.)
8. Voronov R.D., Levashkin D.G., Voronov D.Yu. Improving the accuracy of desktop numerical controlled machines by using loaded reinforcement elements in their bed. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Scientific Research Journal*. 2023;(3):1–11. (In Russ.). doi: 10.23670/IRJ.2023.129.27
9. Zavistovskiy S.E. *Obrabotka materialov rezaniem: ucheb. posobie = Processing of materials by cutting: textbook*. Moscow: INFRA-M, 2023:448. (In Russ.)
10. Shevelev I.V. Razrabotka trekhkoordinatnogo frezernogo stanka s ChPU tsentra “Formula Stanok”: masterskaya dissertatsiya / Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet = *Development of a three-coordinate CNC milling machine at the “Formula Stanok” center: dissertation to apply for the master's degree* / Togliatti State University. Tol'yatti, 2019:124. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Дмитриевич Воронов

студент, Тольяттинский
государственный университет (Россия,
Самарская область, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14)

E-mail: Smr.rom@yandex.ru

Roman D. Voronov

Student, Togliatti State University
(14 Belorusskaya street, Togliatti, Russia)

Денис Геннадьевич Левашкин

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры оборудования
и технологии машиностроительного
производства, Тольяттинский
государственный университет (Россия,
Самарская область, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14)

E-mail: denis.levden@yandex.ru

Denis G. Levashkin

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of equipment
and technology of mechanical engineering,
Togliatti State University (14 Belorusskaya
street, Togliatti, Russia)

Дмитрий Юрьевич Воронов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры оборудования
и технологии машиностроительного
производства, Тольяттинский
государственный университет (Россия,
Самарская область, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14)

E-mail: dmitridmitrie@yandex.ru

Dmitriy Yu. Voronov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of equipment
and technology of mechanical engineering,
Togliatti State University (14 Belorusskaya
street, Togliatti, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 14.05.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 26.09.2023

Принята к публикации / Accepted 10.11.2023

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные специальности журнала:

05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
05.02.08 Технология машиностроения
05.02.11 Методы контроля и диагностика в машиностроении
05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений)
05.11.14 Технология приборостроения
05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)
05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. +7 (8412) 64-32-89. E-mail: volgavuz@pnzgu.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата « ____ » _____ 20__ г.