



#5(57), 2020 część 3

Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe
(Warszawa, Polska)

Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

Rada naukowa

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

#5(57), 2020 part 3

East European Scientific Journal
(Warsaw, Poland)

The journal is registered and published in Poland. The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor in chief - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

The scientific council

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College
London)**

**Igor Dziedzic (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**

Kehan Schreiner(Hebrew University)

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College
London)**

**Igor Dziedzic (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**

Kehan Schreiner(Hebrew University)

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**

Editor in chief - Adam Barczuk

1000 kopii.

**Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie
85/21, 02-001 Warszawa, Polska»**

**Wschodnioeuropejskie Czasopismo
Naukowe**

**Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001
Warszawa, Polska**

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

1000 copies.

**Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-
001 Warsaw, Poland»**

East European Scientific Journal

**Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw,
Poland**

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Воеводин В.А., Печникова А.В., Брюшинин А.О. МЕТОД ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКИ ВЕСОМОСТИ АУДИТРСКИХ СВИДЕТЕЛЬСТВ.....	4
Марич Ю.В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПИ МЕТОДА РЕГУЛИРОВАНИЯ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ LLC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	8
Марич Ю.В. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РЕЗОНАНСНОГО LLC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	17
Чермалых А.В., Мугенов Д.Д. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ...	26
Азимова Н.Н., Ашихмин Д.В., Ладоша Е.Н., Купцова И.С., Холодова С.Н, Чукарина Н.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА И ЗАПЫЛЕННОСТИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ РЕЛЬСОРЕЗНОГО СТАНКА	35
Азимова На.Н., Ашихмин Д.В., Ладоша Е.Н., Цымбалова В.М., Цымбалов Д.С., Яценко О.В. АНАЛИЗ РАЗМЕРА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ АБРАЗИВНОЙ РЕЗКЕ СТАЛИ	52
Бабенко В.Г., Фаурэ Э.В., Сысоенко С.В., Миронец И.В., Сысоенко А.А. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТРИЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРИМИТИВАХ СКОЛЬЗЯЩЕГО ШИФРОВАНИЯ	66

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ержанбек А., Ерман Т., Бердыгулова А.Д., Елеусизова Г.С. ЭВОЛЮЦИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ И ГЛОБАЛЬНОЕ БУДУЩЕЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ЭПОХУ ЦИФРОВИЗАЦИИ	73
--	----

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 004.01
ГРНТИ 81.93.29

Voevodin V.A.

*Associate Professor, candidate of technical Sciences,
National Research University of Electronic Technology*

Pechnikova A.V.

*student of the department of information security
National Research University of Electronic Technology*

Bryushinin A.O.

*student of the department of information security
National Research University of Electronic Technology*

PAIR COMPARISON METHOD FOR EVALUATING THE PONDERABILITY OF AUDITING CERTIFICATES

Воеводин Владислав Александрович

*к.т.н., доцент кафедры «Информационная безопасность»,
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

Печникова Александра Викторовна

*студентка кафедры «Информационная безопасность»,
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

Брюшинин Антон Олегович

*студент кафедры «Информационная безопасность»
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

МЕТОД ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКИ ВЕСОМОСТИ АУДИТРСКИХ СВИДЕТЕЛЬСТВ

Summary. The article proves the relevance of the distribution of managerial resources between information security audit processes and gives a description of the expert method of pairwise comparisons, the analysis of its advantages and disadvantages. In the article the necessity of using the method of pairwise comparisons in assessing the ponderability of audit evidence is proved and the direction for further research is determined, which consists in taking into account the order of preferences of audit evidence not only in terms of their importance, but also in cost and time costs.

Аннотация. В статье обосновывается актуальность распределения управленческого ресурса между процессами аудита информационной безопасности (АИБ). Приводится описание экспертного метода парных сравнений, анализ его преимуществ и недостатков. Доказана необходимость использования метода парных сравнений при оценке весомости аудиторских свидетельств. Определено направление для дальнейшего исследования, заключающееся в учете порядка предпочтений свидетельств аудита не только по их значимости, но и по себестоимости и временным затратам.

Key words: *Information security, information security audit, the method of pairwise comparisons, audit evidence.*

Ключевые слова: *Информационная безопасность, аудит информационной безопасности, метод парных сравнений, свидетельства аудита.*

Лицу, принимающему решение в той или иной области деятельности, необходима управленческая информация, которая достоверно отображает состояние объекта управления и окружающей среды. Однако, на момент принятия решения, лицо, принимающее решения, находится в состоянии информационной неопределенности, так как он такой информацией не располагает и может строить свою стратегию только на догадках и интуиции, что приводит к необоснованному решению и, чаще, неэффективному. Для того чтобы обосновать свое решение данное лицо вынуждено принимать меры по добытию недостающей

информации, на что расходуется управленческий ресурс.

Проблема – в каком соотношении распределить управленческий ресурс между процессами добывания требуемой информации и реализацией принятого решения. На данный момент эта проблема не решена и ждет своего исследователя. Таким образом, лицо, принимающее решения, в силу интуиции и опыта, осознает проблему и готово выделить ресурс для добывания недостающей информации для принятия решения об эффективном применении ресурса.

Особую актуальность эта задача приобретает в высокотехнологичных областях, когда подготовку аудиторских групп возможно провести только на модели соответствующей информационной системы.

Таким образом, для принятия решения по применению сил и средств информационной безопасности органам управления защитой информации требуются достоверные и полные сведения о сложившейся обстановке и о прогнозе её развития. Для добывания таких сведений организуется аудит информационной безопасности, рекомендации по его организации содержатся в [1]. В соответствии с [1] важным и самостоятельным этапом организации аудита информационной безопасности является разработка, сопровождение (управление) программы аудита [1, ст. 3.4] и календарного плана [1, п. 6.3.2] применения сил и средства аудита информационной безопасности. Целью исследования является описание оценки весомости аудиторских свидетельств на основе парных сравнений.

Метод парного сравнения обладает важными преимуществами. Во-первых, выбрать наиболее предпочтительный вариант из двух намного проще, чем из нескольких. Во-вторых, метод парного сравнения позволяет внимательно сосредоточиться на сходствах и различиях только между двумя вариантами [2, 3]. К недостаткам можно отнести

выполнение большого количества парных сравнений, но при оценке весомости аудиторских свидетельств число сравнений относительно невелико. При использовании данного метода нет возможности проверить достоверность данных, можно полагаться только на мнение экспертов. Данный недостаток решается привлечением большего числа экспертов. Метод парных подходит для ранжирования аудиторских свидетельств в зависимости от их информативности.

Сценарий парных сравнений предполагает сравнение экспертами n объектов (свойства ОА, угрозы, уязвимости, компьютерные атаки, уровень компетенции аудиторов, ОА и др.). По сценарию каждому из экспертов, номер которого $i, i = 1, 2, \dots, m$, предъявляют парами объекты, общее число которых $n(n - 1)/2$. Эксперт должен из двух объектов с номерами j и k выбрать более значимый (предпочтительный) с позиции определенной точки зрения, которой он придерживается, (более информативный, более дорогой, более уязвимый, более подготовленный, более опасный, более полезный, более эффективный и др.). Сравнение осуществляется для всех $j < k, k = 1, \dots, n$. В результате взаимного сравнения n объектов каждый эксперт заполняет диагональную матрицу

парных сравнений $A^i = \left\| a_{jk}^i \right\|$,

$$a_{jk}^i = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й объект предпочитается } k\text{-му;} \\ 0 & \text{в противном случае;} \\ - & \text{если эксперт не может установить предпочтение.} \end{cases} \quad (1)$$

$$j \neq k, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, n, a_{jj} = 0, \text{ для } i\text{-го эксперта, } i = 1, 2, \dots, m$$

Матрица A^i может быть не полностью заполненной экспертом, например, если он не может принять решение по установлению предпочтения, выбрать из пары сравниваемых объектов предпочтительный. В этом случае эксперт ставит прочерк в соответствующей ячейке матрицы $A^i, i = 1, 2, \dots, m$.

Для оценки стабильности парных оценок эксперта сначала проводятся оценки объектов с индексами k и j , затем j и k меняют местами, проверяют совпадение зеркально расположенных элементов диагональной матрицы, если зеркальные элементы совпадают, то оценка считается стабильной. Если имеются несовпадения, то оценивают процент этих несовпадений, по которому оценивается нестабильность парной оценки того или иного эксперта.

Под согласованностью парных оценок понимают подтверждение альтернативной гипотезы H_0 к H_A , где гипотеза H_0 состоит в том, что

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{jk} = \frac{1}{2} \text{ для всех } j = 1, 2, \dots, n, \text{ это означает,}$$

что мнения экспертов по установлению

предпочтения разделились поровну, a_{jk} – индикатор предпочтения j – го объекта k – му, $j, k = 1, 2, \dots, n$.

Гипотеза H_A состоит в том, что существует хотя бы один объект $j, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, для которого

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{jk} \neq \frac{1}{2}, \text{ что означает, что хотя бы для}$$

одного объекта мнения экспертов преобладают в ту или иную сторону.

Обозначения:

$$a_j = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m a_{jk}^{(i)} \quad (2)$$

строчная сумма матрицы A , равная сумме строчных сумм матриц A_1, \dots, A_m (эта сумма равна общему числу случаев предпочтения j – го объекта всем остальным).

$$j = 1, 2, \dots, n, \bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j - \text{среднее } a_1, a_2,$$

..., a_n (Точка означает суммирование по индексу, который она заменяет).

$$D_m = \frac{4}{m \cdot n} \sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2 = \left[\sum_{j=1}^n a_j^2 - n(\bar{a})^2 \right] \quad (3)$$

При $m = 1$ (эксперт один) и $n \geq 4$ следует вычислять число круговых триад по формуле 4:

$$d = \frac{1}{24} n(n^2 - 1) - \frac{n}{8} D_1 \quad (4)$$

где $D_1 = D_m$ при $m = 1$.

Если d , вычисленное по матрице парных сравнений и обозначаемой $d_{набл.}$, равно или больше чем $d_{табл.}(n, \alpha)$, то принимают гипотезу

«о несогласованности», если меньше – то «о согласованности». Значения $d_{табл.}(n, \alpha)$ приведены в таблице 1, где приведены верхние процентные точки для d (числа круговых триад) и значения $P = P\{d \geq x\}$, близких к 0,10; 0,05; 0,01 при числе объектов от n до 10 с шагом 1.

Таблица 1

Точные верхние критические (процентные) точки

n=4		n=5		n=6		n=7		n=8		n=9		n=10	
$xP\{d \geq x\}$		$xP\{d \geq x\}$		$xP\{d \geq x\}$		$xP\{d \geq x\}$		$xP\{d \geq x\}$		$xP\{d \geq x\}$		$xP\{d \geq x\}$	
2	0,375	4	0,297	7	0,227	12	0,147	18	0,141	26	0,118	36	0,111
		5	0,023	8	0,081	13	0,036	19	0,051	27	0,055	37	0,059
						14	0,001	20	0,012	28	0,020	38	0,028
										29	0,0024	39	0,0079

Проверка согласованности при $m = 1$ есть проверка транзитивности суждений одного эксперта.

Под транзитивностью, в данном случае, понимаем выполнение следующего условия:

при предпочтении j – го объекта k – му ($a_{kl}^i = 1$) и k – го объекта l – му ($a_{li}^j = 1$) для всех n равных между собой $j, k, l = 1, 2, \dots, n$.

При $m = 3$ до 20 с шагом 1; $n = 4$ и $m = 2$ до 7 с шагом 1; $n = 5$ и $m = 2, 3$; $n = 6$ и $m = 6, 7, 8$ следует вычислять по формуле 5:

$$S_{набл.} = \sum_{j=1}^n a_j^2 = n \left[\frac{m}{4} D_m + \bar{a}^2 \right] \quad (5)$$

Если $S_{набл.} \geq S_{табл.}(n, \alpha)$, приведенное в [3, стр.107], то принимают гипотезу «о согласованности», если $S_{набл.} < S_{табл.}(n, \alpha)$, то принимают гипотезу «о несогласованности». В таблице [4, прил.13] приведены верхние

процентные точки для $S = \sum_{1 \leq j \leq n} a_j^2 \alpha = 0,05, 0,01$ (точнее, ближайšie к ним).

При n, m за пределами [4, прил.13] пользуются следующим правилом. Если вычисленное значение статистики $D_{набл.}$, не менее $\chi_a^2(n-1)$, где $\chi_a^2(n-1)$ верхняя критическая (α – процентная) точка на уровне значимости α χ^2 -распределения с $n-1$ степенью свободы [4, прил. 8], то принимают гипотезу «о согласованности».

При наличии достаточной согласованности обобщенное суждение группы экспертов вычисляют по формуле 6 ($j, k = 1, \dots, n$):

$$a_{j\bar{k}} = \sum_{k=1}^n a_{jk}, a_{\bar{k}j} = \sum_{j=1}^n a_{jk} \quad (6)$$

Пример

Исходные данные: Матрицы парных сравнений четырех экспертов, сравнивающих три объекта (рисунок 1).

	A_1			A_2			A_3			A_4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1
2	0	0	1	2	0	0	0	2	0	0	1	2
3	0	0	0	3	0	1	0	3	1	0	0	3

Рисунок 1 – Матрицы парных сравнений четырех экспертов

Требуется: Согласованность парных сравнений при $\alpha = 0,05$.

Решение: Рассчитывается общая матрица парных сравнений (таблица 2).

Матрица парных сравнений

	1	2	3	$a_{j\bar{j}}$	$a_{j\bar{j}}^2$
1	0	4	3	7	49
2	0	0	3	3	9
3	1	1	0	2	4
$a_{\bar{j}k}$	1	5	6		

$S_{набл.} = 49 + 9 + 4 = 62$. По табл. [4, прил.13] $S_{табл.}(3; 4; 0,05) = 72$. Поскольку $S_{набл.} < S_{табл.}$, то гипотезу «о несогласованности» не отвергают.

Проверка согласованности результатов парных сравнений

Обобщенная ранжировка, получаемая в результате ранжирования $a_{j\bar{j}}^*, \dots, a_{n\bar{n}}^*$, вычисляется по формуле 7 ($j = 1, \dots, n$):

$$a_{j\bar{j}}^* = \frac{a_{j\bar{j}}}{(a_{j\bar{j}} + a_{\bar{j}k})} \quad (7)$$

Обобщенные количественные характеристики объектов вычисляются по формуле 8 ($j = 1, \dots, n$):

$$M_j = \frac{a_{j\bar{j}}^*}{\sum_{k=1}^n a_{\bar{j}k}^*} \quad (8)$$

Пример

Исходные данные: Матрицы парных сравнений четырех экспертов, сравнивающих три объекта (рисунок 1).

Требуется: Вычислить коэффициенты весомости M_1, \dots, M_n .

Решение: Рассчитывается общая матрица парных сравнений (таблица 2).

Рассчитывается обобщенная ранжировка:

$$a_{1\bar{1}}^* = \frac{a_{j1}}{a_{1\bar{1}} + a_{\bar{1}1}} = \frac{7}{8}; \quad a_{2\bar{2}}^* = \frac{a_{j2}}{a_{2\bar{2}} + a_{\bar{2}2}} = \frac{3}{8};$$

$$a_{3\bar{3}}^* = \frac{a_{j3}}{a_{3\bar{3}} + a_{\bar{3}3}} = \frac{2}{8};$$

Сумма $\sum_{k=1}^n a_{1k}^* = \frac{12}{8}$, тогда $M_1 = \frac{7}{8} / \frac{12}{8} = \frac{7}{12}; M_2 = \frac{3}{8} / \frac{12}{8} = \frac{3}{12}; M_3 = \frac{2}{8} / \frac{12}{8} = \frac{2}{12}$.

На данном этапе была высчитана весомость объектов, на основе которой объекты ранжируются по предпочтительности.

Метод парных сравнений позволяет ранжировать аудиторские свидетельства по значимости, но не учитывает себестоимости добывания соответствующего свидетельства аудита и временные затраты.

Таким образом, для дальнейшего исследования выдвигается гипотеза, что при учете веса свидетельств аудита при построении программы и календарного плана аудита информационной безопасности прямо пропорционален его рангу и обратно пропорционален себестоимости и времени его добывания. Для чего планируется эксперимент с использованием статистической модели объекта аудита.

Литература

- ГОСТ Р ИСО 19011-2018 Руководящие указания по аудиту систем менеджмента. Пер. А. Горбунов, Номер для ссылки ISO 19011:2018, – 51 с.
- Коробов В.Б. Теория и практика экспертных методов: /монография / В. Б. Коробов; под ред. Б.И. Кочурова. - М.: ИНФРА-М, 2019. – 219 с.
- Девид Г. Метод парных сравнений. –М.: Статистика, 1978. – 144 с.
- ГОСТ 23554.2-81. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Обработка значений экспертных оценок качества продукции. - М.: Издательство стандартов 1981. – 70с.
- Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. 831 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CLOSED CONTROL SYSTEMS BASED ON PI CONTROL AND FUZZY LOGIC FOR LLC CONVERTER

Marych Ю.В.

студент II-курса магистратуры
КПИ им. И.Сикорского

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПИ МЕТОДА РЕГУЛИРОВАНИЯ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ LLC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Summary. In this article the principles of operation of closed-type control systems based on PID controller and fuzzy logic for control of LLC converters are considered. These control methods provide stability and good control. Simulation is performed on MATLAB.

Аннотация. В данной работе рассматриваются принципы работы систем управления замкнутого типа на основе ПИД регулятора и нечеткой логики для управления LLC преобразователем. Данные методы управления обеспечивают стабильность и хороший контроль. Моделирование проводится на основе MATLAB.

1. Введение

С ростом электропотребления, растут требования к качеству поставки и преобразования электрической энергии, что побуждает постоянное совершенствования соответствующих электронных систем. Среди блоков питания коммутационного типа резонансные преобразователи получают большой интерес за счет работы на диапазоне высоких частот с низкими коммутационными потерями [1], среди которых резонансный преобразователь LLC (SPRC), обладающий преимуществами сразу двух преобразователей: последовательного (SRC) и параллельного (PRC) [2].

Последовательно-параллельный резонансный преобразователь (SPRC) может работать в широком диапазоне нагрузки, сохраняя при этом высокий КПД, по сравнению с последовательным резонансным преобразователем (SRC) [3], параллельным резонансным преобразователем (PRC). Топология LLC позволяет обеспечить работу преобразователя с высокой точностью выходного напряжения/тока и высокой эффективностью при небольших размерах [4-7].

LLC резонансный преобразователь применяется для различных приложений, таких как SMPS [8], телекоммуникации [9] и для регулируемого источника тока широкого диапазона [8].

2. Система управления на основе ПИ регулятора (PID)

PID-контроллеры - это, пожалуй, наиболее часто используемые структуры контроллеров в промышленности. Однако они представляют определенные проблемы перед инженерами приборостроения с точки зрения настройки

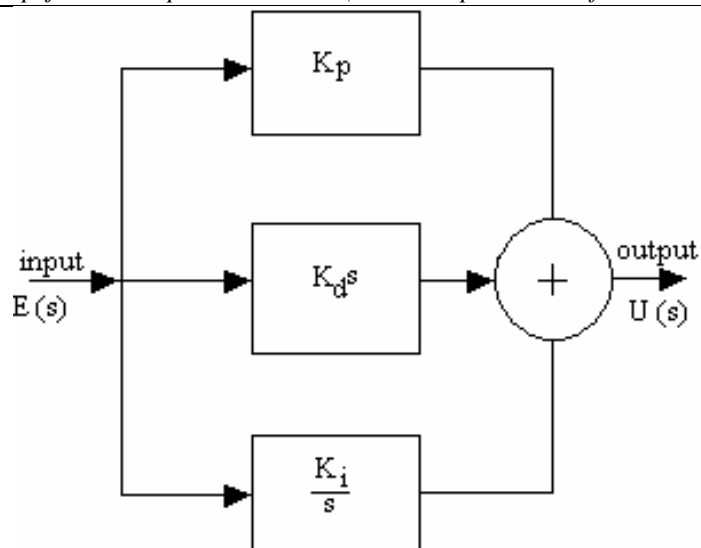
коэффициентов усиления, необходимых для стабильности работы устройства переходных процессов.

Стандартный PID-контроллер, функция передачи которого представляет собой сумму трех составляющих пропорциональную, интегрирующую и дифференциальную, как правило, записывается в параллельной форме или идеальной форме:

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{S} + K_D S$$

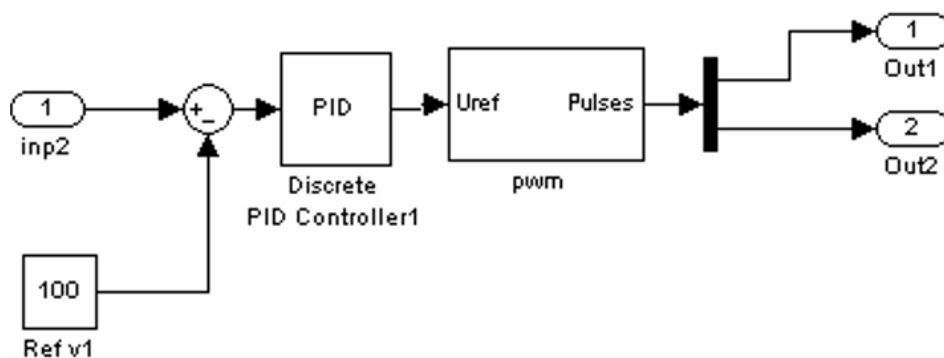
$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right)$$

Пропорциональная составляющая в контроллере, как правило, помогает установить систему и улучшить реакцию замкнутого контура. Это общее управляющее действие, пропорционально сигнала ошибки через коэффициент усиления. Дифференцирующая составляющая часто используется, когда необходимо еще больше усовершенствовать скорость отклика в закрытом цикле. Интегральная составляющая - уменьшает конечное отклонение системы (стационарную погрешность) от заранее заданного эталонного значения, через низкочастотную компенсацию интегратором. Теоретически дифференциальная составляющая свидетельствует о скорости изменения измеряемой переменной контроллером. Ее значение улучшает переходную характеристику через компенсацию дифференциатором. Схематическое изображение данного регулятора приведены на рис. 1.

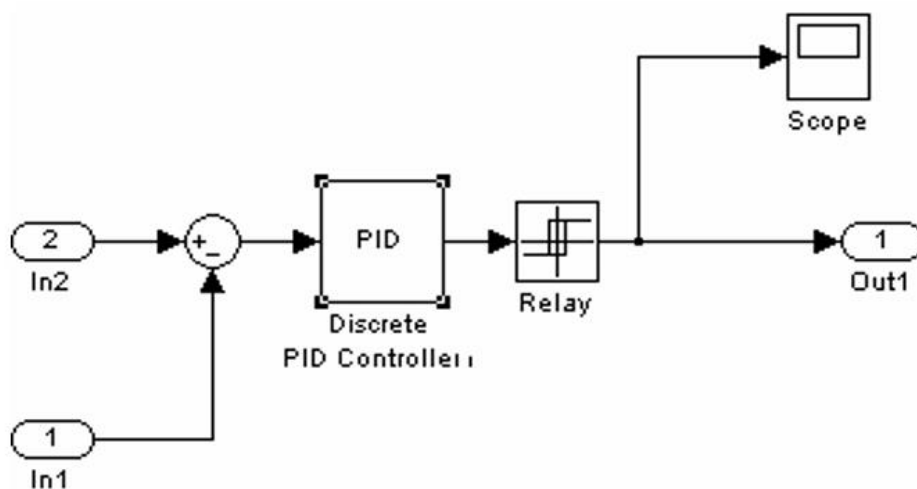


Puc. 1

Структурная схема пропорционально-интегрирующе-дифференциального контроллера для инвертирующего и выпрямительного звена преобразователя представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.



Puc. 2



Puc 3

Полная схема резонансного преобразователя с данной СУ изображена на рис. 8.

3. Система управления на основе нечеткой логики (Fuzzy)

Система нечеткой логики - это один из типов интеллектуальной системы, работа которой основана на лингвистическом языке и булевой логике. Нечеткая логическая структура управления зависит от четырех следующих блоков:

- Блок фазификация превращает четкие величины, измеренные на выходе объекта управления, в нечеткие величины, с помощью функций членства, описанных в базе знаний

- Блок решений использует нечеткие правила (if - then), заложенные в базе знаний, для

преобразования нечетких входных данных в необходимые управляющие воздействия, носят также нечеткий характер.

- Блок дефазификации превращает нечеткие данные с выхода блока решений в четкую величину, используемых для управления объектом.

- База знаний - набор правил обрамленные логическими операциями, которые связывают входные данные с их функциями членства. Членство функционирует из базы данных, используя нечеткие правила в нечетких наборах.

Типичный вид контроллера на базе нечеткой логики приведен на рис.4.

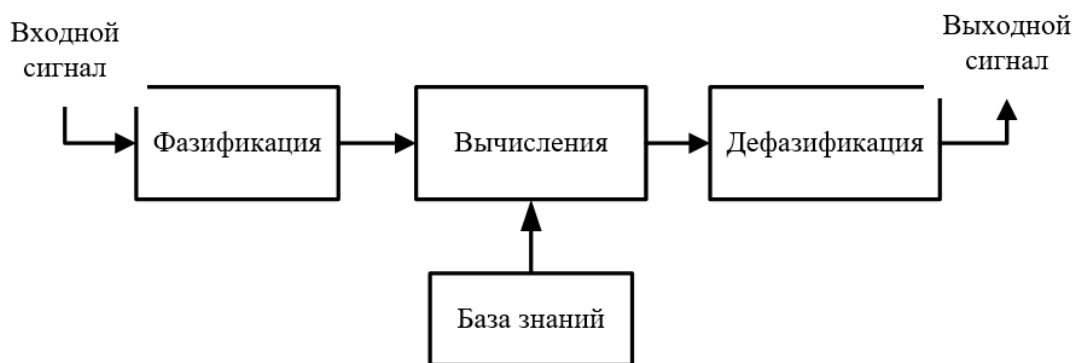


Рис. 4

В этой предлагаемой работе пять функций треугольного членства используется с 25 правилами при логических операций И. В конце дефазификации определяется четкий выход, а также генерируется импульсный сигнал к силовых

ключей полномостового инвертора. Базовая таблица нечетких правил показана в таблице 1, которая проста в использовании и понимании нечеткой логики.

Таблица 1

	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NM	Z
NS	NB	NM	NS	Z	PM
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NM	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PM	PB	PB	PB

На рис. 5 представлена поверхность нечеткого регулятора. Поверхность показывает соотношение между входами и выходами в любой точке с

использованием метода дефазификации по центру области Z_{COA} .

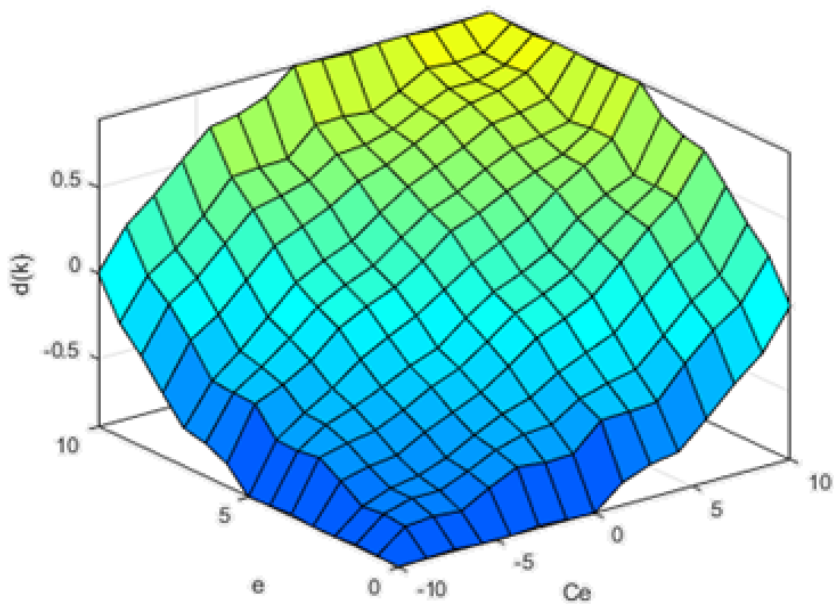


Рис. 5

Нечеткий контроллер-1 меняет индекс модуляции (MI) в соответствии с значением напряжения на нагрузке и опорного напряжения,

меня частоту комутации ключей инвертирующего преобразователя на входе резонансного контура. Схема FLC контроллера представлена на рис 6:

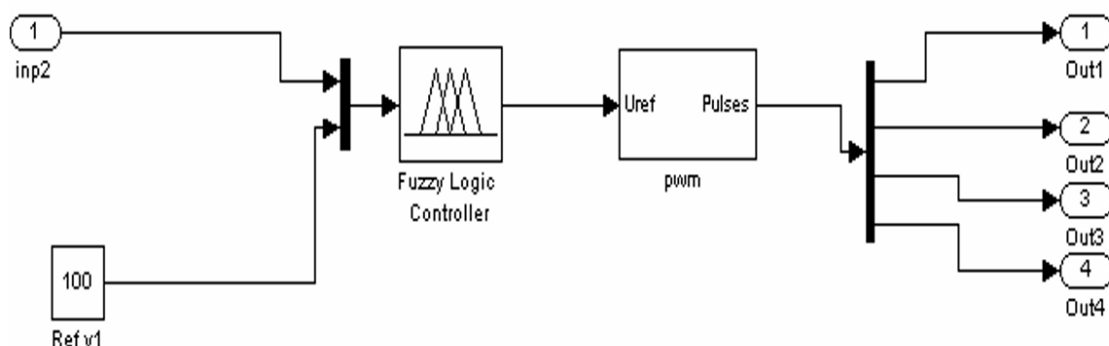


Рис. 6

Нечеткий контроллер-2 изменяет рабочий цикл выходного управляемого ключа в соответствии с выходного напряжения и опорного напряжения. тем самым регулирует выходное

напряжение. Строение FLC контроллера - 2 выходного звена преобразователя показана на рисунке 34.

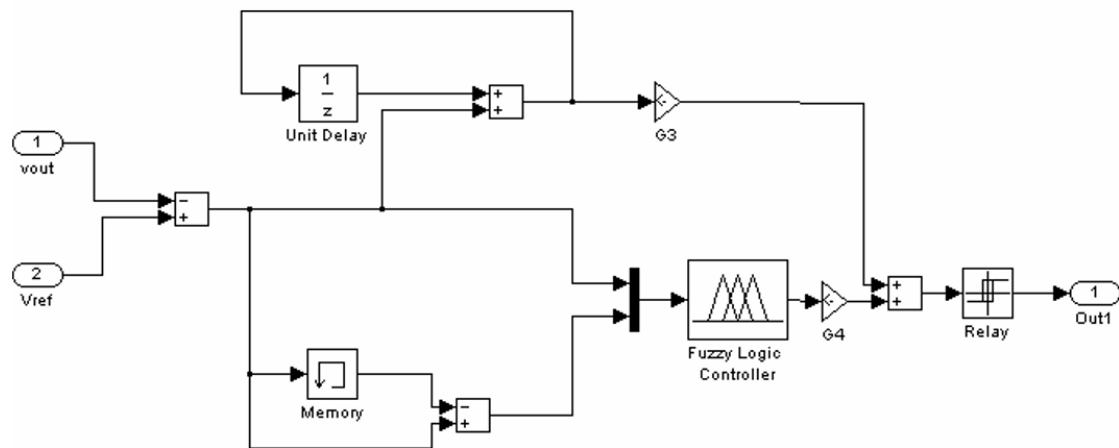


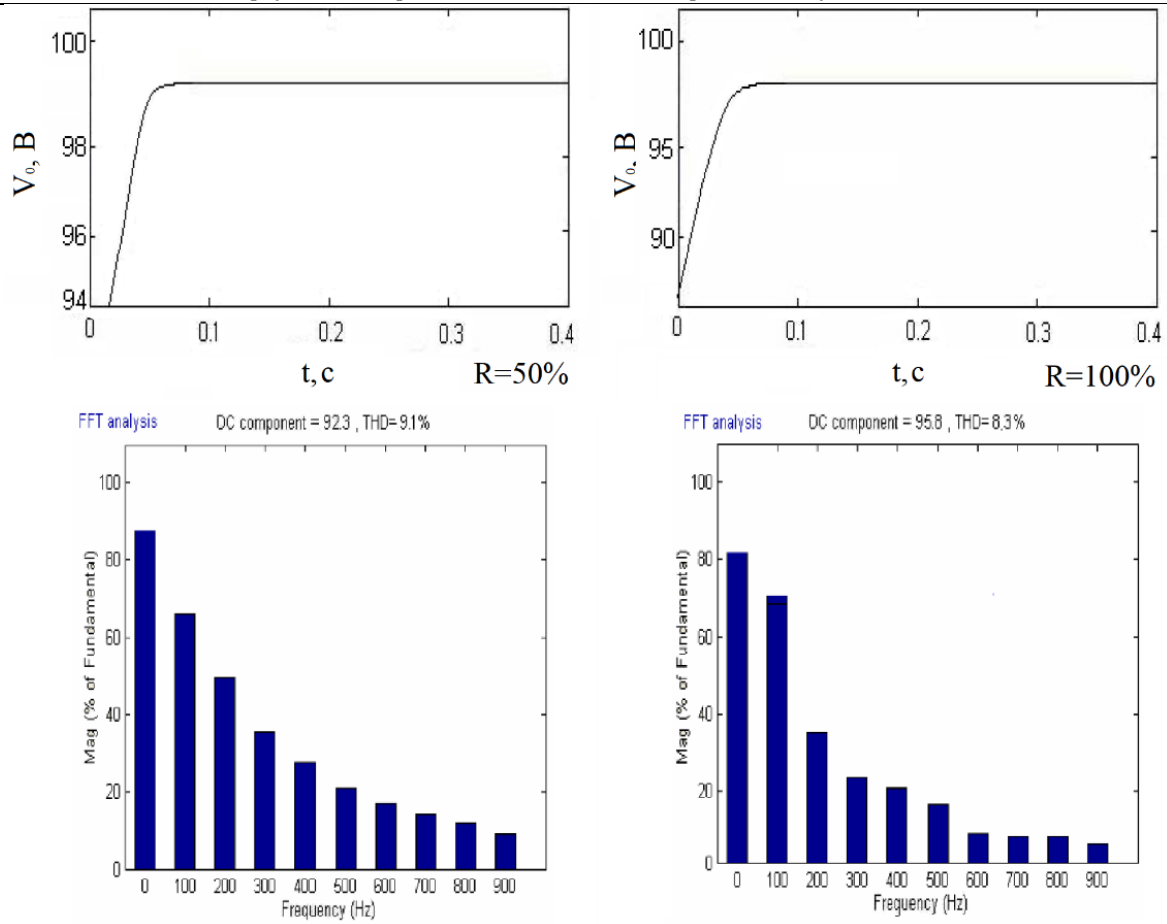
Рис. 7

Схема работы резонансный преобразователя с СК на основе нечеткой логики представлен в приложении. Полная схема резонансного преобразователя с данной СУ изображена на рис. 10.

4. Итоги моделирования

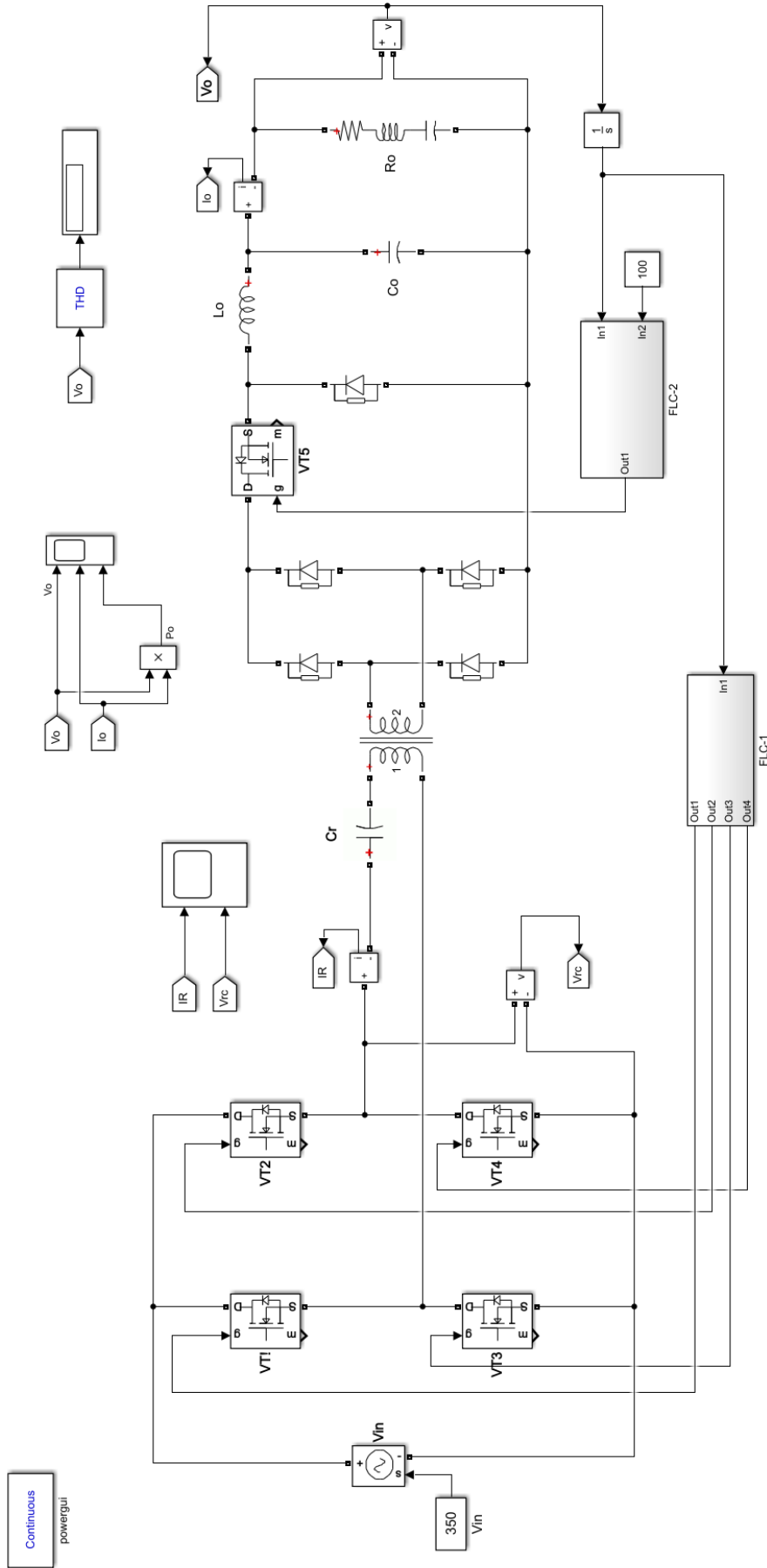
Моделирование работы резонансного LLC преобразователя с двумя методами управления, было проведено в среде MATLAB/Simulink.

- ПИД-регулятор



Puc. 9

- FLC-контролер



Puc. 10

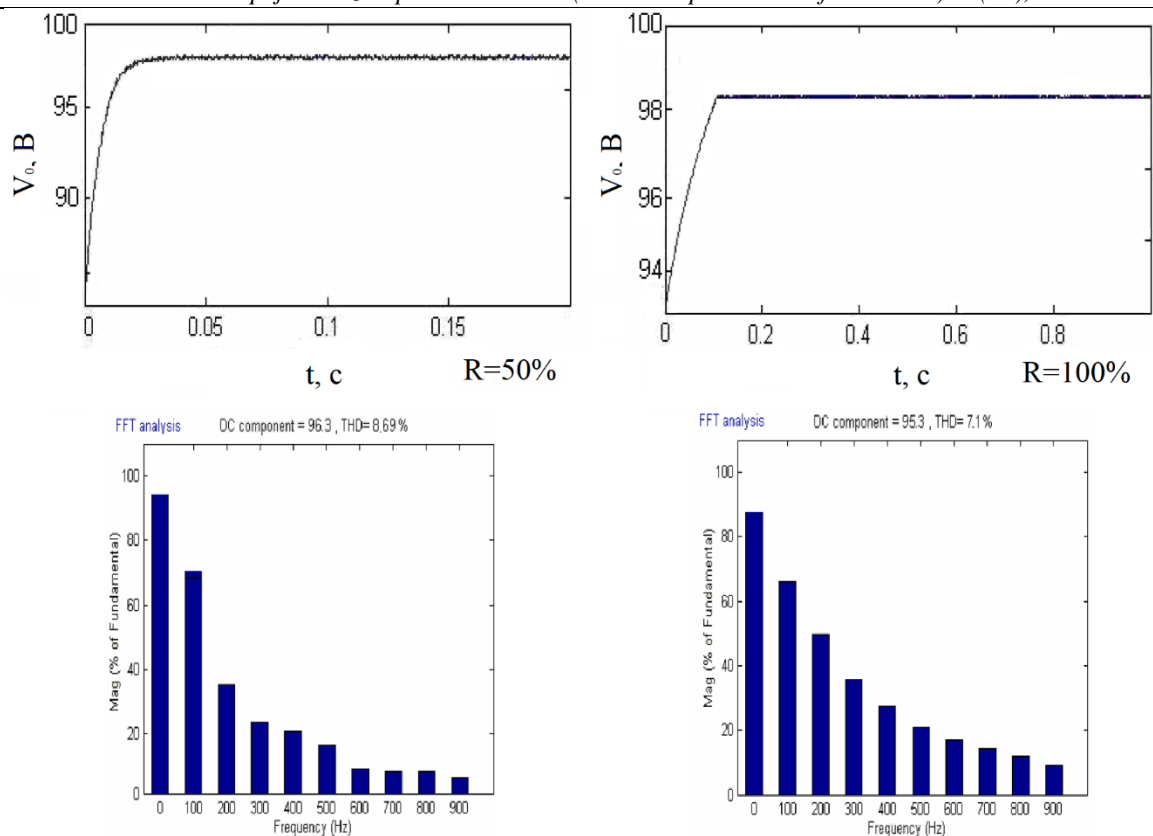


Рис. 11

На основе полученных моделирования при двух разных значениях выходного сопротивления (50% и 100% от номинального) составлены таблицы 2 и 3, отображающие основные параметры управления. данных были

Таблица 2

Тип управления	Время нарастания, с		Время установки, с		Перерегулирование, %	
	R_L (50%)	R_L (100%)	R_L (50%)	R_L (100%)	R_L (50%)	R_L (100%)
PID	0.053	0.062	0.07	0.12	0.46	0.58
Fuzzy	0.03	0.064	0.05	0.1	0.5	0.47

Таблица 3

Тип керування	Ошибка отклонения		THD, %	
	R_L (50%)	R_L (100%)	R_L (50%)	R_L (100%)
PID	0.057	0.04	9.1	8.3
Fuzzy	0.016	0.015	8.69	7.1

5. Выводы

В этой работе было рассмотрено, разработаны и внедрены две различные структуры контроллеров (ПИД и нечеткие контроллеры) для LLC резонансных преобразователей. Эти контроллеры

смоделированы для обеспечения выбранного преобразователя с регулируемым выходным напряжением в условиях разного значения сопротивления нагрузки от номинального.

В ходе моделирования установлено, что схема управления на основе нечеткой логики в этой работе работает лучше, чем управление ПИД, что и ожидалось. Приведенные выше результаты свидетельствуют об обоснованности и целесообразности предлагаемых схем управления для различных нагрузочных резонансных преобразователей.

Литература

1. B. Yang, F. C. Lee, A. J. Zhang, and G. Huang, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., 2002, pp. 1108–1112.
2. N. Madhanakumar, T. S. Sivakumaran, G. Irusapparajan, D. Sujitha, "Closed loop control of LLC resonant converter incorporating ZVS boost converter," in Int. Journal of Engg. and Tech., vol.6, no.2, pp. 0975-4024, May 2014.
3. B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F. C. Lee, and J. D. van Wyk, "Optimal design methodology for LLC resonant converter," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., Mar. 2006, vol. 2, p. 6.

4. T. Liu, Z. Zhou, A. Xiong, J. Zeng, and J. Ying, "A novel precise design method for LLC series resonant converter," in Proc. 28th Annu. Int. Telecomm. Energy Conf., 2006, pp.1-6.

5. C. Oeder, "Analysis and design of a low-profile LLC converter," in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., Jul. 2010, pp. 3859–3864.

6. M. P. Foster, C. R. Gould, A. J. Gilbert, D. A. Stone, and C. M. Bingham, "Analysis of CLL voltage-output resonant converters using describing functions," IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 4, pp. 1772–1781, Jul. 2008.

7. X. Fang, H. Hu, J. Shen, and I. Batarseh, "Operation mode analysis and peak gain approximation of the LLC resonant converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 4, pp. 1985–1995, Apr. 2012.

8. R. Beiranvand, B. Rashidian, M. R. Zolghadri, and S. M. H. Alavi, "Designing an adjustable wide range regulated current source," IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 1, pp. 197–208, Jan. 2010.

9. W.-Y. Choi, J.-M. Kwon, and B.-H. Kwon, "High-performance front-end rectifier system for telecommunication power supplies," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 153, no. 4, pp. 473–482, 2006.

Marych I.V.

*a second-year master's student,
KPI named Igor Sikorsky*

DESIGN OF A CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC FOR LLC RESONANT CONVERTER

Марич Ю.В.

*студент II-курса магистратуры
КПИ им. И.Сикорского*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РЕЗОНАНСНОГО LLC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Summary. In this article the principles of operation of closed-type control systems based on Mamdani and Sugeni fuzzy logic models for control of LLC converters are considered. These control methods provide stability and good control. Simulation is performed on MATLAB.

Аннотация. В данной работе рассматриваются принципы работы систем управления замкнутого типа на основе нечеткой логики двух разных моделей (Мамдани и Сугено) для управления LLC преобразователем. Данные методы управления обеспечивают стабильность и хороший контроль. Моделирование проводится на основе MATLAB.

1. Введение

Растущий спрос на более высокую плотность мощности и низкий профиль в конструкциях преобразователей питания заставляет разработчиков увеличивать частоты коммутации. Работа на высоких частотах значительно уменьшает размер пассивных компонентов, таких как трансформаторы и фильтры. Однако потери на переключение является препятствием для работы на высокой частоте. С целью их уменьшения были разработаны методы резонансной коммутации [1-7]. Эти методы обрабатывают мощность синусоидальным способом и позволяют реализовать «мягкую» коммутацию силовых

транзисторов. Поэтому потери на коммутацию и шум значительно ниже.

Возникает задача эффективного управления работы приведенных выше преобразователей напряжения. На сегодняшний день существует несколько основных методов управления: ПИД регулятор, регулятор на основе нечёткой логики (FLC) и нейронный регулятор. Преимуществом FLC является использование простого математического аппарата для работы со сложными нелинейными системами, высокая точность и скорость алгоритма.

2. Основы нечёткой логики

Нечёткая логика - это набор общепринятых (булевых) логик, расширенных для обработки

концепции частичных значений истины между "полностью правдивыми" и "полностью ошибочными". Как следует из названия, именно логика, лежащая в основе способов рассуждения, является приблизительной, а не точной. Важность нечеткой логики вытекает из того, что большинство способов рассуждения человека носят схожий характер [8-11].

Нечёткая логика была разработана Лотфи А. Заде в 1961 году для того, чтобы обеспечить математические правила и функции, которые работают на естественном (интуитивной) языке. Нечёткая логика обеспечивает способ вычисления промежуточных значений между абсолютной истиной и абсолютной ошибкой с результирующими значениями в диапазоне от 0,0 до 1,0, рис 1.

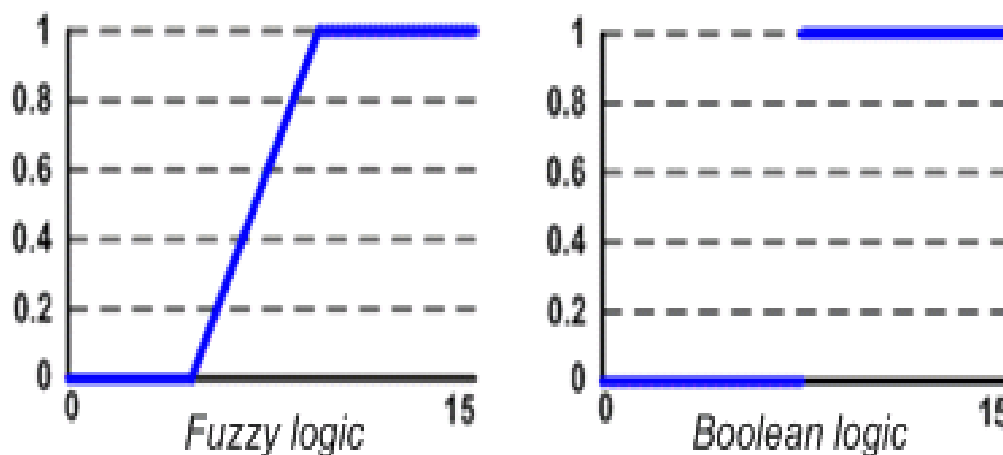


Рис. 1.

Основные части каждого нечёткого регулятора показаны на рис. 2. Контроллер нечёткой логики (FLC) состоит из интерфейса фазификации, базы

знаний, механизма исчисления и интерфейса дефазификации.

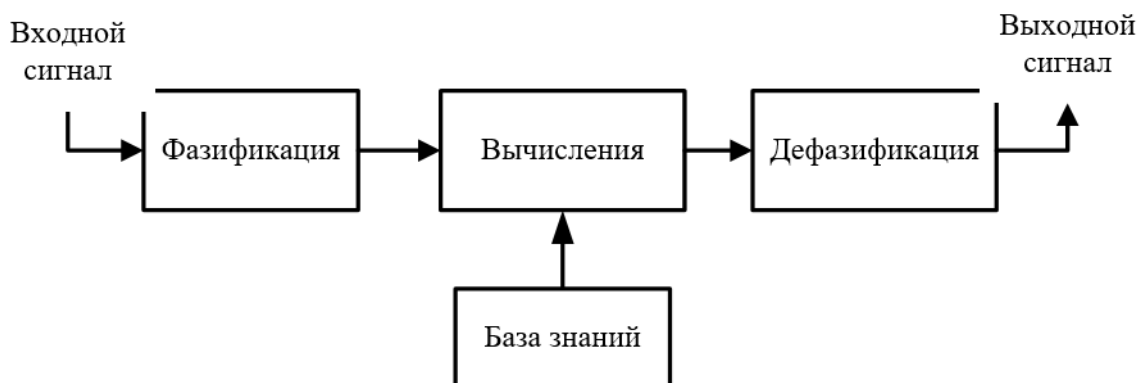


Рис. 2

На первом этапе обработки нечёткой логики четкие входные данные преобразуются в нечёткие входные данные, как показано на рис. 2. Это преобразование называется фазификацией. Система должна превратить числовые значения в соответствующие языковые области, чтобы позволить механизмам нечёткого вычисления сделать вывод, чтобы превратить четкие входные данные в нечёткие входные данные, функции принадлежности должны быть сначала определены для каждого входного сигнала. Как только функции принадлежности определены, фазификация принимает входное значение в реальном времени, такое как напряжение, например, и сравнивает его

с сохраненной информацией о функциях принадлежности, чтобы получить нечёткие входные значения. Фазификация играет важную роль в работе с неопределенной информацией, которая может быть объективной по своей природе [12,13].

3. Разработка регулятора на основе нечёткой логики для резонансного LLC преобразователя.

Контроллер нечёткой логики (FLC) обеспечивает адаптивное управление для повышения производительности системы. Нечёткая логика призвана обеспечить работу СК для управления нелинейными процессами и для

обработки неоднозначных и неопределенных ситуаций. Нечёткое управление для выбранного преобразователя постоянного напряжения разработан с использованием входных функций принадлежности ошибки e и изменения ошибки Ce и исходной функции принадлежности D - скважность. Результатом работы алгоритма нечёткого управления является изменение рабочего цикла $[d(k)]$. Рабочий цикл $d(k)$ в k -й момент времени выборки определяется путем добавления предыдущего рабочего цикла $[d(k-1)]$ к рассчитанному изменению рабочего цикла.

$$d(k) = d(k - 1) + d(k)$$

На рис. 3. показано нечёткое логическое управление резонансным преобразователем LLC из двух входов и одной выходной переменной, ошибка и изменение ошибки являются входными переменными, тогда как изменение рабочего цикла является исходной переменной. А на рис. 4 представлены нечёткие функции членства, используемых для резонансного преобразователя LLC. Правила управления, связывают нечёткий выход с нечёткими входами, исходят из общих знаний о поведении, восприятие и опыт системы. База правил для разработанного нечёткого контроллера приведена в таблице 1.

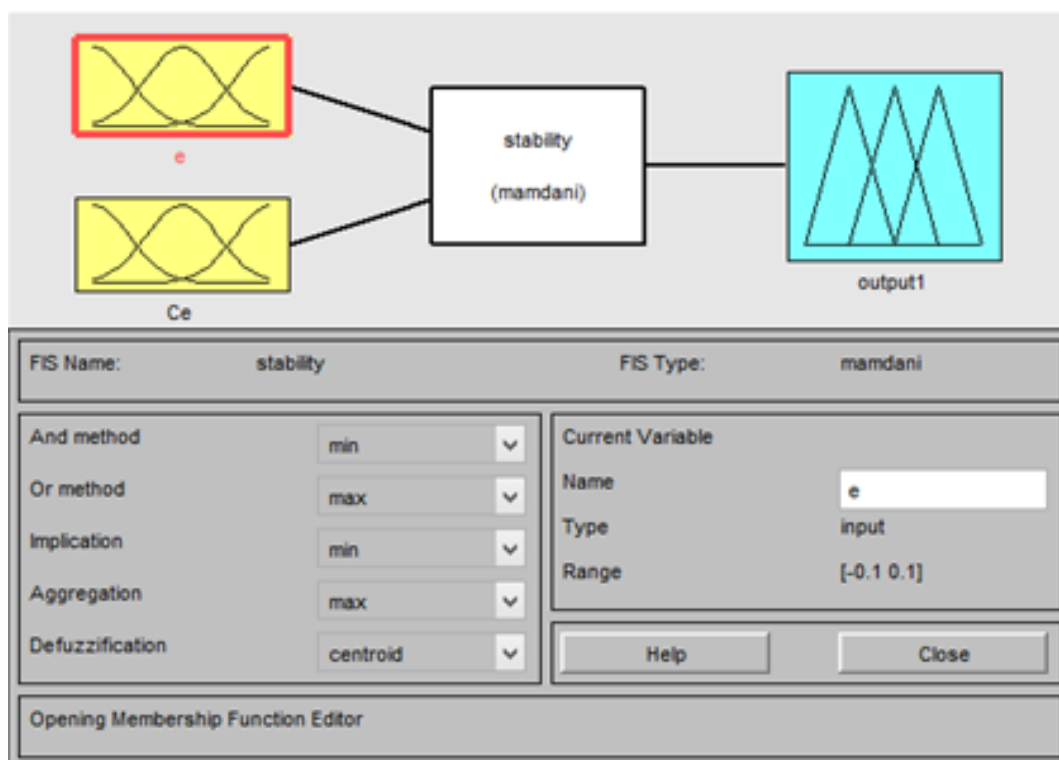


Рис. 3

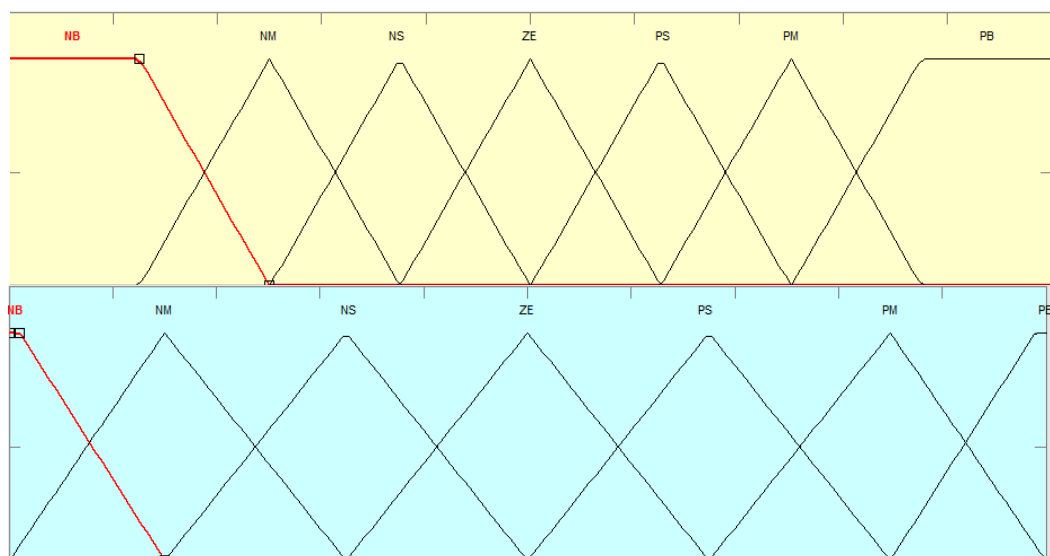


Рис. 4

Таблица 1

	NB	NM	NS	Z	PB	PM	PS
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	Z
NM	NB	NM	NM	NS	NS	Z	PB
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PB	PB
Z	NM	NS	NS	Z	PB	PB	PM
PB	NS	NS	Z	PB	PB	PM	PM
PM	NS	Z	PB	PB	PM	PM	PS
PS	Z	PB	PB	PM	PM	PS	PS

Поверхность нечёткого регулятора показывает отношение между входами и выходами в любой точке интервала $[-0.1 \ 0.1]$ с использованием метода дефазификации по центру области Z_{COA} , рис. 5.

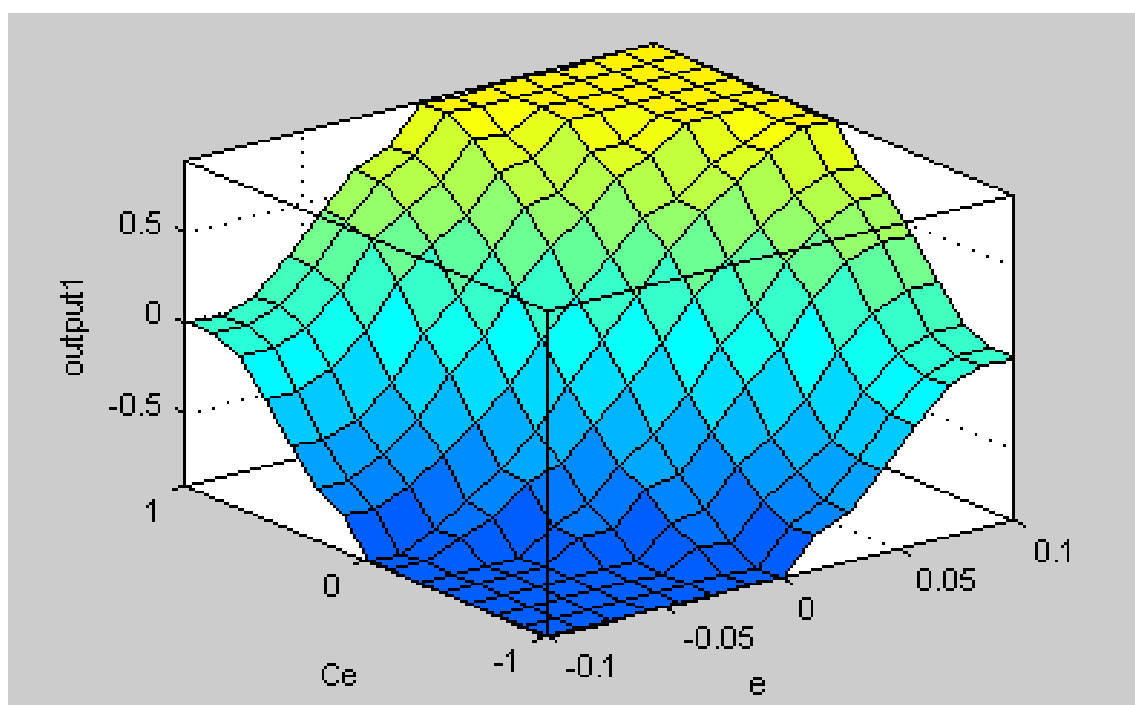
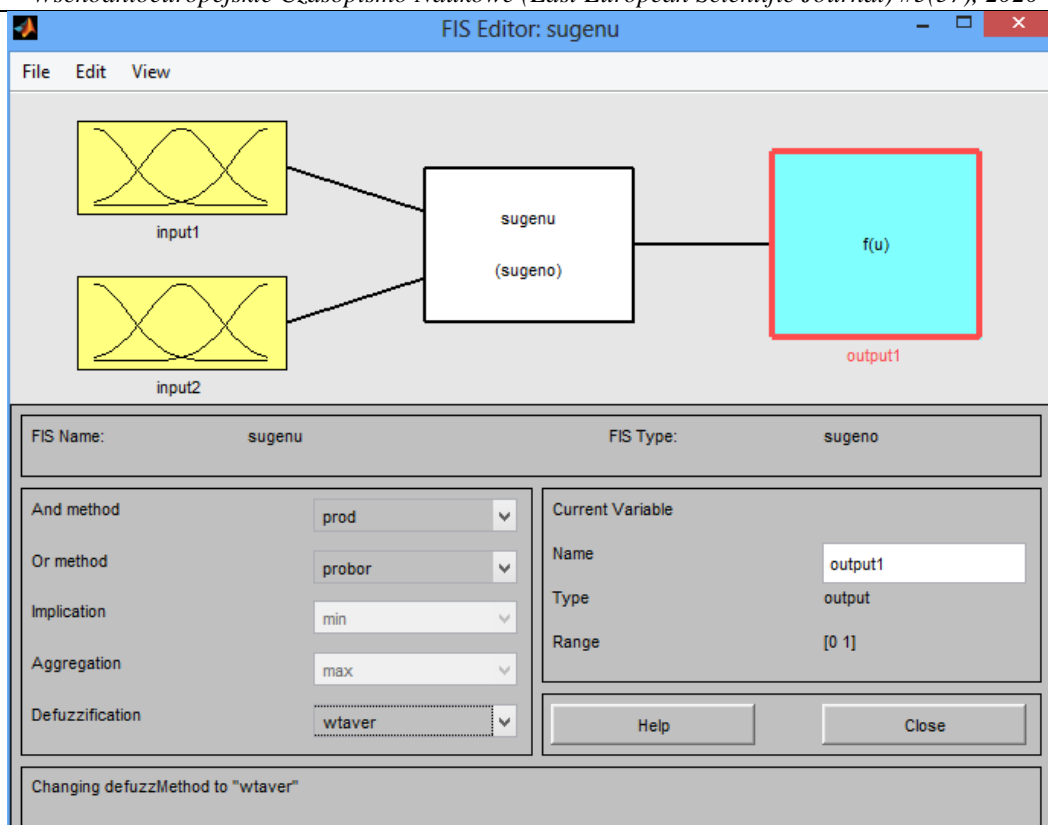


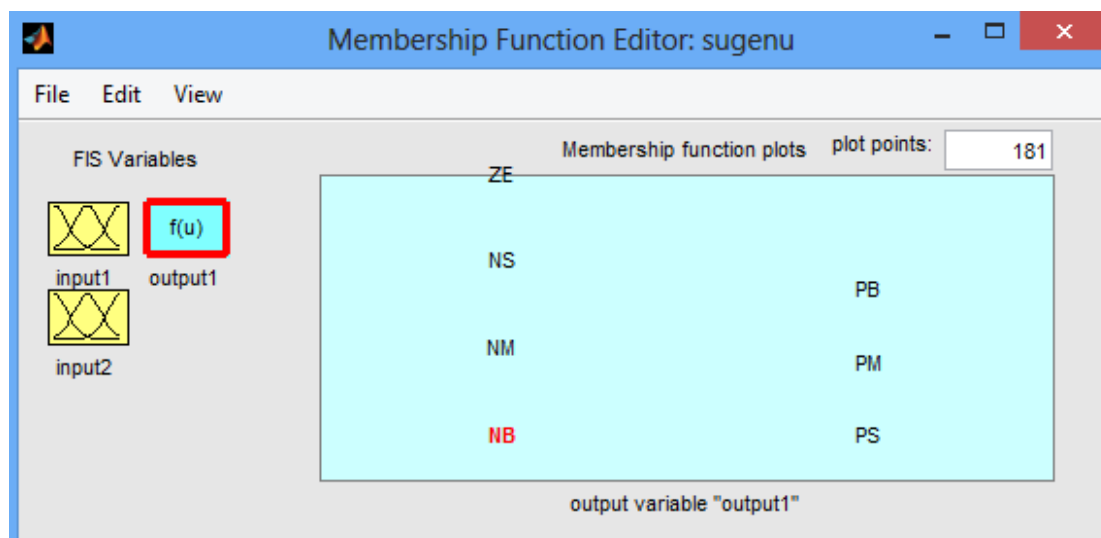
Рис. 5

Нечёткое логическое управление за моделью Sugeno для LLC резонансного преобразователя выполнен из двух входных и одной выходной переменных, которые представляют собой погрешность и изменение погрешности в качестве

входных переменных типа FLC (Mamdani) контроллера (рис. 6). Выходные нечёткие функции принадлежности (рис. 7) связываются с входными согласно встроенных правил изображённых на рис. 8.



Puc. 6



Puc. 7

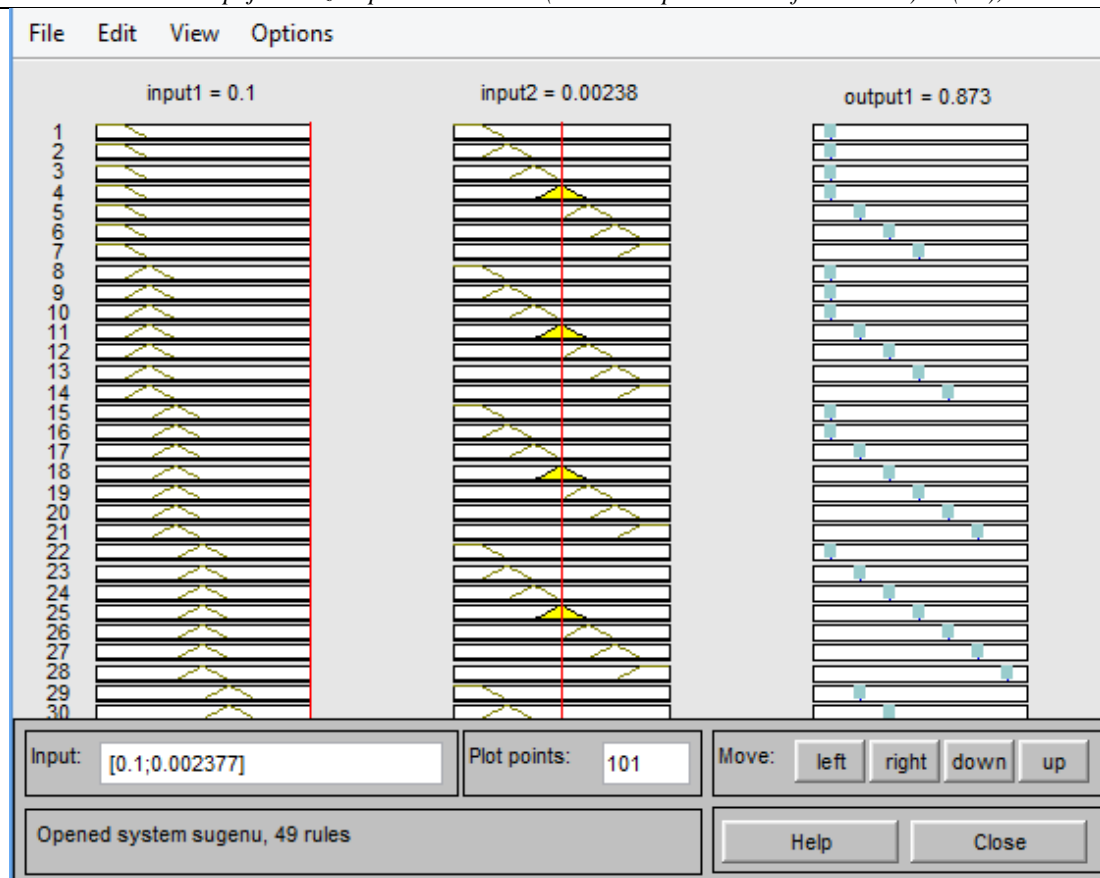


Рис. 8

На каждом интервале выборки значение RMS синусоидальной опорного напряжения и напряжения нагрузки используются для вычисления погрешности (e) и изменения сигналов

ошибок (Ce), которые выполняют роль входа в FLC. Этапы фаззификации, нечёткого исчисления и дефазификации выполняется программой, как описано на блок-схеме рис. 9.

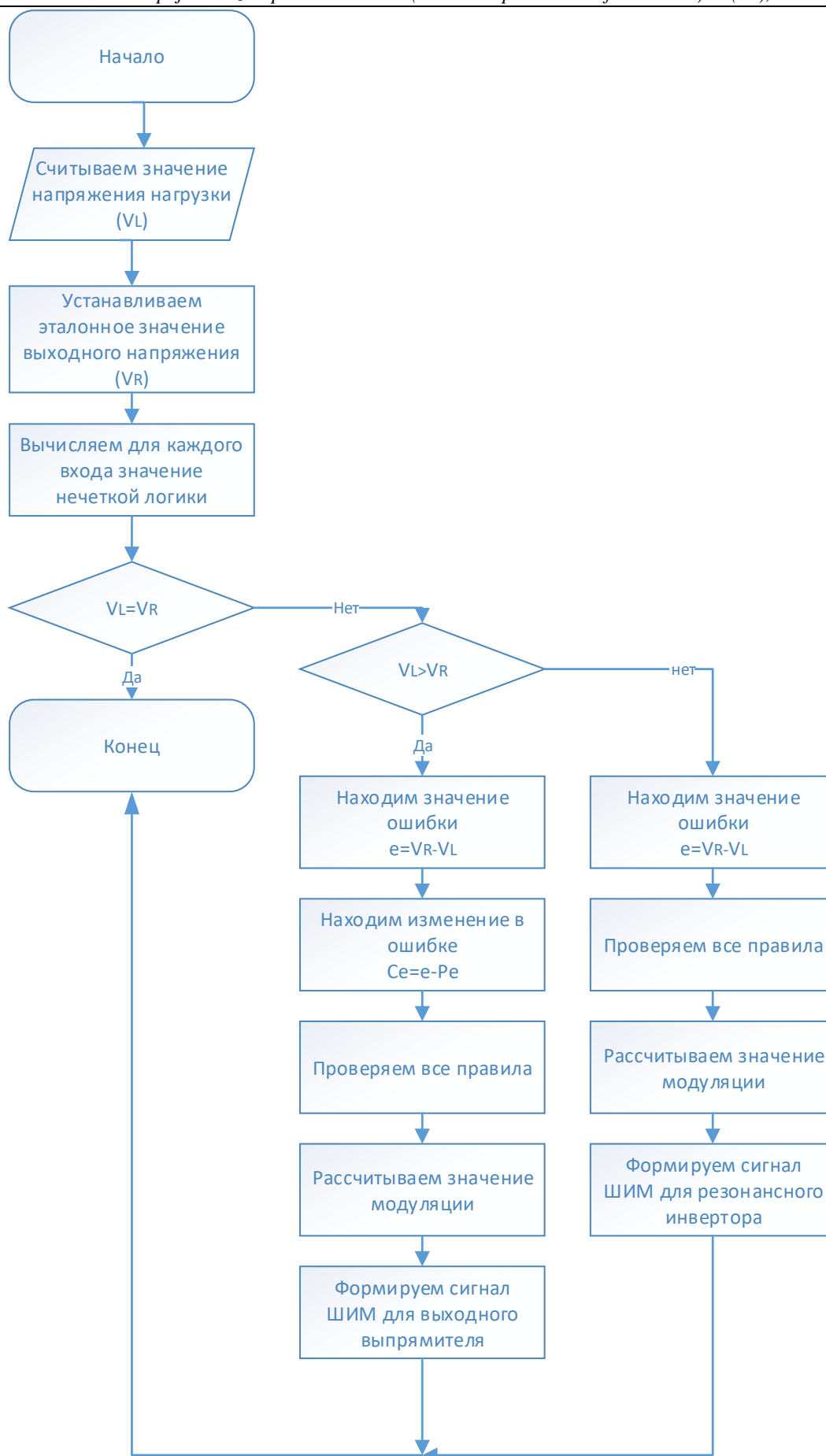


Рис. 9

4. Результаты моделирования

Моделирование замкнутого контура с использованием FLC контроллера для LLC осуществляется с помощью программного обеспечения MATLAB / Simulink. В зависимости от погрешности и изменения погрешности исчисляется величина изменения рабочего цикла. Инструкции по набору параметров и

функциональные блоки, доступные в MATLAB, используются для обновления нового рабочего цикла генераторов ШИМ.

Схема моделирования замкнутого контура LLC резонансного преобразователя с использованием FLC показана на рис. 10. Преобразователь работает с чистой коммутации 50 кГц.

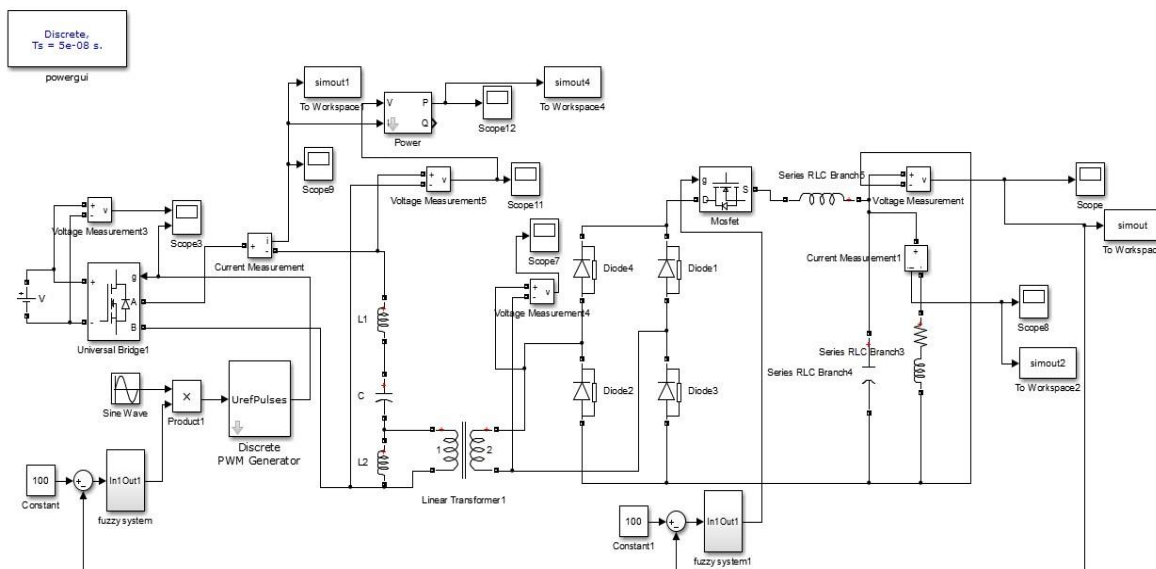


Рис. 10

Полученные результаты моделирования работы резонансного преобразователя, управляемого регулятором на основе нечёткой

логики по двум методам Мамдани (рис. 11) и Сугено (рис 12) сравниваются с результатами для обычного FLC регулятора из источника [14].

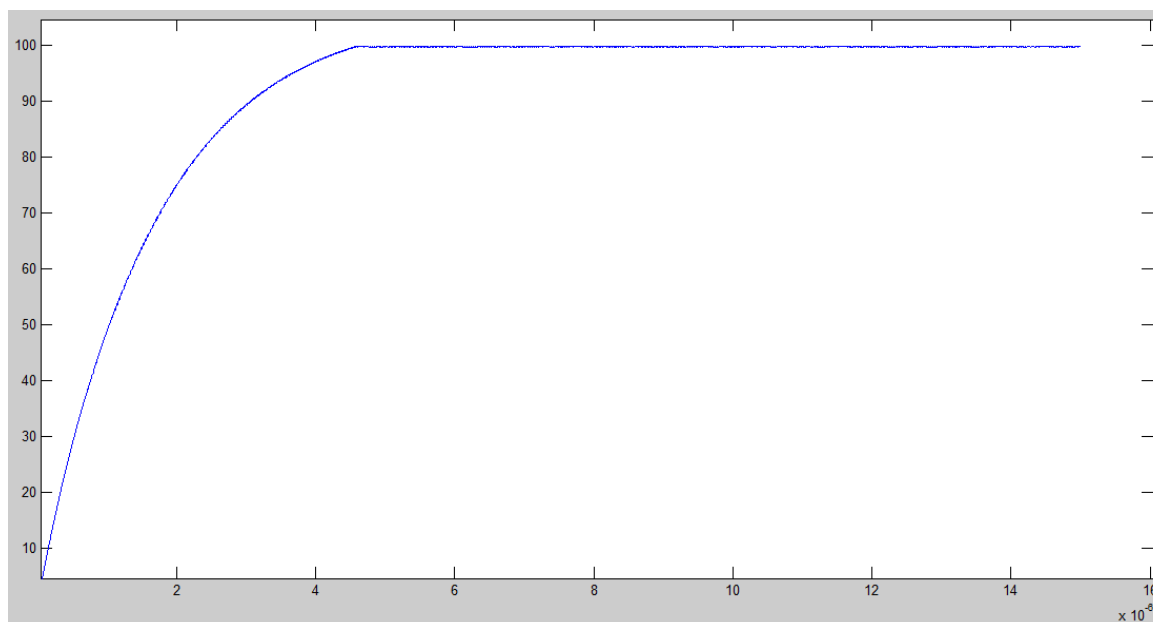


Рис. 11

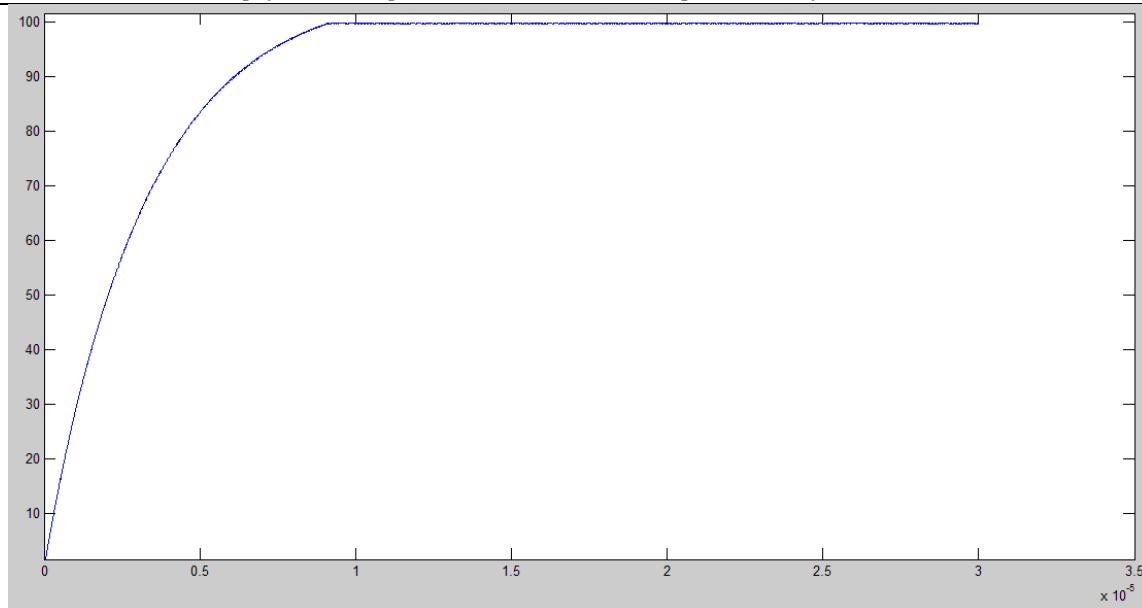


Рис. 12

Результаты моделирования представлены в таблице 2:

Таблица 2

Тип управления	Время нарастания (мс)	Час встановлення (мс)	Відхилення вихідної напруги
FLC	0.057	0.07	1.6%
FLC (Мамдані)	0.0027	0.005	0.4%
FLC (Сугено)	0.0024	0.0046	0.2%

5. Выводы

В данной работе нечёткий логический контроллер был разработан для улучшения отклика системы, например, времени установления, при реализации нечёткого контроллера системы управления на основе метода Мамдани получили выходное напряжение 99.6 от заданного напряжения 100В, установке составил 0.005 мс, время нарастания - 0.027 мс. Для метода Сугено выходное напряжение было 99,8, время установки 0.0046 мс, время нарастания - 0.0024 мс. Исходя из полученных данных, метод управления на основе Сугено является оптимальным для регулировки выходного напряжения резонансного источника питания.

Литература

1. Robert L. Steigerwald, "A Comparison of Half-bridge resonant converter topologies," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 3, No. 2, April 1988.
2. A. F. Witulski and R. W. Erickson, "Design of the series resonant converter for minimum stress," IEEE Transactions on Aerosp. Electron. Syst., Vol. AES-22, pp. 356-363, July 1986.
3. R. Oruganti, J. Yang, and F.C. Lee, "Implementation of Optimal Trajectory Control of

Series Resonant Converters," Proc. IEEE PESC '87, 1987.

4. V. Vorperian and S. Cuk, "A Complete DC Analysis of the Series Resonant Converter," Proc. IEEE PESC'82, 1982.

5. Y. G. Kang, A. K. Upadhyay, D. L. Stephens, "Analysis and design of a half-bridge parallel resonant converter operating above resonance," IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 27, March-April 1991 pp. 386 - 395

6. R. Oruganti, J. Yang, and F.C. Lee, "State Plane Analysis of Parallel Resonant Converters," Proc. IEEE PESC '85, 1985.

7. M. Emsermann, "An Approximate Steady State and Small Signal Analysis of the Parallel Resonant Converter Running Above Resonance," Proc. Power Electronics and Variable Speed Drives '91, 1991, pp. 9-14.

8. http://home.agh.edu.pl/~vlsi/AI/rozmyta_en/

9. Robert Fuller, "Fuzzy Reasoning and Fuzzy Optimization," TUCS General Publications, No. 9, Turku Centre for Computer Science, Abo, 1998.

10. M. Ibrahim, Fuzzy Logic for Embedded Systems and applications, Elsevier Science, MA, USA, 2004.

11. Funk, P., Online fuzzy case-based individual stress diagnosing system, Master Thesis, Mälardalen University, 2005.

12. Oscar Castillo and Patricia Melin, "Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ISBN: 978-3-540-76283-6.

13. Mohammed S. EL-Moghany, Sun and Maximum Power Point Tracking in Solar Array

Systems Using Fuzzy Controllers via FPGA, Master Thesis, Islamic University-Gaza, 2011.

14. S. Selvaperumal, C. Christofer Asir Rajan, and S. Muralidharan "Stability and Performance Investigation of a Fuzzy-Controlled LCL Resonant Converter in an RTOS Environment" IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 28, No. 4, pp. 1820–1821, AP. 2013.

УДК 621.314.26: 539.16.04

ГРНТИ 45.37.31: 58.35.06

Chermalykh A.V.

*candidate of engineering sciences,
associate professor*

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Muhenov D.D.

*postgraduate at the department of automation control
of electrotechnical systems*

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

IONIZING RADIATION INFLUENCE ON THE FREQUENCY CONVERTER OUTPUT VOLTAGE

Чермалых Александр Валентинович

к.т.н., доц.

*Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского*

Мугенов Даниил Джалильевич

*аспирант кафедры автоматизации управления
электротехническими комплексами
Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского*

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Summary. The influence of radiation on the operation of a bridge crane of a nuclear waste storage facility is considered. It was found that the most sensitive to ionizing radiation are semiconductor devices in the electric drive system. We studied the change in the parameters of each of the power semiconductor device of the frequency converter with a direct current link from the absorbed dose of ionizing radiation. To do this, an analysis of the literature on theoretical and experimental studies has done. The equations of electrical equilibrium based on the frequency converter power channel diagram are written taking into account radiation sensitive parameters. A mathematical model of the dependence of the electrical energy semiconductor converter output voltage parameters on the absorbed dose of ionizing radiation is obtained to quantify the radiation effects. Plots of the dependence of the radiation-sensitive parameters of semiconductor devices on the absorbed dose are built. The concept of radiation dynamic resistance is introduced to evaluate the behavior of an insulated gate bipolar transistor collector-emitter channel. Elements which radiation-caused changes affects the most critically on operation of the system were discovered. The dependence of the output voltage of the frequency converter on the absorbed dose of ionizing radiation is obtained.

Аннотация. Рассмотрено влияние радиационного излучения на работу мостового крана хранилища ядерных отходов. Обнаружено, что наиболее чувствительными к ионизирующему излучению являются полупроводниковые приборы в составе системы электропривода. Изучено изменение параметров каждого из силовых полупроводниковых приборов преобразователя частоты со звеном постоянного тока от поглощённой дозы ионизирующего излучения. Для этого проведен анализ литературных источников по теоретическим и экспериментальным исследованиям. На основании схемы силового канала преобразователя частоты записаны уравнения электрического равновесия с учётом чувствительных к радиации параметров. Для количественной оценки влияния радиации получена математическая модель зависимости параметров выходного напряжения полупроводникового преобразователя электрической энергии от поглощённой дозы ионизирующего излучения. Построены графики зависимостей радиационно-чувствительных параметров полупроводниковых приборов от поглощённой дозы. Введено понятие радиационного динамического сопротивления для оценки поведения канала коллектор-эмиттер биполярного транзистора с изолированным затвором. Определены элементы, радиационное изменение

параметров которых наиболее критично сказывается на работе системы. Получена зависимость выходного напряжения преобразователя частоты от величины поглощённой дозы ионизирующего излучения.

Key words: radiation, ionizing radiation, electric drive, frequency converter, diode, transistor, optocoupler.

Ключевые слова: радиация, ионизирующее излучение, электропривод, преобразователь частоты, диод, транзистор, оптрон.

Постановка проблемы. Для захоронения ядерных отходов в Чернобыльской зоне отчуждения сооружены промышленные комплексы для приёма, переработки и захоронения радиоактивных отходов (РАО). К их числу относятся завод по переработке жидких отходов и промышленный комплекс по обращению с твердыми радиоактивными отходами. Продуктами этих учреждений являются 200 литровые бочки с отвердевшими в цементной матрице жидкими РАО и залитые цементом бетонные контейнеры с твердыми РАО. Вес таких контейнеров может достигать нескольких десятков тонн и для их складирования необходимо использовать подъемно-транспортное оборудование. На объектах специально оборудованных приповерхностных хранилищ твердых радиоактивных отходов используются мостовые краны. Механизмы мостового крана приводятся в движение средствами электрических приводов по схеме преобразователь частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока - асинхронный короткозамкнутый двигатель. Поскольку кран находится в агрессивной среде радиационного излучения, вызванного общей активностью РАО и повышенным радиационным фоном местности, уместно оценить степень влияния радиации на его рабочие характеристики. Влияние радиации на мостовой кран рассмотрим на примере электропривода подъема, в связи с тем, что приводы передвижения моста и тележки реализованы по такой же схеме.

Анализ последних исследований и публикация. Для изучения влияния ионизирующего излучения (ИИ) на элементы

электропривода проанализированы научные труды в виде монографий и статей, 11 из которых были непосредственно использованы в данном исследовании. В результате проведенных изысканий выделены изделия, наиболее подверженные влиянию ИИ. Ими оказались изделия, изготовленные из полупроводниковых материалов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Исследования, посвященные изучению влияния ИИ на полупроводниковые приборы, охватывают интегральные микросхемы и логические устройства. Рассмотрение силовых устройств питания ограничивается маломощными 30 Вт [1] преобразователями постоянного тока. Такое положение вещей связано с потребностями развивающейся космической отрасли. Поэтому в данном исследовании не будет уделяться внимание слаботочным системам. Исходя из вышесказанного, нерешенной частью проблемы является исследование радиационной стойкости промышленных ПЧ со звеном постоянного тока средней мощности (1.5 ÷ 500 кВт).

Цель данной статьи – получение математической зависимости параметров выходного напряжения преобразователя частоты от величины поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Основной материал. Структурно классический силовой канал полупроводникового преобразователя представляет собой неуправляемый выпрямитель, автономный инвертор напряжения и драйверы управления (рис. 1).

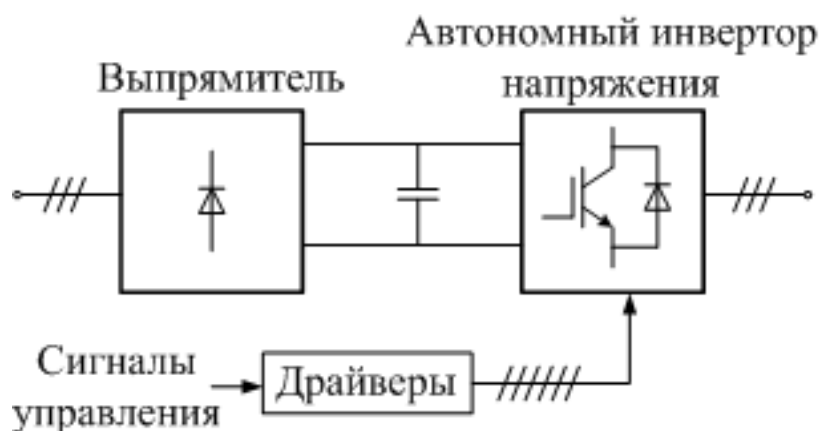


Рис.1. Структура силового канала преобразователя частоты

Выпрямитель реализован по схеме Ларионова, инвертор – трехфазный мостовой. В качестве силового ключа в преобразователях средней мощности используют биполярные транзисторы с

изолированным затвором (БТИЗ). Такие транзисторы можно представить схемой замещения, в которой *n*-канальный полевой транзистор с индуцированным каналом стоком

соединен с базой биполярного *pnp* транзистора, а истоком – с его коллектором (VT2 и VT3 на рис. 2).

Для дальнейшего понимания процессов, протекающих при облучении в электрическом преобразователе, рассмотрим структуру силового канала ПЧ для одного транзистора коллекторной

группы в момент пика фазы А. На основании классической схемы силового полупроводникового канала преобразователя частоты построена детальная схема замещения для одного транзистора коллекторной группы инвертора (рис. 2).

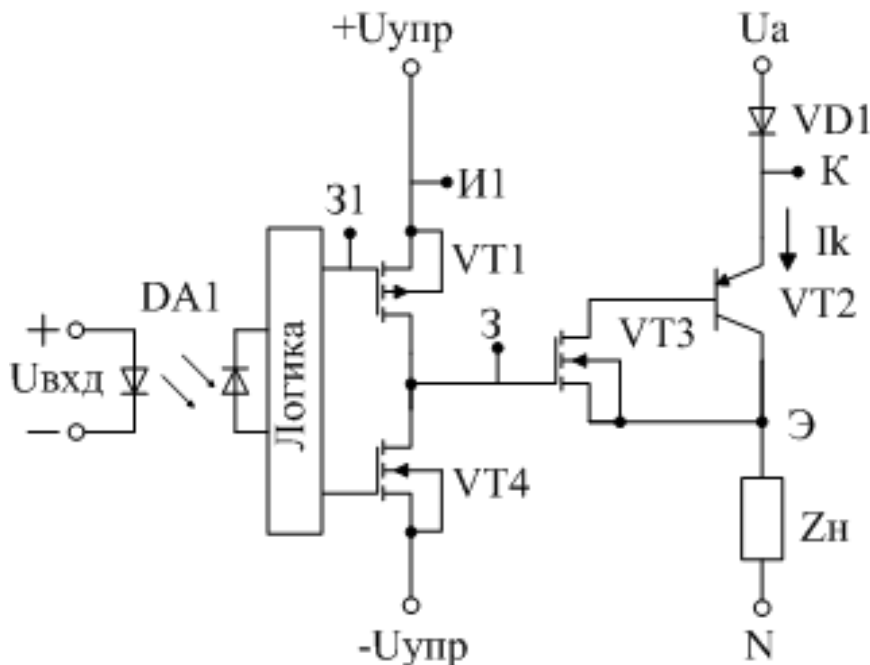


Рис.2. Полупроводниковая структура силового канала преобразователя для одного транзистора.

На рис. 2 обозначены: VD1 – выпрямительный диод; VT1 – *p*-канальный металл-диэлектрик-полупроводниковый (МДП) транзистор драйвера; VT2 – биполярный *pnp* транзистор в составе БТИЗ; VT3 – *n*-канальный МДП в составе БТИЗ; VT4 – *n*-канальный МДП драйвера; DA1 – оптоинвертор; $U_{вхд}$ – сигнал управления драйвера; $+U_{упр}$ и $-U_{упр}$ – напряжение, коммутируемое на затвор БТИЗ; U_a – напряжение фазы А; I_k – ток коллектора; Z_n – полное сопротивление нагрузки; 31, И1 – затвор и исток транзистора VT1; 3, К, Э – затвор, коллектор и эмиттер БТИЗ; N – нейтраль.

Драйверы для управления ключами, например TLP5751, состоят из оптоинвертора DA1 для гальванической развязки, блока “Логика” для

формирования таблицы истинности и транзисторов для непосредственной коммутации затвора БТИЗ. Выходная цепь драйвера выполнена по комплементарной схеме: *p*-канальный МДП транзистор коммутирует положительное напряжение на затвор БТИЗ, *n*-канальный – отрицательное. Такой подход позволяет управлять обоими транзисторами единым сигналом.

Рассмотрим влияние ИИ на полупроводниковые элементы схемы.

1. Диод VD1. Согласно [2, с. 12] вследствие облучения на диоде повышается величина прямого падения напряжения, равная сумме падений напряжений на *p-n* переходе и в базе диода:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{прям}}(\Phi) &= \Delta U_{pn}(\Phi) + \Delta U_{\text{базы}}(\Phi) = \\ &= \frac{I \cdot w_b}{q \mu_n N_b(0) S_{pn}} [\exp(-K_N \Phi) - 1] - \\ &- \frac{kT}{q} \left\{ K_N \Phi + \frac{1}{2} \ln[1 + K_\tau \tau_p(0) \Phi] \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где I – прямой ток через диод; w_b – толщина базы (*n* области) диода; q – заряд электрона; μ_n – дрейфовая подвижность электронов; $N_b(0)$ – концентрация легирующей примеси в базе диода до облучения; S_{pn} – площадь *p-n* перехода; K_N – коэффициент радиационного изменения концентрации основных носителей заряда; Φ – интегральный поток облучения; k – постоянная

Больцмана; T – абсолютная температура; K_τ – коэффициент радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда; $\tau_p(0)$ – время жизни неосновных носителей заряда в базе до облучения.

2. Полевые МДП транзисторы VT1, VT3, VT4. Теоретические [2, с. 32; 3; 4] исследования показывают, что радиационно зависимыми

параметрами МДП транзисторов являются: пороговое напряжение (напряжение отсечки), крутизна стокзатворных характеристик и вольтфарадные характеристики. Исходя из того, что быстродействие ключей колеблется в пределах от наносекунд до десятых долей микросекунд, а по причине облучения барьерное и диффузионные ёмкости уменьшаются, что не приводит к

уменьшению быстродействия, изменением вольтфарадных характеристик можно пренебречь. Снижение крутизны стокзатворных характеристик несущественно и, в дальнейшем, этот параметр не рассматривается. Для количественной оценки изменения порогового напряжения воспользуемся формулой из [3]:

$$\Delta U_{\text{порог}}(D) = -3.4 \cdot 10^{-8} \cdot t_{ox}^2 \cdot F(E, \xi) \cdot F_t \cdot D + 2.4 \cdot 10^{-8} \cdot t_{ox}^2 \cdot D^{2/3}, \quad (2)$$

где t_{ox} – толщина подзатворного окисла (диэлектрика); $F(E, \xi)$ – выход дырок как функция от электрического поля E и энергии облучающих частиц ξ ; F_t – технологический коэффициент; D – поглощенная доза ионизирующего излучения.

Исходя из теоретических [2] и экспериментальных [4] исследований выявлено, что у p -канальных транзисторов напряжение

отсечки увеличивается по модулю на величину (2), а у n -канальных – уменьшается.

3. Биполярный транзистор VT2. Исходя из исследования [6] у биполярного транзистора, работающего в ключевом режиме, ввиду облучения увеличивается коллекторное сопротивление, что приводит к увеличению падения напряжения насыщения и выделению мощности на кристалле.

$$\Delta R_{K.\text{нас}}(\Phi) = \frac{\exp(K_N \cdot \Phi)}{q \cdot N_{K0} \cdot \mu_{K.\text{онз}} \cdot S_{K.\text{эф}}} \cdot \left[\frac{W_{K.\text{еп}} - 2 \cdot \sqrt{D_{K.\text{онз}} \cdot \left(\frac{I_{B(\text{нас})}}{I_K} - \frac{1}{h_{21E}(0)} - K_{\text{эф}} \cdot t_A \cdot \Phi \right)}}{\sqrt{\frac{1}{\tau_{n0}} + K_\tau \cdot \Phi}} \right], \quad (3)$$

где K_N – коэффициент радиационного изменения концентрации легирующей примеси в высокоомной части коллектора; N_{K0} – концентрация легирующей примеси в высокоомной части коллектора; $\mu_{K.\text{онз}}$ – подвижность основных носителей заряда в эпитаксиальной области коллектора; $S_{K.\text{эф}}$ – эффективная площадь коллектора, по которой протекает весь коллекторный ток; $W_{K.\text{еп}}$ – толщина эпитаксиального слоя коллектора; $D_{K.\text{онз}}$ – коэффициент диффузии основных носителей заряда в области коллектора; $I_{B(\text{нас})}$ – ток базы, при котором транзистор переходит в режим насыщения; I_K – ток коллектора; $h_{21E}(0)$ – коэффициент усиления тока транзистора; $K_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент радиационных повреждений в транзисторе; t_A – время пролёта

неосновных носителей заряда через активную базу транзистора; τ_{n0} – время жизни неравновесных носителей заряда.

4. Оптрон DA1. Вследствие радиационного облучения у оптрона происходит деградация коэффициента передачи по току, что вызвано уменьшением интенсивности света, излучаемого светодиодом, и снижением чувствительности фотоприемника [7]. Экспериментальные исследования [8, 9] демонстрируют снижение отношения коэффициента передачи по току облученного оптрона к коэффициенту необлученного до нуля при дозе в 1 Мрад. Обозначим это отношение радиационным изменением коэффициента передачи оптрона по току $K_{OP}(D) = CTR(D)/CTR_0$, тогда

$$K_{OP}(D) = 1 - K_{\text{рад.изм.}} \cdot D^{2/3}, \quad (4)$$

где CTR_0 – коэффициент передачи оптрона до облучения; $K_{\text{рад.изм.}}$ – коэффициент радиационного изменения коэффициента передачи по току.

Для дальнейшей наглядности приведем формулы (1) - (4) к единому аргументу – поглощенной дозе D . Поскольку (1) и (3) являются функциями от интегрального потока,

воспользовавшись выражением из [10, с. 4] для нахождения дозы гамма излучения в радах определим, что поглощенной дозе в 1 [Мрад] соответствует поток $2.17 \cdot 10^{15}$ [1/см²]. На рис. 3 представлены графики зависимостей от поглощённой дозы, построенные по выражениям (1)

- (4) для полупроводниковых устройств в составе ПЧ мощностью 18.5 кВт.

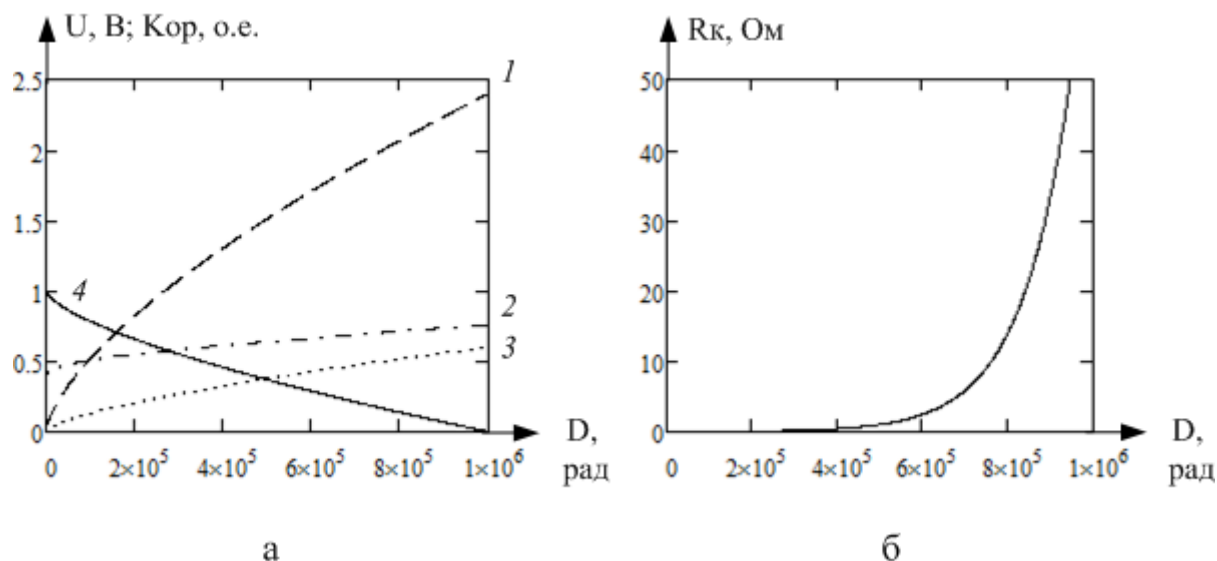


Рис.3. Графики зависимостей радиационно чувствительных параметров от поглощенной дозы. а: 1 – пороговое напряжение транзистора VT3; 2 – прямое падение напряжения на диоде VD1; 3 – пороговое напряжение транзисторов VT1 и VT4; 4 – коэффициент передачи по току DA1. б – коллекторное сопротивление биполярного транзистора VT2.

Для количественной оценки влияния ИИ на параметры выходного напряжения преобразователя запишем уравнения электрического равновесия для участков цепи (см. рис. 2).

1. Напряжение между точками 31-И1 – напряжение затвор-исток транзистора VT1 как функция выходного напряжения драйвера:

$$U_{13И}(D) = U_{вхд} \cdot CTR_0 \cdot K_{OP}(D), \quad (5)$$

где $U_{вхд}$ – входное напряжение драйвера; $K_{OP}(D)$ – функция радиационного изменения коэффициента передачи оптрона по току, определяется выражением (4).

2. Напряжение между точками 3-Э, или входное напряжение БТИЗ. Из источника [11] взято математическое выражение для стокзатворной характеристики транзистора и на её основе записана зависимость выходного напряжения VT1, которое является входным напряжением VT3:

$$U_{3Э}(D) = \begin{cases} R_{1d} \cdot I_{1S0} \cdot \left(\frac{1 - -U_{13И}(D)}{U_{10} - \Delta U_{порог}(D)} \right)^2, \\ -U_{13И}(D) < U_{10} - \Delta U_{порог}(D) \\ 0, -U_{13И}(D) \geq U_{10} - \Delta U_{порог}(D) \end{cases}, \quad (6)$$

где R_{1d} – сопротивление нагрузки VT1 равно входному сопротивлению БТИЗ; I_{1S0} – ток стока насыщения VT1; U_{10} – напряжение отсечки (пороговое) VT1; $\Delta U_{порог}(D)$ – изменение величины

порогового напряжения вследствие действия ИИ, выражение (2).

Зависимость напряжений затвор-исток транзистора VT1 и затвор-эмиттер БТИЗ от поглощенной дозы приведена на рис. 4.

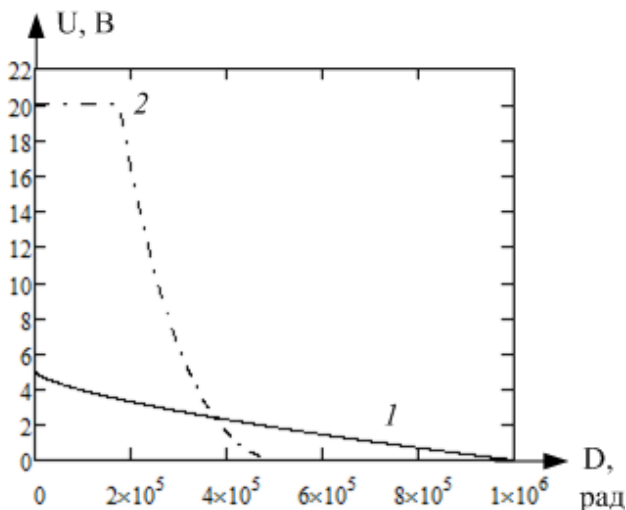


Рис. 4. Зависимости напряжений затвор-исток транзистора VT1 (кривая 1) и затвор-эмиттер БТИЗ (кривая 2) от поглощенной дозы

Так как напряжение на выходе драйвера ограничивается допустимой величиной (для рассматриваемого случая выходное напряжение драйвера TLP5751 – не более 30 В), а предельное напряжение на затворе БТИЗ не должно превышать 20 В (IGBT модуль BSM50GB120DN2), выходное напряжение драйвера ограничим величиной в 20 В. Из графика рис. 4, кривая 2, видно, что до поглощенной дозы $2 \cdot 10^5$ рад облучение не влияет

на работу драйвера, а после $5 \cdot 10^5$ рад наступает его функциональный отказ.

3. Ток коллектора БТИЗ. Для БТИЗ справедливо уравнение для стокзатворных характеристик полевых транзисторов [11], о чём свидетельствует совпадение полученных проходных характеристик с заводскими данными. Система уравнений для определения тока коллектора БТИЗ имеет вид:

$$I_K(D) = \begin{cases} I_{K0} \cdot \left(\frac{1 - \frac{U_{зз}(D)}{U_0 + \Delta U_{порог}(D)}}{U_0 + \Delta U_{порог}(D)} \right)^2, & U_{зз}(D) \geq U_0 + \Delta U_{порог}(D) \\ 0, & U_{зз}(D) < U_0 + \Delta U_{порог}(D) \end{cases}, \quad (7)$$

где I_{K0} – ток коллектора насыщения; U_0 – напряжение отсечки (пороговое); $\Delta U_{порог}(D)$ – напряжение отсечки, вызванное радиационным влиянием (2).

Зависимость тока коллектора от поглощенной дозы и передаточные характеристики БТИЗ изображены на рис. 5.

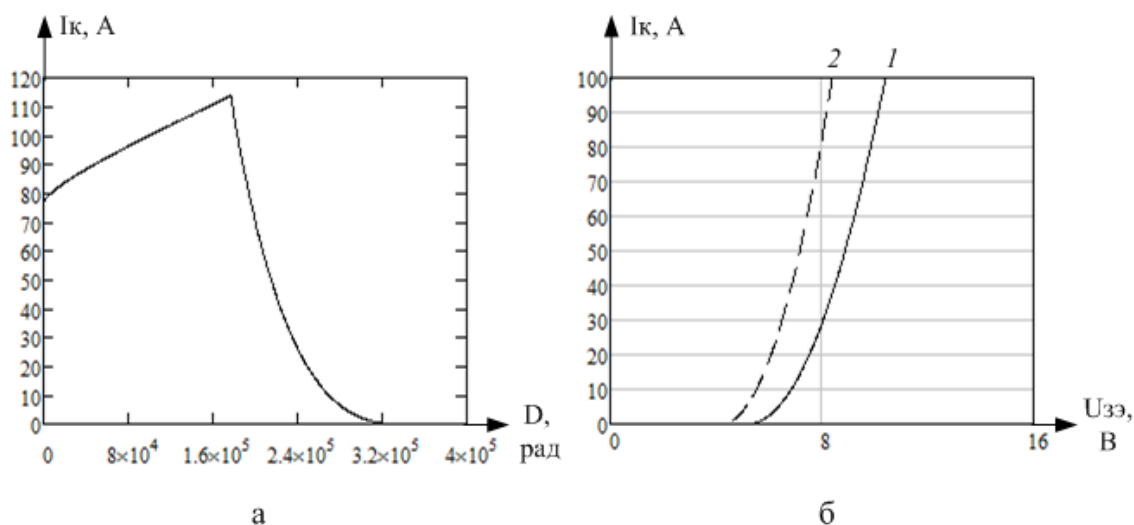


Рис. 5. Зависимость тока коллектора от поглощенной дозы (а) и передаточные характеристики БТИЗ (б): 1 – до облучения, 2 – после облучения

На графике зависимости тока коллектора от поглощённой дозы (рис. 5, а) рост тока до дозы $2 \cdot 10^5$ рад вызван снижением порогового напряжения БТИЗ (рис. 5, б). Выражение (7) и его графическая интерпретация (рис. 5, а) показывает, что БТИЗ теоретически сможет пропускать больший ток, потому, можно утверждать, что до дозы $2 \cdot 10^5$ рад работа БТИЗ не будет изменяться. С ростом дозы от $2 \cdot 10^5$ до $3.2 \cdot 10^5$ рад происходит снижение тока

$$U_1(D) = \begin{cases} U_a - (U_{\text{пр}} + \Delta U_{\text{прям}}(D)), \\ U_a \geq U_{\text{пр}} + \Delta U_{\text{прям}}(D) \\ 0, U_a < U_{\text{пр}} + \Delta U_{\text{прям}}(D) \end{cases}, \quad (8)$$

где U_a – мгновенное значение напряжения фазы А; $U_{\text{пр}}$ – прямое падение напряжения на необлученном диоде; $\Delta U_{\text{прям}}(D)$ – функция изменения прямого падения напряжения на диоде от поглощённой дозы (1). Поскольку падение напряжения на диоде от радиационного излучения возрастает на 0.8 В к дозе 1 Мрад, что составляет 0.31% от величины выпрямленного напряжения, этот параметр практически не влияет на работу системы.

$$R_{\text{рд}}(D) = R_{\text{к.ном}} + \Delta R_{\text{к.нас}}(D) + \frac{U_1(D)}{I_{\text{к}}(D)}, \quad (9)$$

где $R_{\text{к.ном}}$ – номинальное сопротивление коллектора; $R_{\text{к.нас}}(D)$ – функция сопротивления насыщения коллектора, определяется выражением (3).

коллектора, что вызвано радиационным изменением выходного напряжения драйвера (6). При поглощённой дозе более $3.2 \cdot 10^5$ рад в коллекторе БТИЗ прекращает протекать ток.

4. Выходное напряжение диода VD1 – напряжение между точками К-Н. Запишем уравнение выходного напряжения диода как функцию от поглощённой дозы:

5. Напряжение на нагрузке – между точками Е-Н. Так как под влиянием ИИ ток коллектора снижается до нуля, то БТИЗ из ключевого режима работы переходит в активный, что вызвано изменением сопротивления канала коллектор-эмиттер. Введем понятие радиационного динамического сопротивления для количественной оценки поведения канала коллектор-эмиттер в условиях облучения, используя функции (7) и (8):

Зависимость динамического радиационного сопротивления от поглощённой дозы иллюстрирует рис. 6.

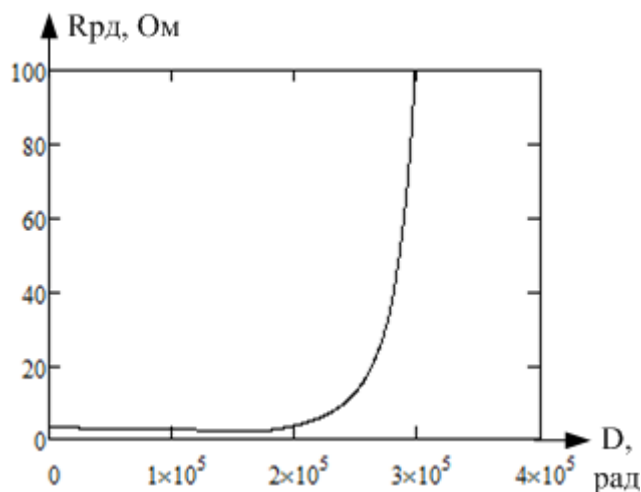


Рис. 6. Зависимость динамического радиационного сопротивления от поглощённой дозы

Таким образом, начиная с дозы приблизительно в $2.5 \cdot 10^5$ рад сопротивление канала коллектор-эмиттер резко возрастает, что говорит о закрытии транзистора при достижении критической поглощённой дозы.

Рассмотрим БТИЗ и нагрузку как классический делитель напряжения. Входным

напряжением будет $U_1(D)$ между точками К-Н, выходным напряжением – напряжением на нагрузке $U_{\text{н}}(D)$ между точками Е-Н (рис. 2). Сопротивлениями послужат $R_{\text{рд}}(D)$ (9) и сопротивление нагрузки $Z_{\text{н}}$. Тогда напряжение на нагрузке выражается как

$$U_H(D) = U_1(D) \frac{Z_H}{Z_H + R_{pд}(D)} \quad (10)$$

Зависимость амплитуды выходного напряжения полупроводникового преобразователя от поглощённой дозы представлена на рис. 7.

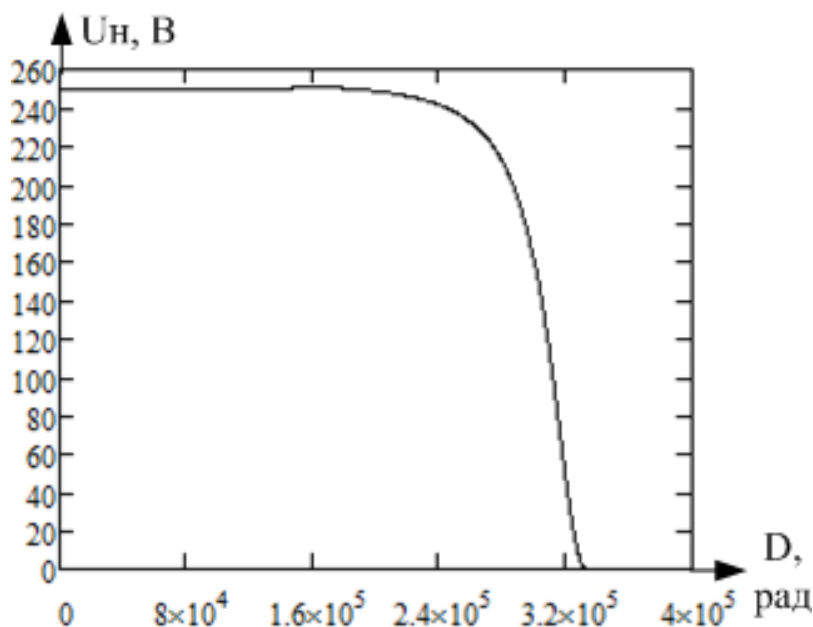


Рис. 7. Зависимость амплитуды выходного напряжения полупроводникового преобразователя от поглощённой дозы

Из графика видно, что начиная приблизительно с $1.8 \cdot 10^5$ рад начинается плавное спадание амплитуды выходного напряжения, его величина достигнет 90% от номинала при дозе $2.65 \cdot 10^5$ рад, при дальнейшем облучении функция экспоненциально спадает и достигает 0 при дозе $3.3 \cdot 10^5$ рад. Формулы (1) – (10) представляют собой математическую модель для расчета выходного напряжения преобразователя частоты средней мощности от величины поглощённой дозы.

Исследования проводились с использованием программной среды Mathcad 15.

Выводы и предположения. Выполнено теоретическое исследование влияния радиационного излучения на силовой канал полупроводникового преобразователя в составе электропривода подъема мостового крана. Установлено, что под влиянием радиации уменьшается амплитуда выходного напряжения преобразователя, а частота остается заданной. Поскольку с ростом поглощенной дозы внутренние емкости транзисторов уменьшаются, а так как их значения имеют порядок $10^{-9} \div 10^{-12}$ фарад, то можно считать, что радиация не влияет на скорость коммутации.

Получена и исследована математическая модель влияния ИИ на амплитуду выходного напряжения преобразователя частоты в составе системы электропривода.

Определено, что радиационно чувствительными полупроводниковыми устройствами в составе преобразователя частоты, оказывающими наибольшее влияние на работоспособность системы, являются: оптрон, полевые *p* и *n*-канальные МДП транзисторы в составе драйвера, полевой *n*-канальный силовой МДП, биполярный *npn* транзисторы в составе БТИЗ и выпрямительный диод.

На основании полученного закона изменения выходного напряжения электрического преобразователя появляется возможность разработки программного средства компенсации радиационного воздействия на полупроводниковые устройства в системе электропривода.

Список литературы:

1. Светлаков В.А.,Пронькин И.Г., Бельков А.М. Модернизация источника вторичного электропитания для бортовой аппаратуры заказов серии «СОЮЗ» // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 1. С. 47–55. [Svetlakov V.A.,Pron'kin I.G., Bel'kov A.M., Modernizacija istochnika vtorichnogo jelektropitanija dlja bortovoj apparatury zakazov serii «SOJuZ» // Vestnik JuUrGU. Serija «Komp'juternye tehnologii, upravlenie, radiojelektronika». 2018. vol. 18, (1). p. 47–55. (In Russ).] <https://doi.org/10.14529/ctcr180105>

2. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов: учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств», М., 2001. [Vologdin Je.N., Lysenko A.P. Radiacionnye jeffekty v nekotoryh klassah poluprovodnikovyh priborov: uchebnoe posobie po discipline «Radiacionnaja stojkost' poluprovodnikovyh priborov i radiojelektronnyh ustrojstv», М., 2001. (In Russ).]

3. Melikyan V., Hovsepyan A., Harutyunyan T. Schematic Protection Method from Influence of Total Ionization Dose Effects on Threshold Voltage of MOS Transistors. 2010 East-West Design & Test Symposium.

<https://doi.org/10.1109/ewdts.2010.5742096>

4. Srour J.R., McGarrity J.M. Radiation effects on microelectronics in space. United States: N. p., 1988. <https://doi.org/10.1109/5.90114>

5. Nagaraj Sh., Singh V., Jayanna H.S., et al. 60Co-Gamma Ray Induced Total Dose Effects on P-Channel MOSFETs Indian Journal of Materials Science Vol. 2013, Article ID 465905, 5 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/465905>

6. Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Радиационная стойкость биполярных транзисторов: учебное пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств», М., 2000. [Vologdin Je.N., Lysenko A.P. Radiacionnaja stojkost' bipolarjnyh tranzistorov: uchebnoe posobie po discipline «Radiacionnaja stojkost' poluprovodnikovyh priborov i radiojelektronnyh ustrojstv», М., 2000. (In Russ).]

7. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах // Мн., «Наука и техника», 1978. [Korshunov F.P., Gatal'skij G.V., Ivanov G.M. Radiacionnye jeffekty v poluprovodnikovyh priborah // Мн., «Nauka i tehnika», 1978. (In Russ).]

8. LaBel K.A., Kniffin S.D., Reed R.A. et al. A Compendium of Recent Optocoupler Radiation Test Data. 2000 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Workshop Record. Held in conjunction with IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (Cat. No.00TH8527).

<https://doi.org/10.1109/redw.2000.896280>

9. Johnston A.H. The Effects of Space Radiation on Optocouplers. California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory; California Institute of Technology, Pasadena, California; USA- 91 109.

10. Роках А.Г. Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и приборы: конспект лекций по курсам «Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и структуры» и «Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые приборы», Саратов: СГУ, 60 с. [Rokah A.G. Dejstvie ionizirujushhh izluchenij na poluprovodnikovye materialy i pribory: konspekt lekcij po kursam «Dejstvie ionizirujushhh izluchenij na poluprovodnikovye materialy i struktury» i «Dejstvie ionizirujushhh izluchenij na poluprovodnikovye pribory», Saratov: SGU, 60 p. (In Russ).]

11. Севин Л. Полевые транзисторы. М., «Советское радио», 1968. [Sevin L. Polevye tranzistory. М., «Sovetskoe radio», 1968. (In Russ).]

Azimova N.N.

*Assistant Professor in Mathematics & Computer sciences,
Don State Technical University*

Ashikhmin D.V.

*Bachelor in Mathematics & Computer sciences
Don State Technical University*

Ladosha E.N.

*Ph.D in Mathematics & Computer sciences, Associate Professor,
Don State Technical University*

Kyptsova I.S.

*Undergraduate student in Occupation safety and Environmental department
Don State Technical University*

Kholodova S.N.

*Ph.D in Occupation safety and Environmental department
Don State Technical University*

Tchukarina N.A.

*Undergraduate student in Occupation safety and Environmental department
Don State Technical University*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION NOISE FIELD AND AIR DUST POLLUTION ACOMPLISHED RAIL CUTTING

Азимова Наталья Николаевна

*Старший преподаватель кафедры прикладной математики,
Донской Государственный Технический Университет*

Ашихмин Денис Валерьевич

*бакалавр кафедры прикладной математики,
Донской Государственный Технический Университет*

Ладоша Евгений Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,
Донской Государственный Технический Университет

Купцова Ирина Сергеевна

аспирант кафедры «БЖ и ЗОС»,
Донской Государственный Технический Университет

Холодова Светлана Николаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры «БЖ и ЗОС»
Донской Государственный Технический Университет

Чукарина Наталья Александровна

аспирант кафедры «БЖ и ЗОС»,
Донской Государственный Технический Университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА И ЗАПЫЛЕННОСТИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ РЕЛЬСОРЕЗНОГО СТАНКА

Summary. Noise field and dust concentration in a working zone of rail cutting setup are investigated experimentally. Based on the study of aerodynamically characteristics of cyclones its' parametric optimization is performed. The efficiency of noise reduction by protective cover designed is tested. Results obtained are compressed by means of respective mathematical models.

Аннотация. Экспериментально исследованы шумовое поле и запыленность в рабочей зоне рельсорезного станка. Изучены аэродинамические характеристики циклонов и осуществлена их параметрическая оптимизация. Проверена эффективность шумопоглощения защитным кожухом рельсорезного станка. Результаты обобщены посредством математических моделей эмпирического характера.

Key words: metal cutting, dust, noise, dust content, experimental measurements.

Ключевые слова: резание металлов, пыль, шум, запыленность, экспериментальные измерения.

Введение

Для выбора конкретных инженерных мероприятий по снижению уровней шума и запыленности до допустимых величин [1-4] используются соответствующие характеристики технологического оборудования. Важной информацией для акустического расчета, а также для расчета шумовой нагрузки на персонал является разница между уровнями шума и запыленности, обусловленными работой системы (рельсорезный станок – рельс), и предельно-допустимыми значениями соответствующих физических параметров среды в рабочей зоне [1-4]. Получить данную информацию можно только при проведении экспериментальных исследований.

1. Шум в рабочей зоне резчика: измерения и анализ данных

Исследования спектров шума и вибрации рельсорезных станков выполнялись на холостом ходу, а также в типичных рабочих режимах. Первичной причиной появления шума в процессе резания является взаимодействие режущего инструмента с заготовкой, т.е. вибрационные процессы в узле «абразивный круг – рельс» [5-6]. Измерения уровней шума на рабочем месте проводились на высоте 1.5 м над уровнем пола. Результаты измерений шума представлены на рис. 1.

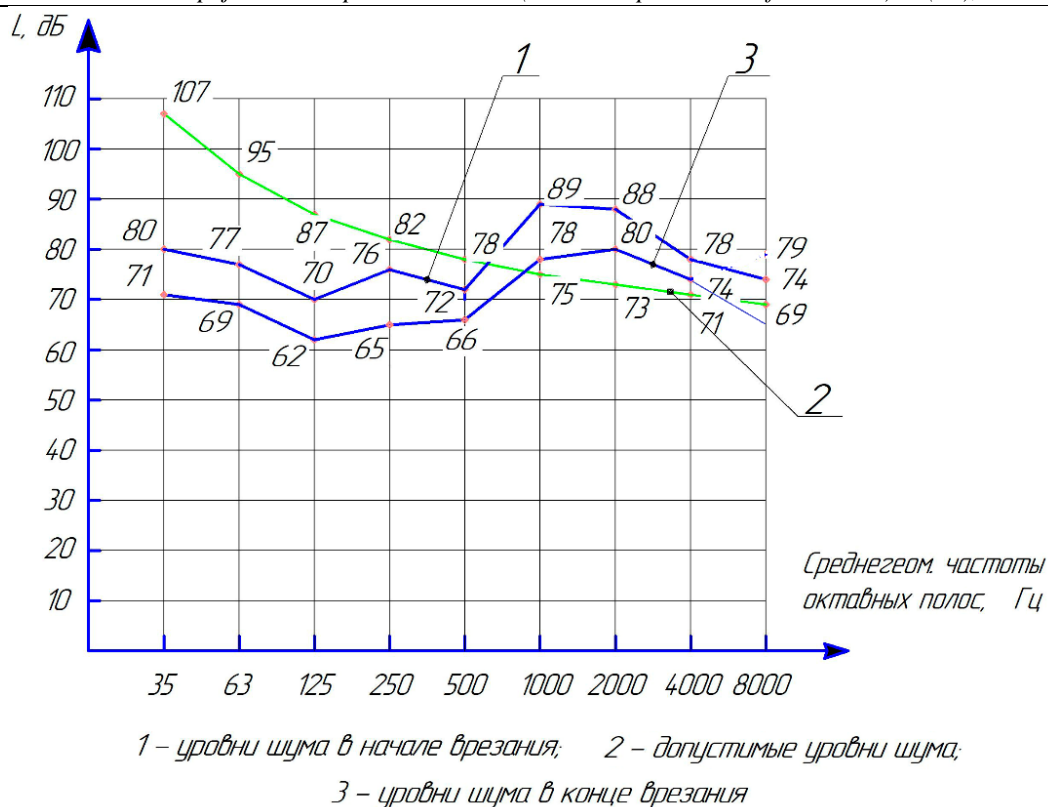


Рис. 1. Изменение уровней шума по мере увеличения глубины резания без использования пыле- и шумозащитного кожуха на рельсорезном станке

На максимальных частотах вращения уровни звукового давления, обусловленные работой станка, превышают предельно-допустимые значения. Хотя в процессе резки спектры шума трансформируются, в них преобладают средне- и высокочастотные компоненты. Существенно, что при частоте вращения режущего круга 3000 об/мин зафиксировано превышение уровней звукового давления до 5 дБ в интервале частот 1000-8000 Гц [2].

Расчет шумозащиты для рельсорезного станка требует построить математическую модель динамики шумового поля в соответствующем технологическом процессе. В ее основу положим экспериментальные данные рис. 1.

Поскольку звуковые спектры в начале и конце резания подобны (соответствующий коэффициент корреляции равен 0,89), их целесообразно описывать посредством однотипных функциональных зависимостей, например, полиномиальных. Учитывая, что число выраженных максимумов равно трем, а общее число экспериментальных точек десяти, базовой аппроксимирующей структурой следует выбрать полином третьей степени. При этом подобие начального и конечного спектра позволяют предположить, что коэффициенты для соответствующих полиномов должны иметь близкие значения, а в реальном процессе резания непрерывно трансформироваться от исходных значений – к конечным. Простейшим законом

такой трансформации служит линейный по степени врезания x/x_{\max} закон.

Для инициализации описанной модели требуется построить модели начального и конечного спектров резания. Практически требуется дважды решить оптимизационную задачу [7] вида

$$\Sigma (L(\lg f_i) - L_i)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $L(\lg f_i) \equiv A + B \cdot \lg f_i + C \cdot (\lg f_i)^2 + D \cdot (\lg f_i)^3$ – модельный частотный спектр шума; L_i – экспериментальный частотный спектр; i – обозначение опытной точки при практических измерениях шума ($i_{\max} = 10$); f_i – частота шума, соответствующая i -му измерению; A , B , C и D – искомые эмпирические параметры модели. Минимизируемая величина (1) известна в вычислительной математике [8] как невязка.

Можно строго доказать, что сформулированная здесь оптимизационная задача на минимум невязки эквивалентна задаче на максимум парной корреляции данных:

$$\text{Corr}(\{L(\lg f_i)\}, \{L_i\}) \rightarrow \max. \quad (2)$$

В данной работе обе задачи решены методами математического программирования [7], а результаты решения представлены на рис. 2 и в виде формул (3) и (4).

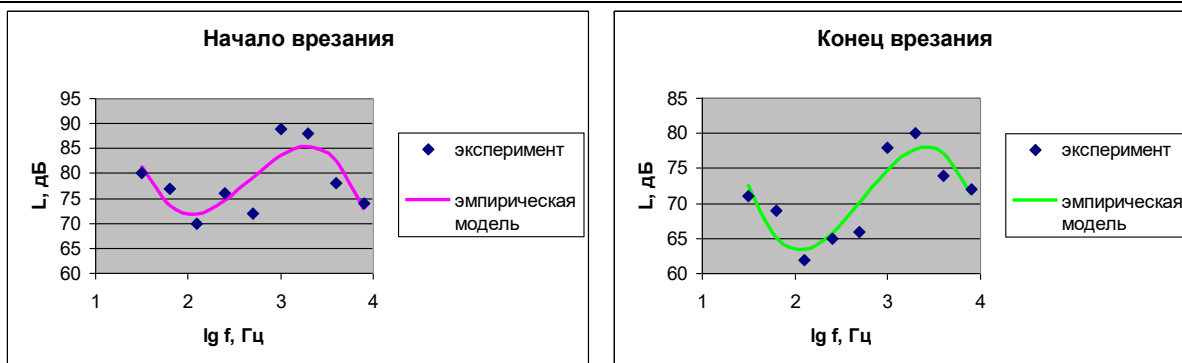


Рис. 2. Результаты идентификации моделей (1) и (2) методами математического программирования: слева – экспериментальный и модельный спектры шума в начале врезания, справа – в конце врезания

Отметим, что результаты идентификации с результатами идентификации, полученными моделями (1) и (2) обоими способами совпадают до средствами Excel: четырех-пяти значащих цифр между собой, а также

$$L_{\text{нач}}(\lg f) = 293.9 - 274.7 \cdot \lg f + 109.1 \cdot (\lg f)^2 - 13.64 \cdot (\lg f)^3, \text{ дБ}, \quad (3)$$

$$L_{\text{кон}}(\lg f) = 262.5 - 242.3 \cdot \lg f + 94.28 \cdot (\lg f)^2 - 11.47 \cdot (\lg f)^3, \text{ дБ}. \quad (4)$$

Модели (3) и (4) характеризуются среднеквадратичной погрешностью 3.8 и 2.7 дБ соответственно и коррелируют с

экспериментальными спектрами на уровне 0.79 и 0.88.

Важный для наших целей и регламентированный [1-2] спектральный ПДУ описывается соотношением

$$L_{\text{пду}}(\lg f) = 123.4 (\lg f)^{-0.443} \text{ [дБ]}, \quad (5)$$

которое характеризуется погрешностью в доли дБ и корреляцией с нормативной зависимостью 0.98.

динамики звукового поля. Эта модель выражает превышение спектрального ПДУ шума в каждый момент резания и выражается уравнением:

Объединяя модели (3)-(5) с моделью врезания, получаем обобщенную модель спектральной

$$\begin{aligned} \Delta L(\lg f, x/x_{\text{max}}) = & (293.9 - 31.4 x/x_{\text{max}}) - (274.7 - 32.4 x/x_{\text{max}}) \cdot \lg f + \\ & + (109.1 - 14.82 x/x_{\text{max}}) \cdot (\lg f)^2 - (13.64 - 2.17 x/x_{\text{max}}) \cdot (\lg f)^3 - \\ & - 123.4 (\lg f)^{-0.443}. \end{aligned} \quad (6)$$

Имеющее среднеквадратичную погрешность в пределах 3 дБ и характеризующееся коэффициентом корреляции на уровне более 0.85, модельное соотношение (6) позволяет надежно рассчитывать звуковое поле исследуемого инструмента в течение всего цикла резания. Для

наглядности вид зависимости (6) приведен на рис. 3 (слева); на этом же рисунке справа показан аналогичный результат, отвечающий использованию на станке пылесушозащитного кожуха с эффективностью шумоподавления 19 дБ.

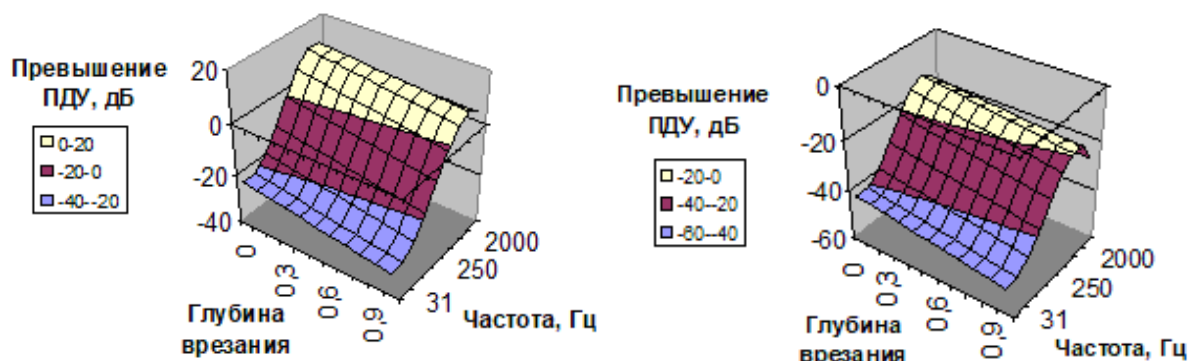


Рис. 3. Спектральная динамика звукового поля при резании рельса в отношении превышения спектральных ПДУ без применения шумозащиты (слева) и с применением шумозащиты (справа)

С учетом защитного кожуха математическая модель динамики шумового поля при работе рельсорезного станка принимает вид:

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{кож}}(\lg f, x/x_{\text{max}}) = & (293.9 - 31.4 x/x_{\text{max}}) - (274.7 - 32.4 x/x_{\text{max}}) \cdot \lg f + \\ & + (109.1 - 14.82 x/x_{\text{max}}) \cdot (\lg f)^2 - (13.64 - 2.17 x/x_{\text{max}}) \cdot (\lg f)^3 - \\ & 123.4 (\lg f)^{-0.443} - 18.80 - 0.00995 \cdot (\lg f)^{5.27} \text{ [дБ]} \end{aligned} \quad (7)$$

Также экспериментально установлено, что увеличение частоты вращения режущего инструмента сопровождается интенсификацией звукового излучения [9] с одновременным расширением звуко-виброактивного диапазона (до границ 500-8000 Гц), в котором уровни звукового давления превышают предельно-допустимые на 8-11 дБ.

Полученные в описанных экспериментах данные служат основой при разработке технических решений для обеспечения действующих санитарных норм шума и вибрации в рабочей зоне рельсорезных станков [1-2].

2. Запыленность в рабочей зоне рельсорезного станка

Исследования запыленности в рабочей зоне резчика, использующего рельсорезные станки РА-2 и РА-2М с электроприводом, выполнялись в теплый период года. Общность экспериментальных данных обеспечена тем, что измерения запыленности осуществлялись в производственных

помещениях нескольких машиностроительных предприятий г. Ростова-на-Дону.

Пробы анализируемой среды отбирались при различных способах подачи приточного воздуха, используемых в металлообрабатывающем производстве. Подвижность воздуха, а также температура и влажность измерялись прибором «Метеоскоп», рекомендованным СанПин 2.2.4.548-96. Для отбора проб запыленного воздуха использовались аэрозольные фильтры (АФА), размещенные в открытом аллонже. Перечень приборов и материалов, использованных в экспериментах, приведен в табл. 1.

Содержание вредного вещества в измерительной точке определялось осредненно, т.е. среднее значение за 30 мин. Через равные промежутки времени (10 мин.) отбирались три пробы, а затем рассчитывалось среднее значение измеренного показателя. Существенно, последовательность технологических операций, степень загрузки изучаемого оборудования и марка разрезаемого рельса (Р65) не изменялись.

Таблица 1

Средства измерений, использованные при измерениях запыленности воздуха

Наименование прибора, устройства, детали	Назначение
Аспиратор Мигунова электрический (мод. 822)	Отбор проб пылевоздушной смеси
Резиновые шланги (комплект)	Соединение аллонжа с аспиратором
Фильтр АФА-ВП-20	Накопление пыли
Электронные весы ALC-80d4	Высокоточное взвешивание
Прибор Аэрокон-П	Определение запыленности воздуха

Измерения запыленности производились как в зоне дыхания резчика, так и на удалении от станка (0,5 м, 1 м, 2 м и 3 м) при высоте 1,5 м от пола. Полученные экспериментально значения концентрации абразивно-металлической пыли в воздухе приведены в табл. 2.

На основании приведенных выше данных можно утверждать, что концентрация абразивно-

металлической пыли в зоне дыхания работающих существенно превышает предельно допустимую (рис. 4). В частности, превышение концентрации пыли над ПДК наблюдается даже на расстоянии около двух метров от оператора, что не допустимо и требует неотложных мер для снижения запыленности [3-4].

Таблица 2

Запыленность воздуха на рабочем месте (абразивная резка рельса)

Марка станка	Концентрации пыли, мг/м ³				
	Удаленность зоны дыхания резчика, м				
	0	0,5	1	2	3
РА-2М	13,9	10,8	8,4	5,0	3,1
РА-2	10,2	7,9	6,2	3,7	1,9

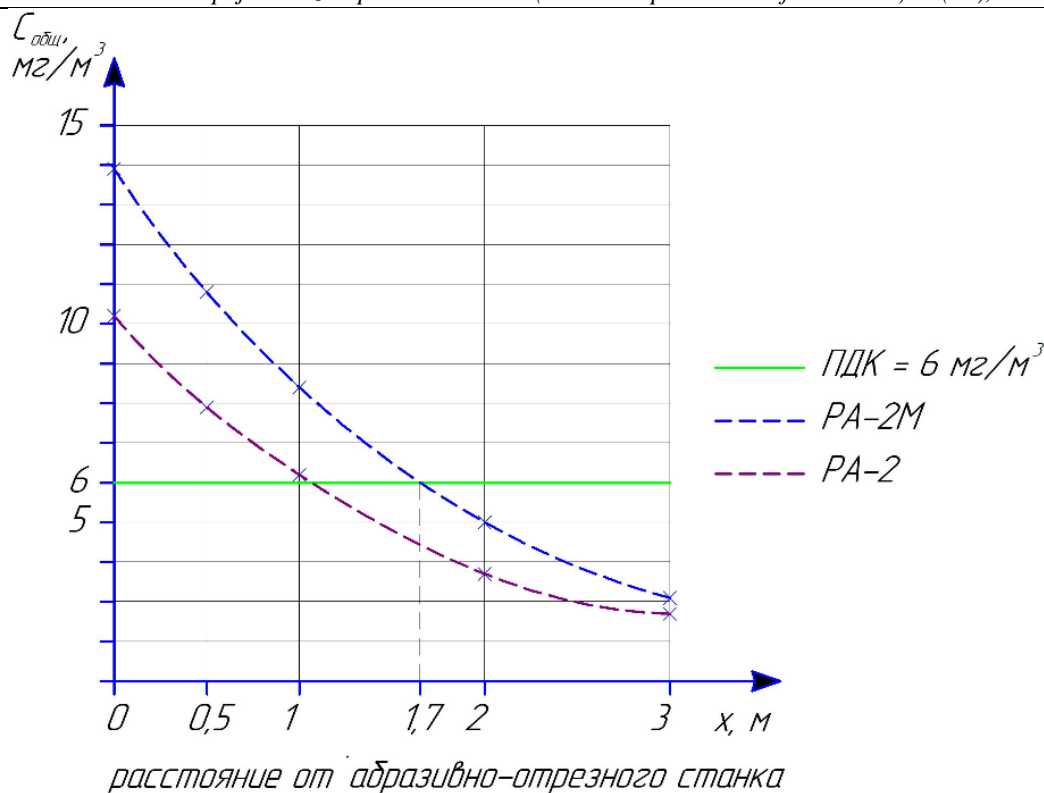


Рис. 4. Запыленность в зоне дыхания работника и на удалении от рельсорезного станка при отсутствии пыли- и шумозащитного кожуха

3. Экспериментальные исследования динамики абразивно-металлической пыли в циклоне с обратным конусом

Для экспериментального определения аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей различной конструкции на кафедре "БЖ и ЗОС" ДГТУ выполнены сравнительные испытания [10]. При их организации сформулированы следующие требования:

- соответствовать ГОСТ 12.3.018-79 – «ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний»;
- выявить поля давления, скорости движения воздуха и его расхода в разных точках во всех элементах сравниваемых циклонных аппаратов при

различной производительности вытяжного вентилятора;

- измерить экспериментально полное, статическое и динамическое давление, а также скорость движения воздушного потока в разных точках потока при изменении производительности вытяжного вентилятора;

- сравнить рассчитанные коэффициенты гидравлического сопротивления исследуемых аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» с измеренными экспериментально.

Для экспериментальных исследований сконструирована и реализована полупромышленная установка, позволяющая изучать в деталях циклоны различной формы (рис. 5).



Рис. 5. Экспериментальная установка: 1 – «Циклон ЦН15у-300», 2 – «ЦОК-200-300», 3 – входной патрубок «Циклон ЦН-15у-300», 4 – входной патрубок «ЦОК-200-300», 5 – регулируемая перегородка, 6 – патрубок выходной, 7 – вентилятор радиальный, 8 – блок управления вентилятором (электронный)

Пылеуловители Циклон «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» устанавливаются параллельно и имеют равные рабочие объемы. Чтобы интенсифицировать эксперименты с циклонами различной конструкции без нарушения герметичности воздуховода (вследствие замены циклонных аппаратов) в экспериментальной установке использовано поочередное закрытие перегородок. Сначала измерения проводились с циклонами без бункера, причем отверстия герметично закрывались. Измерения давления и скорости воздушного потока осуществлялись при помощи двух трубок Пито и 2-х дифференциальных манометров Testo-521, установленных на входе и выходе аппаратов [10].

Модель Testo 521-1 характеризуется погрешностью 0,2 % относительно полной шкалы. При скорости потока 5 м/с приборная погрешность составляет 0,32 м/с, при 20 м/с – 0,09 м/с и при 50 м/с около 0,05 м/с. Зависимость результатов измерений от расположения зондирующего элемента устранена посредством двойной мембраны. Размещение зонда не влияет на результат измерений: при скорости потока 1 м/с погрешность составляет 0,09 м/с, а при 5-8 м/с около 0,03 м/с.

Проведение измерений протоколируется путем автоматического сохранения данных: во внутренней памяти прибора сохраняются результаты 25000 измерений. Программный комплекс прибора ComfortSoftware-3.4 обеспечивает его взаимодействие с разнородными информационными системами. Существенно, что аппаратные и программные средства прибора Testo 521-1 позволяют выполнять измерения в режиме реального времени.

Исследование аэродинамических параметров циклонных аппаратов выполнено путем более чем 1260 непосредственных измерений, в результате которых получено около 4000 ключевых значений. Для измерения давления и скорости движения воздуха в воздуховодах выбраны участки с расположением мерных сечений на расстояниях не менее шести диаметров D_h , м за местом возмущения потока (отводы, шиберы, диафрагмы и т. п.) и не менее двух диаметров перед ним. Число и положение точек измерения давления и скорости определялись геометрией сечения воздуховода в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 (рис. 6).

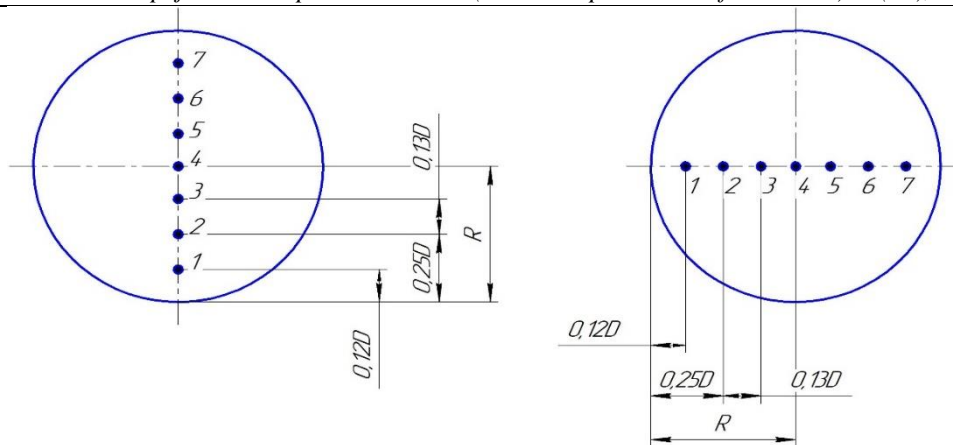


Рис. 6. Схема расположения точек измерения давлений и скоростей входного (слева) и выходного (справа) патрубка циклонов

Поскольку патрубки исследуемых аппаратов имеют диаметр 200 мм, основные точки измерения выбраны на расстоянии $0,12D$ (1) и на расстоянии $0,5D$ (4) от стенки патрубка. Повышение точности в экспериментах достигнуто благодаря использованию 4-х дополнительных точек, расположенных на расстоянии $0,25D$ (2-я и 6-я) и $0,38D$ (3-я и 7-я) от стенки. Входной и выходной патрубки экспериментальной установки имели отверстия $D_{\text{отв}} = 20$ мм. В отверстиях с помощью силиконовых пробок фиксировались трубки Пито, соединенные с двумя дифференциальными манометрами Testo 521-1.

Движение воздуха инициировалось радиальным вентилятором РОВЕН VCZpl-250, подключенным в режиме на вытяжку. Режим работы вентилятора задавался посредством электронного блока управления. По истечении 15 минут, необходимых для формирования ламинарного течения воздуха, во входном и выходном патрубках установки измерялись следующие параметры среды: полное, статическое и динамическое давление, расход и скорость воздушного потока. Чтобы обеспечить достоверность экспериментальных данных

измерения выполнялись 30 раз в 3-х режимах вентилятора ($n_1 = 1710$ об/мин, $n_2 = 2250$ об/мин, $n_3 = 2850$ об/мин). Выбранные режимы вентилятора соответствуют следующим объемным расходам: на входе в аппарат «ЦН-15у-300» ($n_1 = 424$ м³/ч, $n_2 = 558$ м³/ч, $n_3 = 685$ м³/ч); на входе в «ЦОК-200-300» ($n_1 = 516$ м³/ч, $n_2 = 660$ м³/ч, $n_3 = 814$ м³/ч).

Полученные результаты в экспериментах обработаны и представлены в виде графиков (рис. 7-11). На рис. 4 показано скоростное поле потока во входном патрубке циклонов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» при разной производительности вентилятора.

Структура турбулентного потока во входном патрубке циклонов «ЦН-15у-300» хорошо описывается степенной моделью [11]. Согласно этой модели, в трубе круглого сечения осредненная скорость турбулентного потока в точке, удаленной на расстояние r от оси равна:

$$v(r) = v_{\text{max}} \cdot (1 - r/R)^m, \quad (8)$$

где v_{max} – максимальная скорость течения; R – радиус трубы; m – эмпирический параметр модели.

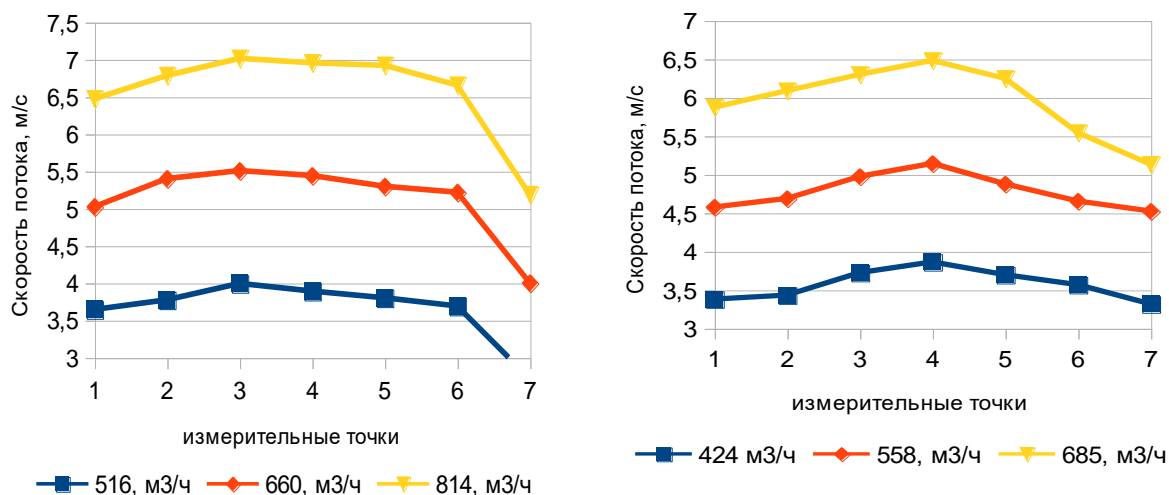


Рис. 7. Скорость воздушного потока во входном патрубке циклона «ЦН15у-300» (слева) и циклона «ЦОК-200-300» (справа) при различных режимах работы вентилятора

Из (8) следует, что средняя скорость потока в такой трубе равна

$$\langle v \rangle = \int v_{\max} \cdot (1 - r/R)^m r dr / \int r dr = 2 \cdot v_{\max} / (2 + 3 \cdot m + m^2) . \quad (9)$$

Инициализированная методами математического программирования по данным рис. 4-а модель (8) имеет вид

$$v(r) = v_{\max} \cdot (1 - r/R)^{0.1037} , 3.9 \leq v_{\max} \leq 6.5 \text{ м/с} . \quad (10)$$

Величина погрешности этой модели (рис. 8, слева) свидетельствует, что во входном патрубке циклона данного типа течение является

установившимся высоко симметричным, т.е. соответствует модели (8)-(9).

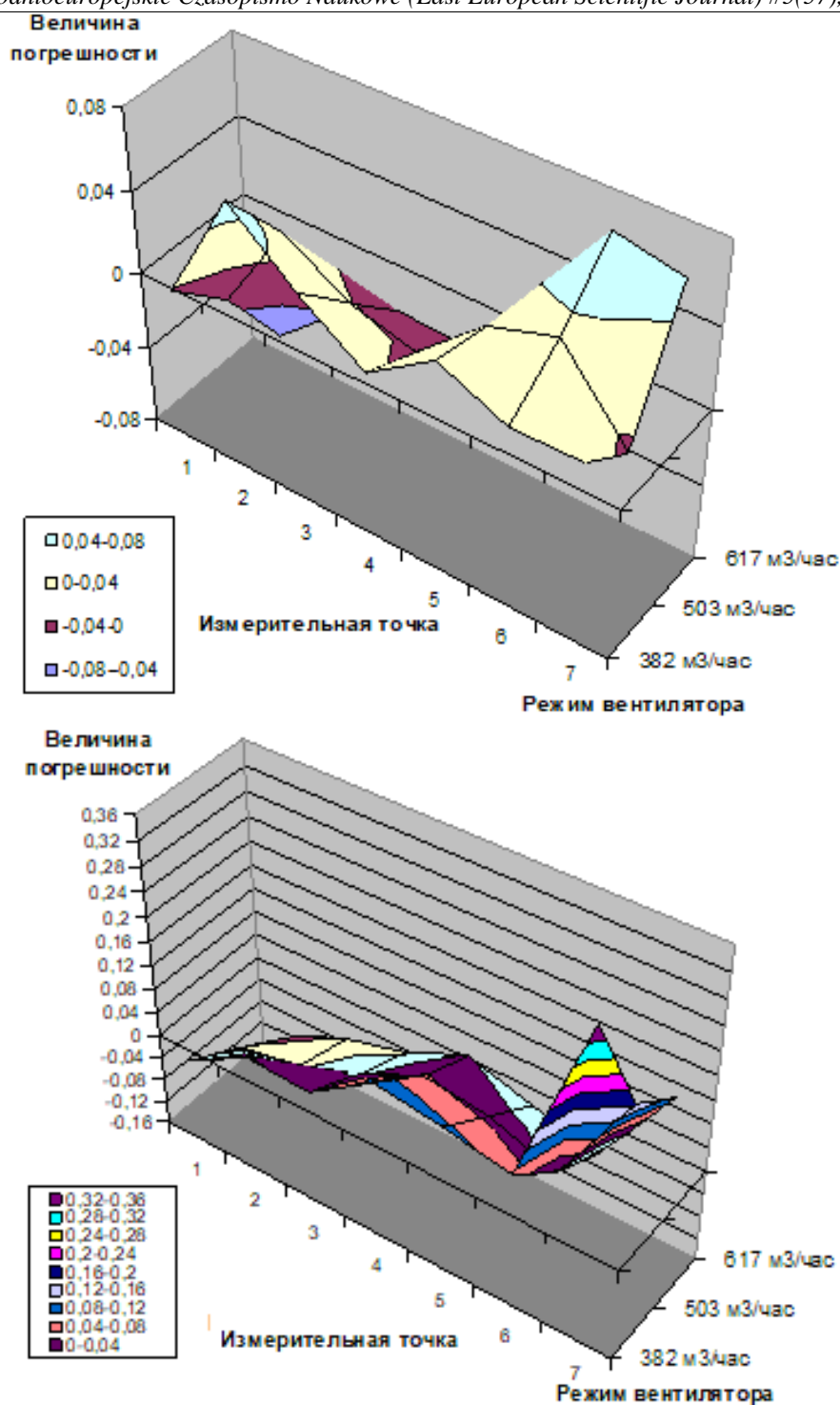


Рис. 8. Погрешность описания течения во входном патрубке циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) посредством классической степенной модели для скоростного поля

Аналогичный анализ входного течения в аппарате «ЦОК-200-300» показывает, что течение во входном патрубке не является столь симметричным как в прямой цилиндрической трубе (рис. 4, справа). В то же время эмпирический параметр модели (8) m для этой конструкции равен 0.145, а отношение $v_{max}/\langle v \rangle = 1.227$, чем подтверждается сходство турбулентной микроструктуры течения в циклонах обоих типов.

Как видно из данных рис. 7, скорость течения во входном трапециевидном патрубке «ЦОК-200-

300» несколько выше, чем на входе цилиндрического циклона. Это обуславливает большую центробежную силу на первых витках движения воздуха внутри аппарата. На рис. 9-10 показаны экспериментальные эпюры полного давления воздушного потока во входном и выходном патрубках установки при разной производительности вентилятора. Отметим, что приведенные выше аппроксимации профиля скорости (8) позволяют, используя известные аэродинамические соотношения [11], выписать

явные формулы для соответствующих профилей давления.

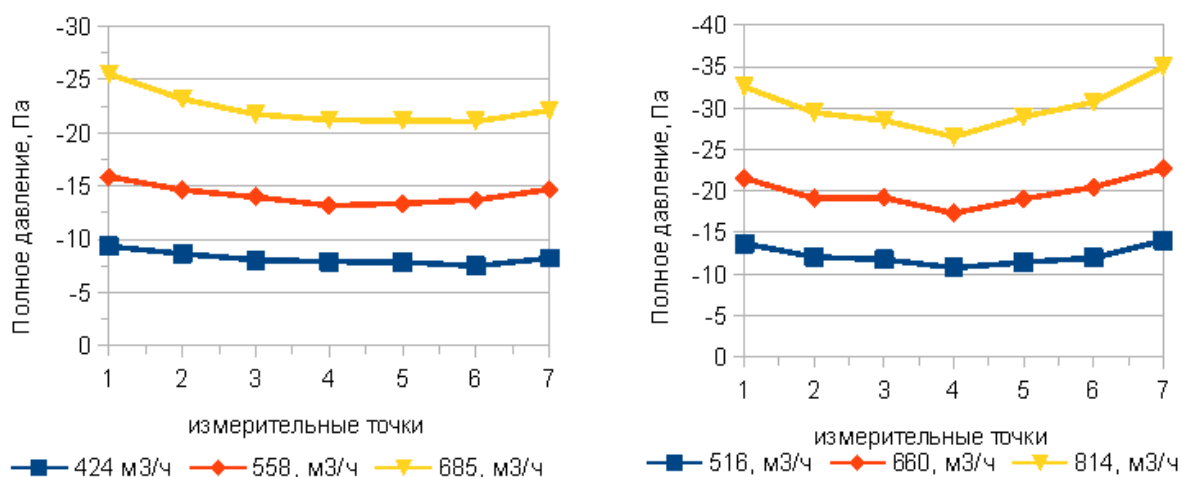


Рис. 9. Полное давление воздушного потока во входных патрубках циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) при различной производительности вентилятора

Характер изменения полного давления свидетельствует о том, что в выходном патрубке циклона создается разрежение. Причина эффекта в том, что исследуемые центробежные аппараты работают не на нагнетание, а на вытяжку. В результате поток сильно завихрен не только в теле аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300», но также на выходе установки, поэтому давление выше на периферии вихря.

Поскольку в циклонах поток имеет сложную структуру, для определения средней скорости потока используется формула [12]:

$$V = \frac{Q}{0,785 \cdot 3600 \cdot D^2} \quad (11)$$

где Q – объем воздуха, проходящего через циклон, м³/ч; D – диаметр циклона, м.

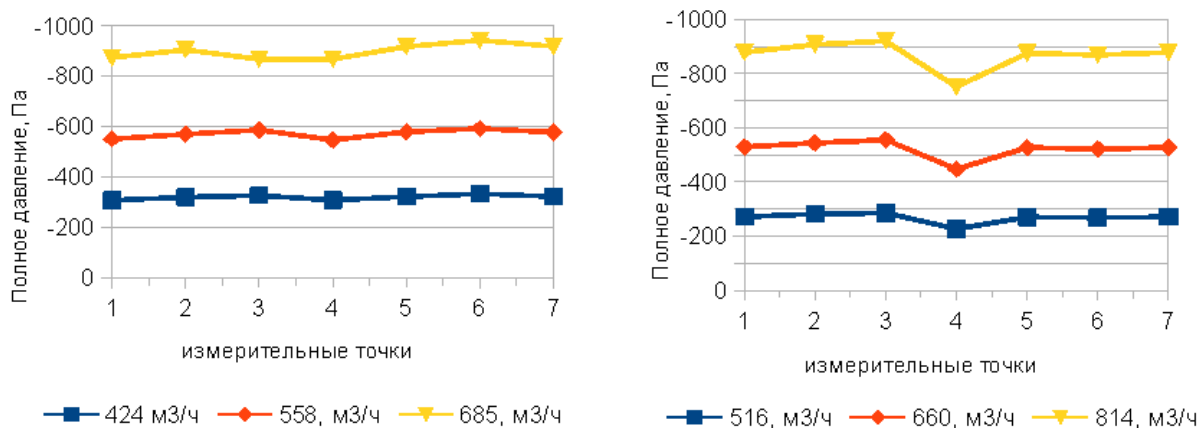


Рис. 10. Полное давление воздушного потока в выходных патрубках циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) при различной производительности вентилятора

Результаты расчета скорости потока в теле циклонов показаны на рис. 11.

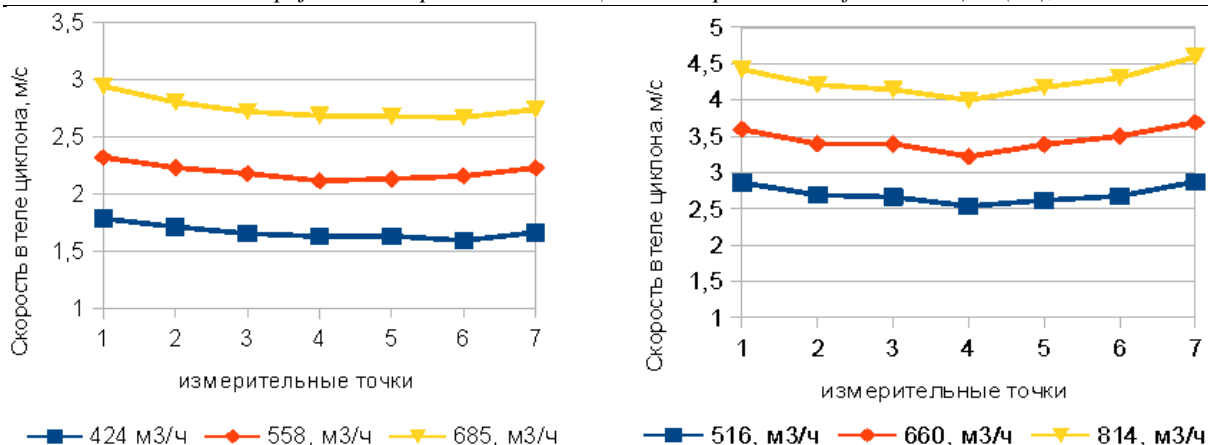


Рис. 11. Скорость потока в теле циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) при различной производительности вентилятора

Рассчитанная скорость потока в циклонах хорошо согласуется со значениями, представленными в литературных источниках [13]. В частности, средняя скорость в теле циклона «ЦН-15у-300» равна 3.5 м/с, а скорость циклона «ЦОК» равна 4.5 м/с.

При определении коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) важным

показателем служит перепад давления между входом и выходом циклона. Для аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» потеря давления в аппарате показана на рис. 12. Как видно из данных рис. 12, в исследуемых аппаратах перепад давления «вход – выход» практически не отличается. Однако с величиной КГС центробежных пылеуловителей ситуация иная.

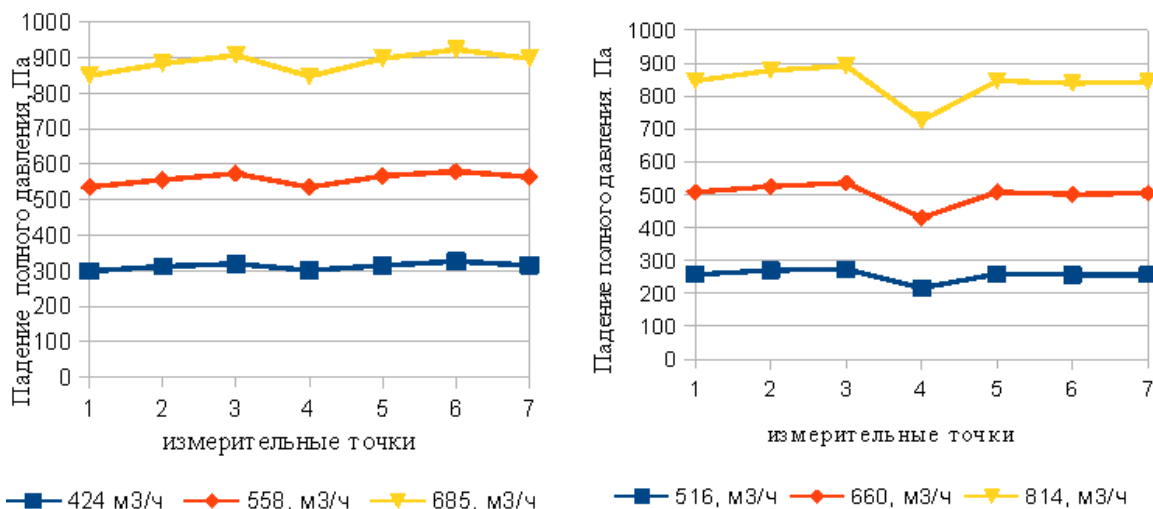


Рис. 12. Потери давления для циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) при различной производительности вентилятора

Стоимость газоочистки является важнейшим показателем, так как характеризует ее экономичность. Она зависит, главным образом, от двух факторов – капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Капитальные затраты определяются конструктивными особенностями и установленной производительностью оборудования. Эксплуатационные расходы в нашем случае сводятся к расходу электроэнергии. Последний зависит от гидравлического сопротивления циклона или потери в нем давления ΔP .

Коэффициент гидравлического сопротивления для аппаратов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» вычисляется на основании закона сохранения энергии

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{2\Delta P_{\text{ц}}}{\rho \cdot V_{\text{вх}}^2}, \quad (12)$$

где: $\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления циклона; $V_{\text{вх}}$ – скорость потока во входном патрубке, м/с; $\Delta P_{\text{ц}}$ – падение полного давления, Па; ρ – плотность воздушного потока. Зависимость (12) для циклонов «ЦН-15у-300» и «ЦОК-200-300» показана на графиках рис. 13.

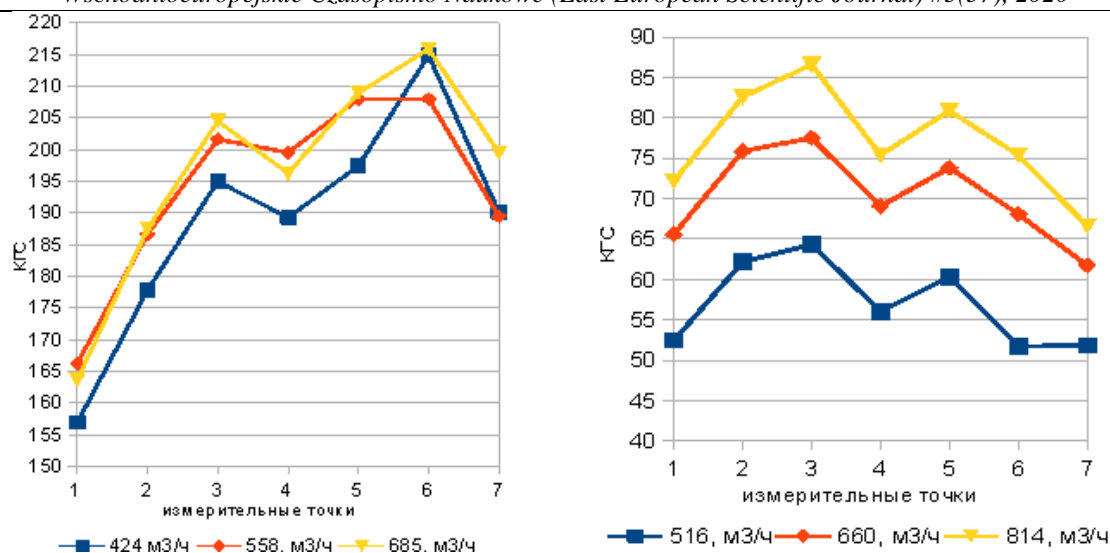


Рис. 13. Коэффициент гидравлического сопротивления для циклонов «ЦН15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа) при различной производительности вентилятора

Коэффициент сопротивления аэродинамического сопротивления аэродинамического сопротивления аэродинамического сопротивления циклона
циклона Коэффициент описывается эмпирической формулой

$$\xi_{\text{вх}}(N, Q) = 1,0246 \cdot (466,33 - 734,33 \cdot N + 640,87 \cdot N^2 - 258,45 \cdot N^3 + 53,086 \cdot N^4 - 5,3819 \cdot N^5 + 0,2134 \cdot N^6) \cdot [1 - e^{-Q/138,3}], \quad (13)$$

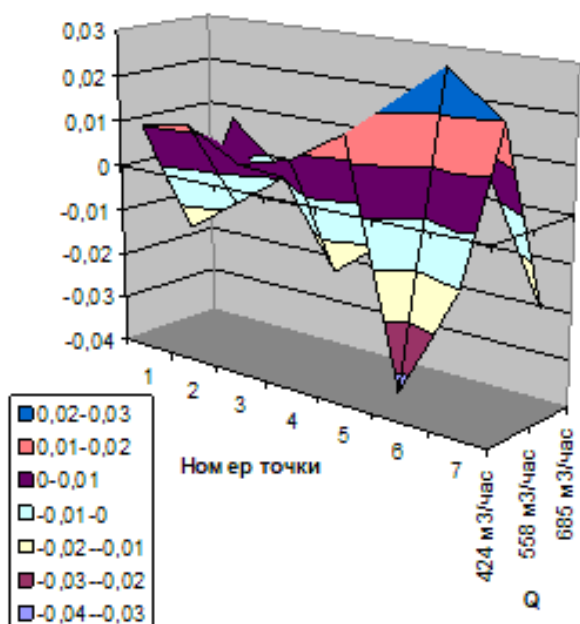
где N – номер измерительной точки; Q – расход $\text{м}^3/\text{ч}$. Погрешность (13) не превышает 4 % (рис. 14, левый фрагмент).

Аналогичный результат для циклона «ЦОК-200-300» имеет функциональный вид

$$\xi_{\text{вх}}(N, Q) = 1,589 \cdot (318,67 - 614,98 \cdot N + 545,85 \cdot N^2 - 229,1 \cdot N^3 + 49,266 \cdot N^4 - 5,2458 \cdot N^5 + 0,219 \cdot N^6) \cdot [1 - e^{-Q/673,5}], \quad (14)$$

с погрешностью, показанной на правом фрагменте рис. 14.

Погрешность



Погрешность

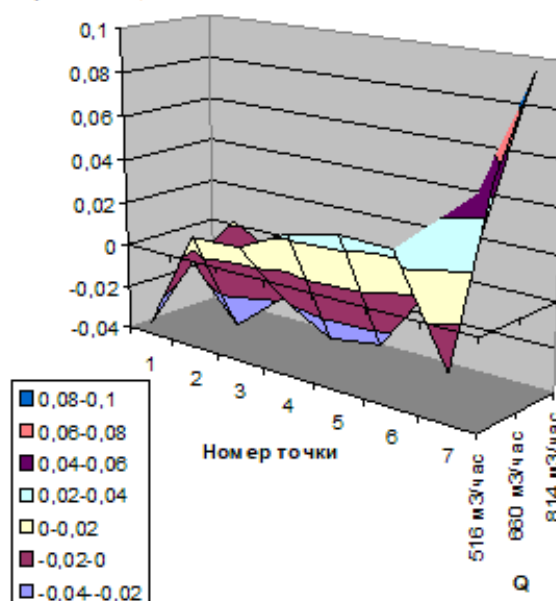


Рис. 14. Относительная погрешность формул (13) и (14), описывающих результаты измерений аэродинамического сопротивления циклонов «ЦН-15у-300» (слева) и «ЦОК-200-300» (справа)

Таким образом, результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что КГС циклона «ЦОК-200-300» в $2 \div 2,2$ раза меньше, чем КГС циклона «ЦН-15у-300». Различие объясняется более высокой скоростью потока воздуха в теле аппарата («ЦОК-200-300»).

4. Аэродинамические испытания циклонных аппаратов индивидуальной системы удаления пыли

Сравнивать результаты экспериментов, выполненных с коническим и цилиндрическим циклонами, позволяют их конструктивные особенности [12]. Ключевыми факторами здесь являются: 1) равные объёмы рабочей части, т.е. цилиндров между верхним и нижним конусами; 2) равные размеры патрубков – как входного, так и выходного; 3) контроль над расходом пропускаемого через циклонный аппарат воздуха при возможности регулировки расхода в надлежащем диапазоне. Обе конструкции имеют

одинаковый диаметр входных и выходных патрубков – 47 мм.

Аэродинамическое сопротивление пылеуловителя (циклона) определяется потоком очищаемого газа, т.е. производительностью. Поэтому корректность сравнительного анализа исследуемых конструкций обеспечивалась их равной производительностью. Рабочая часть обоих циклонов – цилиндрического и конического имела объём 0.027 м³. При этом радиус рабочей части цилиндрического циклона составляет 0.131 м, а высота – 0.5 м. Конический циклон в нижней части конуса имеет радиус 0.164 м, а в верхней – 0.09 м. Соответствующая высота конуса составляет 0.5 м.

Определенный на основании экспериментов коэффициент гидравлического сопротивления сравниваемых циклонов представлен на рис. 15. Как видно из представленных данных, при небольшом расходе (13-27 м³/ч) коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) на 15% больше для конического циклона, а при увеличении расхода до 28-40 м³/ч ситуация меняется на противоположную.

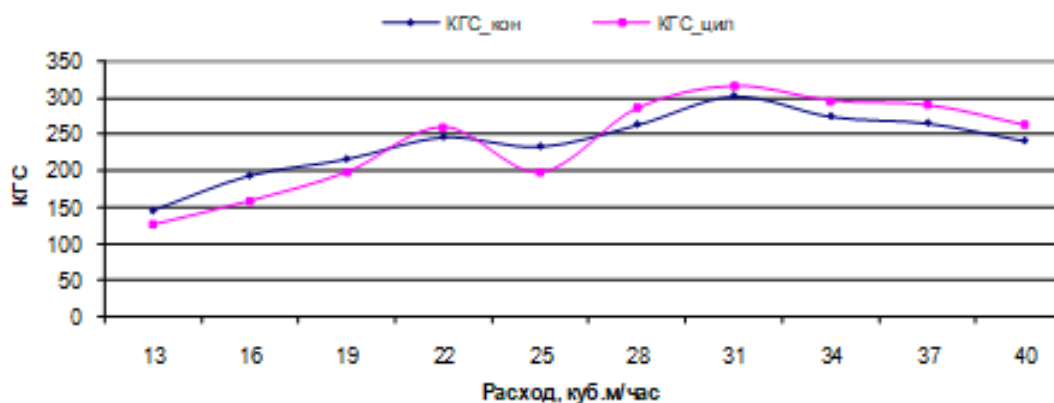


Рис. 15. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от расхода для циклонов различной формы

5. Эффективность пылеулавливания в ЦОК: экспериментальное исследование

Конусность профиля в ЦОК обеспечивает увеличение действующей на частицы центробежной силы, а регулировка погружения выходного патрубка в корпус аппарата сокращает вынос пыли вторичными вихрями [12-13]. Поэтому рациональное управление соотношением объёмов функциональной части ЦОК и бункера обеспечивает гарантированное улавливание пыли различного состава.

Полученные ранее авторами экспериментальные данные свидетельствуют о полидисперсности и материальной неоднородности (металл, абразив) изучаемой пыли.

При помощи малоразмерной экспериментальной установки (рис. 16) фиксировались моменты, в которые происходил выброс пыли из выходного патрубка циклона при фиксированном расходе $Q = 25$ м³/ч (соответствующая скорость потока $v = 4.5$ м/с). Масса уловленных, т.е. осевших в бункере, частиц абразива и металла измерялась с помощью точных электронных весов. Затем рассчитывался коэффициент пылеочистки:

$$\eta = \frac{m_{\text{вых}}}{m_{\text{вх}}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где $m_{\text{вых}}$ – масса пыли после очистки; $m_{\text{вх}}$ – масса пыли в дозаторе до очистки, г.



Рис. 16. Экспериментальная установка: а – с жидкостными манометрами, б – с манометрами Testo 521 (Германия)

Экспериментальная установка (рис. 16) включает: испытываемый циклонный аппарат (1), в корпусе которого имеются шесть технологических отверстий с заглушками (отверстия расположены эквидистантно по высоте рабочей части циклона; в них устанавливаются измерительные датчики); подводящего трубопровода (2), дозатора (3), источника потока (4), а также комплекта жидкостных манометров (5,6) или прибора Testo 521 (7).

Также исследована экспериментально эффективность улавливания абразивно-металлической пыли циклонами разных типов в зависимости от объема бункера [10]. Диапазон варьирования последнего составил 5 – 30 л. При этом использовались пылевые частицы, характерные для условий резания рельса (состав сталь – абразив, размер 40 – 315 мкм). Расход воздуха выбирался также приближенным к условиям работы рельсорезного станка – 27 м³/ч. Измеренная в экспериментах эффективность конического циклона превысила эффективность

циклона цилиндрического. Оказалось также, что эффективность конического циклона возрастает с увеличением отношения объема бункера к объему функциональному. На рис. 17 представлена экспериментально определенная эффективность улавливания абразивно-металлической пыли коническим и цилиндрическим циклонами в зависимости от дисперсного состава и геометрических параметров конструкции (отношения объема бункера к объему рабочему). Приведенный на рис. 17 результат соответствует оптимальному соотношению высот выпускного патрубка и циклона $H_n/H_{ц} = 0,6$. Соотношение объема бункера к рабочему объему циклона варьировалось в практически интересном диапазоне. Для бункера объемом 5 л: $V_б/V_{кц} = 0,18$; для 19 л: $V_б/V_{кц} = 0,7$; для 30 л: $V_б/V_{кц} = 1,11$. Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что в рамках изученных условий эффективность циклона максимальна при объеме бункера 30 л и соотношении $V_б/V_{кц} = 1,11$.

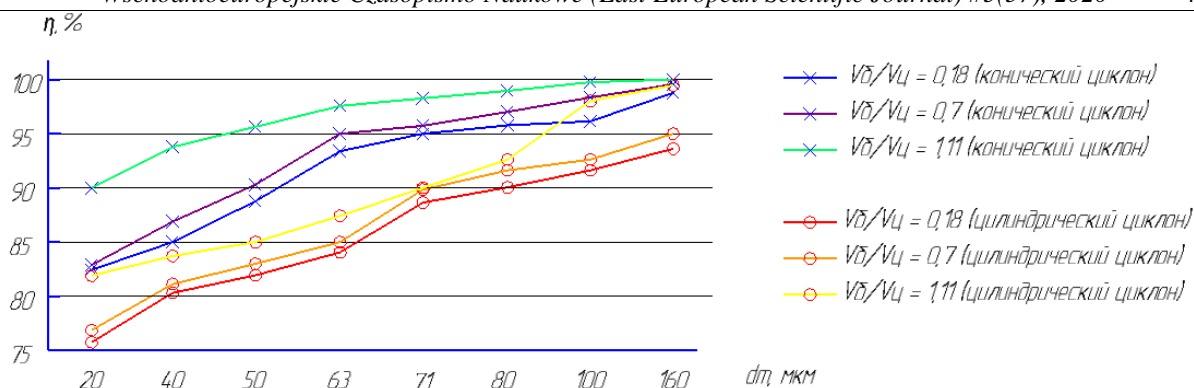


Рис. 17. Сравнение эффективности пылеулавливания абразивно-металлической пыли коническим и цилиндрическим циклонами при различном дисперсном составе и варьируемом отношении объема бункера к рабочему объёму циклона (расчет соответствует оптимальному соотношению параметров $H_n/H_{ц}=0,6$)

Приведенные на рис. 17 данные отвечают трехпараметрической модели процесса

$$\eta(V_6/V_{ц}, d) = 100 \cdot \{1 - \exp[-(V_6/V_{ц})^\alpha \cdot (d/\langle d \rangle)^\beta]\}, \quad (16)$$

в которой эмпирический параметр α отвечает степени влияния конструктивного параметра циклона $V_6/V_{ц}$ на его эффективность, а параметры β и $\langle d \rangle$ – общему виду связи КПД циклона η с размером улавливаемых частиц d . Перечисленные

эмпирические параметры модели (16) для конического и цилиндрического циклонов найдены методами математического программирования. Результат инициализации модели (16) по экспериментальным данным выражается формулами

$$\eta(V_6/V_{ц}, d) = 100 \cdot \{1 - \exp[-(V_6/V_{ц})^{0.0758} \cdot (d/4.78)^{0.4168}]\} \quad (17)$$

для конического циклона и

$$\eta(V_6/V_{ц}, d) = 100 \cdot \{1 - \exp[-(V_6/V_{ц})^{0.068} \cdot (d/6.23)^{0.344}]\} \quad (18)$$

для цилиндрического. О погрешности математической модели (17)-(18) позволяют судить данные, представленные на рис. 18.

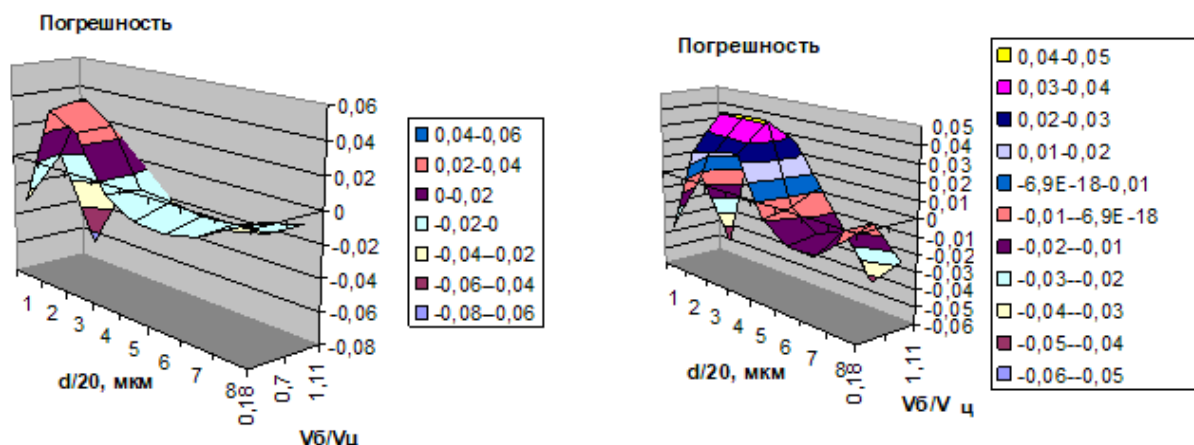


Рис. 18. Погрешность математической модели (17)-(18) для конического (слева) и цилиндрического (справа) циклонов

Экспериментально исследована связь глубины погружения выходного патрубка циклона с эффективностью пылеулавливания. Объем бункера и размеры частиц выбирались актуальными для

условий резания рельса (30 л 40 – 250 мкм соответственно). Данные соответствующих измерений показаны на рис. 19.

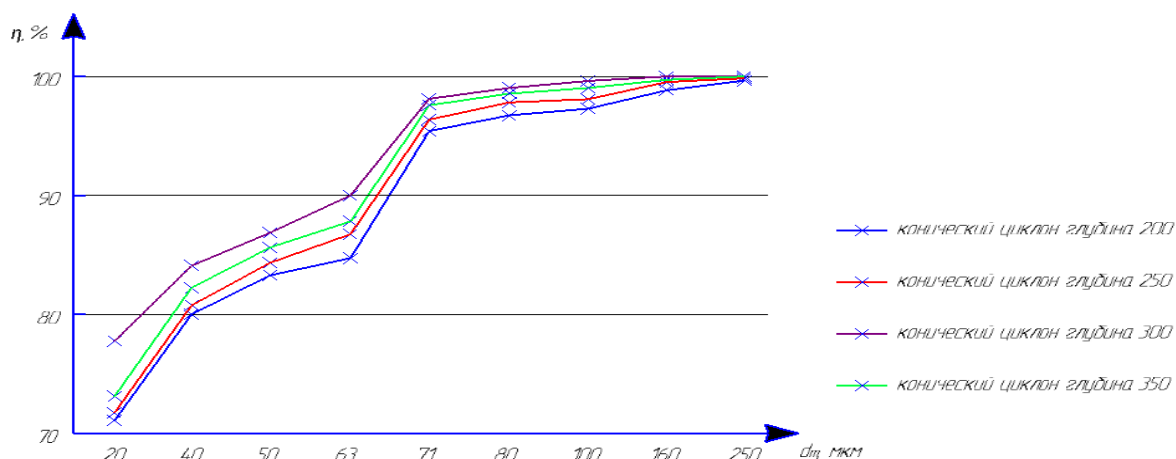


Рис. 19. Эффективность пылеулавливания абразивно-металлической пыли коническим циклоном в зависимости от глубины погружения выхлопного патрубка

Показанные на рис. 16 данные удобно представить в следующей математической форме:

$$\eta(\Gamma, d) = 100 \cdot \{1 - \exp[-(d/(\langle d \rangle + A \cdot (\Gamma - \Gamma_{\text{опт}})^2)^\beta)]\}, \quad (19)$$

где Γ – глубина погружения выхлопного патрубка в тело циклона, а параметры модели $\chi_{\text{опт}}$ и A характеризуют соответственно оптимальную

глубину и степень выраженности оптимального положения в смысле влияния на КПД.

Инициализированная по экспериментальным данным рис. 19 модель (19) принимает явный вид:

$$\eta(\Gamma, d) = 100 \cdot \{1 - \exp[-(d/(12.18 + 0.00028 \cdot (\Gamma - 304.2)^2)^{0.574})]\}. \quad (20)$$

О погрешности модели (19)-(20) позволяют судить данные рис. 17.

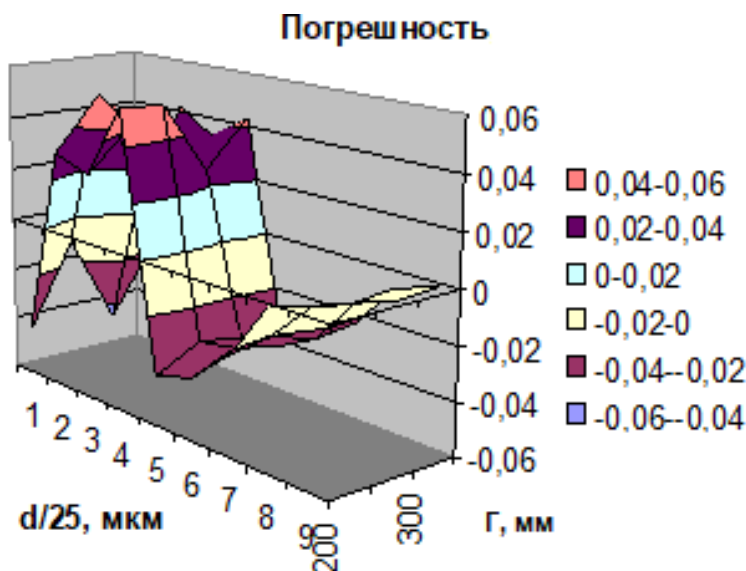


Рис. 20. Относительная погрешность модели (19)-(20)

Предложенная модель (19)-(20) позволяет на основании экспериментов утверждать, что оптимальным значением глубины погружения выхлопного патрубка в тело конического циклона служит $\Gamma = 304$ мм.

Выводы

1. Экспериментально определены (выполнено 1500 измерений, получено 5000

значений ключевых параметров) следующие параметры потока в коническом и цилиндрическом циклонах при изменении производительности вентилятора в широком диапазоне: 1) давление (статическое, динамическое, полное); 2) эпюры скорости во входном и выходном сечениях. После статистической обработки полученные результаты

представлены в графической форме, а также в виде явных аналитических зависимостей.

2. Установлено экспериментально, что повышение производительности циклона сопровождается ростом КГС. Результат объясняется усилением турбулизации потока с ростом средней скорости.

3. Экспериментально доказано, что КГС аппарата «ЦОК-200-300» в 2-2,2 раза меньше, чем КГС циклона «ЦН-15у-300». Результат объясняется более высокой скоростью потока в «ЦН-15у-300».

4. Сравнительный анализ свидетельствует, что циклон с обратным конусом имеет лучшие аэродинамические характеристики и как следствие повышенную эффективность пылеулавливания по сравнению с цилиндрическим циклоном. Результат объясняется более развитой турбулентностью в потоке очищаемого газа при использовании циклона («ЦОК-200-300»).

5. Установлено, что существует оптимальная глубина погружения выхлопного патрубка в тело конического циклона.

Список первоисточников

1. СНИП 23-03-2003 Защита от шума. – М., 2003. – 71с.

2. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки – М., 1996. – 57 с.

3. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.

4. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – М., 2018.

5. Болотов, Б. Е. Методы снижения шума металлорежущих станков / Б. Е. Болотов, С. Н. Панов // Станки и инструмент. – 1978. – № 2. – С. 19-20.

6. Борисов, Л. П. Звукоизоляция в машиностроении / Д. П. Борисов, Д. Р. Гужас. – М.: Машиностроение, 1990. – 253 с.

7. Minoux, M. Mathematical Programming: Theory and Algorithms. – New York: John Wiley, 1986. – 489 p.

8. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840 с.

9. Haider, J. M. Health and Environmental Impacts in Metal Machining Processes / J. M. Haider, S. J. Hashmi // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – Vol. 8. – P. 7-33.

10. Азимова, Н. Н. Сравнительный анализ аэродинамических характеристик центробежных пылеуловителей при проведении параллельных сравнительных испытаний / Н. Н. Азимова, Ю. И. Булыгин, И. С. Купцова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 3 (90). – С. 156-165.

11. Власов, В.Г. Теоретическая гидромеханика [Текст] : Утв. ГУУЗом НКТП в качестве учебника для кораблестроит. вузов / В. Г. Власов. – Ленинград ; Москва : ОНТИ. Глав. ред. судостроит. лит-ры, 1935. 226 с.

12. Пирумов, А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. – М.: Госстройиздат, 1961. – 124 с.

13. Рябинович, В.Б. Циклонная установка с противопылеуносным устройством / В. Б. Рябинович, Н. Ю. Финогорова, А. М. Платонов. // Пром. и сан. очистка газов. – 1984. – №5. – С. 2.

Azimova N.N.

*Assistant Professor in Mathematics & Computer sciences,
Don State Technical University*

Ashikhmin D.V.

*Bachelor in Mathematics & Computer sciences
Don State Technical University*

Ladosha E.N.

*Ph.D in Mathematics & Computer sciences, Associate Professor,
Don State Technical University*

Tsymbalova V.M.

*Bachelor in Occupational Safety
"RostSelMash" plant association*

Tsymbalov D.S.

*Undergraduate student in Mathematics & Computer sciences
Don State Technical University*

Yatcenko O.V.

*Ph.D in Physics, Associate Professor,
Don State Technical University*

ANALYSIS OF SIZE DISTRIBUTION APPLIED TO DUST PRODUCED IN METAL CUTTING BY ABRASIVE TOOL

Азимова Наталья Николаевна

Старший преподаватель кафедры прикладной математики,

Донской Государственный Технический Университет

Ашихмин Денис Валерьевич

бакалавр кафедры прикладной математики,

Донской Государственный Технический Университет

Ладоша Евгений Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,

Донской Государственный Технический Университет

Цымбалова Виктория Михайловна

бакалавр промышленной безопасности и охраны труда,

ОАО «Ростсельмаш»

Цымбалов Денис Сергеевич

старший преподаватель кафедры электротехники и электроники,

аспирант кафедры прикладной математики,

Донской Государственный Технический Университет

Яценко Олег Владимирович

кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры прикладной математики,

Донской Государственный Технический Университет

АНАЛИЗ РАЗМЕРА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ АБРАЗИВНОЙ РЕЗКЕ СТАЛИ

Summary. A mathematical analysis of dust size distribution with respect to metal cutting residual is performed. It is found that dust investigated obeys the uniparametric exponential distribution. Regarding that in cyclone projecting the logarithmically normal distributional is used related numerical parameters are estimated as well. The main error source in size distribution determination is shown. It consists in an inadequate fashion of measurements representation by soft associated with experimental setup. Most perspective directions for further subjective studies are marked. These are partial size analysis for metal and abrasive as well as detailed studies of particles geometry.

Аннотация. Выполнен математический анализ размера пылевых частиц, образующихся при абразивной резке рельса. Установлено, что исследованная технологическая пыль хорошо описывается однопараметрическим экспоненциальным распределением. Поскольку в расчетах циклонов обычно используется модель логнормального распределения частиц по размерам, соответствующие числовые параметры определены на основе решения оптимизационной задачи. Выявлен основной источник погрешности при определении дисперсного состава пыли – неподходящая форма представления первичных данных в программном обеспечении измерительного комплекса. Указаны перспективные направления развития предметных исследований – отдельный анализ дисперсности основных компонентов пыли, образующейся при резании при одновременном детальном изучении геометрии микрочастиц.

Key words: metal cutting, dust, particle size distribution, mathematical statistic, mathematical programming.

Ключевые слова: резание металлов, пыль, распределение по размерам, статистика, математическое программирование.

Введение

Пыль, образующаяся при механической обработке твердых металлов и сплавов (резании, сверлении, шлифовании, полировке и пр.), наносит ущерб здоровью человека, загрязняет окружающую среду, а часто негативно влияет на качество последующей обработки. Чтобы исключить такие негативные эффекты обычно используются циклоны – устройства, предназначенные для захвата пыли воздушным потоком и последующего удаления ее из струи в накопитель за счет сил инерции [1]. Эффективность циклонов достигается предварительным аэродинамическим расчетом, цель которого определить такие параметры устройства, при которых гарантированно улавливаются содержащиеся в потоке твердые частицы (заданной категории) при минимальных экономических издержках. Так как улавливание частиц обеспечивается конкуренцией инерционных

и аэродинамических сил, соответствующие физические критерии составляют основу расчета циклонов [2]. Размерные и массовые характеристики улавливаемых частиц служат здесь основой расчетных критериев. Вследствие неоднородности производственной пыли ее геометрические и соответствующие размерные характеристики имеют статистическую природу, что выдвигает жесткие требования к корректности их осреднения при расчетах циклонов. Следовательно, достоверные научные сведения о размерных и массовых параметрах пыли при различных видах механической обработки металлов крайне актуальны, поскольку их практическое применение позволяет рационально организовать пылеулавливание при помощи циклонов.

Целью данного исследования является разработка математических методов корректного

осреднения размерно-массовых параметров производственной пыли, образующейся в различных технологических процессах. Практически полученные результаты предназначены для использования в анализе мелкодисперсных твердофазных технологических отходов широкого класса производств.

Теоретические основы исследования

На всякую пылевую частицу с характерным размером x [мкм] действует сила земного тяготения или иная инерционной природы, которая пропорциональна массе частицы, т.е. $\rho \cdot x^3$, где ρ [кг/м³] – плотность образующего материала. Следовательно, знание инерционных свойств пыли сводится к знанию ее и характерного размера. Величина аэродинамической силы, действующей на такую частицу со стороны потока, пропорциональна квадрату ее характерного размера x^2 и не зависит от плотности. Фигурирующее в критерии эффективности циклона отношение этих сил соответственно пропорционально $\rho \cdot x$. Однако здесь следует учесть два важных обстоятельства: во-первых, пылевые частицы существенно отличаются по размерам и, во-вторых, форма каждой пылинки уникальна и далека от используемых эталонов (сфера, куб и др.). Эти особенности выдвигают весьма жесткие требования к процедуре двойного осреднения величины, названной выше *характерным размером* пылевой частицы – по размеру и форме. Очевидно,

методика усредняющая размер пылинок, носит целевой характер: в нашем случае расчет эффективности циклонов.

Впервые проблему параметрического осреднения полидисперсных сред систематически исследовал *Заутер* [3-4]. Основные результаты его работ [3-4] сводятся к следующему. Для различных приложений важны специфически осредненные средние размеры частиц из неоднородной совокупности. Поскольку средний размер представляет собой некоторую величину, выражаемую долями метра, очевидным способом размерного осреднения ансамбля частиц с функцией распределения $F(x)$ и соответственно плотностью вероятности $P(x) = dF(x)/dx$ является следующий:

$$\langle x_{ij} \rangle \equiv D_{ij} = [\int P(x) x^i dx / \int P(x) x^j dx]^{1/(i-j)} . (1)$$

Формула (1) подразумевает, что все пылевые частицы характеризуются единственным размером, т.е. имеют форму шара. Величину x_{ij} называют заутеровским диаметром (чаще всего под заутеровским диаметром понимается величина D_{32}). Если же форма частиц существенно не правильна и характеризуется двумя или тремя параметрами, в рассмотрение вводят также коэффициент формы. Физический смысл и практическое применение различных заутеровских диаметров приведены в табл. 1, а важные сведения о коэффициенте формы в работах [5,6].

Таблица 1

Обозначение, приложение и методы определения заутеровских диаметров

Символ	Наименование	Приложение	Метод определения
D ₁₀	Линейный или арифметический – CMD	Испарение жидкостей	Микроскопия, лазерная дифракция, акустическая дифракция
D ₂₀	Поверхностный	Абсорбция	Электронные системы обработки изображения в микроскопии
D ₃₀	Объемный	Гидрология	Электронной чувствительности (Electrozone sensing by Coulter gauge – Ref. US Patent 3557352)
D ₂₁	Удельно-поверхностный	Адсорбция	Электронные системы обработки изображения в микроскопии
D ₃₁	Удельно-объемный	Испарение жидкостей, молекулярная диффузия	Динамическая микроскопия
D ₃₂	Основной заутеровский (средний по поверхности) – SMD	Оценка эффективности процессов, массоперенос, реакции	Седиментация (осаждение)
D ₄₃	Дебруковский (средний по объему/массе)	Равновесное горение	Лазерной дифракции (LALLS – low angle laser scattering)

Среди множества параметров формы выделим два наиболее важных для наших целей – сферичность и скругленность [5]. Первый введен в употребление *X. Уодделлом* [6] и свидетельствует о

близости общей формы объекта к сфере. Сферичность определяется как отношение поверхности равнообъемной сферы к поверхности объекта. На основании изопериметрического

неравенства можно показать, что сферичность любого тела меньше сферичности сферы, т.е. меньше единицы. Числовые показатели сферичности для основных моделей частиц приведены в работах [5-6]. Скругленность характеризует гладкость поверхности объекта: чем проще микрорельеф, тем выше этот показатель [5].

Выполненные разными авторами исследования дисперсности различных сред и материалов позволяют утверждать [7], что полученные в результате однократного дробления твердые частицы распределены по размерам согласно двухпараметрическому закону *Розина – Раммлера*:

$$F(x, D, n) = 1 - e^{-(x/D)^n}, P(x, D, n) = 1/D \cdot (x/D)^{n-1} \cdot e^{-(x/D)^n}, \quad (2)$$

где величина характеризует средний размер частиц $\langle x \rangle = D \cdot \Gamma(1 + 1/n)$, а n – степень размерной неоднородности ансамбля (чем меньше n , тем полидисперсный порошок).

При многократном измельчении порошки состоят из частиц, размеры которых удовлетворяют двухпараметрическому логнормальному распределению *Гаусса – Колмогорова*:

$$P(x, D, \sigma) = \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi} \cdot \lg \sigma \cdot x} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - \lg D}{\lg \sigma} \right)^2}. \quad (3)$$

В распределении (3) параметр $\lg D$ отвечает среднему размеру частицы, а параметр $\lg \sigma$ – разбросу реальных размеров частиц вокруг среднего.

Принципиальным достоинством модели *Гаусса – Колмогорова* является удобство пересчета величин D_{nm} по линейным соотношениям *Хэтча – Шоута* [8], связывающим их с величинами D и σ :

$$\begin{aligned} \lg D_{43} &= \lg D + 1.151 \cdot (\lg \sigma)^2, \lg D_{42} = 2 \cdot \lg D, \lg D_{41} = 3 \cdot \lg D - 3.454 \cdot (\lg \sigma)^2, \\ \lg D_{40} &= 4 \cdot \lg D - 9.212 \cdot (\lg \sigma)^2, \lg D_{32} = \lg D - 1.151 \cdot (\lg \sigma)^2, \lg D_{31} = 2 \cdot \lg D - 4.606 \cdot (\lg \sigma)^2, \\ \lg D_{30} &= 3 \cdot \lg D - 10.363 \cdot (\lg \sigma)^2, \lg D_{21} = \lg D - 3.454 \cdot (\lg \sigma)^2, \lg D_{20} = 2 \cdot \lg D - 9.212 \cdot (\lg \sigma)^2, \\ \lg D_{10} &= \lg D - 5.757 \cdot (\lg \sigma)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Форма соотношений (4) такова, что, зная две любые величины D_{nm} и D_{kl} , можно вычислить все прочие. Существенный практический интерес представляет общий вид зависимости (4), который известен как преобразование *Хэтча – Шоута* [8], но в явном виде не приведен в доступных литературных источниках.

В данной работе указанный пробел устранен путем вычисления интегралов, определяющих вид D_{ij} . Функцией распределения частиц по размерам выбрана логнормальная типа *Колмогорова – Гаусса*. Соответствующий результат имеет вид:

$$D_{ij} = (i - j) \cdot \ln x + 1/2 \cdot (i + j) \cdot (i - j) \cdot (\ln \sigma)^2, \quad (5)$$

если интегрирование ведется в пределах от $(-\infty; +\infty)$ и

$$D_{ij} = (i - j) \cdot \ln x + 1/2 \cdot (i + j - 6) \cdot (i - j) \cdot (\ln \sigma)^2, \quad (6)$$

если пределы интегрирования смещены на величину $3 \cdot (\ln \sigma)^2$.

Форма соотношений (4)-(6) такова, что, зная две любые величины D_{nm} и D_{kl} , можно вычислить все прочие. Выведенные авторами, естественно, не впервые ном явные соотношения (5)-(6) приводятся здесь по причине их важности при количественном анализе экспериментальных данных.

Важно отметить, что анализируемый нами порошок (отходы резания рельса) по природе образования не соответствует приведенным выше классическим моделями. Во-первых, технологический процесс содержит элементы как уникальности (каждый контакт абразивного круга с материалом рельса неповторим), так и многократной повторяемости (элементарные взаимодействия абразив – металл повторяются

многократно). Во-вторых, форма отходящих абразивных и металлических частиц заметно отличается от сферической. Наконец, количественное соотношение абразивной и металлической фракций в пылевой смеси варьируется – в зависимости от марки обрабатываемого материала и особенностей режущего инструмента. Таким образом, исследование реального распределения отходящих пылевых частиц по размеру представляется практически важной научной задачей.

Экспериментальные данные

Физический анализ абразивно-металлической пыли осуществлялся при помощи лабораторно-измерительного комплекса *Fritsch Analysette 22 Compact*, использующего метод *LALLS – low angle laser light scattering* [9]. Программное обеспечение прибора обеспечивает выдачу результатов в

графической (рис. 1) и обработанной цифровой форме (рис. 2).

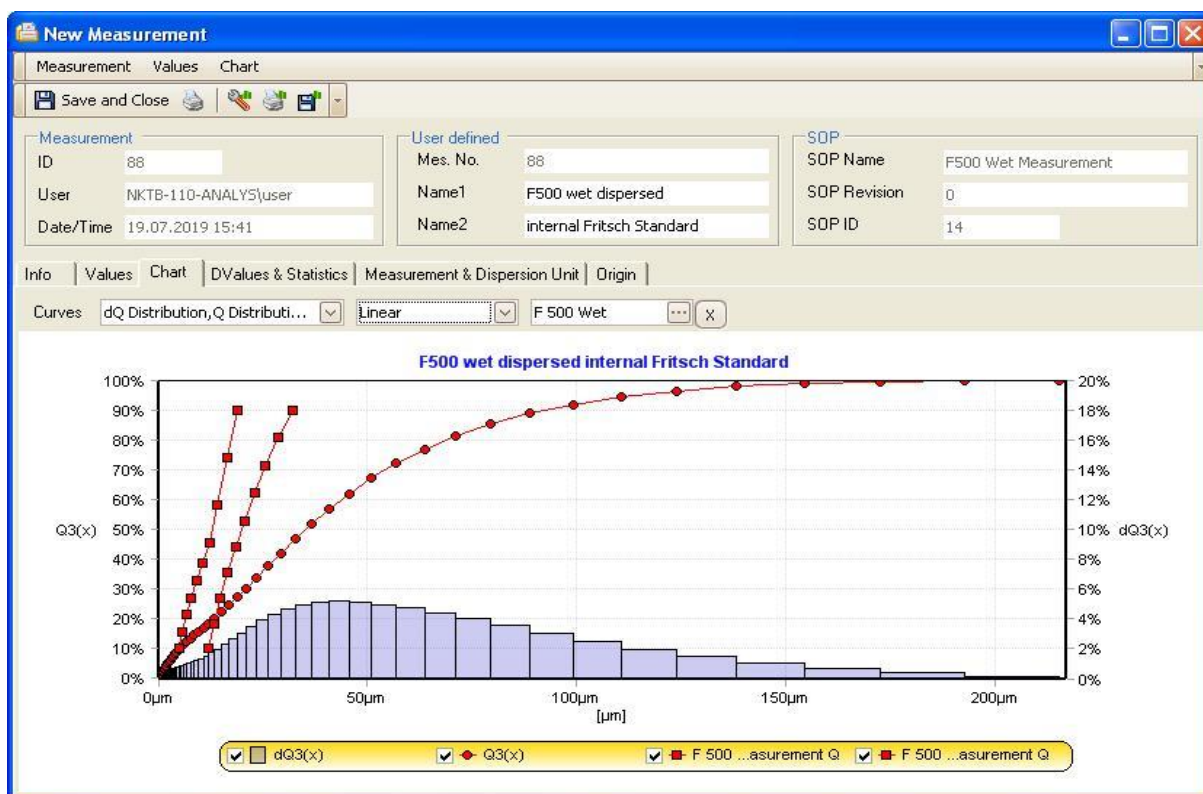


Рис. 1. Интерфейсное окно лабораторно-измерительного комплекса Fritsch Analysette 22 Compact с результатами фракционного анализа технологической пыли в первичной графической форме

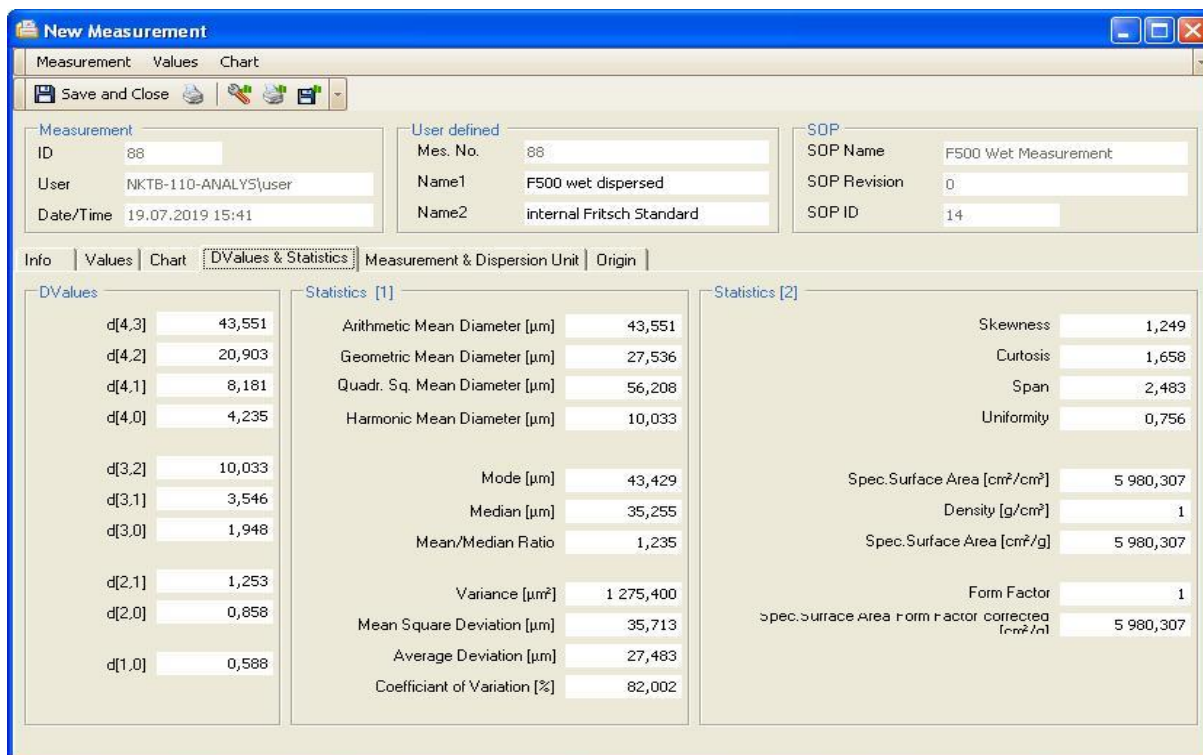


Рис. 2. Интерфейсное окно лабораторно-измерительного комплекса Fritsch Analysette 22 Compact с результатами фракционного анализа технологической пыли (осредненные числовые характеристики)

Необходимо отметить следующее: существенными недостатками программной части измерительного комплекса являются отсутствие

детальных сведений об алгоритмах преобразования измеряемых величин и характере выводимых данных, а также отсутствие документации

касательно данных, отображаемых в форме графиков и неизбежные сопутствующие погрешности. На первый взгляд, шкала дифференциальной функции распределения (рис. 1) приведена с погрешностью в несколько раз. Однако детальный анализ позволяет заключить, что фактически на графике приведена зависимость величины $P(x_k) dx_k$ от x_k , причем разбиение частиц на размерные группы шириной dx_k – не является равномерным. Кроме того, выводимые на экран (рис. 2) интегральные характеристики распределения частиц по размеру D_{ij} не документированы, что требует строить и проверять гипотезы относительно сути этих числовых показателей.

Следовательно, адекватная интерпретация экспериментальных данных возможна лишь на основе согласованного анализа интегральных числовых показателей, которые определяются функцией $P(x)$ (рис. 2), и графических представлений в обоих доступных форматах – с

линейной и логарифмической размерными шкалами. В процессе сопоставления графических и числовых образов $P(x)$ требуется не только использовать специализированное программное обеспечение [10-11], но также разработать надлежащие алгоритмы согласования данных.

Техника оцифровки и верификации экспериментальных данных

Для оцифровки графических данных дисперсионного анализа, полученных при помощи прибора *Fritsch Analysette 22 Compact*, использовалась специализированная программа *Grafula* [12]. Этот информационный продукт автоматизирует оцифровку графически представленных зависимостей, т.е. их перевод в табличный вид. Процедура сводится к считыванию графика, размещению на нем декартовой системы координат и нанесению достаточного числа маркеров на линию графика. Применительно к нашей задаче описанный процесс иллюстрируется рис. 3.

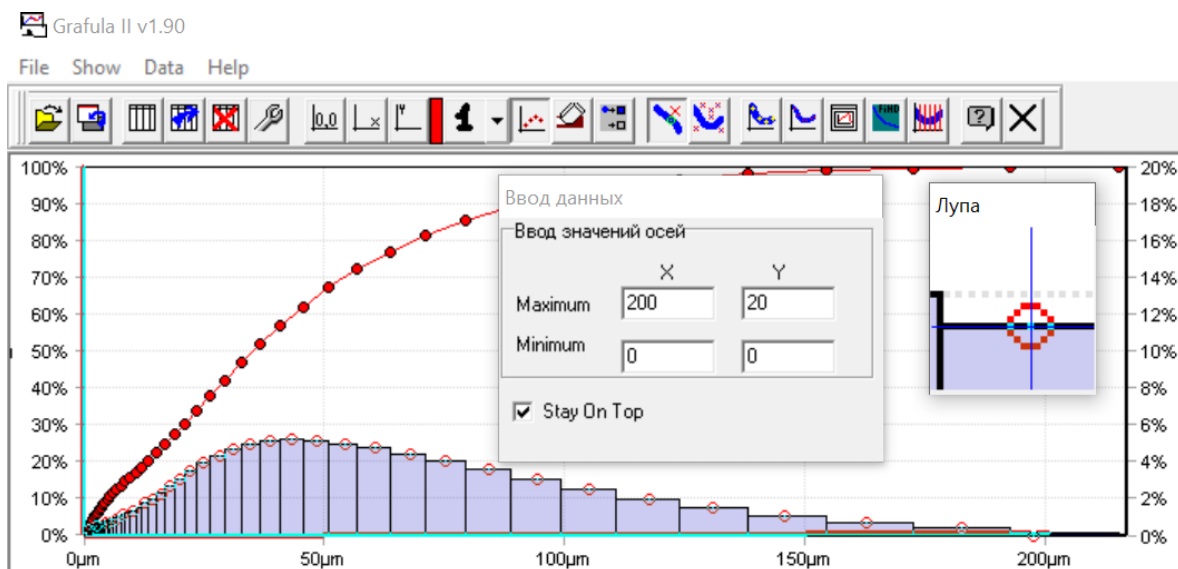


Рис. 3. Процедура оцифровки данных дисперсионного анализа металлоабразивной пыли при помощи прибора *Fritsch Analysette 22 Compact* в пакете *Grafula* [12] (применительно к построению с линейным размером частиц пыли x по оси абсцисс)

Результат автоматической оцифровки относится к положению введенных пользователем точек и формируется в Excel-совместимую таблицу (рис. 4). Отметим, что погрешность оцифрованных данных имеет несколько составляющих: 1) погрешность формирования графика, обусловленная аппаратными и программными особенностями измерительного комплекса, 2) дефекты систем графического отображения

данных, 3) дискретизация при оцифровке графика программой *Grafula*, а также 4) невозможность точно маркировать кривую на графике из-за ограниченных психомоторных возможностей человека. Отмеченные обстоятельства требуют дополнительной проверки результатов с целью исключить критичные ошибки и оценить результирующую погрешность.

X	Y1	Y2
1,3840830	0,27272727	
2,7681660	0,45454545	
4,8442906	0,63636363	
5,5363321	0,63636363	
6,9204152	0,81818181	
8,3044982	1,09090909	
10,380622	1,27272727	
12,802768	1,72727272	
14,532871	1,90909090	
16,262975	2,18181818	

Рис. 4. Результат оцифровки данных дисперсионного анализа металлообразивной пыли при помощи прибора Fritsch Analysette 22 Compact в пакете Grafula [12]

В целях верификации результата оцифровка осуществлялась дважды – применительно к данным в нормальном по размеру частиц представлении (рис. 1) и применительно к отображенным в логарифмическом масштабе (рис. 5). Затем результаты первичного анализа сопоставлялись графически (рис. 6). Для компенсации перечисленных выше погрешностей оба оцифрованных ряда подвергались перенормировке. В результате удалось исключить систематическую погрешность и обеспечить выполнение важного для функции распределения $F(x)$ условия $F(\infty) = 1$. Затем на основе каждого из результатов строились

однотипные модельные распределения, эмпирические параметры которых определялись методами математического программирования [13], а затем сопоставлялись. Последним этапом согласования служила проверка соответствия осредненных величин, рассчитанных по построенным модельным распределениям, как взаимного, так и интегральным характеристикам, выводимым программным обеспечением измерительного прибора.

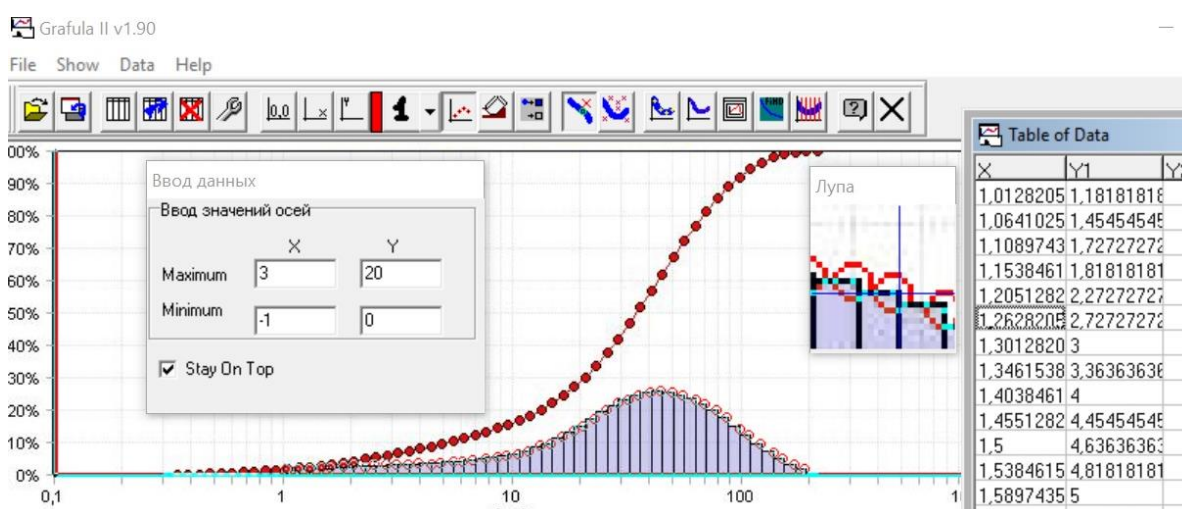


Рис. 5. Процедура оцифровки данных дисперсионного анализа металлообразивной пыли при помощи прибора Fritsch Analysette 22 Compact в пакете Grafula [12] (применительно к построению с логарифмом линейного размера частиц пыли x по оси абсцисс)

Данные рис. 1 удалось оцифровать лишь в 35 точках (вследствие их сгущения и слияния с осью абсцисс при $x \rightarrow 0$), а для данных рис. 5 оцифровка выполнена для всех 50-ти измерительных диапазонов прибора.

Оказалось, что искажение функции распределения $F(x)$ в результате невозможности извлечь ее из измерительного прибора в цифре составляет 15 % при оцифровке графика рис. 1 ($F(\infty) \approx 0.85$) и 8 % при оцифровке графика рис. 5

($F(\infty) \approx 0.92$). Компенсировать выявленные масштабные искажения позволила перенормировка: после нее числовые значения, полученные с графиков рис. 1 и рис. 5 удовлетворительно согласуются между собой (рис. 6). Из этого рисунка следует, что полученные обратной оцифровкой распределения практически совпадают, начиная с диаметра 10 мкм. Отметим, что полтора десятка левых точек, доступные лишь при считывании с графика, имеющего логарифмическую шкалу размеров (рис. 6), свидетельствуют о значительном числе мелких (размером менее 10 мкм) частиц, которые особо опасны для человека. Данное обстоятельство следует иметь в виду при проектировании циклона, поскольку инерционному отсеvu подвержены

крупные частицы, а очистка потока от мелкодисперсной пыли требует надлежаще производительных фильтров.

Наше заключение, что при $x \geq 10$ мкм выводимые прибором графические распределения рис. 1 и рис. 6 совпадают, подтверждается следующей проверкой. Если аппроксимировать зависимость *Розина – Раммлера* оба ряда оцифрованных данных (для ряда с логарифмическим размерным масштабом при этом взяты последние 35 точек), можно количественно оценить отличия сравниваемых вариантов обратной оцифровки.

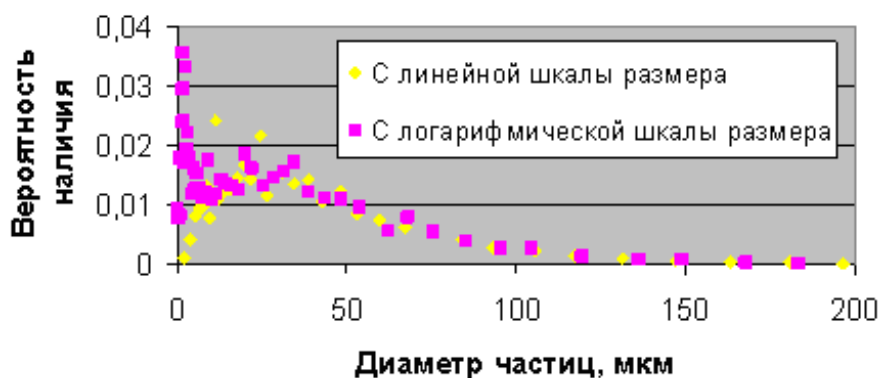


Рис. 6. Сопоставление результатов оцифровки данных дисперсионного анализа металлоабразивной пыли: сравниваются данные, полученные на основе линейной (желтые точки) и логарифмической (розовые точки) размерных шкал

Для аппроксимации функций (2) сравниваемых данных рис. 6 численно решалась задача математического программирования [13]: минимизировалась невязка между

экспериментальным и модельным распределениями частиц. Если невязку определять по удобной для вычислений декартовой норме, требуется минимизировать функционал

$$\Phi(x, D, n) = \sum_k [P(x_k, \hat{=} D, \hat{=} n) - P_k]^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

в котором k – номер табличной точки; P_k – соответствующее значение экспериментальной плотности вероятности; D и n – параметры модельного распределения *Розина – Раммлера* (2).

Средствами Excel получены следующие решения задачи (2), (7) для данных рис. 6. Для данных, полученных с линейного по x графика (рис. 1), величины D и n равны соответственно 48.37 мкм и 1.588. При этом аппроксимирующая $P(x, D, n)$ кривая характеризуется средней невязкой с экспериментальными точками 0.00274 и коэффициентом корреляции 0.894. Решение задачи для 35 правых точек (рис. 5) выражается

значениями $D = 48.61$ мкм, $n = 1.346$, обеспечивающими невязку 0.00187 и коэффициент корреляции 0.934. Близость параметров D и n для обоих способов оцифровки наряду с малой невязкой и высокой корреляцией свидетельствуют о равноценности анализируемых графических образов искомой зависимости. Об отличии формульного представления данных, полученных с графических источников рис. 1 и рис. 5 позволяет судить корреляция функций $P(x, D, n)$ с вычисленными выше значениями параметров. Ее величина (рис. 7) равна 0.99.

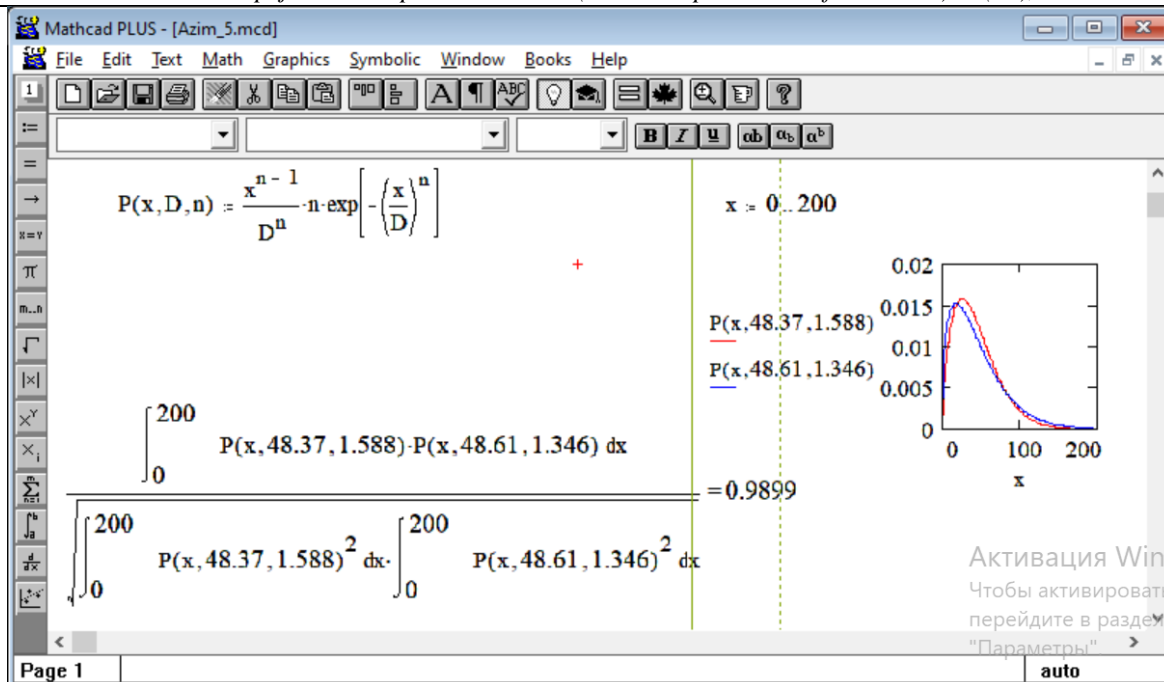


Рис. 7. Графическое и количественное сопоставление результатов оцифровки данных дисперсионного анализа металлообразивной пыли: сравниваются данные, полученные на основе линейной (красная кривая) и логарифмической (синяя кривая) размерных шкал

Поскольку нам важны размерные характеристики пыли, осредненные на основании некоторого реалистичного распределения, вычислим набор показателей D_{ij} согласно инициализированной выше модели Розина – Рамллера при полученных разными способами значениях D и n . Затем сравним результаты между собой и с интегральными показателями D_{ij} , которые выводятся прибором *Fritsch Analysette 22 Compact*.

При этом важно понимать, что цель сравнения представленных на рис. 1 и 5 графических

распределений с выводимыми прибором интегральными показателями D_{ij} – разобраться с тем, какое именно распределение отображено на этих рисунках. То обстоятельство, что на рис. 2 величина D_{43} совпадает со среднеарифметическим диаметром в пяти десятичных знаках, а величина D_{32} столь же близка к среднегеометрическому размеру, позволяет предположить, оси ординат на этих соответствуют дифференциалу взвешенной на x^3 функции распределения

$$dF(x_k) = P(x_k) x_k^3 dx_k, \quad (8)$$

что отличается от принятой в математике величины $P(x_k)$. Данное обстоятельство является ключевым при интерпретации результатов размерного анализа пылевых частиц на основе рассматриваемых гистограмм.

Проверим нашу гипотезу, рассчитав моменты D_{ij} . Сравнение результатов расчета, отвечающих принятию и отвержению гипотезы, с числовыми данными, выдаваемыми прибором *Fritsch Analysette 22 Compact* (рис. 2), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сопоставление зауторовских диаметров пыли в предположении и отвержении гипотезы о взвешивании функции распределения на массу частиц на основе аппроксимаций рис. 6

Диаметр, мкм	Гипотеза (8) не верна		Гипотеза (8) верна		Числовые данные прибора, мкм
	$D = 48.4$ мкм, $n = 1.588$	$D = 48.6$ мкм, $n = 1.346$	$D = 48.4$ мкм, $n = 1.588$	$D = 48.6$ мкм, $n = 1.346$	
D_{43}	90.2	107.1	43.4	44.4	43.5
D_{42}	83.2	97.9	30.4	27.5	20.9
D_{41}	75.2	87.1	15.6	12.5	8.18
D_{40}	65.5	73.6	7.61	6.11	4.23
D_{32}	76.7	89.5	21.3	17.0	10.0
D_{31}	68.6	78.5	9.38	6.62	3.55
D_{30}	58.9	64.9	4.26	3.15	1.95
D_{21}	61.4	68.8	4.13	2.57	1.25
D_{20}	51.6	55.2	1.90	1.35	0.66
D_{10}	43.4	44.4	0.88	0.71	0.59

Как видно из представленных в табл. 2 данных, высказанное здесь предположение о сути данных, выводимых сервисной программой прибора, верна, что принципиально при размерном анализе пыли.

Результаты статистического анализа графических данных

$$P(x, D1, D2, \sigma_1, \sigma_2, \alpha) =$$

$$= \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi} \cdot x} \cdot \left[\frac{\alpha}{\sigma_1} + \frac{1-\alpha}{\sigma_2} \right] \left[\alpha \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - \lg D_1}{\lg \sigma_1} \right)^2} + (1-\alpha) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - \lg D_2}{\lg \sigma_2} \right)^2} \right], \quad (9)$$

где D_1 и D_2 – положение мод, σ_1 , σ_2 – их ширина, α – доля частиц, приходящихся на первую моду. Решение соответствующей оптимизационной задачи [13] средствами Excel дает следующий результат: $D_1 = 45.2$ мкм, $D_2 = 7.0$ мкм, $\sigma_1 = 0.97$ мкм, $\sigma_2 = 2.1$ мкм, $\alpha = 0.858$. Средняя невязка между аппроксимирующей функцией и исходными данными составляет 31 %, а коэффициент корреляции 0.977. Это неплохое соответствие, учитывая высокую погрешность экспериментальных значений (рис. 6). Отметим, что этот результат относится к взвешенной на x^3 истинной функции распределения пыли по размеру. Трактовать его можно следующим

образом: основную массу пыли (около 85 %) составляют частицы размером более 10 мкм, поэтому для целей практической очистки воздуха его можно заменить двухпараметрическим логнормальным (3) с $D = 45.2$ мкм и $\sigma = 1.97$ мкм. Такое упрощение, однако, не позволит качественно аппроксимировать D_{ij} с $j < 3$, в то время как учет мелкой фракции важен для некоторых приложений, например, для аккуратного вычисления всех используемых диаметров D_{ij} и моментов функции распределения $P(x)$. Результаты сопоставления двойной логнормальной и логнормальной аппроксимации $P(x)$ приведены на рис. 8 и в табл. 3.

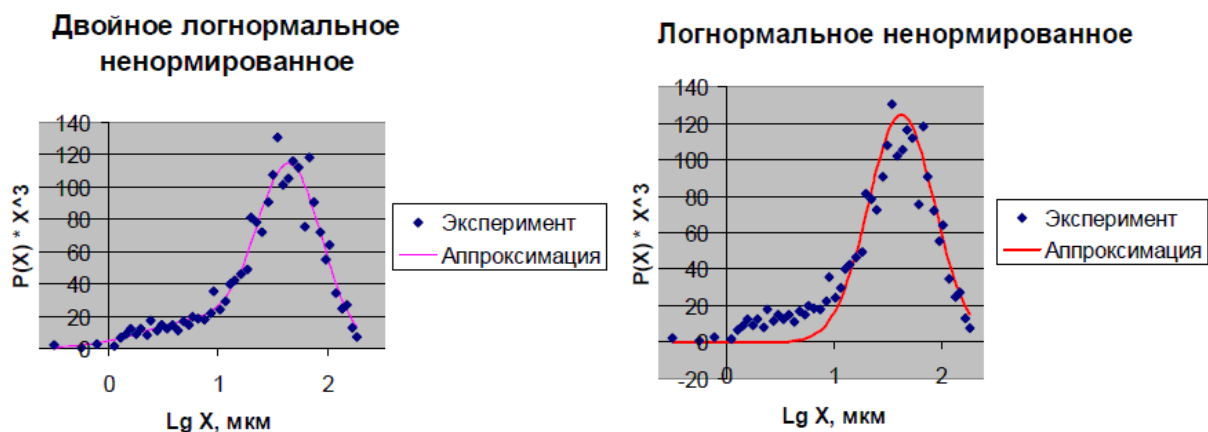


Рис. 8. Аппроксимация экспериментальных данных двойным логнормальным

распределением $P(x) = 0.176 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - 1.65}{0.416} \right)^2} + 0.563 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - 0.898}{0.791} \right)^2}$ (левый фрагмент, среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0.31, коэффициент корреляции с экспериментальными точками составляет 0.977) и логнормальным распределением $P(x) = 0.563 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - 1.63}{0.435} \right)^2}$ (правый фрагмент, среднеквадратичная относительная погрешность составляет 1.23, коэффициент корреляции с экспериментальными точками составляет 0.970)

Также изучалась возможность приблизить экспериментальные данные распределениями Розина – Раммлера (классическим и обобщенным трехпараметрическим $P(x, D, n, m) = (x/D)^m \cdot e^{-(x/D)^n}$

$\int (x/D)^m \cdot e^{-(x/D)^n} dx$). Сопоставить соответствующие результаты между собой и с данными аппроксимации логнормальной и двойной логнормальной функциями позволяют данные рис. 9 и табл. 3. Эти результаты свидетельствуют о близком качестве аппроксимации при использовании пятипараметрического двойного логнормального, трехпараметрического типа Розина – Раммлера и двухпараметрического классического Розина – Раммлера модельных распределений $P(x)$. В то же время логнормальное распределение не согласуется с опытными данными, поскольку не отражает наличия значительного числа очень мелких частиц в рассматриваемой технологической пыли.

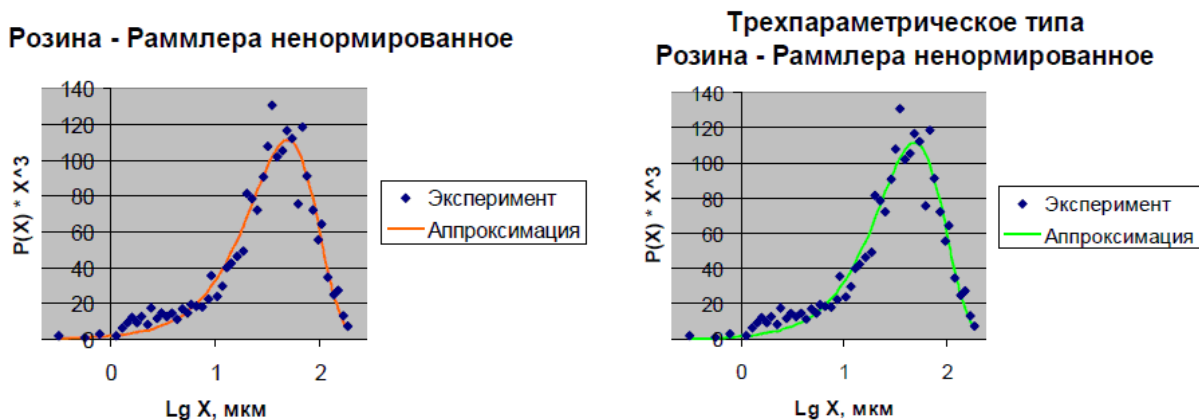


Рис. 9. Аппроксимация экспериментальных данных распределением Розина – Рамллера $P(x) = 7.73 \cdot 10^{-3} \cdot 0.322 \cdot \exp[-(x/48.89)1.322]$ (левый фрагмент, среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0.47, коэффициент корреляции с экспериментальными точками 0.972) и трехпараметрическим распределением $P(x) = 6.66 \cdot 10^{-3} \cdot 0.4 \cdot \exp[-(x/66.18)1.235]$ (правый фрагмент, среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0.51, коэффициент корреляции с экспериментальными точками 0.972)

Из проведенного анализа следует целесообразность аппроксимации экспериментальных данных монотонно убывающей функцией $P(x)$. Простейшим вариантом здесь служит экспоненциальное распределение, которое можно рассматривать как частный случай распределения Розина – Рамллера при $n = 1$. Результаты сопоставления экспериментальных данных с этой моделью

показаны на рис. 10. Данная аппроксимация демонстрирует хорошее согласие с экспериментом для малоразмерных фракций пыли, которые вследствие представительности существенно влияют на среднеквадратичную относительную погрешность аппроксимации. Рассчитанные на основе экспоненциального распределения интегральные показатели дисперсности также сведены в табл. 3.

Розина - Рамллера при $n = 1$ - экспоненциальное ненормированное

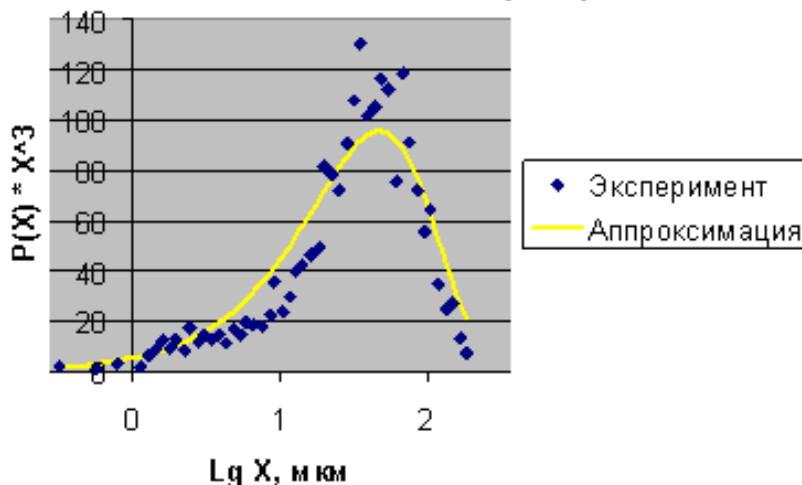


Рис. 10. Аппроксимация экспериментальных данных экспоненциальным распределением $P(x) = 1/47.13 \cdot e^{-x/47.13}$. Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0.42, коэффициент корреляции с экспериментальными точками 0.948

Интегральные показатели дисперсности пыли, рассчитанные на основе модельных распределений в сопоставлении с оцененными программными средствами измерительного прибора. Модельные распределения инициализированы по графическим данным

Параметр	Математическая модель, использованная для оценки					Фактическое значение
	Логнормальное	Двойное логнормальное	Розина – Рамллера трехпараметрическое	Розина – Рамллера	Экспоненциальное	
D_{43} , мкм	51.7	44.8	44.7	45.2	43.6	43.5
D_{42} , мкм	41.2	23.0	27.3	28.1	21.4	20.9
D_{41} , мкм	32.0	9.45	12.2	12.9	8.61	8.18
D_{40} , мкм	25.0	4.87	5.99	6.32	4.40	4.24
D_{32} , мкм	32.8	11.8	16.6	17.5	10.3	10.0
D_{31} , мкм	25.2	4.34	6.4	6.92	3.79	3.55
D_{30} , мкм	19.6	2.32	3.07	3.28	2.03	1.95
D_{21} , мкм	19.4	1.59	2.46	2.74	1.39	1.25
D_{20} , мкм	15.1	1.03	1.32	1.42	0.904	0.858
D_{10} , мкм	11.8	0.666	0.704	0.738	0.586	0.588
Мода, мкм	52.1	45.2	48.9	48.4	43.9	43.4
Медиана, мкм	42.1	36.2	37.0	37.3	32.3	35.3
Среднее/ Медиана	1.21	1.24	1.21	1.21	1.35	1.24
СКО σ , мкм	35.0	37.2	33.6	33.8	39.9	35.7
СМО $ \sigma $, мкм	26.3	29.4	26.2	26.5	30.6	27.5
QSMD, мкм	62.1	58.9	55.9	56.5	54.4	56.2
GMD, мкм	39.3	33.1	31.4	32.2	24.8	27.5
Асимметрия	1.49	1.17	1.19	1.20	1.41	1.25
Эксцесс	2.28	1.49	1.46	1.50	1.66	1.66

Фигурирующие в табл. 3 интегральные показатели распределения рассчитываются по следующим формулам:

Показатель	Связь с дифференциальной функцией распределения
Мода, мкм	Mode: $d/dx P(x = \text{Mode}) = 0$
Медиана, мкм	Med: $F(\text{Med}) = 1/2$
Среднее/ Медиана	$\int P(x) \cdot x dx / \text{Med}$
СКО σ , мкм	$[\int P(x) \cdot (x - \langle x \rangle)^2 dx]^{1/2}$, где $\langle x \rangle = \int P(x) \cdot x dx$
СМО $ \sigma $, мкм	$\int P(x) \cdot x - \langle x \rangle dx$, где $\langle x \rangle = \int P(x) \cdot x dx$
QSMD, мкм	$[\int P(x) \cdot x^2 dx]^{1/2}$
GMD, мкм	$\exp[\int P(x) \cdot \ln x dx]$
HMD, мкм	$1/[\int P(x)/x dx]$
Асимметрия	$[\int P(x) \cdot (x - \langle x \rangle)^3 dx] / [\int P(x) \cdot (x - \langle x \rangle)^2 dx]^{3/2}$
Эксцесс	$[\int P(x) \cdot (x - \langle x \rangle)^4 dx] / [\int P(x) \cdot (x - \langle x \rangle)^2 dx]^2$

Как следует из данных табл. 3, интегральные показатели распределения хорошо воспроизводятся однопараметрической экспоненциальной моделью

$$P(x) = 1/47.13 \cdot e^{-x/47.13} \quad (10)$$

Кроме того, представляется вполне оправданным использовать выводимые прибором интегральные показатели (см. табл. 3) непосредственно для решения обратной задачи – подбора подходящей модели распределения пылевых частиц по размеру. Естественно здесь требуется регуляризация, вариантами которой предлагается использовать рассмотренные выше модельные распределения. Результаты соответствующей аналитической и вычислительной работы приведены в следующем разделе.

Восстановление функции распределения по интегральным показателям

Рассмотрим дифференциальную функцию распределения как принадлежащую некоторому семейству k -параметрических интегрируемых на положительной полуоси функций вида $P(x, \alpha)$, где $\alpha = (\alpha_1, \alpha_1, \dots, \alpha_k)$ – вектор определяющих конкретный вариант параметров. При этом каждый из практически определяемых интегральных

параметров этой функции представляет собой функционал, который является функцией параметрического вектора α . Естественно сформулировать задачу выбора оптимальной функции $P(x, \alpha)$ как функцию, обеспечивающую минимальную невязку между расчетными и практически известными значениями всех функционалов по подходящей норме.

В нашем случае рационально выбрать за норму суммарную квадратичную относительную погрешность функционалов из первого столбца табл. 3 или некоторого их подмножества. Если значения этих функционалов достаточно надежны, то чем больше их число N , тем надежнее результат подбора оптимальной теоретической функции распределения $P(x, \alpha)$ заданного вида. Для иллюстрации такого подхода ограничимся значениями заутеровских диаметров D_{ij} . Математическая формулировка оптимизационной задачи принимает вид:

$$\sum \{ [\int P(x, \alpha) x^i dx / \int P(x, \alpha) x^j dx]^{1/(i-j)} / D_{ij} - 1 \}^2 \rightarrow \min ,$$

$$i = 1, \dots, 4, j = 0, \dots, i - 1 .$$
(11)

Можно доказать, что задача (11) эквивалентна переопределенной системе алгебраических задачи нахождения лучшего решения уравнений

$$[\int P(x, \alpha) x^i dx / \int P(x, \alpha) x^j dx]^{1/(i-j)} = D_{ij} ,$$

$$i = 1, \dots, 4, j = 0, \dots, i - 1 .$$
(12)

Для решения задачи (12) с пробными функциями распределения из табл. 3 воспользуемся средствами пакета MathCAD. Погрешность аппроксимации будем оценивать по величине невязки и коэффициенту корреляции левых и правых частей в уравнениях (12). На рис. 11-12

приведены алгоритм и результаты решения задачи для однопараметрической экспоненциальной функции распределения, а в табл. 5 результаты подбора оптимальных параметров для всех пяти моделей и соответствующие погрешности.

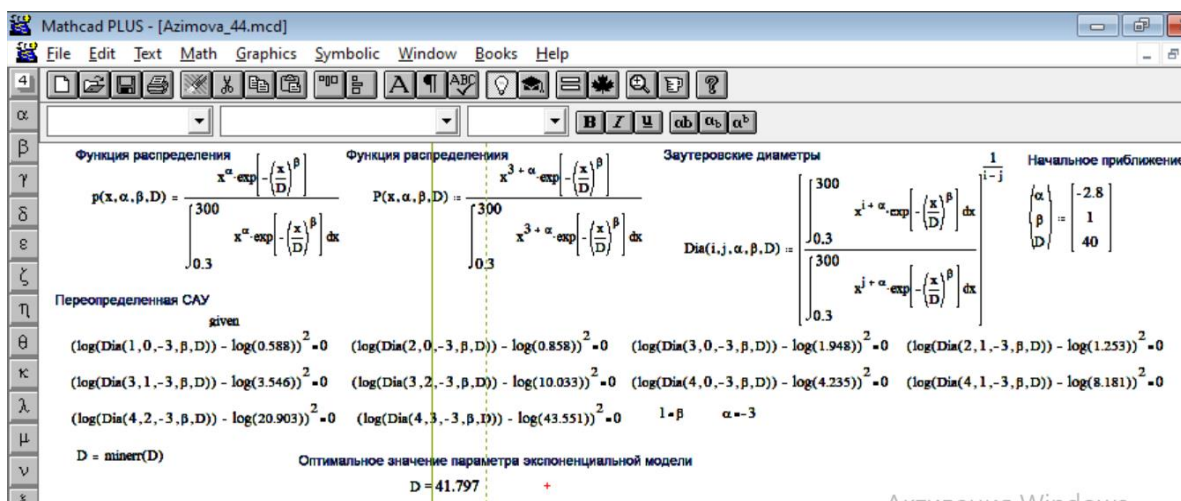


Рис. 11. Алгоритм решения задачи (11)/(12) для экспоненциальной функции распределения средствами MathCAD

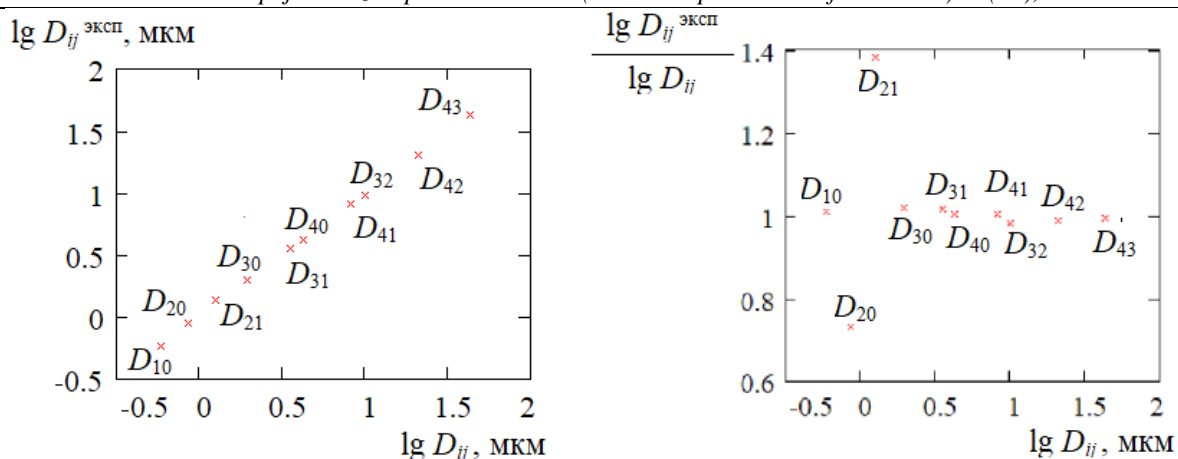


Рис. 12. Определение размерных характеристик пыли на основании набора интегральных показателей D_{ij} : слева – сопоставление расчетных и экспериментальных значений, справа – величина относительной погрешности

Альтернативным способом определить масштабную величину D в экспоненциальном распределении $P(x)$ является решение оптимизационной задачи по обеспечению наибольшего согласия интегральных характеристик модельного и фактического распределений, приведенных в последних девяти строках табл. 3. Результаты таких расчетов, выполненные авторами, очень близки к результатам, полученным описанными выше способами.

С теоретической точки зрения интересен следующий результат, полученный авторами. Для экспоненциального распределения частиц по размерам интегрирование с надлежащими весами

позволяет получить явные выражения для всех десяти заутеровских диаметров. Здесь, однако, важно учесть, что в силу расходимости соответствующих несобственных интегралов пределы интегрирования следует брать не от нуля до бесконечности, а соответствующими границам размерного разрешения измерительного прибора. Кроме того, эти границы удобно масштабировать, выражать в долях масштабной величины D . Если нижний предел интегрирования обозначить как εD , а верхний как $N D$ ($0 < \varepsilon < 1$, $N > 1$), заутеровские диаметры вычисляются как:

$$D_{10} = 2 \varepsilon D,$$

$$D_{20} = [2 \ln(N/\varepsilon)]^{1/2} \varepsilon D, D_{21} = \ln(N/\varepsilon) \varepsilon D,$$

$$D_{30} = (2 \varepsilon^2)^{1/3} D, D_{31} = \varepsilon^{1/2} D, D_{32} = \ln(N/\varepsilon)^{-1} D, \quad (13)$$

$$D_{40} = (2 \varepsilon^2)^{1/4} D, D_{41} = \varepsilon^{1/3} D, D_{42} = \ln(N/\varepsilon)^{-1/2} D, D_{43} = D.$$

Решая переопределенную систему (13) относительно ε , N и D , получаем следующие значения $N D \approx 43.34$ мкм, $\varepsilon D \approx 0.29$ мкм и $N D \approx 186$ мкм, которые хорошо согласуются как с ранее вычисленным размерным параметром пыли, так и с паспортными данными прибора-анализатора. Особо отметим, что погрешность такого способа инициализации экспоненциальной модели характеризуется корреляцией расчетных и

фактических значений D_{ij} на уровне 0.999997 и среднеквадратичной относительной погрешностью около 0.7 %.

Оценить согласованность результатов идентификации модели в рамках гипотезы об экспоненциальном распределении частиц по размерам $P(x, \alpha) = P(x, D) = 1/D \cdot e^{-x/D}$ позволяют данные табл. 5.

Результаты идентификации модели на основе различных данных, выдаваемых прибором *Fritsch Analysette 22 Compact*, и степень согласия результирующей модели и исходных табличных значений

Параметр	По данным оцифровки $P(x, \alpha) \cdot x^3 dx$ в зависимости от x	По данным оцифровки $P(x, \alpha) \cdot x^3 d(\lg x)$ в зависимости от $\lg x$	На основе величин D_{ij} численно	На основе прочих интегральных параметров численно	На основе величин D_{ij} аналитически
D , мкм	71.8	47.13	41.8	39.9	43.3
Относит. погрешность	0.645	0.28	0.78	0.093	0.0069
Корреляция	0.626	0.842	0.996	0.992	0.999997

Как видно из представленных в табл. 5 данных, наиболее надежным способом идентификации модели $P(x, \alpha)$ по выводимой прибором-анализатором информации является аналитическое и/или численное решение задачи (11)-(12), которая для экспоненциальной модели $P(x, D) = 1/D \cdot e^{-x/D}$ сводится к переопределенной системе алгебраических уравнений (13).

Выводы

Анализ экспериментальных дисперсного состава частиц, образующихся при резании рельса, по размерам сводится к следующему.

1. Прибор *Fritsch Analysette 22 Compact* не является оптимальным для исследования фракционного состава пыли, поскольку не выводит данные измерений в первичной числовой форме. Обратная оцифровка распечатываемых прибором графиков и последующие численные преобразования величины $P(x) \cdot x^3 dx$ вносят критичный вклад в погрешность оценивания зависимости $P(x, \alpha)$. Потому рациональным способом извлечения достоверных сведений из данного прибора представляется инициализация вероятных модельных распределений на основе выводимых (рис. 2) интегральных показателей.

2. Для детального анализа размерного распределения пылевых частиц по имеющимся экспериментальным данным лучше всех здесь рассмотренных подходит экспоненциальное распределение частиц по размерам $P(x) = 1/43.33 \cdot e^{-x/43.3}$. На основе этого распределения можно верно воспроизвести все интегральные показатели, предоставляемые измерительным комплексом.

3. Задачи пылеулавливания требуют использовать классическое логнормальное распределение $P(x) = 0.563 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg x - 1.63}{0.435} \right)^2}$. Его параметры вычислены методами математического программирования, что позволяет рассчитать важную для проектирования циклонов величину $D_{32} = 32,8$ мкм.

4. Поскольку содержание металлической и абразивной пыли в образце относится примерно как 3:2 (по массе) необходимо выполнить отдельный анализ размерного распределения частиц для указанных материальных фракций.

5. Ввиду существенной зависимости аэродинамических свойств пыли от геометрии

частиц представляется необходимым осуществлять одновременно анализ таких показателей как сферичность и скругленность.

Список первоисточников

В. Страус Промышленная очистка газов / Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 616 с.

М.Г. Зиганшин Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. М.: Экопресс – 3М, 1998. 505 с.

J. Sauter Grassenbestimmung von Brennstoffteilchen // Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. 1926. Heft 279.

J. Sauter Untersuchung der von Spritzvergasern gelieten Zerstobung // Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. 1928. Heft 312.

Сферичность // <https://ru.wikipedia.org/wiki/Сферичность>.

H. Wadell Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles // J. Geology. 1935. Vol. 43, № 3. P. 250-280.

В.В. Адушкин, С.И. Попель, С.И. Шишаева Анализ мелкодисперсной фракции при разрушении горных пород взрывом и образовании скальных оползней // Записки Горного института. 2007. Т. 171. С. 32-38.

T. Hatch, S.P. Choate Statistical description of the size properties of non-uniform particulate substances // J. Franklin Inst. 1929. V. 207. P.369-387.

W. Kaye, J.B. McDaniel Low-Angle Laser Light Scattering – Rayleigh Factors and Depolarization Ratios // Applied Optics. 1974. V. 13, Issue 8. P. 1934-1937.

Е.А. Бочкарева Сравнительный анализ программ оцифровки графиков // Современные научные исследования и инновации: электронный научно-практический журнал – <http://web.snauka.ru/issues/2015/11/60095>.

Э.Н. Шарпова, В.Л. Дмитриев Система оцифровки графических данных // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2014. № 1-2. С. 166-171.

Grafula – оцифровка координат точек отсканированных графиков для переноса их в Excel: Математическое моделирование – <https://mmodelling.blogspot.com/2012/07/excel.html>.

M. Minoux Mathematical Programming: Theory and Algorithms. New York: John Wiley, 1986. 489 p.

Babenko V. G.

*PhD, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Information Security
and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd., 460, Cherkasy, 18006, Ukraine*

Faure E. V.

*Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Information Security
and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University*

Sysoienko S. V.

*PhD, Senior Lecturer
of the Department of Information Security and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University*

Myronets I. V.

*PhD, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Information Security
and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University*

Sysoienko A. A.

*PhD student
Cherkasy State Technological University*

THE EFFECTIVENESS OF USE OF MATRIX OPERATIONS FOR CRYPTOGRAPHIC TRANSFORMATION IN SLIDING ENCRYPTION PRIMITIVES

Бабенко Вера Григорьевна

*кандидат технических наук,
доцент кафедры информационной безопасности
и компьютерной инженерии
Черкасский государственный технологический университет
б-р Шевченка, 460, г. Черкассы, 18000, Украина,*

Фаурэ Эмиль Виталиевич

*доктор технических наук,
доцент кафедры информационной безопасности
и компьютерной инженерии
Черкасский государственный технологический университет*

Сысоенко Светлана Владимировна

*кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры информационной безопасности
и компьютерной инженерии
Черкасский государственный технологический университет*

Миронец Ирина Валериевна

*кандидат технических наук,
доцент кафедры информационной безопасности
и компьютерной инженерии
Черкасский государственный технологический университет*

Сысоенко Антон Андреевич

*аспирант
Черкасский государственный технологический университет*

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТРИЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ КРИПТОГРАФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРИМИТИВАХ СКОЛЬЗЯЩЕГО ШИФРОВАНИЯ

Summary. The authors prove and substantiate that sliding encryption primitives are a partial case of matrix operations based on recurrent sequences. It is carried out the research of matrix operations of cryptographic transformation synthesized on the basis of sum modulo. It is shown how the properties of cryptographic

transformation results change depending on the module value. Methods and recommendations are offered for applying matrix operations based on sum modulo to encrypt information.

Аннотация. В представленной работе доказано и обосновано, что примитивы скользящего шифрования являются частным случаем матричных операций, построенных на основе рекуррентных последовательностей. Проведено исследование матричных операций криптографического преобразования, которые синтезированы на основе операции суммы по модулю. Показано, как меняются свойства результатов криптографического преобразования в зависимости от выбора значения основы модуля. Согласно полученным результатам, предложены способы и рекомендации по применению матричных операций криптографического преобразования на основе суммы по модулю для шифрования информации.

Keywords: information security, automated systems, cryptographic security methods, group communications, matrix operations, cryptographic primitives, sliding encryption, round key, linear modular equations, logical functions.

Ключевые слова: защита информации, автоматизированные системы, криптографические методы защиты, групповые коммуникации, матричные операции, криптографический примитив, скользящее шифрование, ключ раунда, линейные модульные уравнения, логические функции.

Introduction. The latest information technologies and communications are increasingly being implemented in critical applications. In particular, they are used to ensure the functioning of information processes of government institutions, military and industrial complexes, management structures of energy, transport, financial, banking, business, and other activities. Therefore, the vast majority of world countries, including Ukraine, recognize the protection of information resources from unauthorized use as an important component for realizing national interests. The transition to the digital economy has raised new challenges to ensure the security of financial intermediation [1]. The need to improve the effectiveness of information security measures for financial information is primarily due to the rapid growth of successful cyber-attacks on banking and financial institutions over the past few years, both in Ukraine and in other countries.

The proliferation of information networks and distributed automated systems has contributed to the emergence of a new, multilateral or group, form of communication. In the digital economy, financial intermediation in today's infocommunication space can be attributed to this form of communication. Therefore, the implementation of cryptographic data protection is one of the most important theoretical and practical problems of today.

The development of computer science and computer technology combined with information and telecommunication systems has led to a significant increase of information value. It determines the level of information security. Modern information technologies require high-level security for large amounts of data.

The processes for transmitting, disseminating, storing, processing, and using information must be as fast as possible, least costly, as useful as possible, convenient, automated, and secure at the same time. Thus, increasing the efficiency of cryptographic data protection today is one of the pressing problems of information security.

Literature review. “Symmetric Block Cryptographic Data Conversion Algorithm with Dynamically Controlled Encryption Parameters” and “Block Symmetric Cryptographic Data Conversion

Algorithm with Dynamically Controlled Cryptographic Primitives Stochastic Replacement Process” were presented at the open competition of symmetric block cryptographic algorithms [1]. They first used variable encryption primitives [2]. The main advantage of the proposed solutions is the increase of algorithm cryptographic strength. It is achieved by providing dynamic change in both encryption parameters and cryptographic primitives. However, providing flexible control of encryption process and increasing the number of parameters, including crypto primitives, cause a slowdown in encryption speed. Although this performance loss is negligible, because it is compensated using high-speed hardware.

It is advisable to use this principle of encryption improving for SEP. This can increase the conversion crypto strength. In addition, the basic ways to increase the crypto primitives speed should be considered to ensure their effectiveness.

The papers [3, 4] describe the use of SEPs for symmetric block cryptographic algorithms. In particular, it was proved in [5] that the process of implementing SEP can be paralleled by the use of matrix operations of cryptographic information transformation. In [6, 7] it is proved that matrix operations of cryptographic transformation based on addition modulo can be used to increase crypto strength. The works [8-10] discuss the construction of a mathematical model for performing group matrix cryptographic transformation. The main advantage of its implementation is to increase the speed of cryptographic algorithms.

Therefore, a promising task is to develop methods and recommendations for implementing sliding encryption for a given number of primitive elements based on the use of recursive dependencies.

Formal problem statement. As we know, information security can be done in two ways: restrict access to information by organizational measures, or convert information by the way known only to legitimate users. In today's globalization and digitalization context, information must be transmitted through unsecured communication channels. Therefore, the second method has a clear advantage.

The main characteristics of cryptographic systems are the strength and speed of conversion. Both characteristics need to be permanently increased. This increase should be not less than the increase in productivity of computer facilities.

Considering the success of implementing cryptographic methods of two-way communication security, today the attention of specialists is focused on applying existing and creating new cryptographic algorithms for group communication security. Both theoretical aspects of mathematical improvement of traditional algorithms and practical aspects of development of such software systems are being investigated. At the same time, there are objective obstacles to the widespread practical implementation of software for protecting group information processes. In particular, the problem of resolving the contradiction between providing algorithm cryptographic strength

and its speed remains open. There are also significant difficulties in software implementation of already existing cryptographic algorithms and its related services in a group communication environment.

Therefore, the main task of this work is to improve the efficiency of data cryptographic protection by increasing the speed of information transformation through implementing sliding encryption primitives (SEPs) based on matrix operations of cryptographic transformation.

The use of matrix operations of cryptographic transformation in sliding encryption primitives. The process of implementing the logical SEP can be represented by the structural scheme of information transformation (Fig. 1), where key_1 is a round key element, $input_i$ and $output_i$ is i -th elements of input and output data resp. [5, 11].

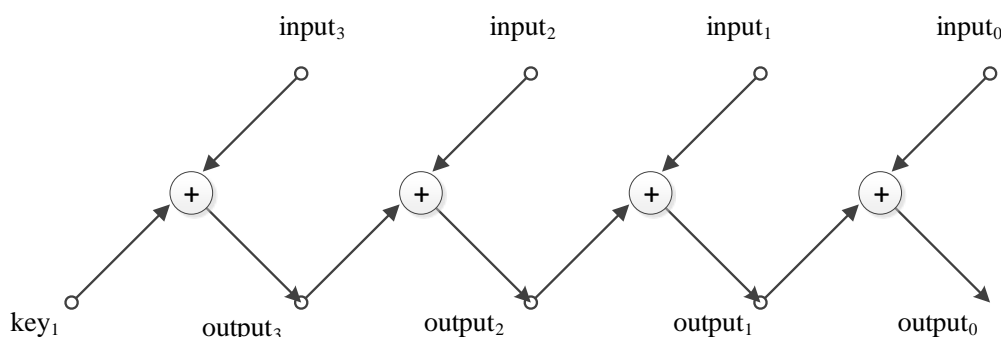


Figure 1. Structural scheme of implementing the direct left-sided SEP

The transformation scheme shown in Figure 1 corresponds to a system of linear modular equations [5, 11]:

$$\begin{aligned} output_3 &= input_3 \oplus key_1; \\ output_2 &= input_2 \oplus output_3; \\ output_1 &= input_1 \oplus output_2; \\ output_0 &= input_0 \oplus output_1. \end{aligned}$$

In the shown sequence of information transforming implemented by SEP, operations are performed bit by bit over each pair of adjacent operands.

The study of sliding encryption multiple primitive made it possible to state the following. The functions for converting sliding encryption elements are represented by recurrent sequences and are special cases from the whole variety of recurrent sequences that can be applied for synthesizing matrix operations of cryptographic transformation [12].

Thus, the function of converting one element of six-fold simplified sliding encryption can be described in a recurrent sequence $q_n = q_{n-8} \oplus input_{n-2} \oplus input_n$ where q_i is element of sequence of six-fold encryption. The six-fold SEP based on this recurrent sequence can be represented as a matrix model [11, 13]:

$$\text{Output} = \left(\begin{array}{l}
 \text{input}_1 \\
 \text{input}_2 \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_3 \\
 \text{input}_2 \oplus \text{input}_4 \\
 \text{input}_3 \oplus \text{input}_5 \\
 \text{input}_4 \oplus \text{input}_6 \\
 \text{input}_5 \oplus \text{input}_7 \\
 \text{input}_6 \oplus \text{input}_8 \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_7 \oplus \text{input}_9 \\
 \text{input}_2 \oplus \text{input}_8 \oplus \text{input}_{10} \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_3 \oplus \text{input}_9 \oplus \text{input}_{11} \\
 \text{input}_2 \oplus \text{input}_4 \oplus \text{input}_{10} \oplus \text{input}_{12} \\
 \text{input}_3 \oplus \text{input}_5 \oplus \text{input}_{11} \oplus \text{input}_{13} \\
 \text{input}_4 \oplus \text{input}_6 \oplus \text{input}_{12} \oplus \text{input}_{14}
 \end{array} \right) \oplus \left(\begin{array}{l}
 \text{key}_1 \oplus \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \oplus \text{key}_4 \oplus \text{key}_5 \oplus \text{key}_6 \\
 \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \oplus \text{key}_5 \\
 \text{key}_1 \oplus \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \oplus \text{key}_6 \\
 \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \\
 \text{key}_4 \oplus \text{key}_5 \oplus \text{key}_6 \\
 \text{key}_5 \\
 \text{key}_6 \\
 0 \\
 \text{key}_1 \oplus \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \oplus \text{key}_4 \oplus \text{key}_5 \oplus \text{key}_6 \\
 \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \oplus \text{key}_5 \\
 \text{key}_1 \oplus \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \oplus \text{key}_6 \\
 \text{key}_2 \oplus \text{key}_3 \\
 \text{key}_4 \oplus \text{key}_5 \oplus \text{key}_6 \\
 \text{key}_5 \\
 \dots
 \end{array} \right),$$

where key_i is a round key elements.

The recurrent sequence that describes the round key processing unit is represented as $key_n = key_{n-8}$ since $key_1 \oplus key_2 \oplus \dots \oplus key_n = key_k$ and round key random elements are formed on the basis of the same algorithm. Consider Shannon's theorem, which proves that reusing the same algorithm does not increase transformation strength. It can then be argued that

reusing round key elements does not increase cryptographic strength.

On this basis, it became possible to optimize the operation of cryptographic transformation of round key processing unit without crypto strength reducing by the following model [11]:

$$\text{Output} = \left(\begin{array}{l}
 \text{input}_1 \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_2 \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_2 \oplus \text{input}_3 \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_2 \oplus \text{input}_3 \oplus \text{input}_4 \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_2 \oplus \text{input}_3 \oplus \text{input}_4 \oplus \text{input}_5 \\
 \dots \\
 \text{input}_1 \oplus \text{input}_2 \oplus \text{input}_3 \oplus \dots \oplus \text{input}_n
 \end{array} \right) \oplus \left(\begin{array}{l}
 \text{key}_1 \\
 \text{key}_2 \\
 \text{key}_3 \\
 \text{key}_4 \\
 \text{key}_5 \\
 \text{key}_6 \\
 \dots \\
 \text{key}_L
 \end{array} \right),$$

where L is a number of rounds.

Thus, the optimized operation compared to the implementation of matrix operation allows increasing: the round key processing speed for the SEP model up to 5 times; the speed of cryptographic conversion operations up to 2 times.

This optimization allows reducing the hardware complexity of SEP implementing by reducing the number of sum modulo 2 operations.

A generalized expression of the recurrent sequence is obtained to describe the multiple direct SEP [14]: $output_i^k = output_{i-1}^k \oplus output_i^{k-1}$ where

$output_0^k = output_d^{k-1}$, $i \in \{1, \dots, d\}$, k is a number of rounds of sliding transformation, and d is the bitness of transformation, and $output_i^j$ is i -th element of output data for j -th round resp.

An effective way to increase the crypto algorithm security is to use multioperational matrix cryptographic primitives. A computational experiment was conducted to simulate two-operand matrix operations suitable for cryptographic transformation. The essence of the experiment was to search operands combinations for synthesizing the matrix operation, which will provide an avalanche effect in information cryptographic transformation. The result is a set of cryptographic transformation operation models.

The analysis of the experimental results made it possible to generalize them with grouping by the type of transformation (Table 1) [15]. The symbol z denotes the presence of permutation, x_i are the input operands.

Analysis of the results of operation simulations showed that these operation sets are mathematical groups up to permutation. These operations can be used, for example, in multiple SEP implementing. Thus, the synthesis of direct SEP may use other synthesized operations instead of sum modulo 2.

Then a generalized recurrent sequence model can be written as $output_i^k = output_{i-1}^k (\nabla) output_i^{k-1}$ where $output_0^k = output_d^{k-1}$, $i \in \{1, \dots, d\}$, ∇ , and (∇) is a two-operand cryptographic operation.

A multiple SEP operation can be changed for any encryption round. Moreover, it can be changed several times in the encryption round.

The number of SEP elements determines the maximum number of round variable operations. Therefore, a generalized recurrent sequence model of multiple SEP with round variable operations can be represented as $output_i^k = output_{i-1}^k (\nabla k_i) output_i^{k-1}$ where $output_0^{k_i} = output_d^{k_i-1}$, $i \in \{1, \dots, d\}$, ∇k_i , and (∇k_i) is a two-operand cryptographic operation to convert the i -th element for the k -th round.

The use of matrix operations of cryptographic transformation makes it possible to parallel the process of implementing SEP.

The use of matrix operations for multiple simplified sliding encryption reduces the number of operations compared to one-time simplified sliding encryption. This gives benefits both in time and in the complexity of implementing primitives.

Table 1

Generalized models of operation groups

Group number		0	1	2	3	Operation model
1	0	a	b	d	c	$O_{1,7,13,19} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 1. \end{cases}$
	1	b	a	c	d	
	2	d	c	a	b	
	3	c	d	b	a	
2	0	a	c	d	b	$O_{2,19,14,7} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \\ x_2 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 1. \end{cases}$
	1	c	d	b	a	
	2	d	b	a	c	
	3	b	a	c	d	
3	0	a	b	c	d	$O_{3,9,19,13} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 1. \end{cases}$
	1	b	a	d	c	
	2	c	d	b	a	
	3	d	c	a	b	
4	0	a	d	b	c	

	1	d	c	a	b
	2	b	a	c	d
	3	c	b	d	a

$$O_{4,13,7,22} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 0, z_2 = 1; \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 0; \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \oplus 1 \end{bmatrix} & \text{if } z_1 = 1, z_2 = 1. \end{cases}$$

Conclusion. On the example of SEP, methods for constructing cryptographic primitives have been improved by applying cryptographic transformation matrix operations. This made it possible to build generalized operation models that implement multiple sliding encryption. Generalized recurrent sequences describing the information conversion functions during multiple sliding encryption are obtained. This made it possible to build algorithms for parallel implementing crypto primitives of multiple sliding encryption of a given number of iterations. These results provided an increase in encryption speed of up to 2 times and strength to linear cryptanalysis when implementing multi-round SEP.

The technology of operations synthesis for multioperational matrix cryptographic primitives is proposed. It uses the table model of crypto conversion operation. The technology is based on the new groups of operations up to permutation of both the input operands and the results of the operation.

The application of the results ensured the operation variability in improving multioperational crypto primitives and increased the strength of crypto algorithms built on their basis.

Thus, in this work a method for protecting information from unauthorized use is proposed. It consists in implementing cryptographic primitives of sliding encryption with optimized structure. These primitives were synthesized using cryptographic transformation matrix operations. Multiple SEP or multioperational matrix cryptographic primitives should be used to increase information security.

References:

1. Announcement of the Organizing Committee for the open competition of crypto algorithms on the termination of the application for participation in the competition. URL: http://www.dsszzi.gov.ua/dsszzi/control/uk/publish/article?art_id=49027&
2. Navrotsky D.O. Methods of constructing symmetric cryptographic ciphers using three-dimensional transformations: dis. Cand. those. Sciences: 05.13.21 - information security systems. Kyiv, 2017. 243 p. URL: https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/25391/4/Dissertation_Navrotskyi.pdf
3. Beletsky A.Y., Beletsky A.A., Navrotsky D.A., et al. Primitive polynomials in cryptographic applications. Modern Information Protection. 2011. No. 4. Pp. 5–18. (in Ukrainian).
4. Beletsky A.Y., Beletsky A.A. Cryptographic primitives based on the sliding coding method. SSU Bulletin. 2006. No. 10. Pp. 33–42. (in Ukrainian).

5. V.G. Babenko. Parallel implementation of sliding encryption. Information processing systems: coll. of sciences. Ave. - Kharkiv: HUP I. Kozheduba. 2013. Iss. 9 (116). Pp. 131-134. URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/11317>. (in Ukrainian).

6. Rudnitsky V.M., Faure E.V., Sysoienko S.V. Evaluation of the quality of pseudorandom sequences based on module addition. Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine, Kiev. 2016. Iss. 3. Pp. 219-221. (in Ukrainian).

7. Faure E.V., Sysoienko S.V. Method for increasing the stability of pseudorandom sequences to linear cryptanalysis. The scientific potential of the present : proceedings of the International Scientific Conference (St. Andrews, Scotland, UK, December 1, 2016) / ed. N. P. Kazmyna. NGO «European Scientific Platform», Vinnytsia. 2016. Pp. 119–122. (in Ukrainian).

8. S.V. Sysoienko, V.G. Babenko, I.V. Myronets. Construction of a generalized mathematical model of group matrix cryptographic transformation. Modern Special Technique: Scientific and Practical Journal, Kyiv: State Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine; NAU; Nat. academy intern. Affairs. 2018. Vip. 4 (55). Pp. 96-103. URL: http://suchasnaspetstehnika.com/journal/ukr/2018_3.pdf. (in Ukrainian).

9. S.V. Sysoienko. Estimation of implementation speed of group matrix cryptographic transformation. Management, navigation and communication systems: coll. of sciences. works, Poltava: Poltava. tech. them. Yuriy Kondratyuk. 2018. Iss. 1 (47). Pp. 141–145. (in Ukrainian).

10. Svitlana Sysoienko, Iryna Myronets, Vira Babenko. Practical Implementation Effectiveness of the Speed Increasing Method of Group Matrix Cryptographic Transformation. Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019), Zaporizhzhia, Ukraine, April 15-19, 2019. CEUR Workshop Proceedings 2353, CEUR-WS.org 2019. Pp. 402 – 412. (Scopus) URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper32.pdf>. (in Ukrainian).

11. V.G. Babenko. Optimization of matrix operations of sliding encryption. Weapons systems and military equipment: Sciences. Journal, Kharkiv: HUPS I. Kozheduba. 2013. No. 4 (36). Pp. 132-135 URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2293>. (in Ukrainian).

12. V.G. Babenko. Use of matrix operations of cryptographic transformation for sliding encryption.

Problems of informatization: Mater. the first international. scientific-technical Conf. abstracts, December 19-20, 2013 Cherkasy: ChSTU; Kiev: DUT; Togliatti: TDU; Poltava: PNTU. 2013. P. 22. (in Ukrainian).

13. V.M. Rudnitsky, E.V. Kozlov, V.G. Babenko. Method for parallel implementation of matrix cryptographic transformation operations. Vector of science of Togliatti State University. 2014. №2 (28). Pp. 11-15. (in Russian).

14. V.G. Babenko, O.G. Melnyk, O.B. Nesterenko. Simulation of sliding encryption primitives based on recurrent sequences. Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kharkov: I. Kozheduba. 2015. Iss. 3 (20). Pp. 129-133. URL: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/13244>. (in Ukrainian).

15. Rudnitsky V.N. Milchevich V.Y. Cryptographic coding. Collective monograph. "Generous Manor Plus" Publishing House, Kharkiv. 2014. 240 p. (in Ukrainian).

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ержанбек Асылбек

*магистр техники и технологии кафедры
профессиональной цифровизации образования,
Казахский университет международных отношений
и мировых языков имени Абылай хана*

Еркан Ташкын

*PhD кафедры профессиональной цифровизации образования,
Казахский университет международных отношений
и мировых языков имени Абылай хана*

Бердыгулова Айнагуль Джумабаевна

*магистр прикладной математики и информатики
кафедры профессиональной цифровизации образования,
Казахский университет международных отношений
и мировых языков имени Абылай хана*

Елеусизова Гулжан Сабитовна

*магистр педагогических наук
кафедры профессиональной цифровизации образования,
Казахский университет международных отношений
и мировых языков имени Абылай хана*

ЭВОЛЮЦИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ И ГЛОБАЛЬНОЕ БУДУЩЕЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ЭПОХУ ЦИФРОВИЗАЦИИ

EVOLUTION OF INNOVATIVE DEVELOPMENT AND GLOBAL THE FUTURE OF EDUCATION IN THE ERA OF DIGITIZATION

Summary. The article is devoted to urgent problems of introducing digital technologies into the education system.

Аннотация. Статья посвящена актуальным проблемам внедрения цифровых технологий в систему образования. Развитие цифровых технологий в сфере образования, актуальностью и поддерживается на государственном уровне и широкой общественностью.

Программа, которая будет реализована в период 2018-2022 годы, обеспечит дополнительный импульс развитию цифровизации в Казахстане. Цифровизация это новая социальная ситуация цифрового разрыва, цифрового гражданства, цифровой социализации. Основные изменения в образовании связаны с цифровизацией образования.

Key words: digital technologies, digitalization, digital education, digitalization and automation, digitalization of educational institutions.

Ключевые слова: цифровые технологии, цифровизация, цифровое образование, цифровизация и автоматизация, цифровизация образовательных учреждений.

Целями государственной программы «Цифровой Казахстан» являются ускорение темпов развития экономики Республики Казахстан и улучшение качества жизни населения за счет использования цифровых технологий в среднесрочной перспективе, а также создание условий для перехода экономики Казахстана на принципиально новую траекторию развития, обеспечивающую создание цифровой экономики будущего в долгосрочной перспективе.

Достижение данной цели подразумевает движение по двум векторам развития:

«Цифровизация существующей ИКТ» - обеспечение прагматичного старта, состоящего из конкретных проектов в реальном секторе, запуск проектов по цифровизации и технологическому перевооружению существующих отраслей экономики, государственных структур и развитие цифровой инфраструктуры.

«Создание цифровой индустрии будущего» - обеспечение долгосрочной устойчивости, запуск цифровой трансформации страны за счет повышения уровня развития человеческого капитала, построения институтов инновационного развития и, в целом, прогрессивного развития цифровой экосистемы.

Пилотный проект цифрового образования - Национальная платформа открытого образования. Он представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из систем дистанционного обучения, телеконференций и вебинаров, образовательных курсов, комплекса проведения онлайн-уроков, объектно-ориентированного программирования, робототехники, 3D-моделирования и печати, удаленной сдачи и приема экзаменов.

Интеграция образовательных курсов и учебных программ поможет заменить

преподавателя в случае его отсутствия либо статья дополнением к материалу, подготовленным учителем, а система дистанционного обучения зафиксировывает активность виртуальной аудитории: сколько чистого времени было потрачено на подачу учебного материала, какова активность аудитории, сколько времени студенты отвечали на поставленные вопросы, кто являлся самым активным и каково количество правильных ответов. Аналитика является настраиваемой.

Цифровые образовательные ресурсы и их виды по представлению и содержанию. Под цифровым образовательным ресурсом понимается информационный источник, содержащий графическую, текстовую, цифровую, речевую, музыкальную, видео, фото и другую информацию, направленный на реализацию целей и задач современного образования. В одном цифровом образовательном ресурсе могут быть выделены информационные или информационно-справочные источники, инструменты создания и обработки информации, управляющие элементы.

Такие же преимущества есть и у преподавателя. В частности, один преподаватель теперь может обучать много людей одновременно. Кроме того, методы отслеживания самостоятельной работы студента в современных системах смешанного обучения позволяют преподавателям принимать вопросы только у тех, кто добросовестно работал самостоятельно. Ведь нередко бывает так, что с вопросами обращаются студенты, которые не пытались решить их самостоятельно. Сюда же можно отнести и проверку контрольных заданий в смешанном обучении проверка может быть автоматически выполнена системами тестирования.

Несмотря на немалые плюсы, у смешанного обучения есть и недостатки, с которыми сталкиваются все звенья системы образования, заинтересованные во внедрении и использовании современных технологий. Это неравномерная ИТ-грамотность, зависимость от техники, широкополосного Интернета, устойчивости онлайн режима и безлимитных тарифов.

Сейчас Казахстан находится на 50-м месте в мире по цифровому развитию, при этом базовая цифровая грамотность населения Казахстана составляет 77%. И чтобы к 2021 году она выросла до 80%, как предусмотрено программой «Цифровой Казахстан», необходимо уже сегодня всем, в том числе и частному сектору, принять активное участие в техподдержке всех звеньев системы образования.

Такое объединение позволит Казахстану достичь общих целей – присоединиться к передовым странам мира, где цифровая эпоха уже наступила, а значит выполнить задачу вхождения Казахстана в число 30 конкурентоспособных стран мира. По мнению Нурсултана Назарбаева, Казахстанцы легко адаптируемы, и надо создавать условия, чтобы компании инвестировали в образование и подготовку своих нынешних и

будущих сотрудников. А система образования страны, в свою очередь, будет стремиться к тому, чтобы цифровая эпоха у нас наступила как можно скорее, чтобы добиться преимущества в условиях глобальной конкуренции.

Программа, которая будет реализована в период 2018-2022 годы, обеспечит дополнительный импульс для технологической модернизации флагманских отраслей страны и сформирует условия для масштабного и долгосрочного роста производительности труда.

Пять основных направлений реализации Программы:

1. «Цифровизация отраслей экономики» - направление преобразования традиционных отраслей экономики Республики Казахстан с использованием прорывных технологий и возможностей, которые повысят производительность труда и приведут к росту капитализации.

2. «Переход на цифровое государство» - направление преобразования функций государства как инфраструктуры предоставления услуг населению и бизнесу, превосходящая его потребности.

3. «Реализация цифрового Шелкового пути» - направление развития высокоскоростной и защищенной инфраструктуры передачи, хранения и обработки данных.

4. «Развитие человеческого капитала» - направление преобразований, охватывающее создание так называемого креативного общества для обеспечения перехода к новым реалиям - экономике знаний.

5. «Создание инновационной экосистемы» - направление создания условий для развития технологического предпринимательства и инноваций с устойчивыми горизонтальными связями между бизнесом, научной сферой и государством. Государство выступит в роли катализатора экосистемы, способного генерировать, адаптировать и внедрять в производство инновации.

В рамках указанных пяти направлений сформированы 17 инициатив и более 100 мероприятий, возврат от реализации которых можно увидеть уже в ближайшие годы в явной форме, а также мероприятий, которые формируют основы формирования цифрового сектора как новой отрасли экономики будущего, основной результат от которых придется на следующие десятилетия.

Цифровизация и автоматизация рабочих мест постоянно требуют новых, более совершенных навыков. Потому работодатели требуют, чтобы вузы предоставляли больше возможностей их сотрудникам в доступе к образовательным программам. Университетам следует принять ряд мер по развитию цифровых технологий, а не только запускать онлайн-курсы. К ним относятся: цифровое преподавание и поддержка обучающихся и мониторинговых систем; масштабное

и повсеместное онлайн-образование, охватывающее большую аудиторию по всему миру; функциональные аккредитация и экзаменационные процедуры; проведение исследований с помощью цифровых технологий, поиск и анализ данных посредством цифровых инструментов, цифровые коммуникации, полная транспарентность.

Цифровизация должна быть неотъемлемой частью инфраструктуры университета. Важно иметь удобную технологичную среду для исследовательской деятельности, цифровые лаборатории, повсеместный легкий и быстрый доступ к Wi Fi, беспроводные зарядные станции, центры обработки данных, «умные» и «зеленые» здания.

Цифровизация деятельности государственных органов. Данной программой поставлены амбициозные цели по цифровизации деятельности госорганов. Для реализации этих целей будет создана инфраструктура поддержки в виде адаптированного законодательства, мер поддержки бизнеса, образования и науки, упрощения процедур ведения бизнеса, сокращения транзакционных издержек при взаимодействии с государством. Более того, государство будет предвосхищать потребности своих граждан в получении услуг, максимально высвобождая время для производительного труда и стимулирования экономически активного поведения.

Электронное правительство. На предыдущем этапе информатизации государство создало «Электронное Правительство» Республики Казахстан в виде базовой инфраструктуры и информационных систем государственных органов, прямо или косвенно задействованных в оказании государственных услуг.

Одновременно с развитием сетей широкополосного доступа, преобразованиями в информационно-коммуникационной инфраструктуре, переводом бизнес-процессов хозяйствующих субъектов в «онлайн» среду и автоматизацией технологических процессов в промышленности, энергетике, банковской деятельности и сфере ИКТ-услуг необходимо одновременно проводить продуманную и последовательную политику обеспечения безопасности информационного пространства и инфраструктуры связи.

Основные проблемы и угрозы безопасности в сфере использования ИКТ, влияющие на эффективность процессов цифровизации экономики Казахстана, меры по их преодолению нашли отражение в Концепции кибербезопасности «Киберщит Казахстана» и предусматривают использование доверенных технологий обеспечения целостности, конфиденциальности, доступности информации и аутентификации пользователей при ее обработке.

Эффективная реализация мероприятий по цифровизации экономики Республики Казахстан будет обеспечена только при обеспечении

единства, устойчивости и безопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры, сохранности данных и доверии граждан к процессам, в основе которых лежат решения, основанные на использовании ИКТ. Основное движение предполагается по двум направлениям: движение по двум векторам развития – цифровизация существующей экономики, то есть обеспечение прагматичного старта, состоящего из конкретных проектов в реальном секторе, запуск проектов по цифровизации и технологическому перевооружению существующих отраслей экономики, государственных структур и развитие цифровой инфраструктуры.

Второе направление – это создание цифровой индустрии будущего – обеспечение долгосрочной устойчивости, запуск цифровой трансформации страны за счет повышения уровня развития человеческого капитала, построения институтов инновационного развития и в целом прогрессивного развития цифровой экосистемы.

Пять ключевых направлений: в основе этой концепции пять основных направлений, а именно цифровизация отраслей экономики – преобразование традиционных отраслей экономики с использованием прорывных технологий и возможностей, которые повысят производительность труда и приведут к росту капитализации.

Развитие электронных услуг.

Переход на цифровое государство – направление преобразования функций государства как инфраструктуры предоставления услуг населению и бизнесу, предвосхищая его потребности.

Реализация цифрового Шелкового пути – то есть развитие высокоскоростной и защищенной инфраструктуры передачи, хранения и обработки данных. Развитие человеческого капитала – направление преобразований, охватывающее создание так называемого креативного общества для обеспечения перехода к новым реалиям – экономике знаний.

Создание инновационной экосистемы – это создание условий для развития технологического предпринимательства и инноваций с устойчивыми горизонтальными связями между бизнесом, научной сферой и государством. Государство выступит в роли катализатора экосистемы, способного генерировать, адаптировать и внедрять в производство инновации.

Цифровизация деятельности государственных органов. Данной программой поставлены амбициозные цели по цифровизации деятельности госорганов. Для реализации этих целей будет создана инфраструктура поддержки в виде адаптированного законодательства, мер поддержки бизнеса, образования и науки, упрощения процедур ведения бизнеса, сокращения транзакционных издержек при взаимодействии с государством. Более того, государство будет предвосхищать

потребности своих граждан в получении услуг, максимально высвобождая время для производительного труда и стимулирования экономически активного поведения.

Обеспечение информационной безопасности в сфере ИКТ. Включение Казахстана в мировую систему информатики и телекоммуникаций уже повлекло многократное увеличение объектов информационно-коммуникационной инфраструктуры в государственном управлении, бизнесе, системах управления промышленными объектами, расширило сферы оказания услуг ИКТ операторами, обрабатывающими персональные данные граждан.

Усилия по цифровизации приводят к созданию нового общества, где активно развивается человеческий капитал - знания и навыки будущего воспитываются с самых юных лет, повышаются эффективность и скорость работы бизнеса за счет автоматизации и других новых технологий, а диалог граждан со своими государствами становится простым и открытым. Цифровая революция происходит у нас на глазах.

Сегодня Интернет экономика растет с темпами до 25% в год в развивающихся странах, при этом ни один сектор экономики не может даже приблизиться к таким темпам. 90% всех глобальных данных были созданы всего за 2 последних года. Уже 35 млрд. устройств подключены к интернету и осуществляют обмен данными - эта цифра в пять раз превышает общую численность населения мира. Но, вместе с этим Правительства и корпорации тратят почти полтриллиона долларов США ежегодно на противодействие новому, получившему широкое распространение явлению - кибератакам.

Эти изменения вызваны внедрением за последние годы множества технологических инноваций, применяемых в разных отраслях. Кардинальным образом меняются способы производства и получения добавленной стоимости, появляются новые требования к образованию и трудовым навыкам людей. Промышленный интернет вещей формирует будущее производственных отраслей, используя возможности гибкого и умного производства, обеспечивает революционный рост производительности.

Искусственный интеллект внедряется, в том числе, в консервативных отраслях, таких как финансовые услуги и медицина. Технология 3D-печати уже сегодня способствует трансформации таких отраслей, как авиация, логистика, биомедицина и автомобильная промышленность. Процесс цифровизации сегодня затрагивает практически все страны мира. В то же время, каждая страна сама определяет приоритеты цифрового развития. Более 15 стран мира реализуют на текущий момент национальные программы цифровизации.

Включение Казахстана в мировую систему информатики и телекоммуникаций уже повлекло многократное увеличение объектов информационно-коммуникационной инфраструктуры в государственном управлении, бизнесе, системах управления промышленными объектами, расширило сферы оказания услуг ИКТ операторами, обрабатывающими персональные данные граждан.

В последние годы происходит резкий рост угроз информационной безопасности, направленных как на государственные информационные системы, так и на банковский и промышленный сектора.

«Информационный Казахстан-2020», в качестве фундамента для цифровой трансформации экономики страны данная программа способствовала развитию следующих факторов: перехода к информационному обществу, совершенствованию государственного управления, созданию институтов «открытого и мобильного правительства», росту доступности информационной инфраструктуры не только для корпоративных структур, но и для граждан страны.

Однако стремительное развитие ИТ в глобальных масштабах диктует свои правила и требует адекватной и своевременной реакции.

Список литературы:

1. Послание Президента Республики Казахстан Н. Назарбаева народу Казахстана «Новые возможности развития в условиях Четвертой промышленной революции» // Казахстанская правда. 10 января 2018 г.
2. Юмашев Ф. Цифровизация - ключевой фактор развития АПК // Казахстанская правда. 13 февраля 2018 г.

#5(57), 2020 część 3
Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe
(Warszawa, Polska)
Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

Rada naukowa

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

#5(57), 2020 part 3
East European Scientific Journal
(Warsaw, Poland)
The journal is registered and published in Poland. The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor in chief - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

The scientific council

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Redaktor naczelny - Adam Barczuk

1000 kopii.

Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warszawa, Polska»

Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe

Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001
Warszawa, Polska

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Editor in chief - Adam Barczuk

1000 copies.

Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland»

East European Scientific Journal

Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw,
Poland

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com>