

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя С. Фундаментальныя навукі

У серыі С навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне інфарматыкі і матэматыкі, фізікі.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия С. Фундаментальные науки

В серии С научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области информатики и математики, физики.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series C. Fundamental sciences

Series C includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in computer science and mathematics, physics.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:

Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: Д.О.Глухов.

Редактор С.Е. Рясова.

Подписано к печати 29.01.2020. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.

Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 12,89. Тираж 100 экз. Заказ 026.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 534.784: 621.391

ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРИЗНАКОВ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

канд. техн. наук, доц. **И.Б. БУРАЧЁНОК**,
д-р техн. наук, проф. **В.К. ЖЕЛЕЗНЯК**
(Полоцкий государственный университет)

Приведены результаты исследования обнаружения первичных признаков речевого сигнала различными методами на базе гласных фонем мужских голосов средней продолжительностью около 0,25 с в условиях зашумления. Разброс вычисленных значений частоты основного тона рассмотренными методами составил $\pm 1,37\%$. Самую низкую относительную погрешность оценки – 0,38%, имеет метод на основе вейвлет-преобразования с использованием в качестве материнского комплексного вейвлета Морле. Относительная погрешность оценки основного тона автокорреляционным методом составила 0,43%. Данный метод предлагается использовать для дальнейших исследований так как он имеет менее сложный алгоритм реализации и не требует больших вычислительных затрат.

Ключевые слова: речевой сигнал, форманты, основной тон, первичные признаки речевого сигнала, тонкая структура речевого сигнала, маскирующие шумы.

Введение. Обнаружение слабых сигналов в шумах – это задача, которая имеет отношение ко многим системам связи, в том числе и к системам защиты речевой информации от утечки по техническим каналам. Выделение первичных признаков речевого сигнала, таких как период (или частота) основного тона (ОТ) F_0 , Гц, и формант F_1, \dots, F_n , Гц, является необходимым критерием для определения наличия речи в шумах [1].

Из анализа известных методов оценки частоты ОТ (амплитудные методы, основанные на амплитудной селекции; спектральные методы, основанные на частотной селекции; многоканальный пиковый [2]; метод выделения ОТ на основе параллельной обработки [3]; методы на основе кепстрального анализа [3]; автокорреляционные методы [4]; методы на основе линейного предсказания [4]; методы на основе вейвлет-преобразования [5]; метод на основе полигармонической математической модели [6] и др.) следует, что существующие методы определения частоты ОТ исследованы в нормальных условиях и мало исследованы в условиях воздействующих шумов [7]. Поэтому возникла необходимость в проведении дополнительных исследований методов оценки ОТ и первичных признаков элементов речевого сигнала в шумах.

Целью работы является определение метода, повышающего точность оценки информационных признаков речевого сигнала в условиях шумов.

Решаемые задачи:

1. Определение факта присутствия речевого сигнала в анализируемой смеси сигнала и маскирующего его шума выделением частоты основного тона.
2. Определение формант для получения информации об основных характеристиках речевого сигнала и дополнительной информации, характеризующей индивидуальные признаки говорящего.

Спектр речевого сигнала и фонемы русской речи. Энергетический спектр речевого сигнала, представляющий собой область частот, в которой сосредоточена его основная энергия, определяют выражением

$$\beta = 10 \log_{10} \left(\frac{G^2(f)}{G_0^2} \right) \Delta f ,$$

где $G^2(f)$ – спектральная плотность среднего квадрата звукового давления;

G_0 – порог слышимости, или минимальное звуковое давление на частотах 600...800 Гц, которое начинает ощущаться человеком с нормальным слухом;

$\Delta f = 1$ Гц [9].

В таблице 1 представлены характеристики полос равной разборчивости (с одинаковой вероятностью появления формант в каждой из них) при разбиении спектра речевого сигнала. Выделены критические частотные полосы разборчивости: третья как самая узкая и двадцатая как самая широкая.

Таблица 1. – Разбиение спектра речевого сигнала на двадцать полос равной разборчивости

N_k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Границы ($f_1 - f_2$), Гц	100- 420	420- 570	570- 710	710- 865	865- 1030	1030- 1220	1220- 1410	1410- 1600	1600- 1780	1780- 1960
Центральная частота f_0 , Гц	260	495	640	788	946	1125	1315	1505	1690	1870
Ширина $2\Delta f$, Гц	320	150	140	155	165	190	190	190	180	180

Окончание таблицы 1

N_k	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Границы ($f_1 - f_2$), Гц	1960- 2140	2140- 2320	2320- 2550	2550- 2900	2900- 3300	3300- 3660	3660- 4050	4050- 5010	5010- 7250	7250- 10000
Центральная частота f_0 , Гц	2050	2230	2435	2725	3100	3480	3855	4530	6130	8625
Ширина $2\Delta f$, Гц	180	180	230	350	400	360	390	960	2240	2750

Несмотря на то, что речь представляет собой широкополосный процесс, частотный спектр которого сосредоточен в диапазоне от 50...100 Гц до 8000...10000 Гц [8], частоты диапазона 300–3500 Гц приняты МСЭ-Т (Международный союз электросвязи – стандарты, определяющие порядок функционирования и взаимодействия сетей электросвязи) в качестве границ эффективного спектра речи, так как качество речи при ограничении спектра в указанном диапазоне получается вполне удовлетворительным. Согласно исследованиям, представленным в [8], в полосе частот 300–3400 Гц сохраняется удовлетворительная натуральность звучания и слоговая разборчивость составляет около 90%, разборчивость фраз – более 99%.

Звуки русской речи разделяют на гласные и согласные. В русском языке насчитывается 41 звук. Принято выделять 6 гласных (а, о, у, э, и, ы). Гласные звуки составляют примерно 43,5%, а согласные – 56,5% от общего числа звуков, при этом невокализованные звуки составляют 32%. Все гласные звуки являются вокализованными [2; 9; 10].

Гласные звуки речи имеют в среднем длительность около 0,15 с, согласные – около 0,08 с. Для различных людей диапазон звукового давления речевых сигналов достигает 60 дБ. Уровень речи отдельного человека может изменяться в пределах 20–30 дБ. Нормальная речь соответствует акустической мощности 10 мкВт, а шепот – 10^{-3} мкВт [10]. Гласные звуки в среднем имеют мощность 650–700 мкВт, самые слабые согласные – 0,65...0,7 мкВт [10]. Поэтому для обнаружения признаков речевого сигнала традиционно используют алгоритмы, основанные, как правило, на определении характеристик гласных звуков.

В таблице 2 представлены статистические данные вероятности появления звуков в русской речи.

Таблица 2. – Вероятность появления звука в русской речи

Звук русской речи	Вероятность появления в речи	Звук русской речи	Вероятность появления в речи	Звук русской речи	Вероятность появления в речи
О	0,078	Н	0,0476	Г	0,0168
А	0,0713	Р	0,0465	Б	0,0120
Е	0,0626	В	0,0418	Ь	0,0119
И	0,0460	С	0,0398	Й	0,0111
У	0,0226	Т	0,0387	З	0,0104
Я	0,0152	Л	0,0361	Ж	0,0061
Ы	0,0091	К	0,0349	Ц	0,0051
		М	0,0240	Х	0,0049
Пробел/(пауза)	0,17	Д	0,0238	Ф	0,0035
		П	0,0210	Щ	0,0012

Исходя из данных, представленных в таблице 2, в русской речи наиболее часто встречаются гласные звуки «о» и «а», поэтому основные исследования проводились на базе этих гласных фонем мужских и женских голосов средней продолжительностью около 0,25 с (дополнительно рассматривались и некоторые согласные фонемы – «г» и «х» длительностью около 0,10 с) в условиях зашумления при различных отношениях сигнал/шум.

Особенности обнаружения информационных признаков речевого сигнала. Звуки речи являются сложными звуками, так как в процессе речеобразования возникают резонансные явления, собственные частоты которых изменяются в зависимости от произнесенного звука. Дискретные спектры, создаваемые голосовым источником, в первом приближении являются чисто гармоническими. Сформированные звонкие звуки (гласные и согласные) представляют собой *квазипериодическую последовательность треугольной формы*. Импульсы, создаваемые голосовыми связками, кроме основной составляющей содержат большое число гармоник (более 40) [2], причем их амплитуды убывают с увеличением частоты со скоростью приблизительно 12 дБ/октава [8]. Уровень интенсивности гармоник плавно уменьшается с увеличением частоты, т.е. с увеличением их порядкового номера.

По спектральному составу звуки речи различаются числом формант и их расположением в частотном спектре [9]. Отдельным звукам речи может соответствовать до 6 формант, из которых только одна (две) являются определяющими – основными. Под формантой понимают упорядоченную пару значения локального максимума амплитуды и частоты, на котором он достигается [9]. Так как из гласных звуков наибольшей акустической мощностью обладает гласный звук «а», то дальнейшие исследования проводились с использованием данного звука.

На рисунке 1 построена спектрограмма ударного изолированного звука «а», произнесенного мужским голосом. Самые темные области соответствуют локальным максимумам амплитуды и частоты – основным формантам. Вычисленные параметры сигнала: частота основного тона $F_0 = 119$ Гц (мужской голос от 80 до 210 Гц, женский от 150 до 320 Гц); частота первой форманты $F_1 = 601$ Гц; частота второй форманты $F_2 = 1198$ Гц.

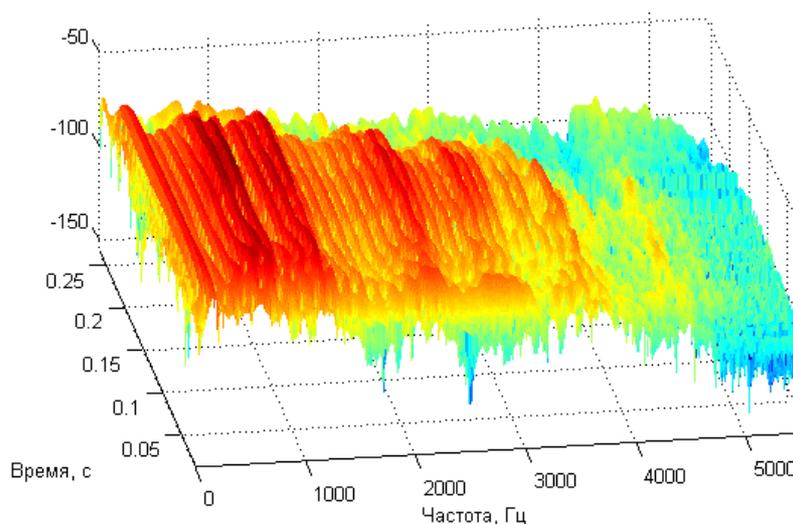


Рисунок 1. – Спектрограмма звука «а»

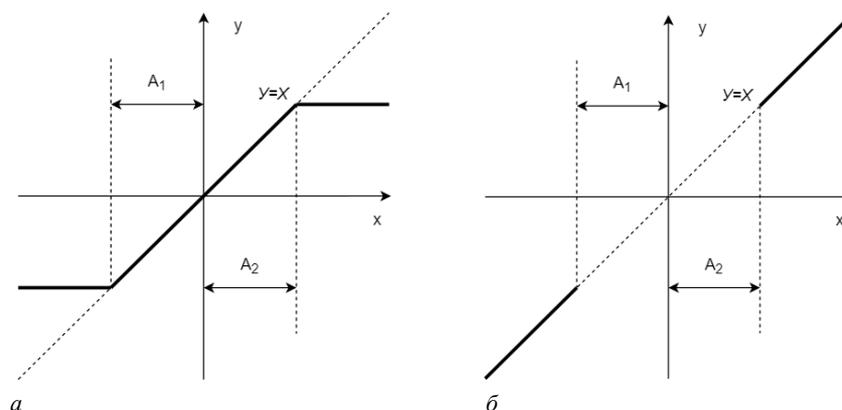
Для узнавания звука важны первые два частотных усиления (или первые две форманты F_1 и F_2). Формант больше, чем две, но именно форманты F_1 и F_2 отвечают за лингвистическую суть любого звука [9]. Если исключить из передачи любую из основных формант, то передаваемый звук исказится.

Спектр звонких звуков в основном расположен в нижней полосе частот (300–3500 Гц) речевого сигнала и сгруппирован вокруг формант, причем скорость изменений формант такова, что спектр остается практически постоянным на промежутках менее 16 мс [10]. Согласно исследованиям основной формантный состав гласных звуков русской речи сосредоточен на следующих частотах: звук «у» – 200...600 Гц, звук «о» – 400...800 Гц, звук «а» – 1000...1400 Гц, звук «и» – 2800...4200 Гц, звук «ы» – 200...600 Гц и 1500...2300 Гц, звук «э» – 600...1000 Гц и 1600...2500 Гц.

Следует отметить и тот факт, что частота импульсов ОТ человеческой речи лежит в пределах от 50–80 Гц (очень низкий голос – бас) до 200–250 Гц (женские и детские голоса) [10]. При произнесении конкретным человеком она непрерывно изменяется (обычно немногим более октавы) в соответствии с ударением, акцентированием звуков и слов, а также их эмоциональной окраской (восклицание, удивление и т.п.). Изменение частоты ОТ называется интонацией. У каждого человека своя интонация, что позволяет идентифицировать говорящего.

В качестве воздействующих факторов применялись белый гауссов шум с распределением по амплитуде и шум ХИП (хаотическая импульсная последовательность) [7]. Также частота ОТ и разборчивость

фоном оценивались при различных уровнях амплитудного ограничения (порогах отсечек) сигнала: клиппировании и центральном ограничении. Клиппирование – ограничение сигнала по амплитуде, т.е. представление речевого сигнала в виде последовательности биполярных прямоугольных импульсов (рисунок 2, а). Центральное ограничение речи – искажение переходов через ноль речевого сигнала (рисунок 2, б).



а – ограничение по амплитуде; б – центральное ограничение

Рисунок 2. – Типовые нелинейные искажения воспроизводимой речи

Применялось и частотное ограничение спектра до 3500 Гц (целесообразность выбора описана ранее), так как в этом диапазоне расположено подавляющее большинство основных формант звуков речи. Ограничение спектра речевого сигнала позволило получить достаточное качество речи и значительно снизить уровень шума в полосе речевого сигнала. Следует заметить, что качество речи по каналу связи характеризуется рядом факторов: уровнем громкости, не требующим напряжения слуха и голоса; естественным звучанием голоса и низким уровнем помех; достаточной разборчивостью. Безусловно, эти факторы имеют субъективный характер и лишь определяют основные требования к физическим характеристикам речевого сигнала для обнаружения его на фоне шумов.

Исследование первичных признаков речевого сигнала различными методами

Информация об ОТ речевого сигнала очень важна для анализа и синтеза речи, поэтому в первую очередь осуществим анализ существующих методов определения ОТ в условиях шумов.

Метод амплитудной селекции. Как правило, известные методы селекции сводятся к выделению сигналов из шумов путем использования возможных отличий их параметров, таких как несущая частота, ширина спектра, амплитуда, фаза, поляризация и др. Различают частотную, временную, амплитудную, фазовую, поляризационную и пространственную селекции, а также их комбинации.

В результате проведенных исследований методом, основанным на амплитудной селекции с использованием расстановки меток в точках максимальных значений квазипериодических участков сигнала, можно сделать вывод, что несмотря на то, что данный метод прост в реализации и не требует больших вычислительных ресурсов, результаты его оценки имеют весьма низкую точность и устойчивость даже при небольших уровнях шума. При амплитудном методе в условиях шумов высока вероятность пропуска максимума и неверного определения частоты ОТ.

Спектральный метод. Наиболее известные методы анализа звуков речи основываются на спектральной модели стационарного сигнала

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt ,$$

где $s(t)$ – массив временных значений речевого сигнала;

$\omega = 2\pi / T_c = 2\pi f_0$ – круговая частота;

t – время.

Как известно, в большинстве языков основная речевая информация (смысловое содержание) передается посредством согласных звуков, а основным недостатком спектрального метода является именно отсутствие характеристик для шумовых составляющих в произносимых согласных звуках.

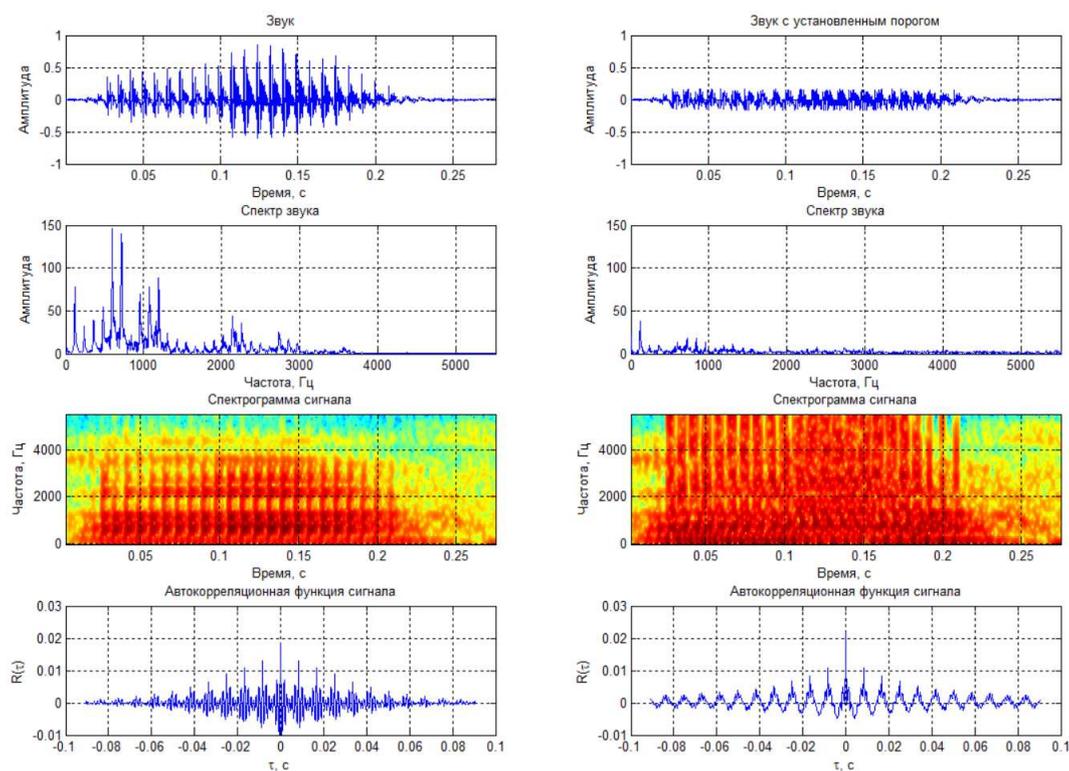
Исследования спектрального метода, основанного на использовании расстановок меток в точках максимальных значений квазипериодических участков частоты, показали, что данный метод имеет самую низкую точность оценки. Поиск максимума необходимо производить в интервале 50–350 Гц, однако в указанной полосе частот часто находится и вторая гармоника, иногда даже с большей энергией, и в этом случае она может быть ошибочно принята за частоту ОТ.

Наилучшее представление о частотно-временной структуре речевого сигнала дает его двумерное или трехмерное изображение (см. рисунок 1). Способы визуализации могут быть различными. Двумерное представление (сонограмма) в осях время–частота позволяет получить картину видимой речи. При этом в процессе произнесения фонемы оттенками цвета изображается перераспределение энергии речевого сигнала между различными частотными полосами. Трехмерное изображение спектра на осях время–частота–амплитуда позволяет осуществить его вращение, что значительно повышает информативность цифрового спектрального анализа.

Автокорреляционный метод. Для анализа речевого сигнала автокорреляционным методом использовалась кратковременная автокорреляционная функция (АКФ):

$$A_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s(t-\tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t-\tau) s(t) dt = A_s(-\tau) .$$

АКФ представляет собой функцию скалярного произведения сигнала и его копии, сдвинутой на интервал τ , при $-\infty < \tau < \infty$, однако с учетом четности вычисление АКФ чаще производится только для положительных значений τ . Это обычно используют на практике, когда сигналы задаются на интервале положительных значений аргументов от 0 до T , что дает возможность продления интервала нулевыми значениями, если это необходимо для математических операций. В этих границах вычислений более удобным является сдвиг копии сигнала влево по оси аргументов. Для вокализованных фонем АКФ имеет четкий максимум в районе задержек, равный периоду OT . На рисунке 3 показаны возможности оценки основного тона амплитудным, спектральным и автокорреляционным методами, а также совместное использование амплитудного и спектрального методов при построении сонограммы.



а

б

а – исходные характеристики сигнала;

б – характеристики сигнала, искаженного установлением порога отсечки

Рисунок 3. – Пример искаженного сигнала с установлением порога отсечки

Для повышения точности оценки значений частоты основного тона гласных звуков определим экстремумы АКФ-сигнала, используя математический метод. Найдем производную данной функции с целью определения положения точек, в которых данная производная равна нулю (рисунок 4, а):

$$\frac{\partial R_s(\tau, 0)}{\partial \tau} = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \frac{\partial}{\partial \tau} [s_1^*(t-\tau)] dt .$$

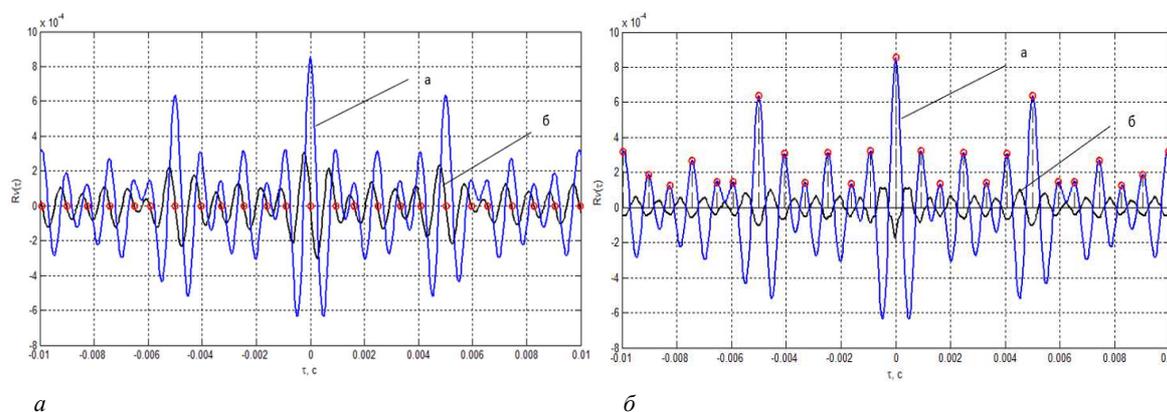
На рисунке 4, а показаны графики функций $R_v(\tau, 0)$ и $\frac{\partial R_v(\tau, 0)}{\partial \tau}$, показывающие, что нули производной АКФ соответствуют ее экстремумам. В точке максимального совпадения производная от АКФ имеет S-образную форму, пересекающую нулевой уровень.

Далее определяем, какие из найденных точек являются точками минимума, а какие – максимума. Тип экстремума (максимум или минимум) определяется знаком второй производной в этой точке. Для этого находим значения второй производной согласно выражению

$$\frac{\partial^2 R_v(\tau, 0)}{\partial \tau^2} = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} [s_1^*(t - \tau)] dt$$

и определяем ее знак.

На рисунке 4, б показаны графики функций $R_v(\tau, 0)$ и $\frac{\partial^2 R_v(\tau, 0)}{\partial \tau^2}$. Расстояние между двумя максимумами есть время основного тона, обратная величина которого равна частоте основного тона.



**а – совместное отображение АКФ и ее первой производной речевого сигнала:
а – АКФ, б – первая производная от АКФ;
б – совместное отображение АКФ и ее второй производной речевого сигнала:
а –АКФ, б – вторая производная от АКФ**

Рисунок 4. – Демонстрация процесса повышения точности оценки основного тона автокорреляционным методом

При различных уровнях амплитудного ограничения сигнала речи (порогах отсечек) – клиппировании – согласные звуки произносятся с шипением, что снижает их разборчивость, также ухудшается разборчивость и гласных звуков. При порогах отсечки сигнала выше 35–40% данный расчет не представляется возможным. При центральном амплитудном ограничении сигнала речи (нулевой отсечке) происходят самые существенные изменения сигнала: «сбедаются» некоторые звуки, голос становится более высоким, появляются хрипы, повышается уровень шумов. Относительная погрешность оценки основного тона автокорреляционным методом составила 0,43%.

Кепстральный метод. Разработанный Р.В. Шафером и Л.Р. Рабинером метод кепстрального анализа основан на вычислении и анализе кепстра – обратного преобразования Фурье логарифма спектра мощности сигнала [3]:

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln |S(\omega)|^2 e^{iq\omega} d\omega,$$

где $S(\omega)$ – спектр сигнала.

Одной из особенностей данного метода является усиление влияния низкочастотных компонент шума за счет операции логарифмирования спектра. Наличие выброса в кепстре в диапазоне 3–20 мс очень точно указывает на то, что данный сегмент является вокализованным. Наилучший результат этот метод дает при оценке вокализованных звуков [3]. Однако работа ведется в нереальном масштабе времени, а для повышения точности оценки необходимо применять временные окна и операции сглаживания. Следовательно, из-за невысокой стойкости к шумам и вычислительной сложности кепстральный подход не позволяет получить хорошие результаты для решения задач выделения ОТ в шумах.

Метод линейного предсказания. Применение линейного предсказания LPC (Linear Predictive Coding) описано в работах Итакура и Санто, Атан и Ханауэр [4]. Дж.Д. Маркел для автоматического оценивания формантных траекторий с использованием линейного предсказания предложил упрощенную процедуру. Оценку спектра сигнала на выходе линейного тракта с неизвестными параметрами можно представить выражением [3]

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} a_k z^{-k}}$$

или соответствующим разностным уравнением

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i x(n-i) - \sum_{k=0}^{M-1} a_k y(n-k),$$

где на некоторую линейную модель системы с передаточной функцией $H(z)$ воздействует сигнал возбуждения $x(n)$, а на ее выходе формируется сигнал $y(n)$.

Применение линейного предсказания открывает широкие возможности в области компрессии речевых данных. Однако в наших условиях при частотах ОТ выше 200 Гц данный метод оценки приводит к плохим результатам.

Метод на основе вейвлет-преобразования. Это относительно новый, развивающийся метод оценки частоты ОТ при использовании амплитудной вейвлет-функции

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a > 0,$$

где a – масштаб;

b – сдвиг;

ψ – базисная функция.

Речевой сигнал (РС) – это нестационарный процесс, в котором информативным является сам факт изменения его частотно-временных характеристик. Для выполнения анализа таких процессов требуются специальные базисные функции, имеющие способность одновременно выявлять в анализируемом сигнале как его частотные, так и временные характеристики. Другими словами, сами функции должны обладать свойствами частотно-временной локализации. Вейвлет-преобразование имеет эти свойства, а также ряд существенных преимуществ при выполнении высокоточного анализа сложных нестационарных сигналов.

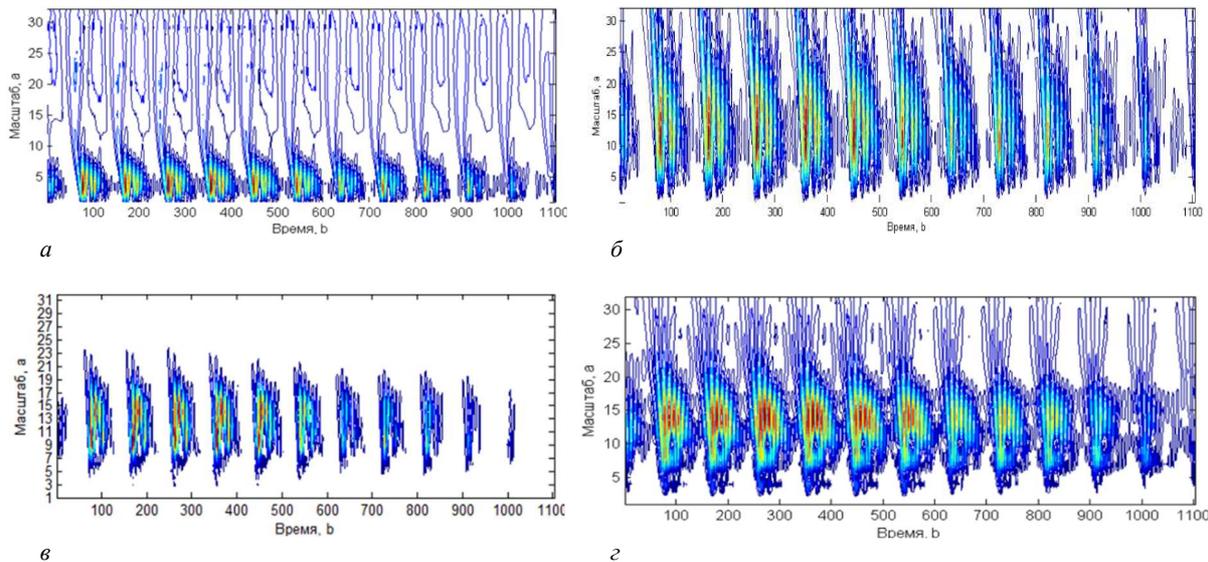
Для исследований был выбран участок сигнала длительностью 0,1 с, где присутствует наибольшая интенсивность звука и сосредоточены основные форманты F_1 и F_2 . Исследуемый фрагмент гласного звука «а» представим временным рядом со значениями функции, следующими друг за другом с постоянным интервалом времени Δt : $s_k = s(t_k)$, $t_k = \Delta t k$, $k = 0, 1, \dots, N-1$. Интервал временного окна, где процесс можно считать квазистационарным, определим равным $\Delta t \leq 20$ мс.

Оценка локального спектра энергии (анализ распределения энергии по частотно-временной шкале) осуществлялась на основании построения скалограммы, которая для дискретного сигнала может быть записана как $S(a_i, b_j) = |W_A(a_i, b_j)|^2$, в трехмерном пространстве координат (a, b, S) и представления в виде топологической карты при изображении поверхности $S(a, b)$ в координатах (a, b) .

Скалограммы заданного участка фонемы «а» (см. рисунок 1), представляющие масштабное распределение энергии сигнала, где по оси времени отложена величина сдвига вейвлет-функции – b , по оси ординат – масштаб a , с использованием различных вейвлетов при одинаковых значениях масштабных коэффициентов представлены на рисунке 5. Рассмотрены вейвлеты: «мексиканская шляпа» (см. рисунок 5, а); гауссова типа (см. рисунок 5, б); Мейера (см. рисунок 5, в) и комплексный вейвлет Морле (см. рисунок 5, г). Применение комплексного вейвлета Морле в качестве материнского при одних тех же значениях масштабных коэффициентов a и b обладает большей детализацией и информативностью.

В работе [11] показана возможность получения тонкой структуры речевого сигнала в случае применения комплексного вейвлета Морле. Изображение его вейвлет-скалограммы выявляет наличие разномасштабной периодичности, содержащейся в анализируемых зависимостях, показывая наличие появившихся частотных составляющих, не соответствующих собственным частотам рассматриваемого РС. Комплексный вейвлет Морле также имеет близкое сходство с речевыми фрагментами (подобен импульсным составляющим нестационарных сигналов) и обладает лучшей по сравнению с другими базисами частотной локализацией, он имеет более узкий Фурье-образ и продолжителен во временной области. Присутствие доминирующей частоты позволяет варьировать его избирательностью в частотной области [12]. Из рисунка 5

следует, что гармоники основного тона остаются устойчивыми на протяжении всего временного промежутка, в то время как выявленные гармоники высших порядков со временем затухают.



***a* – вейвлет «мексиканская шляпа»; *б* – вейвлет гауссова типа; *в* – вейвлет Мейера; *з* – комплексный вейвлет Морле**

Рисунок 5. – Примеры скалограмм звука «а», полученных с использованием различных материнских вейвлетов при одинаково заданных значениях масштабных коэффициентах *a* и *b*

Можно отсечь влияние контуров, выделив те точки скалограммы, в которых она имеет максимумы (локальные экстремумы) по переменным *a* и *b*, построив так называемый скелетон (skeleton) (рисунок 6), выявляющий структуру анализируемого сигнала

$$S_c(a_i, b_j) = \begin{cases} S_{ij}, & \text{если } S_{i-1,j} < S_{i,j} > S_{i+1,j} \\ & \text{или } S_{i,j-1} < S_{i,j} > S_{i,j+1} \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Увеличим масштаб скелетона исследуемой фонемы «а» (см. рисунок 5, з). Его фрагмент представлен на рисунке 6.

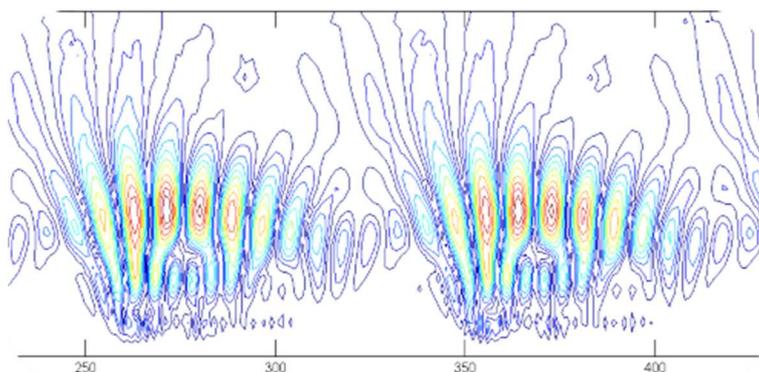
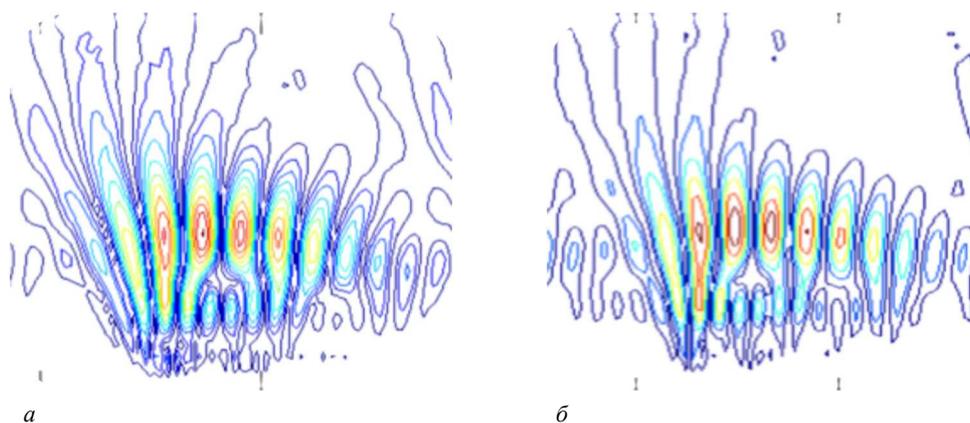


Рисунок 6. – Фрагмент скелетона фонемы «а» (два рядом идущих скейла), полученный с использованием комплексного вейвлета Морле

Построение изолиний (изоуровней) позволяет получать картины линий локальных экстремумов, тем самым, четко визуализировать структуру анализируемого процесса, а также отслеживать изменения интенсивности амплитуд вейвлет-преобразования на разных масштабах и во времени. Цветовая гамма наглядно демонстрирует зависимость интенсивности от изменения вейвлет-коэффициента *S*. На рисунке 6 темно-красные изолинии соответствуют положительным, а темно-синие – отрицательным значениям $W(a, b)$. Ясно, что значение амплитуды вейвлет-преобразования в точке (a_0, b_0) тем больше (по абсолютной величине),

чем сильнее корреляция между вейвлетом данного масштаба и поведением сигнала в окрестности $t = b_0$. Картина коэффициентов демонстрирует, что процесс составляют компоненты разных масштабов: экстремумы $W(a, b)$ наблюдаются на разных масштабах, интенсивность их меняется и со временем, и с масштабом.

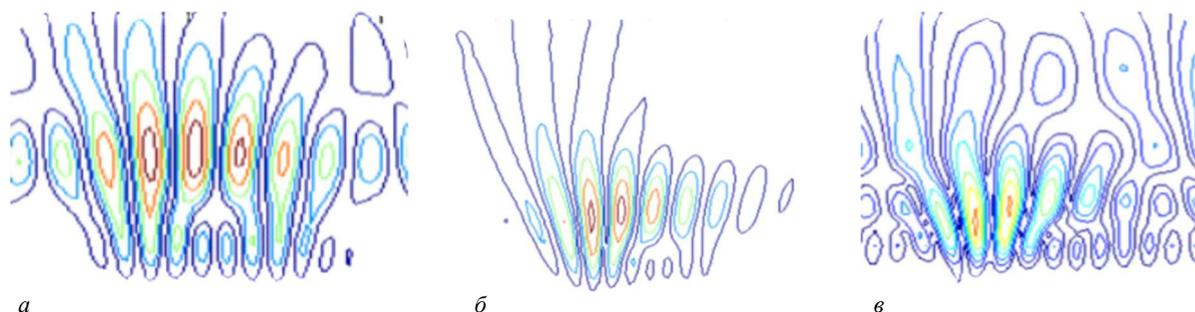
На рисунке 7 показаны фрагменты скелетонів фонемы «а», произнесенной одним человеком в разных условиях. Визуальное сходство представленных фрагментов демонстрирует возможность осуществления идентификации дикторов для фонограмм, записанных в каналах с высоким уровнем помех и искажений, а также фонограмм с произвольной устной речью дикторов, находящихся в различных психофизиологических состояниях.



а – отдельно произнесенный ударный звук; **б** – вырезанный звук из слова «барабан»

Рисунок 7. – Фрагмент фонемы «а», произнесенной одним человеком в разных условиях

На рисунке 8 приведены фрагменты фонемы «а», произнесенной разными людьми (мужские голоса) с различной частотой основного тона F_0 в одинаковых условиях.



а – $F_0 = 111$ Гц; **б** – $F_0 = 96$ Гц; **в** – $F_0 = 152$ Гц

Рисунок 8. – Фрагмент фонемы «а», произнесенной разными людьми (мужские голоса) с различной частотой основного тона F_0 в одинаковых условиях

Представленные фрагменты фонемы «а» (см. рисунок 8) демонстрируют наличие отличительных особенностей тонкой структуры отдельно взятого звука речи.

Огромным преимуществом метода на основе вейвлет-преобразования перед всеми рассмотренными методами является то, что применение данного вида анализа позволяет выделить индивидуальные признаки говорящего и проводить фоноскопическую экспертизу фонем речи на предмет идентификации по голосу, а также выявлять признаки монтажа или иных изменений, вносимых в аудиозапись. Однако несмотря на то, что у данного метода самая низкая относительная погрешность оценки ОТ (0,38%), он имеет сложный алгоритм и требует больших вычислительных затрат.

Дискретно-квантованное представление речевых сигналов. В отличие от непрерывного исходного сигнала его дискретное представление позволяет осуществить передачу на большие расстояния при высокой скорости и качестве передаваемого сигнала. Погрешность восстановления исходного сигнала зависит от вида исходной функции; процесса квантования, связанного с округлением значений непрерывного сигнала; интервала квантования и алгоритма восстановления. Квантование сигналов по амплитуде позволяет эффективно подавлять помехи, если только среднее квадратическое значение помех мало по сравнению с разностью между дискретными уровнями [13].

По результатам исследований установлено, что отношение сигнал/шум принятого сигнала существенно зависит от шага квантования. Разряд квантователя заметно влияет и на качество речи. Например, при использовании 7-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – квантующего устройства – заметных изменений не происходит, наблюдается лишь появление незначительного шума, однако если мы берем 4-разрядный квантователь, то речь по-прежнему остается разборчивой, но уже сопровождается треском, а при обработке 3-разрядным квантователем разобрать речь практически невозможно.

Следует заметить и то, что чем меньше интервал дискретизации (чем выше частота дискретизации), тем точнее отображается исходная функция (форма восстановленного сигнала приближается к оригиналу), и тем меньше ошибки квантования по времени. Однако не следует забывать, что при этом увеличивается количество обрабатываемой информации, что требует увеличения как объема памяти, так и быстродействия устройства обработки информации. На практике частота дискретизации выбирается исходя из теоремы Котельникова и для речевого сигнала составляет не менее 8 кГц, поэтому в дальнейших исследованиях для передачи сигналов рекомендуется использование 7 бит, или числа уровней квантования $2^7 = 128$ (шаг квантования – 7,8 мВ), частоты дискретизации $F_d = 192$ кГц (период дискретизации – 5,2 мкс) посредством применения универсального АЦП/ЦАП LCard E14-440D (14 бит, 400 кГц, для подключения 16 дифференциальных каналов или 32 с «общей землей») с интерфейсом USB 2.0. Диапазон входных значений находится в пределах от –10 до 10 В. Разрешение двоичного АЦП по напряжению составляет $(10 - (-10)) / 16384 = 20 / 16384 = 0,00122$ В = 1,22 мВ. Эффективная разрядность – 13,2 бит. Ошибка квантования $1 / 16384 = 6,1 \times 10^{-5} = 0,0061\%$. Используемый АЦП/ЦАП удобен для создания портативных измерительных систем на базе ноутбука, так как не требует дополнительного источника питания.

Заключение. При разговоре, во время перехода от гласных звуков к согласным и наоборот, частота ОТ меняется в значительных пределах. Среднее квадратическое отклонение частоты ОТ, произнесенного одним человеком, для мужского и женского голосов соответственно равно 17 и 27 Гц. Разброс вычисленных значений частоты ОТ рассмотренными методами составил $\pm 1,37\%$ [1].

На основании обработки экспериментальных данных наилучшие результаты оценки ОТ при внесении искажений в сигнал различными отсечками – клипшированием и нулевой отсечкой, а также в условиях шумов получены автокорреляционным методом, позволяющим оценить периодичность сигнала в зависимости от его задержки. Данный метод не требует больших вычислительных ресурсов, позволяет наиболее точно определить частоту ОТ (относительная погрешность оценки 0,43%) произнесенных фонем при различных уровнях амплитудного ограничения сигналов и обнаруживает речевой сигнал даже на фоне мощных шумов.

Применение вейвлет-преобразования позволяет проводить оценку скейлинговых параметров сигналов и с высокой точностью определять значение частоты ОТ (относительная погрешность оценки не превышает 0,38%). Выбор комплексного вейвлета Морле в качестве материнского и результаты анализа экспериментальных исследований параметров гласных звуков, полученные с помощью данного вейвлет-преобразования, позволят в дальнейшем в силу масштабирующих свойств вейвлетного базиса, обеспечивающего связь между частотным и временным разрешением, гибко управлять настройкой параметров вейвлета для получения тонкой структуры сигнала конкретного диктора в реальном масштабе времени, а также решать задачи очистки сигнала от шума при цифровой обработке сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бураченок, И.Б. Оценка тонкой структуры информационных признаков речевого сигнала / И.Б. Бураченок, В.К. Железняк // Современные средства связи : материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–16 окт. 2013 г. / Белорус. гос. акад. связи; редкол.: А.О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2013. – С. 184–186.
2. Михайлов, В.Г. Измерение параметров речи / В.Г. Михайлов, Л.В. Златоустова ; под ред. М.А. Сапожкова. – М. : Радио и связь, 1987 – 168 с.
3. Rabiner, L.R. Digital processing of speech signals / Lawrence R. Rabiner, Ronald W. Schafer. – New Jersey : Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, 1978. – 512 p.
4. Markel, J.D. Linear Prediction of Speech, Springer-Verlag / J.D. Markel, A.H. Gray, Jr. – New York, 1976.
5. Рассказова, С.И. Метод формантного анализа на основе вейвлет-преобразования в системах распознавания речи / С.И. Рассказова, А.И. Власов // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы: сб. тр. IX Науч.-техн. конф. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – С. 38–43.
6. Голубинский, А.Н. Расчет частоты основного тона речевого сигнала на основе полигармонической математической модели / А.Н. Голубинский. // Вестн. Воронеж. ин-та МВД России. – 2009. – № 1. – С. 81–90.
7. Бураченок, И.Б. Обнаружение измерительных сигналов в маскирующих шумах высокого уровня / И.Б. Бураченок, В.К. Железняк, А.Г. Филиппович // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2018. – № 4. – С. 2–9.
8. Гитлиц, М.В. Теоретические основы многоканальной связи : учеб. пособие для вузов связи / М.В. Гитлиц, А.Ю. Лев – М. : Радио и связь, 1985. – 248 с.
9. Фланаган, Дж. Анализ, синтез и восприятие речи / Дж. Фланаган ; пер. с англ. под ред. А.А. Пирогова. – М. : Связь, 1968. – 396 с.

10. Стопцов Н.А. Связь под водой : справочное пособие / Н.А. Стопцов, В.И. Бойцов, В.Н. Шелемин. – Л. : Судостроение, 1990. – 248 с.
11. Бураченок, И.Б. Анализ вейвлет-преобразованием тонкой структуры гласных звуков речевого сигнала / И.Б. Бураченок, В.К. Железняк // Теоретические и прикладные аспекты информационной безопасности : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 19 июня 2014 г. / Акад. М-ва внутр. дел Респ. Беларусь ; редкол.: В.Б. Шабанов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 124–128.
12. Бураченок, И.Б. Вейвлет преобразования при оценке защищенности речевого сигнала в условиях наличия шумов [Электронный ресурс] / И.Б. Бураченок, В.К. Железняк // Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) : электрон. сб. ст. I Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2018. – 383 с. – С. 323–327. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
13. Шелухин, О.И. Цифровая обработка и передача речи / Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф. ; под ред. О.И. Шелухина. – М. : Радио и связь, 2000. – 456 с.
14. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. – М. : Мир, – Т. 1.– 1976. – 520 с.
15. Передача информации в подвижных системах связи / В.Ю. Бабков [и др.]. – СПб. : СПбГУТ, 1999. – 152 с.

Поступила 27.08.2020

DETECTION OF PRIMARY SIGNS OF A SPEECH SIGNAL

I. BURACHONAK, V. ZHELEZNYAK

The results of a study of the detection of primary signs of a speech signal by various methods based on vowel phonemes of male voices with an average duration of about 0.25 s in noisy conditions are presented. The spread of the calculated values of the pitch frequency discussed methods was $\pm 1,37\%$. The method based on the wavelet transform with the use of the complex Morlet wavelet as the parent has the lowest relative estimation error – 0.38%. Relative error autocorrelation pitch estimation method was 0.43%. This method is proposed to be used for further research as it has a less complex implementation algorithm and does not require large computational costs.

Keywords: *speech signal, formants, pitch frequency, primary signs of a speech signal, the fine structure of the speech signal, masking noise.*

УДК 004.931

КЛИЕНТ-СЕРВЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И МОНИТОРИНГА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЛЮДЕЙ В ПОМЕЩЕНИЯХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИДЕОДАННЫХ

*канд. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ, И.Ю. ЗАХАРОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Разработаны алгоритмическое и программное обеспечение для идентификации и сопровождения множества людей в помещениях на основе анализа последовательностей изображений, получаемых со стационарных камер видеонаблюдения. Процедуры обнаружения и сопровождения людей используют сверточные нейронные сети. Особенностью алгоритма сопровождения является применение результатов идентификации по лицам для правильного установления соответствия на кадрах между людьми при их идентичных внешних характеристиках. Составной дескриптор изображения каждого человека включает признаки лиц, вычисленные на основе сверточной нейронной сети, и комплекс признаков изображения человека, что позволяет сопровождать людей при невозможности идентификации лиц. Программная реализация применяет библиотеку OpenCV для традиционных операций обработки изображений. Для основных процедур предложенной алгоритмической обработки используется программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений, реализованная на GPU Nvidia по технологии CUDA. Такой подход позволяет обеспечить работу в режиме реального времени, если на кадре до пяти человек, при реализации на видеокарте NVIDIA GTX 1060, CPU Intel i7 – 5820k. Выходными данными являются обработанные последовательности изображений с координатами обнаруженного или сопровождаемого человека и его индексом, а также общее количество людей в кадре. Тестирование разработанной клиент-серверной системы выполнено с использованием персонального компьютера и мобильных устройств под управлением операционных систем Android и iOS.

Ключевые слова: *идентификация людей, сопровождение, сверточные нейронные сети, CUDA, система «Умный дом».*

Введение. Для видеонаблюдения внутри помещений перспективно использование пространственно-распределенных систем, которые предполагают применение IP-камер. Использование автоматизированного анализа видеоданных в рамках системы «Умный дом» позволит обеспечить быстрый и надежный контроль нежелательного вторжения в жилище посторонних людей, поведения несовершеннолетних, состояния пожилых людей и др.

Обнаружение и сопровождение множества людей в помещении осложняется рядом факторов: низким уровнем освещенности; неоднородным задним фоном, фрагменты которого могут быть схожи по форме, текстуре и цвету с изображениями людей; наличием теней и, соответственно, изменяющимся задним фоном; множественными перекрытиями людей между собой и другими объектами в помещении; высокой схожестью признаков разных сопровождаемых людей; достаточно быстрым движением людей и в ряде случаев изменяющимся ускорением и нелинейной трансформацией траектории движения. Задача сопровождения множества людей заключается в определении местоположения выделенных объектов на текущем кадре видеопоследовательности относительно предыдущего, что позволит построить индивидуальные траектории их движения.

Для сопровождения людей применяются методы на основе сравнения признаков изображений людей и лиц. В первой группе методов в настоящее время наиболее результативным является сопровождение через обнаружение. Этот подход использует ансамбль из детектора объектов и алгоритма для объединения результатов обнаружений на двух кадрах. Эффективное решение проблемы объединения позволяет корректно соотносить результаты обнаружения различных объектов и формировать устойчивые траектории движения для каждого из них. В настоящее время широкое развитие и применение для обнаружения объектов получили алгоритмы классификации с применением сверточных нейронных сетей (СНС) [1–3], которые достаточно устойчивы к изменениям освещенности, динамическому заднему фону и позволяют осуществлять детектирование даже в случае частичных перекрытий, что также обеспечивает повышение качества сопровождения. Однако, при схожести признаков людей, сложных траекториях движения результативность их работы значительно уменьшается.

Целью работы является создание алгоритмического и программного обеспечения для обнаружения, идентификации и сопровождения множества людей в помещениях с возможностью их практической работы в режиме реального времени на современных вычислительных средствах.

1. Алгоритмическое обеспечение. Для обнаружения, идентификации и сопровождения людей разработан алгоритм, который основан на использовании СНС для всех основных задач и состоит из следующих основных этапов:

- обнаружение людей;
- формирование вектора признаков для каждого;

- обнаружение и распознавание лица в детектированной на предыдущем этапе области изображения;
- идентификация человека по лицу;
- установление соответствия между людьми на кадрах;
- индексация людей;
- определение видимости на кадре;
- выделение рамкой человека при его присутствии в кадре.

Общая схема работы алгоритма представлена на рисунке 1.

Для обеспечения обработки в режиме реального времени на первом этапе (обнаружение людей) необходимо применять быстродействующую СНС, которая также должна отличаться высокой точностью. Среди существующих СНС предъявляемым требованиям удовлетворяет модель YOLO v4 [4], обученная на базе данных MS COCO. Далее для областей кадра, в которых обнаружены люди, формируются признаки при помощи модифицированной модели СНС, состоящей из 29 сверточных слоев и формирующей 128 признаков. После выделения признаков проводится сопоставление информации об уже имеющихся (сопровождаемых) объектах с информацией, полученной от детектора. С этой целью сравниваются признаки для последних n верных обнаружений объекта, после чего формируется матрица соответствий, которая поступает на вход венгерского алгоритма.

Далее следует поиск лиц в сопровождаемых областях. Выделение области поиска лица выполняется на основе анализа размеров детектированного фрагмента. Если его ширина меньше его высоты более чем в три раза, то анализируется только верхняя часть этого фрагмента, иначе анализируется вся область, описывающая человека. Для обнаружения областей, содержащих лица, применяется мультизадачная трехкаскадная СНС MTCNN [5]. Для данной модели на базе данных Wider Face [6] достигается точность 82% правильных обнаружений и при этом обеспечивается уменьшение вычислительных затрат более чем в два раза по сравнению с моделью детектора лиц RetinaFace [7], которая использует архитектуру ResNet100 для достижения точности 92%.

Полученная на предыдущем шаге область кадра, содержащая лицо, поступает для распознавания. Для этого этапа применяется СНС MobileFaceNet с размером входного слоя 112×112 пикселей, которая характеризуется значительно меньшими вычислительными затратами и обеспечивает при этом высокую точность работы (например, на базе данных LFW точность составляет 99,5%, а для СНС LResNet100E-IR – 99,77% [8]). Архитектура MobileFaceNetwork формирует вектор из 128 признаков для лица человека. Затем выполняется идентификация лица путем вычисления расстояний между выделенными признаками на текущем кадре и признаками лиц в базе данных. Среди вычисленных расстояний выбирается минимальное, и если оно больше заданной пороговой величины, то результат распознавания принимается верным. При правильном распознавании лица из базы данных признаки изображения лица, расстояние и имя человека обновляются в составном дескрипторе. В случае пересечения людей в обрабатываемой области может быть обнаружено несколько лиц, которые принадлежат разным сопровождаемым объектам. Поэтому, если значение величины пересечения над объединением (IoU) для лиц больше заданного значения, выполняется оценка схожести между вычисленными СНС-признаками лиц и признаками из составных дескрипторов сопровождаемых людей, максимальная схожесть среди которых определяет соответствие лица сопровождаемому объекту.

Если лицо не распознано с использованием базы данных, то выполняется сравнение признаков обнаруженного лица с соответствующими данными составного дескриптора, который включает:

- координаты центра области человека на кадре при предыдущем его обнаружении;
- ширину и высоту области человека на кадре при предыдущем его обнаружении;
- координаты центра области лица на кадре при предыдущем его обнаружении;
- ширину и высоту области лица на кадре при предыдущем его обнаружении;
- СНС-признаки для последнего верного распознавания лица сопровождаемого объекта (f_{rec}^{FCNN});
- расстояние между вычисленными признаками и признаками изображения лица из базы данных;
- число непрерывных результатов обнаружения лица при отсутствии распознавания;
- СНС-признаки всей фигуры человека при последнем правильном обнаружении ($f_{det}^{FullPCNN}$);
- СНС-признаки верхней половины фигуры человека при последнем правильном обнаружении ($f_{det}^{TopPCNN}$);
- гистограммные признаки человека при последнем правильном обнаружении;
- индекс человека в видеопоследовательности;
- имя человека.

В случаях невозможности обнаружения или распознавания лиц сопровождение выполняется на основе алгоритма, включающего оценку наличия всей фигуры человека, формирование СНС-признаков для всей области и для верхней ее части и их накопление, формирование пространственных признаков и фильтрацию

по расстоянию и размерам, вычисление схожести между всеми сопровождаемыми и обнаруженными на текущем кадре объектами и установление соответствия между ними, индексацию и именование людей, определение их видимости на кадре, выделение рамкой человека при его присутствии в кадре [9].

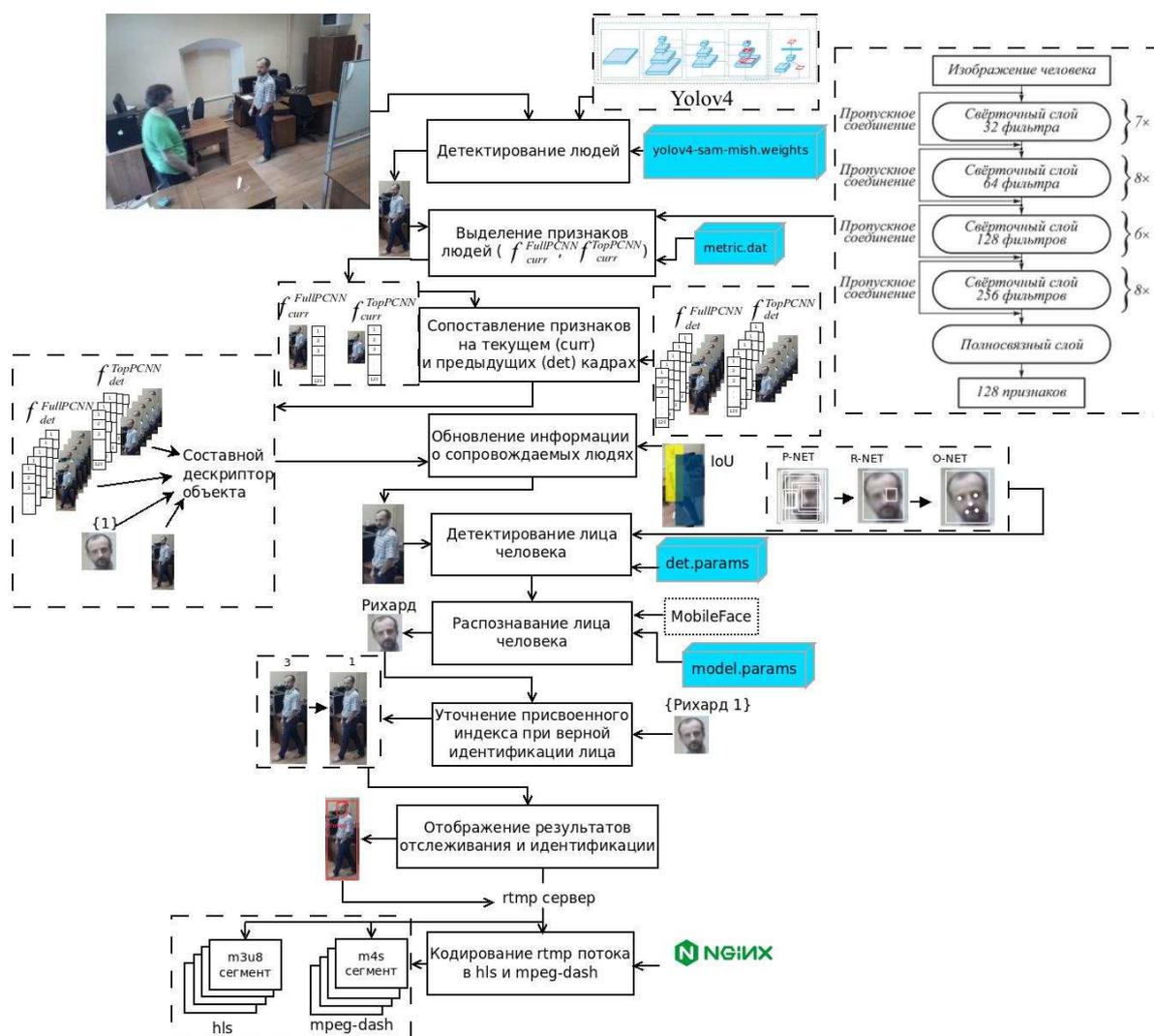


Рисунок 1. – Общая схема работы алгоритма

При движении в помещении человек может зайти за объект фона, соответственно признаки будут вычислены для верхней части его фигуры. Поэтому СНС-признаки вычисляются для всей фигуры человека и для ее верхней половины, если ширина выделенного объекта меньше его высоты, иначе принимается решение, что полученные СНС-признаки характеризуют верхнюю часть фигуры.

В результате расчета расстояний для всех сопровождаемых людей на предыдущих кадрах и обнаруженных объектов на входном кадре формируется матрица схожести, к которой применяется венгерский алгоритм, решающий задачу о назначениях, благодаря чему обнаруженному человеку на текущем кадре присваивается имя или индекс сопровождаемого. Для уточнения результатов идентификации формируется словарь, который состоит из имени человека и индекса, под которым это имя впервые было присвоено объекту. Посредством такого уточнения алгоритм сопровождения восстанавливает верный индекс человека, даже если он отсутствовал в кадре продолжительное время, не затрачивая при этом большого количества памяти.

2. Описание программной реализации модуля. С учетом специфики использования программного модуля обнаружения, распознавания и сопровождения людей к приложению были сформированы следующие требования:

- работа в режиме реального времени;
- минимизация передаваемого трафика по каналам связи;
- кроссплатформенность;

- обеспечение стабильной работы при сбоях в сети передачи данных;
- возможность подключения большого числа клиентов к видеоданным, формируемым камерой наблюдения.

Для получения видеоданных используется IP видеокamera, обработка выполняется на сервере, к которому может подключиться клиент с использованием мобильного устройства или персонального компьютера, т.е. используется централизованная архитектура системы видеонаблюдения.

Видеокamera формирует поток, для передачи которого используется протокол, обеспечивающий минимальную задержку при передаче данных. Программная реализация алгоритма использует OpenCV для захвата видеопотока, извлечения кадров, изменения его размера, кадрирования, отображения текста и графических фигур. Программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений применяется для всех операций на основе СНС, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность благодаря использованию GPU Nvidia с технологией CUDA. Ее составной частью является ускоренная на GPU библиотека примитивов для сверточных нейронных сетей cuDNN, имеющая свободное распространение и доступная зарегистрированным на NVIDIA разработчикам.

В программной реализации выделены три этапа: обнаружение людей на видеопотоке, отслеживание обнаруженных людей, идентификация отслеживаемых людей по лицам. Для этапа обнаружения используется достаточно быстрый и точный фреймворк машинного обучения, написанный на языке C, Darknet. Данный фреймворк позволяет реализовать СНС Yolov4, которая осуществляет детектирование объектов заданных классов на уровне, сравнимом с GoogleNet-Inceptionv4, затрачивая при этом на свою работу меньше вычислительных мощностей компьютера. При реализации отслеживания также использована библиотека с открытым исходным кодом для алгоритмов машинного обучения Dlib, характеризующаяся возможностью реализации СНС разной структуры и назначения. Для последующей идентификации отслеживаемых людей по лицу была использована библиотека машинного обучения MxNet.

Передача обработанного видеопотока осуществляется через http-сервер nginx, который осуществляет передачу медиаданных значительно быстрее по сравнению с apache, обладает широким набором модулей для упрощения процесса разработки и на основе которого реализованы многие высоконагруженные системы (например, Яндекс, Mail.Ru, ВКонтакте). На мобильные устройства поток передается в формате hls, а на персональный компьютер – в формате mpeg-dash.

Система реализована на основе объектно-ориентированного подхода, каждый модуль приложения является классом. Класс «Детектор» осуществляет обнаружение людей на изображении, использует метод для загрузки структуры СНС, принимающий в качестве входных данных тензор весовых коэффициентов и структуру СНС, и метод для детектирования людей, использующий в качестве входных данных текущий кадр видеопоследовательности, а в качестве выходных – координаты обнаруженных областей с людьми. Для управления составными дескрипторами объектов реализован модуль, главный метод которого в качестве входных данных принимает координаты обнаруженных людей и текущий кадр, а в качестве выходных данных формируются составные дескрипторы для каждого отслеживаемого объекта.

Управляющий класс является надстройкой над несколькими классами, которые предназначены для заполнения и обновления составных дескрипторов при сопровождении объектов. Среди них класс для выделения признаков из областей изображения, в которых содержится человек с методами для загрузки весов СНС и преобразования областей изображений в набор признаков по заданному алгоритму.

Реализован класс для имплементации венгерского алгоритма. Его главный метод осуществляет решение задачи о назначении областей, обнаруженных детектором, к уже существующим отслеживаемым объектам. На вход метода поступает матрица схожести между областями, обнаруженными детектором, и уже существующими отслеживаемыми объектами. В качестве выходных данных формируется вектор, в котором каждому объекту назначен индекс обнаруженного детектором объекта.

Для идентификации людей реализован класс обнаружения и идентификации лиц со следующими методами: для загрузки СНС-моделей; для детектирования лица человека (в качестве выходных данных формирует координаты лица человека и положение особых точек для обнаруженного лица); для построения признаков лица; для формирования базы данных (в качестве выходных данных формируется словарь соответствий идентификации лица, который выдает из базы данных имя максимально похожего лица и степень соответствия).

3. Результаты тестирования. Тестирование разработанного модуля выполнено с использованием персонального компьютера и мобильных устройств под управлением ОС Android и iOS. Серверная часть системы реализована на компьютере с видеокартой NVIDIA GTX 1060, CPU Intel i7 – 5820k, RAM 32Gb. Проверка работы программного обеспечения выполнена в браузере Mozilla Firefox на персональном компьютере под управлением ОС Ubuntu (рисунок 2).

Для мобильных устройств под управлением iOS тестирование проведено с использованием iPhone SE в браузере Safari; подключение к серверу с адресом 192.168.43.218, что подтверждается рисунком 3, а (из него видно, что воспроизведение ведется по ссылке <http://192.168.43.218/hls/stream.m3u8>). Браузер Safari

автоматически отображает плеер, в котором имеется возможность воспроизведения видео в полноэкранном режиме. Для мобильных устройств под управлением Android тестирование выполнено с использованием Samsung Galaxy S9 в браузере устройства. Воспроизведение ведется по ссылке <http://192.168.43.218/hls/stream.m3u8> (рисунок 3, б).

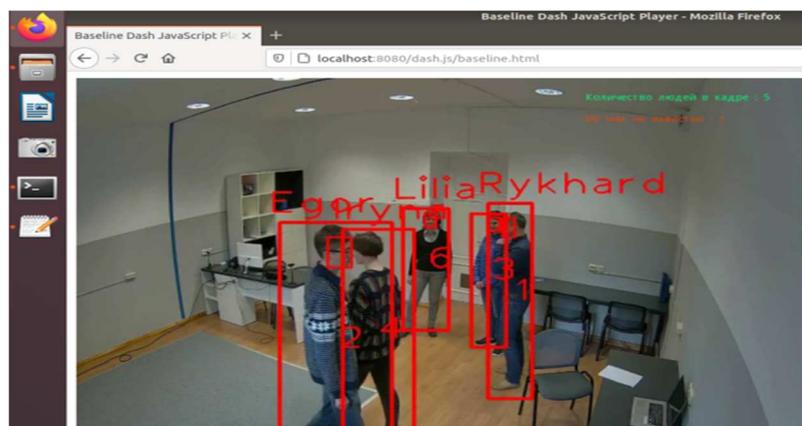
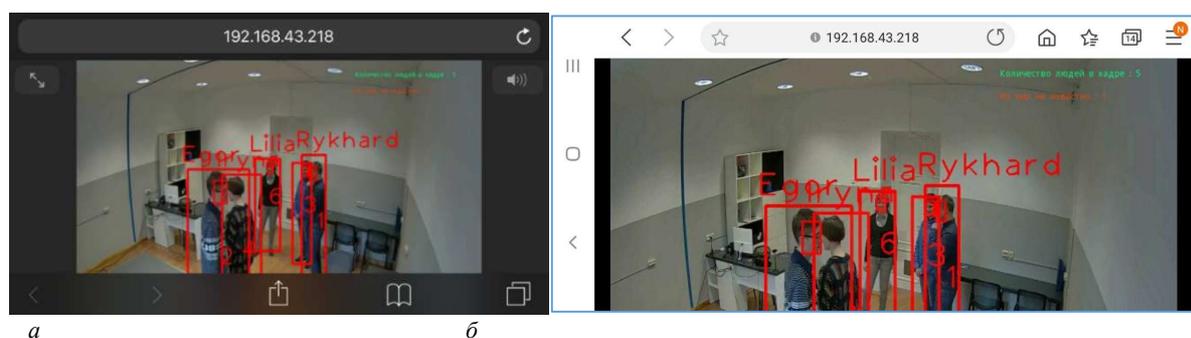


Рисунок 2. – Отображение результатов работы алгоритма на персональном компьютере



а

б

а – iPhone SE; б – Samsung Galaxy S9

Рисунок 3. – Отображение результатов работы на мобильных устройствах

Из рисунков 2, 3 видно, что в кадре одновременно находятся 5 человек, из них один изначально не был зафиксирован в базе данных, и ему соответствует индекс «3» без имени. Остальные объекты, имена и лица которых присутствовали в базе данных, верно идентифицированы и сопровождаются на кадре и в случае без возможности распознавания лица (например, Игуна).

Заключение. Для обнаружения, идентификации и сопровождения множества людей в помещениях на основе анализа видеопоследовательностей разработаны алгоритмы на основе сверточных нейронных сетей и выполнена их программная реализация. Библиотека OpenCV применяется для традиционных операций обработки изображений, а для наиболее ресурсоемких процедур алгоритмической обработки используется программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений по технологии CUDA. Такой подход позволил обеспечить работу в режиме реального времени, если на кадре до пяти человек, при реализации на видеокарте NVIDIA GTX 1060, CPU Intel i7 – 5820k. Тестирование разработанной клиент-серверной системы выполнено с использованием персонального компьютера и мобильных устройств под управлением операционных систем Android и iOS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chahyati, D. Tracking People by Detection Using CNN Features / D. Chahyati, M.I. Fanany, A.M. Arymurthy // In Proceedings of the 4th Information Systems International Conference (ISICO 2017). – 2017. – P. 167–172.
2. Wojke, N. Simple online and realtime tracking with a deep association metric / N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus // In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – 2017. – P. 3645–3649.
3. Bohush, R. Robust Person Tracking Algorithm Based on Convolutional Neural Network for Indoor Video Surveillance / R. Bohush, I. Zakharava // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 1055. – P. 289–300.
4. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf>. – Date of access: 29.09.2020.

5. Ma M.H. Multi-View Face Detection and Landmark Localization Based on MTCNN// M.H. Ma, J. Wang // In Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress (CAC). – 2018. – P. 4200–4205. – DOI:10.1109/cac.2018.8623535.
6. WIDER FACE: A Face Detection Benchmark [Electronic resource] // Sh. Yang [et al.] // Computing Research Repository ; 2015 arXiv:1511.06523. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1511.06523.pdf>. – (дата обращения 16.06.2019).
7. RetinaFace: Single-stage Dense Face Localisation in the Wild [Electronic resource] // J. Deng [et al.] // Computing Research Repository ; 2019 arXiv:1905.00641v2. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1905.00641.pdf>. – Date of access: 16.06.2019.
8. InsightFace [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/deepinsight/insightface/wiki/Model-Zoo-MTCNN>. – Date of access: 29.09.2020.
9. Богущ, Р.П. Алгоритм сопровождения людей на видеопоследовательностях с использованием сверточных нейронных сетей для видеонаблюдения внутри помещений / Р.П. Богущ, И.Ю. Захарова // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 109–116. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-565.

Поступила 28.10.2020

CLIENT-SERVER SYSTEM FOR PEOPLE IDENTIFICATION AND TRACKING IN INDOOR BASED ON VIDEO DATA ANALYSIS

R. BOHUSH, I. ZAKHARAVA

In this paper we present software that was developed for identification and tracking of multiple people indoors. Proposed approach based on the analysis of image sequences obtained from stationary CCTV cameras. Person detection and tracking procedures use convolutional neural network architectures. Tracking algorithm is characterized by collecting face recognition results for the correct assignment of a person's external features in different frames. An integral descriptor defines each person and contains convolutional neural network based face features and person's image features. His structure allows us to track people when faces can't be recognized properly. The software implementation uses the OpenCV library for basic image processing operations. For the main procedures of our algorithm we use software and hardware architecture for parallel computing that is implemented on an Nvidia GPU and CUDA technology. The proposed approach achieves real-time processing if there are five or less people in a frame simultaneously. The computational experiments are conducted on a PC with GPU NVIDIA GTX 1060 and CPU Intel i7-5820k. The output data is processed image sequence with rectangular areas of people's location and their index. Overall number of people in the current image is showed as well. The developed client-server system was tested using a personal computer and mobile devices running on Android and iOS operating systems.

Keywords: *people tracking and identification, convolutional neural networks, CUDA, "Smart home" system.*

УДК 620.1.08

**ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАЗРЕЖЕННЫХ МАТРИЦ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АССОЦИАТИВНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ C++ БИБЛИОТЕКИ STL**

*канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, канд. техн. наук, доц. Р.П. БОГУШ, Т.М. ГЛУХОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Предлагается объектно-ориентированный архитектурный шаблон для построения ассоциативных контейнеров, предназначенных для представления разреженных матриц. Решается проблема классических ассоциативных контейнеров STL, состоящая в появлении несуществующих элементов при первом обращении к ним. Предлагаемый архитектурный шаблон не меняет вычислительной сложности основных операций ассоциативного контейнера `std::map` и обеспечивает компактное представление разреженной матрицы жесткости системы линейных уравнений большой размерности метода конечных элементов в задаче расчета статически неопределимых строительных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности.

Ключевые слова: метод конечных элементов, разреженная матрица, объектно-ориентированные шаблоны проектирования, ассоциативный контейнер.

Описание проблемы. При решении задач строительной механики методом конечных элементов из системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) определяются узловые перемещения. Типовым представлением системы линейных уравнений является

$$[K]\{r\} = \{P\}, \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости стержневой системы, формируемая как комбинация матриц жесткости отдельных конечных элементов;

$\{r\}$ – вектор узловых перемещений;

$\{P\}$ – вектор узловых нагрузок.

Моделируемые конструкции содержат десятки тысяч конечных элементов, что приводит к необходимости проработки программных решений для представления матрицы жесткости большой размерности в памяти компьютера. Важной особенностью представляемых матриц является их разреженность.

При переходе к нелинейным моделям строительных конструкций в процессе расчета возникает задача дополнения расчетной схемы более детальным конечно-элементным представлением для учета процессов трещинообразования (образования пластических шарниров и перераспределения внутренних усилий). Таким образом, топология расчетной схемы меняется в процессе расчета методом последовательных нагружений, порождая на каждом этапе расчета модифицированную матрицу жесткости (1), возможно, большего ранга, чем предшествующая.

Решение таких систем строится на прямых или итерационных методах с применением различных разложений матриц, повышающих обусловленность задачи, что существенно увеличивает объем матрично представленной информации. Преимущество итерационных методов и алгоритмов заключается в отсутствии необходимости строить и хранить в памяти компьютера матрицы большой размерности. Недостатками итерационных методов являются чувствительность к выбору первого приближения и плохая сходимость в плохо обусловленных задачах. Однако известны способы уменьшения погрешности решения (например, алгоритм итерационного уточнения [5–7]).

В языке программирования C++ для решения задачи построения динамических ассоциативных контейнеров в рамках объектно-ориентированного подхода широкое распространение получила стандартная библиотека шаблонов (Standard Template Library, STL) и ее модификации в рамках библиотеки boost. Контейнеры данной библиотеки обеспечивают оптимальную работу с памятью и известную вычислительную сложность операций вставки, удаления и поиска элементов.

В силу своей универсальности контейнеры STL способны инстанцироваться самими классами контейнеров, создавая многомерную структуру.

Рассмотрим пример 1:

```
typedef std::map<int, double> IDM;  
IDM m;  
m[10] = 23.12;
```

Ассоциативный контейнер `std::map` представляет собой отсортированный вектор пар «ключ – значение». Он предлагает удобные средства добавления, поиска и удаления элемента по ключу. Вычислительная сложность операций вставки, удаления и поиска равна $O(\log n)$. В своей реализации класс `std::map` использует деревья двоичного поиска.

Ключевым недостатком данного контейнера является то, что при обращении к несуществующему элементу данный элемент создается и размещается в памяти.

Рассмотрим пример 2:

```
typedef std::map<int, double> IDM;
IDM m;
m[10] = 23.12;
int s1 = m.size();           // вернет 1
double a = m[13];           // в переменную a будет помещен 0, так как элемент m[13] не заносился
double b = m[10];           // в переменную b будет помещено число 23.12
int s2 = m.size();           // вернет 2, хотя элемент m[13] в вектор не заносился
```

Причинами изменения размера контейнера при обращении к несуществующим элементам являются особенности реализации стандартных операторов присваивания `operator=`, определенных для типа помещаемых в контейнер значений, и оператора извлечения ссылки на объект `operator[]`, определенного для соответствующего типа контейнера. Поскольку оператор извлечения ссылки `operator[]` срабатывает до оператора присваивания, то он «не знает» о том, что со ссылкой будет делать последующий код программы. В свою очередь оператор присваивания для типа (например, `double`) «не имеет никакого представления», как ссылка на объект была сформирована, была ли она получена в результате обращения к контейнеру. Такая последовательность событий требует обязательного создания несуществующего элемента ассоциативного контейнера.

Универсальность контейнера позволяет формировать и многомерные структуры. Покажем это на примере 3:

```
typedef std::map<int, double> IDM;
typedef std::map<int, IDM> IDM2;
IDM2 m;
m[5][15] = 3.45;             m[5][3] = 2.55; m[3][17] = 32.7;
int s1 = m.size();           // вернет 2
int s2 = m[5].size();        // вернет 2
int s3 = m[3].size();        // вернет 1
int s4 = m[2].size();        // вернет 0
double a = m[2][2];          // в переменную a будет помещен 0, так как элемент m[2][2] не заносился
double b = m[3][17];         // в переменную b будет помещено число 32.7
s1 = m.size();               // вернет 3, хотя ожидалось 2, так как изменений в карте не было, а
s4 = m[2].size();            // вернет 1, хотя ожидался 0
```

Удобство работы с такими структурами при разработке численных алгоритмов поиска решений СЛАУ очевидно. Однако тот факт, что при обращении к ним наблюдается появление несуществующих элементов, делает данные контейнерные классы неприемлемыми для задач большой размерности с разреженными матрицами, к которым относятся и задачи строительной механики.

Работы по поиску оптимальных структур для хранения и манипулирования разреженными матрицами публиковались в разное время рядом авторов (А.И. Богоявленский, Bathe Klaus-Jürgen, А.Б. Свириденко, О.А. Дмитриева, С. Писсанецки и др.). В частности, в работе [1] предложена модель, названная CCS, которая строится на контейнере с возможностью произвольной вставки по индексу (например, контейнер `list` языка `python`). Все действия с контейнером описаны на псевдоязыке. Также в некоторых работах предлагаются сжатый диагональный (`compressed diagonal`, `CDS`) или `skyline` [2] способы представления.

Постановка задачи. В отличие от того, что предлагается в существующих публикациях, мы ставим своей целью построить архитектурный шаблон на основе имеющихся C++ классов библиотеки STL, позволяющий обеспечить оптимальное хранение разреженных матриц. Мы формулируем свою задачу именно как задачу сохранения синтаксически неизменного способа представления матрицы в виде двумерного массива, лишенного проблемы захвата избыточной оперативной памяти, работа с которым идет на основе оператора `operator[]`. Это позволит строить программный код в привычной для визуального представления манере и повысит его читаемость.

Разработка архитектурного шаблона. Для решения поставленной задачи мы предлагаем использовать статические переменные класса чисел с плавающей запятой, идентифицирующие последнее значение ключа и указатель на контейнер, к которому выполнялось последнее обращение с оператором `operator[]`. Новый тип данных с плавающей точкой должен уметь в рамках оператора присваивания различать ситуацию чтения из и записи в ассоциативный контейнер.

Диаграмма классов архитектурного шаблона приводится на рисунке 1.

Здесь важно пояснить, что нами для представления чисел с плавающей запятой введены новые классы `fr` и `fr2`. За счет переопределения операторов неявного преобразования типов числа классов `fr` и `fr2` могут использоваться как обычные `double`-числа языка C++.

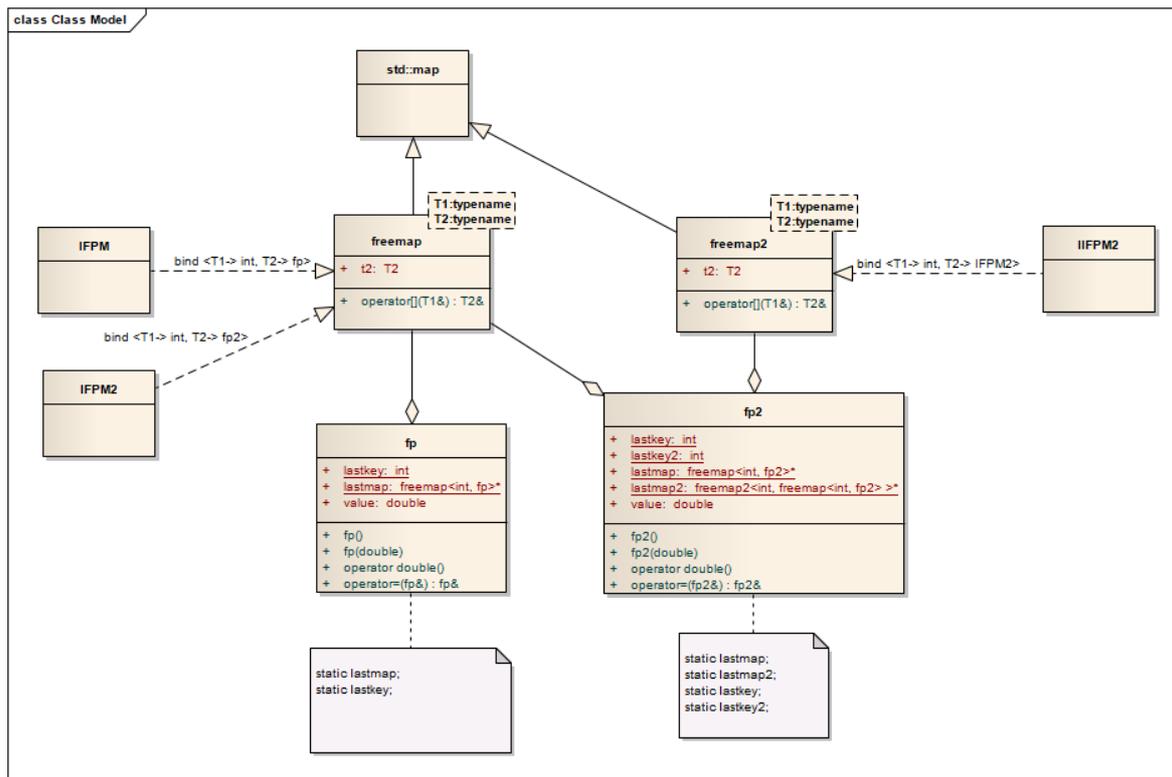


Рисунок 1. – Диаграмма классов архитектурного шаблона ассоциативного контейнера для разреженных матриц

В рамках предложенной кооперации классов создание ассоциативного контейнера будет выглядеть очень похоже на создание классического `std::map`-контейнера, но с обязательным определением статических переменных классов `fp` и `fp2` в сегменте BSS:

```

typedef freemap<int, fp> IFPM;
IFPM *fp::lastmap = NULL;
int fp::lastkey;
typedef freemap<int, fp2> IFPM2;
IFPM2 *fp2::lastmap = NULL;
int fp2::lastkey;
typedef freemap2<int, IFPM2> IIFPM2;
IIFPM2 *fp2::lastmap2 = NULL;
int fp2::lastkey2;
    
```

Работа с такими типами ассоциативных контейнеров ничем не будет отличаться от контейнера `std::map`. Покажем это на примере:

```

IIFPM2 fpm;
// заносим 3 значения
fpm[1][10] = 1.1;
fpm[1][11] = 3.1;
fpm[2][15] = 1.2;
int s1 = fpm.size(); // вернет 2
int s11 = fpm[1].size(); // вернет 2
int s12 = fpm[2].size(); // вернет 1
double n = fpm[1][11]; // в переменную n занесет 3.1
// считывание несуществующих элементов не добавляет их в контейнер
double n1 = fpm[1][12]; // 0
double n2 = fpm[3][13]; // 0
double n3 = fpm[5][13]; // 0
double n4 = fpm[6][13]; // 0
double n5 = fpm[1][10]; // 1.1
double n6 = fpm[2][15]; // 1.2
    
```

```

fpm[2][15] = 120.134; // меняем значение
double n7 = fpm[2][15]; // вернет 120.134
// размеры векторов не изменились
int s2 = fpm.size(); // 2
int s21 = fpm[1].size(); // 2
int s22 = fpm[2].size(); // 1
int s32 = fpm[3].size(); // 0
int s42 = fpm[4].size(); // 0
int s52 = fpm[5].size(); // 0
int s62 = fpm[6].size(); // 0

```

Обобщая полученные архитектурные решения для одномерного и двумерного ассоциативного контейнера на случай n -мерного контейнера, нам необходимо перейти к системе классов чисел с плавающей точкой fp , $fp2, \dots, fpn$ и классов ассоциативных контейнеров $IFPMn$, $IFPMn$, $\dots, I \dots IFPMn$.

В таком случае архитектурный шаблон может быть представлен диаграммой классов как на рисунке 2.

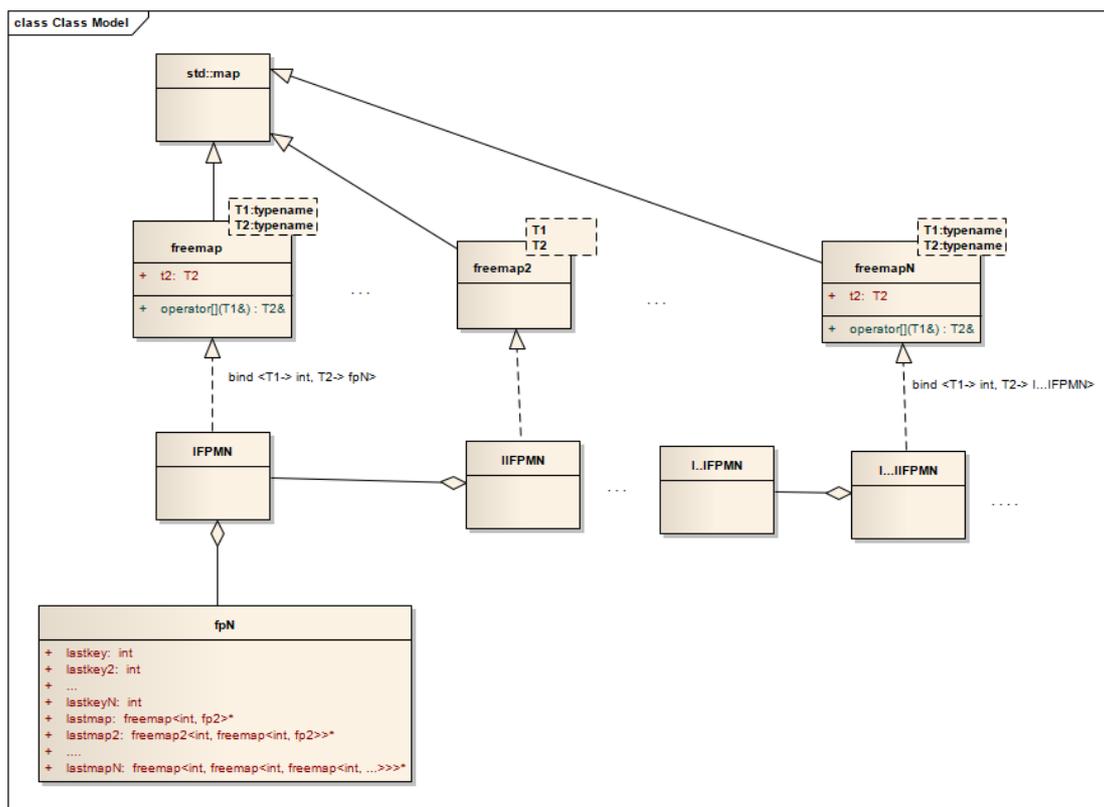


Рисунок 2. – Диаграмма классов архитектурного шаблона n -мерного ассоциативного контейнера для разреженных матриц

Реализация. Покажем ключевые аспекты реализации предложенной системы классов. Для классов, описывающих числа с плавающей точкой, важна инкапсуляция статических переменных для идентификации последнего вызова оператора `operator[]` у соответствующего ассоциативного контейнера, а также наличие перегруженных операторов неявного преобразования типов к типу `double`.

Приведем исходный код класса чисел с плавающей точкой для двумерного ассоциативного контейнера `fp2`:

```

class fp2 {
public:
// статические переменные, идентифицирующие ассоциативные контейнеры
// первого и второго уровня, и соответствующие значения ключей i и j последнего обращения
// посредством оператора operator[] (например, m[i][j])
static freemap<int, fp2>* lastmap;
static freemap2<int, freemap<int, fp2>>* lastmap2;
static int lastkey;

```

```

static int lastkey2;
double value;
// конструктор по умолчанию
fp2() {
    value = 0;
    lastmap = NULL;
    lastmap2 = NULL;
}
// конструктор числа типа fp2 из типа double
fp2(double t) {
    value = t;
    lastmap = NULL;
    lastmap2 = NULL;
}
// оператор неявного преобразования типа к типу double
operator double() {
    return value;
}
// оператор присваивания, различающий ситуацию записи/чтения ассоциативного контейнера
// по заполненности статических переменных
fp2& operator=(const fp2 &p) {
    // если перед присваиванием сработывал оператор operator[],
    // то создание объекта и помещение его в карту объектов первого уровня
    if (lastmap) {
        lastmap->insert(std::pair<int, fp2>(lastkey, p));
        // создание карты второго уровня при необходимости
        if (lastmap2) {
            lastmap2->insert(std::pair<int, freemap<int, fp2>>(lastkey2, *lastmap));
            lastmap2->t2.clear();
        }
    }
    value = p;
    lastmap = NULL;
    lastmap2 = NULL;
    // возврат ссылки на объект после очистки статических переменных
    return *this;
}
};

```

Для классов двумерных ассоциативных контейнеров необходимо реализовать два класса – **freemap** и **freemap2**. Приведем возможную реализацию данных классов:

```

template <typename T1, typename T2> class freemap: public std::map<T1, T2> {
public:
    T2 t2;
    T2& operator[] (const T1& k) {
        iterator it = find(k);
        if (it != end()) {
            return std::map<T1, T2>::operator[](k);
        }
        t2.lastmap = this;
        t2.lastkey = k;
        t2.value = 0;
        return t2;
    }
};

template <typename T1, typename T2> class freemap2: public std::map<T1, T2> {
public:
    T2 t2;
    T2& operator[] (const T1& k) {

```

```

iterator it = find(k);
if (it != end()) {
    return std::map<T1, T2>::operator[](k);
}
t2.t2.lastmap2 = this;
t2.t2.lastkey2 = k;
return t2;
}
};

```

Как видно, одной из возможных реализаций оператора `operator[]` является реализация, основанная на вызове метода `find()` базового контейнера `std::map`.

Тестирование. Для предложенных реализаций архитектурного шаблона мы провели тестирование двумерного ассоциативного контейнера 10000×10000 элементов в сравнении с базовым контейнером класса `std::map` по времени заполнения на определенный процент и времени поэлементного считывания всего контейнера. Результаты приведены на рисунке 3.

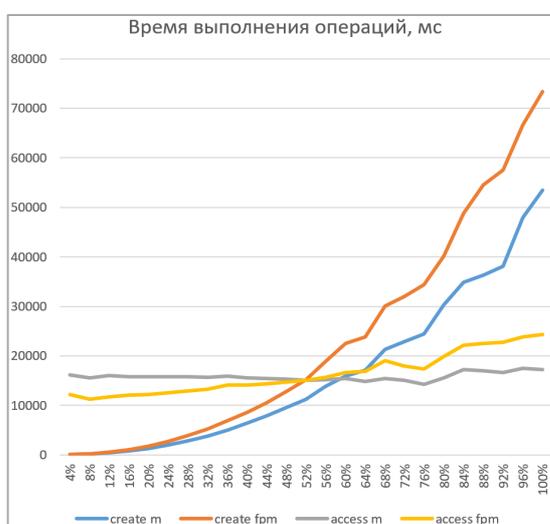


Рисунок 3. – Результаты времени заполнения и считывания контейнера `m`, основанного на классе `std::map`, и контейнера `fpm`, построенного на классах `freemap` и `freemap2`

На основании представленных графиков можно сделать вывод, что для разреженных матриц с заполнением менее 50% полученное архитектурное решение не только обеспечивает существенную экономию оперативной памяти, но и, вследствие более компактного хранения данных, дает выигрыш в быстродействии по доступу к элементам двумерного контейнера.

Матрицы жесткости метода конечных элементов строительных конструкций являются сильно разреженными (см. пример на рисунке 4).

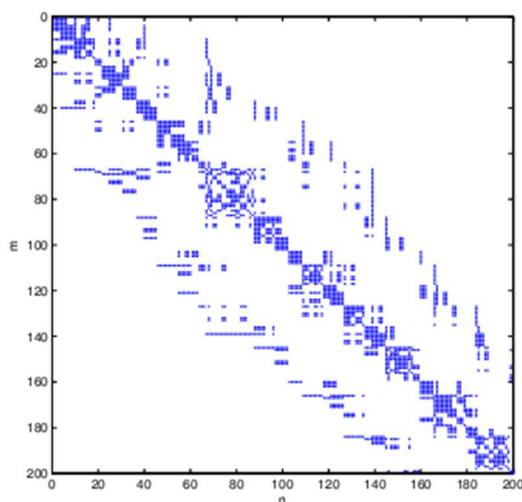


Рисунок 4. – Пример типовой матрицы жесткости метода конечных элементов [10] с заполнением 0,00327%

Предложенный архитектурный шаблон успешно решает поставленную задачу.

Заключение. В результате проведенного анализа были выявлены причины некорректной работы стандартных ассоциативных C++ контейнеров библиотеки STL. С целью устранения выявленных проблем разработан объектно-ориентированный архитектурный шаблон одно и двумерного ассоциативного контейнера для хранения разреженных матриц большой размерности.

Разработанный архитектурный шаблон применен нами в алгоритмах конечно-элементного анализа пространственных статически неопределимых строительных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности. На основе разработанного архитектурного шаблона построен класс двумерного ассоциативного контейнера для хранения разреженных матриц, содержащих числа с плавающей запятой удвоенной точности (тип double).

ЛИТЕРАТУРА

10. Богоявленский, А.И. Использование форматов хранения разреженных матриц при реализации метода конечных элементов / А.И. Богоявленский // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2017. – № 2. – С. 4–11.
11. Bathe, K.-J. Finite element procedures / K.-J. Bathe. – New Jersey : Prentice Hall, 1995. – 1037 p.
12. Кундас, С.П. Обзор численных методов расчета систем уравнений строительной механики и выбор оптимальной схемы хранения данных для задач большой размерности / С.П. Кундас, Д.О. Глухов, Т.М. Глухова // Вестн. Полт. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 6. – С. 79–83.
13. Свириденко, А.Б. Прямые мультипликативные методы для разреженных матриц. Ньютоновские методы / Свириденко А.Б. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9. – № 5. – С. 679–703.
14. Соловьев, С.А. Решение разреженных систем линейных уравнений методом Гаусса с использованием техники аппроксимации матрицами малого ранга / С.А. Соловьев // Вычислительные методы и программирование. – 2014. – Т. 15. – С. 441–460.
15. Отаров, А.О. Решение неустойчивых систем линейных алгебраических уравнений методом дифференциального спуска / А.О. Отаров, Э.П. Уразымбетова, А.А. Отаров // Вестн. Каракалпак. гос. ун-та им. Бердаха. – 2010. – № 3–4 (8–9). – С. 7–15.
16. Есаулов, В.А. Итерационный метод решения систем линейных уравнений с использованием q-градиента [Электронный ресурс] / Есаулов В.А., Д.В. Гринченков, В.А. Мохов // Инженер. вестн. Дона. – 2015. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/iteratsionnyy-metod-resheniya-sistem-lineynyh-uravneniy-s-ispolzovaniem-q-gradienta>.
17. Дмитриева, О.А. Оптимизация выполнения матрично-векторных операций при параллельном моделировании динамических процессов / О.А. Дмитриева // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2014. – № 1(26). – С. 94–100.
18. Писсанецки, С. Технология разреженных матриц / С. Писсанецки. – М. : Мир, 1988. – 410 с.
19. High-order unstructured methods for computational aero-acoustics / H. Beriot [et al.]. // Progress in simulation, control and reduction of ventilation noise / VKI. – Sint-Genesius-Rode, 2015.

Поступила 10.11.2020

SPARE MATRIX REPRESENTATION USING ASSOCIATIVE CONTAINERS C ++ STL LIBRARIES

D. GLUKHOV, R. BOGUSH, T. GLUKHOVA

The paper proposes an object-oriented architectural pattern for building associative containers designed to represent sparse matrices. The problem of classic associative STL containers is solved. This problem lies in the appearance of non-existent elements when you first access them. The proposed architectural pattern does not change the computational complexity of the basic operations of the `std::map` associative container. We have applied the proposed architectural template for a compact representation of a sparse stiffness matrix of a system of large-dimensional linear equations of the finite element method in the problem of calculating statically indeterminate building structures taking into account physical and geometric nonlinearity.

Keywords: *finite element method, sparse matrix, object-oriented design patterns, associative container.*

УДК 621.397.6

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ
СОПРОВОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ****канд. техн. наук, доц. А.В. ХИЖНЯК, Д.С. ШАРАК, А.Ю. БОБРОВ
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)**

Представлен аппаратно-программный комплекс исследования алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов, который позволяет осуществлять выбор типа сопровождения в зависимости от параметров фоновой обстановки и наличия преднамеренных помех, фиксировать количество срывов сопровождения в видеопоследовательности. Разработанный комплекс характеризуется возможностью исследования алгоритмов как в режиме реального времени, так и с заранее подготовленными видеопоследовательностями с возможностью моделирования эффектов ухудшения условий эксплуатации (применение дымовой завесы, повышение шумовой составляющей, засветки камеры и др.), которые представляют собой маскирующие помехи естественного и искусственного происхождения. Аппаратно-программный комплекс позволяет проводить исследование и оценку эффективности как существующих, так и вновь разрабатываемых алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов в условиях изменяющейся фоновой обстановки и наличия преднамеренных помех.

Ключевые слова: алгоритмы сопровождения, оценка эффективности, многоканальные оптико-электронные системы.

Введение. Системы анализа и обработки визуальной информации активно применяются для решения различных технических задач, требующих качественного анализа и интерпретации информации, полученной из видеопотока. Одной из задач, которые обычно интересуют потребителей оптико-электронных систем, является задача сопровождения движущихся объектов в реальном времени. Сопровождение объекта состоит в обнаружении нужного объекта, оценке его положения и размеров от кадра к кадру в видеопоследовательности, построении траектории его перемещения. Примерами объектов, которые требуется обнаруживать и сопровождать, могут служить летящие самолеты, вертолеты, суда, люди. В качестве фона для них могут выступать изображения дорог, леса, облаков, домов и т.п. При этом информация о характеристиках объектов, которые требуется обнаруживать и сопровождать, обычно очень скудна и в лучшем случае включает в себя лишь приблизительные размеры объектов [1].

Процесс сопровождения малоконтрастного объекта представляет собой вычисление относительных угловых координат объекта на основании информации о распределении интенсивности физических полей Земли, которые однозначно определяют конкретное место на земной поверхности. Использование оптического контраста для целей сопровождения обусловлено его высокой информативностью и возможностью получения исходной информации о яркостных полях Земли с требуемым качеством и на любых участках земной поверхности.

К алгоритмам сопровождения объекта предъявляется ряд требований:

- 1) алгоритм должен функционировать в режиме реального времени, что неизбежно накладывает ограничения на сложность используемых алгоритмов;
- 2) алгоритм должен работать в условиях наличия и изменения на естественных изображениях сложного неоднородного фона, постановки различного рода помех, учитывать слабую контрастность;
- 3) алгоритм должен справляться с дестабилизирующими факторами: размытостью, изменением освещения и размеров объекта, его деформацией, а также фоновыми помехами, полным или частичным исчезновением объекта из поля зрения камеры, шумами [1].

Эти требования не позволяют ограничиваться простыми решениями при синтезе алгоритмов.

Большинство известных методов и алгоритмов сопровождения объектов, подробно описанных в современной научной литературе, либо получены для простейших моделей, либо имеют эвристическое происхождение и зачастую не обеспечивают должного результата при изменении условий функционирования.

Трудность решения прикладной задачи в военной сфере прежде всего обусловлена противодействием противника: приходится сопровождать малоразмерные, малоконтрастные, в том числе замаскированные объекты на нестационарном фоне. Подвижность оптико-электронной системы сопровождения дополнительно усложняет и без того нетривиальную задачу.

Таким образом, разработка эффективных алгоритмов сопровождения объектов на видеопоследовательности, ориентированных на работу в реальном масштабе времени и использующихся в многоканальных оптико-электронных системах сопровождения объектов (МОЭСС) в условиях изменяющейся фоновой обстановки и наличия преднамеренных помех, является актуальной научной и практической задачей.

Основная часть. Для выявления факта успешного выполнения стоящей перед МОЭСС задачи используются критерии качества, которые учитывают различные эксплуатационные, технико-экономические,

тактико-технические требования к данным системам. На протяжении последних десятилетий появилось немало работ, в которых делались попытки сформулировать некоторый обобщенный и комплексный критерий качества МОЭСС [1]. Однако следует согласиться с авторами [2], что такие критерии обычно формируются на основе эвристических и субъективных соображений, суждений и полностью не определяют возможности МОЭСС при решении значительного количества прикладных задач и зачастую не помогают разработчику аппаратуры оптимизировать ее конструкцию.

Всю используемую на практике совокупность критериев качества МОЭСС можно разделить на следующие группы [3]:

- тактико-технические параметры и характеристики аппаратуры;
- показатели эффективности достижения цели;
- критерии качества изображения, сформированного МОЭСС;
- технико-экономические показатели.

К тактико-техническим параметрам и характеристикам МОЭСС относятся *вероятность обнаружения, чувствительность, отношение сигнал-шум, температурно-частотные характеристики, спектральный диапазон, угол обзора, формат и частота кадров, однородность и число элементов разрешения* и др.

К показателям эффективности достижения цели МОЭСС в первую очередь относятся *средние времена решения стоящих перед системой задач, а также вероятности обнаружения, классификации, распознавания и идентификации объектов*.

Так как понятие «качество оптического изображения» на сегодняшний день не имеет общепринятого определения, существует большое количество показателей, которые используются для описания качества: *контраст изображения, разрешающая способность аппаратуры, степень фокусировки изображения, функция передачи модуляции и контраста, количество передаваемых уровней яркости или освещенности* и др.

К технико-экономическим показателям относятся *стоимостные оценки МОЭСС, технологичность, энергопотребление, массогабаритные параметры аппаратуры, время наработки на отказ* и др. Часто на ранних этапах разработки МОЭСС (системотехническое и структурное проектирование) прежде всего учитываются данные показатели.

В связи с тем, что большинство из указанных выше критериев качества МОЭСС часто находится во взаимозависимости и даже просто определяет друг друга, такая их классификация в большинстве случаев условна и относительна. Однако разделение совокупности показателей эффективности МОЭСС на отдельные частные критерии во многих случаях используется при структурно-параметрическом анализе и синтезе таких систем, при их исследованиях, разработке и эксплуатации.

Помимо критериев качества самих МОЭСС также принимают во внимание и различные условия работы этих систем, к которым относятся параметры и характеристики наблюдаемых объектов, среда распространения сигналов и др. Некоторые критерии качества зависят от личных качеств наблюдателя или оператора, работающего с МОЭСС.

Для сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения возможно использовать вероятность срыва сопровождения. Однако ввиду невозможности однозначно утверждать, какому закону распределения подчинено распределение яркости пикселей в изображении, в качестве показателя качества сопровождения можно использовать количество срывов сопровождения на 1000 кадров видеопоследовательности. Анализ источников [1; 5] показал, что данный показатель качества с достаточной точностью характеризует алгоритмы сопровождения оптически наблюдаемых объектов.

Принимая во внимание общую длительность видеопоследовательностей и их характеристики, а также общее количество срывов за время работы алгоритма, определяется среднее количество срывов на 1000 кадров Ω_* по формуле

$$\Omega_* = \frac{1000 \cdot N_{cp}^*}{\tau \cdot f},$$

где N_{cp}^* – зафиксированное количество срывов за время работы алгоритма сопровождения;

τ – длительность видеопоследовательности, подаваемой на алгоритм сопровождения;

f – частота кадров видеопоследовательности, подаваемой на алгоритм сопровождения.

Схема аппаратно-программного комплекса, разработанного в рамках проводимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, представлена на рисунке 1.

В качестве источника информации использовалась PTZ-камера двойного назначения Ulisse Compact Thermal (рисунок 2), имеющая в своем составе телекамеру «день/ночь» с высоким разрешением, а также тепловую камеру с разрешением 320×256 пикселей [4].

Внешний вид автоматизированного рабочего места (АРМ) экспериментальной установки представлен на рисунке 3.

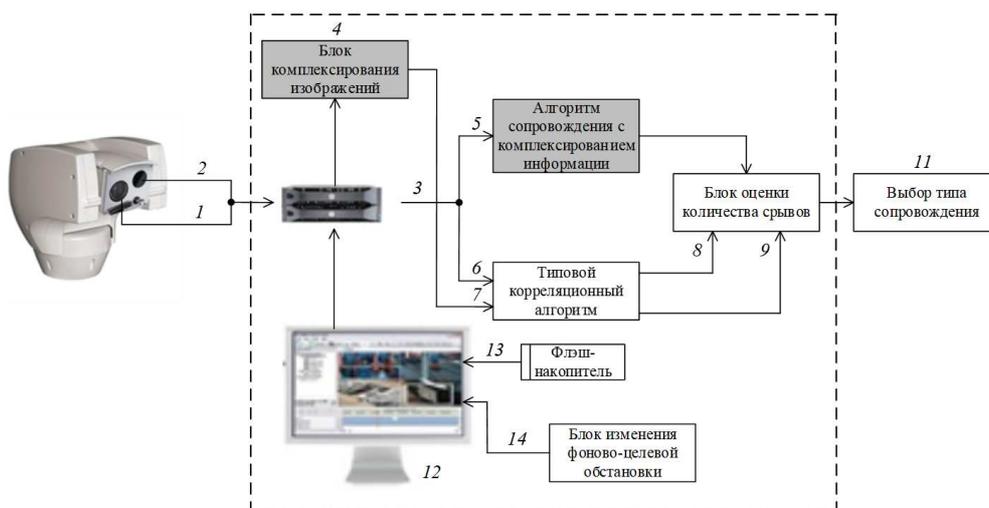


Рисунок 1. – Схема аппаратно-программного комплекса для сравнения алгоритмов сопровождения



Рисунок 2. – PTZ-камера двойного назначения Ulisse Compact Thermal, используемая при экспериментальных исследованиях

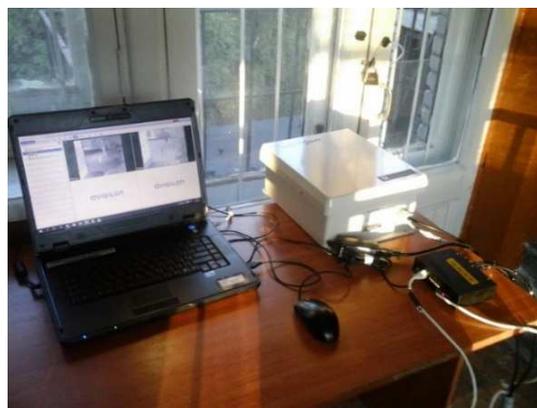


Рисунок 3. – Внешний вид автоматизированного рабочего места экспериментальной установки

На АРМ установлено специализированное программное обеспечение (ПО) Avigilon Control Center, поддерживающее технологию управления видеопотоком высокой четкости High-Definition Stream Management (HDSM), которое обеспечивает подключение и управление двумя каналами видеокamеры [4]. Полученное видео записывается в режиме реального времени и хранится на жестком диске АРМ.

С выходов источника видеoinформации (1, 2) на АРМ (12) поступают исходные видеопоследовательности видимого и ИК-диапазонов. Видеоэнкодер Avigilon (3) преобразует стандартный аналоговый видеосигнал в цифровой поток, позволяя отправлять полученные цифровые изображения по сети IP [4]. В блоке комплексирования (4) запрограммированы два алгоритма комплексирования изображений. Блок 6–7 представляет собой программную реализацию типового корреляционного алгоритма сопровождения.

В блоке 5 запрограммирован исследуемый алгоритм сопровождения с комплексированием первичной видеoinформации. В блоке 8–9 фиксируется количество срывов сопровождения в видеопоследовательности. Выбор типа сопровождения в зависимости от параметров фоново-целевой обстановки и наличия преднамеренных помех осуществляется в блоке 11. При необходимости информации источник может являться не только PTZ-камера, работающая в режиме реального времени, но и заранее полученные видеопоследовательности, сгустированные по времени, размерам и углу места, подключаемые к АРМ (12) через флэш-накопитель (13). Это особенно удобно для разработчиков специализированного ПО в целях снижения временных, материальных и трудовых затрат при выборе конкретного способа сопровождения для определенных условий функционирования МОЭСС. Для обеспечения исследования алгоритмов сопровождения в сложных условиях эксплуатации в схему стенда включен блок изменения фоново-целевой обстановки (блок 14). Данный блок представляет собой специализированный пакет программ для обработки видеопоследовательностей различного спектрального диапазона. В качестве такого программного обеспечения могут использоваться различные видеоредакторы: VSDC Video Editor, VideoPad, Movavi Video

Editor, Adobe Premiere Pro, Sony Vegas Pro, Corel Videostudio Pro и др. Для задания различных условий эксплуатации исследуемого алгоритма сопровождения был использован специализированный пакет Pinnacle Studio, установленный на АРМ аппаратно-программного комплекса. Данный редактор имеет большие возможности по обработке видеопоследовательностей – от применения простых фильтров до генерации сложных эффектов с использованием исходной информации. В состав стандартного пакета входит достаточно большой набор видеоэффектов: Studio HD RTFx, Studio Ultimate RTFx, RTFX Volume 1, которые при необходимости могут быть скомпилированы с дополнительными эффектами на специализированном сайте поддержки пользователей. С помощью этого ПО были смоделированы эффекты ухудшения условий эксплуатации алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов, которые представляют собой маскирующие помехи естественного и искусственного происхождения и часто имеют место в реальной обстановке. В качестве таких условий использовались: применение дымовой завесы ($\Omega_{\text{дым}}$), повышение шумовой составляющей на изображении ($\Omega_{\text{шум}}$), а также засветка источника видеoinформации ($\Omega_{\text{засв}}$).

Программная реализация блоков 4, 5–9, 14 установлена на специализированном АРМ (12).

Заключение. Разработанный аппаратно-программный комплекс исследования алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов обладает следующими функциональными возможностями:

- 1) исследование алгоритмов как в режиме реального времени, так и с заранее подготовленными видеопоследовательностями;
- 2) моделирование эффектов ухудшения условий эксплуатации (применение дымовой завесы, повышение шумовой составляющей, засветки камеры и др.), которые представляют собой маскирующие помехи естественного и искусственного происхождения;
- 3) выбор типа сопровождения в зависимости от параметров фоновой-целевой обстановки и наличия преднамеренных помех;
- 4) фиксация количества срывов сопровождения в видеопоследовательности.

Таким образом, комплекс позволяет проводить исследование и оценку как существующих, так и вновь разрабатываемых алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов в условиях изменяющейся фоновой-целевой обстановки и наличия преднамеренных помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов [и др.]. – М. : Радиотехника, 2008. – 176 с.
2. Автоматическое обнаружение и сопровождение динамических объектов на изображениях, формируемых оптико-электронными приборами в условиях априорной неопределенности. Методы и алгоритмы / Под ред. А.А. Храмичева. – М. : Радиотехника, 2015. – 280 с.
3. Бокшанский, В.Б. Расчет характеристик фоточувствительных приборов с зарядовой связью / В.Б. Бокшанский, В.Е. Карасик. – М. : МГТУ им. Баумана, 2001. – 157 с.
4. Официальный сайт компании «VideoTec» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.videotec.com>. – Дата доступа: 24.10.2018.

Поступила 09.11.2020

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR RESEARCHING ALGORITHMS OF TRACKING OPTICALLY OBSERVED OBJECTS

A. KHIZNIAK, D. SHARAK, A. BOBROV

This article presents a hardware and software complex for researching algorithms for tracking optically observed objects. The hardware and software complex allows you to select the type of tracking depending on the parameters of the background-tuned environment and deliberate interference, to record the number of tracking disruptions in the video sequence. The developed complex differs from algorithms in real time, as well as with previously prepared video sequences using simulation of operating conditions (use of a smoke screen, increasing the noise component, camera illumination, etc.), which are masking noise and artificial origin. The hardware and software complex allows for research and evaluation of the effectiveness of newly developed algorithms for tracking optically observed objects in a changing background search environment and the presence of deliberate interference.

Keywords: tracking algorithms, performance evaluation, multichannel optoelectronic systems.

УДК 004.056.32

**ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ
ОТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВЛЕННЫХ ДАТЧИКОВ**

*А.В. КАРЛА, д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК
(Полоцкий государственный университет)*

Бурное развитие и масштабное внедрение в современном мире беспилотных летательных аппаратов (БЛА) обуславливает необходимость решения новых задач при полетах.

В статье рассматриваются вопросы оценки точности параметров наблюдения, определяющих стабильность БЛА при различных влияющих факторах, которые зависят не от летательного аппарата, а от внешних воздействий. Анализируются литературные издания, статьи и другие источники информации. Предложены альтернативные способы использования ресурсов и их реализация, которые направлены на определение стабильности и точности. Результатом статьи является оценка стабильности параметров наблюдения для определения точности и повышения достоверности информации.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, стабильность, достоверность информации, влияющие факторы.

Введение. Беспилотным летательным аппаратом является аппарат без экипажа на борту, способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в воздушном пространстве для выполнения различных функций в автономном режиме с помощью собственной управляющей программы или посредством дистанционного управления, осуществляемого человеком-оператором со стационарного или мобильного пульта управления [1]. Такие аппараты имеют различную степень автономности: от управляемых дистанционно до полностью автоматических, а также различаются по конструкции, назначению и множеству других параметров.

Основные преимущества БЛА перед летательным аппаратом (ЛА):

- габаритные характеристики БЛА меньше, чем ЛА;
- масса БЛА для выполнения определенных действий меньше, чем ЛА, что подразумевает экономию ресурсов на питание;
- сложность обнаружения БЛА в связи с малыми габаритами и неотражающими материалами, используемыми при изготовлении.

БЛА по габаритам и массе подразделяются:

- на микро- и мини-БЛА ближнего радиуса действия (взлетная масса до 5 кг, дальность действия до 25–40 км);
- на легкие БЛА малого радиуса действия (взлетная масса 5–50 кг, дальность действия 10–70 км);
- на легкие БЛА среднего радиуса действия (взлетная масса 50–100 кг, дальность действия 70–150 м, некоторые виды – до 250 км);
- на средние БЛА (взлетная масса 100–300 кг, дальность действия 150–1000 км);
- на среднетяжелые БЛА (взлетная масса 300–500 кг, дальность действия 70–300 км);
- на тяжелые БЛА среднего радиуса действия (взлетная масса более 500 кг, дальность действия 70 км и более);
- на тяжелые БЛА большой продолжительности полета (взлетная масса более 1500 кг, дальность действия около 1500 км) и др.

По назначению делятся:

- на применяемые в научных целях (испытания новой техники, в т.ч. новых принципов полета; наблюдения за природными явлениями и др.);
- на применяемые в прикладных целях.

По функциональному назначению БЛА классифицируют на используемые в военной сфере и в гражданской сфере.

Гражданские БЛА применяются:

- для мониторинга различных объектов (видеонаблюдение с целью их охраны);
- для мониторинга лесных массивов службой лесоохраны;
- для наблюдения за движением на железных и шоссейных дорогах, контроля судоходства;
- для наблюдения за посевами предприятий сельского хозяйства;
- для картографирования земной поверхности;
- для разведки и составления планов помещений с помощью малых БЛА внутри разрушенных или опасных зданий;
- для мониторинга нефтегазовых объектов, особенно трубопроводов;

- для радиационной и химической разведки на опасных территориях;
- для видеофотосъемки труднодоступных промышленных объектов (линий электропередач, опор мостов, дымовых труб, ветрогенераторов, антенн и т.д.);
- для мониторинга опасных природных явлений (паводков, извержений вулканов, лавиноопасных горных районов и др.);
- для поиска полезных ископаемых с помощью специальных средств зондирования;
- для познавательных акций (видео- и фотосъемка объектов архитектуры, природы, бизнеса, а также массовых мероприятий с целью презентации или рекламы);
- для авиамоделизма и авиаконструирования;
- для использования малых БЛА в качестве арт-объекта или объекта развлечения;
- для наблюдения за прокладкой кабелей в опасных зонах;
- для ретрансляции сигналов (ретрансляция радиосигналов с целью увеличения дальности действия каналов связи) .

Для полетного режима БЛА существует классификация по принципу полета, в соответствии с которой выделяют:

- БЛА с жестким крылом (самолетного типа);
- БЛА с гибким крылом;
- БЛА с вращающимся крылом (вертолетного типа);
- БЛА с машущим крылом;
- БЛА аэростатического типа;
- различные гибридные подклассы аппаратов, которые трудно однозначно отнести к какой-либо группе.

Задача данной статьи заключается в том, чтобы обосновать и определить стабильность летательных аппаратов, в основе которых лежит поддержание нужной высоты, стабильность равномерного поддержания летательного аппарата по координатным осям. Сформулировать и конкретизировать оценку параметров точности, которые влияют как на стабильность, так и на действия БЛА. Основные параметры, на которые будет сделан упор, – это влияние погодных условий, ландшафт местности, высота и режим полета.

Актуальность статьи: анализ факторов стабильного полета как для точного и полного выполнения поставленных задач, так и для безопасности получения достоверной информации.

Анализ метода. Важнейшими вопросами являются определение координат в пространстве и повышение стабилизации БЛА. Повышенная стабилизация необходима для наблюдения и устойчивости полета. Указанные параметры определяются приведенными ниже факторами.

Дистанционный контроль при помощи устанавливаемых на БЛА фото- и видеокамер, применяется во многих сферах деятельности. Востребованной является стабилизация изображения и самого летательного аппарата.

В первую очередь, требуется рассмотреть фактор, который возникает при сложении радиолокационных (РЛ) сигналов в момент дистанционного наблюдения с высокой точностью.

При принятии РЛ сигнала вследствие отражения от элементарных площадок поверхности происходит сложение фаз сигналов, которое называется блужданием центра отражения или же угловым мерцанием цели. Такое явление приводит к угловым ошибкам определения мгновенного центра отражения. Блуждание центра отражения происходит в пределах ограниченной области, связанной с отражающей поверхностью. Вследствие этого угловые колебания отраженного сигнала существенно зависят от дальности. Зачастую блуждание центра отражения выражают в виде стационарной случайной функции, поделенной

на дальность $D(t)$ до отражающей поверхности $X(t) = \frac{X_6(t)}{D(t)}$ [2]. Случайная функция X_6 имеет спектральную плотность, которая хорошо аппроксимируется формулой

$$S_6(\omega) = \frac{a\sigma_6^2}{\alpha + \beta\omega^2 + \gamma\omega^4}, \tag{1}$$

где σ_6^2 – дисперсия блуждания центра отражения.

Экспериментально формула (1) более детально и подробно рассмотрена Р. Делано [2] и Дж. Данном, Д. Ховардом, А. Кингом [3].

Часть параметров, которые используются в последней формуле, являются постоянными значениями: $a = 9,67$; $\alpha = 483,1 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 0,456$; $\gamma = 0,001 \text{ с}^3$. В свою очередь, среднее квадратическое отклонение зависит от наибольшего размера L облучаемой РЛ цели и вычисляется по формуле $\sigma_6 = 0,21L$ (L измеряется в метрах).

При рассмотрении расстояния при принятии сигнала, следует отметить такой фактор, как влияние атмосферы на точность координат БЛА.

В связи с тем, что атмосфера всегда находится в непрерывном случайном движении относительно Земли, что выражается в появлении ветра, скорость ветра W является случайной функцией времени и координат точки пространства R : $W = W(R, t)$. Скорость ветра можно представить в виде суммы двух составляющих: постоянной и переменной. Составляющую скорости ветра считают постоянной, если за время движения летательного аппарата она мало изменяется по направлению и по величине. Модуль постоянной составляющей скорости ветра обычно рассматривают как случайную величину. Экспериментальные данные Ю.П. Доброленского [4] показывают, что данная величина имеет закон распределения вероятности Рэлея. Плотность вероятности постоянной составляющей скорости ветра [4]

$$f(W) = \frac{W}{\sigma^2} e^{-\frac{W^2}{2\sigma^2}}.$$

В представленной формуле среднее квадратическое отклонение постоянной составляющей скорости ветра зависит от высоты над земной поверхностью. В приземном слое атмосферы среднее отклонение выражается следующей зависимостью от высоты [5]:

$$\sigma = \frac{2}{\pi} m_{w_0} \left(\frac{H}{H_0} \right)^n,$$

где m_{w_0} – математическое ожидание скорости ветра на некоторой опорной высоте H_0 ;

H – текущая высота;

n – показатель степени, величину которого рекомендуется выбирать в пределах 0,15–0,20.

При опорной высоте $H_0 = 10$ м рекомендуется принимать $m_{w_0} = 3 \div 4$ м · с⁻¹. Переменная составляющая скорости ветра $W^0(R, t)$ характеризует турбулентность движения атмосферы, выражающуюся в хаотическом случайном перемещении частиц воздуха. По масштабу различают три интервала турбулентного движения: крупномасштабный, инерционный, вязкий. Крупномасштабная турбулентность обусловлена нарушением равновесного состояния атмосферы за счет неравномерного нагревания Солнцем. Данное движение носит асимметричный характер вследствие влияния поверхности земли и ее вращения. В инерционном диапазоне масштабов турбулентного движения происходит передача энергии от крупномасштабного движения сравнительно небольшим массам воздуха. При этом турбулентность носит изотропный характер. Предельные величины вихрей в этом диапазоне имеют порядок нескольких сотен метров. В вязком диапазоне турбулентность также носит изотропный характер и охватывает наиболее высокие частоты движения воздуха. Размеры вихрей в этом диапазоне составляют несколько сантиметров.

При статическом описании турбулентности обычно принимаются гипотезы о неизменности поля скоростей по отношению к летательному аппарату (гипотеза «замороженности» Тейлора) и об однородности и изотропности в вероятностном смысле поля скоростей. На основании первой гипотезы вероятностные характеристики турбулентности, полученные как функции координат для одного момента времени, можно использовать для любого момента времени. Вторая гипотеза позволяет ограничиться при статическом описании лишь одной корреляционной функцией проекции вектора скорости ветра на направление, соединяющие две точки пространства: $k_r(r)$, где r – расстояние между двумя точками пространства. Вследствие условия изотропности и однородности эта функция проекций вектора скорости ветра на нормаль к направлению между двумя точками $k_n(r)$ связана с корреляционной функцией $k_r(r)$ соотношением, полученным в общей теории турбулентности [4]:

$$k_n(r) = k_r(r) + \frac{1}{2} r \frac{dk_r(r)}{dr}.$$

Аналитические выражения для корреляционных функций, полученных аппроксимацией экспериментальных кривых, имеют следующий вид:

$$k_r(r) = \sigma_w^2 e^{-\frac{|r|}{L_r}};$$

$$k_n(r) = \sigma_w^2 \left(1 - \frac{|r|}{2L_n} e^{-\frac{r}{L_n}} \right),$$

где σ_w^2 – дисперсия переменной составляющей скорости ветра;

L_n и L_r – поперечный и продольный масштабы турбулентности соответственно.

График корреляционной функции турбулентности представлен на рисунке 1.

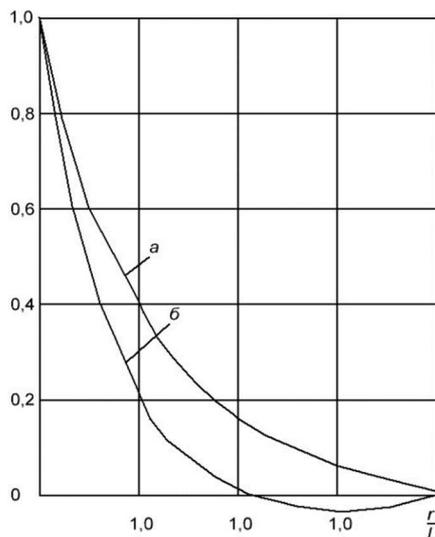


Рисунок 1. – Корреляционная функция турбулентности

Масштабы турбулентности характеризуют длины интервалов, на которых сохраняются корреляционные связи случайного процесса. Эти масштабы определяются как интегралы от нормированных корреляционных функций:

$$L_r = \frac{1}{\sigma_w^2} \int_0^\infty k_r(r) dr; \quad L_n = \frac{1}{\sigma_w^2} \int_0^\infty k_n(r) dr.$$

Между масштабами турбулентности имеется соотношение $L_r = 2L_n$. Для перехода от корреляционных функций, зависящих от координат, к корреляционным функциям, зависящим от времени, следует воспользоваться соотношением, вытекающим из гипотезы замороженности поля скоростей:

$$-r = v\tau,$$

где v – скорость полета БЛА.

Тогда

$$k_r(\tau) = \sigma_w^2 e^{-\alpha|\tau|}; \quad k_n(\tau) = \sigma_w^2 (1 - \alpha|\tau|) e^{-\frac{\alpha|\tau|}{2}},$$

где $\alpha = \frac{v}{L_r} = \frac{v}{2L_n}$.

Корреляционным функциям соответствуют спектральные плотности, аргументом которых является пространственная частота Ω :

$$\left. \begin{aligned} S_r(\Omega) &= \frac{2L_r \sigma_w^2}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + (\Omega L_r)^2} \\ S_n(\Omega) &= \frac{L_n \sigma_w^2}{\pi} \cdot \frac{1 + 3(\Omega L_n)^2}{[1 + (\Omega L_n)^2]^2} \end{aligned} \right\}.$$

Корреляционным функциям соответствуют спектральные плотности временной угловой частоты $w = v\Omega$:

$$S_r(w) = \frac{2 \sigma_w^2 \alpha}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha^2 + w^2}; \quad S_n(w) = \frac{2 \sigma_w^2}{\pi} \cdot \frac{\alpha^2 + 3w^2}{(\alpha^2 + w^2)^2}.$$

Рассмотренные экспериментальные корреляционные функции и спектральные плотности достаточно хорошо описывают характеристики турбулентности в инерциальном интервале и значительно хуже в крупномасштабном и вязком интервалах. Вопреки этому, простота аналитических выражений данных функций служит веским основанием для широкого использования их в практических расчетах. Чаще всего

значения параметров в формулах для корреляционных функций и спектральных плотностей соответственно равны $L_r = 200 \div 300$ м; $\sigma_w = 2 \div 3$ м · с⁻¹ – для ясной погоды; $\sigma_w = 8 \div 3$ м · с⁻¹ – для кучевых облаков и $\sigma_w = 18 \div 25$ м · с⁻¹ – для грозных условий (рисунки 2, 3).

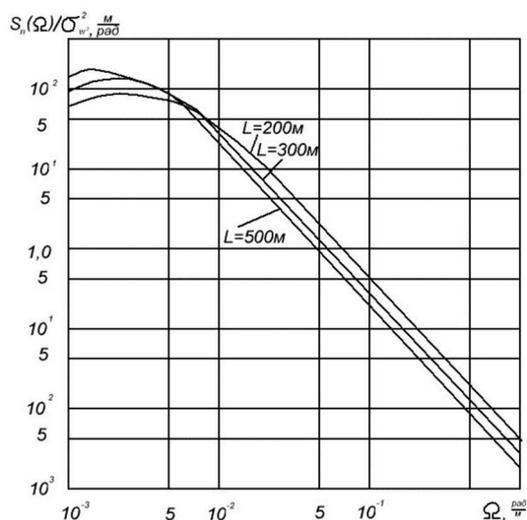


Рисунок 2. – Спектральная плотность тангенциальной составляющей скорости ветра [4]

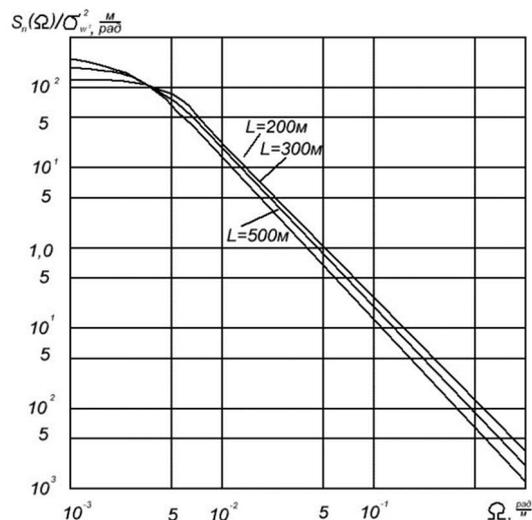


Рисунок 3. – Спектральная плотность нормальной составляющей скорости ветра [4]

Для примера рассмотрим датчик ADIS16495 компании Analog Devices как один из наиболее подходящих для стабилизации.

Нелинейную характеристику электролитического датчика можно приближенно представить в виде кусочно-линейной характеристики типа чистого ограничения. Также в электролитическом датчике имеется существенная нелинейность, обусловленная взаимным влиянием каналов. При наличии угла наклона датчика в другой плоскости β изменяется крутизна характеристики, определяющей зависимость амплитуды выходного напряжения от угла α . Параметры идеализированной кусочно-линейной характеристики датчика, соответствующей наклону оси датчика в плоскости угла β , зависят от угла α . Данные зависимости необходимо учитывать при вычислении гармонических и статических коэффициентов передачи электролитического датчика. В таком случае электролитический датчик можно полагать безынерционным нелинейным звеном типа ограничителя с двумя взаимно связанными каналами.

Электролитические датчики имеют широкое распространение в гироскопических приборах как первичные датчики вертикали места. Простота устройства, малые габариты и высокая чувствительность (менее 1'–2') являются положительными качествами.

Датчик ADIS16495 имеет следующие характеристики [5]:

- 1) трехосевой цифровой гироскоп:
 - варианты диапазонов измерения $\pm 125^\circ/\text{с}$, $\pm 450^\circ/\text{с}$, $\pm 2000^\circ/\text{с}$;
 - погрешность взаимной ориентации осей $\pm 0,05^\circ$;
 - рассогласование ориентации осей относительно корпуса $\pm 0,25^\circ$ (макс.);
 - стабильность смещения в установившемся состоянии $0,8^\circ/\text{час}$;
 - случайный уход по углу $0,09^\circ/\sqrt{\text{час}}$;
- 2) трехосевой цифровой акселерометр:
 - диапазон измерений ± 8 g;
 - стабильность смещения в установившемся состоянии $3,2 \times 10^{-6}$ g;
- 3) выходы показаний по трем осям, приращения угла и приращения скорости;
- 4) заводская калибровка чувствительности, смещения и взаимной ориентации осей:
 - температурный диапазон калибровки от -40°C до $+85^\circ\text{C}$;
- 5) цифровой ввод/вывод: индикатор готовности данных, внешняя тактовая синхронизация;
- 6) варианты синхронизации выборки: внутренняя, внешняя или масштабированная;
- 7) самотестирование внутренних датчиков по запросу;

- 8) однополярное питание от 3,0 В до 3,6 В;
- 9) выдерживает механические ударные нагрузки до 1500 g;
- 10) рабочий температурный диапазон от -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$.

Заключение. Таким образом, выполнен анализ углового мерцания или же блуждания центра отражения, который описывается стационарной случайной функцией и дальностью до отражающей поверхности. Рассмотрена величина закона распределения вероятности Рэлея при помощи изученных экспериментальных данных. Исходя из последнего следует, что среднее квадратическое отклонение постоянной составляющей скорости ветра зависит от высоты над земной поверхностью.

Совокупность воздействующих на БЛА процессов, представленных в виде математических моделей, обеспечивает стабилизацию движения БЛА, а также точность координат, фиксируемых устройством съема информации.

Показано три интервала турбулентного движения, выражающегося в хаотическом случайном перемещении частиц воздуха. Крупномасштабная турбулентность имеет асимметричный характер, а инерционная и вязкая турбулентность – изотропный.

Описан переход от одной корреляционной функции к другой корреляционной функции, зависящий от определенных параметров, при помощи соотношения, вытекающего из гипотезы заморозенности поля скоростей. Обоснованы аналитические выражения, служащие основанием для широкого использования в практических расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиация : энциклопедия / Центр. аэрогидродинам. ин-т им. Н.Е. Жуковского ; редкол.: Г.П. Свищев (гл. ред.) [и др.]. – М. : Науч. изд-во «Большая рос. энцикл.», 1994. – 736 с.
2. Делано, Р. Теория мерцания цели и угловые ошибки при радиолокационном сопровождении / Р. Делано // Вопросы радиолокационной техники. – 1954. – № 1. – С. 108–119.
3. Данн, Дж. Влияние флуктуации эхо-сигнала на работу радиолокационных станций сопровождения / Дж. Данн, Д. Ховард, А. Кинг // Радиотехника и электроника за рубежом. – 1959. – № 6. – С. 97–113.
4. Доброленский, Ю.П. Динамика полета в неспокойной атмосфере / Ю.П. Доброленский. – М. : Машиностроение, 1969. – 260 с.
5. ADIS16495. Инерциальный датчик тактического класса с шестью степенями свободы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.analog.com/ru/products/adis16495.html. – Дата доступа: 21.08.2020.

Поступила 08.10.2020

METHOD FOR EVALUATING THE STABILITY OF OBTAINING INFORMATION FROM THE PARAMETERS OF INSTALLED SENSORS

A. KARLA, V. ZHELEZNYAK

The rapid development and large-scale introduction of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the modern world makes it necessary to solve new problems during flights.

The article discusses the issues of assessing the accuracy of observation parameters that determine the stability of the UAV under various influencing factors that depend not on the aircraft, but on external influences. Literary publications, articles and other sources of information are analyzed. Alternative ways of using resources and their implementation are proposed, which are aimed at determining stability and accuracy. The result of the article is to assess the stability of observation parameters to determine the accuracy and increase the reliability of information.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, stability, reliability of information, influencing factors.*

УДК 623.618

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ
АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ****канд. техн. наук, доц. А.В. ХИЖНЯК, А.Ю. ЛИПЛЯНИН, А.В. СЕРГЕЕНКО
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)**

Представлен универсальный инструментарий исследования работы алгоритмов обнаружения объектов в оптическом диапазоне. Инструментарий позволяет проводить оценку работы алгоритмов на реальной и смоделированной выборках данных, настраивать параметры алгоритмов обнаружения до начала работы и в процессе работы, получать количественные и качественные оценки работы каждого алгоритма и др. Отличительной особенностью инструментария является гибкость его применения при исследовании алгоритмов обнаружения, заключающаяся в возможности изменения математической модели построения кадров генерируемой видеопоследовательности, алгоритмов обнаружения и параметров, оценивающих качество их работы. Рассмотренный универсальный инструментарий позволяет осуществлять выбор алгоритмов обнаружения для конкретных оптико-электронных систем исходя из выполняемых ими задач, а также условий функционирования, что позволит увеличить эффективность работы оптико-электронной системы в целом.

Ключевые слова: алгоритмы обнаружения, оценка качества, оптические системы.

Введение. На сегодняшний день оптические системы обработки изображений плотно вошли в повседневную жизнь современного общества. Они нашли применение во многих сферах: в медицине (обработка рентгеновских снимков и изображений МРТ), в военном деле (обнаружение воздушных и наземных целей и наведение высокоточного оружия), в исследовании космоса (обработка снимков Земли и прочих космических объектов) и др. Каждая оптическая система обработки изображений способна решать широкий спектр задач: выполнять распознавание образов и объектов, восстановление, фильтрацию, оценку параметров, сжатие изображений и др. [1].

Одной из наиболее актуальных, но при этом трудоемких и сложных с научной точки зрения задач, решаемых оптическими системами обработки изображений, является задача обнаружения объектов. Сложность решения задачи обнаружения заключается в том, что всем оптическим системам присущ ряд типичных недостатков: зависимость дальности обнаружения от погодных условий, искажения изображений и др.

Одним из главных компонентов любой системы обнаружения, наравне с собственно оптическими средствами, является используемый алгоритм обнаружения. В системах обработки изображений сегодня можно встретить как алгоритмы, относящиеся к классическим (основанные на цветовой модели объекта, корреляционном методе, вычитании фона), так и алгоритмы на основе набирающего все большую популярность машинного обучения (сверточные нейронные сети, дескрипторы изображений, классификаторы и др.) [1].

В основе работы каждого алгоритма лежит один или несколько принципов обнаружения. Выбор принципа обнаружения, лежащего в основе алгоритма обнаружения, зависит от условий работы оптической системы, а также наличия или отсутствия априорной информации об искомом объекте.

Таким образом, можно сделать вывод, что не существует универсального алгоритма обнаружения, подходящего под любые условия работы оптической системы. Отсутствие универсального алгоритма приводит к тому, что для каждой системы требуется выбирать либо синтезировать алгоритм, наиболее подходящий для решения поставленных перед ней задач. Неверный выбор алгоритма влечет за собой снижение эффективности работы всей системы в целом, и, соответственно, невыполнение поставленных задач.

Целью статьи является разработка универсального инструментария, позволяющего автоматизировать процесс исследования алгоритмов обнаружения в различных условиях фоновой-целевой обстановки за счет автоматизации процесса построения смоделированных видеопоследовательностей и автоматизации процесса оценки качества работы алгоритмов обнаружения; проведение исследований алгоритмов обнаружения воздушных объектов в оптическом диапазоне с использованием разработанного инструментария, а также выработка рекомендаций по их дальнейшему использованию.

Основная часть. Разрабатываемый инструментарий должен включать в себя графический интерфейс, блок генерации моделируемой видеопоследовательности, набор реализованных алгоритмов обнаружения, а также блок оценки результатов работы алгоритмов обнаружения. Кроме того, должна быть реализована возможность гибкого изменения математической модели генерируемых кадров видеопоследовательности, добавления новых алгоритмов обнаружения и изменения параметров, позволяющих оценить результаты работы алгоритмов.

Для создания инструментария выбран язык программирования C++. Достоинствами языка являются поддержка объектно-ориентированного программирования, кроссплатформенность и возможность низкоуровневой работы с адресами памяти.

В качестве среды разработки была выбрана Microsoft Visual Studio, достоинствами которой являются встроенный компилятор, удобный механизм отладки и релиза разрабатываемых приложений. Также при программной реализации встроенных алгоритмов обнаружения и модели построения видеопоследовательности широко использовалась OpenCV – библиотека алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений с открытым исходным кодом.

Для гибкого изменения модели генерируемой видеопоследовательности, добавления новых алгоритмов и изменения методики оценки результатов работы алгоритмов обнаружения была реализована возможность дополнительного подключения к инструментарию сторонних dll-библиотек (Dynamic Link Library – *англ.*, библиотека динамической компоновки).

Исследовательский инструментарий структурно состоит из трех независимых, последовательно соединенных блоков: блока генерации моделируемой видеопоследовательности, блока алгоритмов обнаружения и блока оценки качества работы алгоритмов. Каждый из этих блоков может быть заменен соответствующей ему dll-библиотекой, что и обеспечивает требуемую гибкость инструментария.

Наличие блока генерации моделируемой видеопоследовательности обусловлено тем, что при разработке оптических систем обнаружения, а именно на этапе выбора принципов и алгоритмов обнаружения, не может идти речь о верификации модели изображения на основе экспериментальных данных или полунатурного моделирования ввиду существенных материальных затрат при соблюдении необходимого и достаточного количества экспериментов для обеспечения точности полученных результатов. Очевидным решением является математическое моделирование условий работы системы обнаружения. Поскольку для моделирования оптических систем, различных условий их работы (как внутренних, так и внешних), воздействия различных помех и т.п. необходимо использовать соответствующие математические модели, то в инструментарии реализована возможность замены встроенной математической модели построения изображения (кадра).

Необходимость использования блока алгоритмов обнаружения обуславливается тем, что на сегодняшний день существует большое количество подобных алгоритмов. Кроме того, их число постоянно увеличивается за счет разработки новых и улучшения старых алгоритмов. Поэтому, помимо работы с четырьмя встроенными алгоритмами, следует обеспечить возможность использования сторонних алгоритмов обнаружения.

Заключительным блоком исследовательского инструментария является блок оценки качества работы алгоритмов обнаружения. Наличие данного блока в инструментарии обусловлено тем, что для оценки качества работы алгоритмов обнаружения можно применять различные параметры. В связи с этим реализована возможность замены встроенных параметров оценки качества на сторонние. Результатом работы блока являются файлы, содержащие оценки качества, полученные в соответствии с выбранными параметрами. Также данный блок имеет специальный модуль, позволяющий при наличии нескольких выходных файлов с оценками качества представить эти оценки в виде графиков.

Таким образом, структура инструментария при замене каждого блока соответствующей ему dll-библиотекой дает широкие возможности по комбинированию между собой различных математических моделей построения изображения, алгоритмов обнаружения и параметров оценки качества работы алгоритмов.

Рассмотрим подробнее структуру дополнительных dll-библиотек для каждого блока инструментария.

Структура dll-библиотеки для блока генерируемой видеопоследовательности должна содержать три функции:

- 1) `void readParamFile(QString fileName);`
- 2) `void setParams (std::vector<int> params);`
- 3) `void generateVideo(QString savePATH).`

Первая функция предназначена для установки параметров формируемой видеопоследовательности. Единственный аргумент, который она принимает, – это путь к файлу, в котором собственно указаны требуемые параметры. В качестве параметров для начала работы могут выступать: размер изображения объекта, среднеквадратическое отклонение яркости шума, отношение сигнал/шум, среднее значение яркости пикселей фона, размеры кадра, количество кадров в видеопоследовательности и т.п.

Вторая функция используется для динамического изменения параметров формируемой видеопоследовательности, в качестве входного параметра принимает вектор, содержащий значения изменяемых параметров.

Третья функция предназначена непосредственно для формирования видеопоследовательности. Принимаемый параметр указывает директорию, где необходимо сохранить видеопоследовательность. Тело функции содержит программную реализацию математической модели генерируемого кадра.

Структура dll-библиотеки блока алгоритмов обнаружения включает в себя четыре функции:

- 1) `void readParams(QString fileName);`
- 2) `void setTempImgs(QString PATHName);`

3) `void setParams(std::vector<doubl> params);`

4) `void work(cv::Mat testImg).`

Первая функция предназначена для установки настраиваемых параметров, в качестве которых могут выступать: заданная вероятность ложной тревоги, пороги обнаружения, указания необходимости загрузки дополнительных файлов и т.п. Входным параметром функции является путь к файлу настроек.

Вторая функция является необязательной и используется с целью загрузки дополнительных файлов для работы алгоритма обнаружения, например, опорного изображения или их группы для корреляционного обнаружителя или дескриптора изображений, обученного классификатора и т.п. Во входном параметре указывается путь к директории, где находятся данные файлы.

Третья функция предназначена для динамического изменения параметров алгоритма в процессе его работы. Входным параметром является вектор, содержащий значения изменяемых параметров.

Четвертая функция принимает тестовое (обрабатываемое) изображение. В данной функции непосредственно заключена программная реализация алгоритма обнаружения. Также данная функция осуществляет вывод обработанного изображения на экран и отвечает за передачу данных, необходимых для блока оценки качества работы алгоритмов.

Структура dll-библиотеки для блока оценки качества работы алгоритмов обнаружения включает в себя две функции:

1) `void getObj(std::vector<Ceil> *trueObj, std::vector<Ceil> *predictObj);`

2) `void result(QString namePATH).`

Первая функция предназначена для принятия данных о входных и выходных данных алгоритма обнаружения. В качестве входных данных выступает количество объектов, находящихся в кадре, и параметры их настоящих ограничивающих прямоугольников. В качестве выходных данных выступает информация о детектированных объектах и их предсказанных ограничивающих прямоугольниках.

Вторая функция в качестве параметра принимает путь к директории для сохранения файлов, которые содержат оценку качества работы исследуемого алгоритма. Непосредственно в этой функции заключена программная реализация алгоритма оценки качества работы по выбранным параметрам.

При отсутствии подключаемых dll-библиотек для работы инструментария используются встроенная математическая модель генерируемой видеопоследовательности, встроенные алгоритмы обнаружения и встроенные параметры оценки качества работы алгоритмов обнаружения.

Проанализируем встроенные модель построения кадров видеопоследовательности, один из реализованных алгоритмов обнаружения и параметры оценки качества работы алгоритмов обнаружения.

Встроенная математическая модель основана на принципе построения кадра с заданным соотношением сигнал/шум. В данной модели заданное отношение сигнал/шум подразумевает, что в каждом кадре среднее значение яркости пикселей, принадлежащих изображению объекта, находится вне диапазона яркостей, нижняя и верхняя граница которого вычисляются по формулам [1]

$$L = M - R \times \sigma; \quad (1)$$

$$H = M + R \times \sigma, \quad (2)$$

где L – нижняя граница яркости;

H – верхняя граница яркости;

R – отношение сигнал/шум;

σ – среднеквадратическое отклонение яркости шума;

M – среднее значение яркости пикселей фона.

Рассмотрим один из встроенных алгоритмов обнаружения, в основе работы которого лежит принцип построения модели изображения, – алгоритм корреляционного обнаружителя. Работа данного алгоритма обнаружения основана на сопоставлении функции яркости тестового изображения с эталоном. При реализации процедуры обнаружения эталон последовательно перемещается по полю изображения, и в каждом положении исследуется его сходство с реальной функцией яркости на фрагменте. Сравнение эталона с участком изображения осуществляется по формуле взаимной корреляции [2]

$$B(m, n) = \sum_{(k, l) \in D} x(m + k, n + l) t(k, l), \quad (3)$$

где $t(k, l)$ – функция яркости эталона;

$x(m, n)$ – отсчеты функции яркости наблюдаемого изображения.

При превышении $B(m, n)$ некоторого порога принимается решение, что объект обнаружен.

Кроме корреляционного алгоритма блок включает еще три наиболее распространенных алгоритма обнаружения, в основе работы которых лежит принцип построения модели фона: алгоритм вычитания фона, анализ распределения случайной величины (алгоритм яркостных гистограмм с локальной пороговой

обработкой), а также комбинацию принципов обнаружения (в частности, анализ распределения случайной величины, а именно вейвлет-коэффициентов Хаара, совместно с принципом построения модели объекта – корреляционным обнаружителем).

В инструментарии для оценки качества работы алгоритмов обнаружения по умолчанию используются две группы параметров: группа оценки правильности определения факта наличия или отсутствия цели в кадре и группа оценки правильности определения положения объекта в кадре.

Для оценки параметров первой группы требуется сгруппировать выходные данные следующим образом [3]:

- 1) истинно-положительные (true positives, tp);
- 2) ложноположительные (false positives, fp);
- 3) ложноотрицательные (false negatives, fn).

Непосредственно правильность обнаружения оценивается с помощью двух параметров:

- 1) точность (precision, P) – отношение верно детектированных объектов к общему числу детектированных объектов [3];
- 2) полнота (recall, R) – отношение верно детектированных объектов к общему числу объектов, которые должны быть детектированы [3].

Для оценки второй группы параметров используются координаты настоящих и предсказанных (предполагаемых, обнаруженных) ограничивающих прямоугольников. На основе этих данных рассчитываются следующие параметры:

- 1) пересечение над объединением – отношение площадей настоящего и предсказанного прямоугольников [6];
- 2) ошибки определения координат центра – модуль разности координат центра настоящего и предсказанного ограничивающих прямоугольников [6].

При использовании встроенной методики оценки качества работы результат представляется в виде одного выходного файла. Он содержит рассчитанную первую группу оцениваемых параметров, а также среднее значение пересечения над объединением (среднее арифметическое значение схожести) для всей видеопоследовательности.

Продемонстрируем работу предлагаемого универсального инструментария на примере исследования реализованных алгоритмов обнаружения. Для оценки качества их работы применялись встроенные параметры оценки, а в качестве тестовых использовались видеопоследовательности, сгенерированные при помощи встроенной математической модели построения изображения.

Для исследования было сгенерировано пять видеопоследовательностей со следующими параметрами: размеры кадра – 1280×720 пикселей, размеры объекта интереса – 20×20 пикселей, размер видеопоследовательности 2000 кадров. Данные параметры были неизменными для всех пяти видеопоследовательностей в отличие от отношения сигнал/шум, значение которого изменялось в диапазоне от 1 до 9 с шагом 2. По завершении исследования работы алгоритмов были получены результаты, представленные на рисунках 1–3. По зависимостям на этих рисунках можно сделать выводы, что точность и полнота обнаружения целей для всех исследованных алгоритмов связаны прямо пропорционально с отношением сигнал/шум. Эта связь обусловлена тем, что все исследуемые алгоритмы для обнаружения объекта, так или иначе, осуществляют сравнение функций яркости объекта и фона, при этом точность обнаружения зависит от значения отношения сигнал/шум в большей степени, чем полнота.

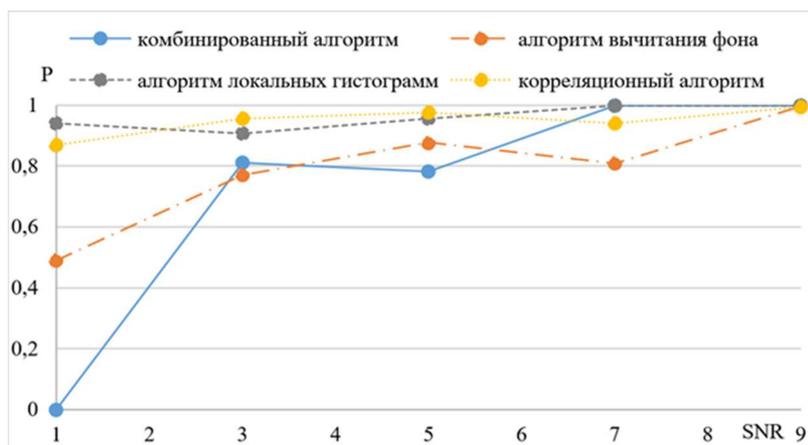


Рисунок 1. – Зависимость точности обнаружения цели от отношения сигнал/шум для смоделированной видеопоследовательности

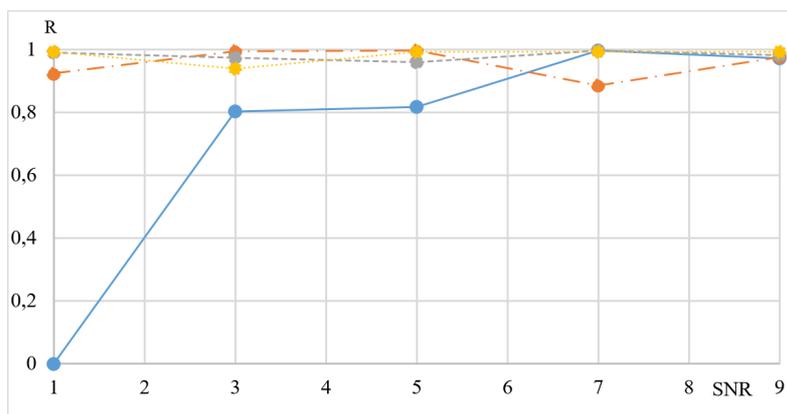


Рисунок 2. – Зависимость полноты обнаружения цели от отношения сигнал/шум для смоделированной видеопоследовательности

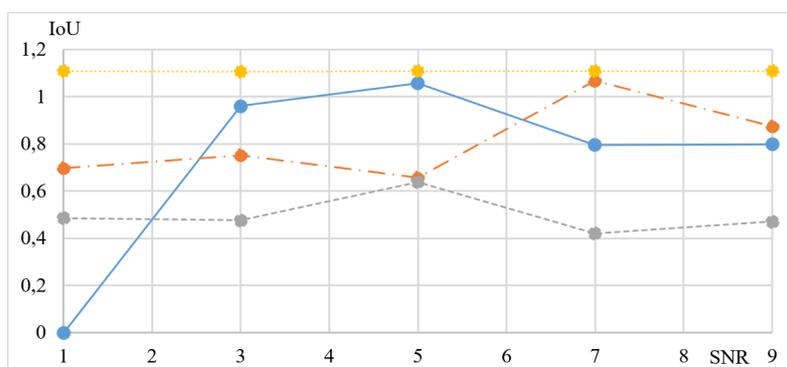


Рисунок 3. – Зависимости среднего арифметического значения схожести от отношения сигнал/шум для смоделированной видеопоследовательности

Важно отметить, что с точки зрения оценки точности и полноты обнаружения лучшие результаты работы продемонстрировали алгоритмы локальных гистограмм и корреляционного обнаружителя. Для корреляционного алгоритма это во многом обуславливается тем, что искомый объект практически не изменен на протяжении всей тестовой видеопоследовательности, а для алгоритма локальных гистограмм – тем, что размеры областей, в которых происходит бинаризация исходного изображения, позволяют захватить пиксели, принадлежащие как фону, так и объекту, что и обеспечивает их разделение на два типа.

В то же время комбинированный алгоритм показал наихудшие результаты. Такие низкие показатели точности и полноты вызваны особенностью используемых вейвлет-преобразований и особенностью генерации кадров видеопоследовательности, а именно отсутствием четкой границы между объектом и фоном. Результатом этого явилось низкое значение высокочастотных вейвлет-коэффициентов Хаара (значение коэффициента примерно 2–3), что не позволило алгоритму точно определить границы искомого объекта.

Из рисунка 3 видно, что практически все алгоритмы имеют слабую зависимость (не имеют зависимости) между отношением сигнал/шум и средним значением схожести. Исключением является алгоритм вычитания фона. Это обусловлено особенностью работы алгоритма, связанной с построением модели фона: при малом значении отношения сигнал/шум и с учетом того, что граничные пиксели фона и объекта имеют незначительные различия, алгоритм «увеличивает» размеры объекта.

Отсутствие зависимости среднего значения схожести от отношения сигнал/шум для корреляционного обнаружителя обусловлено особенностями работы алгоритма, а именно тем, что площадь предсказанного ограничивающего прямоугольника равна площади эталона, которая, в свою очередь, близка по размеру к настоящему ограничивающему прямоугольнику. На протяжении всей видеопоследовательности размеры как эталонного изображения, так и настоящего ограничивающего прямоугольника остаются неизменными, чем и объясняется постоянное значение схожести.

Если исключить корреляционный алгоритм обнаружения, то с точки зрения точности обнаружения лучшие результаты продемонстрировал комбинированный алгоритм обнаружения. Это обусловлено тем, что для определения границы объекта и фона используется небольшое значение высокочастотного коэффициента Хаара (примерно 5–7), что позволяет с высокой точностью определять реальные границы искомого объекта.

Худшие же результаты показал алгоритм локальных гистограмм, т.к. для построения предсказанных ограничивающих прямоугольников используются промежуточные бинарные изображения, на которых происходит определение границы групп пикселей, обозначающих искомый объект. Точность определения границ в данном случае будет зависеть от размеров областей, которые используются для операции группирования.

Результаты, представленные на рисунках 1–3, получены для относительно большого значения отношения сигнал/шум. На реальных видеопоследовательностях зачастую отношение сигнал/шум значительно ниже и не превышает 2. Работа этих же алгоритмов обнаружения была исследована на реальной видеопоследовательности с параметрами: размер кадра видеопоследовательности – 1280×720 пикселей, размер объекта изменяется в диапазоне от 20×25 до 100×110 пикселей, размер видеопоследовательности – 2000 кадров, отношение сигнал/шум изменяется от 1 до 1,6. Результаты исследования представлены на рисунках 4–6.

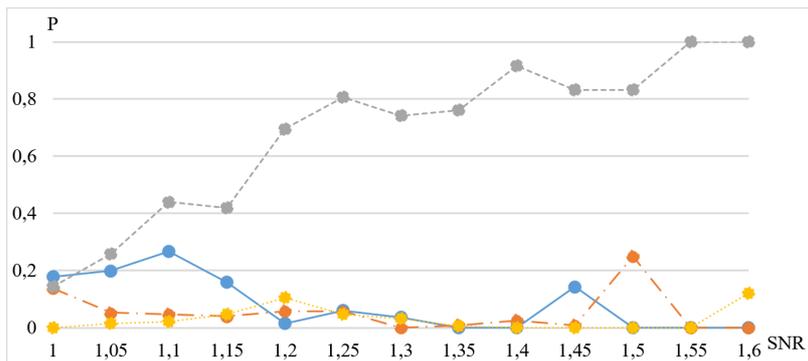


Рисунок 4. – Зависимости точности обнаружения от отношения сигнал/шум для реальной видеопоследовательности

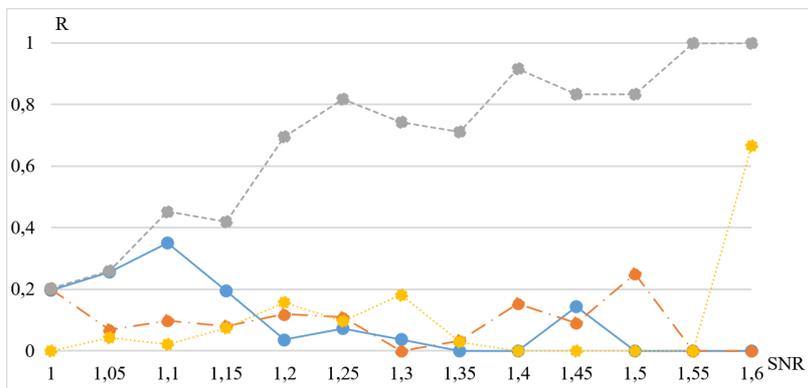


Рисунок 5. – Зависимости полноты обнаружения от отношения сигнал/шум для реальной видеопоследовательности

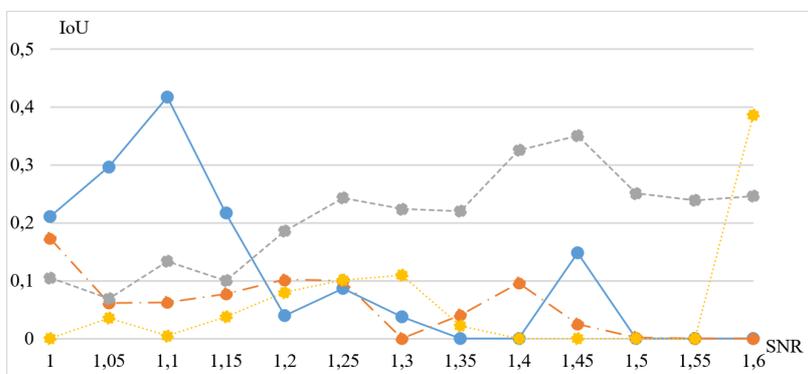


Рисунок 6. – Зависимость среднего арифметического значения схожести от отношения сигнал/шум для реальной видеопоследовательности

По графикам на рисунках 4–6 можно сделать вывод, что прямая зависимость точности и полноты обнаружения от отношения сигнал/шум наблюдается только для алгоритма локальных гистограмм. Определяющим фактором здесь является то, что в обрабатываемой видеопоследовательности объект интереса (самолет) представлял собой область с однородной яркостью, находившуюся на однородном фоне, отличавшемся по яркости, т.е. объект являлся контрастным. При этом среднее значение схожести для данного алгоритма на реальной видеопоследовательности аналогично имеет слабую зависимость от отношения сигнал/шум, что также объясняется особенностью локализации объекта, описанной ранее.

Корреляционный алгоритм показал низкие значения потому, что объект интереса постоянно находился в движении, тем самым изменялось и положение объекта в кадре, которое за частую не совпадало с положением объекта на эталонном изображении. Изменением положения объекта от кадра к кадру обусловлено и изменение размеров настоящих ограничивающих прямоугольников, в то время как эталонное изображение остается неизменным, а, следовательно, и размеры предсказанных ограничивающих прямоугольников, чем объясняется малое значение схожести.

Комбинированный алгоритм показал низкое качество в связи с тем, что из-за движения как объекта интереса, так и камеры граница между объектом и фоном размывается. Результатом этого явилось низкое значение высокочастотных вейвлет-коэффициентов Хаара (значение коэффициента примерно 2–3), что не позволило алгоритму точно определить границы искомого объекта.

Низкое качество работы алгоритма вычитания фона обусловлено движением оптической системы.

Из полученных результатов очевидно, что на реальных видеопоследовательностях выявляются недостатки, которые не были обнаружены при исследовании на сгенерированных видеопоследовательностях. В связи с этим возникает необходимость разработки других математических моделей построения кадров видеопоследовательности, более детально описывающих реальные видеопоследовательности, например, учитывающих такие явления, как изменение искомого объекта с течением времени, движение камеры и др. Также на реальной видеопоследовательности проявляется сильное влияние качества обрабатываемого кадра на качество работы алгоритмов обнаружения.

Проанализировав зависимости на рисунках 1–6, можно дать следующие рекомендации по использованию встроенных алгоритмов обнаружения на реальных оптических системах обнаружения:

- алгоритм вычитания фона следует применять только в тех условиях работы, когда оптическая система стационарна, а передвигаются искомые объекты. Также необходимо проводить мероприятия по компенсации дребзга платформы;
- корреляционный обнаружитель может работать как на подвижных, так и на стационарных оптических системах, но для эффективной работы необходимо тщательно подбирать эталонные изображения объекта. Главным противоречием в выборе эталонных изображений является минимизация количества эталонов при условии максимально точного описания объекта. При большом количестве эталонов алгоритм будет очень «дорогостоящим» для вычислений, а при недостаточном описании – неэффективно работающим;
- алгоритм локальных гистограмм также можно применять как на подвижных, так и на стационарных оптических системах, когда не требуется высокая точность определения положения объекта в кадре и только при простой фоновой обстановке;
- комбинированный алгоритм обнаружения также подходит для применения как на подвижных, так и на стационарных оптических системах в тех случаях, когда требуется высокая точность определения положения объекта в кадре и только в простой фоновой обстановке.

Важно отметить, что при анализе работы алгоритмов обнаружения необходимо однозначно характеризовать качество входного изображения. Так, наиболее распространенной является метрика отношения сигнал/шум. Она неплохо характеризует изображение, когда объект поиска контрастирует с фоном, что характерно для области применения алгоритмов локальных гистограмм, вычитания фона. В случае, когда объект малоконтрастен и изображен на сложной сцене, обнаружение объектов строится на основе образа объекта (алгоритмы: корреляционный, SVM, нейросеть), метрика отношения сигнал/фон плохо характеризует пригодность входного изображения. Для описанного случая наиболее подходящей является метрика, оценивающая границы объектов на изображении, например, гистограмма градиента яркости изображения [7].

При проведении исследования алгоритмов обнаружения была выявлена сильная зависимость качества их работы от качества изображения. Так, при обработке кадра, где наблюдалось размытие искомого объекта, ни один алгоритм не смог правильно обнаружить искомый объект. Для устранения этой проблемы требуется предварительная (до обработки алгоритмом обнаружения) подготовка очередного кадра с целью улучшения его качества.

Заключение. Функциональные возможности разработанного инструментария дают возможность производить следующие операции:

- проводить оценку работы алгоритмов обнаружения в различных условиях как на смоделированной, так и на реальной выборке данных;
- производить настройку параметров алгоритмов обнаружения до начала работы и в процессе их работы;

- получать количественные и качественные оценки работы каждого алгоритма;
- динамически добавлять новые алгоритмы обнаружения, методики оценки качества работы алгоритмов обнаружения, а также математические модели построения кадров видеопоследовательности;
- производить разметку тестовых видеопоследовательностей, т.е. производить выделение областей в кадре, где находятся искомые объекты;
- комбинировать различные математические модели построения кадров видеопоследовательности с различными алгоритмами обнаружения.

Таким образом, разработанный универсальный инструментарий может применяться при разработке оптических систем обнаружения, поскольку с его помощью на этапе выбора алгоритма обнаружения можно произвести сравнительное исследование имеющихся алгоритмов, а по выбранному критерию определить алгоритм, наиболее подходящий к заданным условиям работы, а также определить рекомендованные настраиваемые параметры.

В дальнейшем планируется реализация новых математических моделей построения кадров видеопоследовательности, учитывающих ранее указанные недостатки, а также реализация новых алгоритмов обнаружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С.М. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
2. Кустикова, В.Д. Разработка мультимедийных приложений с использованием библиотек OpenCV и IPP / В.Д. Кустикова. – Нижний Новгород : НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2013. – 34 с.
3. Сергеев, В.В. Обнаружение объектов на изображении / В.В. Сергеев, М.В. Гашников, В.В. Мясников. – Самара : СГАУ, 2010. – 23 с.
4. Боровик, Е.С. Исследование интеллектуальных систем технического зрения техногенных объектов / Е.С. Боровик. – Томск : ФИТ ТГУ, 2018. – 74 с.
5. Автоматическое обнаружение и сопровождение динамических объектов на изображениях, формируемых оптико-электронными приборами в условиях априорной неопределенности. Методы и алгоритмы / Гузенко О.Б. [и др.] ; под ред. А.А. Храмычева – М. : Радиотехника, 2015. – 280 с.
6. Никитина, А.В. Исследование и разработка алгоритмов обнаружения с подвижной платформы окружающих объектов / А.В. Никитина. – СПб. : СПбПУ, 2017. – 93 с.
7. Обоснование критерия оценки качества восстановления искаженных изображений для итерационного алгоритма в системах корреляционного обнаружения / А.Ю. Липлянин [и др.] // Докл. БГУИР. – 2019. – № 4. – С. 64–72.

Поступила 09.11.2020

ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR DETECTING TARGETS IN THE OPTICAL RANGE

A. KHIZNIAK, A. LIPLIANIN, A. SERGEENKO

A universal tool for research of work algorithms for detecting targets in optical range is present. Tool allows us to make an estimation of work algorithms on real and modeling data sample, configure the algorithm detecting parameters before starting the work and during work. This tool give the possibility quantitative and qualitative evaluation of work and other. The universal tool has distinctive feature it is flexibility of the application for research algorithms for detecting, consisting in the ability to change mathematical model for construction frames of the generated video sequence, algorithms of detecting and parameters, estimating the quality of their work. Considered universal tool allows us to make a selection of the algorithms of detecting for specific opto-electronic systems, based on performed tasks, also working conditions, witch allows to increase the efficiency work of opto-electronic system.

Keywords: *detection algorithm, evaluating the quality, optical system.*

УДК 517.58:519.722

**ПОПРАВКИ К ФОРМУЛЕ СТИРЛИНГА,
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ЭКСЦЕССАМИ ГАММА-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

*д-р техн. наук, проф. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ,
канд. физ.-мат. наук, доц. О.В. ГОЛУБЕВА, О.Н. ЗАБЕЛЕНДИК, Т.С. СТРУК
(Полоцкий государственный университет)*

В работе развит основанный на теории информации и методе статистических моментов подход к получению формулы Стирлинга для факториалов с большими аргументами. Обоснована процедура поиска поправок к асимптотическому выражению Стирлинга, обусловленных эксцессами гамма распределения случайной величины. С ее помощью получена приближенная формула для вычисления $n!$, относительная погрешность которой убывает с ростом аргумента, как $1/n^3$.

Ключевые слова: формула Стирлинга, энтропия, гамма распределение, эксцессы высших порядков.

Введение. При компьютерном моделировании природных и технологических процессов (например, динамики сорбции [1]) возникает необходимость вычисления факториалов с большими аргументами. При этом возможности прикладных пакетов имеют ограничения по максимальным значениям фигурирующих в числовых расчетах величин [2]. Преодолеть эту трудность можно разбив $n!$ на группу множителей, каждый из которых участвует в расчетах автономно. В частности, сделать это можно с помощью асимптотической формулы Стирлинга, поправки к которой необходимо учитывать для обеспечения требуемой точности вычислений. Обоснованию процедуры их получения, основанной на методе статистических моментов, посвящена данная публикация.

Получение асимптотического выражения. С помощью n -кратного интегрирования по частям и правила Лопиталья можно убедиться в справедливости цепочки равенств

$$\int_0^{\infty} x^n e^{-x} dx = n \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx = \dots = n! \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (1)$$

Разделив левую и правую части (1) на $n!$ получим равенство

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{n!} x^n e^{-x} dx = 1, \quad (2)$$

которое можно интерпретировать как условие нормировки для плотности вероятности

$$f(x) = \frac{1}{n!} x^n e^{-x} \quad (3)$$

некоторой неотрицательной случайной величины X [3]. С помощью (1), (3) найдем ее математическое ожидание

$$M(X) = \int_0^{\infty} x f(x) dx = \frac{1}{n!} \int_0^{\infty} x^{n+1} e^{-x} dx = \frac{(n+1)!}{n!} = n+1, \quad (4)$$

дисперсию и среднеквадратическое отклонение:

$$M(X^2) = \int_0^{\infty} x^2 f(x) dx = \frac{1}{n!} \int_0^{\infty} x^{n+2} e^{-x} dx = \frac{(n+2)!}{n!} = (n+1)(n+2),$$

$$D(X) = M(X^2) - M(X)^2 = (n+1)(n+2) - (n+1)^2 = n+1, \quad (5)$$

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)} = \sqrt{n+1}. \quad (6)$$

То, что $M(X)$ и $D(X)$ аддитивно зависят от n с учетом свойств математического ожидания и дисперсии означает, что X представляет собой сумму $n+1$ независимых случайных слагаемых X_i с единичными математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями

$$M(X_i) = \sigma(X_i) = 1. \quad (7)$$

Свойством (7) обладают случайные величины, распределенные по экспоненциальному закону

$$f_i(x) = e^{-x}, \quad (i = 1, 2, \dots, n + 1),$$

что согласуется с формулой (3) при $n=0$. То есть, полагая в (3)–(6)

$$m = n + 1, \tag{8}$$

получим плотность вероятности суммы m независимых экспоненциально распределенных случайных слагаемых

$$f(m, x) = \frac{1}{(m-1)!} x^{m-1} e^{-x} \quad (m = 1, 2, \dots), \tag{9}$$

известную как гамма-распределение с m степенями свободы [3].

Согласно (4), (6) при больших m слева от матожидания в области возможных значений X помещается сколь угодно много среднеквадратических отклонений

$$(M(X) - 0) / \sigma(X) = \sqrt{m} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \infty,$$

то есть, в соответствии с неравенством Чебышева [3], область возможных значений X из полубесконечной ($x \in [0, \infty)$) при $m \rightarrow \infty$ превращается как бы в бесконечную. На ней максимум энтропии обеспечивается нормальным распределением [3; 4]

$$f(m, x) \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi m}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2m}}. \tag{10}$$

В справедливости последних рассуждений можно убедиться и непосредственно, вычислив с помощью (1), (9) асимметрии и эксцессы функции распределения. Для этого потребуются начальные

$$v_k(m) = \int_0^\infty x^k f(m, x) dx = \frac{1}{(m-1)!} \int_0^\infty x^{m-1+k} e^{-x} dx = \frac{(m-1+k)!}{(m-1)!} = m(m+1)\dots(m-1+k) \tag{11}$$

и центральные моменты высших порядков

$$\mu_k(m) = \int_0^\infty (x - v_1(m))^k f(m, x) dx = \sum_{i=0}^{k-2} (-1)^i C_k^i \cdot v_{k-i}(m) \cdot v_1^i(m) + (-1)^k (1-k) v_1^k(m), \tag{12}$$

где C_k^i – числа сочетаний из k объектов по i .

В частности, из (6), (10), (11) и (12) следует, что

$$\mu_0(m) = 1, \quad \mu_1(m) = 0, \quad \mu_2(m) = 1, \tag{13}$$

как и при любой плотности вероятности, а все асимметрии и эксцессы

$$A_{2k+1}(m) = \frac{\mu_{2k+1}(m)}{m^{(2k+1)/2}}, \quad E_{2k+2}(m) = \frac{\mu_{2k+2}(m)}{m^{k+1}} - 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2k+1) \quad (k = 1, 2, \dots)$$

являются бесконечно малыми при $m \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} A_3(m) &= \frac{2}{m^{1/2}}, & A_5(m) &= \frac{20}{m^{1/2}} + \frac{24}{m^{3/2}}, & A_7(m) &= \frac{210}{m^{1/2}} + \frac{924}{m^{3/2}} + \frac{720}{m^{5/2}}, \dots; \\ E_4(m) &= \frac{6}{m}, & E_6(m) &= \frac{130}{m} + \frac{120}{m^2}, & E_8(m) &= \frac{2380}{m} + \frac{7308}{m^2} + \frac{5040}{m^3}, \end{aligned} \tag{14}$$

что соответствует нормальной асимптотике (10).

Подставив в (10) любое x из интервала, обеспечивающего для нормального закона практически весь вклад в энтропию (например $x = m$), получим с учетом (9)

$$\frac{1}{(m-1)!} m^{m-1} e^{-m} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi m}}, \quad (15)$$

откуда, пренебрегая единицами по сравнению с m , получим асимптотическое выражение для факториалов с большими аргументами

$$m! \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \sqrt{2\pi m} m^m e^{-m}, \quad (16)$$

известное, как формула Стирлинга [5].

Получение поправок. Уточнить правую часть (16) можно, получив поправки к асимптотике (15), обусловленные эксцессами гамма-распределения¹

$$\frac{\mu_{2k}(\tau)}{m^k} \equiv \int_{-\sqrt{m}}^{\infty} \xi^{2k} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\varphi_i(\xi)}{m^i} \right) d\xi, \quad (17)$$

где

$$\xi(m, x) = (x - m) / \sqrt{m}, \quad (18)$$

а $\varphi_i(\xi)$ – некоторые функции, раскладываемые по четным степеням ξ

$$\varphi_i(\xi) = \sum_{l=0}^{3i} c_{il} \xi^{2l} \quad (19)$$

и подлежащие определению с помощью (14)².

Тождество (17) должно выполняться при любых, в том числе и бесконечно больших, m . При этом важно, что $\int_{-\infty}^{-\sqrt{m}} \xi^{2n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi$ является бесконечно малой более высокого порядка, чем $1/m^i$, в чем легко убедиться с помощью правила Лопиталю

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\int_{-\infty}^{-\sqrt{m}} \xi^{2n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi}{1/m^i} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{m^n e^{-\frac{m}{2}}}{-i\sqrt{2\pi}/m^{i+1}} = \frac{1}{-i\sqrt{2\pi}} \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{m^{n+i+1}}{e^{m/2}} = 0.$$

С учетом этого обстоятельства выполним интегрирование в (17):

$$\frac{\mu_{2k}(\tau)}{m^k} \equiv I(k) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{m^i} \sum_{l=0}^{3i} I(k+l) c_{il}, \quad (20)$$

где

$$I(n) = \int_{-\infty}^{\infty} x^{2n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \begin{cases} 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1), & n = 1, 2, \dots \\ 1, & n = 0 \end{cases}.$$

В частности, полагая в (20) $k = 0, 1, 2, 3$ и приравнивая коэффициенты при $1/m$ в левой и правой части полученных равенств, запишем с учетом (13), (14), (19) систему линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов c_{il} . Ее решение, записанное в матричной форме, имеет вид

¹ Асимметрии вклада не дадут, ибо их учет добавляет в (10) слагаемые, нечетные относительно математического ожидания, т.е. обращающиеся в ноль при $x = m$.

² При этом коэффициенты с более высокими степенями ξ оказываются равными нулю.

$$\hat{c}_1 = \hat{a}_3^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 6 \\ 130 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/12 \\ 1 \\ -7/12 \\ 1/18 \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где

$$\hat{c}_i = \begin{pmatrix} c_{i0} \\ c_{i1} \\ \dots \\ c_{i3i} \end{pmatrix}, \quad \hat{a}_n = \begin{pmatrix} I(0) & I(1) & \dots & I(n) \\ I(1) & I(2) & \dots & I(n+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I(n) & I(n+1) & \dots & I(2n) \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Если попытаться в (19) увеличить старшую степень $\varphi_1(\xi)$ на две единицы, в (20) также следует положить $k=4$. В результате с учетом разложения (14) для $E_8(m)$ вместо (21) получим

$$\begin{pmatrix} c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \\ c_{14} \end{pmatrix} = \hat{a}_4^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 6 \\ 130 \\ 2380 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/12 \\ 1 \\ -7/12 \\ 1/18 \\ 0 \end{pmatrix},$$

что подтверждает правильность верхнего предела суммирования в (19).

С точки зрения решаемой задачи (уточнение формулы Стирлинга) в (21) существенно лишь найденное $c_{10} = -1/12$ как значение $\varphi_1(\xi)$ при $x = m$ (см. (18), (19)). С учетом этого обстоятельства, а также формул (17)–(19), (21), вместо (15) получим

$$\frac{1}{(m-1)!} m^{m-1} e^{-m} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi m}} \left(1 - \frac{1}{12m}\right),$$

что не противоречит имеющимся оценкам погрешности формулы Стирлинга [5]

$$\frac{(m-1)! - \sqrt{2\pi m} m^{m-1} e^{-m}}{(m-1)!} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \frac{1}{12m}.$$

Согласно (19), чтобы получить поправку порядка $1/m^2$ кроме имеющихся в (14) потребуются эксцессы

$$E_{10}(m) = \frac{44100}{m} + \frac{303660}{m^2} + \frac{623376}{m^3} + \frac{362880}{m^4}, \quad (23)$$

$$E_{12}(m) = \frac{866250}{m} + \frac{11098780}{m^2} + \frac{47324376}{m^3} + \frac{76998240}{m^4} + \frac{39916800}{m^5}. \quad (24)$$

Последовательно полагая в (20) $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ и приравнявая в получаемых таким образом уравнениях коэффициенты при $1/m^2$, с помощью (14), (23), (24) найдем

$$c_{20} = \Delta_1^{(6)} / \Delta^{(6)} = 1/288,$$

где $\Delta^{(6)}$ – определитель матрицы \hat{a}_6 , а $\Delta_1^{(6)}$ получается из него заменой элементов первого столбца свободными членами соответствующей системы линейных алгебраических уравнений $0, 0, 0, 120, 7308, 303660, 11098780$.

Найденное c_{20} позволяет уточнить формулу для приближенного вычисления факториалов

$$(m-1)! \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2\pi m} m^{m-1} e^{-m}}{1 - \frac{1}{12m} + \frac{1}{288m^2}}, \quad (25)$$

снизив оценку относительной погрешности до

$$\frac{\sqrt{2\pi m} m^{m-1} e^{-m}}{(m-1)! \left(1 - \frac{1}{12m} + \frac{1}{288m^2}\right)} - 1 \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \frac{c_{30}}{m^3},$$

где c_{30} – константа в разложении $\varphi_3(\xi)$ по обратным степеням m (см. (19)). Ее значение, найденное с помощью описанной выше процедуры, уже для $m=2$ ($n=1$) позволяет обеспечить погрешность менее 0,1%. Фрагмент программы с результатами соответствующих расчетов представлен на рисунке.

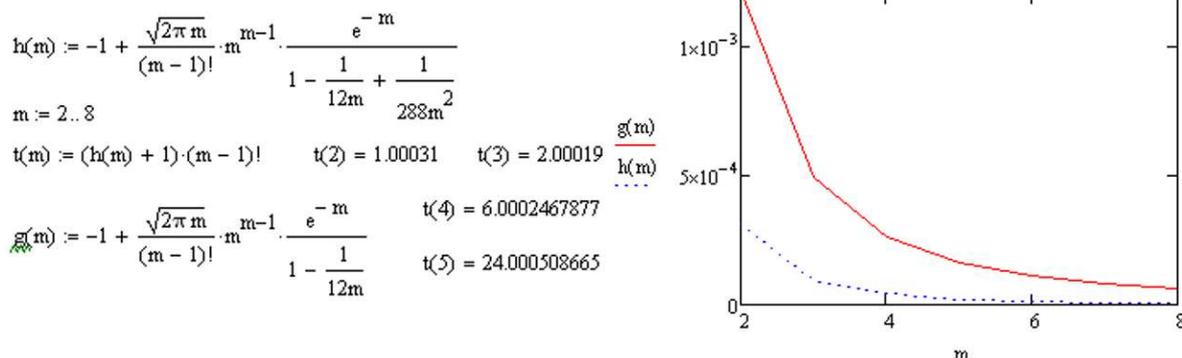


Рисунок. – Относительная погрешность формулы Стирлинга, исправленной с учетом эксцессов 6-го (сплошная кривая) и 12-го (пунктирная кривая) порядков гамма-распределения

Выводы. В работе развит основанный на теории информации и методе статистических моментов подход к получению формулы Стирлинга для факториалов с большими аргументами. Обоснована процедура поиска поправок к формуле Стирлинга, обусловленных эксцессами гамма-распределения случайной величины. С ее помощью получена приближенная формула для вычисления $n!$, относительная погрешность которой убывает с ростом аргумента как $1/n^3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ехилевский, С.Г. Нестационарная задача динамики сорбции углекислого газа в регенеративном патроне изолирующего респиратора / С.Г. Ехилевский // Вестн. Фонда фундам. исследований. – 2019. – № 3(89) – С. 57–65.
2. Аладьев, В.З. Вычислительные задачи на персональном компьютере / В.З. Аладьев, Н.А. Гершгорн. – Киев : Техника, 1991. – 246 с.
3. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М. : Наука, 1969. – 400 с.
4. Ехилевский, С.Г. Экстремальность энтропии, формула Стирлинга и закон больших чисел / С.Г. Ехилевский, Т.С. Рудькова, О.В. Голубева // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук : материалы IV науч.-практ. междунар. конф. (школы-семинара) молодых ученых, Тольятти, 23–25 апр. 2018 г. / Тольят. гос. ун-т. – Тольятти, 2018. – Ч. 1. – С. 461–464.
5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1968.

Поступила 09.12.2020

AMENDMENTS TO THE STIRLING FORMULA, CAUSED BY EXCESSES OF THE GAMMA DISTRIBUTION

S. EKHILEVSKIY, O. GOLUBEVA, O. ZABELENDIK, T. STRUK

The paper develops an approach based on information theory and the method of statistical moments to obtain the Stirling formula for factorials with large arguments. The procedure for searching for corrections to the Stirling asymptotic expression due to excesses in the gamma distribution of a random variable is justified. It is used to obtain an approximate formula for calculating $n!$, the relative error of which decreases with the growth of n , as $1/n^3$.

Keywords: Stirling formula, entropy, gamma distribution, higher-order excesses.

УДК 621.397.6

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ АЛГОРИТМОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ

*канд. техн. наук, доц. А.В. ХИЖНЯК, Д.С. ШАРАК, А.В. СЕРГЕЕНКО
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)*

Представлена обобщенная схема функционирования и оценки качества системы сопровождения оптически наблюдаемых объектов с комплексированием информации, включающая авторские элементы, а также разработана методика проведения испытаний алгоритмов сопровождения в двухканальной оптической системе. В основе этой методики лежит расчет такого показателя качества работы алгоритмов сопровождения как средняя вероятность срыва сопровождения на 1000 кадров видеопоследовательности. Особенностью схемы функционирования и оценки качества системы сопровождения является возможность использования как экспериментальных так и сгенерированных видеопоследовательностей, а также возможность изменения исследуемых алгоритмов сопровождения. Разработанная методика позволяет проводить исследования существующих алгоритмов сопровождения в различных условиях фоновой-целевой обстановки, в том числе при наличии преднамеренных помех, а также проводить исследования по разработке и анализу новых и перспективных алгоритмов сопровождения.

Ключевые слова: алгоритмы сопровождения, оценка качества, оптические системы.

Введение. Программное обеспечение в совокупности с аппаратными средствами является неотъемлемой частью современного мира. Однако следует отметить, что применение в конкретной области массовых программных продуктов, рассчитанных на решение типовых задач, зачастую является затруднительным либо невозможным. В этом случае требуется разработка качественно нового, специализированного программного обеспечения или расширение функциональности имеющегося.

Цифровая обработка изображений является одним из направлений, требующих разработки именно специализированного программного обеспечения. Кроме того, она представляет собой одну из наиболее актуальных и быстро развивающихся областей науки и техники, что обусловлено как многообразием практических задач, требующих анализа визуальной информации, так и все возрастающими возможностями оптики и вычислительной техники.

Одной из самых трудоемких задач с научной точки зрения является задача сопровождения объектов. Это связано с тем, что в реальных условиях на качество работы систем сопровождения оказывают влияние различные природные явления (туман, изморозь, дождь и т.п.). Кроме того, значительное влияние могут оказывать и другие факторы, например, движение объекта наблюдения или самой оптической системы, различные помехи и др.

В условиях изменяемой фоновой-целевой обстановки при плохих погодных условиях оптико-электронные системы требуют дополнительной «подсветки», а значит, пассивность (необнаруживаемость) не сохраняется. На изображениях, полученных с камер различного спектрального диапазона, зачастую присутствуют шумы, блики и другие помехи, вызванные окружающим фоном. Это ухудшает качество изображений и, следовательно, снижает информативность, а также может воспрепятствовать дальнейшему выполнению боевой задачи по устойчивому сопровождению объектов.

Одним из способов устранения подобных негативных явлений стало использование многоканальных оптических систем. Наибольшее распространение на сегодняшний день получили системы, имеющие два оптических канала в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн.

Наряду с применением многоканальных оптических систем для устранения указанных негативных явлений применяются и программные методы, заключающиеся в разработке новых и модернизации имеющихся алгоритмов сопровождения. Активное развитие данного направления привело к тому, что к настоящему времени разработаны и активно используются алгоритмы сопровождения, основанные на классических методах, таких как методы сопровождения силуэта, методы сопровождения с использованием корреляционных фильтров и др. Также все чаще встречаются алгоритмы сопровождения, в основе работы которых лежат принципы машинного обучения, такие как методы сопровождения на основе нейронных сетей, методы на основе сопровождения особых точек и др. Однако из всего разнообразия алгоритмов, основанных на перечисленных выше методах сопровождения, нельзя выделить один универсальный, в связи с чем возникает проблема выбора алгоритма сопровождения для конкретных условий работы оптической системы, т.е. существует необходимость проведения сравнительного анализа алгоритмов сопровождения.

Целью данной статьи является разработка методики проведения испытаний алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов в двухканальной системе сопровождения, которая позволяет количественно оценить их эффективность.

Основная часть. Предлагаемая методика основывается на расчете такого показателя качества работы алгоритмов сопровождения, как среднее количество срывов сопровождения на 1000 кадров видеопоследовательности [2]:

$$\Omega_* = \frac{1000 \cdot N_{cp}^*}{\tau \cdot f}, \quad (1)$$

где N_{cp}^* – зафиксированное количество срывов за время работы алгоритма сопровождения (знак * указывает на тип видеопоследовательности, по которой работал алгоритм (видимый, ИК-диапазон, комплексированная видеопоследовательность и др.);

τ – длительность видеопоследовательности, подаваемой на алгоритм сопровождения;

f – частота кадров видеопоследовательности, подаваемой на алгоритм сопровождения.

Под срывом сопровождения понимается превышение расстояния между эталонными и измеренными координатами центра объекта интереса на величину, принимающуюся за максимальную ошибку измерения и равную половине диагонали прямоугольника, ограничивающего эталонное изображение объекта, т.е. срыва сопровождения (рисунок 1).

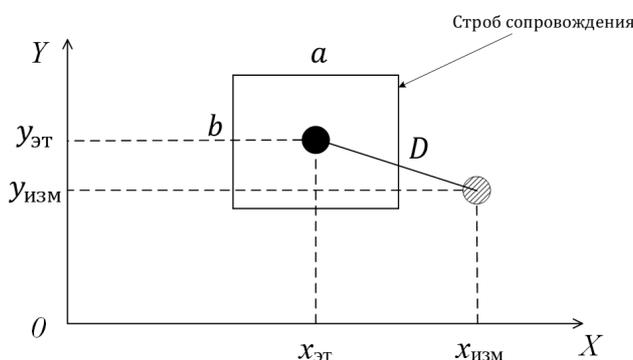


Рисунок 1. – Определение срыва сопровождения объекта

В большинстве случаев строб сопровождения представляет собой прямоугольник с фиксированными размерами, который должен ограничивать объект интереса. В некоторых оптико-электронных системах размеры строга сопровождения адаптируются под размеры объекта интереса автоматически или по команде оператора. Максимальная ошибка измерения координат определялась исходя из размеров строга сопровождения (см. рисунок 1).

$$\sigma_{\max} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2}, \quad (2)$$

где a и b – заданные ширина и высота строга сопровождения соответственно.

Расстояние между эталонными и измеренными координатами центра объекта интереса определялись исходя из выражения

$$D = \sqrt{(y_{\text{эт}} - y_{\text{изм}})^2 + (x_{\text{эт}} - x_{\text{изм}})^2}, \quad (3)$$

где $y_{\text{эт}}, x_{\text{эт}}$ – эталонные координаты центра объекта интереса;

$y_{\text{изм}}, x_{\text{изм}}$ – измеренные координаты центра объекта интереса по результатам работы алгоритма сопровождения.

Таким образом, наличием срыва сопровождения считалась ситуация, удовлетворяющая условию

$$D > \sigma_{\max}. \quad (4)$$

В рамках выполнения различных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по данной тематике [5; 7] коллективом авторов была разработана обобщенная схема функционирования и оценки качества системы сопровождения оптически наблюдаемых объектов с комплексированием информации, которая представлена на рисунке 2. Авторские блоки на схеме выделены серым цветом.

Согласно рисунку 2 непосредственно оценка качества работы алгоритмов сопровождения происходит в блоке сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения. Именно в данном блоке осуществляется расчет и сравнение среднего количества срывов сопровождения на 1000 кадров исследуемых

алгоритмов сопровождения согласно выражению (1). Входными данными для этого блока являются количество срывов сопровождения за время работы исследуемых алгоритмов сопровождения N_{cp*} и показатель качества обрабатываемого изображения PSR_* (Peak-to-sidelobe-ratio), символ * указывает на тип видеопоследовательности, по которой работал алгоритм (видимый, ИК-диапазон, комплексированная видеопоследовательность и др.) [4]. Выходными данными блока является алгоритм сопровождения, показавший наилучшие результаты работы, т.е. по результатам работы которого показатель качества Ω_* принимает наименьшее значение ($\Omega_* \rightarrow \Omega_{min}$).

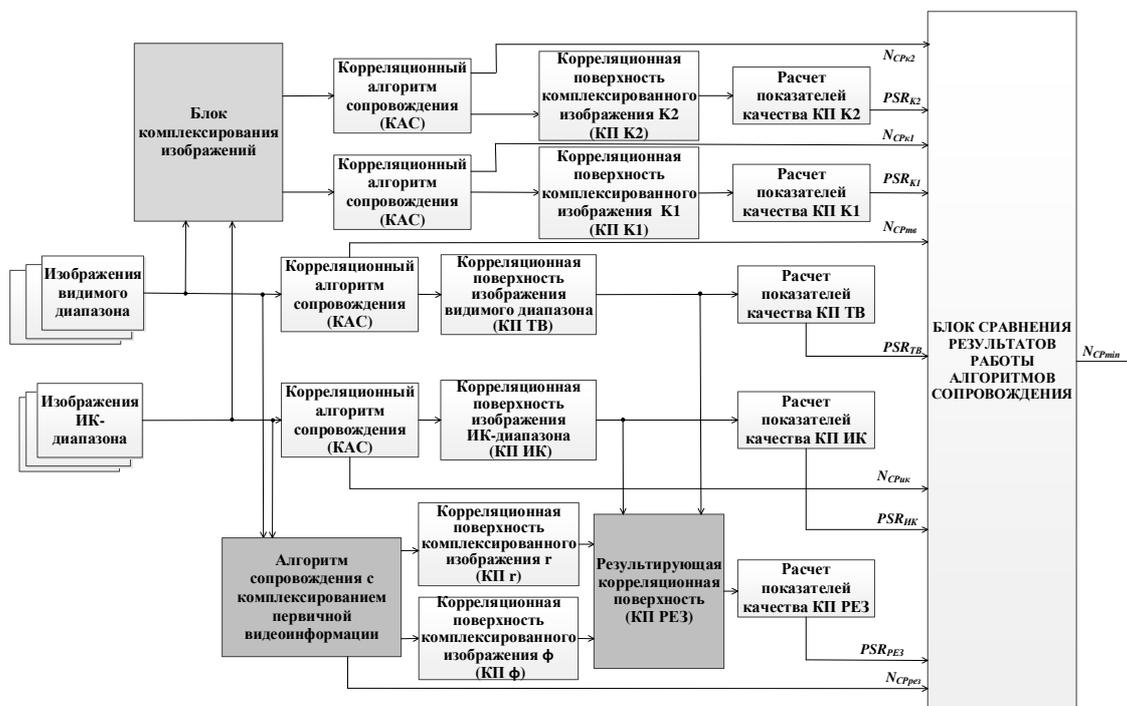


Рисунок 2. – Обобщенная схема функционирования и оценки качества системы сопровождения оптически наблюдаемых объектов с комплексированием информации

Таким образом, разработанная методика проведения испытаний алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов в двухканальной системе сопровождения представляет собой последовательность выполнения следующих основных операций (см. рисунок 2):

- 1) захват объекта интереса на сопровождение (по команде оператора);
- 2) работа типового корреляционного алгоритма сопровождения:
 - а) подача исходных видеопоследовательностей видимого и ИК-диапазонов с выходов источников информации на типовой корреляционный алгоритм сопровождения оптически наблюдаемых объектов;
 - б) построение корреляционных поверхностей КП ТВ и КП ИК для сопровождаемого объекта интереса;
 - в) фиксирование срывов сопровождения;
 - г) расчет показателей качества ($\Omega_{ТВ}$, $\Omega_{ИК}$);
 - д) передача показателей качества ($\Omega_{ТВ}$, $\Omega_{ИК}$) на блок сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения;
 - е) передача параметров качества изображений ($PSR_{ТВ}$, $PSR_{ИК}$) на блок сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения;
- 3) работа типового корреляционного алгоритма сопровождения по комплексированным видеопоследовательностям:
 - а) подача исходных видеопоследовательностей видимого и ИК-диапазонов на блок комплексирования изображений;
 - б) формирование комплексированных видеопоследовательностей К1 [5], К2 (алгоритм критерияльного суммирования [6]);
 - в) подача комплексированных видеопоследовательностей на типовой корреляционный алгоритм сопровождения оптически наблюдаемых объектов;
 - г) построение корреляционных поверхностей КП К1, КП К2.

- д) фиксирование срывов сопровождения;
- е) расчет показателей качества (Ω_{K1} , Ω_{K2});
- ж) передача показателей качества (Ω_{K1} , Ω_{K2}) на блок сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения;
- з) передача параметров качества изображений (PSR_{K1} , PSR_{K2}) на блок сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения;
- 4) работа алгоритма сопровождения оптически наблюдаемых объектов с комплексированием первичной видеoinформации:
 - а) подача исходных видеопоследовательностей видимого и ИК-диапазонов на алгоритм сопровождения оптически наблюдаемых объектов с комплексированием первичной видеoinформации;
 - б) формирование новых комплексированных изображений r и φ в соответствии с алгоритмом [7];
 - в) построение корреляционных поверхностей дополнительных комплексированных изображений КП r и КП φ в соответствии с алгоритмом [7];
 - г) построение результирующей корреляционной поверхности в соответствии с алгоритмом [7];
 - д) фиксирование срывов сопровождения;
 - е) расчет показателей качества ($\Omega_{рез}$);
 - ж) передача показателя качества ($\Omega_{рез}$) на блок сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения;
 - з) передача параметров качества изображений ($PSR_{рез}$) на блок сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения;
- 5) работа обобщенной схемы функционирования и оценки качества системы сопровождения оптически наблюдаемых объектов с комплексированием информации завершается анализом работы алгоритмов сопровождения и выбором оптимального для конкретных условий способа сопровождения, для которого $\Omega \rightarrow \Omega_{min}$.

Для сравнения результатов работы алгоритмов сопровождения на вход обобщенной схемы можно подавать как синтезированные, так и экспериментальные видеопоследовательности видимого и ИК-диапазонов.

Синтезированные видеопоследовательности представлены набором изображений формата jpg из базы данных, находящейся в свободном доступе в сети Интернет [8] и представляющей собой эталонный набор данных для тестирования и оценки новых алгоритмов компьютерного зрения, в том числе и алгоритмов сопровождения.

Видео представляет собой съюстированные по времени и углу обзора последовательности изображений видимого и ИК-диапазонов. Фрагменты данных видеопоследовательностей представлены на рисунке 3.

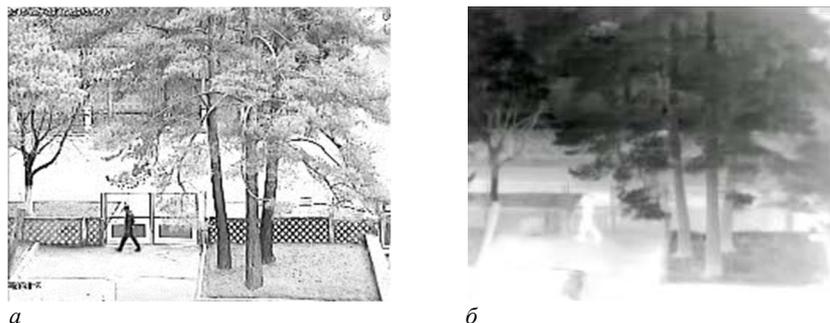


а – видимый диапазон; б –инфракрасный диапазон

Рисунок 3. – Фрагмент синтезированной видеопоследовательности видимого и ИК-диапазонов

Следует отметить, что использование синтезированных изображений дает широкие возможности по исследованию работы алгоритмов сопровождения в различных условиях фоновой-целевой обстановки (задымление, туман, размытие объекта сопровождения и т.п.) без проведения экспериментов или полунатурного моделирования.

В качестве экспериментальных применялись видеопоследовательности, снятые на стендовом оборудовании в ходе проведения эксперимента по получению изображений различного спектрального диапазона [3]. Фрагменты экспериментальных видеопоследовательностей представлены на рисунке 4.



a – видимый диапазон; *б* – инфракрасный диапазон

Рисунок 4. – Фрагмент экспериментальной видеопоследовательности видимого и ИК-диапазонов (сопровождение наземного объекта)

Заключение. Разработанная методика проведения исследований алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов в двухканальной системе сопровождения позволяет воспроизводить и оценивать влияние возмущающих факторов на работу алгоритмов сопровождения в условиях изменяемой фоновой-целевой обстановки и наличия преднамеренных помех, а также проводить исследования по разработке и анализу новых и перспективных алгоритмов сопровождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое обнаружение и сопровождение динамических объектов на изображениях, формируемых оптико-электронными приборами в условиях априорной неопределенности. Методы и алгоритмы / Гузенко О.Б. [и др.] ; под ред. А.А. Храмычева – М. : Радиотехника, 2015. – 280 с.
2. Алгоритм автоматического обнаружения, выделения и оценки динамических объектов, возникающих в последовательности телевизионных кадров. Цифровая обработка сигналов и ее применение / Б.А. Алпатов [и др.] // Доклады 3-й Междунар. конф. DSPA-2000. – СПб., 2000. – Т. 3. – С. 110–116.
3. Баклицкий, В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь : ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
4. Van Droogenbroeck, M. ViBe: a disruptive method for background subtraction / M. Van Droogenbroeck, O. Barnich // Background Modeling and Foreground Detection for Video Surveillance / ed.: T. Bouwmans [et al.]. – Chapman and Hall/CRC. – 2014. – P. 7.1–7.23.
5. Шарак, Д.С. Применение комплексирования изображений, получаемых от источников различного спектрального диапазона, в задачах сопровождения оптически наблюдаемых объектов / Д.С. Шарак, А.В. Хижняк, Е.И. Михненко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 2 (55). – С. 72–79.
6. Способ комплексирования цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений : пат. 2451338 РФ : МПК G06T5/00 (2010) / А.П. Богданов, Л.Н. Костяшкин, А.В. Морозов, О.В. Павлов, Ю.Н. Романов, А.В. Рязанов. – Оpubл. 20.05.2012.
7. Повышение качества сопровождения оптически наблюдаемых объектов при комплексировании первичной видеoinформации в корреляционных алгоритмах сопровождения / Д.С. Шарак [и др.] // Докл. БГУИР. – 2016. – № 5 (99). – С. 79–86.
8. OTCBVS Benchmark Dataset Collection [Electronic resource]. – Mode of access: <http://vcipl-okstate.org/pbvs/bench/>. – Date of access: 30.11.2015.

Поступила 09.11.2020

METHOD OF TESTING ALGORITHMS FOR TRACKING OPTICALLY OBSERVED OBJECTS IN A TWO-CHANNEL TRACKING SYSTEM

A. KHIZNIAK, D. SHARAK, A. SERGEENKO

The development of a methodology for testing algorithms for tracking optically observed objects in a two-channel tracking system, as well as a generalized scheme for functioning and evaluating the quality of the tracking system for optically observed objects with information aggregation are presented. The developed method is based on the calculation of such an indicator of the quality of the tracking algorithms as the average probability of failure of tracking per 1000 frames of the video sequence. A special feature of the scheme of functioning and quality assessment of the tracking system is the possibility of using both experimental and generated video sequences, as well as the possibility of changing the studied tracking algorithms. The developed research methodology makes it possible to conduct research on existing tracking algorithms in various conditions of the background-target environment, including in the presence of deliberate interference, as well as to conduct research on the development and analysis of new and promising tracking algorithms.

Keywords: tracking algorithm, evaluating the quality, optical system.

ФИЗИКА

УДК 621.371: 550.837.6

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДВУХЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ

канд. техн. наук, доц. **В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.Н. АБРАМЕНКО**
(Полоцкий государственный университет);

д-р физ.-мат. наук, проф. **В.А. БОГУШ**

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Приведен анализ распространения электромагнитных волн в режиме двухчастотного воздействия с использованием мощного низкочастотного сигнала в среде над углеводородными залежами. Исследовано поведение вещественных, мнимых составляющих комбинированных элементов и фазовых компонент тензора диэлектрической проницаемости анизотропной среды над залежью в режиме двухчастотных сигналов на основе используемого подхода при изучении плазмы. Проведен анализ составляющих компонент тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для электромагнитных волн с правой и левой круговыми поляризациями в зависимости от диэлектрической проницаемости и удельной проводимости среды. Установлено, что по амплитудным и фазовым характеристикам компонент тензора диэлектрической проницаемости среды над углеводородами при вариации частот зондирующего сигнала может осуществляться диагностика сред с целью повышения производительности геологоразведочных работ и точности определения границ залежей углеводородов.

Ключевые слова: углеводородная залежь, электромагнитная волна, двухчастотный сигнал

Введение. Актуальность исследуемых в работе задач определяется необходимостью разработки современных методов поиска углеводородных залежей (УВЗ) на основе активного внедрения электромагнитных методов (ЭММ) и аппаратуры для поиска углеводородов [1]. Тенденции развития ЭММ в поисковой геофизике определяются задачами создания эффективных методов с высоким уровнем достоверности обнаружения углеводородов. Возможности применения этих методов на практике обусловлены их высокой информативностью. Это связано с функциональными зависимостями компонент диэлектрической проницаемости среды над залежами углеводородов (нефть и газ), использование свойств которых дает дополнительные возможности для электроразведки [2–4]. В статье модернизация и разработка ЭММ основана на исследовании указанных выше зависимостей для двухчастотных сигналов.

Решение данных задач базируется на определении контрастного изменения сопротивления пород, характеристик электромагнитных волн (ЭМВ) – амплитудных значений различных составляющих, их фазовых компонент, поляризационных характеристик и т.д. [5]. Анализ электрофизических и электрохимических процессов в средах над залежами углеводородов при взаимодействии ЭМВ с исследуемым объектом дает возможность получать значительно больше результатов от исследуемых сред на основе вариации параметров зондирующих сигналов в различных диапазонах частот. На основе анализа электрофизических и электрохимических процессов над залежами углеводородов проводится электродинамическое моделирование среды. Аналогия исследуемой среды над залежью нефти и газа с плазмоподобным образованием позволяет использовать для изучения взаимодействия ЭМВ с УВЗ имеющиеся решения для плазмы и плазмоподобных сред. Оптимизации параметров зондирующих сигналов осуществляется с учетом специфических характеристик УВЗ и существующих решений при изучении плазмы на основе квазигидродинамического подхода [1].

Результаты применения методов поиска, идентификации месторождений УВЗ представлены во многих работах. В работе [6] исследовано применение радиоволнового метода поиска. Методы на основе электрорезонансного зондирования находят широкое применение для решения указанных выше задач [7]. Анализ компонент поверхностного импеданса среды над УВЗ с учетом влияния на верхний слой всех ниже расположенных слоев проведен в работе [8]. В основу многих методов георазведки углеводородов может быть положено исследование взаимодействия радиоимпульсных сигналов со средой над залежью [9]. Находят применение методы исследования свойств объектов, основанные на сравнении статистических свойств устанавливаемых электрических полей при морских измерениях [10]. Нефтегазовые резервуары выявляются на основе аномалии поля в водной среде [11]. Возможно обнаружение месторождений нефти и газа на основе способов поиска УВЗ с использованием амплитудно-модулированных сигналов [12; 13] по измерениям величины напряженности электрического поля и фазовых компонент отраженных от залежей сигналов. Различные варианты электромагнитных зондирований при поисках углеводородов

в транзитной зоне Каспийского моря получили широкое распространение, на основании опыта их применения наработаны различные методики зондирования УВЗ [14]. Применение для поиска УВЗ метода 3D-электроразведки становлением поля [15; 16] приводит к расширению функциональных зависимостей диэлектрической проницаемости среды над углеводородами от режимов зондирования, что позволяет повысить точность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

Воздействие двухчастотного сигнала на среду над УВЗ. Распространение двухчастотных ЭМВ в среде над УВЗ рассмотрено в работе [1]. Полученные в этой работе результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что в компонентах тензора диэлектрической проницаемости среды заложены функциональные зависимости, позволяющие повышать информативность методов поиска УВЗ. Установлено, что существующие модели УВЗ показывают, что физико-химические свойства среды над залежью нефти и газа существенно отличаются от данных, полученных при исследовании образцов пород, отобранных непосредственно над УВЗ. В статье учитывается это обстоятельство. Анализ работ [3–5] показал, что аномалии электромагнитного поля могут достигать нескольких десятков процентов на реальном месторождении. Объяснение данных расхождений обусловлено электрическими свойствами вмещающих пород над УВЗ, которые приводят к существенному их влиянию на электродинамический отклик углеводородов на воздействие зондирующего сигнала. Полученные выражения для компонент тензоров диэлектрической проницаемости анизотропной среды (АС) над залежью определяют закономерности трансформации частотных зависимостей комбинационных элементов от соотношения частот и амплитуд двухчастотных сигналов. Вместе с тем для реализации новых методов георазведки представляет интерес анализ процесса взаимодействия двухчастотных ЭМВ, образующихся над залежами и скоплениями углеводородов, с АС в зависимости от диэлектрической проницаемости и удельной проводимости пород, находящихся над УВЗ и определяющих электродинамический отклик. Соответственно, изучение дополнительных режимов зондирования поверхности исследуемого профиля вмещающих пород над УВЗ позволяет установить реальную физическую картину, возникающую над реальным месторождением или скоплением нефти и газа.

Для зондирования ЭМВ среды над УВЗ выберем двухчастотный сигнал вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где $A_1, A_2, \omega_1, \omega_2$ – соответственно амплитуды и частоты данных ЭМВ.

Режимы зондирования определяются коэффициентами отношения амплитуд двух волн и их частот

$$k_E = \frac{A_2}{A_1}, \quad k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (2)$$

поэтому процесс распространения двухчастотного сигнала (1) над средой с наличием углеводородов приводит к расширению возможностей георазведки и позволяет формировать ЭМВ с различными соотношениями параметров. При наличии достаточно большой базы применяемых режимов можно выбрать оптимальные с точки зрения повышения эффективности, уровня достоверности обнаружения углеводородов.

В работе проведено исследование воздействия на среду над УВЗ мощного низкочастотного (НЧ) сигнала с коэффициентами

$$k_E \ll 1, k_\omega \ll 1. \quad (3)$$

Новизна исследования состоит в том, что полученные результаты способствуют выделению УВЗ по величине отличий компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами по сравнению с однородными средами.

Методика исследования. Переносной передатчик перемещается вдоль исследуемого профиля с границей раздела сред с характеристиками воздушной среды распространения $\epsilon_0, \mu_0, \sigma_0$ и с АС над УВЗ. Для зондирования выбирается режим наклонного падения плоской ЭМВ с вертикальной поляризацией. Определяются компоненты диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями по формулам

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}}_R &= \dot{\mathbf{E}}_1 + \dot{\mathbf{E}}_2 = \text{Re } \mathbf{E}_R + j \text{Im } \mathbf{E}_R; \\ \dot{\mathbf{E}}_L &= \dot{\mathbf{E}}_1 - \dot{\mathbf{E}}_2 = \text{Re } \mathbf{E}_L + j \text{Im } \mathbf{E}_L. \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (2) присутствуют элементы матрицы тензора [1]

$$\dot{\hat{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Определение величин компонент диэлектрической проницаемости для различных режимов облучения исследуемого профиля ЭМВ позволяет выделить границу УВЗ. Изменение свойств земной поверхности при переходе от изотропной среды к анизотропной сопровождается соответствующими изменениями компонент диэлектрической проницаемости и поверхностного импеданса.

Результаты исследования. Проведен анализ выражений (2) для компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ. Вещественные значения для компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями приведены соответственно на рисунках 1, 2.

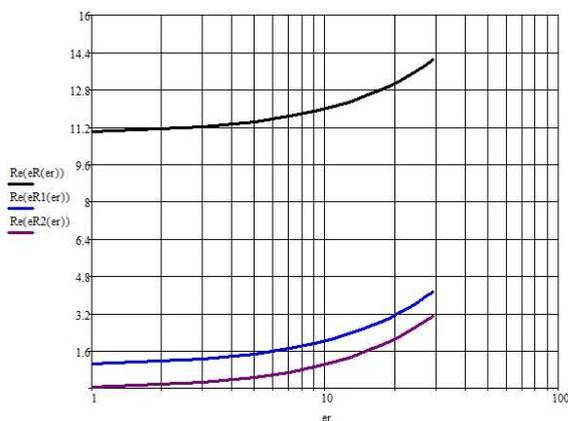


Рисунок 1. – Зависимости $\text{Re } \mathbf{\epsilon}_r = \psi(\epsilon_r)$ при изменении диэлектрической проницаемости среды

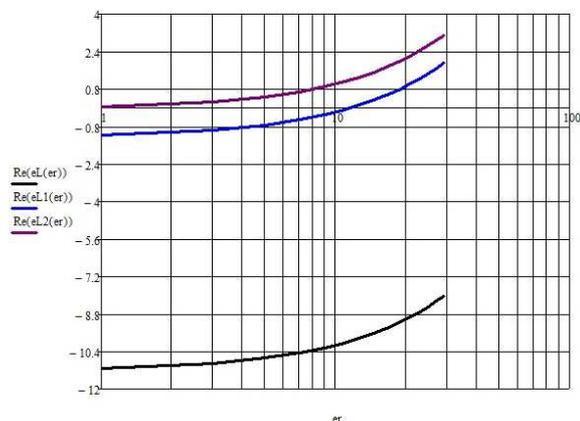


Рисунок 2. – Зависимости $\text{Re } \mathbf{\epsilon}_l = \psi(\epsilon_r)$ при изменении диэлектрической проницаемости среды

Было учтено, что над залежами углеводородов экспериментально получены параметры среды [1]: удельная электрическая проводимость $\sigma_r = (10^{-6} - 1) \text{ См/м}$; концентрация частиц $N_e = N_n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$; частота столкновения частиц $\nu = 2 \cdot \pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$. Диэлектрическая проницаемость среды исследовалась в диапазоне от 1 до 30. Коэффициенты соотношения частот и амплитуд задавали следующие: $k_\omega = 10^{-6}$, $k_E = 10^{-1}$. Величина поверхностного импеданса среды над углеводородами определяется физико-химическими процессами в самой залежи и в околозалежном пространстве, составом кристаллического скелета и термодинамическими условиями залегания (давление и температура), приводящими к влиянию углеводородов на электрические свойства вмещающих пород над УВЗ. Компонента вещественной составляющей диэлектрической проницаемости для правой поляризации изменяется при вариации диэлектрической проницаемости пород по нелинейному закону, увеличиваясь с ростом ϵ_r .

Составляющие тензора определены соответственно: без индекса – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^5 Гц , с индексом 1 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^6 Гц , с индексом 2 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^9 Гц . При изменении коэффициентов соотношения частот и амплитуд закономерности поведения комбинационных составляющих диэлектрической проницаемости среды над УВЗ могут быть рекомендованы для диагностики анизотропных сред, поскольку представляют дополнительную информацию о среде над залежью. Компонента вещественной составляющей диэлектрической проницаемости для левой поляризации изменяется при вариации диэлектрической проницаемости пород по аналогичному закону, за исключением численных значений. Для данной составляющей тензора характерны как отрицательные, так и положительные значения. При высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^6 Гц происходит переход характеристики через нуль в районе $\epsilon_r = 10$. Таким образом, по разностной компоненте могут быть получены дополнительные данные об исследуемой среде. Дополнительно были проанализированы фазовые составляющие компонент тензора диэлектрической проницаемости (рисунок 3).

Исследования показали, что составляющие фаз для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны. Выделяется более контрастное поведение фазовой составляющей для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^9 Гц , когда происходит увеличение фазы от $-1,6 \text{ рад}$ до 1 рад с переходом через нуль при $\epsilon_r = 4,5$. При уменьшении частоты зондирования наблюдается менее контрастное изменение данной комбинационной составляющей диэлектрической проницаемости среды над УВЗ при росте диэлектрической проницаемости среды ϵ_r . В отличие от предыдущего случая данная компонента всегда отрицательна в исследуемом диапазоне диэлектрической проницаемости среды. При этом использование

более низких частот зондирующего сигнала практически не влияет на фазовые характеристики. Закономерности изменения дисперсионных характеристик сохраняются за исключением численных значений. Характерной особенностью поведения компоненты ЭМВ с левой поляризацией является наличие отрицательного участка при низких значениях диэлектрической проницаемости наполнителя среды. В действительности реальная обстановка и характер среды над углеводородами сложнее приведенных усредненных значений характеристик анизотропной среды над залежью. Залечь поляризуется, это обусловлено высокими температурами и пластовым давлением. Составы горных пород пронизаны водно-солевыми растворами, которые закрывают углеводороды. Восстановительные процессы в области между УВЗ и окружающей средой характеризуются переходом ряда химических элементов в низковалентное состояние и преобладанием свободных электронов. Тем не менее закономерности, приведенные в статье, могут быть применены на практике с учетом поправочных коэффициентов.

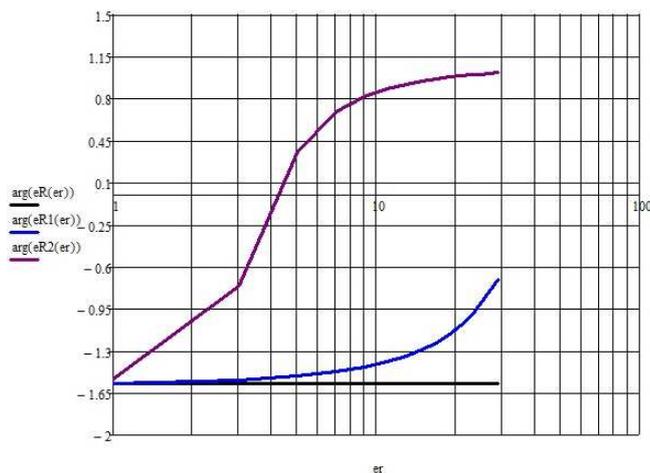


Рисунок 3. – Зависимости фазовой компоненты для ЭМВ с правой поляризацией

На этапе идентификации УВЗ данные графики могут использоваться для диагностики сред. Методика исследований состоит из нескольких этапов, включающих в себя вывод тензора среды над УВЗ в режиме двухчастотных сигналов, анализ комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями, идентификацию среды над залежами по характеру и величине комбинированных суммарной и разностной компонент диэлектрической проницаемости анизотропного слоя.

Дополнительно были проанализированы зависимости мнимых составляющих и фазовых характеристик компонент тензора диэлектрической проницаемости при изменении удельной проводимости среды (рисунки 4, 5).

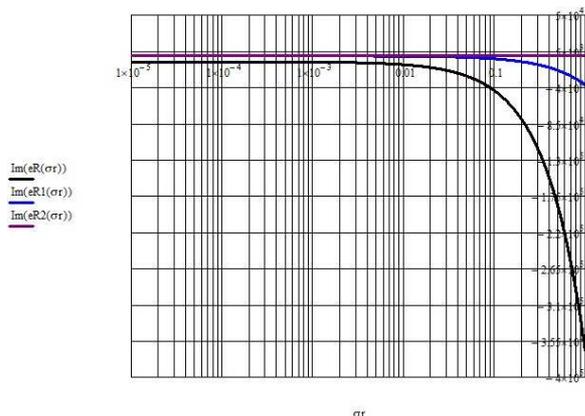


Рисунок 4. – Зависимости мнимых составляющих при изменении удельной проводимости среды

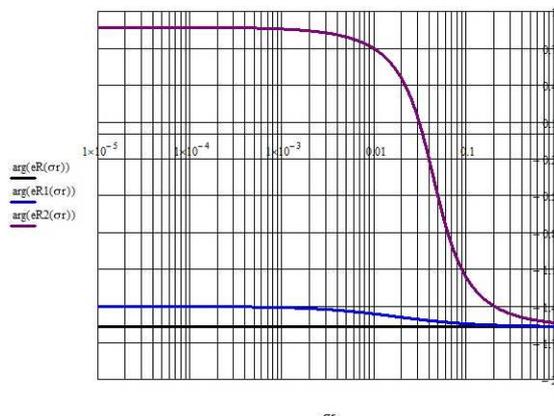


Рисунок 5. – Зависимости фазовых характеристик среды при изменении удельной проводимости

Поскольку данный параметр не влияет на вещественные составляющие тензора, было проанализировано его влияние на мнимые компоненты. Исследования показали, что составляющие компонент

для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны. Составляющие тензора определены соответственно: без индекса – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^5 Гц, с индексом 1 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^8 Гц, с индексом 2 – при высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^9 Гц. Наиболее контрастное изменение (уменьшение) происходит для $\sigma_r = (10^2 - 1)$ См/м. Для данной компоненты характерно уменьшение вещественной составляющей диэлектрической проницаемости при уменьшении высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала. При низких значениях удельной проводимости среды величина данной составляющей практически постоянна при вариации удельной проводимости среды подстилающей поверхности. Следует отметить, что использование высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^9 Гц не влияет на мнимые составляющие. Фазовые составляющие поверхностного импеданса несут дополнительную информацию о характере сопротивления. Исследования показали, что фазовые составляющие компонент для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны. Наиболее контрастное изменение (уменьшение) происходит для $\sigma_r = (10^{-2} - 1)$ См/м для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^9 Гц, причем для данной компоненты характерен переход через нуль. Это свидетельствует об изменении характера проводимости. При этом использование более низких частот зондирующего сигнала практически не влияет на фазовые характеристики.

Распространение двухчастотных ЭМВ в режимах с правой и левой круговыми поляризациями над исследуемым геологическим профилем местности позволяет повысить производительность методов электроразведки. Дополнительная априорная информация может быть получена с помощью применения метода, основанного на перемещении передатчика и приемника вдоль участка исследуемого профиля. В результате процедуру диагностики среды можно осуществлять согласно методике решения обратной задачи, по которой на основании измерения компонент тензора диэлектрической проницаемости и его фазовых компонент осуществляется определение диэлектрической проницаемости, удельной проводимости среды и глубины слоя. Информативность повышается за счет набора конкретных значений расстояний и конкретизации электродинамических моделей УВЗ для повышения эффективности ЭММ георазведки с учетом влажности слоев, климатических факторов и особенностей измерений сезонного характера.

Важную роль играют физико-геологические свойства пород-коллекторов, которые в свою очередь определяются минералогическим и гранулометрическим составами пород, особенностями структурно-текстурного строения скелета при определении комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами. Двухканальная схема определения комбинационных составляющих позволяет учитывать характер пористости и проницаемости, вид цементирующего вещества и механические свойства скелета, количество пластовой воды в порах и ее минерализацию и т.д.

По рисунку 5 видно, что этот режим целесообразно использовать в приборе для обнаружения залежей, поскольку по сравнению с однородной средой наличие спадающего участка представляет дополнительные преимущества в повышении информативности систем поиска углеводородов.

Заключение. Проведенное исследование комбинационных составляющих компонент диэлектрической проницаемости среды над углеводородами показало следующее:

- вещественные и мнимые значения для комбинированных элементов и фазовых компонент диэлектрической проницаемости среды над УВЗ для ЭМВ с правой и левой круговыми поляризациями в режиме двухчастотного взаимодействия с использованием мощного НЧ-сигнала могут быть применены для определения электродинамических характеристик анизотропных сред над скоплением углеводородов;
- составляющие фаз для ЭМВ с правой и левой поляризациями равны, причем более контрастное поведение фазовой составляющей характерно для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^9 Гц;
- для высокочастотной составляющей двухчастотного сигнала 10^9 Гц характерен переход фазовой компоненты через нуль, что свидетельствует об изменении характера проводимости и может быть применено для диагностики сред и повышения точности определения границ залежей углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д.В. Гололобов. – Минск : Бестпринт, 2009. – 185 с.
2. Frasheri, A. Self-potential anomalies as possible indicators in search for oil and gas reservoirs / A. Frasheri // 57th EAGE Conf. and Tech. Exhib., Glasgow, 29 May–2 June 1995. – Glasgow, UK. – P. 8.
3. Способ поиска месторождений нефти и газа : а. с. SU 1264122 / А.Ф. Семенов, В.Ф. Семенов. – 1986. – Опубл. 15.10.1986.
4. Могилатов, В.С. Зондирования вертикальными токами / В.С. Могилатов, Б.П. Балашов. – Новосибирск : СО РАН, филиал «Гео», 2005.

5. Moskvichew, V.N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
6. Способ радиоволнового зондирования и устройство для его осуществления : пат. RU 2152060 / В.К. Томилин, Г.П. Астафьев, В.И. Луконин. – Опубл. 27.06.2000.
7. Levashov, S.P. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations [Electronic resource] / S.P. Levashov // 66nd EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003. – (CD-ROM Abstracts volume).
8. Adamovskiy, E. Simulation of electromagnetic waves interaction with hydrocarbon deposits / E. Adamovskiy, V. Yanushkevich // 8 Junior researchers conference European and national dimension in research : in 3 p. / PSU. – Novopolotsk : PSU, 2016. – P. 3 : Technology. – P. 179–183.
9. Взаимодействие электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами в режиме радиоимпульсных сигналов. / В.Ф. Янушкевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 45–50.
10. Маловичко, М.С. Сравнение статистических свойств устанавливающихся электрических полей при морских измерениях / М.С. Маловичко. // Геофизика. – 2008. – № 5. – С. 59–64.
11. Электродинамические параметры подводных источников в поле поверхностной электромагнитной волны / Д.В. Гололобов [и др.]. // 35 Всерос. Межвуз. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Владивосток. – 1992. – Т. 1, ч. 1. – С. 59–62.
12. Гололобов, Д.В. Импедансные граничные условия анизотропной среды для амплитудно-модулированного сигнала / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич, С.В. Калинин // Доклады БГУИР. – Минск, 2010. – № 6(52). – С. 13–17.
13. Гололобов, Д.В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмоподобного типа / Д.В. Гололобов, О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 98–101.
14. Опыт применения электромагнитных зондирований при поисках углеводородов в транзитной зоне Каспийского моря / А.А. Петров [и др.] // Геофизика. – № 2. – 2010. – С. 60–64.
15. Тригубович, Г.М. 3D-электроразведка становлением поля / Г.М. Тригубович, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик. – Новосибирск : Наука, 2009. – 217 с.
16. Anderson, C. An integrated approach to marine electromagnetic surveying using a towed streamer and source / C. Anderson, J. Mattsson // First Break. – 2010. – Vol. 28, iss. 5. – P. 71–75.

Поступила 12.10.2020

FEATURES OF PROPAGATION OF TWO-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES OVER HYDROCARBONS

V. YANUSHKEVICH, S. ABRAMENKO, V. BOGUSH

The article analyzes the propagation of electromagnetic waves in a two-frequency mode using a powerful low-frequency signal in an environment above hydrocarbon deposits. The behavior of the real, imaginary components of the combined elements and the phase components of the dielectric constant tensor of an anisotropic medium above the reservoir in the mode of two-frequency signals was investigated on the basis of the approach used in studying plasma. The analysis of the components of the tensor of the dielectric constant of the medium over hydrocarbons for electromagnetic waves with right and left circular polarizations is carried out depending on the dielectric constant and specific conductivity of the medium. It has been established that, based on the amplitude and phase characteristics of the components of the dielectric constant tensor of the medium over hydrocarbons, with a variation in the frequencies of the probing signal, the media can be diagnosed with an increase in the productivity of geological exploration and the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbon deposits.

Keywords: hydrocarbon reservoir, electromagnetic wave, dual-frequency signal.

УДК 541.183

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННЫХ ПЛЕНОК ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА НА КРЕМНИИ

канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ, Н.В. ВАБИЩЕВИЧ

(Полоцкий государственный университет);

канд. физ.-мат. наук Д.И. БРИНКЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доц. В.С. ПРОСОЛОВИЧ

(Белорусский государственный университет, Минск)

Исследованы адгезионные и прочностные свойства структур фоторезист ФП9120 – кремний, облученных γ -квантами ^{60}Co дозами до 300 кГр. Облучение приводит к снижению микротвердости структур фоторезист – кремний при нагрузках 5 г и выше, что связано с ухудшением адгезии пленки позитивного фоторезиста ФП9120 к кремнию после γ -облучения. Заметные изменения прочностных и адгезионных свойств структур фоторезист – кремний наблюдались при дозах γ -квантов свыше 200 кГр. Удельная энергия отслаивания G пленок фоторезиста толщиной 1,0 мкм снижалась после облучения γ -квантами в 1,5–4 раза, что обусловлено, вероятнее всего, разрывом связей Si–O–C на границе раздела фоторезист – кремний.

Ключевые слова: диазохинон-новолачный резист, γ -облучение, микротвердость, адгезия.

Введение. Диазохинон-новолачные (ДХН) резисты широко применяются в качестве светочувствительного материала в фотолитографических процессах при изготовлении полупроводниковых приборов, интегральных схем, печатных плат и металлизированных шаблонов [1–3]. Позитивный фоторезист марки ФП9120, представляющий собой композит из светочувствительного нафтохинондиазида и смеси фенол- и крезолоформальдегидных смол в соотношении 1:5, широко используется в современной полупроводниковой электронике в качестве защитного светочувствительного материала в субмикронных фотолитографических процессах при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [2; 4]. Одной из наиболее важных характеристик фоторезистивных пленок является адгезия к подложке монокристаллического кремния. Ранее в [2; 5–6] показано, что имплантация ионов сурьмы, бора и фосфора существенным образом изменяет адгезионные свойства пленок диазохинон-новолачного резиста к кремнию. Целью настоящей работы являлось исследование адгезионных и прочностных свойств пленок диазохинон-новолачного фоторезиста марки ФП9120, подвергнутых γ -облучению.

Материалы и методы. Пленки диазохинон-новолачного фоторезиста (ФР) марки ФП9120 толщиной 1,0 мкм наносились на поверхность пластин (диаметр 100 мм) кремния р-типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см и ориентацией (111) методом центрифугирования [7]. Толщина пленок ФР контролировалась с помощью профилометра «Dectak». Отклонения от среднего значения по пластине для всех образцов не превышали 1%. Исследование прочностных свойств проводилось при комнатной температуре на приборе ПМТ-3 методом микроиндентирования. Нагрузка на индентор в виде четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием в оправе типа НПМ и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$ варьировалась в пределах 1–100 г; длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой – 5 с. Измерения микротвердости H проводились по восстановленному отпечатку согласно ГОСТ 9450-76. При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков и проводилась обработка результатов измерений с использованием методов математической статистики [8].

Для количественной оценки адгезионных свойств пленки определяли удельную энергию отслаивания пленок G , широко используемую для исследования различных полимерных пленок на стеклянных подложках [9] и рассчитываемую по формуле

$$G = \frac{0,627H^2h(1-\nu^2)}{E(1+\nu+2(1-\nu)Hl^2/P)^2}, \quad (1)$$

где h – толщина пленки;

ν – коэффициент Пуассона (использовалось значение 0,3);

E – модуль Юнга (для исследовавшейся пленки 8 ГПа);

P – нагрузка на индентор;

l – длина трещины расслоения.

Длина трещины расслоения принималась равной расстоянию от центра отпечатка до границы разрушения сферической области. Для каждого отпечатка длина трещины расслоения определялась из среднего

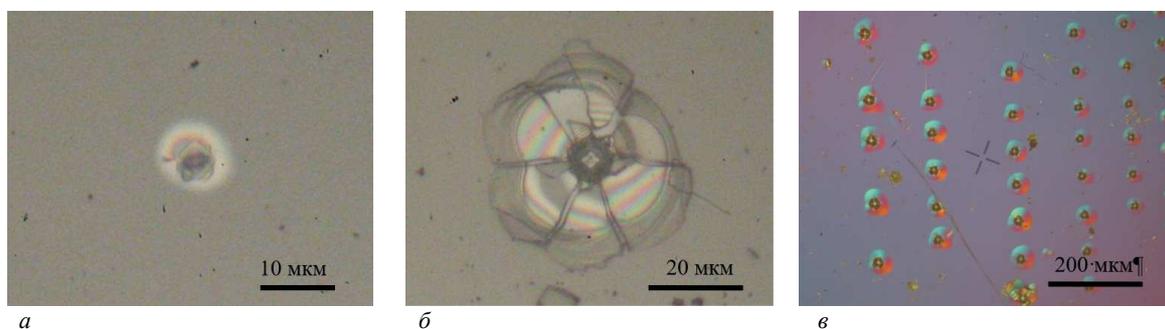
значения от двух диаметров d_{cp} сферы разрушения: $l_i = 1/2 d_{cp}$. Затем рассчитывалось среднее значение длины трещины расслоения для всей серии отпечатков данной нагрузки. Значение микротвердости H полимера для расчетов G выбиралось для тех нагрузок, при которых индентор не прокалывает слой полимера и достигает границы полимер – подложка. Для пленок толщиной 1,0–2,5 мкм эта нагрузка лежала в диапазоне от 2–5 г.

Для надлежащей визуализации отпечатка измерения выполнялись в отраженном свете на микроскопе Axiovert 10 с использованием стандартных методов светлого и темного поля [10]. Для выявления анизотропии полимера при индентировании использовали поляризационный метод [8]. Для визуализации рельефа поверхности исследуемого материала применяли метод дифференциально-интерференционного контраста [11; 12].

Облучение γ -квантами ^{60}Co осуществлялось при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении на установке МРХ- γ -25М [13]. Мощность поглощенной дозы составляла $0,120 \pm 0,006$ Гр/с. Поглощенные дозы находились в интервале от 1 до 300 кГр. Часть образцов перед облучением γ -квантами имплантировалась ионами фосфора P^+ (энергия 100 кэВ) и бора B^+ (энергия 60 кэВ) на ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6» по методике, описанной в [14].

Результаты и обсуждение. Воздействие на индентор небольшими нагрузками вызывало появление вокруг отпечатка светлых сферических областей (рисунок 1, а), вызванных, вероятнее всего, вспучиванием фоторезистивной пленки. Релаксация растягивающих напряжений в пленке после прекращения действия индентора обуславливала бочковидную форму отпечатков. Увеличение нагрузки на индентор, при котором последний достигает границы раздела фоторезист – кремний, приводит к существенному изменению формы светлых областей: они теряют симметричность и растрескиваются, а на границе раздела внутри отпечатков наблюдаются четкие четырехгранники (рисунок 1, б). Обнаруженные эффекты свидетельствуют о возможном отслоении пленки ФР от подложки под воздействием индентора. Облучение γ -квантами на форму отпечатков существенного влияния не оказывало.

При индентировании пленок толщиной свыше 2,0 мкм вокруг отпечатков видна сферическая зона деформации (навалы), выявляемая методом дифференциально-интерференционного контраста (рисунок 1, в). В тонких пленках, когда индентор проникает в кремний, подобная зона не наблюдалась. Внутри зоны деформации определялись радиальные трещины, формирующие зону разрушений, которая составляла 90–70% от зоны деформации.



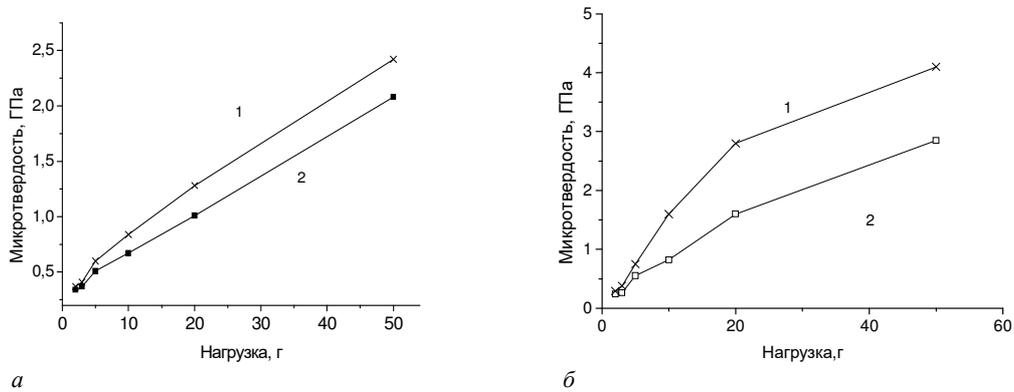
а, б – метод темного поля; в – метод дифференциально-интерференционного контраста

Рисунок 1. – Фотографии характерных отпечатков индентора при нагрузках 2 г (а, в) и 100 г (б) для облученных γ -квантами структур фоторезист – кремний. Толщина пленки ФР – 1 мкм.

Величина микротвердости H всех образцов при нагрузке 2 г составляла $\sim 0,3$ ГПа. Облучение γ -квантами на величину микротвердости фоторезистивной пленки при малых нагрузках влияния не оказывало (рисунок 2). Зондирование пленки индентором по глубине показало рост микротвердости фоторезиста по мере приближения к границе раздела фоторезист – кремний. Существенное же увеличение H обнаружено при нагрузках на индентор, соответствующих его внедрению в кремниевую подложку для пленок толщиной 1,0 мкм при нагрузках 10 г и выше (см. рисунок 2). Такое поведение микротвердости характерно для «мягких» пленок на «твердых» подложках [15].

Облучение γ -квантами привело к снижению микротвердости при нагрузках 5 г и выше (см. рисунок 2). Наиболее отчетливо указанный эффект наблюдался в предварительно имплантированных структурах фоторезист – кремний (рисунок 2, б). При указанных выше нагрузках индентор пересекает границу раздела фоторезист – кремний. Известно, что γ -облучение в дозе до 300 кГр не оказывает существенного влияния на микротвердость монокристаллического кремния [16]. Учитывая это, приведенные на рисунке 2 зависимости микротвердости от нагрузки обусловлены, вероятнее всего, снижением адгезии пленки ФР к кремнию после

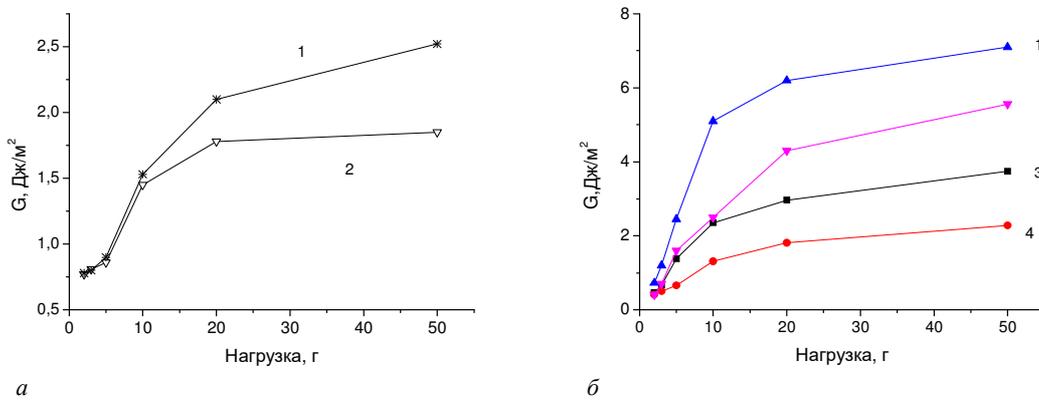
γ-облучения, что согласуется с ранее полученными экспериментальными данными. Так, ранее в работах [2; 5–7] было показано, что высокоэнергетические воздействия, в частности, ионная имплантация, могут существенным образом изменять адгезию пленок диазохинон-новолачного резиста к кремнию.



1 – доза γ-квантов 0 кГр; 2 – доза γ-квантов 270 кГр

Рисунок 2. – Зависимости микротвердости от величины нагрузки для исходных (а) и имплантированных P⁺ (б) структур фоторезист – кремний толщиной 1 мкм

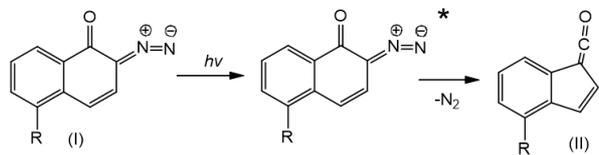
Для проверки этого предположения по длине трещин расслоения согласно формуле (1) была рассчитана удельная энергия отслаивания пленок *G*. Оказалось (рисунок 3), что, действительно, γ-облучение приводит к снижению значений *G* при преобладании латеральной составляющей отрывного усилия (нагрузка свыше 10 г). Причем этот эффект существенно (более чем в 5 раз) выше в образцах, предварительно имплантированных фосфором или бором (рисунок 3, б). Так, если в исходных (не имплантированных) образцах γ-облучение приводило к снижению величины *G* в 1,4 раза, то в имплантированных пленках такое снижение существенно выше: в 2,4 раза при имплантации В⁺ и 2,8 раза при имплантации Р⁺.



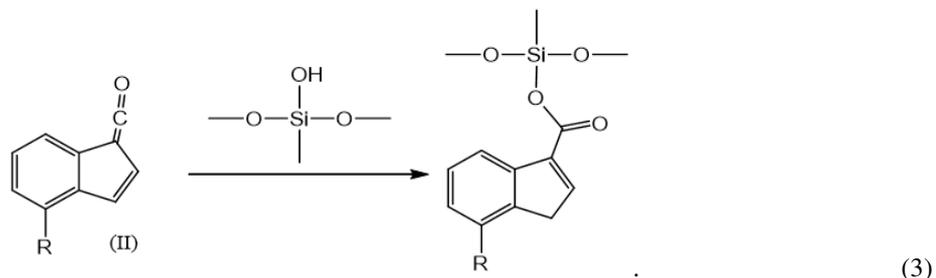
1, 3 – доза γ-квантов 0 кГр; 2, 4 – доза γ-квантов 270 кГр

Рисунок 3. – Зависимости удельной энергии отслаивания *G* от величины нагрузки для исходных (а) и имплантированных Р⁺ (1, 3) и В⁺ (2, 4) структур фоторезист – кремний. Толщина пленки ФР – 1 мкм

Основным механизмом адгезионного взаимодействия фенолформальдегидного фоторезиста ФП9120 и монокристаллического кремния являются радиационно-индуцированные процессы с участием фоточувствительного компонента фоторезиста – орто-нафтохинондиазида (I). Это соединение, химически привитое к фенолформалорто-нафтохинондиазиддегидной смоле, способно под действием фотонов с энергией 2,8–4,0 эВ (УФ-излучение) претерпевать деазотирование по реакции (2) с образованием высокорекреационноспособного кетена (II) [1; 2]:



Ранее в работах [5; 6] показано, что адгезия фоторезиста ФП9120 к монокристаллическому кремнию обусловлена взаимодействием кетена с окислом кремния по реакции (3) с образованием сложноэфирных сшивок между гидроксильными группами на поверхности оксидного слоя кремниевой пластины и карбоксильной группой 1-Н-инден-3-карбоновой кислоты:



Вероятнее всего, γ -облучение приводит к разрушению нестабильной 1-Н-инден-3-карбоновой кислоты и, соответственно, разрыву связей в Si–O–C группе. Это предположение согласуется с результатами измерений спектров поглощения, в которых интенсивность полос колебаний, связанных с Si–O–C группой, снижается при γ -облучении [5; 17].

Отметим, что заметные изменения прочностных свойств структур фоторезист – кремний наблюдались при дозах γ -квантов свыше 200 кГр, что также коррелирует с результатами измерений спектров нарушенного полного внутреннего отражения [6; 18].

Закключение. Таким образом, установлено, что облучение γ -квантами приводит к снижению микротвердости структур фоторезист – кремний при нагрузках 5 г и выше, причем заметные изменения прочностных свойств структур фоторезист ФП9120 – кремний наблюдались при дозах γ -квантов свыше 200 кГр. Это связано с ухудшением адгезии пленки диазохинонноволачного фоторезиста ФП9120 к кремнию после γ -облучения. Удельная энергия отслаивания G пленок фоторезиста толщиной 1,0 мкм снижается после облучения γ -квантами дозой 270 кГр в 1,5–4 раза, что обусловлено, вероятнее всего, разрывом связей Si–O–C на границе раздела фоторезист – кремний. Полученные методом индентирования экспериментальные данные коррелируют с результатами измерений спектров нарушенного полного внутреннего отражения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы : в 2-х ч. / У. Моро. – М. : Мир, 1990. – Ч. 2. – 632 с.
2. Ионная имплантация позитивных фоторезистов / Д.И. Бринкевич [и др.]. // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199.
3. DNQ-novolac photoresist revisited: ¹H and ¹³C NMR evidence for a novel photoreaction mechanism / Roy Debmalaya [et al.] // Magnetic resonance in chemistry. – 2003. – V. 41. – P. 84–90.
4. Серия позитивных фоторезистов ФП-9120-1.0; ФП-9120-1.8; ФП-9120-2.0 : ТУ 2378-015-29135749-2015 : Введ 28.09.15. – М. : ЗАО «Фраст-М», 2015. – 45 с.
5. Adhesion of diazoquinon-novolac photoresist films with implanted boron and phosphorus ions to single-crystal silicon / S.A. Vabishchevich [et al.] // High energy chemistry. – 2020. – V. 54, № 1. – P. 46–50.
6. Механизм адгезионного взаимодействия пленок диазохинон-новолачного фоторезиста с монокристаллическим кремнием/ Бринкевич С.Д. [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 4. – С. 589–594.
7. Прочностные свойства структур фоторезист ФП9120 – кремний / С.А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 12. – С. 69–73.
8. Микротвердость пленок полиимида и полиэтилентерефталата, облученных гамма-квантами ⁶⁰Co / Д.И. Бринкевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2017. – № 12. – С. 30–34.
9. Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coating on glass / J. Malzbender [et al.] // Materials Science and Engineering R. – 2002. – V. 36 – P. 47–103.
10. Анисович, А.Г. Искусство металлографии: использование методов оптического контрастирования / А.Г. Анисович // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2016. – № 1. – С. 36–42.
11. Анисович, А.Г. Визуализация поверхности методом дифференциально-интерференционного контраста / А.Г. Анисович, И.Н. Румянцева // Литье и металлургия. – 2013. – № 3. – С. 156–162.
12. Анисович, А.Г. Оптические эффекты при микроскопии неметаллических материалов / А.Г. Анисович // Литье и металлургия. – 2017. – № 1. – С. 110–114.
13. Вабищевич, С.А. Прочностные свойства структур фоторезист – кремний, γ -облученных и имплантированных ионами В⁺ и Р⁺/ С.А. Вабищевич [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 30–36.
14. EPR Spectroscopy of Diazoquinon-Novolac Resist Films Implanted with P⁺ and B⁺ Ions / D.I. Brinkevich [et al.] // High energy chemistry. – 2020. – V. 54, № 2. – P. 115–122.
15. Шугуров, А.Р. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования / А.Р. Шугуров, А.В. Панин, К.В. Оскомов // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 1007–1012.

16. Вабищевич, С.А. Подавление радиационного упрочнения в кремнии, легированном германием / С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, Д.И. Бринкевич // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – № 4. – С. 12–14.
17. Бринкевич, Д.И. Модификация пленок диазохиноноволачного фоторезиста имплантацией ионов бора / Д.И. Бринкевич, В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский // Журн. Белорус. гос. ун-та. – 2020. – № 2. – С. 62–69.
18. Спектры НПВО имплантированных ионами бора пленок диазохиноноволачного фоторезиста на кремнии / В.С. Просолович [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 13-й Междунар. конф., Минск, 30 сент.–3 окт. 2019 г. – Минск : Изд. ц-р БГУ, 2019. – С. 169–171.

Поступила 14.10.2020

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF IRRADIATED FILMS OF DIAZOQUINONE-NOVOLACH PHOTORESIST ON SILICON

S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH, D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH

Photoresist FP9120 – silicon structures irradiated with ^{60}Co γ -quanta at doses up to 300 kGy were studied by the microindentation method. Irradiation with γ -quanta leads to a decrease in the microhardness of the photoresist – silicon structures at loads of 5 g and higher. This is due to the deterioration in the adhesion of the film of diazoquinone-novolac photoresist FP9120 to silicon after γ -irradiation. Changes in the strength and adhesive properties of the photoresist – silicon structures were observed at doses of γ -quanta above 200 kGy. The specific peeling energy G of the 1.0 μm thick photoresist films decreases after irradiation with γ quanta by a factor of 1.5–4, which is most likely due to the breaking of Si–O–C bonds at the photoresist – silicon interface.

Keywords: diazoquinon-novolac resist; γ -irradiation; microhardness; adhesion.

УДК 537.533; 621.384

**СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ ДИАГНОСТИКИ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА****С.Н. АБРАМЕНКО, канд. техн. наук, доц. Ю.П. ГОЛУБЕВ,****П.Н. СОЛДАТЕНКО****(Полоцкий государственный университет);****канд. техн. наук, доц. Д.А. АНТОНОВИЧ****(Витебский государственный университет им. П.М. Машерова)**

Численное моделирование позволяет сузить набор параметров при разработке электронно-оптических систем для получения пучка с определенными характеристиками. Однако для практической доработки (оптимизации) электронно-оптических систем требуется соответствующая аппаратура, позволяющая оценивать качество пучка на основе сравнения степени влияния различных внешних факторов на электронно-оптические параметры электронного пучка – расходимость пучка, распределение плотности тока по сечению пучка, минимально возможный диаметр пучка. При этом вследствие многофакторности условий формирования электронных пучков целесообразно использовать комплексные характеристики, для расчета которых используются различные аппаратно-программные комплексы. На повышение точности работы таких комплексов существенное влияние оказывает взаимное расположение системы датчиков диагностирующей аппаратуры и диагностируемого электронного пучка. В работе представлено описание и принципиальная схема разработанной системы автоматического позиционирования диагностической аппаратуры, применение которой при исследовании распределения плотности тока электронного пучка позволяет исключить ошибку, обусловленную неправильным расположением сканирующих датчиков относительно измеряемого электронного пучка.

Ключевые слова: диагностика параметров электронного пучка, качество электронного пучка, диагностирующая аппаратура, система позиционирования.

Введение. Несмотря на то, что применение электронно-лучевых технологий по сравнению с традиционными способами сварки может обеспечить более высокий уровень экономических показателей и эксплуатационных свойств изделий из разнородных материалов [1–3], их внедрение в производство сдерживается по ряду причин. Одной из таких причин является то, что при оценке технологической пригодности электронного пучка для реализации конкретного технологического процесса, как правило, ограничиваются сравнением плотности мощности пучка и энергии электронов в пучке. В то же время на стадии проектирования электронно-лучевых устройств, а также при разработке новых технологий возникает необходимость получать, сравнивать и корректировать как более частные параметры (расходимость, распределение плотности тока, электронную температуру плазмы, предельный диаметр пучка), так и комплексные характеристики (эмиттанс, яркость), позволяющие сравнивать пучки, априори определяя их качество [4]. Для оценки каждой из частных характеристик разработаны методы, позволяющие исследовать их в зависимости от внешних условий. Однако все эти параметры взаимосвязаны, и изменение одного из них приводит к изменению другого. Такая ситуация делает затруднительным сравнение качества пучков на основе одного из параметров, поэтому для получения целостного представления о качестве пучков и их сравнительного анализа целесообразно использовать комплексные характеристики и соответствующую аппаратуру для их измерения и автоматической обработки информации (построения трехмерных поверхностей, определения фазового портрета пучка, расчета эмиттанса и яркости). Подобный комплекс, включающий электромеханическое устройство, систему его управления и соответствующее программное обеспечение, может быть использован как для оптимизации разрабатываемых конструкций источников заряженных частиц, так и для других лучевых устройств с целью повышения их технологической эффективности и качества пучков.

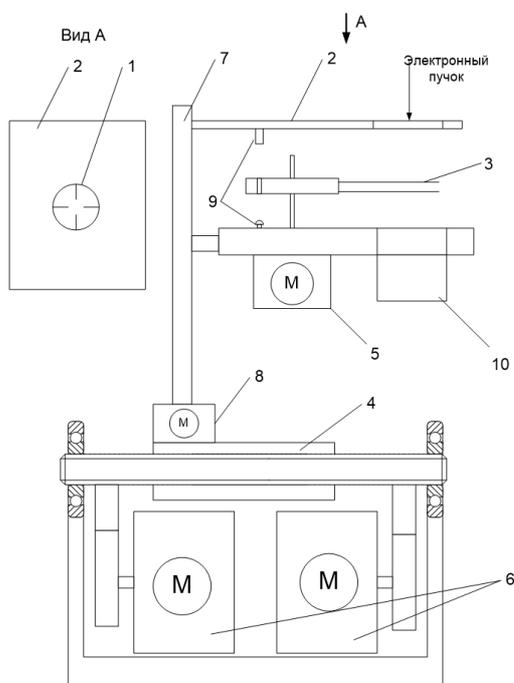
Основная часть. На кафедре физики Полоцкого государственного университета был разработан подобный комплекс (рисунок 1), включающий электромеханический измерительный блок для непосредственного измерения параметров электронного пучка, компьютерную систему обработки и компонент для визуализации полученных результатов, ответственные за оцифровку измеренных данных их обработку и расчет комплексных характеристик электронного пучка (яркости, эмиттанса и угла расходимости), а также визуализацию полученных результатов. Так как электромеханический блок осуществляет непосредственное измерение распределения плотности тока электронов, сформированных в источнике электронов, то корректность и точность итоговых результатов во многом определяется работой электромеханического измерительного блока, поскольку обработка и визуализация полученных результатов, осуществляемая на последующих этапах, зависит от адекватности применяемого для обработки математического аппарата.

Среди факторов, влияющих на правильность измерения параметров электронного пучка, важную роль играет точность установки диагностирующей аппаратуры. Ниже представлено описание системы позиционирования диагностирующей аппаратуры, позволяющей при первоначальной примерной установке в автоматическом режиме выводить ее на точную позицию для измерения распределения плотности тока электронного пучка и поддерживать такое состояние с требуемой (заданной) точностью.



Рисунок 1. – Структурная схема измерительного комплекса

Структурная схема электромеханического измерительного блока диагностирующей аппаратуры приведена на рисунке 2.



- 1 – датчик системы позиционирования;
 2 – пластина; 3 – система двойного сканирующего зонда; 4 – двухпозиционный координатный стол;
 5 – двигатель вращения; 6 – двигатели позиционирования; 7 – вал вертикального перемещения;
 8 – двигатель вертикального перемещения;
 9 – оптопара; 10 – цилиндр Фарадея

Рисунок 2. – Структура электромеханического измерительного блока диагностирующей аппаратуры

Пучок электронов, проходящий через металлическую пластину 2 из тугоплавкого материала (тантал) с отверстием, снабженным датчиками системы позиционирования 1 (см. рисунок 2), принимается в заземленный цилиндр Фарадея 10 [5]. Под пластиной находится система двойного сканирующего зонда с датчиками, разнесенными в пространстве по вертикали и смещенными на угол друг относительно друга. Зонд закреплен на диске, приводимом во вращательное движение двигателем 5. Каждый из датчиков системы двойного сканирующего зонда представляет собой проволоку, изготовленную из тугоплавкого материала (нихром, вольфрам) диаметром 0,1 мм и длиной 45 мм. Такой выбор обусловлен критериями теплостойкости (нагрев до 1000 К), механической прочности и жесткости для недопущения провисания во время остановки и разгона двигателя. Каждый из зондов 3 жестко прикреплен к диску. Для исключения влияния электронного пучка на двигатель вращения 5 он размещен под защитной пластиной, в которой закреплен цилиндр Фарадея 10. Система двойного вращающегося зонда изолирована от корпуса диагностирующей аппаратуры. Двигатель установлен относительно пластины таким образом, что система двойного сканирующего зонда измеряет плотность тока электронного пучка, прошедшего отверстие в пластине 2, и в рабочей области плоскость расположения зондов можно считать нормальной к плоскости распространения тока диагностируемого электронного пучка. С постоянной скоростью проволоочки пересекают электронный пучок перпендикулярно оси и отбирают небольшую часть его тока. Сигнал, возникающий при пересечении проволочками пучка, представляет собой временную функцию напряжения. Двигатель

и пластина закреплены на стойке 7 и имеют возможность вертикального перемещения для поиска кроссовера пучка. Управление вращением и передача сигнала об измеряемых параметрах осуществляется посредством промышленного логического контроллера (ПЛК, на рисунке 2 не показан). Вся конструкция установлена на двухпозиционный координатный стол 4 и способна перемещаться в четырех направлениях горизонтальной плоскости, ортогональной к плоскости распространения электронного пучка. Пучок электронов проходит через датчик системы позиционирования и формирует управляющий сигнал для системы управления позиционированием, затем попадает на ПЛК, управляющий сигнал с которого поступает на двигатели системы позиционирования 6 и производит центрирование аппаратуры.

На рисунке 3 приведена структурная схема системы управления позиционированием диагностирующей аппаратуры, входные сигналы для которой формируют датчики 1 (см. рисунок 2).

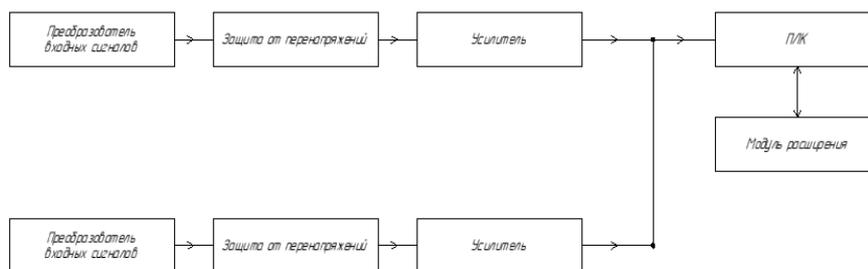


Рисунок 3. – Структурная схема автомата управления фокусировкой ионного луча

В качестве усилителя входных сигналов применялся каскад, включающий в себя операционный усилитель с высоким коэффициентом усиления и частотой компенсации. Данный каскад изображен на рисунке 4. Его принцип действия основан на том, что в блок преобразователя входных сигналов, включающий в себя разъем XS1 и два резистора R1, R5, с датчиков системы позиционирования поступает сигнал, проходит через блок защиты от напряжений, включающий в себя диоды VD1, VD5, VD6, конденсатор C3 и резисторы R9, R10, а затем попадает в блок операционного усилителя DA2.1, после чего поступает на ПЛК, в качестве которого применялся 6ED1052-1CC08-0BA0 Logo! 24CE фирмы Siemens [6].

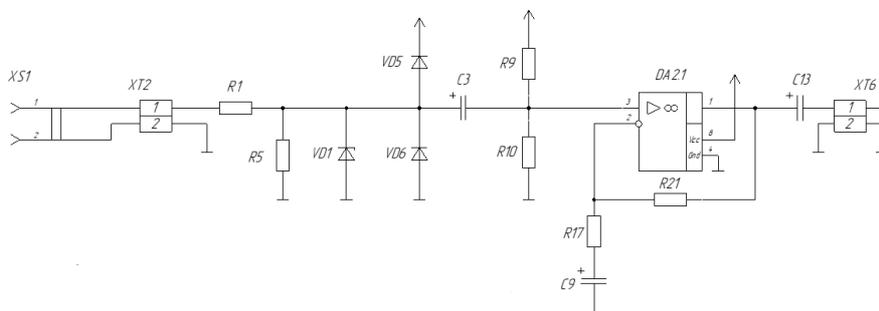


Рисунок 4. – Схема усилителя входных сигналов

На рисунке 5 изображена разработанная схема электрическая принципиальная системы управления позиционированием диагностической аппаратуры.

По величине сигнала рассогласования ПЛК формирует и передает управляющие сигналы на соответствующие двигатели позиционирования 6 (см. рисунок 2) в автоматическом режиме. Предусмотрен также и ручной режим управления по команде оператора. Для этого система управления снабжена дисплеем 6ED1055-4MH00-0BA1 Logo! TDE фирмы Siemens [7], где отображаются основные технические характеристики работы системы позиционирования и оператор формирует команды управления в ручном режиме. При разработке схемы также использовались следующие готовые модули, выбор которых был обусловлен их совместимостью с выбранным ПЛК и подходящими техническими характеристиками:

- модуль расширения для ПЛК 6ED1055-1CB10-0BA2 LOGO! DM16 24 фирмы Siemens [8] для обеспечения устройства нужным количеством входов и выходов;
- в качестве шагового двигателя применялся ST57-56 фирмы Leadshine [9] с драйвером DM556E фирмы Leadshine [10];
- в качестве операционного усилителя применялся сдвоенный усилитель марки LM358AN от National Instruments в корпусе SOIC8 [11];
- выпрямительные диоды марки RHRP30120 фирмы On Semiconductor [12];
- стабилитроны марки 1SMB5929BT3G фирмы On Semiconductor [13].

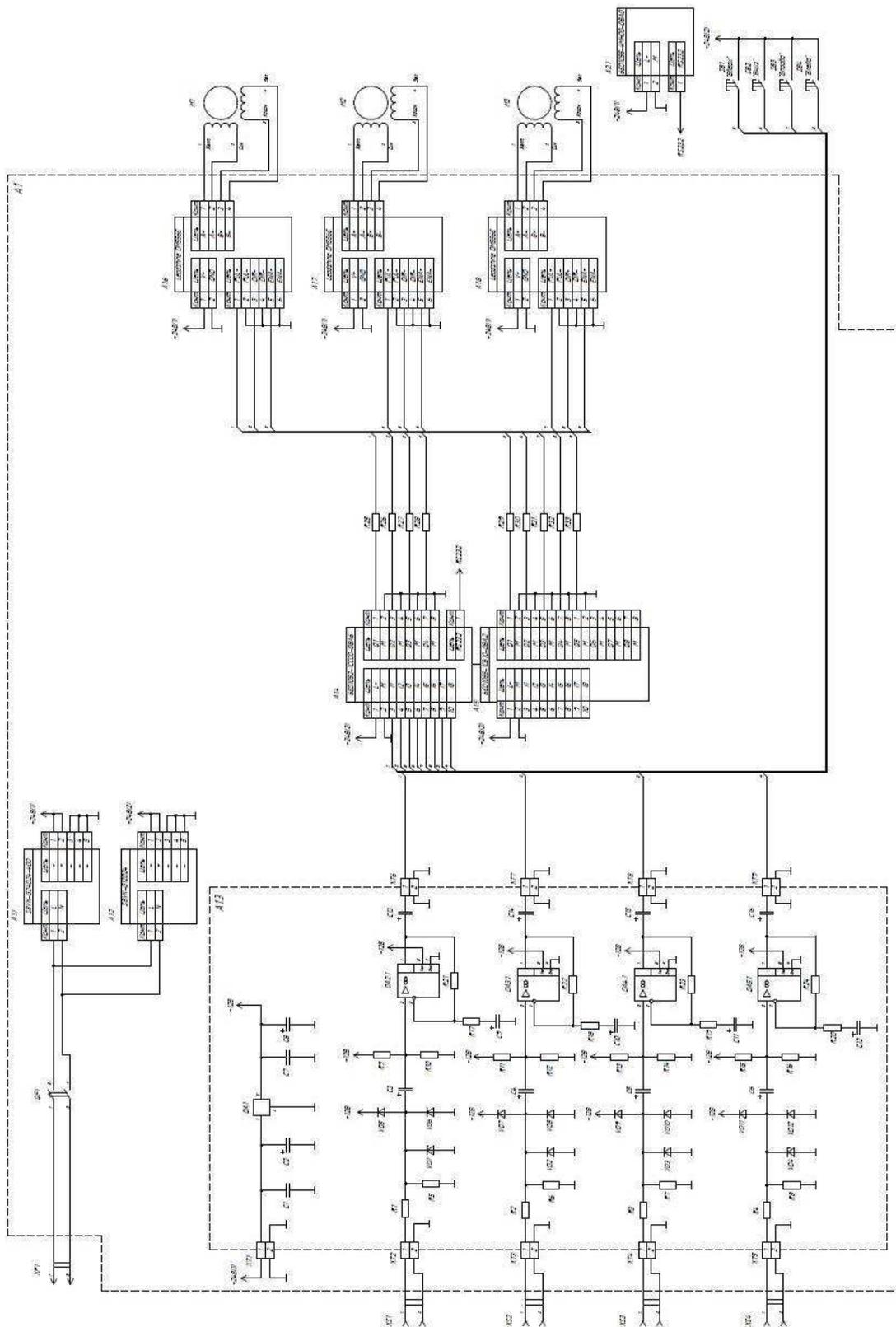


Рисунок 5. – Схема электрическая принципиальная системы управления позиционирования диагностической аппаратуры

Заключение. Проведенные эксперименты показали, что система позволяет выполнять позиционирование системы диагностики с точностью до 0,5 мм, начальное время позиционирования – до 1 с. Это позволяет сделать вывод о возможности применения разработанной системы позиционирования диагностической аппаратуры в составе аппаратно-программного комплекса для проведения комплексной диагностики электронных пучков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиллер, З. Электронно-лучевые технологии / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
2. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий : ч. 1 / Д.А. Антонович [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2016. – № 12. – С. 37–44.
3. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий : ч. 2 / Д.А. Антонович [и др.] – Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2017. – № 4 – С. 45–51.
4. Молоковский, С.И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, А.Д. Сушков. – Л. : Энергия, 1972.
5. Алямовский, И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский. – М. : Советское радио, 1966. – 456 с.
6. Техническая документация по 6ED1055-1CB10-0BA2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/logo/6ED1055-1CB10-0BA2.html>. – Дата доступа: 20.12.2020.
7. Техническая документация по LOGO! TDE 6ED1 055-4MH00-0BA1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.saa.su/product/siemens-logo-tde-6ed1-055-4mh00-0ba1>. – Дата доступа: 20.12.2020.
8. Техническая документация по 6ED1055-1CB10-0BA2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.siemens-pro.ru/logo/6ED1055-1CB10-0BA2.html>. – Дата доступа: 20.12.2020.
9. Техническая документация по шаговый двигатель ST57-56 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://darxton.ru/catalog_item/shagovyy-dvigatel-st57-56-flanets-57mm-nema23/. – Дата доступа: 20.12.2020.
10. Техническая документация на цифровой настраиваемый драйвер для шагового двигателя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://darxton.ru/catalog_item/dm556e-leadshine-naryazhenie-20-50-v-tok-do-5-6-a/. – Дата доступа: 20.12.2020.
11. Техническая документация на операционный усилитель LM358AN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chipdip.ru/product/lm358an-norb>. – Дата доступа: 20.12.2020.
12. Техническая документация на выпрямитель RHRP30120 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.mouser.com/ProductDetail/?qs=UeXq8qLVREE4mVP09LVybW%3D%3D>. – Дата доступа: 20.12.2020.
13. Техническая документация на стабилитрон 1SMB5929BT3G [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.mouser.com/ProductDetail/ON-Semiconductor/1SMB5929BT3G?qs=vLkC5FC1VN%2FFUr7OS2Q1Aw%3D%3D>. – Дата доступа: 20.12.2020.
14. Humphries, S.Jr. Charged Particle Beams / S.Jr.Humphries. – New York : John Wiley and Sons, 2002. – 819 p.
15. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
16. Лоусон, Дж. Физика пучков заряженных частиц / Дж. Лоусон ; пер. с англ. А.В. Агафонова. – М. : Мир, 1980. – 438 с.

Поступила 24.12.2020

POSITIONING SYSTEM FOR DIAGNOSTIC EQUIPMENT OF ELECTRON BEAM PARAMETERS

S. ABRAMENKO, Yu. GOLUBEV, P. SOLDATENKO, D. ANTONOVICH

Numerical simulation allows you to narrow the set of parameters in the development of electron-optical systems to obtain a beam with certain characteristics. However, for practical fine-tuning (optimization) of electron-optical systems, appropriate equipment is required, which makes it possible to evaluate the quality of the beam based on comparing the degree of influence of various external factors on the electron-optical parameters of the electron beam - beam divergence, current density distribution over the beam cross section, and the minimum possible beam diameter. In this case, due to the multifactorial nature of the conditions for the formation of electron beams, it is advisable to use complex characteristics, for the calculation of which various hardware and software complexes are used. The increase in the accuracy of the operation of such complexes is significantly influenced by the relative position of the system of sensors of the diagnostic equipment and the electron beam being diagnosed. The paper presents a description and a schematic diagram of the developed system for automatic positioning of diagnostic equipment, the use of which in the study of the distribution of the current density of the electron beam eliminates the error caused by the incorrect location of the scanning sensors relative to the measured electron beam.

Keywords: diagnostics of the parameters of the electron beam, the quality of the electron beam, diagnostic equipment, positioning system.

УДК 530.122.1

РАСЧЕТ СИГНАЛА ДЕТЕКТОРА ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЯ ОТРАЖАЮЩИХ ЗЕРКАЛ

*И.П. ОХРИМЕНКО, канд. физ.-мат. наук, доц. Н.Н. КОЛЬЧЕВСКИЙ, П.В. ПЕТРОВ
(Белорусский государственный университет, Минск)*

Исследован детектор гравитационных волн с подвижными зеркалами. В функционирующих на сегодняшний день наземных детекторах (LIGO и др.) отражающие зеркала изолированы от вибраций любого рода, но не являются абсолютно статичными, а наоборот, находятся в системе 4-ступенчатого маятника с большим периодом колебаний. Предложена модель детектора гравитационных волн с зеркалами, осциллирующими по различным функциональным зависимостям. Разработано программное обеспечение LIGO-RM для проведения численного моделирования нового типа детектора. Произведен ряд расчетов сигнала на детекторе гравитационных волн с колеблющимися зеркалами с помощью программы LIGO-RM. Представлены параметры расчета и обсуждены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: интерферометры, гравитационные волны, детектор, численное моделирование, LIGO, подвижные зеркала.

Введение. Пуанкаре был первым физиком, который применил термин «гравитационные волны» (Ondes gravifiques) к распространяющимся изменениям гравитационного поля [5]. За «решающий вклад в LIGO-детектор и наблюдение гравитационных волн (ГВ)», была присуждена Нобелевская Премия 2017 года в области физики [1]. На сегодняшний день уже функционируют три гравитационно-волновые обсерватории: LIGO (USA), Virgo (Italy) и KAGRA (Japan) [2]. Обсерватория LIGO сделала ряд фундаментальных физических открытий. Так, было установлено, что скорость распространения ГВ равна скорости света с точностью более, чем $1 \cdot 10^{-15}$ [3]. Гравитационные волны – это изменения гравитационного поля (поля тяготения), распространяющиеся в пространстве с фундаментальной скоростью [1; 4]. Гравитационно-волновым детектором считается любая система пробных масс (тел) или протяженное тело и сенсор, реагирующие и записывающие малые относительные смещения масс или силы, которые их вызвали. ГВ, распространяясь с фундаментальной скоростью света, изменяет свойства кривизны пространства, воздействуя на тела. Амплитуда возмущений, вызванных ГВ от реальных астрономических источников обратно пропорциональна расстоянию до источника и оказывается очень малой величиной ($\sim 10^{-21}$). Наибольшее распространение получили два типа наземных детекторов гравитационных волн:

- 1) массивный цилиндр длиной от 1 до 3 м, регистрирующий низкочастотные механические колебания (Weber bar), – детектор резонансного типа [6];
- 2) лазерный интерферометр, регистрирующий сдвиг интерференционных полос, – детектор электромагнитного принципа [7].

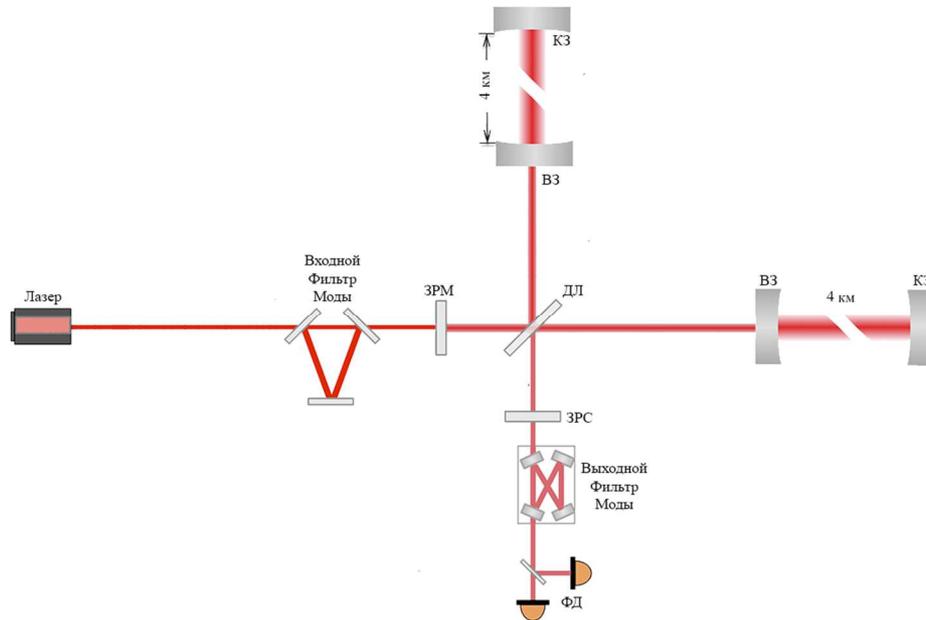
Основной проблемой детекторов первого типа являются тепловые колебания, а детекторов второго типа – сейсмические возмущения [8]. LIGO (Laser-Interferometer Gravitational-wave Observatory) – гравитационно-волновая обсерватория второго типа (рисунок 1) – была построена в 2002 г. и состоит из двух идентичных установок, расположенных в разных концах Соединенных Штатов Америки: одна находится в Ливингстоне, штат Луизиана, а другая – в Хэнфорде, штат Вашингтон. LIGO использует физические свойства света и самого пространства для обнаружения гравитационных волн. LIGO-детектор представляет собой связку из двух больших оптических интерферометров, разнесенных в пространстве на расстояние в 3,002 км. Каждый такой интерферометр является модернизированной версией известного интерферометра Майкельсона. Модернизация осуществлена за счет добавления резонаторов Фабри-Перо в каждое из плеч интерферометра для увеличения оптического хода луча. Основа интерферометра Майкельсона включает в себя источник – лазер; два перпендикулярных плеча, по которым распространяются лучи; фотодиод, на котором два луча снова смешиваются в один.

Идея эксперимента на LIGO-детекторе: когда гравитационная волна проходит через детектор, растяжение и сжатие пространства заставляет плечи интерферометра попеременно удлиняться и укорачиваться в силу поляризации ГВ. По мере того как плечи интерферометров изменяют длины, лазерные лучи, перемещаясь через них, проходят различные расстояния, приводящие к изменению в интерференции между волнами, и происходит сдвиг интерференционных полос. Детальная информация о технических характеристиках LIGO приведена в [9].

По состоянию на декабрь 2019 г. обсерватория LIGO произвела 3 запуска наблюдений, именуемых O^1 , O^2 и O^3 , и зарегистрировала 67 событий, претендующих на явление ГВ [10].

После экспериментального подтверждения существования ГВ во всем мире началась разработка крупных проектов наземных гравитационно-волновых детекторов нового поколения, а также космических

детекторов с повышенной чувствительностью, способных регистрировать новый спектр астрономических источников ГВ [11–18]. Помимо обсерваторий ГВ, США объявила о проекте создания генератора ГВ высокой частоты как оружия, способного уничтожить планетоид размером с Землю [19].



ЗРМ – зеркало рециркуляции мощности; ДЛ – делитель луча; ЗРС – зеркало рециркуляции сигнала; ФД – фотодетектор; ВЗ – входное зеркало; КЗ – концевое зеркало

Рисунок 1. – Упрощенная схема LIGO-детектора

В связи с малой величиной амплитуды ГВ к чувствительности детекторов предъявляются экстремальные требования, превышающие аналогичные требования при наблюдении квантовых эффектов. Из-за наличия шумов различного типа, частотные спектры детекторов ГВ сильно ограничены. Из-за высокой стоимости таких детекторов (для LIGO ~800 млн \$ США) востребовано программное обеспечение (ПО), способное моделировать, оценивать параметры и возможности различных конфигураций детекторов ГВ.

Целью данной работы является разработка ПО, моделирующего работу LIGO-детектора и позволяющего проводить численное моделирование и исследовать сигнал детектора ГВ.

Расчет сигнала на гравитационно-волновом детекторе с колеблющимися зеркалами. Для изучения работы детектора ГВ и численной оценки его разрешающей способности выполнено численное моделирование установки гравитационно-волнового детектора. Разработан алгоритм и программное обеспечение LIGO-RM, которые моделируют работу ГВ-детектора и позволяют управлять его конфигурацией, а также проводить численный эксперимент по оценке чувствительности детектора.

Программа LIGO-RM, или Laser-Interferometer Gravitational-wave Observatory with Ringing Mirrors, исследует модель детектора ГВ с осциллирующими отражающими зеркалами. В переводе с англ. *Ring* означает *звенеть, колебаться* или *осциллировать*. В данной работе исследуется влияние колебаний отражающих зеркал из плавленого кварца на заданной частоте, т.е. зеркала будут звенеть – *Ring*. Алгоритм разработанной программы представлен на рисунке 2.

Данный алгоритм заложен в основу LIGO-RM. LIGO-RM написана на языке C++ в кроссплатформенной среде разработки Embarcadero RAD Studio и функционирует в операционной системе Windows.

В программном обеспечении LIGO-RM для расчета фазового сдвига лазерного луча детектора в результате прохождения сквозь него гравитационной волны и последующей деформации плеч интерферометра используется выражение

$$T = t_0 \cdot \left(1 + \frac{\int_0^T g(t) dt}{T} \right), \quad (1)$$

где t_0 – время обычное, или неизменное, которое волна излучателя затрачивает на прохождение плеча интерферометра при отсутствии возмущающей гравитационной волны;

$g(t)$ – функция комплексной амплитуды гравитационной волны;

T – момент времени, в который фронт волны лазера возвращается на делитель за один импульс.

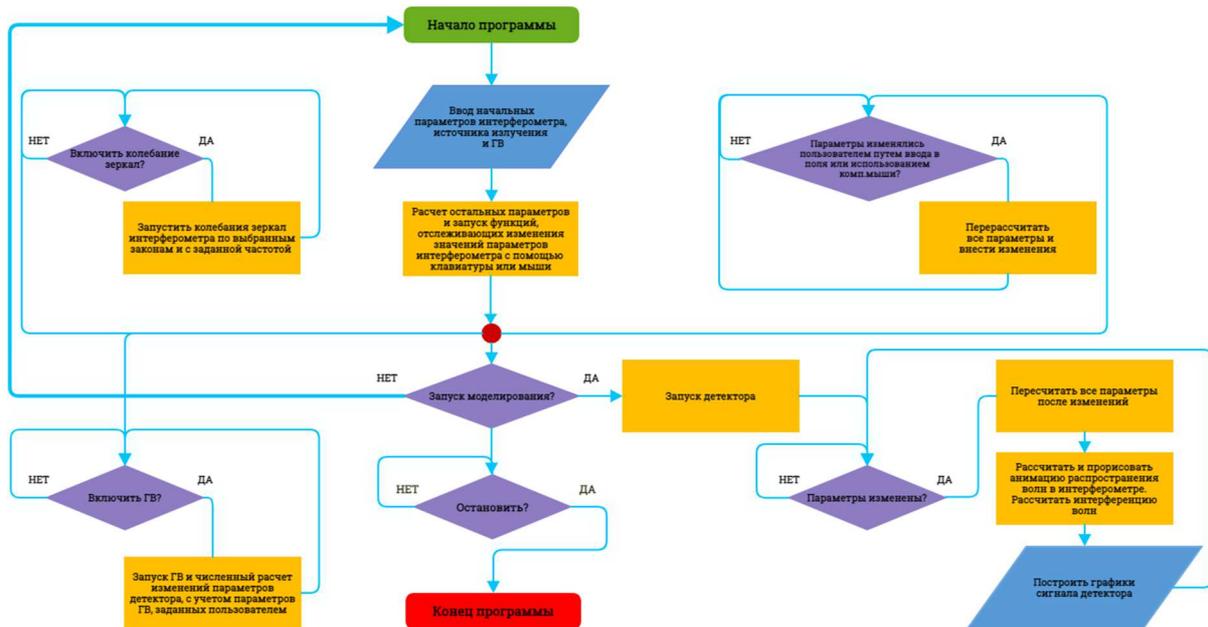


Рисунок 2. – Алгоритм разработанной программы LIGO-RM

Рассмотрим случай, при котором формула (1) имеет аналитическое решение. Для этого в качестве функции гравитационной волны запишем линейную функцию $g(t) = kt + b$, тогда аналитическое решение уравнения для фазы примет вид

$$T = \frac{1+b}{\frac{1}{t_0} + k}. \quad (2)$$

Уравнение (1) позволяет находить набег фазы волны после прохождения плеча интерферометра лучом лазера в зависимости от вида функции гравитационной волны $g(t)$, что используется для численного решения в разработанной программе.

Согласно представленной на рисунке 2 блок-схеме алгоритма в начале выполнения программы пользователь вводит и в дальнейшем контролирует следующие параметры детектора и гравитационной волны: длину волны излучателя; длину плеч интерферометра (положение зеркал); запуск колебаний зеркал по заданному закону с определенной частотой; запуск гравитационной волны (рисунок 3). Изменяя указанные параметры, пользователь получает новую конфигурацию детектора, а моментальное отображение результатов численного эксперимента, для перерасчета новой конфигурации позволяет оценить ее качественные характеристики и найти оптимальную конфигурацию детектора. Например, положение зеркала фактически определяет длину плеча интерферометра L , что напрямую связано с временем T в формуле (1), которое волна затратит на прохождение данного плеча. Положение зеркала, а соответственно и длина плеча интерферометра, может быть сложной функцией, зависящей от времени, и носить колебательный характер, что и отражено в данной работе. Изменение длины волны излучателя в разработанном ПО носит изобразительно-образовательный характер, показывающий взаимосвязь между длиной волны и длиной плеча интерферометра, но не влияет на результат моделирования сигнала детектора в рамках предложенной модели расчета.

LIGO-RM имеет графический интерфейс (см. рисунок 3), что значительно повышает эффективность проведения численного эксперимента (моделирования). Графический интерфейс позволяет оперативно управлять настройками эксперимента, изменяя параметры детектора за счет ввода новых значений или используя интерактивные функции: перетаскивание зеркал с помощью мыши, поворот графических регуляторов и т.д. Для отображения результатов численного эксперимента и образовательной части приложение поддерживает интерактивный режим с анимацией, отображающий распространение излучения в плечах интерферометра, движение зеркал, а также выполняющий построение графиков в реальном времени, имитируя работу осциллографа. Все это дает возможность пользователю наблюдать работу детектора с возможностью непосредственного вмешательства.

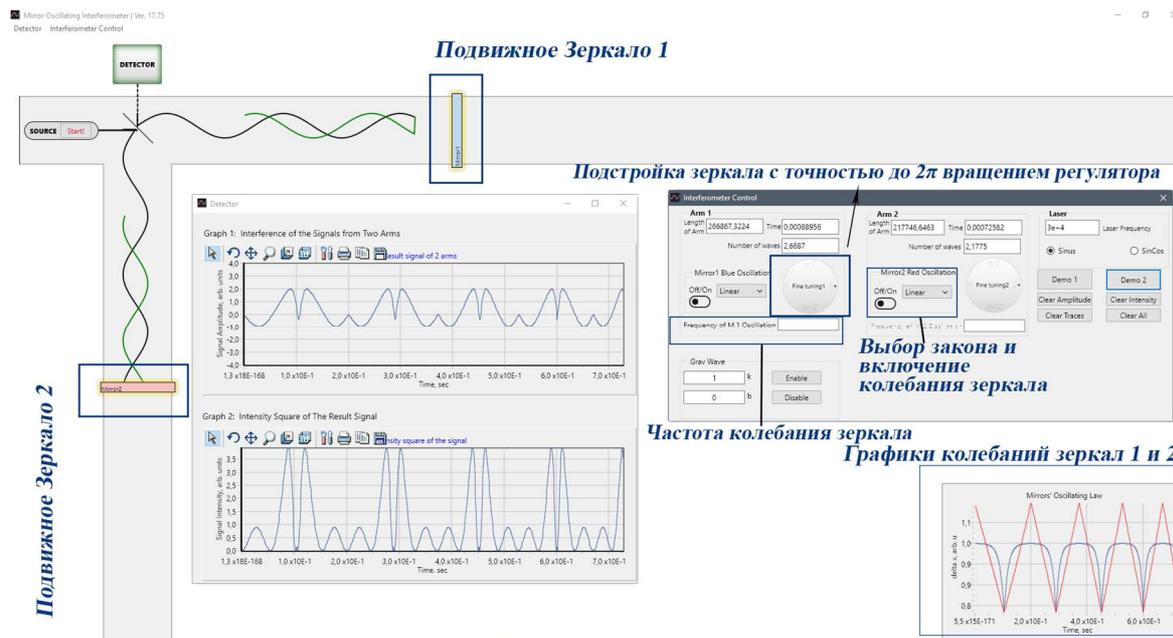


Рисунок 3. – Снимок приложения LIGO-RM и описание его функциональных возможностей

Согласно алгоритму (см. рисунок 2) после ввода параметров программа производит расчет анимации и физический расчет интерференции сигналов. В LIGO-RM реализовано анимационное отображение сопровождения распространения волны в интерферометре до зеркал и обратно, изменения положения зеркал пользователем вручную или их колебания по заданному закону, и формируется ряд динамических графиков. Пользователь может активировать колебания зеркал по определенному закону, выбирая нужный из «выпадающего списка». Графики законов колебания зеркал при их активации отображаются в правом нижнем углу окна программы. Пользователь задает частоту этих колебаний. Сигналы ГВ-детектора отображаются в отдельном окне путем построения графиков в режиме реального времени с шагом, который задается пользователем (по умолчанию – 1 мс). Динамическими графиками являются график результирующей амплитуды сигнала на детекторе; график результирующей интенсивности сигнала; графики колебания зеркал.

Созданное ПО было протестировано на задачах, имеющих аналитическое решение:

- 1) при неравной длине плеч интерферометра наблюдался постоянный ненулевой сигнал,
- 2) при равной длине плеч амплитуда сигнала равнялась нулю.

С помощью разработанного ПО LIGO-RM был проведен ряд численных экспериментов и получены результаты работы детектора при наличии и отсутствии колебаний зеркал. На рисунке 5 представлены результаты численных экспериментов для следующих параметров детектора:

- исходная длина плеч интерферометра – 300 000 м (во всех численных экспериментах);
- частота источника излучения в детекторе – $3 \cdot 10^4$ Гц (для всех графиков);
- длина волны источника излучения в детекторе – $1 \cdot 10^4$ м = 10 км;
- совместные колебания отражающих зеркал в плечах интерферометра происходили только в противофазе (для всех графиков).

Характер функционального движения (колебания) отражающих зеркал для представленных результатов численных экспериментов (рисунок 4), включая численные значения параметров, описывается следующим образом:

(1) – колебания зеркал по линейному закону: изменение координаты x зеркала постоянно и пропорционально коэффициенту n , зависящему от частоты колебания зеркала $x = n(\theta)t$. Частота колебания зеркала в проведенных экспериментах была одинаковой для зеркал и составляла $\theta = 1/3 \text{ с}^{-1}$;

(2) – колебания зеркал по синусоидальному закону $x = \sin(n(\theta)t)$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$;

(3) – колебания зеркал по кубическому закону $x = (n(\theta)t)^3$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$;

(4) – колебания зеркал по нелинейной зависимости пятой степени $x = (n(\theta)t)^5$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$;

(5) – колебания зеркал по экспоненциальному закону $x = e^{n(\theta)t}$, где $\theta = (3 \text{ с})^{-1}$.

Начальное положение зеркал для каждого эксперимента было одинаковым и находилось на отметке $x_{\text{нач.}} = 300\,000$ м; изменялся только закон (линейный, синусоидальный, кубический, нелинейный 5-й степени,

экспоненциальный), по которому зеркала преодолевали расстояние. В случае, когда «колебались» оба зеркала, колебания происходили в противофазе. Для каждого закона был проведен расчет графиков сигнала детектора: когда одно зеркало колеблется, а другое неподвижно; когда оба зеркала осциллируют по заданному закону в противофазе.

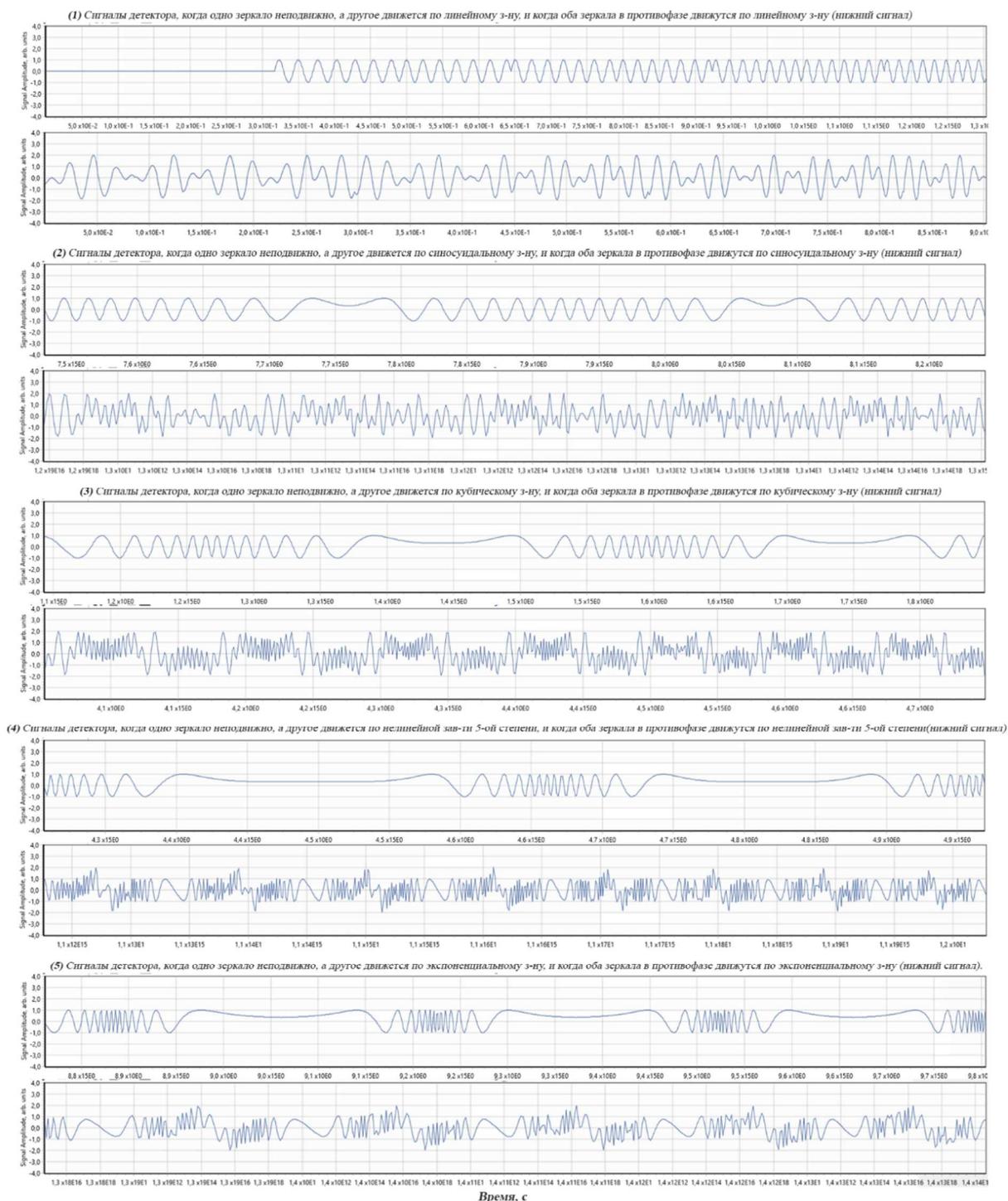


Рисунок 4. – Графики типичных сигналов детектора гравитационных волн при различных характерах колебания отражающих зеркал, рассчитанных в ПО LIGO-RM

Рассмотрим график совместного колебания зеркал (см. рисунок 4). Тип сигнала – незатухающие гармонические колебания длительностью 1136 мс. Амплитуда колеблется от 1,995 до $-1,895$, среднее значение – $0,013$. Видны повторяемые участки с периодичностью 166 мс, следующие друг за другом и образующие весь сигнал. Каждый участок $\sim 1/7$ сигнала и имеет три интервала с переменной частотой,

которые можно классифицировать по изменению крутизны пиков: 1-й интервал – 60 мс, 12 пиков большой крутизны; 2-й интервал – 52 мс, 2 пика малой крутизны (длительность одного – 32 мс); 3-й интервал – 54 мс, 16 пиков большой крутизны. В 1-м и 3-м интервалах частота следования пиков изменяется в ~ 2 раза.

Результаты численного эксперимента при наличии ГВ линейного типа показывают, что во время отсутствия гравитационной волны сигнал на детекторе постоянный и равен нулю. В момент прохождения гравитационной волны сквозь детектор плечо интерферометра испытывает деформацию и на детекторе возникает сигнал. Сигнал по форме напоминает гладкую синусоиду, частота которой меняется в сторону увеличения.

На рисунке 5 показан сигнал детектора для высокочастотного колебания зеркал.

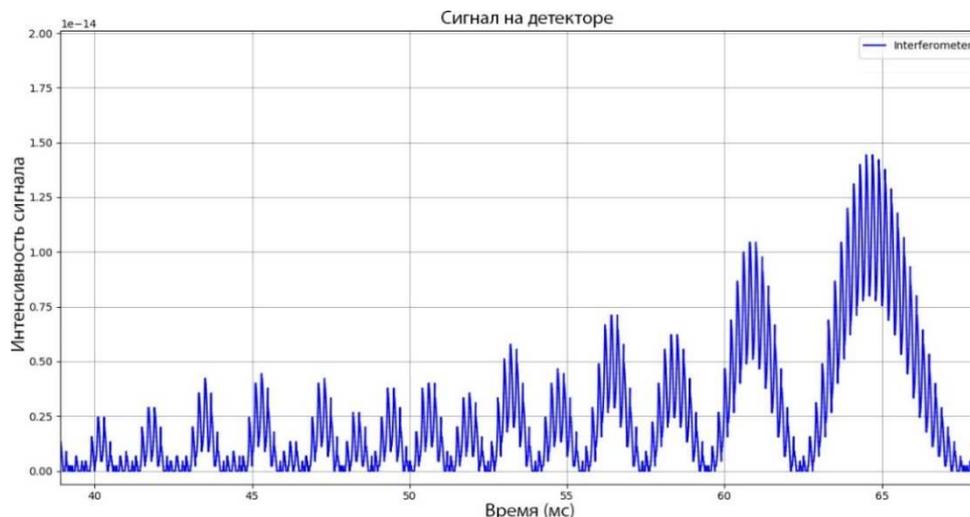


Рисунок 5. – График численного моделирования сигнала детектора с колебанием зеркал высокой частоты

На графике изображен сигнал на детекторе, где одно из зеркал совершает высокочастотные колебания по линейному закону и испытывает воздействие чирпа гравитационной волны. Длина волны лазера – 1024 нм, максимум отклонения зеркала от исходного положения – $1 \cdot 10^{-16}$ м, частота колебаний зеркала – 5 Гц, амплитуда ГВ – 10^{-15} , частота – 100 Гц, угол падения подобран так, что ввиду собственной поляризации ГВ воздействует только на одно плечо детектора.

Разработанное ПО LIGO-RM позволяет проводить широкий спектр экспериментов для всевозможных конфигураций ГВ-детектора и параметров колебания зеркал и получать численную оценку таких экспериментов, определяя достоинства и недостатки различных конфигураций детектора.

Заключение. Ученые находятся на пороге открытия новой области физической науки – гравитационно-волновой астрометрии [4; 11–19], к настоящему времени уже зарегистрировано 67 волн. Появляется большое число проектов гравитационно-волновых обсерваторий на базе лазерного интерферометра, где активно пытаются увеличить его чувствительность, что напрямую связано с неподвижностью отражающих зеркал. В работе предложен новый тип детектора гравитационных волн – детектор с осциллирующими отражающими зеркалами на базе интерферометра Майкельсона. Разработано программное обеспечение LIGO-RM, моделирующее детектор гравитационных волн с осциллирующими зеркалами и позволяющее проводить численный эксперимент. Программа поддерживает моделирование наличия и отсутствия гравитационных волн разного типа, позволяя наблюдать их влияние на работу детектора и численно оценивать его чувствительность. LIGO-RM позволяет задавать любые параметры конфигурации детектора, задавать любой функциональный характер движения-колебания зеркал и его параметры. Выполнены расчеты сигналов детектора с осциллирующими отражающими зеркалами для ряда функциональных зависимостей движения зеркал, результаты отображены на рисунке 4. Показаны сравнительные сигналы гравитационно-волнового детектора при колебании одного зеркала и при совместном колебании двух зеркал в противофазе для различных законов колебаний (см. рисунок 4). Выполнены и визуализированы результаты расчетов сигнала детектора гравитационных волн для двух видов колебаний зеркал: низкочастотного и высокочастотного (см. рисунки 4, 5 соответственно).

ЛИТЕРАТУРА

1. The Nobel Prize : The Nobel Prize in Physics 2017 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/summary/>. – Date of access: 12.12.2019.
2. KAGRA Observatory News : KAGRA Gravitational-wave Telescope Starts Observation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/archives/1381>. – Date of access: 25.02.2020.
3. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger / B. P. Abbott [et al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2017. – Vol. 848, No. 2. – 59 p.

4. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger / B.P. Abbot [et al.] // Phys. Rev. Let. – 2016. – Vol. 116, iss. 6. – 061102.
5. Poincare, H. Sur la dynamique de l'électron / H. Poincare // Rend. Circ. Mat. Palermo. – 1906. – Vol. 21, ser. 1. – P. 129–176.
6. Weber, J. Gravitational-wave-detector events / J. Weber // Phys. Rev. Let. – 1968. – Vol. 20, iss. 23. – P. 1307–308.
7. Gertsenshtein, M.E. On the detection of low frequency gravitational waves / M.E. Gertsenshtein, V.I. Pustovoit, // JETP. – 1962. – Vol. 43, No. 2. – P. 605–607.
8. Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors / B.P. Abbott [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2017. – Vol. 34, No. 4. – 044001.
9. Advanced LIGO : LIGO Scientific Collaboration / LIGO – Livingston : Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, 2014 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1411/1411.4547.pdf>. – Date of access: 1.01.2020.
10. LIGO NEWS : LIGO Suspends Third Observing Run (O3) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200326>. – Date of access: 1.04.2020.
11. Sensitivity studies for third-generation gravitational wave observatories / S. Hild [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2011. – Vol. 28, No. 9. – 094013.
12. Laser Interferometer Space Antenna : A proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts / Albert Einstein Institute ; K. Danzmann [et al.]. – Hannover, 2017. – 41 p.
13. NGO, Revealing a hidden Universe: opening a new chapter of discovery (New Gravitational wave Observatory) : Assessment Study Report / European Space Agency ; O. Jenrich [et al.]. – Paris, 2011. – 153 p. – № ESA/SRE (2011) 19.
14. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO / S. Kawamura [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2008. – Vol. 122. – 012006.
15. Laser interferometry for the Big Bang Observer / G.M. Harry [et al.] // Class. Quantum Grav. – 2006. – Vol. 23. – P. 4887–4894.
16. Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO / D. Reitze [et al.] // Bulletin of the American Astronomical Society. – 2019. – Vol. 51, iss. 7, id. 35.
17. Yagi, K. Detector configuration of DECIGO/BBO and identification of cosmological neutron-star binaries / K. Yagi, N. Seto // Phys. Rev. D. – 2011. – Vol. 83. – 20 p.
18. Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory. Instrument Science White Paper : LIGO-T1600119–v4 : adopted 27.10.16. – Cambridge : Technical Note : LIGO Scientific Collaboration, 2016. – 116 p.
19. High frequency gravitational wave generator [Electronic resource] : pat. US 10,322,827 B2/ C. Salvatore, P. – Publ. date 18.01.2019. – Mode of access: [https://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%25252Fmeta.html%25252FPTO%25252Fsearch-adv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=\(2019\\$.PD.%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522\)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522%2526RS=\(ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522\)](https://pdfpiw.uspto.gov/piw?docid=10322827&SectionNum=1&IDKey=59C80614D29C&HomeUrl=http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2%2526Sect2=HITOFF%2526u=%25252Fmeta.html%25252FPTO%25252Fsearch-adv.htm%2526r=2%2526f=G%2526l=50%2526d=PTXT%2526p=1%2526S1=(2019$.PD.%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522)%2526OS=ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522%2526RS=(ISD/2019%2526BAND%2526B%252522LIGO%252522)). – Date of access: 01.02.2020.

Поступила 03.09.2020

THE RECKONING OF GRAVITATIONAL WAVE DETECTOR SIGNAL INTRODUCING OSCILLATING REFLECTIVE MIRRORS

I. OHRYMENKO, N. KOLCHEVSKY, P. PETROV

The gravitational wave detector with movable mirrors is studied. Operating ground-based detectors (LIGO, etc.) contain reflecting mirrors isolated from vibrations of any kind. However, the mirrors are not static and on the contrary, they are placed in the system of a 4-stage pendulum with a long oscillation period. A model of a GW detector with mirrors oscillating for various functional dependences is proposed. The “LIGO-RM” software has been developed and is available for the numerical simulation of a new type detector. A number of the signal calculations of the gravitational wave detector with oscillating mirrors have been performed using the LIGO-RM program. The parameters used for the calculation are presented and the results of the numerical simulation are discussed.

Keywords: *interferometers, gravitational waves, detector, numerical simulation, LIGO, movable mirrors.*

УДК 621.316.718.5

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

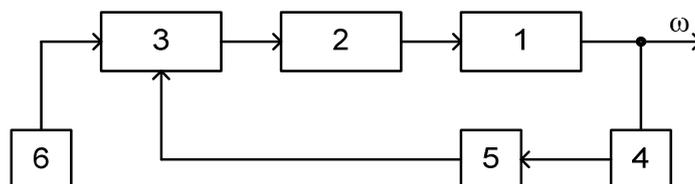
канд. техн. наук, доц. А.С. ВЕРШИНИН
(Полоцкий государственный университет)

В [1] описан импульсный электропривод постоянного тока, в котором рабочие импульсы обратной связи формируются с помощью механического модулятора с двумя первичными формирователями импульсов, расположенными диаметрально относительно механического модулятора с целью исключения влияния его эксцентриситета на формирование рабочих импульсов обратной связи. Для этого используется специальная цифровая схема обработки импульсов от этих первичных формирователей в реальном времени с формированием выходных рабочих импульсов обратной связи, на частоту следования которых эксцентриситет механического модулятора практически не влияет [1]. В работе приведены возможные варианты построения цифровой схемы для обработки импульсов от указанных первичных формирователей импульсов в реальном времени с формированием выходных рабочих импульсов обратной связи для импульсной системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока. Также предложен упрощенный метод и цифровая схема обработки импульсов от первичных формирователей импульсов в реальном времени с формированием выходных рабочих импульсов обратной связи.

Ключевые слова: электродвигатель, механический модулятор, формирователь импульсов, эксцентриситет, логические элементы, триггеры, скорость вращения, точность стабилизации.

Введение. При решении ряда задач необходимо выдерживать скорость вращения вала электропривода с высокой точностью, например, в приборах для угловых измерений, в которых используется равномерно вращающаяся мера (механический модулятор). С этой целью часто используют системы автоматического регулирования (стабилизации) скорости вращения вала электродвигателя обычно постоянного тока, поскольку управление скоростью вращения таких двигателей проще.

Во многих случаях применяют импульсные астатические системы автоматической стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока [1–3], общая типовая структура которых приведена на рисунке 1.



1 – электродвигатель постоянного тока с механическим модулятором 4 на валу; 2 – ключевой усилитель; 3 – регулятор; 5 – оптронный формирователь импульсов; 6 – задающий генератор

Рисунок 1. – Общая структура импульсной системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока

Конечно, точность стабилизации скорости вращения вала вместе с механическим модулятором в такой системе определяется прежде всего метрологическими характеристиками регулятора 3, стабильностью частоты задающего генератора импульсов 6, а также точностью формирования импульсов обратной связи, частота которых соответствует фактической скорости вращения вала электродвигателя [1].

К настоящему времени схемотехника построения систем автоматического регулирования (стабилизации) скорости вращения вала электродвигателей постоянного тока проработана достаточно глубоко, и посредством регулятора 3 повысить точность стабилизации указанной скорости вращения весьма сложно. Однако имеется возможность повысить точность измерения фактической скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока в виде частоты рабочих импульсов обратной связи в системе.

Для этого следует исключить влияние эксцентриситета механического модулятора на формирование рабочих импульсов обратной связи в системе стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока. Наличие эксцентриситета механического модулятора, насаженного на вал электродвигателя (а он есть всегда), приводит к неравномерности следования импульсов обратной связи, формируемых по меткам механического модулятора и расположенных по его окружности. В результате точность стабилизации скорости вращения снижается.

В [1] описан импульсный электропривод постоянного тока, в котором рабочие импульсы обратной связи формируются с помощью механического модулятора с метками и двумя первичными формирователями импульсов, расположенными диаметрально относительно механического модулятора с целью исключения влияния его эксцентриситета на формирование рабочих импульсов обратной связи. Там же описан и аналитически доказан способ исключения влияния эксцентриситета механического модулятора на формируемые выходные импульсы обратной связи, приведена и описана цифровая схема, выполняющая обработку во времени исходных импульсов от первичных формирователей и формирующая рабочие импульсы обратной связи для системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока.

Цель работы. Цель данной работы – показать возможные варианты построения более простых цифровых схем для обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей и формирования выходных рабочих импульсов обратной связи, а также разработать упрощенный метод и цифровую схему обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей и формирования выходных рабочих импульсов обратной связи для системы стабилизации.

Обзор возможных вариантов построения цифровых схем для формирования выходных рабочих импульсов обратной связи. Приведенная в [1] цифровая схема формирования выходных рабочих импульсов обратной связи для системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока не является единственной. На рисунке 2 показана функциональная схема импульсной системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока с цифровой схемой формирования рабочих импульсов обратной связи по сигналам от двух первичных формирователей импульсов, диаметрально расположенных относительно механического модулятора [1].

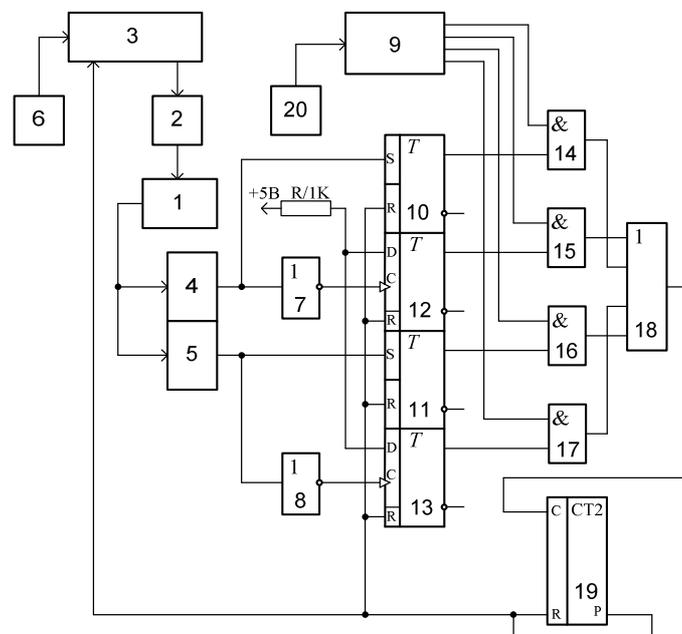


Рисунок 2. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока

Эта функциональная схема приведена с целью проведения сравнительного анализа с другими схемами аналогичного назначения в части формирования импульсов обратной связи по меткам механического модулятора. Принцип действия схемы описан в [1].

В состав указанной системы стабилизации входят электродвигатель постоянного тока 1 с механическим модулятором, ключевой усилитель 2, регулятор 3, диаметрально расположенные оптронные формирователи импульсов (датчики) 4 и 5, задающий генератор импульсов 6 и цифровая схема формирования рабочих импульсов обратной связи [1].

Совокупность элементов НЕ 7 и 8, распределителя импульсов 9, RS-триггеров 10 и 11, D-триггеров 12 и 13, элементов И 14–17, элемента ИЛИ 18 и двоичного счетчика импульсов 19 вместе с генератором тактовых импульсов 20 образуют цифровую схему, которая формирует рабочие импульсы, снимаемые с выхода переполнения счетчика импульсов и используемые в качестве импульсов отрицательной обратной связи регулятора 3 [1; 4–6].

Позиционные обозначения элементов и узлов, выполняющих одинаковые функции во всех рассматриваемых схемах, сохраним одинаковыми, а вновь вводимые элементы будут иметь другие по порядку позиционные обозначения.

Первое незначительное упрощение схемы формирования рабочих импульсов обратной связи можно получить заменой RS-триггеров 10 и 11 (см. рисунок 2) на элементы ИЛИ 21 и 22 с соответствующими связями (рисунок 3).

Из анализа исходной схемы (см. рисунок 2) следует, что по переднему фронту импульса с выхода первичного формирователя 4 RS-триггер 10 устанавливается в единичное состояние и сохраняет его до появления формируемого выходного импульса обратной связи. И все это время RS-триггер 10 сигналом с прямого выхода разрешает прохождение импульсов от распределителя импульсов 9 через элемент И 14.

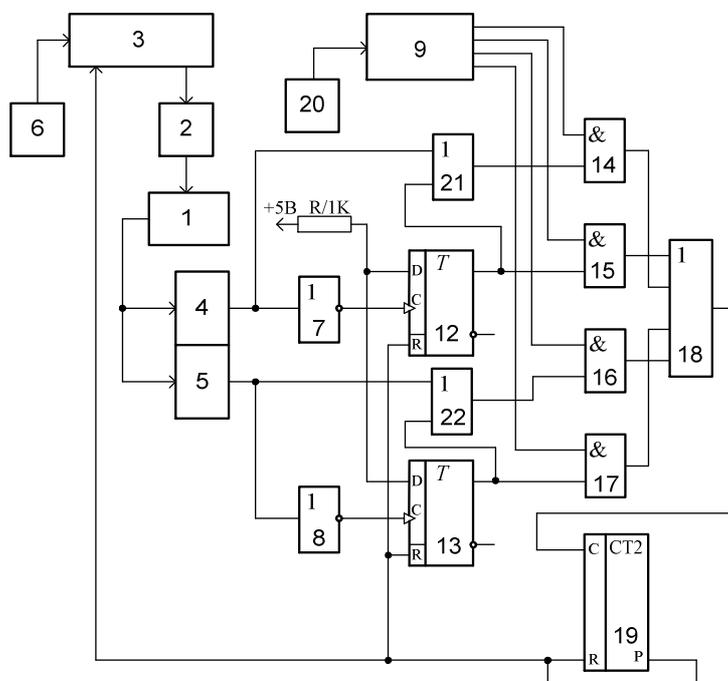


Рисунок 3. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока

В схеме (см. рисунок 3) выходной импульс первичного формирователя 4 через элемент ИЛИ 21 разрешает прохождение импульсов через элемент И 14. Это продолжается в течении длительности указанного импульса. В момент окончания действия импульса с выхода формирователя 4 через инвертор 7 D-триггер 12 переключается в единичное состояние и сигналом с прямого выхода D-триггера 12 через элемент ИЛИ 21 разрешает прохождение импульсов через элемент И 14.

Аналогично может быть исключен RS-триггер 11 и вместо него установлен элемент ИЛИ 22, входы которого соединены с выходом первичного формирователя импульсов 5, с прямым выходом D-триггера 13. Таким образом, при указанной замене работоспособность схемы полностью сохраняется.

При внимательном рассмотрении функциональных схем, приведенных на рисунках 2 и 3, можно увидеть что совокупность элементов И 14, 15, 16, 17 с элементом ИЛИ 18 близка к внутренней структуре мультиплексора на четыре входа, поэтому указанную группу элементов можно заменить одним мультиплексором, а функции распределителя импульсов 9 ограничить формированием адресных сигналов для мультиплексора (рисунок 4).

Адресные сигналы для мультиплексора 24 в этой схеме формируются двухразрядным двоичным суммирующим счетчиком 23, а в качестве разрешающего (синхронизирующего) сигнала для работы мультиплексора являются импульсы с выхода генератора 20 тактовых импульсов.

По своим функциональным возможностям и метрологическим характеристикам все рассмотренные схемы эквивалентны.

Из сравнения рассмотренных схем в части формирования выходных рабочих импульсов обратной связи видно, что удастся лишь частичное и не очень существенное упрощение схемы. Это связано с тем, что у всех рассмотренных схем реализован один и тот же довольно сложный метод обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5, расположенных диаметрально относительно механического модулятора 1. Указанный метод описан в [1] и заключается в формировании выходных рабочих импульсов обратной связи с постоянной задержкой $\tau_{\text{зад}}$ относительно временного положения середины между центрами исходных импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5.

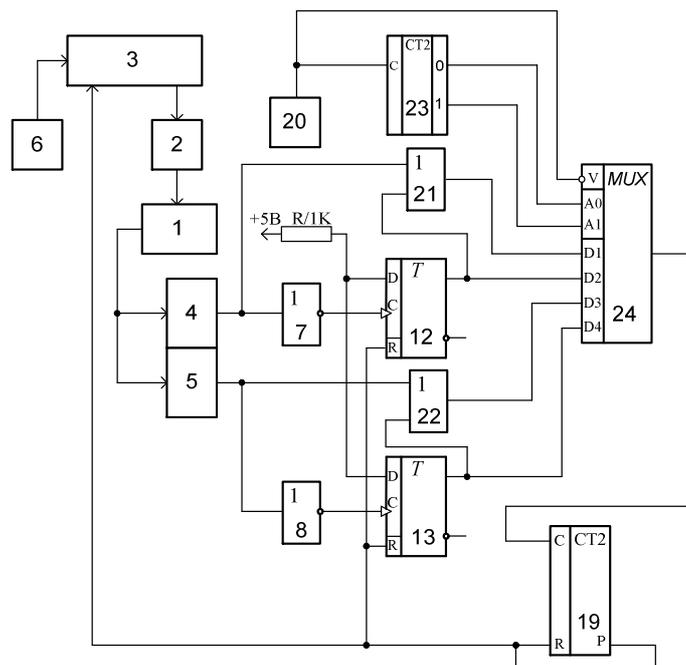


Рисунок 4. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока

Для более существенного упрощения схемы формирования рабочих импульсов обратной связи нужно упростить метод обработки во времени исходных импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5. Это можно попытаться сделать если формировать рабочие импульсы обратной связи с постоянной задержкой $\tau_{\text{зад}}$ относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов от первичных формирователей импульсов 4 и 5, расположенных диаметрально относительно механического модулятора.

Обоснование метода достижения цели. Также как в [1], для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора на частоту следования импульсов обратной связи в системе стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока следует формировать импульсы обратной связи по двум диаметрально расположенным меткам на механическом модуляторе (рисунок 5), с последующей обработкой во времени полученных сигналов и формированием выходных импульсов, привязанных к временному положению середины между передними фронтами исходных импульсов.

На рисунке 5 условно показан механический модулятор, который вращается с круговой скоростью ω и в котором геометрический O и физический O_1 центры вращения не совпадают. Длина отрезка $OO_1 = \Delta$ и является величиной эксцентриситета модулятора, как следствие неточности изготовления.

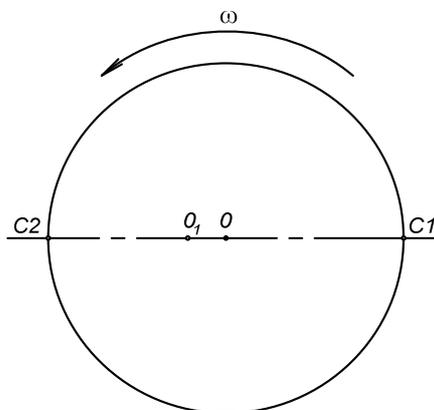


Рисунок 5. – Условное изображение механического модулятора с метками по внешней окружности (например, в виде щелевых прорезей) и диаметрально расположенными оптронными формирователями импульсов C_1 и C_2

Касательные скорости механического модулятора относительно первичных формирователей импульсов $C1$ и $C2$ изменяются по законам соответственно [1]:

$$V_{C1} = O_1 \cdot C1 \cdot \omega = [R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega; \tag{1}$$

$$V_{C2} = O_1 \cdot C2 \cdot \omega = [R - \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega, \tag{2}$$

где R – рабочий радиус механического модулятора относительно геометрического центра вращения O . Пусть на механический модулятор нанесены N меток (дискрет), тогда шаг дискретизации (шаг расположения меток) получим в виде

$$h = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{N}. \tag{3}$$

Частоты выходных импульсов первичных формирователей импульсов $C1$ и $C2$ с учетом (1), (2) и (3) получим соответственно в виде [1; 7]

$$f_{C1} = \frac{V_{C1}}{h} = \frac{[R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot \omega \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{R + \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R} \cdot f_B \cdot N, \tag{4}$$

где $f_B = \omega / 2 \cdot \pi$;

$$f_{C2} = \frac{R - \Delta \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R} \cdot f_B \cdot N. \tag{5}$$

Из (4) и (5) следует, что частоты получаемых последовательностей импульсов от указанных формирователей импульсов модулированы, и причиной этой модуляции является наличие эксцентриситета механического модулятора.

Для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора на формируемую частоту следования импульсов обратной связи предложено формировать ее как результат одновременной обработки импульсов, получаемых от двух диаметрально расположенных первичных формирователей импульсов как в [1], но в отличие от [1] формировать рабочий выходной импульс со смещением на строго постоянную задержку во времени относительно временного положения середины между началами исходных импульсов $C1$ и $C2$ (рисунок 6).

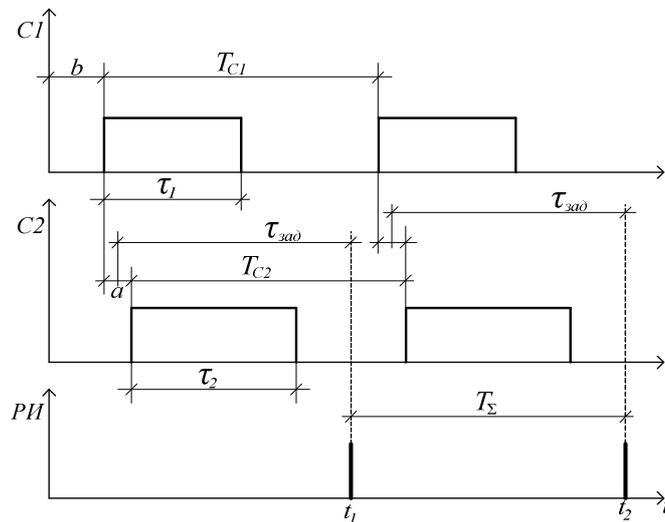


Рисунок 6. – Временная диаграмма, поясняющая принцип обработки исходных импульсов от диаметрально расположенных формирователей для исключения влияния эксцентриситета механического модулятора

На рисунке 6 приняты следующие обозначения:

- $C1$ и $C2$ – импульсы, формируемые соответственно первым и вторым первичными формирователями импульсов, которые располагаются диаметрально относительно механического модулятора;
- τ_1 и τ_2 – длительности импульсов первичных формирователей $C1$ и $C2$ соответственно;
- a – интервал времени между передними фронтами импульсов $C1$ и $C2$;

- T_{C1} и T_{C2} – периоды следования импульсов $C1$ и $C2$ соответственно;
- $\tau_{\text{зад}}$ – время постоянной задержки выходных рабочих импульсов относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов $C1$ и $C2$;
- T_{Σ} – период следования выходных рабочих импульсов обратной связи;
- b – время смещения переднего фронта опережающего импульса (в данном случае $C1$) относительно начала системы координат.

Согласно рисунку 6 выразим моменты времени t_1 и t_2 , в которые формируются выходные рабочие импульсы обратной связи:

$$t_1 = b + \frac{a}{2} + \tau_{\text{зад}}; \quad (6)$$

$$t_2 = b + \frac{T_{C1} + a + T_{C2}}{2} + \tau_{\text{зад}}. \quad (7)$$

Теперь выразим период следования выходных рабочих импульсов обратной связи:

$$T_{\Sigma} = t_2 - t_1 = b + \frac{T_{C1}}{2} + \frac{a}{2} + \frac{T_{C2}}{2} + \tau_{\text{зад}} - b - \frac{a}{2} - \tau_{\text{зад}} = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2}. \quad (8)$$

Таким образом, для T_{Σ} получен точно такой же результат, как и в [1].

Далее частоту следования выходных рабочих импульсов обратной связи также получим в виде

$$f_p = \frac{1}{T_{\Sigma}} = \frac{2}{T_{C1} + T_{C2}} = \frac{2}{1/f_{C1} + 1/f_{C2}} = \frac{2 \cdot f_{C1} \cdot f_{C2}}{f_{C1} + f_{C2}}. \quad (9)$$

Обозначив $f_B \cdot N = f_H$, выражения (4) и (5) преобразуем к виду

$$f_{C1} = f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad (10)$$

$$f_{C2} = f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (11)$$

где $\Delta f = \frac{\Delta}{R} \cdot f_B \cdot N = \frac{\Delta}{R} \cdot f_H$.

Окончательно для частоты рабочих импульсов обратной связи получаем такой же результат как в [1]:

$$f_p = \frac{2 \cdot [f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t)] \cdot [f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t)]}{f_H + \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t) + f_H - \Delta f \cdot \sin(\omega \cdot t)} = \frac{f_H^2 - \Delta f^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{f_H} \approx f_H, \quad (12)$$

так как $\Delta f^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) \ll f_H^2$.

Таким образом, из выражения (12) следует, что влияние эксцентриситета механического модулятора на частоту следования выходных рабочих импульсов f_p обратной связи практически исключено. Однако при этом выходные рабочие импульсы обратной связи с частотой f_p формируются в моменты времени, сдвинутые относительно середины между передними фронтами исходных импульсов $C1$ и $C2$ на строго постоянное время задержки $\tau_{\text{зад}}$ (см. рисунок 6). Следовательно, полученный результат совпадает с [1], но при более простом алгоритме обработки во времени исходных импульсов, а значит и при более простой реализации схемы.

Реализация метода. Для построения системы стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока с такой обработкой сигналов от двух диаметрально расположенных датчиков относительно механического модулятора в структуру системы необходимо ввести цифровое устройство, которое в реальном времени выполнит рассмотренный вид обработки исходных импульсов от датчиков $C1$ и $C2$, и сформирует выходной рабочий импульс (рисунок 7).

В состав системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока входят электродвигатель постоянного тока 1 с механическим модулятором, ключевой усилитель 2, регулятор 3, диаметрально расположенные первичные формирователи импульсов (датчики) 4 и 5, задающий генератор импульсов 6 и цифровая схема формирования рабочих импульсов.

Совокупность D-триггеров 12, 13 и 26 с элементом НЕ 25, элементами И 27 и 28, элементом ИЛИ 29 и двоичного счетчика импульсов 19 вместе с генератором тактовых импульсов 20 образуют цифровую схему, которая формирует рабочие импульсы, снимаемые с выхода переполнения счетчика импульсов 19 и используемые в качестве импульсов отрицательной обратной связи регулятора 3.

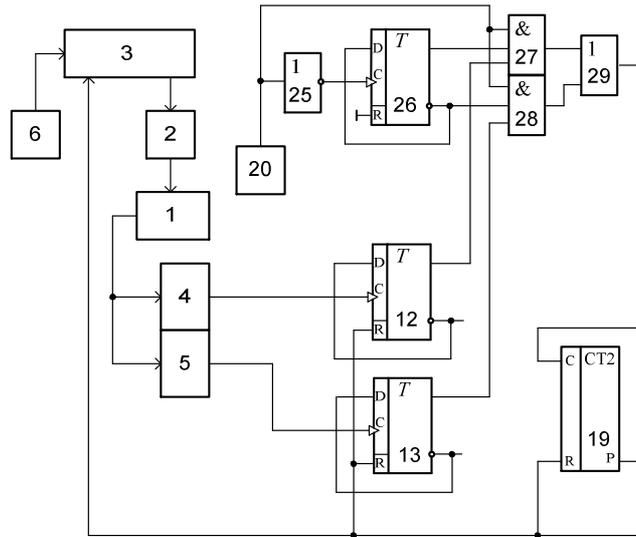


Рисунок 7. – Функциональная схема системы стабилизации скорости вращения вала электропривода постоянного тока

Система стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока работает следующим образом. Регулятор 3 сравнивает между собой последовательности импульсов, поступающих от задающего генератора импульсов 6 и с выхода переполнения счетчика импульсов 19, и выработывает управляющее воздействие через ключевой усилитель 2 на электродвигатель 1. При вращении механического модулятора первичные формирователи импульсов 4 и 5 формируют прямоугольные импульсы C1 и C2 в соответствии с рисунком 6. Частота следования импульсов C1 и C2 пропорциональна скорости вращения механического модулятора, и при наличии эксцентриситета механического модулятора указанная частота модулируется по синусоидальному закону около своего среднего значения согласно (10) и (11). Период модуляции частоты равен периоду одного оборота модулятора, а глубина модуляции частоты пропорциональна величине эксцентриситета. Полученные прямоугольные импульсы C1 и C2 поступают на входы цифровой схемы формирования рабочих импульсов (см. рисунок 7).

Временная диаграмма, поясняющая работу цифровой схемы формирования рабочих импульсов обратной связи, приведена на рисунке 8.

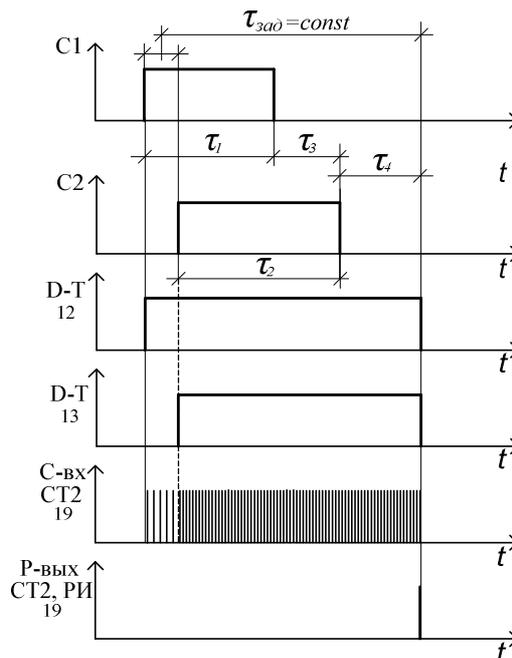


Рисунок 8. – Временная диаграмма работы цифровой схемы формирования рабочих импульсов

В соответствии с рисунком 8 выразим величину времени задержки формирования рабочего импульса относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов $C1$ и $C2$:

$$\tau_{\text{зад}} = \frac{\tau_1 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4}{2} = 2^n \cdot \frac{1}{f} = \text{const}, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{зад}}$ – время постоянной задержки рабочего импульса обратной связи относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов $C1$ и $C2$;

τ_1 – длительность импульса $C1$, формируемого первичным формирователем импульсов 4;

τ_2 – длительность импульса $C2$, формируемого первичным формирователем импульсов 5;

τ_3 – время смещения между задними фронтами импульсов $C1$ и $C2$;

τ_4 – время смещения выходного рабочего импульса относительно заднего фронта запаздывающего импульса (в данном случае $C2$);

n – число разрядов двоичного счетчика импульсов 19;

f – частота следования тактовых импульсов генератора 20.

Преобразуем выражение (13) к виду

$$\begin{aligned} \tau_{\text{зад}} &= \frac{\tau_1 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4}{2} = \frac{\tau_1 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_2 + \tau_4 + \tau_2 - \tau_2}{2} = \\ &= \frac{\tau_1 - \tau_2 + \tau_3 + 2 \cdot \tau_2 + 2 \cdot \tau_4}{2} = \frac{\tau_1 - \tau_2 + \tau_3}{2} + \tau_2 + \tau_4, \end{aligned} \quad (14)$$

где $(\tau_1 - \tau_2 + \tau_3)$ – длительность интервала времени между передними фронтами исходных импульсов $C1$ и $C2$.

Тогда в выражении (14) первое слагаемое соответствует длительности интервала времени от временного положения середины между передними фронтами импульсов $C1$ и $C2$ до переднего фронта импульса $C2$. Сумма второго и третьего слагаемых в выражении (14) соответствует длительности интервала времени от переднего фронта импульса $C2$ до момента формирования выходного рабочего импульса обратной связи.

Умножив (14) на частоту f , с учетом (13) получим

$$2^n = \text{const} = (\tau_1 - \tau_2 + \tau_3) \cdot \frac{1}{2} \cdot f + (\tau_2 + \tau_4) \cdot f. \quad (15)$$

Из (15) следует, что интервал времени $(\tau_2 + \tau_4)$ необходимо заполнять импульсами с частотой f , а интервал времени $(\tau_1 - \tau_2 + \tau_3)$ – импульсами с частотой $f/2$.

В исходном состоянии (до появления импульсов $C1$ и $C2$) D-триггеры 12, 13 и счетчик импульсов 19 находятся в нулевом (сброшенном) состоянии. D-триггер 26 вместе с элементом НЕ 25 выполняют роль распределителя импульсов, поочередно разрешая прохождение импульсов через элементы И 27 и 28. Но поскольку D-триггеры 12 и 13 находятся в нулевых состояниях, то элементы И 27 и 28 заблокированы, следовательно, на С-вход счетчика импульсов 19 импульсы от генератора 20 не проходят.

При появлении импульса $C1$ на выходе первичного формирователя импульсов 4 D-триггер 12 устанавливается в единичное состояние и разрешает прохождение импульсов от генератора 20 через элемент И 27 и далее через элемент ИЛИ 29 на С-вход счетчика импульсов 19. При этом на С-вход счетчика импульсов 19 поступают импульсы с частотой $f/2$. Состояние схемы соответствует интервалу времени $(\tau_1 + \tau_3 - \tau_2)$ (см. рисунок 8).

При появлении импульса $C2$ на выходе первичного формирователя импульсов 5 D-триггер 13 также устанавливается в единичное состояние и разрешает прохождение импульсов от генератора 20 через элемент И 28 и далее через элемент ИЛИ 29 на С-вход счетчика импульсов 19. При этом на С-вход счетчика импульсов 19 поступают импульсы с частотой f , так как импульсы от генератора 20 проходят поочередно через два элемента И 27 и 28. Состояние схемы соответствует интервалу времени $(\tau_2 + \tau_4)$ (см. рисунок 8).

При переполнении счетчика импульсов 19, когда на его вход подано 2^n импульсов, на выходе переполнения счетчика формируется рабочий импульс, который сбрасывает счетчик импульсов 19 и D-триггеры 12 и 13 в нулевое состояние. Сформированный рабочий импульс используется как импульс отрицательной обратной связи регулятора 3. Временное положение формируемого рабочего импульса строго постоянно относительно средней точки между передними фронтами импульсов $C1$ и $C2$, а период следования и частота формируемых рабочих импульсов свободны от влияния эксцентриситета механического модулятора.

Структура регулятора 3 может быть практически любой для класса регуляторов, использующих в качестве сигнала обратной связи импульсы таходатчика, связанного с валом электродвигателя, а в качестве задающего воздействия – частоту импульсов задающего генератора.

Сравнительный анализ быстродействия и точности формирования рабочих импульсов обратной связи. Для принятых в [1] допущений, а именно $\tau_1 \approx \tau_2 \approx \tau_{зад} \approx \tau$, длительность временного интервала a между передними фронтами импульсов $C1$ и $C2$ (см. рисунок 6) ограничена величиной $a \leq \tau/2$; схемы, приведенные на рисунках 2–4 эквивалентны, то есть имеют одинаковое быстродействие и точность. В [1] показано, что требуемое время на формирование рабочего импульса обратной связи в этих схемах для принятых допущений составляет

$$T_{ФРИ} = 1 \frac{3}{4} \cdot \tau_{зад}, \quad (16)$$

где $\tau_{зад} = 2^n \cdot \frac{1}{f} = const$, здесь f – частота тактовых импульсов генератора 20.

Для предложенного в данной работе метода упрощенной обработки во времени исходных импульсов $C1$ и $C2$ и формирования рабочего импульса обратной связи относительно середины между передними фронтами исходных импульсов $C1$ и $C2$ требуемое время на формирование указанного импульса обратной связи (см. рисунок 6) можно представить в виде

$$T_{ФРИ} = \frac{a}{2} + \tau_{зад}. \quad (17)$$

Тогда для принятых выше допущений эта длительность времени составит

$$T_{ФРИ} = 1 \frac{1}{4} \cdot \tau_{зад}. \quad (18)$$

Из сравнения (16) и (18) видно, что упрощенный метод формирования импульсов обратной связи при прочих равных условиях обладает большим быстродействием.

Кроме того, можно утверждать, что упрощенный метод формирования импульсов обратной связи позволяет получить более высокую точность формирования этих импульсов. Поскольку рабочие импульсы обратной связи в этом методе формируются относительно временного положения середины между передними фронтами исходных импульсов $C1$ и $C2$, а длительности самих импульсов τ_1 и τ_2 никак не участвуют в процедуре формирования, то этим освобождается значительная часть периода следования импульсов обратной связи, а значит можно увеличить частоту генератора тактовых импульсов 2 и разрядность счетчика импульсов 19. В итоге это позволит увеличить точность формирования импульсов обратной связи и далее увеличить точность стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока.

Также в предложенном методе используются только две частоты для заполнения счетчика импульсов 19 на двух интервалах времени – $f/2$ и f , тогда как в [1] используются четыре частоты для заполнения счетчика импульсов 19 на четырех интервалах времени – $f/4, f/2, 3f/4$ и f , что снижает точность формирования импульсов обратной связи.

Заключение

1. Использование двух первичных формирователей импульсов, расположенных диаметрально относительно механического модулятора в системе стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока, и введенная в систему цифровая схема формирования рабочего импульса обратной связи (см. рисунок 7) относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов от первичных формирователей позволяют исключить влияние эксцентриситета механического модулятора на скорость вращения вала электродвигателя и тем самым повысить точность стабилизации скорости вращения.

2. Предложенный упрощенный метод формирования рабочих импульсов обратной связи относительно временного положения середины между передними фронтами импульсов от первичных формирователей обладает более высоким быстродействием и точностью по сравнению с известным методом [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин, А.С. Стабилизация скорости вращения вала электропривода постоянного тока за счет исключения эксцентриситета механического модулятора / А.С. Вершинин, В.П. Авдейко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундам. науки. – 2017. – № 12. – С. 57–64.
2. Трахтенберг, Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением / Р.М. Трахтенберг. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.

3. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода : учеб. / В.В. Москаленко. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 208 с.
4. Цифровой электропривод постоянного тока : а. с. SU 1335106 / В.Д. Сибирцев, А.С. Вершинин. – Оpubл. 1987 г.
5. Цифровой электропривод постоянного тока : а. с. SU 1422349 / В.Д. Сибирцев, А.С. Вершинин. – Оpubл. 1988 г.
6. Цифровой измеритель временного положения середины видеоимпульсов : а. с. SU 1449937 / В.Д. Сибирцев, А.С. Вершинин. – Оpubл. 1989 г.
7. Brindley, K. Sensors and Transducers / K. Brindley. – London, 1988.

Поступила 16.11.2020

OPTIONS FOR BUILDING HIGH-PRECISION SYSTEMS OF STABILIZING THE ROTATION SPEED OF A DC ELECTRIC MOTOR

A. VERSHININ

In [1], a DC pulsed electric drive is described, in which working feedback pulses are formed using a mechanical modulator with two primary pulse generators. The primary shapers are located diametrically relative to the mechanical modulator. This makes it possible to exclude the influence of the eccentricity of the mechanical modulator on the formation of working feedback pulses. For this purpose, a special digital scheme is used for processing pulses from these primary shapers in real time with the formation of output working feedback pulses [1]. This paper presents possible options for constructing a digital circuit for processing pulses from these primary pulse generators in real time. A simplified method and a digital scheme for processing pulses from primary pulse generators in real time with the formation of output working feedback pulses are also proposed.

Keywords: *electric motor, mechanical modulator, pulse generator, eccentricity, logic elements, triggers, rotation speed, stabilization accuracy.*

УДК 536.76:66.045

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

*канд. техн. наук, доц. В.Е. ПИТОЛИН
(Полоцкий государственный университет)*

Изложены результаты теоретических исследований режимов работы паровой сушильной установки для сушки строительной пропитанной армированной стеклотетки. Показано, что реальный расход греющего пара на установку в 1,5–2 раза выше теоретического, определенного методами составления теплового баланса. Это подтверждается эксергетическим расчетом, методика выполнения которого приводится в статье. Результаты теоретических исследований подтверждаются практикой эксплуатации установки, оборудованной системой автоматического регулирования подачи греющего пара. Показано, что величина термической эксергии пара, поступающего на установку, полностью определяет технико-экономические характеристики ее работы, обусловленные безвозвратными потерями тепла. Чем больше величина термической эксергии греющего пара, подаваемого на установку, тем меньше потери тепловой энергии. При этом отмечается, что отборный пар теплоисточника различных давлений имеет одинаковую стоимость вне зависимости от располагаемой эксергии. Предложены методы повышения эффективности работы установок такого типа.

Ключевые слова: эксергия, 1-й и 2-й законы термодинамики, установки теплообмена, сушильные установки.

Введение. В технологических процессах производства строительных материалов доля расходуемого топлива, водяного пара и электроэнергии достигает 70–80% в себестоимости готовой продукции. При этом степень использования потребляемой энергии может быть незначительна – всего 25–30%. Остальная часть расходуемой энергии составляет безвозвратные потери. Высокую энергоемкость и малый КПД технологических процессов определяет низкий уровень их термодинамического совершенства.

Существующие методы расчета теплообменных установок не позволяют в процессе проектирования оценить возможные реальные потери тепловой энергии при их эксплуатации. При проектировании теплообменных установок обычно выполняется только тепловой расчет в соответствии с первым законом термодинамики, т.е. с помощью составления уравнений материального и теплового балансов. Такой метод проектирования теплопотребляющих установок может привести и приводит к неоправданным потерям тепловой энергии. С одной стороны, это объясняется недостаточно высоким КПД установки или отдельных блоков, из которых она состоит, с другой стороны, выполнить исследование режимных факторов на этапе проектирования установки иногда не представляется возможным в связи с отсутствием соответствующих практических рекомендаций и опытных данных.

В настоящей работе на примере теплового расчета паропотребляющей установки для сушки строительной стеклотетки, пропитываемой упрочняющим раствором, выполняется оценка энергоэффективности с использованием эксергетических методов расчета и сравнение полученных данных с результатами ее последующей эксплуатации на греющем паре различных параметров.

Описание конструкции установок. Сетка перевивочная армирующая пропитанная фенолформальдегидными смолами [1], изготовленная из стекловолокна, находит широкое применение в строительстве при наружной облицовке стен и при изготовлении абразивного инструмента различного назначения.

Технологический процесс пропитки связующим веществом и последующей сушки обычно выполняется на пропиточно-сушильной установке вертикального типа.

Пропитываемая стеклотетка устанавливается на барабан подающего узла. Затем по направляющим опускается в ванну с пропитывающим раствором и далее поступает в сушильную камеру, представляющую собой вертикальную шахту нагрева воздуха и сушки сетки.

Просушиваемый материал протягивается по высоте камеры в несколько оборотов.

Материал (сетка) движется с постоянной скоростью по натяжным валикам и направляющим между рядами паровых труб в потоке воздуха, подаваемого в шахту снизу дутьевым вентилятором.

Схема подачи греющего пара и воздуха на установку показана на рисунке 1.

На выходе с последнего направляющего валика полностью просушенная сетка наматывается на товарный валик.

Процесс пропитки и сушки происходит непрерывно с короткими остановками для сцепления очередного рулона на подаче (перед ванной с пропиточным составом) и снятия готового рулона стеклотетки с приемного узла пропиточно-сушильной установки.

Процесс высушивания сетки после пропитки осуществляется за счет конвективного теплообмена с окружающим воздухом и радиационного теплообмена с поверхностями нагрева.

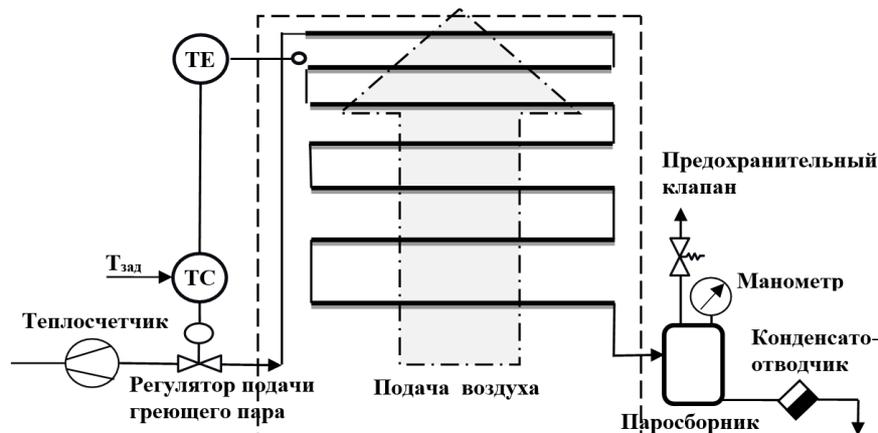


Рисунок 1. – Схема парового обогрева сушильной установки

Тепловой расчет сушильной установки. Требуемый удельный расход тепловой энергии на просушку одного погонного метра пропитанной сетки обычно рассчитывается методом составления уравнений материального и теплового балансов [2].

Определим массовый расход M (кг/с) просушиваемого материала:

$$M = (G + P_{nc}) \cdot V, \quad (1)$$

где G – приведенная масса сетки до обработки, кг/м²;

P_{nc} – приведенная масса пропитывающего состава, наносимого на сетку, кг/м²;

V – скорость движения сетки в сушильном агрегате, обычно 1,67 м/с.

Поток влаги W (кг/с), удаляемой при сушке сетки в сушильной установке:

$$W = M \cdot \left(1 - \frac{100 - w_1}{100 - w_2} \right), \quad (2)$$

где w_1 – исходное влагосодержание в материале на момент поступления в сушильную камеру, %, определяется как $P_{nc} / (G + P_{nc}) \cdot 100\%$;

w_2 – максимально допустимое влагосодержание высушенной сетки (не более 2%) [1].

Из уравнения материального баланса (3) находим массовый расход воздуха F_b (кг/с), необходимый для поглощения и транспортировки удаляемой влаги и равный производительности вентилятора:

$$F_b = \frac{W}{(d_2 - d_1)}, \quad (3)$$

где d_1 и d_2 – влагосодержание воздуха, соответственно, на входе и на выходе сушильной камеры, кг/кг, которое определяется по диаграмме Молье для температуры воздуха на входе $t_1 = 10$ °С (среднегодовая температура) и $t_2 = 120$ °С на выходе из установки [2].

С целью компенсации потерь гидравлического напора потока воздуха в установке реальный расход дутьевого вентилятора рекомендуется увеличить на 20–25%.

Теоретически необходимый расход греющего пара F_n (кг/с) находится из уравнения теплового баланса:

$$F_n \cdot (i_n - i_k) = F_b \cdot (i_{b2} - i_{b1}), \quad (4)$$

где i_n – энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг, поступающего на установку при избыточном давлении 0,7 мПа и температуре 170 °С [3];

i_k – энтальпия конденсата на выходе из установки, кДж/кг (при температуре 110 °С и избыточном давлении 0,07 мПа);

$i_{в2}$ и $i_{в1}$ – энтальпия влажного воздуха соответственно на входе в сушильную камеру установки и на выходе из нее, кДж/кг, которые находятся по диаграмме Молье состояния влажного воздуха или по формуле Л.К. Рамзина для атмосферного давления [2]:

$$i_{в} = t + d \cdot (2493 + 1,97t). \quad (5)$$

Но уравнение (4) дает лишь общее представление о количестве требуемой тепловой энергии для работы установки. Очевидно, что насыщенный пар с температурой ниже 120 °С ($\leq 0,2$ МПа) не сможет нагреть воздух до заданной температуры, даже обладая необходимым количеством тепловой энергии.

Для более точного определения расхода пара на установку необходимо выполнить эксергетический расчет установки.

Эксергетический расчет установки [4; 5]. Обычно эксергетический расчет теплообменной установки начинают с определения располагаемой термической эксергии греющего пара. Причем величина эксергии пара должна быть равна или больше требуемой тепловой энергии, рассчитанной по уравнению (4).

Под термической эксергией рабочего тела обычно понимают максимальную работу, которую можно получить от рабочего тела при осуществлении технологического процесса передачи тепловой энергии до достижения равновесия с окружающей средой. При этом реальная температура окружающей среды определяется по условиям технологического процесса [4].

Оценка величины термической эксергии Ξ (кДж/с), вносимой с греющим паром, выполняется по формуле (6), являющейся следствием теоремы Карно:

$$\Xi = F_{п} \cdot (i_{п} - i_{к}) \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{п}}\right), \quad (6)$$

где T_0 – температура окружающей среды (град. К);

$T_{п}$ – температура греющего пара (град. К).

Безвозвратные потери эксергии D_i (кДж/с) определяются из выражения для закона Гюи-Стодолы [5]:

$$D_i = T_0 \cdot \Delta S_i, \quad (7)$$

где $\Delta S_i = F_i \cdot \Delta s_i$ – приращение энтропии, обусловленное безвозвратными потерями тепла i -го вида.

Потери эксергии в теплообменном аппарате обычно бывают четырех видов: потери, определенные конечной разностью температур теплоносителей; потери от гидравлического сопротивления потока теплоносителя; потери через теплоизоляцию в окружающее пространство и потери, вызванные теплопроводностью вдоль тракта движения теплоносителя.

Потери эксергии от конечной разности температур D_1 (кДж/с), где теплообмен происходит с изменением фазового состояния теплоносителя при постоянной температуре, можно определить по формуле

$$D_1 = T_0 \cdot F_{п} \cdot (i_{п} - i_{к}) \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right), \quad (8)$$

где T_1 – температура конденсации потока пара, К;

T_2 – усредненная по длине канала температура воздуха, К.

Потери эксергии от гидравлических сопротивлений D_2 (кВт) обычно незначительны. Их можно оценить по мощности приводов вентиляторов и нагнетателей:

$$D_2 = Z_{пн} + Z_{в}, \quad (9)$$

где $Z_{пн}$ – мощность привода питательного насоса, отнесенная к паровому потоку отбора, кВт;

$Z_{в}$ – мощность привода дутьевого вентилятора, кВт.

Потери эксергии в окружающее пространство D_3 (кВт) для установки, находящейся в помещении оцениваются по формуле

$$D_3 = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где S – суммарная площадь поверхности теплоизоляции установки, м²;

Δt – разность температур на поверхности изоляции и окружающего воздуха;

α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, который приближенно можно оценить, как $\alpha = 9,74 + 0,07\Delta t$, Вт/(м²·К) [5].

Потери эксергии от теплопроводности вдоль тракта теплообмена в сушильных установках, подобных нашей, обычно малы и ими можно пренебречь.

Эксергетический КПД определяется из уравнения (11):

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \frac{\Sigma D_i}{\Sigma} \quad (11)$$

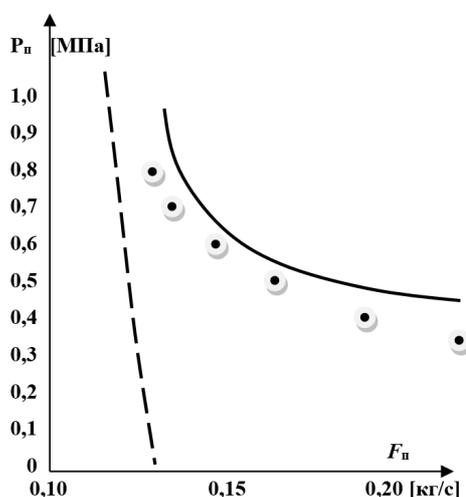
В нашем случае эксергетический КПД получается равным 0,67, что достаточно неплохо.

Рассчитаем величину эксергии по формуле (6) и определим реально необходимый расход греющего пара F_{Π}^* (кг/с) на установку для обеспечения ее работоспособности с учетом эксергетического КПД по формуле:

$$F_{\Pi}^* = \frac{\Sigma}{\eta_{\Sigma} \cdot (i_n - i_k) \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\Pi}}\right)} \quad (12)$$

Расход пара будет в 2,6 раза больше рассчитанного по тепловому балансу (4). Снижение параметров пара ниже 0,7 МПа приведет к еще большему увеличению расхода. Результаты расчета показаны на рисунке 2.

Параметры греющего пара, подаваемого на установку, могут изменяться в широком диапазоне давлений и, соответственно, температур. Вследствие этого расход пара на установку также может изменяться в широком диапазоне.



— — — — — теоретический; — — — — — реальный;
● ● — при постоянной эксергии

Рисунок 2. – График расхода пара на установку

Если нанести на график (см. рисунок 2) значения расходов греющего пара, обеспечиваемого системой автоматического регулирования, можно видеть, что характер зависимости изменения расхода пара, задаваемого автоматическим регулятором, практически полностью совпадает с графиком расчетного расхода греющего пара, обладающего различной термической эксергией.

Рассчитаем общие потери тепловой энергии $Q_{\text{пот}}$ (кДж/с) при работе установки, предполагая, что конденсат не возвращается теплоисточнику, а утилизируется:

$$Q_{\text{пот}} = (F_{\Pi}^* - F_{\Pi}) \cdot (i_{ni} - i_0) - F_{\Pi} \cdot (i_k - i_0), \quad (13)$$

где i_0 – энтальпия воды при температуре 10 °С (температура «холодного» источника для систем коммерческого учета отпуска тепловой энергии).

Термический КПД установки можно определить по формуле

$$\eta_{\Gamma} = \frac{F_{\Pi}^* \cdot (i_n - i_k) - Q_{\text{пот}}}{F_{\Pi}^* \cdot (i_n - i_k)} \quad (14)$$

Рассчитанный по этой формуле термический КПД установки не превышает 24%.

Обычно низкий КПД сушильных установок такого типа объясняют плохим качеством теплоизоляции или выносом большого количества тепла с воздухом из-за повышенной адгезии пропитываемого состава. Но если исследовать процесс сушки методами эксергетического анализа, можно сделать заключение

о непригодности пара пониженных параметров для данной установки, приводящее к большим безвозвратным потерям тепловой энергии.

Следует отметить, что теплосодержание сухого насыщенного пара при изменении его давления от 0,1 до 1,0 МПа изменяется незначительно – всего на 3% при изменении его температуры в широких пределах (на 65 °С). Но, согласно графику работы установки, задаваемому системой автоматического регулирования (см. рисунок 2), можно сделать заключение, что существует критическая температура пара. Пар с температурой ниже критической не может обеспечивать работоспособность сушильной установки, поскольку не обеспечивает требуемое качество сушки даже при увеличении его расхода до предельных величин, обусловленных пропускной способностью регулирующего клапана. Очевидно, что нагреть воздух до температуры 120 °С способен лишь пар с температурой выше указанной.

Изменение конструкции или режима работы установки, например, при уменьшении скорости движения сетки, эта температура может существенно изменяться.

Так, например, при снижении скорости движения сетки и соответствующем уменьшении подачи воздуха методами частотного регулирования приводных электродвигателей, существенно снижается и критическая температура t_2 . Что и было рекомендовано сделать эксплуатирующей организации в данном случае для снижения потребления тепловой энергии, т.к. повысить температуру греющего пара или изменить конструкцию установки без существенных капитальных затрат в данном конкретном случае было невозможно.

Заключение

1. Метод эксергетического анализа режима работы сушильной установки в совокупности с результатами работы систем автоматического регулирования позволяет наиболее наглядно определить степень совершенства конструкции сушильной установки и режимов ее эксплуатации, а также понять причины безвозвратных потерь тепловой энергии.

2. Эксергетический анализ показывает, что реальный расход тепла теплообменных установок обычно в 1,5–2 раза больше теоретического, определенного тепловым методом расчета.

3. При выборе отборного пара для использования в теплообменной установке следует отдавать предпочтение пару с большим давлением и, следовательно, с большей термической эксергией при их равной стоимости (<https://minenergo.gov.by/wp-content/uploads/Vitebsk-1.pdf>). Это позволит существенно снизить потери тепловой энергии при эксплуатации установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сетки стеклопластиковые конструкционные. Технические условия : ТУ 6-48-00202956-35-98. – Полоцк : ОАО «Завод стекловолокна». – 1998. – 26 с.
2. Лебедев, П.Д. Теплообменные сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев. – М. : Энергия, 1972. – 317 с.
3. Вукалович, М.П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М.П. Вукалович, С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М. : Изд-во стандартов, 1969. – 407 с.
4. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 279 с.
5. Казаков, В.Г. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок: учеб. пособие / В.Г. Казаков, П.В. Луканин, О.С. Смирнова. – СПб. : СПбГТУ РП, 2013. – 93 с.

Поступила 11.12.2020

EXERGY METHOD FOR EVALUATING THE OPERATION OF A DRYING PLANT

V. PITOLIN

The results theoretical studies of the operating modes of a steam drying plant for drying a construction impregnated reinforced glass mesh are presented. It is shown that the actual consumption of heating steam for the installation is 1.5-2 times higher than the theoretical one determined by the methods of compiling the heat balance. This is confirmed by the exergy calculation, the method of implementation of which is given in the article. The results of theoretical studies are confirmed by the practice of operating a unit equipped with an automatic heating steam supply control system. It is shown that the value of thermal exergy of steam supplied to the installation completely determines the technical and economic characteristics of its operation, due to irrecoverable heat losses. The greater the value the thermal exergy of the heating steam supplied to the installation, the lower the loss of thermal energy. At the same time, it is noted that the selected steam of a heat source of different pressures has the same cost, regardless of the exergy available. Methods for increasing the efficiency of this type of installations are proposed.

Keywords: exergy, 1st and 2nd laws of thermodynamics, heat exchange units, drying units.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Бураченко И.Б., Железняк В.К.</i> Обнаружение первичных признаков речевого сигнала	2
<i>Богуш Р.П., Захарова И.Ю.</i> Клиент-серверная система для идентификации и мониторинга перемещения людей в помещениях на основе анализа видеоданных	13
<i>Глухов Д.О., Богуш Р.П., Глухова Т.М.</i> Представление разреженных матриц с использованием ассоциативных контейнеров C++ библиотеки STL	19
<i>Хижняк А.В., Шарак Д.С., Бобров А.Ю.</i> Аппаратно-программный комплекс исследования алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов	26
<i>Карла А.В., Железняк В.К.</i> Оценка стабильности получения информации от параметров установленных датчиков	30
<i>Хижняк А.В., Липлянин А.Ю., Сергеенко А.В.</i> Универсальный инструментарий для исследования работы алгоритмов обнаружения в оптическом диапазоне	36
<i>Ехилевский С.Г., Голубева О.В., Забелендик О.Н., Струк Т.С.</i> Поправки к формуле Стирлинга, обусловленные эксцессами гамма-распределения	44
<i>Хижняк А.В., Шарак Д.С., Сергеенко А.В.</i> Методика проведения испытаний алгоритмов сопровождения оптически наблюдаемых объектов в двухканальной системе сопровождения	49

ФИЗИКА

<i>Янушкевич В.Ф., Абраменко С.Н., Богуш В.А.</i> Особенности распространения двухчастотных электромагнитных волн над углеводородами	54
<i>Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И., Просолович В.С.</i> Физико-механические свойства облученных пленок диазохинон-новолачного фоторезиста на кремнии	60
<i>Абраменко С.Н., Голубев Ю.П., Солдатенко П.Н., Антонович Д.А.</i> Система позиционирования аппаратуры диагностики параметров электронного пучка	65
<i>Охрименко И.П., Кольчевский Н.Н., Петров П.В.</i> Расчет сигнала детектора гравитационных волн с учетом колебания отражающих зеркал	70
<i>Вершинин А.С.</i> Варианты построения высокоточных систем стабилизации скорости вращения вала электродвигателя постоянного тока	77
<i>Питолин В.Е.</i> Эксергетический метод оценки эффективности сушильной установки	87