

**8-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИМ ПРОБЛЕМАМ,
ПРОБЛЕМАМ ОБОРОНЫ И БЕЗОПАСНОСТИ,
ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ ДВОЙНОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**

(Минск, 16–17 мая 2019 г.)

Сборник научных статей

В пяти частях

Часть 1

УДК 623(082)
ББК 68.8я43
В76

В76 8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 16–17 мая 2019 г.) : сборник научных статей. В 5 ч. Ч. 1 / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск : Лаборатория интеллекта, 2019. – 108 с.

ISBN 978-985-90490-5-7.

DOI: 10.31882/978-985-90490-5-7.

В сборник включены материалы 8-й Международной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (16–17 мая 2019 г., Минск, Беларусь), на которой представлены доклады по военно-техническим аспектам обороны и безопасности, теории вооружения и военной техники, перспективным решениям создания, модернизации и утилизации ВВТ, а также использованию технологий двойного применения.

**УДК 623(082)
ББК 68.8я43**

**ISBN 978-985-90490-5-7 (ч. 1)
ISBN 978-985-90490-4-0**

© Государственный военно-промышленный
комитет Республики Беларусь, 2019
© Оформление. ООО «Лаборатория
интеллекта», 2019

СЕКЦИЯ «КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ,
СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»

АЛЕКСЕЙЧУК И. А., АНТОНОВ А. В., АНТОНОВ В. И., ВОРОНЬКОВ В. Н., КОЖЕМЯКИН В. А., КУРДЯ Ю. Ф., ЛОПАТИК А. Р., ПЕТРОВ В. И. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ РАДИАЦИИ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	6
БОГДАН М. А., КАРАЙКОЗА Т. М., КУРДЯ Ю. Ф. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДОЗИМЕТРЫ ДЛЯ ЭКИПИРОВКИ ЛИЧНОГО СОСТАВА СИЛОВЫХ СТРУКТУР: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ	11
БОРОВСКАЯ М. А., КОСТРИКИН А. М., ГУСИНСКИЙ А. В. ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 178–220 ГГц	15
ВОЛЫНЕЦ А. С. СОСТОЯНИЕ И ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ВЕЛИЧИН.	19
ГОРОВЕНКО С. А. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ	22
ГРИШИН С. А., ВАРЕНОВ Ю. И., НЕДВЕЦКИЙ Н. С., КЛИМЕНТОВСКИЙ В. В. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МУЛЬТИДЕТЕКТОРНЫХ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЙ И ЧАСТИЦ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ	25
ГРИШИН С. А., КЛИМЕНТОВСКИЙ В. В., ЯГОДНИКОВ Д. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ АППАРАТУРЫ	30
ГРИШИН С. А., НЕДВЕЦКИЙ Н. С., КЛИМЕНТОВСКИЙ В. В., КУЗНЕЧИК О. О. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ 3D-ПРИНТЕРЕ	35
ГРУНТОВИЧ НАД. ВЛАД., ГРУНТОВИЧ НИК. ВАС. ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	41
ГРУНТОВИЧ НИК. ВАС., ГРУНТОВИЧ НАД. ВЛАД. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	45
ГУЗОВ В. Д., КОЖЕМЯКИН В. А., ЛУКАШЕВИЧ Р. В. КОМПЛЕКТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПОВЕРОЧНЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ГАММА- И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.	49

ДВОРНИКОВ О. В., ЧЕХОВСКИЙ В. А., ГАЛКИН Я. Д., КУНЦ А. В. РАЗРАБОТКА НА БАЗОВОМ МАТРИЧНОМ КРИСТАЛЛЕ МН2ХА030 СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДВОЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ	52
КИРИЛЬЧУК В. Б., КИЖЛАЙ И. Н., ПОПОВ А. А., ЗДОРОВЦЕВ С. В. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ RFID-СИСТЕМ ВЧ И УВЧ ДИАПАЗОНОВ.	56
КОЖЕМЯКИН В. А. ДАТЧИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	60
КОЗАК Г. В., ДАНИЛОВИЧ С. В., ТИХОМИРОВ А. Н., ШАРАНДО А. В. ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР СО ВСТРОЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР, УСТОЙЧИВЫЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ	68
КОМАР Д. И., БЫСТРОВ Е. В., КОНОВАЛОВ Е. А., ПРИБЫЛЕВ С. В. ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ЛИЧНОГО СОСТАВА ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ РАДИАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ.	72
ЛИСЕНКОВ Б. Н., ОГОРОДНИКОВ Д. А. КОММУТАЦИЯ ТЕСТОВЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ.	76
МАТЮШКОВ В. Е., ВИСКУШЕНКО А. А., ПИНЧУК Т. Е., ПРОТАЗАНОВА Т. М., ТИХОНЧУК Г. И., КАЗАКОВ А. Д. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СПЕЦТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.	80
ТОДАРЕВ В. В., ПОГУЛЯЕВ М. Н., САВЕЛЬЕВ В. А. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ	84
ТОДАРЕВ В. В., САВЕЛЬЕВ В. А. ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И МОДЕРНИЗАЦИИ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИКИ	87
ТРОФИМОВ Ю. В., ЛИШИК С. И., ПОСЕДЬКО В. С., ТИХОНОВИЧ А. В., ОСТРЕЦОВ Е. Ф., БОРТНИК К. И., ЧЕЛЯПИН А. Е., СУРВИЛО Л. Н., ГРУШКО Н. Н., ЖУК Е. С., БЕГУНОВ П. С. ТЕПЛОКОНТРАСТНАЯ МИШЕНЬ	90
ЧЕРТКОВ В. М., ЖЕЛЕЗНЯК В. К. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЗАКЛАДНЫХ УСТРОЙСТВ.	92
ЧУГАЙ К. Н., МАКСИМОВИЧ Е. С. ФОРМИРОВАНИЕ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА В РАДИОЛОКАТОРЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА	95

ЧУГАЙ К. Н., САВЕНКО С. А. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАТОРЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.	98
ЮРКЕВИЧ С. Н., ВАЩЕНКО И. М., ЮРКЕВИЧ-ПОТОЦКАЯ К. С. ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗАБРАЗИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ (БУФО) ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАТЕХНИКИ	101
ЮРКЕВИЧ С. Н., ВАЩЕНКО И. М., ЮРКЕВИЧ-ПОТОЦКАЯ К. С. ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗАБРАЗИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ (БУФО) ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАТЕХНИКИ	104

И. А. АЛЕКСЕЙЧУК, А. В. АНТОНОВ, В. И. АНТОНОВ, В. Н. ВОРОНЬКОВ,
В. А. КОЖЕМЯКИН, Ю. Ф. КУРДЯ, А. Р. ЛОПАТИК, В. И. ПЕТРОВ

Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ РАДИАЦИИ ДЛЯ ОСНАЩЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. В докладе приведена информация о разработанных интеллектуальных датчиках радиации для использования в составе робототехнических систем – линейки блоков детектирования гамма-излучения спектрометрического и дозиметрического назначения, а также радиационно-стойкого устройства детектирования сверхвысоких уровней радиации.

С развитием технологий все более быстрыми темпами создаются роботизированные мобильные комплексы наземного, воздушного и морского применения. Такие комплексы могут управляться дистанционно или работать автономно с использованием встроенного программного обеспечения в тесной связи с бортовыми сенсорами и системами спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС. Робототехнические устройства получили широкое применение в различных сферах, в т.ч. в сфере обеспечения безопасности, включая функции дистанционного радиационного мониторинга и контроля при ядерных авариях и их последствиях.

Для использования роботизированных комплексов в радиационной сфере необходим правильный выбор датчиков радиации – блоков детектирования ионизирующих излучений. Так, применение блоков детектирования в составе беспилотных летательных аппаратов накладывает определенные ограничения на габаритно-весовые характеристики; использование в составе подводных роботов требует обеспечения высокой механической прочности и герметичности; для наземных робототехнических устройств крайне важными являются такие характеристики, как радиационная устойчивость и стойкость.

Исходя из необходимости получения требуемой информации, целесообразно выделить три разновидности блоков детектирования (БД):

- высокочувствительные спектрометрические БД, способные измерять спектр гамма-излучения и параллельно – уровни радиации (мощность амбиентного эквивалента дозы) с последующей идентификацией радионуклидного состава;
- широкодиапазонные дозиметрические БД, способные обеспечивать измерения от фоновых уровней до аварийных и выше (максимально до 10 Зв/ч);
- радиационно-стойкие дозиметрические устройства детектирования, способные функционировать и достоверно измерять сверхвысокие уровни радиации (до 5000 Зв/ч);

Все разновидности вышеназванных устройств должны быть законченного интеллектуального типа, т.е. обеспечивать полную обработку информации и ее передачу по интерфейсу связи на бортовую аппаратуру робота или на пункт управления.

Высокочувствительные спектрометрические блоки детектирования

В спектрометрических блоках детектирования сцинтилляционного типа в качестве детекторов гамма-излучения используются обычно кристаллы, представленные в таблице 1 с характерными для них достоинствами и недостатками.

Таблица 1

Тип кристалла	Достоинства	Недостатки
Nal(Tl)	возможность работы с аппаратурным спектром (разрешение по ^{137}Cs – $7\div 8\%$); относительно невысокая цена; легко доступен для покупки и заказа ввиду своей распространенности; отсутствие собственного фона	гигроскопичен; разрешение невысоко относительно других кристаллов

Тип кристалла	Достоинства	Недостатки
CsI(Tl)	слабо гигроскопичен, что позволяет достаточно легко его обрабатывать; относительно высокое разрешение по ^{137}Cs ~7 %; отсутствие собственного фона	длительное время высвечивания и как результат – низкая загрузочная способность
LaBr ₃ (Ce)	высокое разрешение по ^{137}Cs ~3,5–4 %; малое время высвечивания и как результат – высокая загрузочная способность	наличие собственного фона в области энергий до 100 кэВ и высоких энергий; очень высокая стоимость кристалла
SrI ₂ (Eu)	высокое энергетическое разрешение по ^{137}Cs ~3 %; высокая, но приемлемая стоимость относительно других кристаллов со сравнимым разрешением; отсутствие собственного фона	гигроскопичен; длительное время высвечивания кристалла и как результат – низкая загрузочная способность

Технические характеристики разработанных и выпускаемых БД спектрометрического типа с использованием наиболее распространенных неорганических сцинтилляторов NaI(Tl) различных размеров приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные характеристики	БДКГ-201М	БДКГ-203М	БДКГ-205М	БДКГ-11М БДКГ-211М	БДКГ-19М БДКГ-219М
Детектор NaI(Tl)	Ø25×16 мм	Ø25×40 мм	Ø40×40 мм	Ø63×63 мм	Ø63×160 мм
Диапазон энергий	20 кэВ – 3 МэВ				
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МД)	50 нЗв/ч – 1 мЗв/ч	30 нЗв/ч – 500 мкЗв/ч	30 нЗв/ч – 300 мкЗв/ч	30 нЗв/ч – 150 мкЗв/ч	0,03 – 50 мкЗв/ч
Предел основной относительной погрешности измерения МД	±20 %				
Энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ	±20 % (40 кэВ – 3 МэВ)				
Чувствительность к гамма-излучению ^{137}Cs	имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹				
	165	400	800	2450	6000
Временная дискретность измерения	1/3 с	1/3 с	1/3 с	1/3 с	1/3 с
Типовое энергетическое разрешение для энергии 662 кэВ (^{137}Cs)	8 %	8 %	7,5 %	7,5 %	8 %
Степень защиты	IP68	IP68	IP68	IP54 IP68	IP54 IP68
Интерфейс	USB / RS232 / RS485				
Диапазон рабочих температур	-35...+55°C	-35...+55°C	-35...+55°C	-20...+50°C -35...+55°C	-20...+50°C -35...+55°C
Относительная влажность воздуха (≤35°C без конденсации влаги)	≤98 %	≤98 %	≤98 %	≤95 % ≤98 %	≤95 % ≤98 %
Габаритные размеры, масса	Ø63×313 мм 1 кг	Ø63×333 мм 1 кг	Ø63×333 мм 1 кг	Ø78×320 мм 1,7 кг Ø90×350 мм 2 кг	Ø76×422 мм, 3 кг Ø90×430 мм, 3,3 кг

При необходимости обеспечивать спектрометрию и, соответственно, идентификацию сложного радионуклидного состава, следует использовать сцинтилляционные детекторы с высоким энергетическим разрешением, в частности кристаллы LaBr_3 , $\text{SrI}_2(\text{Eu})$. В таблице 3 приведены технические характеристики спектрометрических блоков детектирования на основе этих сцинтилляторов.

Таблица 3

Блок детектирования	БДКГ-205А	БДКГ-205К
Детектор	Сцинтилляционный $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ Ø38×38 мм	Сцинтилляционный $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ Ø38×38 мм
Диапазон энергий	20 кэВ – 3 МэВ	
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы	30 нЗв/ч – 10 мкЗв/ч	30 нЗв/ч – 500 мкЗв/ч
Предел основной относительной погрешности измерения мощности дозы	±20 %	
Энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ (^{137}Cs)	±10 % (40 кэВ – 3 МэВ)	±15 % (80 кэВ – 3 МэВ)
Время отклика при изменении мощности дозы от 0,1 мкЗв/ч до 1 мкЗв/ч	не более 2 с	
Типовое энергетическое разрешение для энергии 662 кэВ (^{137}Cs)	3,3 %	3,5 %
Количество каналов АЦП	1024 (2048)	
Степень защиты	IP68	
Диапазон рабочих температур	от -20°C до +50°C	
Габаритные размеры, масса	Ø63×313 мм, 1 кг	

Для оснащения беспилотных малоразмерных летательных аппаратов (дронов) наиболее приемлемым решением с точки зрения габаритно-весовых требований является использование блоков детектирования на основе сцинтилляционных детекторов и кремниевых фотоэлектронных умножителей. Как показывают результаты исследований реализуемые при таком подходе варианты БД обладают техническими характеристиками, приведенными в таблице 4.

Таблица 4

Детектор	SrI_2				NaI
	12,7×12,7×12,7 мм	12,7×12,7×25,4 мм	Ø38,1×12,7 мм	Ø50,8×25,4 мм	12,7×12,7×25,4 мм
Объем детектора, см ³	2	4	14,5	51,5	4
Диапазон энергий, эВ	50 кэВ – 3 МэВ				
Разрешение, %	4	4	4	4	7,5
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы	50 нЗв/ч – 150 мкЗв/ч	50 нЗв/ч – 75 мкЗв/ч	50 нЗв/ч – 20 мкЗв/ч	50 нЗв/ч – 5 мкЗв/ч	50 нЗв/ч – 0,5 мЗв/ч
Чувствительность к гамма-излучению ^{137}Cs	(имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹) 50	(имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹) 100	(имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹) 350	(имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹) 1000	(имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹) 75
Степень защиты	IP68				
Диапазон рабочих температур	от -35°C до +55°C				
Габаритные размеры, масса	Ø30×50 мм 50 г	Ø30×60 мм 75 г	Ø50×80 мм 150 г	Ø65×80 мм 350 г	Ø30×60 мм 70 г

Широкодиапазонные дозиметрические блоки детектирования

В таблице 5 приведены технические характеристики дозиметрических блоков детектирования, в составе которых используются сцинтилляционные детекторы на основе тканезквивалентной пластмассы.

Таблица 5

Основные характеристики	БДКГ-04 БДКГ-204	БДКГ-24 БДКГ-224	БДКГ-30 БДКГ-230	БДКГ-32 БДКГ-232	БДКГ-103
Детектор на основе сцинтилляционной пластмассы	Ø30×15 мм	Ø50×40 мм	Ø50×40 мм	Ø70×80 мм	200×180×70 мм
Диапазон энергий	15 кэВ – 3 МэВ 60 кэВ – 3 МэВ	30 кэВ – 3 МэВ	50 кэВ – 3 МэВ	35 кэВ – 3 МэВ	80 кэВ – 3 МэВ
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы	50 нЗв/ч – 10 Зв/ч	30 нЗв/ч – 1 Зв/ч	–	30 нЗв/ч – 500 мЗв/ч	30 нЗв/ч – 50 мЗв/ч
Диапазон измерения мощности поглощенной дозы	–	–	30 нГр/ч – 1 Г/ч	–	–
Предел основной относительной погрешности измерений	±20 %	±20 % ±15 %	±20 % ±15 %	±20 %	±20 %
Чувствительность к гамма-излучению ¹³⁷ Cs	имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹		имп·с ⁻¹ /мкГр·ч ⁻¹	имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹	
	70	530	600	1700	15000
Энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ	±35 % ±25 %	±25 %	±25 %	±25 %	±40 %
Временная дискретность измерения	0,1 с	0,1 с	0,1 с	0,1 с	0,1 с
Степень защиты	IP64 IP57	IP64 IP67	IP64 IP67	IP64 IP67	IP64
Интерфейс	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485
Диапазон рабочих температур	-35...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+55°C
Относительная влажность воздуха (≤35°C без конденсации влаги)	≤98 %	≤98 %	≤98 %	≤95 % ≤98 %	≤95 %
Габаритные размеры, масса	Ø60×205 мм, 0,45 кг Ø60×230 мм, 0,55 кг	Ø60×200 мм, 0,65кг Ø60×250 мм, 0,75кг	Ø60×200 мм, 0,65кг Ø60×200 мм, 0,75кг	Ø76×245 мм, 0,78 кг Ø76×245 мм, 0,9 кг	360×220×80 мм, 5 кг

Радиационно-стойкие дозиметрические устройства детектирования для измерения сверхвысоких уровней радиации

При ликвидации последствий особо тяжелых аварий на объектах атомной энергетики и ядерной техники наземные робототехнические средства необходимо оснащать устройствами детектирования, способными измерять сверхвысокие уровни радиации, по крайней мере до 5000 Зв/ч и обладать при этом радиационной устойчивостью и стойкостью. Подобное устройство УДКГ-37 разработано и успешно выдержало испытания. Принципиально устройство включает радиационно-стойкий измерительный блок детектирования БДКГ-37, сконструированный с использованием радиационно-стойких детекторов, дистанционно связанный кабелем (20–50 м) с блоком сопряжения БОИ-37. Последний имеет 2 интерфейсных выхода: RS 232 и RS 485.

Диапазон измерения мощности дозы составляет 1 мкЗв/ч – 5000 Зв/ч, диапазон дозы – 1 мкЗв – 5000 Зв. Радиационный ресурс не менее 50000 Зв. Диапазон регистрируемых энергий – 50 кэВ – 3 МэВ.

Конструктивное исполнение – по классу IP68. Диапазон рабочих температур составляет -30÷50°C.

В целом по своим техническим характеристикам устройство УДКГ-37 не уступает зарубежным аналогам.

Заключение. Разработанная линейка интеллектуальных датчиков радиации для оснащения робототехнических систем предоставляет широкую возможность выбора для разработчиков и изготовителей робототехники воздушного, наземного и морского применения.

Ряд из выпускаемых блоков детектирования успешно используется в составе робототехнических систем в Республике Беларусь, Российской Федерации, Болгарии, Китае, Японии.

ALEKSEYCHUK I., ANTONOV A., ANTONOV V., VORONKOV V.,
KOZHEMYAKIN V., KURDYA Y., LOPATIK A., PETROV V.
Atomtex SPE, Minsk, Belarus

SMART RADIATION SENSORS FOR ROBOTIC SYSTEMS INSTRUMENTATION

Summary. *The report provides information on smart radiation sensors developed for use as part of robotic systems – a range of spectrometric and dosimetric gamma radiation detection units and a radiation-resistant device for detecting very high radiation levels.*

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ДОЗИМЕТРЫ ДЛЯ ЭКИПИРОВКИ ЛИЧНОГО СОСТАВА СИЛОВЫХ СТРУКТУР: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация. В докладе представлена информация о разработанных и выпускаемых предприятием «АТОМТЕХ» конкурентоспособных индивидуальных прямопоказывающих дозиметров рентгеновского и гамма-излучения семейств ДКГ-АТ2503 и ДКС-АТ3509 (всего 9 модификаций). Благодаря своим техническим и эксплуатационным параметрам дозиметры используются во многих сферах деятельности и обеспечивают защиту персонала при воздействии радиационного фактора. Таким образом, они могут быть рекомендованы для оснащения персонала силовых структур, выполняющих свои функции на радиационно-опасных объектах.

Индивидуальные прямопоказывающие электронные дозиметры непрерывного рентгеновского и гамма-излучения семейств ДКГ-АТ2503 и ДКС-АТ3509 (см. рис. 1) выпускаются предприятием «АТОМТЕХ» на протяжении почти 20 лет. За этот период времени они неоднократно модернизировались с целью усовершенствования и обеспечения конкурентоспособности и зарекомендовали себя надежными, обладающими современными функциональными возможностями приборами для индивидуального дозиметрического контроля, способными эксплуатироваться в жестких условиях. Дозиметры позволяют оперативно получать информацию о дозах облучения персонала, об уровнях радиации, тем самым эффективно обеспечивают выявление и предупреждение переоблучения.



Рисунок 1. – Индивидуальные дозиметры из семейств ДКГ-АТ2503 и ДКС-АТ3509

Приборы успешно используются в различных сферах, связанных с обеспечением радиационной защиты персонала, сертифицированы как средства измерения в Республике Беларусь, Российской Федерации, Украине, Литве, Казахстане, Словакии и других странах, соответствуют требованиям технического регламента ЕАС по электромагнитной совместимости и безопасности. Дозиметры также прошли испытания на соответствие условиям европейской директивы 89/336/ЕЕС по электромагнитной совместимости и безопасности в сертифицированной лаборатории центра ARC Seibersdorf research (Австрия). Кроме того, участвовали в программе интерсличения, проведенной Международным агентством по атомной энергии МАГАТЭ совместно с организацией EURADOS [1]. Таким образом, оба семейства индивидуальных дозиметров соответствуют требованиям ГОСТ 27451-87, IEC 61526:2010, IEC 61010-1:2001, IEC 61000-4-2:2008, IEC 6100-4-3:2008, EN 55011:2009. Благодаря этому они конкурентоспособны и поставляются в десятки стран мира.

Дозиметры ДКГ-АТ2503 [2] представляют собой миниатюрные микропроцессорные приборы, принцип действия которых основан на измерении частоты импульсов, генерируемых в счетчике Гейгера-Мюллера под воздействием регистрируемого рентгеновского и гамма-излучения. Благодаря энергокомпенсирующему фильтру эффективно реализуется коррекция энергетической зависимости чувствительности

в заданном диапазоне энергий. Дозиметры выполнены в ударопрочном пластмассовом корпусе, что позволяет использовать их в жестких условиях эксплуатации.

В конце 2018 года прошли периодические испытания дозиметров ДКГ-АТ2503, в результате которых в государственный реестр средств измерений были внесены новые модификации индивидуальных дозиметров ДКГ-АТ2503В, ДКГ-АТ2503В/1, ДКГ-АТ2503В/2. Эти модификации отличаются повышенной надежностью, расширенным диапазоном измерения мощности дозы (до 103в/ч у ДКГ-АТ2503В/2) и повышенной помехоустойчивостью. Основные технические характеристики семейства дозиметров ДКГ-АТ2503 приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Технические характеристики дозиметров семейства ДКГ-АТ2503

Основные характеристики	ДКГ- АТ2503	ДКГ- АТ2503А	ДКГ- АТ2503В	ДКГ- АТ2503В/1	ДКГ- АТ2503В/2
Диапазон измерений индивидуального эквивалента дозы	1 мкЗв – 10 Зв		0,1 мкЗв – 10 Зв		1 мкЗв – 10 Зв
Диапазон измерений мощности индивидуального эквивалента дозы	0,1 мкЗв/ч – 0,5 Зв/ч	0,1 мкЗв/ч – 0,1 Зв/ч	0,1 мкЗв/ч – 1 Зв/ч	0,1 мкЗв/ч – 0,2 Зв/ч	1 мкЗв/ч – 10 Зв/ч
Диапазон энергий	50 кэВ – 3 МэВ		50 кэВ – 10 МэВ		
Время непрерывной работы	не менее 1000 ч				
Диапазон рабочих температур	-10...+40°C		-30...+60°C		
Степень защиты	IP54				
Габаритные размеры	85×46×16 мм				
Масса	70 г				

Дозиметры ДКС-АТ3509 [3] представляют собой широкодиапазонные микропроцессорные приборы, принцип действия которых основан на измерении интенсивности и амплитудной дискриминации импульсов, генерируемых в полупроводниковом кремниевом детекторе под воздействием регистрируемого рентгеновского и гамма-излучения. Преобразование временных и амплитудных распределений в непосредственно измеряемые физические величины (мощность дозы и дозу) осуществляется автоматически. Это позволяет производить одновременное измерение дозовых нагрузок на внутренние органы Нр(10), кожные покровы и слизистые оболочки Нр(0,07). Благодаря осуществляемому амплитудному анализу импульсов и наличию энергокомпенсирующего фильтра эффективно реализуется коррекция энергетической зависимости чувствительности во всем диапазоне энергий.

В начале 2019 года в рамках периодических испытаний была проведена модернизация дозиметров с целью улучшения их помехоустойчивости (устойчивости к электромагнитному излучению напряженностью до 30 В/м). Основные технические характеристики семейства дозиметров ДКС-АТ3509 приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Технические характеристики дозиметров семейства ДКС-АТ3509

Основные характеристики	ДКС-АТ3509	ДКС-АТ3509А	ДКС-АТ3509В	ДКС-АТ3509С
Измеряемая величина	Нp(10)		Нp(10), Нp(0,07)	
Диапазон измерений индивидуального эквивалента дозы	1 мкЗв – 10 Зв			
Диапазон измерений мощности индивидуального эквивалента дозы	0,1 мкЗв/ч – 1 Зв/ч			0,1 мкЗв/ч – 5 Зв/ч
Диапазон энергий	15 кэВ – 10 МэВ	30 кэВ – 10 МэВ	15 кэВ – 10 МэВ	15 кэВ – 10 МэВ
Время непрерывной работы	не менее 500 ч			
Диапазон рабочих температур	-10...+40 °С			
Степень защиты	IP54			
Габаритные размеры	105×58×23 мм			
Масса	100 г			

Благодаря наличию инфракрасного канала передачи данных семейства дозиметров ДКГ-АТ2503 и ДКС-АТ3509 совместно с подключенным к ПЭВМ устройством считывания и прикладным программным обеспечением образуют локальную автоматизированную систему дозиметрического контроля (см. рис. 2).

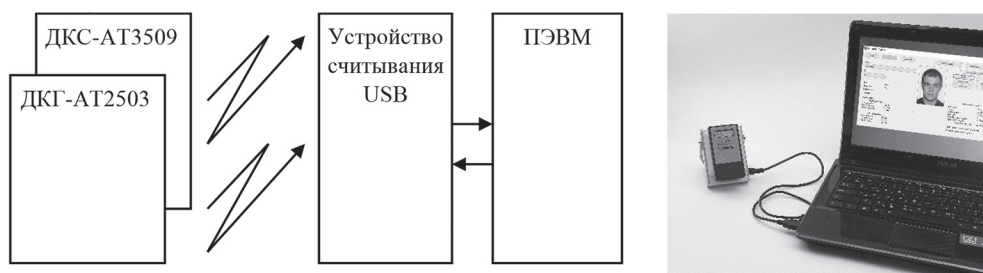


Рисунок 2. – Локальная автоматизированная система дозиметрического контроля

Функции, которые реализуются системой:

- сбор и обработка данных индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внешнего облучения (гамма и рентгеновская дозиметрия);
- ведение архива данных ИДК, а также представление его в наглядном графическом формате (история накопления пользователем доз по годам, кварталам, а также «записные книжки» дозиметров);
- формирование отчетов (карточек учета индивидуальных доз внешнего облучения, документов государственной статистической отчетности, внутренних отчетов предприятия);
- ведение архива индивидуальных дозиметров (тип дозиметра, заводской номер, дата выпуска, общее время работы и доза, накопленная прибором за время работы, пределы основной погрешности).

Отличительные особенности системы:

- высокая оперативность получения дозиметрической информации (время приема-выдачи дозиметра составляет 5–10 с);
- простота аппаратных и программных средств, удобный графический интерфейс делают систему оптимальной по соотношению цена/производительность для учета доз на малых и средних предприятиях (несколько сот человек), где используется ионизирующее излучение;
- адаптируемость системы, заключающаяся в возможности ее расширения за счет включения новых модификаций дозиметров.
- наличие индивидуального номера у дозиметра и возможность его смены в системе позволяют иметь их меньшее количество, чем численность попеременно работающего личного состава.

Для увеличения конкурентоспособности и обеспечения соответствия современным тенденциям развития индивидуальных прямопоказывающих электронных дозиметров планируются разработки по следующим перспективным направлениям:

- создание индивидуального дозиметра с возможностью регистрации импульсного излучения;
- создание нового, современного, более прочного корпуса для увеличения степени защищенности индивидуальных дозиметров;
- внедрение часов реального времени для хранения в памяти прибора дополнительных параметров (время включения/отключения, время превышения порога по дозе, мощности дозы) для получения более детальной истории накопления доз;
- внедрение GPS-модуля для привязки данных записной книжки к местоположению;
- внедрение в дозиметры пороговой по дозе вибросигнализации;
- внедрение в дозиметры встроенной аккумуляторной батареи;
- создание группового (на 10–50 дозиметров) считывающего/зарядного устройства с возможностью функции быстрого заряда, а также увеличенной скоростью обмена (введение нового интерфейса передачи данных: USB, Bluetooth, WiFi).

Таким образом, индивидуальные цифровые дозиметры, выпускаемые предприятием «АТОМТЕХ», благодаря своей надежности, функциональности, а также благодаря перспективным решениям, могут быть эффективно применимы для экипировки личного состава силовых структур, задействованных на радиационно-опасных объектах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Intercomparison of Personal Dose Equivalent Measurements by Active Personal Dosimeters, IAEA, Vienna, 2007.
2. Дозиметры индивидуальные ДКС-АТ3509. Руководство по эксплуатации.
3. Дозиметры индивидуальные ДКГ-АТ2503. Руководство по эксплуатации.

BOHDAN M. A., KARAIKOZA T. M., KURDIA Y. F.
Atomtex SPE, Minsk, Belarus

**INDIVIDUAL DIGITAL DOSIMETERS FOR EQUIPMENT OF PERSONNEL
OF POWER STRUCTURES: STATE AND PERSPECTIVES**

Summary. *The report provides information on developed and manufactured by the company «ATOMTEX» competitive of active individual dosimeters x-ray and gamma-ray families AT2503 and AT3509 (9 modifications). Due to its technical and operational parameters dosimeters are used in many fields and provide protection of personnel under the influence of the radiation factor. Thus, they can be recommended for equipping personnel of power structures performing their functions at radiation-hazardous facilities.*

ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 178–220 ГГц

Аннотация. В связи с развитием науки и техники возникает необходимость в создании и применении радиоэлектронных СВЧ приборов и устройств в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Для их метрологического обеспечения в Центре 1.9 НИЧ БГУИР ведется разработка векторного анализатора цепей в диапазоне частот 178–220 ГГц. В статье приведен принцип работы и построения таких векторных анализаторов. Рассмотрены особенности конструкции и основные характеристики умножителей частоты на два в диапазоне 178–220 ГГц, применяемых в СВЧ измерительном тракте векторного анализатора субмиллиметрового диапазона волн.

В последние годы активно проводятся исследования и разработки, связанные с коротковолновой частью миллиметрового диапазона волн. Это обусловлено применением миллиметровых и субмиллиметровых волн в научных исследованиях, в системах радиосвязи, радиолокации и радионавигации, в медицине и других областях. Разработка, производство и эксплуатация сложных радиотехнических систем и комплексов, работающих в субмиллиметровом диапазоне длин волн, требуют соответствующего метрологического обеспечения, для осуществления которого требуется вся номенклатура приборов, начиная от генераторов и измерителей мощности и заканчивая скалярными и векторными анализаторами СВЧ-цепей.

К числу наиболее эффективных измерительных средств, предназначенных для инструментального анализа параметров СВЧ-устройств, относятся векторные анализаторы СВЧ-цепей. С их помощью можно провести измерения S-параметров, связывающих падающие на i -входы СВЧ-устройства волны a_i и отраженные (рассеянные) от них волны b_i , где $i=1, 2, \dots, n$ (n -число пар полюсов эквивалентного СВЧ-устройству $2n$ -полюсника). Связь падающих и отраженных волн в общем случае может быть выражена в виде [1]:

$$b_i(\omega) = \sum_{k=1}^n S_{ik}(\omega) a_k(\omega)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$, или в матричном виде

$$[b] = [S][a].$$

S-параметры являются комплексными величинами, зависящими от частоты. Основными «цепными» параметрами СВЧ-устройства, подлежащими измерению, являются: модули $|S_{ii}|$ и фазы $\arg S_{ii}$ коэффициентов отражения, модули $|S_{ik}|$ и фазы $\arg S_{ik}$ коэффициентов передачи. Кроме того используется производный параметр – коэффициент стоячей волны по напряжению i -го плеча

$$K_i = \frac{1+|S_{ii}|}{1-|S_{ii}|}.$$

В Центре 1.9 НИЧ БГУИР ведутся работы по созданию векторного анализатора цепей, который предназначен для автоматизированного измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения ($S_{11(22)}$ и $S_{21(12)}$) в диапазоне частот от 178 до 220 ГГц волноводных устройств, имеющих волноводный канал сечением $1,3 \times 0,65$ мм.

Анализатор состоит из блока измерительного и преобразователя выносного. Схема подключения объекта измерений к анализатору представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. – Схема подключения объекта измерений к анализатору

Принцип действия анализатора основан на раздельном выделении падающей на объект измерения, отраженной и прошедшей волн СВЧ сигнала. Напряжения, пропорциональные параметрам падающей, отраженной и прошедшей волн, полученные с использованием специального алгоритма вычисления, преобразуются в значения измеряемых параметров: модуль $|S_{11(22)}|$ и фазу $\arg S_{11(22)}$ коэффициента отражения, коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), модуль $|S_{21(12)}|$ и фазу $\arg S_{21(12)}$ коэффициента передачи. Измеряемая информация отображается в виде частотных зависимостей в декартовой системе координат.

В рассматриваемом анализаторе реализован гетеродинный метод измерения S-параметров. При преобразовании микроволновых сигналов в сигналы промежуточной частоты в гетеродинных анализаторах используются два сигнала с различными частотами от двух генераторов: генератора сигналов качающейся частоты (ГКЧ) и гетеродина.

Источником СВЧ колебаний является синтезатор частоты, который генерирует сигнал в диапазоне частот от 14,8 до 18,3 ГГц. Далее сигнал поступает в блок умножителей частоты, где происходит усиление и преобразование частоты сигнала до значений от 178 до 220 ГГц. С выхода блока умножителей сигнал поступает в СВЧ тракт, включающий в себя направленные ответвители падающей и отраженной волн, с боковых плеч которых снимаются сигналы, несущие информацию о параметрах объекта измерения.

Эти сигналы поступают на смесители опорного и измерительного канала. На вторые входы смесителей через делитель мощности поступает сигнал гетеродина, сдвинутый по частоте относительно сигнала ГКЧ на промежуточную частоту деленную на номер гармоники сигнала, полученного на выходе блока умножителей частоты в СВЧ тракте. Смесители на гармониках выполняют преобразование сигналов в сигналы промежуточной частоты, пригодные для последующей обработки. Потери преобразований компенсируются усилителями предварительными. Далее производится аналого-цифровое преобразование и сигналы поступают в модуль обработки сигналов, где производится первичная математическая обработка. В модуле компьютерном по специализированным алгоритмам происходит вычисление и построение графиков модулей и фаз коэффициентов.

Преобразователь выносной также состоит из смесителя на гармониках и усилителя предварительного и служит для снятия информации о прошедшей через объект измерения волне. Сигнал с выхода преобразователя подается в блок измерительный, который осуществляет его аналого-цифровое преобразование и дальнейшую математическую обработку. Результат измерения отображается на экране блока измерительного.

Для кратного преобразования (умножения) частоты источника СВЧ сигнала и формирования выходного сигнала векторного анализатора в диапазоне частот 178–220 ГГц применяются умножители частоты на два, которые разработаны и изготовлены в Центре 1.9 НИЧ БГУИР.

В миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн наибольшее применение получили умножители на СВЧ диодах с барьером Шоттки. Работа применяемых умножителей частоты основана на эффекте удвоения частоты по схеме двух-полупериодного выпрямления. Эквивалентная схема данных удвоителей частоты представлена на рисунке 2а.

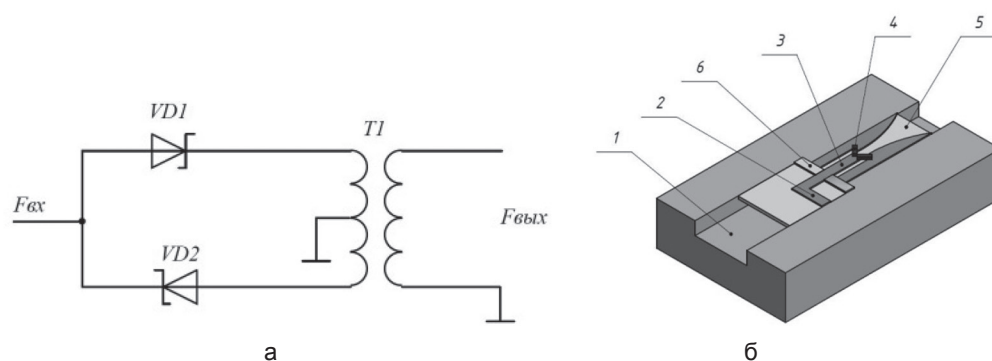


Рисунок 2. – Умножитель частоты в диапазоне 178–220 ГГц:
а – эквивалентная схема; б – эскиз конструкции

Конструктивно удвоитель частоты выполнен в виде комбинации двух линий передачи (рисунок 2б): входной – копланарного волновода (3) и выходной – щелевой линии (5), между которыми установлены два диода с барьером Шоттки 3А-147-А (4). Входной сигнал поступает со входа волновода (1) сечением 2,4×1,2 мм на копланарную линию через индуктивный зонд (2) и далее проходит на диоды удвоителя. Выходной сигнал возбуждается в щелевой линии, расположенной в волноводе сечением 1,3×0,65 мм. Входной и выходной волноводы разделены между собой металлической перемычкой (6), обеспечивающей развязку входного и выходного волноводов [2]. Работа умножителей частоты характеризуется такими параметрами, как входная ($P_{вх}$) и выходная ($P_{вых}$) мощности; коэффициент передачи по мощности (η); полоса рабочих частот F .

В измерительном канале разрабатываемого векторного анализатора в диапазоне частот 178-220 ГГц используются удвоители частоты, которые имеют характеристики, представленные в таблице 1.

**Таблица 1. – Основные параметры удвоителя частоты
в диапазоне частот 178–220 ГГц**

$F_{вх}$, ГГц	$F_{вых}$, ГГц	$P_{вх}$, мВт	$P_{вх}$, дБм	$P_{вых}$, мВт	$P_{вых}$, дБм	η , %
89,3	178,6	13,338	11,251	0,195	-7,100	1,5
92,5	185,0	13,814	11,403	0,107	-9,706	0,8
95,0	190,0	14,387	11,580	0,203	-6,925	1,4
97,5	195,0	13,993	11,459	0,138	-8,601	1,0
100,0	200,0	13,614	11,340	0,272	-5,654	2,0
102,5	205,0	13,636	11,347	0,433	-3,635	3,2
105,0	210,0	13,740	11,380	0,687	-1,630	5,0
107,5	215,0	13,369	11,261	0,734	-1,343	5,5
110,0	220,0	13,245	11,220	1,535	1,861	11,6

Значения выходной мощности сигнала используемых удвоителей частоты лежат в диапазоне от 1 до -9 дБм, что обусловлено малой мощностью входного сигнала (11 дБм). Удвоители частоты с полученными характеристиками могут применяться при построении СВЧ измерительных трактов векторных анализаторов цепей, которые работают с сигналами малого уровня мощности.

Таким образом, используя недорогую и доступную элементную базу и относительно простую конструкцию, в Центре 1.9 НИЧ БГУИР разрабатываются умножители частоты в диапазоне 178–220 ГГц.

Описанные умножители частоты являются одними из ключевых элементов СВЧ измерительного тракта векторного анализатора цепей в диапазоне частот 178–220 ГГц. Их применение позволяет создать векторный анализатор отечественного производства в новом, ранее неосвоенном субмиллиметровом диапазоне частот.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Гусинский, А. В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн: монография. В 3 ч. Ч. 3 (кн. 1). Принципы построения и анализ схем векторных анализаторов цепей / А. В. Гусинский, Г. А. Шаров, А. М. Кострикин. – Минск: БГУИР, 2008. – С. 240.
2. Боровская, М. А., Липатников, В. П., Касперович, М. М., Кострикин, А. М., Гусинский А. В. Исследование основных характеристик умножителей частоты в диапазоне 120–220 ГГц // Докл. БГУИР 2018. – № 2 (112). – С. 47–53.

BOROVSKAYA M. A., KOSTRIKIN A. M., GUSINSKIY A. V.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

VECTOR NETWORK ANALYZER IN THE FREQUENCY RANGE 178–220 GHZ

Summary. *In connection with the development of science and technology, there is a need to create and use electronic microwave devices and devices in the submillimeter wavelength range. For their metrological support in Center 1.9, the research department of BSUIR is developing a vector network analyzer in the frequency range 178–220 GHz. The article describes the principle of operation and construction of such vector analyzers. The design features and the main characteristics of frequency multipliers in the 178–220 GHz range used in the microwave measuring path of the vector analyzer of the submillimeter wave band are considered.*

**СОСТОЯНИЕ И ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ВЕЛИЧИН**

Аннотация. В статье описаны национальные эталоны и комплексы эталонной аппаратуры, обеспечивающие метрологический контроль радиоэлектронных средств измерений в отделе радиоэлектронных измерений БелГИМ, перспективы развития радиоэлектронных средств измерений.

Уникальные комплексы эталонной аппаратуры БелГИМ обеспечивают проведение калибровки и поверки радиоэлектронных средств измерений, информационно-измерительных систем, измерителей скорости движения транспортных средств, а также проводить высокоточные измерения в диапазоне частот от 0 до 39,65 ГГц на напряжения и мощности, ослабления, фазы, добротности, параметров цепей, частоты электромагнитных колебаний, параметров модулированных колебаний, спектральных и импульсных характеристик. В отделе радиоэлектронных измерений БелГИМ функционирует 10 национальных эталонов, а также ряд эталонных установок, обеспечивающих метрологический контроль радиоэлектронных средств измерений.

До введения в эксплуатацию **национального эталона единицы ослабления электромагнитных колебаний НЭ РБ 44-18** направление измерения ослабления в Республике Беларусь было представлено установками Д1-13, которые калибровались на территории Российской Федерации. В настоящее время с помощью эталона единицы ослабления БелГИМ имеет возможность воспроизводить единицу ослабления в электромагнитных колебаний в диапазоне от 0 до 110 дБ с неисключенной систематической погрешностью от 0,001 до 0,12 дБ в зависимости от диапазона частот и значения ослабления. Перспективы развития эталона – приобретение установки Д1-25 для проведения исследований и международных сличений [1].

Национальный эталон единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП) НЭ РБ 25-15 предназначен для передачи размера единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения рабочим эталонам, используемым для калибровки и поверки средств измерений, применяемых в волоконно-оптических системах передачи информации. Эталон принял участие в сличениях с РТВ (Германия) и ВНИИОФИ (Россия), по результатам которых подтвердил заявленные характеристики.

Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15 применяется при метрологическом контроле измерителей плотности потока энергии, измерителей уровней электромагнитных полей, измерительных антенн в диапазоне частот от 300 МГц до 39,65 ГГц. Эталон обеспечивает воспроизведение единицы плотности потока энергии в диапазоне от 0,01 до 1,65 Вт/м² с неисключенной систематической погрешностью от 0,5 до 1,2 дБ. Основным преимуществом нового эталона по сравнению с использовавшейся ранее установкой П1-9 является возможность воспроизведения единицы на любой частоте из всего рабочего диапазона частот; ранее была возможность проведения измерений только на фиксированных частотах, некоторые поддиапазоны частот не были обеспечены вообще. Научно-исследовательские работы по совершенствованию эталона ведутся постоянно, в настоящее время завершаются исследования, которые позволили снизить неисключенную систематическую погрешность эталона до 0,4–0,5 дБ [2].

В связи с интенсивным развитием средств телекоммуникаций БелГИМ выполняет разработку необходимых эталонов для метрологического контроля используемых в связи средств измерений. Так в 2015 году завершены работы по созданию **эталонного комплекса для контроля интерфейсов цифровых (PDH/SDH) каналов связи**. Комплекс включает в себя аппаратуру для воспроизведения цифровых сигналов (PDH/SDH) каналов связи, аппаратуру для измерения формы цифровых сигналов (PDH/SDH) каналов связи, аппаратуру для измерения и генерации фазового

дрожания. Комплекс предназначен для аттестации, поверки, калибровки тестеров и анализаторов цифрового потока E1 – AFK3 и их зарубежных аналогов Беркут E1, ТИС-E1, ТЦК-E1, E2, EDT-125(EST-135), SunSet-PDH [3].

Ещё одним эталоном, созданным в сфере телекоммуникаций, является **национальный эталон единицы измерения объемов передаваемой цифровой информации по каналам интернет и телефонии НЭ РБ 50-18**. Принцип работы эталона основан на том, что по заданной программе эталон устанавливает исходящие соединения с файл-сервером через систему связи с измерительными функциями, осуществляющим учет объемов оказанных услуг связи по передаче данных. Абонентское устройство обеспечивает передачу файлов эталонных объёмов от сервера по сети связи, поддерживающей технологии пакетной передачи данных через контролируемое средство связи, осуществляющее учет объемов оказанных услуг связи по передаче данных (коммутатор пакетов, маршрутизатор и т.п.) другому включенному в сеть связи средству связи (приемник данных). В сеансе передачи/приема данных эталон производит измерение количества данных, которое также измеряется и регистрируется в соответствующем учётном CDR-файле контролируемой системы связи.

Основные технические характеристики разработанного эталона:

- диапазон воспроизведения и измерения объёмов цифровой информации: 1 Б – 1 ТиБ;
- неисключенная систематическая погрешность воспроизведения объёмов цифровой информации: 0 Б [6].

Сфера единства времяисчисления в Республике Беларусь представлена **национальным эталоном единиц: времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени НЭ РБ 01-95**. До выполнения последней модернизации эталон обеспечивал воспроизведение размера единицы частоты и времени с суммарной погрешностью, не превышающей $5 \cdot 10^{-13}$ на годовом интервале, что было недостаточно для возрастающих потребностей республики. В настоящее время выполнена модернизация эталона, в рамках которой произведено его дооснащение водородными стандартами частоты и времени, навигационными космическими аппаратами ГЛОНАСС/GPS, аппаратурой усиления и размножения сигналов (включает в себя усилители частотных и временных сигналов, сервера времени для передачи эталонных сигналов через Internet), генераторами отстроек по фазе и частоте типа HROG-5 (обеспечивают возможность корректировки шкалы и фазы хранителей, таким образом обеспечивая стабильность хранения и ведения национальной шкалы времени), автоматизированными частотно-временными системами внутренних и внешних сличений эталона. Работы завершены в 2 кв. 2018 года. Модернизированный эталон имеет улучшенные метрологические и технические характеристики:

- суммарная погрешность воспроизведения размера единицы времени и частоты не более $1 \cdot 10^{-14}$;
- расхождение шкалы времени UTC(BY) со шкалой всемирного координированного времени UTC не более $\pm 0,1$ мкс [4].

Ещё одной задачей, решаемой в рамках ГНТП «Эталоны Беларуси» на 2016–2020 гг., является метрологическое обеспечение средств измерений параметров электрических полей в диапазоне частот от 5 Гц до 150 кГц. Первый необходимый для решения задачи **национальный эталон единицы напряженности электрического НЭ РБ 49-18** поля был создан к середине 2018 г. В основу работу эталона положен метод эталонного поля. Суть метода заключается в создании однородного электрического поля в пространстве между двумя параллельными пластинами плоского несимметричного конденсатора, одна из пластин которого заземлена. Особенностью плоского конденсатора является высокая однородность электрического поля в пространстве между пластинами, что позволяет использовать его в качестве меры напряженности электрического поля. Диапазон рабочих частот эталона составил от 5 Гц до 400 кГц, диапазон воспроизводимой единицы напряженности электрического поля – от 0,5 до 2000 В/м, погрешность воспроизведения и передачи напряженности электрического поля составила не более 5 %. Второй эталон обеспечит воспроизведение единицы напряженности магнитного поля с аналогичными точностными характеристиками. По завершению работ в республике будет обеспечена возможность поверки и калибровки широко используемыми при аттестации рабочих мест по уровням электромагнитных полей центрами гигиены и эпидемиологии средств

измерений низкочастотных электромагнитных полей, а также низкочастотных измерительных антенн [5].

В 2014 г. в БелГИМ организована лаборатория измерений электромагнитных полей. В комплекс решаемых лабораторией задач входят испытания продукции на электромагнитную совместимость, поверка и калибровка измерительных антенн, измерителей напряженности электромагнитного поля, аттестация испытательного оборудования.

Основу технической базы лаборатории составляет модифицированная экранированная полубезэховая камера производства компании Franconia EMC Test-Systems GmbH, Германия. Камера рассчитана на измерительное расстояние 3 м, диапазон рабочих частот от 30 МГц до 18 ГГц диаметр полезного испытательного объема – 2 м, высота испытательного объема – 2 м. Камера полностью соответствует требованиям национальных стандартов, стандартов технического регламента Таможенного союза, международного стандарта CISPR 16-1-4. Оборудование БелГИМ позволяет проводить испытания на устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю напряженностью до 30 В/м с размерами плоскости калиброванного испытательного поля 1,5×1,5 м, а также выполнять измерения напряженности поля излучаемых радиопомех в диапазоне частот от 9 кГц до 18 ГГц при полном отсутствии внешних сигналов, способных повлиять на результаты испытаний.

БелГИМ является единственной в РБ лабораторией, обладающей необходимым оборудованием и обученным персоналом для аттестации экранированных безэховых камер, открытых и альтернативных измерительных площадок на соответствие ГОСТ CISPR 16-1-4. Аттестация измерительных площадок является сложным и трудоемким процессом. Приобретенный комплект оборудования и соответствующая подготовка персонала позволили организовать автоматизированное рабочее место для измерений нормализованного затухания, КСВн площадок, коэффициента безэховости и коэффициента экранирования экранированных безэховых камер. Лаборатория имеет большой опыт работы в этой области, в том числе за пределами РБ.

В отделе радиоэлектронных измерений также функционирует национальный эталон единицы звукового давления в воздушной среде в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц НЭ РБ 11-03, национальный эталон единицы коэффициента гармоник НЭ РБ 36-18, национальный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции НЭ РБ 42-18, национальный эталон единицы девиации частоты НЭ РБ 43-18, национальный эталон мощности электромагнитных колебаний в диапазон частот (0,3–37,5 ГГц) НЭ РБ 39-18.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Национальный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазон частот (0,3–37,5 ГГц) НЭ РБ 44-18. Паспорт.
2. Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15. Паспорт.
3. Эталонный комплекс для контроля интерфейсов цифровых (PDH/SDH) каналов связи. Паспорт.
4. Национальный эталон единиц: времени – секунды, частоты – герца и шкалы времени НЭ РБ 01-95. Паспорт.
5. Национальный эталон единицы напряженности электрического поля НЭ РБ 49-18. Паспорт.
6. Национальный эталон единицы измерения объемов передаваемой цифровой информации по каналам интернет и телефонии НЭ РБ 50-18. Паспорт.

VOLYNETS A. S.

STATE OF THE ART AND PRIORITY AREAS FOR DEVELOPMENT IN MEASURING RADIO-ELECTRONIC QUANTITIES

Summary. The article describes national measurement standards and reference installations in use for metrological control of radio-electronic measuring instruments by the Department for Radio-Electronic Measurements of BelGIM; prospects for further improvement of radio-electronic measuring instruments.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ

Аннотация. В статье рассматривается компьютерная измерительная система для оценки параметров радиостанций малой мощности. В основе системы лежит принцип переноса спектра исходного сигнала в область более низких частот, чем снижаются требования к устройствам аналого-цифрового преобразования.

В настоящее время мобильные телекоммуникационные устройства при обретают все большее распространение, а стандарты мобильной связи и беспроводной передачи развиваются стремительными темпами. Основным направлением развития данных устройств остается увеличение скорости передачи данных при минимальном увеличении энергетических и материальных затрат на построение и эксплуатацию всей системы передачи информации. Также стремительно развивается направление когнитивных систем связи и программно-определяемых радиосредств.

Приемные и передающие модули с преобразованием частоты являются ключевыми компонентами таких радиосредств и при их разработке и производстве необходимо иметь приборы, позволяющие эффективно измерять и контролировать их основные электрические параметры.

Наряду с традиционными мобильными устройствами разрабатываются и мобильные радиостанции, работающие, как правило, в диапазоне частот от 3 до 300 МГц. Такие радиостанции применяются в основном в специальных ведомствах, где необходима организация связи на любой местности и на большие расстояния. Помимо качества и дальности связи к таким устройствам предъявляются требования обеспечения скрытности передачи данных, безопасности и помехозащищенности. Предъявляемые дополнительные требования требуют от разработчиков использования нетрадиционных решений, наиболее популярными из которых на данном этапе является применение шумоподобных сигналов и программной (псевдослучайной) перестройки рабочей частоты. Оба решения приводят к расширению спектра сигнала и снижению мощности передатчика, усложняя при этом конструкцию приемо-передающего устройства.

Применение и дальнейшее развитие подобных радиосредств требует изучения принципов их построения и характеристик сигналов, однако то, что данные средства работают в высоком диапазоне частот (от 3 до 300 МГц) требует применения сложных и дорогих устройств. Одним из вариантов решения данной проблемы предлагается использование для оценки параметров данных радиосредств применение компьютерной измерительной системы. Обобщенная структурная схема измерительной системы приведена на рисунке 1.

Исследуемый аналоговый сигнал подается на согласующее устройство (СУ), которое согласует нагрузку для нормальной работы радиосредства и приводит уровень поступающего сигнала к нужному значению. Затем сигнал поступает на один из входов балансного смесителя, а на другой вход поступает сигнал с перестраиваемого гетеродина. Балансный смеситель под воздействием сигнала гетеродина переносит исследуемый сигнал в полосу частот от 10 кГц до 1 МГц. С выхода смесителя сигнал поступает на полосовой фильтр, который выделяет необходимые спектральные составляющие. Для последующей обработки сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), реализованный на плате NI PCI-6251.

Частота выборки определяется полосовым фильтром и может изменяться оператором в пределах от 10 кГц до 1 МГц. Информация о значении коэффициента передачи и частота выборки определяется программным методом через вычислительное устройство, собранное на базе любой электронно-вычислительной машины (ЭВМ) и учитываются при формировании конечного результата.

Фактически ядром представленной КИС является программа, которая и позволяет в конечном итоге реализовать измерение практически любых параметров сигнала, поступающего на ее вход.

Управление полосовым фильтром и перестройкой гетеродина осуществляется соответствующим контроллером ЭВМ через стандартный интерфейс RS-232C.

Плата ввода-вывода NI PCI-6251 относится к М-серии высокоскоростных многофункциональных устройств сбора данных (DAQ). Она имеет 16 аналоговых входов, 2 аналоговых выхода, 24 цифровых ввода-вывода. Максимальная частота дискретизации на вход 1,25 МГц, на выход – 2,86 МГц. В состав изделия включен программный драйвер NI-DAQmx и программное обеспечение интерактивной регистрации данных NI Lab VIEW Signal Express LE.

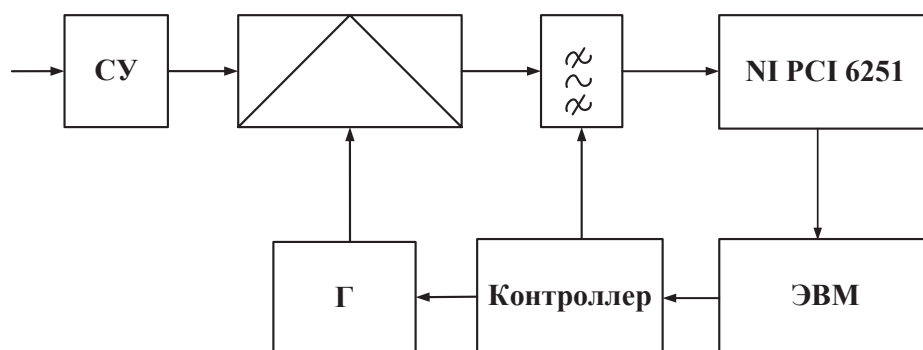


Рисунок 1. – Обобщенная структурная схема измерительной системы

Применение мощнейшей среды разработки LabVIEW позволяет реализовать графический подход к программированию. Эта визуализация упрощает интеграцию измерительного оборудования, изображение сложных алгоритмов на диаграмме, разработку алгоритмов анализа данных и специализированных интерфейсов пользователя. Вместе с тем работа в данной среде не вызывает серьезных сложностей, среда имеет поддержку программных продуктов, интерактивную функцию справки, обширный набор готовых программных решений.

Таким образом, применяя вышеописанную систему, мы имеем возможность на одной платформе построить не просто один прибор для измерения, например, девиации рабочей частоты радиостанции, а целый набор приборов, которые могут не только измерять параметры, но и моделировать встречную работу радиостанции (имитировать радиолинию).

Основным достоинством структурной схемы является перенос спектра сигнала из области частот в более низкие, до 500 кГц. Этот процесс, с помощью ПК предлагается автоматизировать. Устанавливая рабочую частоту средства связи и генератора сигнала можно добиться нужной нам частоты на выходе смесителя, тем самым позволив анализатору спектра (или другому измерительному прибору) измерять параметры в рабочем диапазоне частот.

Применение подобных систем позволит организовывать изучение принципов формирования радиосигналов современных радиосредств, не тратя огромные средства на приобретение дорогостоящих приборов и комплексов. Наиболее дорогим устройством в описанной измерительной системе является плата ввода-вывода NI PCI-6251, стоимость которой сопоставима со стоимостью персонального компьютера начального уровня.

Автором статьи проводится работа по применению и внедрению подобных измерительных систем в обучающий процесс, разработке методик проведения измерений, разработке программных приложений для расширений возможностей по измерению параметров радиостанций, таких как количество скачков в радиостанциях с программной перестройкой рабочей частоты, чувствительность приемников радиосредств, зависимость скорости передачи данных от помеховой обстановки, зависимости мощности передатчика от частоты и других.

Разработанная измерительная система позволяет проводить измерения параметров средств связи в автоматизированном режиме. Измерительная система может найти свое применение как в учебном процессе, так и в организациях, измеряющих

параметры средств связи, где также возможна реализация значительно большего количества виртуальных приборов, разработанных с применением описанных технологий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Евдокимов, Ю. К., Линдваль, В. Р., Щербаков, Г. И. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 402 с.
2. Борицько, С. И., Дементьев, Н. В., Тихонов, Б. Н., Ходжаев, И. А. Метрология и электро-радиоизмерения в телекоммуникационных системах. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007 г. – 376 с.

GOROVENKO S. A.

Educational Establishment «Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics»

MEASURING SYSTEM FOR MONITORING PARAMETERS OF THE COMMUNICATION DEVICES

Summary. *The article deals with a computer measurement system for evaluating the parameters of low-power radio stations. The system is based on the principle of transferring the spectrum of the original signal to the lower frequency range than the requirements for analog-to-digital conversion devices are reduced.*

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МУЛЬТИДЕТЕКТОРНЫХ СИСТЕМ
РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЙ И ЧАСТИЦ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ**

Аннотация. Представлены результаты разработки и использования комплекса средств тестирования (КСТ) для контроля параметров бортового спектрометра потоков заряженных частиц (электронов, протонов, ядер гелия). КСТ позволяет сократить затраты на проведение наземных испытаний и калибровок многоканальной сцинтилляционной детекторной системы спектрометра, повышает качество и эффективность выполнения этих процедур, что крайне важно с точки зрения обеспечения безотказной работы научной аппаратуры, устанавливаемой на борту космических аппаратов. Приведены результаты применения КСТ для изучения свойств сцинтилляционного детектирующего модуля гамма-телескопа ГАММА-400. Показана необходимость разработки специализированного роботизированного программно-аппаратного комплекса для исследования откликов детектирующих модулей гамма-телескопа на воздействие световых и радиационных излучений эталонных источников, потоков наземных мюонов космического происхождения и излучений ускорителей частиц. Обсуждается архитектура построения такого комплекса.

Введение. Гамма-телескопы и спектрометры излучений и частиц высоких энергий, размещаемые на космических аппаратах; комплексы позитронно-эмиссионной томографии, используемые в медицине; промышленные томографы; порталы мониторов досмотрового контроля потоков людей, транспорта и грузов; ультранизкофоновая аппаратура для подземных, подводных и наземных наблюдений излучений; мюонные телескопы; комплексы для мониторинга ядерных материалов и реакторов АЭС являются сложными программно-аппаратными мультidetекторными системами, в состав которых входят детектирующие модули, многоканальные аналоговые и цифровые электронные устройства, высокопроизводительные системы сбора и обработки информации. Контроль параметров таких систем, их настройка и калибровка требуют разработки и применения специализированных программно-аппаратных средств тестирования.

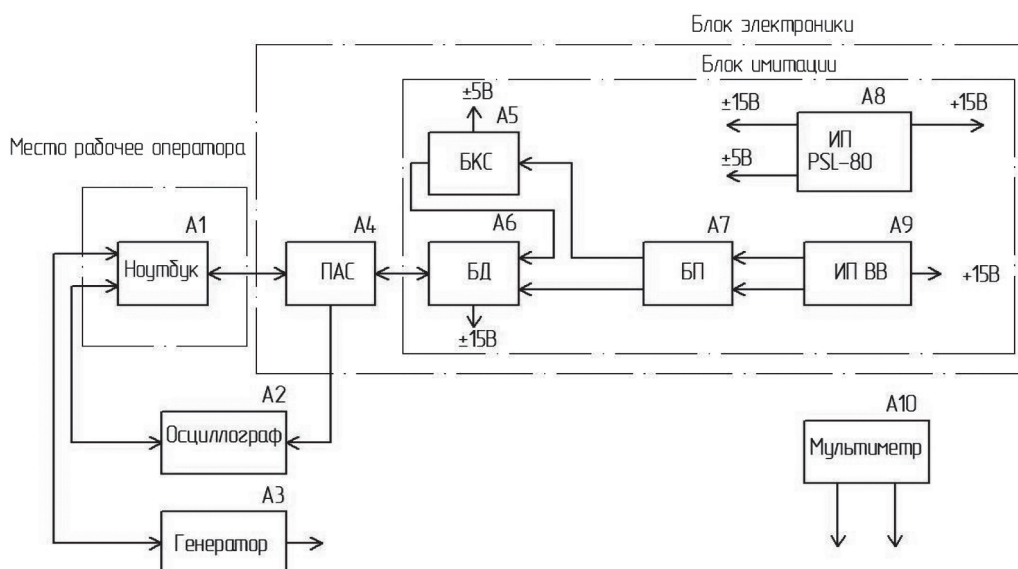
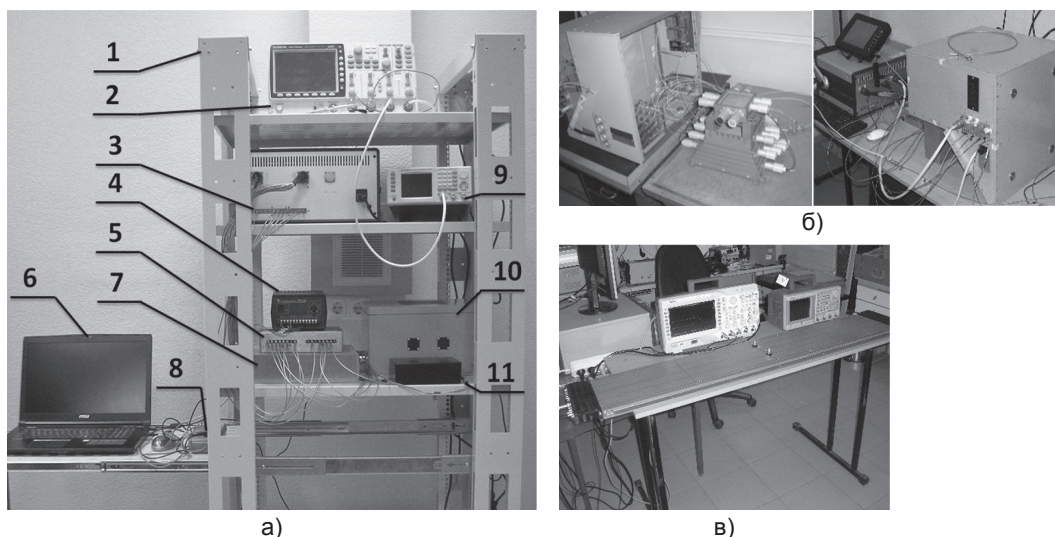


Рисунок 1. – Структурная схема комплекса средств тестирования КСТ:

- А1 – Ноутбук, А2 – Осциллограф, А3 – Генератор,
А4 – Блок программно-аппаратных средств ПАС, А5 – Блок каналов связи БКС,
А6 – Блок дискриминаторов БД, А7 – Блок преобразователей БП,
А8 – Источник питания высоковольтный ИП ВВ,
А9 – Источник питания низковольтный, А10 – Мультиметр



1 – приборная стойка, 2 – осциллограф, 3 – блок программно-аппаратных средств ПАС, 4 – источник питания низковольтный, 5 – блок дискриминаторов БД, 6 – ноутбук, 7 – блок каналов связи БКС, 8 – мультиметр, 9 – генератор, 10 – блок преобразователей БП, 11 – источник питания высоковольтный ИП ВВ

Рисунок 2. – Комплекс средств тестирования КСТ (а) и объекты контроля: многослойный сцинтилляционный детектор (МСД) бортового спектрометра заряженных частиц (б) и сцинтилляционный детектирующий модуль гамма-телескопа (в) НИЯУ МИФИ

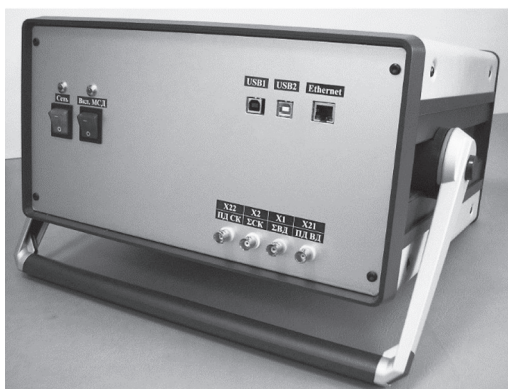
1. Комплекс средств тестирования.

Специалистами ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» совместно с НИЯУ МИФИ был разработан, изготовлен, испытан и опробован в эксплуатации комплекс средств тестирования (КСТ) [1–2], позволяющий автоматизировать процессы проведения контроля и диагностики блоков прототипа сцинтилляционного спектрометра заряженных частиц НИЯУ МИФИ. Структурная схема КСТ представлена на рисунке 1, внешний вид – на рисунке 2, а, характеристики – в таблице 1.

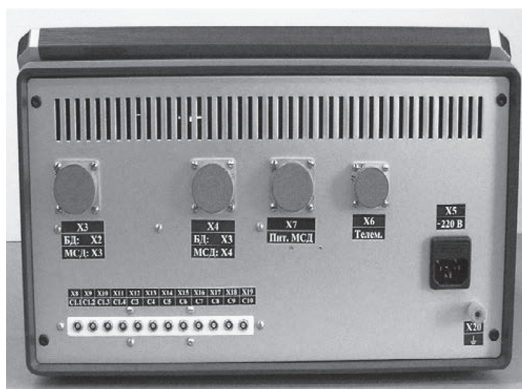
Таблица 1. – Основные технические характеристики комплекса средств тестирования

Параметр	Значение
Количество входных каналов	44
Количество контролируемых параметров	17
Количество команд управления	15
Представление выходных данных осуществляется в виде таблиц и графиков на экране монитора и распечатках, а также в виде файлов для экспорта в широко используемые приложения.	

Основным устройством КСТ является блок программно-аппаратных средств (ПАС) (рисунок 3), предназначенный для приема и обработки информации, поступающей по аналоговым и цифровым каналам от блока имитации и многослойного сцинтилляционного детектора (МСД) бортового спектрометра, и передачи информации на компьютер для последующей обработки, визуализации и протоколирования. На передней панели блока ПАС расположены разъемы интерфейсов «USB 1», «USB 2», «Ethernet», разъемы выходных аналоговых сигналов сумматоров верхнего детектора «ΣВД» и сцинтилляционного калориметра «ΣСК», разъемы выходных сигналов пиковых детекторов этих сумматоров «ПД ВД», «ПД СК», а также тумблеры и индикаторы общего питания – «СЕТЬ» и питания МСД – «Вкл. МСД». На задней панели блока ПАС расположены разъемы для аналоговых X8...X19 и цифровых X3, X4 входных сигналов от блока дискриминаторов, разъем телеметрической информации, получаемой от МСД X6, разъем питания МСД X7, а также разъем питания 220 В X5 и клемма заземления X20.



а)



б)

Рисунок 3. – Блок программно-аппаратных средств ПАС:

а) вид передней панели блока ПАС, б) вид задней панели блока ПАС

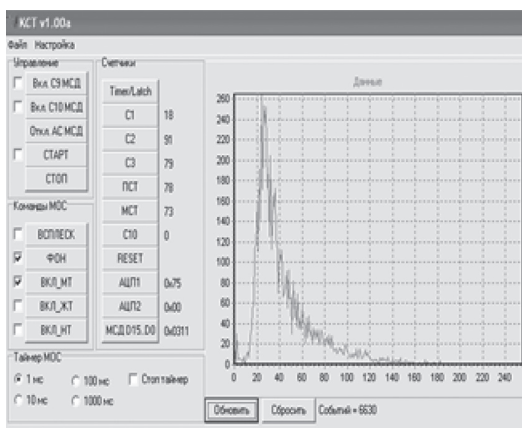
Управление режимами работы ПАС, контроль передаваемой научной и служебной информации, прием, обработка и отображение научной информации в форме таблиц и графиков, а также формирование протоколов испытаний многослойного сцинтилляционного детектора осуществляется с помощью компьютера и специализированного программного обеспечения.

2. Применение комплекса средств тестирования.

С использованием КСТ был проведен контроль многослойного сцинтилляционного детектора МСД (рисунок 2, б, рисунок 4, а), входящего в состав бортового спектрометра заряженных частиц НИЯУ МИФИ. Была выполнена проверка параметров сигналов, генерируемых МСД, исследованы амплитудно-частотные характеристики измерительных каналов, найдены амплитудные спектры потоков мюонов, их статистические характеристики, скорости регистрации событий и эффективности отдельных детекторов (рисунок 4, б). Проведенные испытания блоков спектрометра показали высокую эффективность применения КСТ. Достигнуто существенное уменьшение трудоемкости и повышение качества выполнения процедур контроля основных параметров испытываемой аппаратуры.



а)



б)

Рисунок 4. – а) проведение испытаний блоков бортового спектрометра с использованием КСТ, б) главное окно программы для задания режимов работы КСТ и отображения состояния счетчиков и амплитудных спектров при регистрации мюонов

Дополнительно сверх программы испытаний было проведено опробывание КСТ при исследовании характеристик протяженных детектирующих модулей с габаритными размерами 1000×100×10 мм (рисунок 2, в) гамма-телескопа «ГАММА-400»,

которое показало на необходимость разработки специализированных роботизированных программно-аппаратных комплексов для проведения контроля блоков гамма-телескопа. Сложность детектирующих систем гамма-телескопа «ГАММА-400» [3–4] заключается в том, что в их состав входит, в общей сложности, более 5000 кремниевых фотоумножителей (SiPM), более 300 счетчиков на основе быстрых органических сцинтилляторов, а также более 1000 кристаллов неорганического сцинтиллятора CsI(Tl).

3. Вариант исполнения роботизированного программно-аппаратного комплекса.

В работе [5] была предложена архитектура построения роботизированного программно-аппаратного комплекса (РПАК) для исследований временных, пространственных и спектральных характеристик протяженных детектирующих модулей (ДМ) гамма-телескопа. На рисунке 5 приведена разработанная нами компьютерная модель одного из вариантов исполнения РПАК. В состав РПАК предлагается включить следующие блоки: систему сбора и обработки информации; роботизированную 6-ти степенную систему координатного позиционирования; эталонные импульсные источники оптического излучения – лазерный (LAS-источник) и светодиодный (LED-источник); держатель источника радиационного излучения; триггерные детекторы; детектирующий модуль гамма-телескопа; видеорегистратор процессов исследований; устройства измерения и питания; рабочее место оператора.

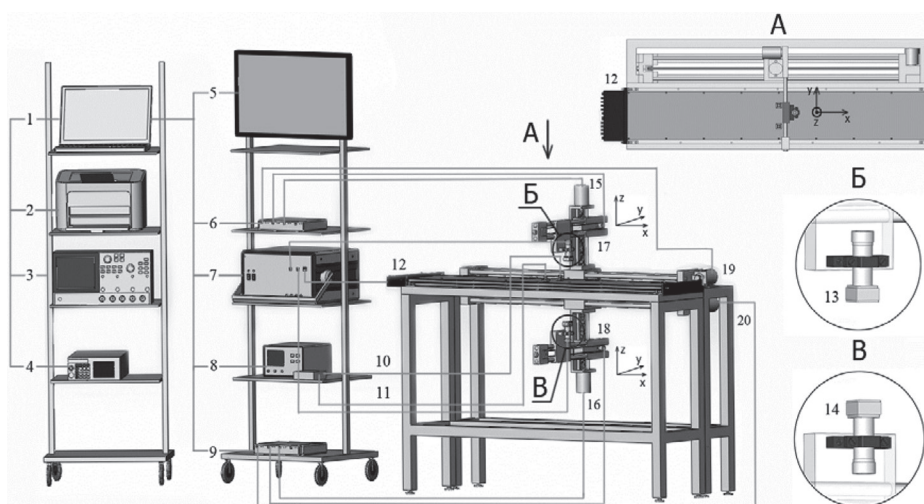


Рисунок 5. – Компьютерная модель роботизированного программно-аппаратного комплекса для тестирования и исследований характеристик протяженных сцинтилляционных детектирующих модулей гамма-телескопа «ГАММА-400»

- 1 – ноутбук, 2 – принтер, 3 – осциллограф, 4 – генератор, 5 – экран,
6, 9 – блок управления и питания шаговых двигателей, 7 – система приема
и обработки информации детектирующего модуля и триггерных детекторов,
8 – источник лазерного излучения, 10, 11 – оптоволоконный кабель,
12 – сцинтилляционный детектирующий модуль гамма-телескопа,
13 – верхний триггерный детектор или держатель источника радиоактивного излучения,
14 – нижний триггерный детекторный модуль, 15, 16, 17, 18, 19, 20 – элементы
6-ти степенной системы позиционирования и перемещения по осям X, Y, Z

РПАК должен обеспечивать:

- регистрацию и обработку сигналов, поступающих с ДМ гамма-телескопа и эталонных приемников излучений, при воздействии мюонов космического происхождения, импульсного оптического излучения (лазерного и светодиодного) и излучений эталонных радиоактивных источников;
- автоматическое перемещение и позиционирование с помощью манипуляторов эталонных приемников и источников излучений;
- оценку влияний факторов различной физической природы на выходные характеристики ДМ;

- нахождение временных зависимостей и их спектров;
- отображение темпов счета и времени накопления событий;
- хранение результатов в базе данных;
- отображение результатов контроля на экране монитора и бумажных носителях в наглядном виде в форме таблиц, графиков и протоколов испытаний.

При выполнении работ использовались результаты, полученные ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» в ходе реализации заданий программы Союзного государства «Мониторинг-СГ».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Батищев, А. Г. Аппаратно-программные средства для наземной отработки бортовых спектрометров заряженных частиц / А. Г. Батищев, А. М. Гальпер, С. А. Гришин, С. В. Колдашов, П. Ю. Наумов, Н. С. Недвецкий // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014, том 5. – № 3. – С. 247–256.
2. Гришин, С. А. Создание и применение комплекса средств тестирования для наземных испытаний блоков бортового сцинтилляционного спектрометра / С. А. Гришин, В. А. Селянтьев, Н. С. Недвецкий, М. Н. Волкович, С. В. Колдашов, С. Ю. Александрин, А. Г. Батищев, А. М. Гальпер // Материалы 7-го Белорусского космического конгресса 24–26 октября 2017 г., г. Минск. – С. 146–149.
3. Гальпер, А. М. и др. Характеристики гамма-телескопа GAMMA-400 для поиска следов темной материи. Известия РАН. Серия физическая. – 2013, том 77. – № 11. – С. 1605–1608.
4. Topchiev, N. P. et al. New stage in high-energy gamma-ray studies with GAMMA-400 after Fermi-LAT // EPJ Web of Conferences 145, 06001 (2017), P. 1-5, doi:10.1051/epjconf/201714506001.
5. Архангельский, А. И. Архитектура роботизированного программно-аппаратного комплекса для изучения свойств детектирующих модулей гамма-телескопа / А. И. Архангельский, С. А. Гришин, Н. П. Топчиев // Материалы 5 Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» 14–16 ноября, Беларусь, Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2018, Ч. 2. – С. 270–275.

GRISHIN S. A., VARENOV Y. I., NEDVETSKY N. S., KLIMENTOVSKI V. V.
State Scientific and Production Association «Optics, optoelectronics
and laser technology», Minsk

SOFTWARE-HARDWARE AND ROBOTIC MEANS FOR INVESTIGATION OF PROPERTIES OF MULTIDETECTOR SYSTEMS FOR HIGH ENERGY RADIATION AND PARTICLES REGISTRATION

Summary. The results of development and utilization of complex of test equipment (CSE) for monitoring the parameters of an onboard spectrometer of charged particle (electrons, protons, helium nuclei) fluxes are presented. The results of CSE application for investigation of scintillation detection module of gamma telescope GAMMA-400 properties are presented. The necessity for development is shown and the architecture of a robotic software-hardware complex for examination of responses of gamma telescope detection modules to the exposure to radiation from reference sources is considered.

С. А. ГРИШИН¹, В. В. КЛИМЕНТОВСКИЙ¹, Д. А. ЯГОДНИКОВ²

¹ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Беларусь

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ АППАРАТУРЫ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. Представлены результаты проведения экспериментальной отработки элементов систем аварийной защиты реактивных двигателей с использованием автоматизированной мультисенсорной аппаратуры регистрации и обработки информации. На основании анализа полученных данных сделан вывод о возможности использования регистрации спектров оптического излучения факела, флуктуаций магнитных и электрических полей вблизи корпуса двигателя для получения дополнительной информации о процессах в газозовом тракте при разработке быстродействующих систем аварийной защиты и систем мониторинга режимов работы и технического состояния ЖРД.

Безотказная работа реактивных силовых агрегатов с оптимальными режимами является важнейшим условием для безопасной и эффективной эксплуатации или применения различных технических средств гражданского и специального назначения. Реактивные двигатели представляют собой сложные многофакторные системы, требующие для точного определения и контроля их технического состояния проведения непрерывного мониторинга большого количества разнородных параметров. Традиционно применяемые для этих целей средства не охватывают весь спектр таких параметров, не всегда способны обеспечить необходимые быстродействие и достоверность, поэтому актуальной задачей оказывается поиск и исследование инновационных возможностей, основанных, например, на оптических, электромагнитных, вибрационно-акустических способах получения диагностической информации. Высокоскоростные и, предпочтительно, бесконтактные средства диагностики особенно востребованы для разработки быстродействующих систем аварийной защиты реактивных двигателей, позволяющих, при необходимости, своевременно заглушить работающий двигатель или изменить режим его работы, не допуская развития аварийной ситуации. В ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» в рамках задания программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» создана мультисенсорная автоматизированная система для сбора и обработки измерительной информации [1], которая позволяет регистрировать характеристики различных физических полей, возникающих при работе сложных технических объектов. Эта система использовалась при проведении огневых испытаний различных типов модельных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на испытательном стенде в филиале МГТУ им. Н. Э. Баумана (рисунок 1а). При этом проводилась регистрация спектров оптического излучения факела в диапазоне длин волн от 300 до 1000 нм, электрических и магнитных полей вблизи корпуса двигателя в диапазоне частот от 20 Гц до 50 кГц, вибраций в диапазоне частот от 0,5 Гц до 12 кГц, акустического шума в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц, температурных полей на внешней поверхности корпуса двигателя в диапазоне от 0 до 1000°С. Полученная информация сопоставлялась с данными штатных измерительных средств испытательного стенда. Для моделирования процессов эрозии и разрушения элементов конструкции двигателя использовалась система подачи порошкообразного металла (ПМ) в камеру сгорания и расширяющуюся часть сопла, показанная на рисунке 1б, а также разгорающиеся вкладыши критического сечения сопла. Конструкция специального кольца, предназначенного для ввода ПМ в камеру сгорания и расширяющуюся часть сопла и вид навески ПМ из алюминиевого сплава показаны на рисунках 2а и 2б. Также был опробован вариант размещения кольца для ввода ПМ за срезом сопла двигателя, как показано на рисунке 2в.

На рисунке 3а показано расположение при проведении огневых испытаний датчиков электрических и магнитных полей вблизи корпуса ЖРД, а на рисунке 3б приведен пример осциллограммы сигнала, полученного с индукционного датчика магнитных полей и совмещенного с профилями давления в камере сгорания модельного ЖРД

и расхода топлива. Испытания показали, что осциллограмма сигнала с индукционно-го датчика позволяет идентифицировать основные фазы работы двигателя, а амплитуда данного сигнала имеет устойчивую корреляцию с величиной давления в камере сгорания ЖРД.

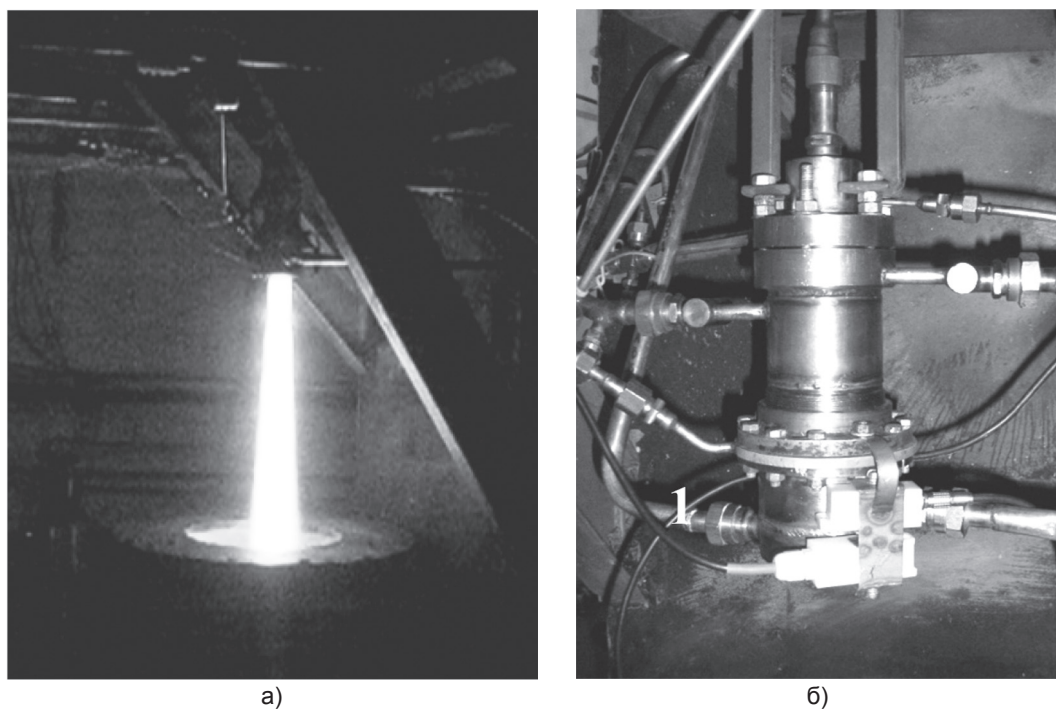


Рисунок 1. – а) процесс проведения огневых испытаний ЖРД на испытательном стенде;
б) ЖРД, оснащенный системой 1 подачи порошкообразного металла

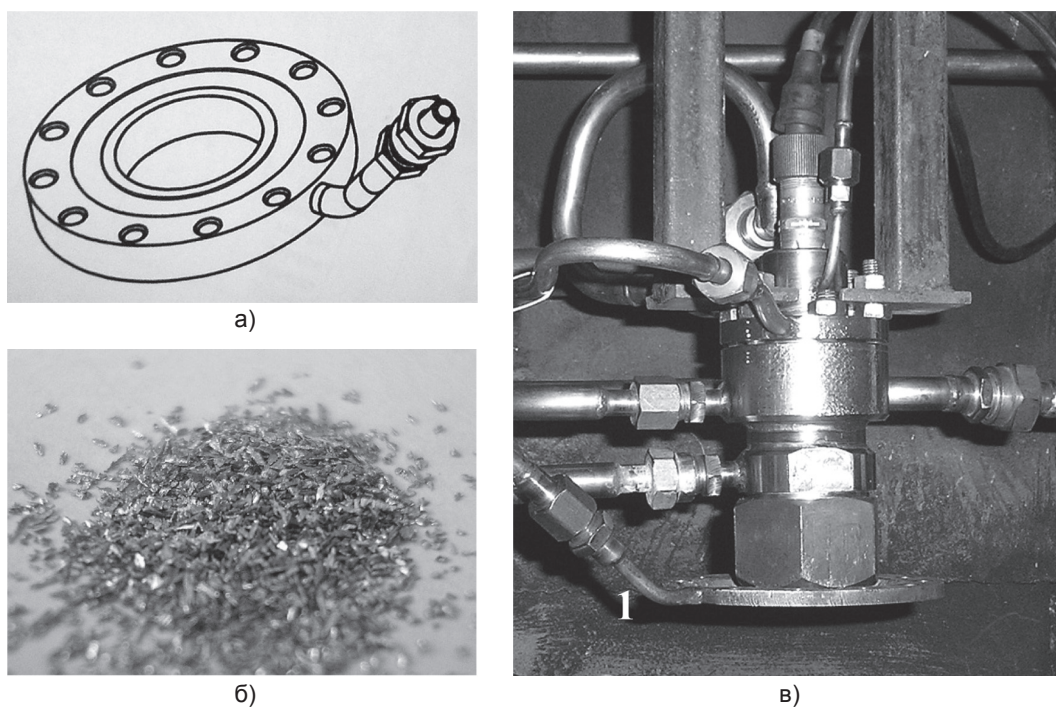


Рисунок 2. – а) кольцо, предназначенное для ввода порошкообразного металла;
б) навеска порошкообразного металла; в) вариант размещения кольца 1
для ввода порошкообразного металла за срезом сопла двигателя

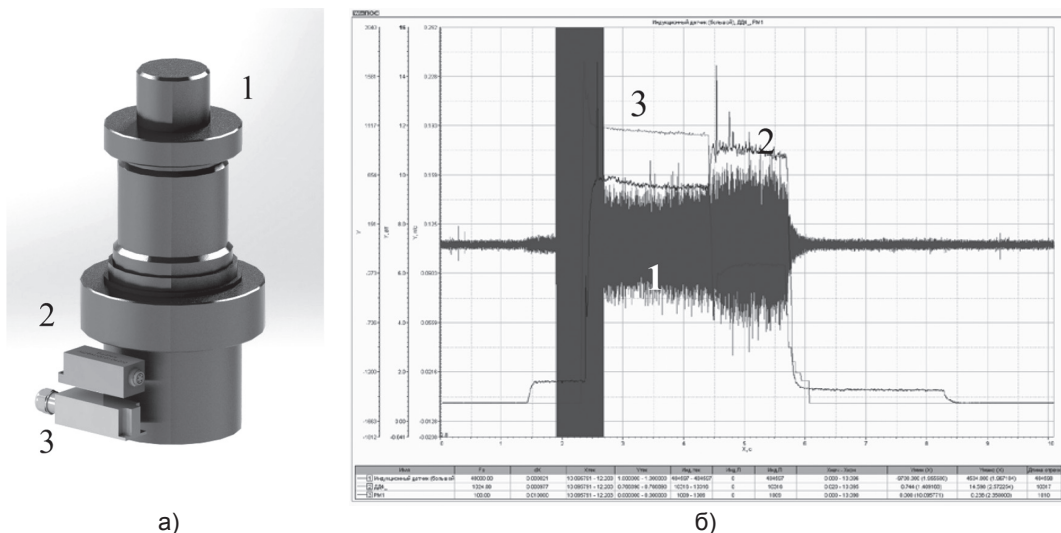


Рисунок 3. – а) схема расположения датчиков электрических и магнитных полей вблизи корпуса ЖРД; 1 – ЖРД; 2 – датчик электрических полей; 3 – датчик магнитных полей; б) пример осциллограммы сигнала полученного с датчика магнитных полей и совмещенного с профилями давления в камере сгорания модельного ЖРД и расхода топлива: 1– сигнал датчика магнитных полей; 2 – давление в камере сгорания; 3 – расход топлива

При регистрации спектров оптического излучения факела объектив спектрометра располагался на расстоянии около 3 м от ЖРД и был соединен со спектрометром при помощи оптоволоконной линии. На рисунке 4 приведены примеры спектров оптического излучения факела двигателя в начале процесса горения и в установившемся режиме.

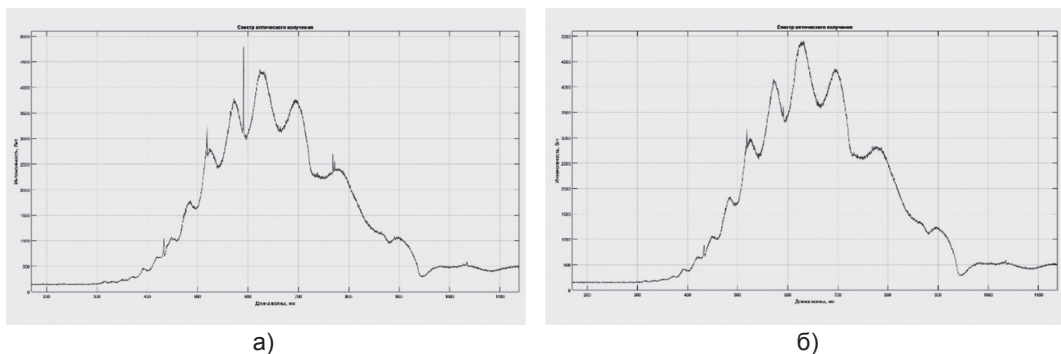
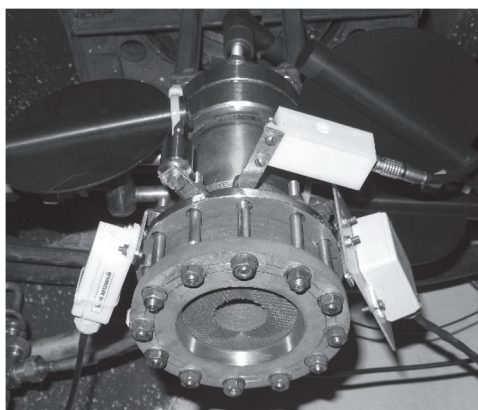


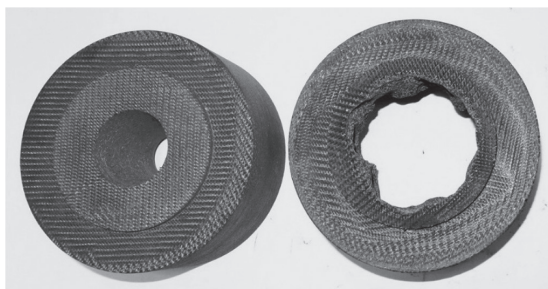
Рисунок 4. – Спектры оптического излучения факела модельного ЖРД в начале процесса горения (а) и в установившемся режиме (б)

В начале процесса горения в спектре присутствуют линии свечения, которые позднее значительно ослабевают. Это может быть связано с тем, что перед началом испытаний в проточной части двигателя находились определенные загрязнения или частицы конструкционных материалов деталей ЖРД, которые в начальный момент проведения огневого испытания выносились из проточной части и обуславливали оптическое излучение факела на соответствующих линиях спектра, а в установившемся режиме работы вынос материалов из проточной части двигателя уменьшался и это отражалось на характере спектра.

В ходе некоторых из проведенных огневых испытаний для моделирования процессов эрозии и разрушения элементов конструкции двигателя использовались разгорающиеся вкладыши критического сечения сопла (рисунок 5).



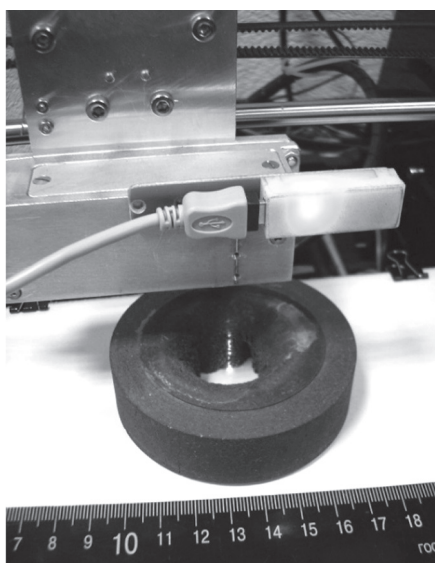
а)



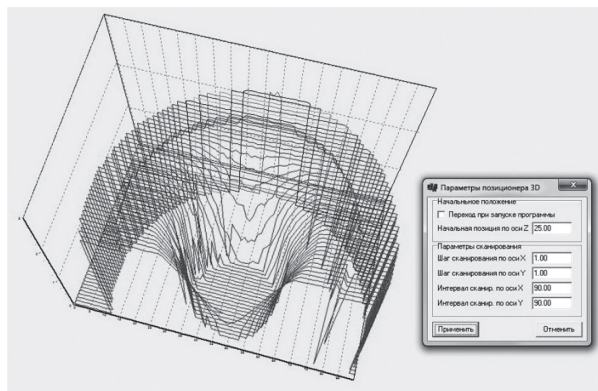
б)

Рисунок 5. – а) модельный ЖРД с установленным разгорающимся вкладышем критического сечения сопла; б) разгорающиеся вкладыши критического сечения сопла до и после проведения огневых испытаний ЖРД

После проведения огневых испытаний необходимо оценивать степень и характер разрушений разгорающихся вкладышей, величину и профиль их эрозии. Очевидно, что вручную это делать затруднительно, поэтому была разработана автоматизированная система бесконтактного сканирования для определения геометрических параметров объектов и с ее помощью были исследованы образцы разгорающихся вкладышей критического сечения сопла до и после проведения огневых испытаний модельных ЖРД, как показано на рисунке 6.



а)



б)

Рисунок 6. – а) процесс сканирования разгорающегося вкладыша критического сечения сопла; б) скриншот рабочего окна программы при определении геометрических параметров разгорающегося вкладыша критического сечения сопла

Полученная в результате лазерного сканирования 3-D модель разгорающегося вкладыша может быть использована для исследования степени и характера разрушений, произошедших при проведении огневого испытания и занесена в базу данных.

При регистрации спектров оптического излучения факела модельных ЖРД в ходе проведения стендовых огневых испытаний было выявлено, что при вводе порошкообразного металла в камеру сгорания и расширяющуюся часть сопла, при прогаре стенок разгорающегося вкладыша критического сечения сопла, а также при выносе

загрязнений из проточной части двигателя в момент начала процесса горения в спектре оптического излучения факела появляются или усиливаются линии излучения, характерные для соответствующих материалов. При подаче порошкообразного металла в камеру сгорания наблюдается повышение амплитуды сигнала индукционного датчика магнитного поля в 1,5–2 раза. В момент начала прогара стенок сопла амплитуда сигнала индукционного датчика возрастает в 3–4 раза. Осциллограммы сигналов с датчиков магнитных и электрических полей, расположенных вблизи корпуса двигателя, позволяют идентифицировать основные фазы его работы, а амплитуды данных сигналов имеют устойчивую корреляцию с величиной давления в камере сгорания ЖРД. В отличие от традиционно применяемых при отработке реактивных двигателей датчиков для измерения тепловых, вибрационных параметров, давления, регистрация спектров оптического излучения факела ЖРД, магнитных и электрических полей вблизи корпуса двигателя могут обеспечить гораздо меньшее время реакции на изменения режимов работы силового агрегата или возникновение нештатной ситуации. Датчики и узлы каналов регистрации спектров оптического излучения факела, магнитных и электрических полей могут располагаться на некотором удалении от ЖРД и не подвергаться воздействию экстремальных тепловых и механических нагрузок, при установке датчиков никакого вмешательства в конструкцию двигателя не потребуется. Поэтому регистрация спектров оптического излучения факела, флуктуаций магнитных и электрических полей вблизи корпуса двигателя может стать средством для получения дополнительной информации о процессах в газовом тракте ЖРД и использоваться при разработке быстродействующих систем аварийной защиты и систем мониторинга режимов работы и технического состояния ракетных двигателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Гришин, С. А. Применение автоматизированных средств регистрации и обработки информативных параметров при испытаниях силовых и энергетических установок / С. А. Гришин, В. В. Климентовский // 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 20–22 мая 2017 г.) : сборник научных статей. В 3 ч. Ч. 1 / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск : Четыре четверти, 2017. – 404 с., С. 140–145.

GRISHIN S. A., KLIMENTOVSKI V. V., YAGODNIKOV D. A.
SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Belarus;
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF JET ENGINE EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS ELEMENTS USING AUTOMATED MULTISENSORY INFORMATION REGISTRATION AND PROCESSING EQUIPMENT

Summary. *The results of experimental development of jet engine emergency protection systems elements using automated multisensory information registration and processing equipment are presented. On the basis of received data analysis a conclusion is drawn about feasibility of utilization of registration of plume optical emission spectra, magnetic and electric field fluctuations in proximity of engine body, for acquisition of additional information about processes in engine gas path during development of high-speed emergency protection systems and operating modes and technical condition monitoring systems for liquid-propellant rocket engines.*

С. А. ГРИШИН¹, Н. С. НЕДВЕЦКИЙ¹, В. В. КЛИМЕНТОВСКИЙ¹, О. О. КУЗНЕЧИК²

¹ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,

² ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа»

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ 3D-ПРИНТЕРЕ

Аннотация. Представлены результаты использования разработанной системы бесконтактного лазерного сканирования в исследовании металлических поверхностей изделий, полученных с использованием металлургического 3D-принтера. На основе анализа полученных результатов сделаны выводы о том, что разработанная система может использоваться в составе автоматизированных рабочих мест контролеров отдела технического контроля, а также в аддитивном производстве при отработке режимов 3D-печати на металлургическом 3D-принтере.

Введение. Оптико-электронные системы бесконтактного лазерного сканирования поверхностей достаточно широко используются в составе как автоматизированных рабочих мест технического и технологического контроля, так и контрольно-измерительного оборудования автоматизированного управления поточными линиями предприятий машиностроения. Благодаря возможности осуществления сканирования на удалении, без использования непосредственного контакта с исследуемым объектом, такие системы также начинают активно внедряться и в использующее металлургические 3D-принтеры аддитивное производство, которое в последние два десятилетия развивается бурными темпами [1, 2]. Способствовать этому может использование оптико-электронной системы бесконтактного лазерного сканирования при исследовании металлических поверхностей, полученных на металлургическом 3D-принтере изделий. Проведение этих исследований и является целью данной работы.

1. Методика исследований, используемое оборудование и программное обеспечение. При проведении исследований использована разработанная в лаборатории интеллектуальных электронных систем ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» система бесконтактного лазерного сканирования, входящая в состав разрабатываемой мультисенсорной системы мониторинга технологических процессов и качества изделий при аддитивном производстве [3–7]. Особенностью системы мониторинга является то, что благодаря имеющемуся программируемому интерфейсу в ее состав, при необходимости, кроме микропроцессорных устройств регистрации видеоизображений и системы лазерного сканирования геометрических параметров изделий, дополнительно можно включать регистраторы оптического, электромагнитного и акустического излучений, измерители вибраций, электрических параметров (токов и напряжений), расходов, давлений, механических напряжений и усилий, а также микропроцессорные газовые анализаторы и измерители газовых потоков. Разрабатываемое оригинальное программное обеспечение позволит использовать лазерный оптико-электронный модуль, входящий в систему сканирования, не только для контроля размеров и геометрии поверхности исследуемых объектов, но и как средство контроля положения и перемещения рабочих органов исполнительных механизмов технологических установок. Благодаря возможности интегрирования программного обеспечения в операционные системы семейства Windows возможна синхронизированная работа перечисленных устройств под управлением персонального компьютера. Внешний вид использованной при проведении исследований системы бесконтактного лазерного сканирования представлен на рис. 1, а ее характеристики – в таблице 1.

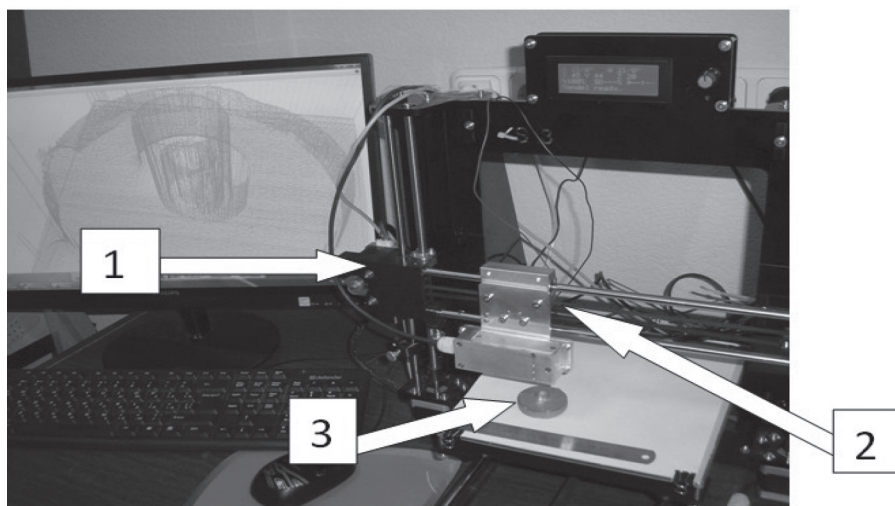


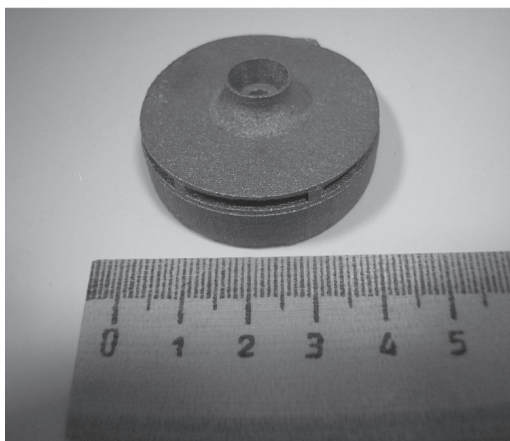
Рисунок 1. – Система бесконтактного лазерного сканирования металлической поверхности: 1 – система линейного X, Y, Z позиционирования (перемещения); 2 – лазерный оптико-электронный измерительный модуль; 3 – исследуемый объект

Таблица 1. – Основные характеристики системы бесконтактного лазерного сканирования

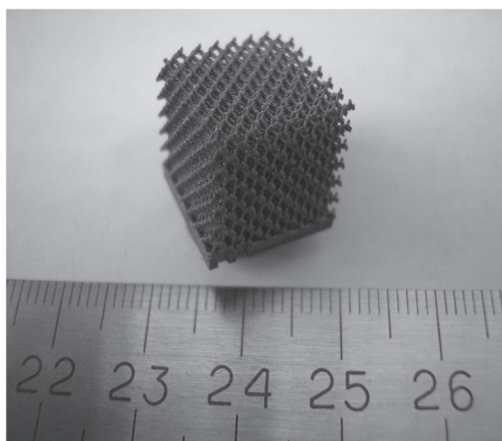
Характеристика	Величина
Размеры исследуемых объектов	150×150×10 мм
Дискретность перемещения по осям X, Y, Z	100 мкм и более
Диапазон измерения координаты Z оптико-электронным модулем	10 мм
Разрешение при измерении Z координаты	10 мкм
Канал обмена информацией и командами с компьютером	USB
Представление выходных данных осуществляется в виде таблиц, графиков и 3D-изображений на экране монитора и распечатках, а также в виде файлов для экспорта в широко используемые графические среды.	

В состав системы сканирования входили следующие устройства: компьютер с устройствами визуализации, система трехстепенного линейного позиционирования (система X, Y, Z-перемещения) с микроконтроллерной системой управления, лазерный оптико-электронный измерительный модуль расстояния, блок сбора и обработки информации, поступающей с оптико-электронного модуля. Блок сбора и обработки информации был реализован на основе микроконтроллера STM32F103C8T6 со встроенным 12-разрядным 1 мкс аналого-цифровым преобразователем и специально разработанного программного обеспечения для формирования и передачи на компьютер кодированных значений Z-координат поверхности исследуемого объекта контроля по USB-каналу со скоростью 10^3 значений в секунду. Управление системой позиционирования и считывание координат X, Y, Z перемещения оптико-электронного модуля осуществлялось с помощью команд G-кода, передаваемых по последовательному каналу RS232. Используемое при проведении исследований программное обеспечение включало в себя программные модули, написанные на языке C#, которые позволяли проводить автоматизированную калибровку и тестирование системы бесконтактного сканирования, а также выполнять измерения геометрических параметров сканируемых поверхностей исследуемых объектов с точностью до 10 мкм с выводом на экран компьютера сгенерированных из массивов измерительных данных графических 3D-изображений рельефов поверхностей.

2. Объекты исследования. Объектами исследования являлись малогабаритные изделия (рис. 2), полученные из порошка титанового сплава со сферической формой частиц фракции ≤ 45 мкм с помощью металлургического 3D-принтера (рис. 3), характеристики которого приведены в таблице 2.



а)



б)

Рисунок 2. – Внешний вид объектов исследований, изготовленных с использованием металлургического 3D принтера ProX DMP 300

Таблица 2. – Основные характеристики металлургического 3D-принтера

Показатели	Значения
Тип источника лазерного излучения	волоконный, одномодовый
Мощность лазерного излучения	до 500 Вт
Частота модуляции	50 кГц
Длина волны лазерного излучения	1070 нм
Точность сплавляемого порошкового слоя	x=20 мкм; y=20 мкм; z=20 мкм
Размер зоны 3D-печати	250×250×300 мм

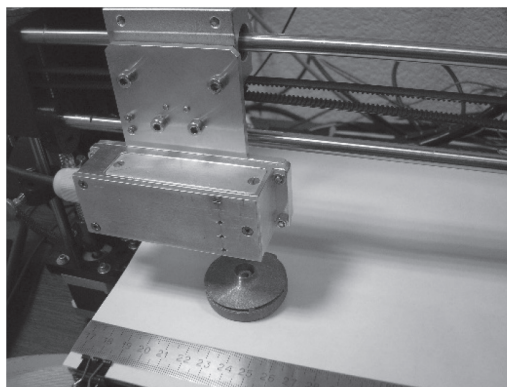


Рисунок 3. – Металлургический 3D-принтер ProX DMP 300

Один из объектов исследований (рис. 2 а) имел металлическую светонепроницаемую поверхность, а второй (рис. 2 б) – светопроницаемую с ячеистой структурой. Форма ячеек кубическая с размерами 1×1×1 мм.

3. Результаты исследований и их анализ. Процесс использования системы бесконтактного сканирования при исследовании металлических поверхностей, полученных на металлургическом 3D-принтере изделий, представлен на рис. 4 а и 5 а. Результаты самого исследования представлены на рис. 4 в, г, а также на рис. 5 в, г.

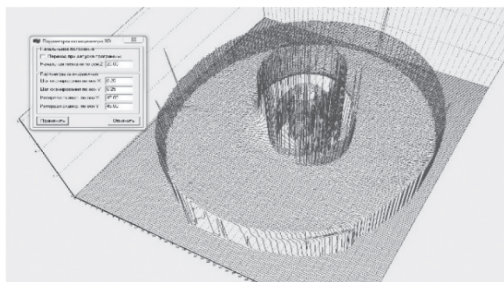
Анализ полученных результатов показал, что поверхность объекта со светонепроницаемой поверхностью является шагреновой, в которой перепады между выступами и впадинами относительно усредненного нулевого уровня составляют в пределах ± 20 мкм. Сами поверхности образуют замкнутый объем сложной формы, который соответствует форме и габаритным размерам исследуемого объекта. То же самое можно сказать и об объекте с светопроницаемой поверхностью, за исключением, того, что в ее основе лежит ячеистая структура. При этом проекция ячеек на плоскость сканирования имеет форму квадратов с размерами 1 ± 1 мм.



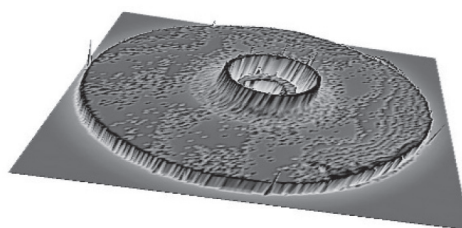
а)



б)

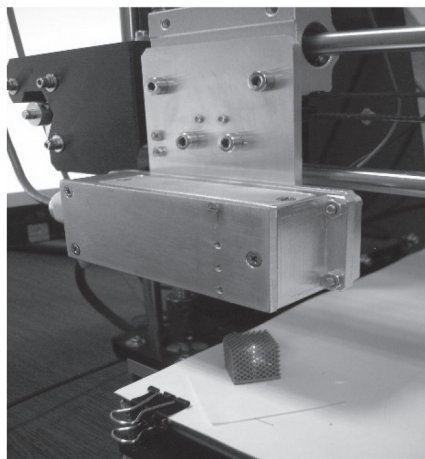


в)

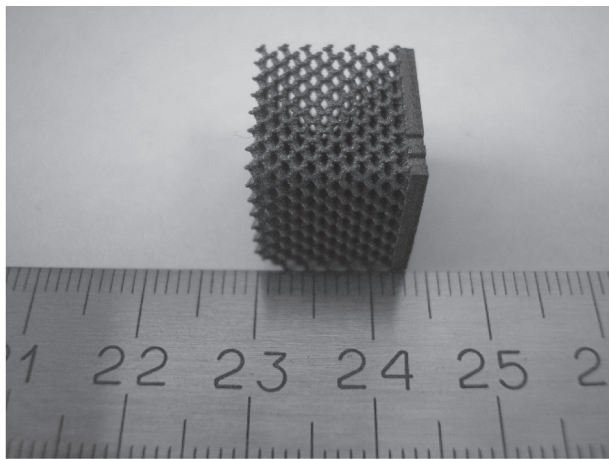


г)

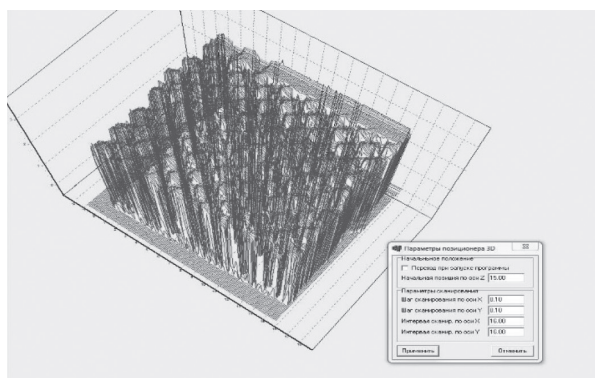
Рисунок 4. – Объект исследования со светонепроницаемой поверхностью:
а) сканирование, б) видимая поверхность, в) полученная сканированием без сглаживания и фильтрации, г) полученная сканированием после сглаживания и фильтрации



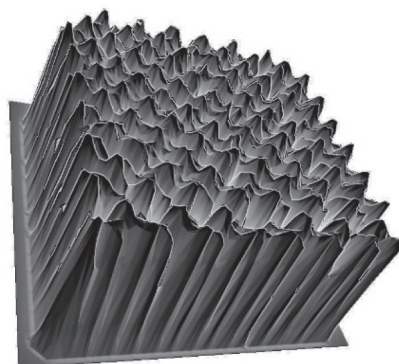
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5. – Объект исследования со светопроницаемой поверхностью:

а) сканирование, б) видимая поверхность, в) полученная сканированием без сглаживания и фильтрации, г) полученная сканированием после сглаживания и фильтрации

Выводы:

1. По своим функциональным возможностям разработанная система бесконтактного сканирования может быть отнесена к разновидности 3D-сканеров, используемых в качестве лабораторного оборудования, а также в составе автоматизированных рабочих мест контролеров отдела технического контроля.

2. Разработанная система бесконтактного сканирования может также использоваться в аддитивном производстве при отработке режимов 3D-печати на металлургическом 3D-принтере, использующем для получения изделий селективное лазерное сплавление порошков металлических сплавов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Hannien, J. Direct metal laser sintering // Advance materials & processes. 2002. P. 33–35.
2. Быков, Р. П. Исследование процесса селективного припекания импульсным лазером сферических порошков титана. / Р. П. Быков, К. Е. Белявин, Д. В. Минько, О. О. Кузнечик // Литье и металлургия. – 2010. – № 4 (58). – С. 137–140.
3. Гришин, С. А. Архитектура системы мониторинга технологических процессов и качества получаемых изделий при аддитивном производстве // «Аддитивные технологии, материалы и конструкции»: Материалы научно-технической конференции. (Гродно, 5–6 октября 2016 г.). 2016. – С. 129–132.
4. Гришин, С. А. Разработка и исследование базовых элементов мультисенсорной системы контроля технологического процесса и качества получаемых изделий при аддитивном производстве / Сборник трудов III Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 23.03.17), ВИАМ, 2017. Ч 1, доклад № 6, С. 1–10.
5. Гришин, С. А. Аппаратно-программные средства для многопараметрического мониторинга сложных технических объектов / С. А. Гришин, В. В. Климентовский, Н. С. Недвецкий // Сборник научных статей I международной научно-технической конференции «ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА. – 2018», 22–26 октября 2018, г. Минск. – С. 94–97.
6. Гришин, С. А. Контроль технологических параметров установки лазерного спекания материалов / С. А. Гришин, В. В. Климентовский, О. О. Кузнечик // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: материалы 17-ой Междунар. науч.-практ. конф., 2–3 дек. 2016 г. – г. Новочеркасск. 2016, С. 7–12.
7. Гришин, С. А. Применение мультисенсорной системы для мониторинга технологического оборудования и силовых агрегатов / С. А. Гришин, В. В. Климентовский // Сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» Могилев, 19–20 сентября 2017 г., С. 431–435.

GRISHIN S. A.¹, NIADVETSKI N. S.¹, KLIMENTOVSKI V. V.¹, KUZNECHIK O. O.²

¹ State Research and Production Association «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,

² State Scientific Institution «Powder Metallurgy Institute»

USE OF A CONTACT-FREE LASER SCANNING SYSTEM IN THE STUDY OF THE METAL SURFACES OF THE OBTAINED ON METALLURGICAL 3D PRINTER PRODUCTS

Summary. *The results of using the developed contactless laser scanning system in the study of metal surfaces of products obtained using a metallurgical 3D printer are presented. Based on the analysis of the obtained results, it was concluded that the developed system can be used as part of automated workplaces of the controllers of the technical control department, as well as in additive production when developing 3D printing modes on a metallurgical 3D printer.*

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. Установлено, что на предприятия Республики поступает около 50 % подшипников качения низкого качества. Вибродиагностирование новых подшипников качения в диапазоне от 5 до 5000 Гц выявило от 40 до 60 % бракованных подшипников. Определены основные дефекты новых подшипников качения и соответствующие этим дефектам частоты вибрации. Предложен способ по уменьшению микроволнистости поверхности колец подшипников качения за счет удаления загрязненной смазки и добавления в обычную новую смазку специального сверхпластичного материала.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что внедрение средств диагностирования является одним из важнейших факторов повышения экономической эффективности использования оборудования. В последние годы были предложены новые методы диагностирования, появилась возможность дистанционного контроля и испытаний без вывода оборудования из работы. Для механизмов роторного типа (турбины, электродвигатели, генераторы, насосы, вентиляторы, редукторы и т.д.) широкое распространение во всем мире получили методы контроля, базирующиеся на измерении параметров вибрации. Основными преимуществами вибродиагностики являются возможность обнаруживать скрытые дефекты, получать информацию о состоянии оборудования, находящегося в труднодоступных местах, а также проводить мониторинг и получать информацию о дефекте еще на стадии его появления.

Определены спектры вибрации в диапазоне от 5 до 6000 Гц, соответствующие дефектам в подшипниках качения, что позволяет выявить их дефекты как до установки на рабочий механизм, так и в процессе эксплуатации [1, 2].

Неисправности подшипников качения ускоряют выход двигателя из строя [3]: 13 % неисправностей электрических двигателей вызваны неисправностями подшипников; более 60 % механических неисправностей на предприятии вызваны износом подшипников. Важно знать, как устранять эти потенциальные проблемы.

Проведенные на специальном вибродиагностическом комплексе (рисунок 1) исследования показали, что на предприятия Республики поступает около 50 % подшипников качения низкого качества. Причем в диапазоне 5–600 Гц по уровню вибрации количество бракованных подшипников составляло около 40 % от исследуемой выборки, а в диапазоне 600–5000 Гц бракованных подшипников уже составило около 60 %. Были проверены подшипники качения порядка 20 различных фирм-производителей. Основными дефектами новых подшипников являются разноразмерность тел качения, повышенная микроволнистость колец (низкий класс обработки), некруглость тел качения и овальность внутреннего кольца.

Впервые была предпринята попытка по уменьшению влияния микроволнистости поверхности колец подшипников качения на уровень их вибрации и срок службы, используя различные смазки (рисунок 2).

Методика проведения эксперимента включала несколько этапов:

- 1) удаление заводской смазки с помощью дизельного топлива;
- 2) подготовка смеси, состоящей из глицерина с добавлением мелкодисперсного абразивного вещества (5–10 мкм);
- 3) с помощью пипетки окружность колец подшипника качения промазывалась смесью в нескольких местах;
- 4) создавалась равномерная нагрузка около 1 кг;
- 5) обеспечивалась частота вращения внутреннего кольца 24,4 Гц на протяжении 25–30 минут, при этом каждые 60 град. наружное кольцо перемещалось по отношению к внутреннему;
- 6) по истечении этого времени подшипник качения промывался от глицерина с абразивным порошком с помощью дизельного топлива;

- 7) закладывалась смазка MANNOL LC-2, OI MOL KSC WR2, Литол-24 РФ;
 8) обеспечивалась частота вращения внутреннего кольца на 25–30 минут.

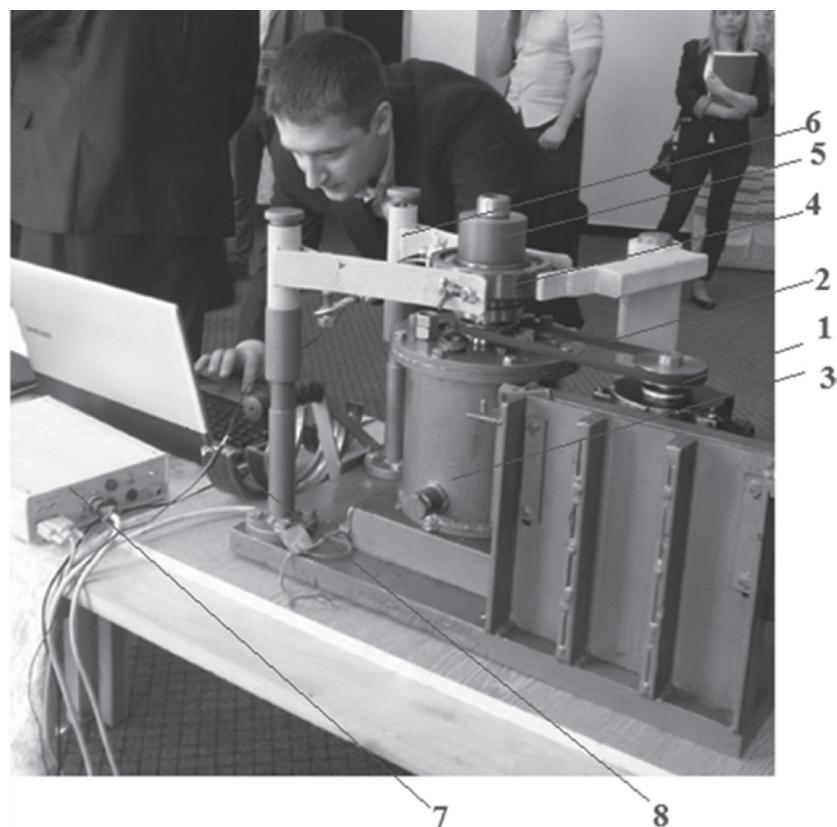


Рисунок 1. – Стенд для диагностирования подшипников качения:

- 1 – вал асинхронного электродвигателя со шкивом; 2 – ременная передача;
 3 – корпус подшипника скольжения; 4 – диагностируемый подшипник качения;
 5 – прижимная гайка; 6 – два рычага для торможения наружного кольца подшипника качения;
 7 – преобразователь сигнала; 8 – персональный компьютер с программой «Таямніца»

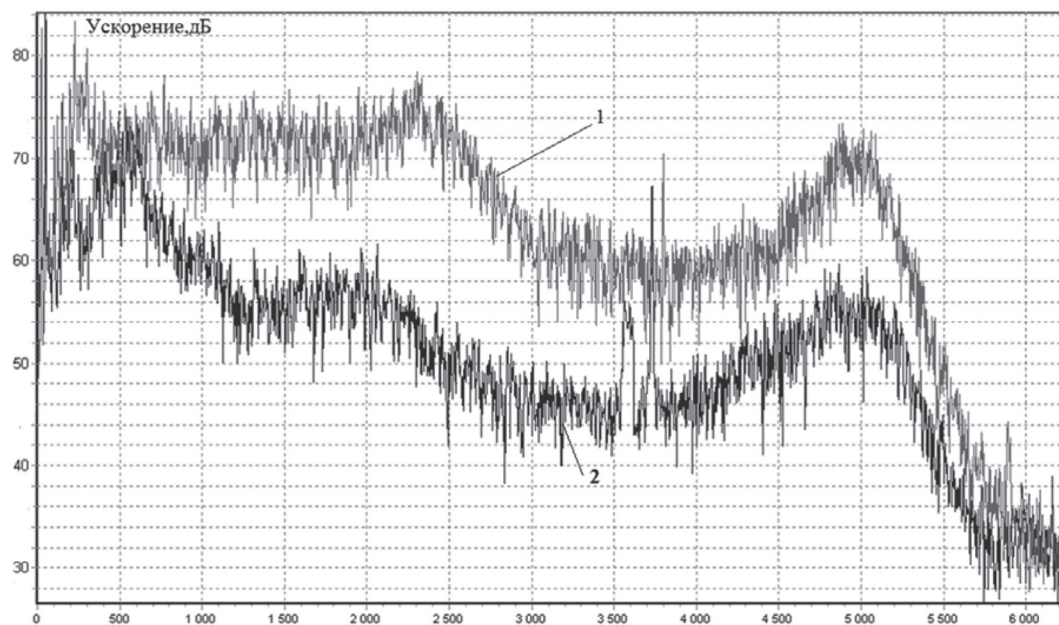


Рисунок 2. – Вибродиагностирование (частота до 5000 Гц):

- 1 – подшипник № 409 до обработки (восстановления);
 2 – после обработки ($t=25$ мин) и смазки MANNOL LC-2

Имели место и неудачные попытки проведения эксперимента, пока не была отработана технология.

Как показывает практика, в процессе эксплуатации под воздействием различных факторов возникает множество дефектов: бринелирование, наклеп, задиры, выбоины, микрораковины на кольцах коррозии, износ сепаратора и прочие дефекты.

Во время исследований на стенде изношенных подшипников было установлено, что около 40 % подшипников во время ремонта оборудования снимается с механизма в хорошем техническом состоянии. Возможный остаточный ресурс таких подшипников может составить $T_{ост} \approx 20000\text{--}30000$ ч работы.

После удаления старой смазки и набивки новой смазки, вибрация изношенного подшипника на стенде существенно уменьшалась. Однако не во всех случаях простая замена смазки давала положительный результат. Подобные операции по замене смазки были выполнены на рабочих механизмах одного из предприятий.

На кольцах подшипников во время длительной работы образуются микрораковины. После удаления загрязненной смазки в обычную новую смазку добавляют специальный сверхпластичный материал. При этом вибрация подшипника уменьшается, срок службы подшипников увеличивается. Сверхпластичный материал уменьшает влияние микрораковин на дальнейший износ подшипников.

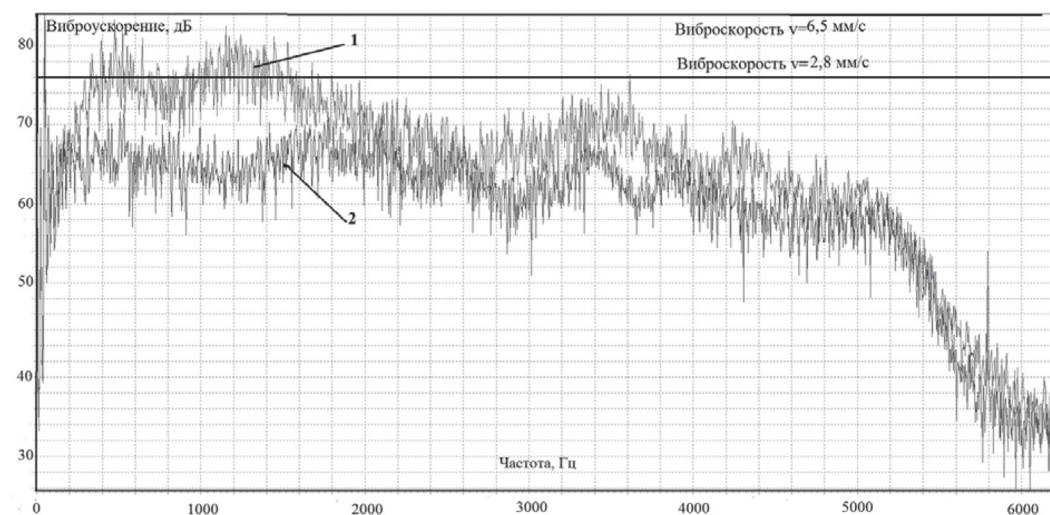


Рисунок 3. – Спектр вибрации ПК 311 № 3 до 6000 Гц:

1 – со старой смазкой, 2 – после удаления старой смазки и добавления новой

Выводы:

Можно рекомендовать три способа для повышения безотказности подшипников качения и увеличения срока службы:

- обязательное вибродиагностирование подшипников качения на специальном стенде перед установкой на механизм. На механизм необходимо ставить подшипники с минимальной вибрацией при виброскорости $v \leq 2,8$ мм/с;
- выявленную повышенную микроволнистость на кольцах можно устранить, используя различные смазки, согласно представленной методике;
- добавление сверхпластичного материала в используемой смазки подшипников уменьшает влияние микрораковин на дальнейший износ подшипников.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. Учебное пособие. Мн. «Новое знание»; М.: ИНФРА-М, 2017 г. – 271 с. (Высшее образование: Бакалавриат).
2. Грунтович, Н. В., Петров, И. В., Кирдищев, Д. В. Гипоциклоида частоты вибрации подшипников качения. Тезисы докладов 3-ой Международная конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», Тамбовский государственный технический университет, 25–27 апреля 2016 г. / Министерство образования и науки Российской Федерации; Т. И. Чернышова, отв. ред. – Тамбов: Изд-во Першина Р. В., 2016, с. 288–289.

3. 13 распространенных причин неисправности электродвигателей. Компания Диполь, 2018. Интернет-ресурс https://www.dipaul.ru/pressroom/13_prichin_neispravnosti_elektrodvigatelay/. Дата открытого доступа 24.02.2019.

HRUNTOVICH NAD. VL., HRUNTOVICH NIC. VAS.
Educational Establishment «Sukhoi State Technical University of Gomel»

IMPROVEMENT OF ROLL BEARINGS RELIABILITY IN OPERATING CONDITIONS

Summary. *It has been established that about 50 % of low quality rolling bearings come into the enterprises of the republic. The vibration diagnostics of new rolling bearings in the range from 5 to 5000 Hz has revealed from 40 % to 60 % of rejected bearings. The main defects of new rolling bearings and the vibration frequencies corresponding to these defects are determined. A method is proposed for reducing the surface microwaviness of rolling bearing rings by removing contaminated lubricant and adding a special superplastic material to the new standard lubricant.*

НИК. ВАС. ГРУНТОВИЧ, НАД. ВЛАД. ГРУНТОВИЧ
Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. В 80-х годах 20 столетия во всех родах вооруженных сил Советского Союза проводились НИОКР по применению искусственного интеллекта в военном деле. Теория искусственного интеллекта широко используется в экспертных системах различного назначения, в том числе в системах технического диагностирования трансформаторов и электрических двигателей. Любая экспертная система содержит базу знаний, базу данных, блок логических выводов. Для этих целей применяется табличная форма, логические функции, эталоны состояний, порядковая функция графа, матрица смежностей и метод Байеса. В статье рассматриваются экспертные системы технического диагностирования электрооборудования.

Искусственный интеллект начал активно развиваться за рубежом в 60–70 годах прошлого столетия. В 80-х годах во всех видах вооруженных сил Советского Союза проводились НИОКР по применению искусственного интеллекта в военном деле [1, 2]. Проводились исследования по применению искусственного интеллекта и для решения противоаварийных задач в корабельной атомной энергетической установке [3]. Результаты этих исследований хорошо демонстрируются сегодня в вооруженных силах Российской Федерации.

Разработка теории и систем искусственного интеллекта обусловлена в первую очередь двумя факторами:

- подготовка высококвалифицированных специалистов длительный, дорогостоящий и многократно повторяющийся процесс;
- высокоинтеллектуальные системы обеспечивают высокую надежность и безопасность эксплуатации технологических процессов любой сложности.

Теория искусственного интеллекта широко используется в экспертных системах различного назначения.

Применение экспертных систем техническом диагностировании силовых маслонаполненных трансформаторов.

Любая экспертная система проектируется по определенным принципам. Она должна содержать базу данных, базу знаний, блок логических выводов (рисунок 1). Для этих целей применяются реляционная (табличная) форма, логические функции, эталоны состояний, порядковая функция графа, матрица смежности и другие. При разработке экспертных систем привлекаются эксперты-специалисты соответствующей области [4].

В 2004–2005 гг. ОАО «Белгорхимпром» под руководством д.т.н., профессора Грунтовича Н. В. по заданию Концерна «Белнефтехим» разработал экспертную систему технического диагностирования для трансформаторов 110 кВ для ОАО «Беларуськалий» (рисунок 2). Состав системы: компьютерная экспертная система; трехканальная автоматическая система контроля $\lg \delta$ вводов 110 кВ под нагрузкой; трехканальная виброакустическая система контроля вибрации бака трансформатора с компьютером. Виброакустическую систему можно было использовать как стационарную, так и как переносную.

В настоящее время многие зарубежные фирмы России, Украины, Ирландии, США, Швеции и др. предлагают стационарные компьютерные системы технического диагностирования трансформаторов. Но их нельзя считать системами противоаварийной защиты [5].



Рисунок 1. – Структурная схема интеллектуальной системы поддержки принятия решений

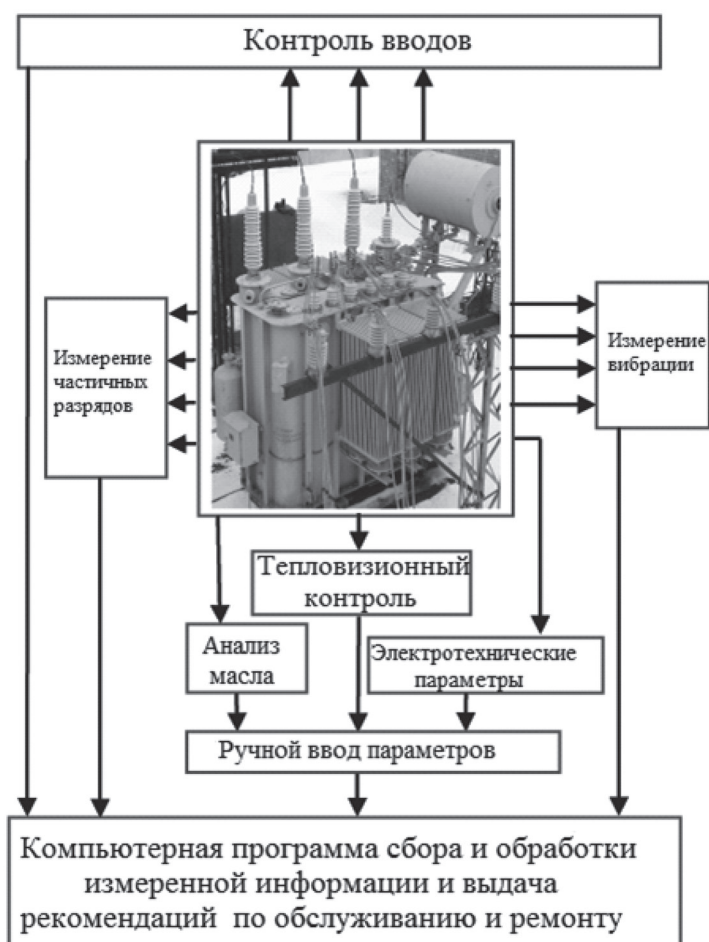


Рисунок 2. – Функциональная схема экспертной системы технического диагностирования трансформаторов 110–330 кВ

Применение экспертных систем техническом диагностировании электрических двигателей.

Принцип работы эксперта в области вибродиагностики и алгоритм работы компьютерной программы:

1. Спектр вибрации подшипника качения электрического двигателя может находиться в базе данных (базы знаний). Выполняется анализ спектра по частоте и амплитуде. Выявляются возможные дефекты в подшипнике.

2. Определяются геометрические параметры подшипников качения и частота вращения внутреннего кольца (вала ротора механизма).

3. По формулам, которые находятся в базе знаний вычисляются основные информативные частоты вибрации, на которых могут проявляться дефекты, в зависимости от численного значения амплитуды вибрации (таблица 1).

Таблица 1. – Основные дефекты подшипников качения и частоты вибрации

Частота вибрации для выявления дефекта	Вид дефекта	Формула	Пояснение к формулам
1. Частота вращения сепаратора вокруг центра вала	Износ сепаратора	$f_c = \frac{f_p \cdot R_{вн}}{2(R_{вн} + r_{ш})}$	f_p – частота вращения ротора АД, Гц. Принята 24,4 Гц.; $R_{вн}$ – радиус рабочей поверхности внутреннего кольца подшипника качения, мм;
2. Частота вращения тел качения относительно наружного кольца	Раковины на наружном кольце, разноразмерность тел качения	$f_{нк} = f_c \cdot Z_{ш} \cdot k1$	$r_{ш}$ – радиус тел качения, мм. f_c – частота вращения сепаратора относительно центра вала, Гц; $Z_{ш}$ – количество тел качения; $k1$ – отношение длины окружности рабочей поверхности наружного кольца к длине окружности шара.
3. Частота вращения тел качения относительно внутреннего кольца	Раковины на рабочей поверхности внутреннего кольца	$f_{вк}' = f_p \cdot f_c$ $f_{вк} = f_{вк}' \cdot Z_{ш} \cdot k2$	$f_{вк}'$ – частота перемещения тел качения относительно рабочей поверхности внутреннего кольца; $f_{вк}$ – частота вращения тел качения относительно рабочей поверхности внутреннего кольца;
4. Частота вращения тела (всех тел) качения вокруг собственной оси	Раковины на телах качения	$f_{ш1} = f_p \cdot R_{вн} / 2 \cdot r_{ш}$ $f_{ш2} = f_p \cdot R_{вн} / 2 \cdot r_{ш} \cdot Z_{ш}$	$k2$ – отношение длины окружности рабочей поверхности внутреннего кольца к длине окружности тела качения.

4. Формируется диагностическая модель подшипника. Для этого определяется максимальное и минимальное значение виброускорения на каждой информативной частоте ($A_{мин}$, $A_{макс}$) согласно ISO2372 или согласно статистической обработки спектров.

5. Полученная разность между $A_{мин}$, $A_{макс}$ делится на пять зон износа: начальный; малый; средний; предельный; аварийный.

6. Экспертная система вычисляет степень риска дефектов на каждой информативной частоте. В таблице 1 приведены результаты диагностирования подшипника качения № 409.

Таблица 2. – Результаты вибродиагностирования подшипника качения № 409

Номер	Частота	Виброускорение, дБ			Износ	Дефект	Степень риска
		$A_{мин}$	$A_{тек}$	$A_{макс}$			
1	24,400	70,000	76,711	80,000	Средний	Нарушение балансировки	0,671
2	8,799	70,000	48,598	80,000	Начальный	Дефект сепаратора	0,000
3	31,561	70,000	53,390	80,000	Начальный	Дефект тел качения	0,000

Номер	Частота	Виброускорение, дБ			Износ	Дефект	Степень риска
		A_мин	A_тек	A_макс			
4	220,926	70,000	75,342	80,000	Средний	Дефект тел качения	0,534
5	61,592	70,000	59,099	80,000	Начальный	Разноразмерность тел качения	0,000
6	123,183	70,000	74,113	80,000	Нормальный	Перекося наружного кольца	0,411
7	15,601	70,000	52,258	80,000	Начальный	Дефект внутреннего кольца	0,000
8	109,208	70,000	68,515	80,000	Начальный	Дефект внутреннего кольца	0,000
9	7,161	70,000	48,598	80,000	Начальный	Износ поверхностей тел качения в норме	0,000
10	50,126	70,000	68,343	80,000	Начальный	Износ поверхностей тел качения в норме	0,000

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Поспелов, Д. А. Искусственный интеллект. Справочник. Книга 2. Модели и методы. М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
2. Попов, Э. В., Фирдман, Г. Р. Алгоритмические основы интеллектуальных роботов и искусственного интеллекта. – М.: Наука, 1976. – 456 с.
3. Грунтович, Н. В., Скороходов, Д. А. Представление знаний в автоматизированных системах информационной поддержки операторов. Сборник НПО «Аврора» Л.: 1991 г.
4. Грунтович, Н. В., Чаус, О. В. Анализ принципов построения информационных систем поддержки операторов АЭС. Промышленная безопасность. 2012 – № 1. – С. 31–35.
5. Грунтович, Н. В., Фёдоров, О. В., Мороз, Д. Р., Третьяков, Б. Б., Колесников, П. М. Анализ проблемных вопросов эксплуатации маслонаполненных трансформаторов. Энергия и Менеджмент, 2017. – № 3 (96), С. 2–6.

HRUNTOVICH NIC. VAS., HRUNTOVICH NAD. VL.

Educational Establishment «Sukhoi State Technical University of Gomel»

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IMPLEMENTATION IN DIAGNOSTIC SYSTEMS OF POWER-ENGINEERING EQUIPMENT

Summary. In the 80s of the 20th century research and development were conducted in all kinds of USSR Armed Forces on the implementation of artificial intelligence in military affairs. The theory of artificial intelligence is widely used in expert systems of different purpose, including systems of technical diagnostics of transformers and electric motors. Any expert system contains knowledge base, database, inductive inference block. For these purposes a tabular form, logic functions, condition standards, order function of a graph, an adjacency matrix and the Bayesian method are used. The article considers expert systems of technical diagnostics of electrical equipment.

**КОМПЛЕКТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПОВЕРОЧНЫХ
ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ГАММА- И НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Аннотация. В докладе представлена информация о разработках, производстве и применении современных автоматизированных эталонных поверочных установок гамма- и нейтронного излучения.

В течение последнего десятилетия в составе разработок и выпуска новой конкурентоспособной продукции на предприятии реализован ряд проектов, направленных на создание современного оборудования и средств измерений для метрологии ионизирующего излучения. В перечень средств измерений – рабочих эталонов для решения задач практической метрологии, проведения калибровочных и поверочных процедур вошли автоматизированные поверочные установки гамма- и нейтронного излучений.

Установка дозиметрическая гамма-излучения УДГ-АТ130 обеспечивает воспроизведение единиц мощности кермы в воздухе в диапазоне с номинальными границами от 0,4 мкГр/ч до 50 Гр/ч с доверительными границами относительной погрешности рабочего эталона 1 разряда от 1,5 до 2,5 %, единиц амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы с доверительными границами относительной погрешности рабочего эталона 1 разряда от 2,5 до 4,5 %.

Диапазон дозиметрических величин формируется в геометрии типового коллиматора с использованием набора стандартно четырех радионуклидных гамма-источников цезий-137 с максимальной активностью 10^{14} Бк (96 ТБк) в интервале расстояний от 0,3 до 7 м. В установке используются также гамма-источники из америция-241 и кобальта-60 с максимальной активностью 16 и 7,2 ГБк, соответственно, применяемые для калибровки и испытаний дозиметров и измерителей мощности дозы в диапазоне энергий.

Горизонтальная система облучения калибруемых средств измерений (СИ) использует поле гамма-излучения, формируемое типовым коллиматором по ГОСТ 8.087-2000. Геометрия облучения проектируется с учетом минимизации вклада рассеянного излучения, внешнего по отношению к держателю источника, включая фотоны отраженные от стен помещения. Перемещение источников в облучателе обеспечивается цифровыми сервоприводами, работающими в абсолютной системе координат.

Позицию калибруемых СИ в пучке излучения обеспечивает подвижная платформа калибровочного стенда. Система управления позиционированием источников в области подвижной платформы в диапазоне рабочих расстояний 0,3–7 м, построенная на использовании цифровых сервоприводов, программных контроллеров, панелей оператора и специального инсталлированного программного обеспечения (ПО). Регистрация показаний калибруемых СИ осуществляется с использованием видеонаблюдения и интерфейсных связей. Вышестоящая компьютерная система обеспечивает управление режимами работы установки, процессом измерений и калибровки с использованием специального ПО.

Схема поставки источников предусматривает их зарядку в держатели на заводе изготовителе источников и загрузку в облучатель с использованием комплектного перегрузочного устройства.

Установка поверочная нейтронного излучения УПН-АТ140 предназначена для передачи единиц плотности потока, мощности амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения. В установке используются источники нейтронов Pu-238-Be и Cf-252, при этом обеспечиваются: диапазон плотности потока быстрых нейтронов $2,5\text{--}3,5 \cdot 10^3$ нейтр/с·см²; мощность амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы $3,5\text{--}4 \cdot 10^3$ мкЗв/ч. Основная относительная погрешность не превышает 4 % (рабочий эталон 1 разряда), интервал рабочих расстояний 0,5–3 м.

Коллиматор установки обеспечивает формирование нейтронных полей в геометрии быстрых и геометрии тепловых нейтронов. В открытой геометрии используется типовой конус по ISO 8529-2. Энергетические спектры нейтронов в указанных геометриях приведены на рисунке 1.

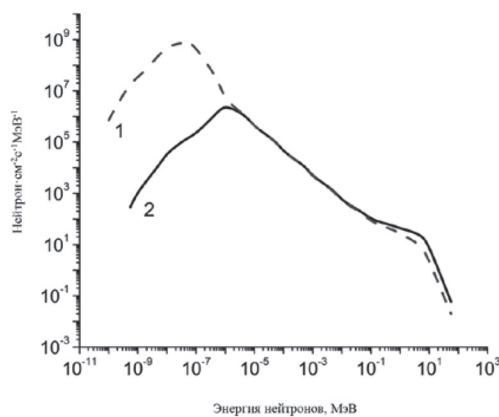


Рисунок 1. – Энергетические спектры нейтронов: 1 – геометрия тепловых нейтронов; 2 – геометрия быстрых нейтронов

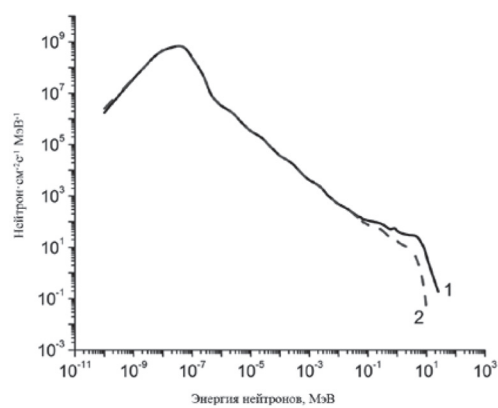


Рисунок 2. – Спектры нейтронов: 1 – открытая геометрия в помещении без конуса, 2 – после установки поглощающего конуса

Доля тепловых нейтронов с энергией менее 1 эВ в геометрии тепловых нейтронов составляет более 35 %.

При использовании установки для калибровки радиометров и дозиметров нейтронов следует оценивать изменение энергетического спектра нейтронов вследствие рассеянного излучения от стен помещения и проводить учет корректирующих поправок.

Установка УПН-АТ140 внесена в Госреестр средств измерений Российской Федерации, соответствует требованиям ГОСТ 27451-87, ГОСТ 8.031-82, технического регламента ЕАС, ОСПОРБ 99/2010, НП-038-16.

Особый интерес для ряда сфер применения представляет интегрированный комплект поверочных установок (рис. 1, 2), включающий гамма-установку УДГ-АТ130 и нейтронную установку УПН-АТ140, выполненный на единой аппаратно-программной платформе и значительно превосходящей по техническим, метрологическим и сервисным параметрам установки типа КИС-НРД, применяющиеся до сих пор, начиная с 1970 г.

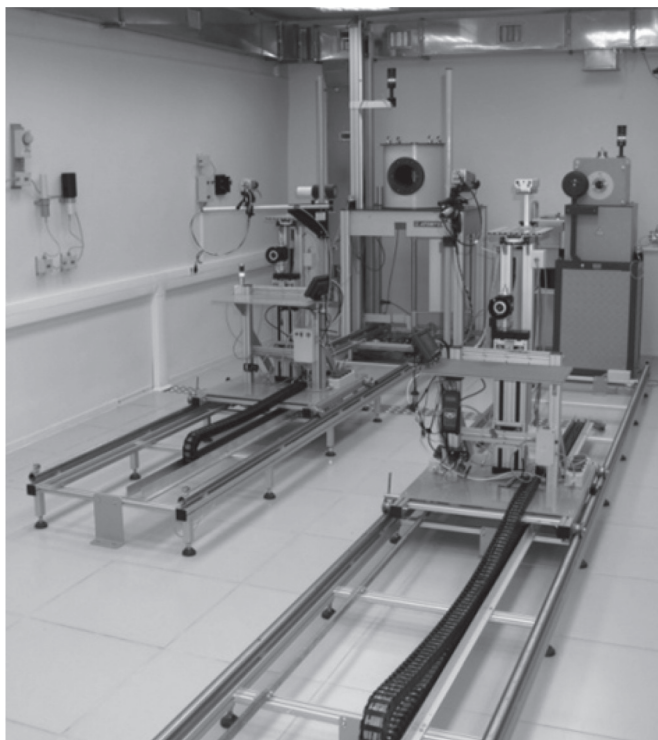


Рисунок 3. – Рабочая зона УПН-АТ140 (слева) и УДГ-АТ130 (справа)



Рисунок 4. – Зона управления УДГ-АТ130 и УПН-АТ140

Комплект установок УДГ-АТ130 и УДГ-АТ140, размещаемый в одном градуировочном помещении, характеризуется наличием интегрированной части, включающей системы безопасности, радиационного контроля, энергообеспечения, пользовательский интерфейс с управляющим компьютером и прикладным ПО на уровне аппаратного оснащения. Система безопасности предотвращает облучение персонала в условиях нормальной эксплуатации, а также в аварийных ситуациях.

Применение дозиметрических установок обеспечивает высокий уровень безопасности на предприятиях атомной отрасли, обеспечивая точность показаний средств измерений, применяемых для контроля радиационной обстановки, дозовой нагрузки на персонал и население.

Все созданные установки (УДГ-АТ110, УДГ-АТ130, УПН-АТ140) успешно функционируют на предприятии «АТОМТЕХ» в качестве рабочих эталонов, обеспечивая высокую производительность и точность градуировки широкой номенклатуры выпускаемых дозиметрических средств измерений, а также качественное проведение исследовательских работ.

GUZOV V. D., KOZHEMYAKIN V. A., LUKASHEVICH R. V.
Atomtex SPE, Minsk, Belarus

SET OF AUTOMATED TESTING DOSIMETRIC INSTALLATIONS OF GAMMA AND NEUTRON RADIATION

Summary. *The report describes the development, production and use of sophisticated automated standard gamma and neutron calibration facilities.*

О. В. ДВОРНИКОВ¹, В. А. ЧЕХОВСКИЙ², Я. Д. ГАЛКИН³, А. В. КУНЦ³

¹ Открытое акционерное общество «МНИПИ»

² «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

³ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

РАЗРАБОТКА НА БАЗОВОМ МАТРИЧНОМ КРИСТАЛЛЕ МН2ХА030 СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДВОЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. Предложено осуществлять проектирование специализированных аналоговых микросхем для радиоэлектронной аппаратуры двойного применения на базовом матричном кристалле (БМК) МН2ХА030, для которого приведены параметры основных компонентов: двух операционных усилителей, трех компараторов, двух трансрезистивных усилителей.

Для использования в сложно-функциональных ИС рекомендуется применение наиболее универсального компаратора ADComp3, позволяющего регулировать в широком диапазоне ток потребления и обеспечивающего переход в режим малого энергопотребления.

Указано, что трансрезистивные усилители включают полосовой фильтр, схему восстановления базового уровня и характеризуются различным уровнем шумов и полосы пропускания. Все компоненты БМК сохраняют свою работоспособность при воздействии проникающей радиации.

Введение. Специализированные аналоговые интегральные схемы (ИС) часто применяются во входных каскадах радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) для обеспечения требуемых электрических параметров и предотвращения несанкционированного копирования РЭА. Производство высококачественной РЭА обычно является малосерийным, поэтому создание специализированных аналоговых ИС целесообразно выполнять на базовых матричных (БМК) и базовых структурных кристаллах (БСК).

БМК и БСК представляют собой полупроводниковые кристаллы со сформированными активными и пассивными радиоэлектронными элементами, соединения между которыми выполняются для реализации требуемых потребителю функций и параметров.

Основное отличие БСК от БМК заключается в том, что на БСК некоторые соединения элементов выполнены заранее, поэтому проектирование ИС на БСК выполняется на уровне блоков, в то же время преимуществом БМК является большая степень свободы при схемотехническом синтезе.

Для производства аналоговых ИС ранее нами были созданы БСК МН2ХА010 [1] и БМК МН2ХА030 [2, 3], причем МН2ХА010 был предназначена для проектирования радиационно-стойких многоканальных (до 8-ми каналов), а МН2ХА030 – криогенных малоканальных (до 4-х каналов) аналоговых устройств.

Апробация микросхем МН2ХА010 и МН2ХА030 позволила установить, что потребность в сложно-функциональных аналоговых ИС, реализуемых на БСК МН2ХА010, довольно не велика. Преобладающему числу потребителей в Беларуси и России необходимы одно- или двухканальные изделия, которые с успехом можно создать на БМК МН2ХА030.

Целью доклада является рассмотрение основных параметров аналоговых компонентов, характеризующихся высоким быстродействием и радиационной стойкостью, что позволяет осуществлять на основе БМК МН2ХА030 схемотехнический синтез различных микроэлектронных аналоговых устройств со сложностью до 8 операционных усилителей (ОУ) для РЭА двойного применения.

Основные элементы библиотеки БМК МН2ХА030. К настоящему времени разработаны основные элементы схемно-топологической библиотеки БМК МН2ХА030, которые наиболее часто применяются при синтезе аналоговых устройств, а именно: две модификации ОУ OАmp1, OАmp2; компараторы напряжения Comp3, ADComp3, CompF; импульсные трансрезистивные усилители (ТРУ), т.е. преобразователи токовых импульсов в напряжение, ADPreamp13, IBUF.

В табл. 1–5 приведены результаты моделирования всех разработанных устройств.

Таблица 1. – Параметры ОУ при напряжении питания ± 5 В

Наименование параметра	Величина параметра	
	ОАmp1	ОАmp2
Ток потребления, мА	1,79	2,51
Входной ток, мкА	1,28	1,28
Напряжение смещения нуля, мкВ	642	0,1
Коэффициент усиления напряжения	7214	5936
Максимальное выходное напряжение, В	-3,24/3,58	-2,77/2,77
Частота единичного усиления, МГц	50,5	46,06
Запас фазы при единичном усилении, градусов	56,5	53,1

Таблица 2. – Параметры компараторов для дифференциального выходного напряжения

Наименование параметра	Величина параметра		
	Comp3	ADComp3	CompF
Напряжение питания V_{CC} , В	$\pm 5,0$	$\pm 3,0$	$\pm 5,0$
Ток потребления от положительного источника питания I_{CC} , мА	1,75	0,98	15,3
Ток потребления от отрицательного источника питания I_{EE} , мА	6,05	6,60	12,9
Входной ток I_{INP} , мкА	0,37	0,53	5,5
Выходной ток I_{OUT} , мА	3,95	4,04	–
Выходное напряжение V_{OUT} , В	–		3,36... 4,17
Чувствительность S, мВ	1,0	2,0	4,0
Задержка включения/выключения t_D , нс, при превышении порога на 10 мВ 100 мВ 1 В	5,39/5,25 2,98/8,05 2,63/12,05	8,95/8,95 5,13/14,03 4,79/14,94	1,32/1,34 0,55/1,24 0,42/1,68
Длительность фронта нарастания/спада t_F , нс, при превышении порога на 100 мВ	1,58/1,74	2,30/2,59	0,47/1,21

**Таблица 3. – Диапазоны изменения параметров компаратора ADComp3
внешним резистором R_{EXTC} (динамические параметры определены
при превышении порога на 10 мВ)**

R_{EXTC} , кОм	I_{EE} , мА	R_{LOAD} , кОм	$V_{OUT1}-V_{OUT2}$, мВ	t_D , нс	t_F , нс
0	6,595	0,2	от 802,98 до -804,38	8,95/8,95	2,562/2,562
65	1,390	10,0	от 805,29 до -800,43	11,70/11,73	18,60/18,60

**Таблица 4. – Основные параметры ТРУ ADPreampl3
при напряжении питания, равном ± 3 В**

Наименование параметра	Величина
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	5,71
Входное сопротивление, Ом	25
Максимальное значение коэффициента преобразования при $C_D \approx 18$ пФ, мВ/фКл	0,7
Диапазон регулировки базового уровня, В	± 1
Время пика при $C_D \approx 18$ пФ, $Q_{INP} \approx 1,3$ пКл, нс	14,5
Полоса пропускания по уровню –3 дБ при $C_D \approx 18$ пФ, МГц	от 2,55 до 36,81
Среднеквадратическое значение шумового заряда, приведенное к входу при $C_D \approx 18$ пФ, фКл	77,16

Таблица 5. – Основные параметры ТРУ IBUF при напряжении питания, равном 3,3 В

Наименование параметра	Величина
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	1,28
Входное сопротивление, Ом	<29
Коэффициент преобразования при $C_D \approx 18$ пФ, В/пКл	0,03
Диапазон регулировки базового уровня изменением напряжения в узле OutShift, В	от 0,4 до 2,5
Диапазон регулировки базового уровня изменением напряжения в узле OutShift1, В	от 1,28 до 3,10
Время пика при $C_D \approx 18$ пФ, нс	96,5
Полоса пропускания по уровню –3 дБ при $C_D \approx 18$ пФ, МГц	от 0,034 до 1,84
Среднеквадратическое значение шумового заряда, приведенное к входу, при $C_D \approx 18$ пФ и подключенной (отключенной) схеме ВБУ, фКл	58,23 (35,94)

Компараторы отличаются по току потребления (от 1 мА до 15 мА), задержкам переключения (от 1,34 нс до 8,95 нс) и сохраняют свою работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения 3 Мрад и потоке нейтронов 10^{14} н/см². Наиболее универсальным и рекомендуемым для использования в сложно-функциональных ИС является ADComp3, который позволяет регулировать ток потребления от отрицательного источника питания в диапазоне от 6,60 мА до 1,43 мА и, при необходимости, допускает переход компаратора в режим малого энергопотребления.

ADPreampl3 включает трансрезистивный усилитель-формирователь с полосой пропускания до 60 МГц, зарядочувствительный усилитель-формирователь со схемой восстановления и подстройки базового уровня (ВБУ) в рекомендуемом диапазоне от -1 В до 1 В и возможностью электронной регулировки коэффициента преобразования.

Схема восстановления и подстройки базового уровня обеспечивает неизменную форму выходного импульса напряжения при постоянном входном токе усилителя, изменяющемся от -190 мкА до 190 мкА, и пренебрежимо малое изменение базового уровня при ± 20 % разбросе сопротивлений интегральных резисторов.

ADPreampl3 допускает переход в «спящий» режим с уменьшением тока потребления до 10 мкА, сохраняет работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения до 500 крад и воздействии интегрального потока нейтронов до 10^{13} н/см².

IBUF содержит токовый буфер, интегратор тока, схему восстановления базового уровня и при однополярном напряжении питания, равном 3,3 В, характеризуется следующими основными параметрами: входное сопротивление – 29 Ом, ток потребления – 1,28 мА, время пика выходного импульса – около 100 нс.

Применение схемы восстановления базового уровня обеспечивает пренебрежимо малое изменение базового уровня Ibuf при ± 20 % разбросе сопротивлений интегральных резисторов, компенсирует влияние на базовый уровень вытекающего входного тока с величиной до 200 мкА, но в то же время увеличивает уровень шумов в 1,6 раза.

IBUF сохраняет свою работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения до 1 Мрад и воздействии интегрального потока нейтронов до 10^{14} н/см².

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Дворников, О. В., Дятлов, В. Л., Прокопенко, Н. Н., Чеховский, В. А. Базовый структурный кристалл для изготовления аналоговых интерфейсов малочувствительных к проникающим излучениям. Радиотехника и электроника. – 2017. – Том 62, № 10. – С. 1031–1038.
2. Dvornikov, O. V., Tchekhovski, V. A., Dziatlau, V. L., Prokopenko, N. N., Bugakova, A. V. BiJFet Array Chip MH2XA030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. Труды конференции 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech-2018). DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.
3. Дворников, О. В., Чеховский, В. А., Дятлов, В. Л., Прокопенко, Н. Н., Будяков, П. С. Проектирование компараторов напряжений на базе элементов радиационно-стойкого низкотемпературного BiJFET базового матричного кристалла MH2XA030 // МЭС-2018. Россия, Москва, октябрь 2018. ИППМ РАН. – С. 10–16. DOI 10.31114/2078-7707-2018-4-10-16.

DVORNIKOV O. V.¹, TCHEKHOVSKI V. A.², GALKIN YA. D.³, KUNTS A. V.³

¹ JSC «MNIPI»

² «Institute of Nuclear Problems» of the Belarusian State University

³ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

ASICS DESIGN ON THE MH2XA030 MASTER SLICE ARRAY FOR DUAL-USE RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

Summary. *It is proposed to design ASICs for dual-use radioelectronic equipment on the master slice array MH2XA030, for which the parameters of the main components are given: two operational amplifiers, three comparators, two transresistance amplifiers.*

The general-purpose comparator ADComp3 is recommended to use in complex-functional ICs, it allows regulating the current consumption in a wide range and provides sleeping mode.

It is indicated that the transresistance amplifiers include a band-pass filter, a base-level restorer and are characterized by different noise levels and bandwidths.

All array components retain their performance when exposed to penetrating radiation.

В. Б. КИРИЛЬЧУК¹, И. Н. КИЖЛАЙ¹, А. А. ПОПОВ¹, С. В. ЗДОРОВЦЕВ²

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

² Открытое акционерное общество «МНИПИ»

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИИ RFID-СИСТЕМ ВЧ И УВЧ ДИАПАЗОНОВ

Аннотация. Представлены структура и описание конструкции аппаратно-программного комплекса для изучения, исследования и верификации фундаментальных характеристик компонентов и устройств RFID систем ВЧ и УВЧ диапазонов.

Для исследования функциональных характеристик устройств радиочастотной идентификации (RFID считывателей и радиочастотных меток) в процессе их разработки, эксплуатации и верификации применяется соответствующее метрологическое оборудование. Перечень технических характеристик RFID-систем, подлежащих измерению, а также методы их испытаний с помощью традиционного комплекта измерительного оборудования определен в нормативных документах [1–4].

Специфика и трудоемкость измерений в области RFID технологий послужили основой разработки специализированных измерительных приборов, обладающих высокой производительностью и функциональностью [5–9]. Такое оборудование, как правило, ориентировано на использование в специализированных научно-производственных лабораториях и, характеризуется наряду с превосходными метрологическими показателями достаточно высокой стоимостью. Последнее обстоятельство в значительной мере ограничивает его использование в профильных учебных заведениях.

Для решения комплексных задач, связанных с проектированием и экспериментальным исследованием устройств и компонентов RFID-систем в УО БГУИР совместно с ОАО «МНИПИ» разработан аппаратно-программный комплекс (АПК). АПК ориентирован на использование в качестве научно-лабораторной базы при изучении дисциплин, связанных с разработкой и исследованием компонентов и узлов RFID-систем ВЧ и УВЧ диапазонов на различных ступенях высшего образования.

На структурном уровне АПК состоит из двух основных блоков (рисунок 1): *численного моделирования* (включает модуль моделирования, который через персональный компьютер (ПК) связан с модулем программного обеспечения (ПО)) и *экспериментальных исследований* (включает учебно-лабораторные модули (УЛМ) ВЧ и УВЧ диапазонов с соответствующим управляющим программным обеспечением, а также и комплект измерительного оборудования и приспособлений (КИОиП)). Защита от несанкционированного доступа к УЛМ RFID ВЧ и УВЧ диапазонов (разрешение на загрузку специального ПО) осуществляется через соответствующие модули доступа (МД).

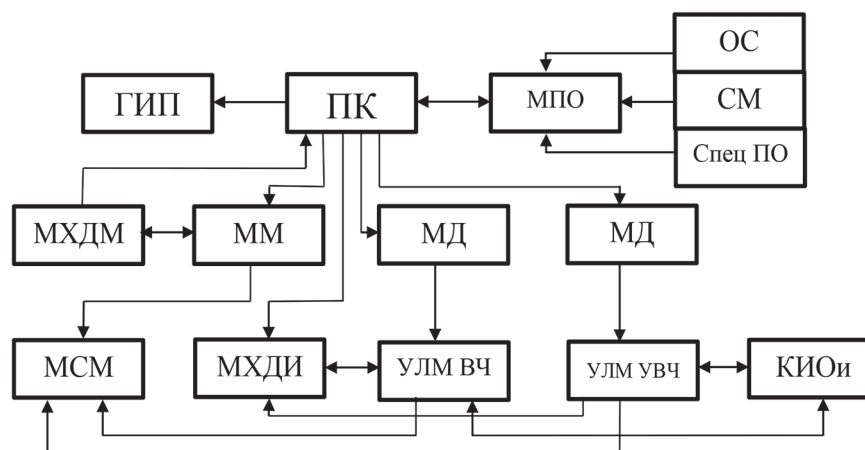


Рисунок 1. – Обобщенная структура АПК

Модуль моделирования содержит комплект типовых проектов приемо-передающих трактов RFID устройств (считывателя и метки), реализованных в интегрированной среде разработчика *Labview*, ряд типовых проектов компонентов (антенн круговой и линейной поляризации считывателей и меток, и др.), составленных для работы в средах *CST Studio Suite* (Student Edition), *AWR Design Environment* (учебная версия), а также комплект моделей антенн и многолучевого канала связи считыватель-метка, выполненных для работы с ПО собственной разработки.

УЛМ RFID ВЧ диапазона предназначен для экспериментальных исследований зоны взаимодействия (ЗВ) считывателя и карты-метки (КМ), спектрально-временных характеристик (СВХ) сигналов информационного обмена (ИО) между считывателем и КМ, осуществляемых с помощью КИОиП. УЛМ RFID ВЧ диапазона состоит из считывателя и комплекта КМ, поддерживающих различные беспроводные протоколы. Исследование параметров ЗВ производится с помощью блока позиционирования, который состоит из трехкоординатного стола-держателя RFID КМ ВЧ диапазона, траверсы-держателя ВЧ RFID считывателя и системы управления положения дифракционного экрана между антеннами считывателя и КМ. Измерение СВХ сигналов ИО в ЗВ осуществляется с помощью входящих в состав КИОиП цифрового осциллографа типа WON Smart DS6062E, анализатора спектра типа Anrytsu MS 2720T и комплекта измерительных антенн ВЧ диапазона, изготовленных в соответствии с ИСО/МЭК 7810.

Считыватель УЛМ RFID ВЧ диапазона, выполнен на базе демонстрационной платы (ДП) типа ST25R3911B-DISCO. ДП представляет собой мультистандартный ВЧ/NFC-инициатор (13,56 МГц) с встроенной антенной и функциями автоматического согласования выходного каскада передатчика с импедансом антенны, автоматического определения наличия метки в зоне антенны считывателя и выходной мощностью передатчика до 1400 мВт. Управление работой ST25R3911B-DISCO осуществляется с помощью графического интерфейса пользователя (ГИП) STSW-ST25R001. Меню ГИП позволяет исследовать протоколы ISO/IEC 14443A/B (включая поддержку неконтактного стандарта связи платежных карт *EMVco*) и *FeliCa™*; ISO/IEC 15693/ISO/IEC 18000-3; 18092 NFC ISO/IEC ISO 18092 (NFCIP-1) active P2P. Внешний вид УЛМ RFID ВЧ диапазона с КИОиП показан на рисунке 2.

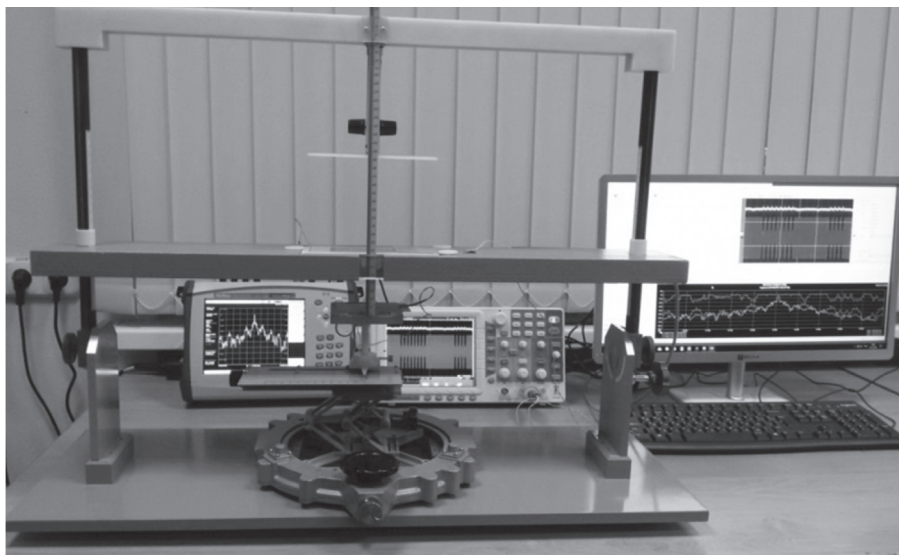


Рисунок 2. – Внешний вид УЛМ RFID ВЧ диапазона с КИОиП

УЛМ RFID УВЧ диапазона предназначен для экспериментального исследования системных и компонентных параметров устройств радиочастотной идентификации УВЧ диапазона, а также СВХ сигналов ИО между считывателем и метками УВЧ диапазона с помощью КИОиП. К системным параметрам относятся дальность чтения данных, хранящихся в банках памяти метки, и дальность записи данных в RFID метку. УЛМ RFID УВЧ позволяет исследовать указанные параметры в зависимости

от характеристик RFID считывателя, включая антенну: мощности передатчика, вида модуляции, чувствительности приемника, коэффициента усиления (КУ) антенн, КСВ в антенно-фидерном тракте (АФТ); параметров метки: пороговой чувствительности, диаграммы излучения при заданных параметрах обратного канала связи (Backscatter Link Frequency): 40; 160; 213; 256; 320; 640 кГц; вида кодирования: FM0, M2, M4, M8; длительности T_{ari} : 6,25; 12,5; 25 мкс. К группе компонентных параметров относятся пространственно-поляризационные (диаграмма направленности (ДН), поляризационная характеристика (ПХ) антенн) и S-параметры устройств и узлов, входящих в состав считывателя и метки. Для измерения S-параметров в состав КИОиП входит портативный 2-х каналный векторный анализатор цепей типа Pocket VNA.

Измерение ДН, ПХ и ИХ, а также связанных с ними системных параметров RFID производится в специально разработанной экранированной безэховой камере (БЭК) размерами 2,5×2,5×2,5 м. Внутри БЭК располагаются дистанционно-управляемые опорно-поворотные устройства (ОПУ) для антенн считывателя и держателя RFID меток. Управление работой ОПУ осуществляется с помощью ГИП ОПУ и блока драйверов собственной разработки.

УЛМ RFID ВЧ диапазона, реализован на основе ДП типа ST25RU3993-EVAL. ДП представляет собой блок считывателя УВЧ диапазона (840-960) МГц с поддержкой радиочастотных протоколов ISO 18000-61, ISO 18000-62 (в прямом режиме), EPC Class 1 Gen2 (ISO 18000-63), и функций: автоматического согласования антенн, электронной регулировки выходной мощности передатчика ($P_{\text{max}}=30$ дБм), спектрального анализа сигналов в рабочей полосе частот, электронной коммутации 2-х антенн.

Управление работой ST25RU3993-EVAL осуществляется с помощью программного обеспечения STSW-ST25RU003, которое включает в себя источник прошивки для ST25RU3993 и представляет собой мост USB/UART с USB-управляемым приложением для микроконтроллера типа STM32L476.

Внешний вид УЛМ RFID УВЧ диапазона с КИОиП показан на рисунке 3.

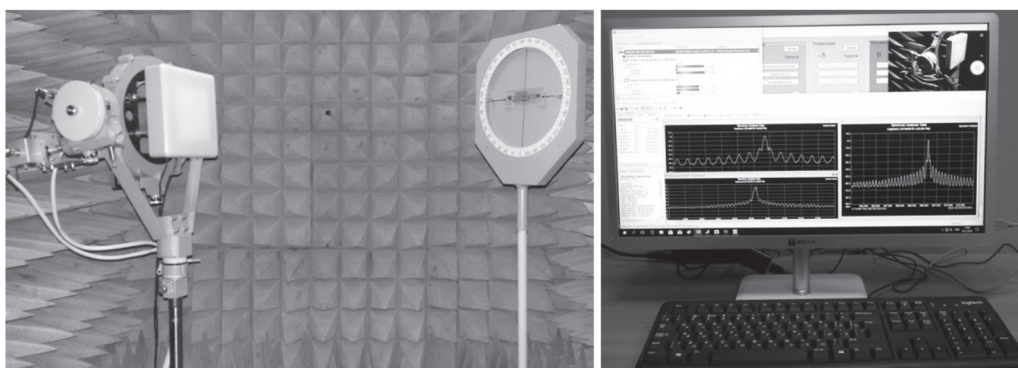


Рисунок 3. – Внешний вид УЛМ RFID УВЧ диапазона с КИОиП

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. ISO/IEC 18046:2006 «Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Radio frequency identification device performance test methods».
2. ISO/IEC TR 18047-3:2011 «Information technology – Radio frequency identification device conformance test methods – Part 3: Test methods for air interface communications at 13,56 MHz», IDT.
3. ISO/IEC 18047-6:2012 «Information technology – Radio frequency identification device conformance test methods – Part 6: Test methods for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz».
4. ETSI EN 302 208-1 V1.2.1 (2007-07) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio Frequency Identification Equipment operating in the band 865 MHz to 868 MHz with power levels up to 2 W; Part 1: Technical requirements and methods of measurement.
5. CISC RFID MeETS System, <https://www.cisc.at/meets.html>.
6. RFID Testing and Measurement for Tag Development and Selection. Tagformance Pro. © Voyantic Ltd. 4/2018. www.voyantic.com.
7. Tescom RFID Tester: <http://www.tescom-lab.com>.
8. National Instruments RF and Wireless Test products and Solutions: <http://www.ni.com/rf/>.
9. Nexjen RFID Conformance Test System <http://www.nexjen.com/products/test-engineering>.

KIRYLCHUK V. B.¹, KIZHLAI I. N.¹, POPOV A. A.¹, ZDOROVTSSEV S. V.²

¹ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

² Joint-Stock Company «MNIPI»

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR RESEARCH AND VERIFICATIONS OF HF AND UHF RFID SYSTEMS

Summary. *The structure and design of the hardware and software complex for studying, research and verification of the fundamental characteristics of components and devices of the HF and UHF of the RFID systems are presented.*

ДАТЧИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация. В связи с интенсивным развитием и внедрением в практику беспилотных малоразмерных летательных аппаратов (БМЛА) представляется целесообразным и эффективным привлечение технических средств этого класса в сферу радиозоологического мониторинга. Для использования в составе БМЛА предлагается линейка созданных датчиков радиации – интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения для дозиметрического и спектрометрического дистанционного контроля территорий и объектов. Представлены результаты натурных испытаний, проведенных в радиоактивно-загрязненных зонах Республики Беларусь, их сравнение с данными моделирования. Приведены примеры использования отдельных блоков детектирования в составе БМЛА.

Широкое распространение малоразмерных беспилотных систем в качестве средств обнаружения разноплановых наземных объектов стимулировало нарастающий интерес к бортовым малогабаритным устройствам детектирования гамма-излучения. Цель их применения в составе малоразмерных и миниатюрных летательных аппаратов – обеспечение дистанционного радиационного мониторинга окружающей среды в зонах, прилегающих к радиационно-опасным и радиационно-чувствительным объектам, радиоактивных выпадений на местности, поиск, обнаружение и локализация утерянных гамма-источников и т.д.

Для использования в составе таких летательных аппаратов предлагается линейка интеллектуальных блоков детектирования (датчиков) гамма-излучения, способная выполнять следующие функции в зависимости от их назначения и решаемых задач [1, 2]:

- обнаруживать источники радиоактивного загрязнения;
- локализовать источники или зоны загрязнения;
- измерять уровни радиации на высоте полета;
- приводить измеренное значение мощности дозы на высоте полета к уровню 1 метр (при наличии информации о высоте полета над поверхностью объекта);
- оценивать плотность поверхностного загрязнения гамма-излучающими радионуклидами для участков местности;
- осуществлять идентификацию радионуклидного состава загрязнения по гамма-спектрам.

В таблицах 1–2 приведены основные технические характеристики интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения, из числа которых может быть выбран потребителем приемлемый вариант в соответствии с допустимой массой полезной нагрузки и целевым применением. Во всех типах блоков детектирования осуществляется полная обработка информации до получения измеряемой величины (мощность дозы, спектр гамма-излучения), поступающей по интерфейсу связи на бортовые устройства беспилотных малоразмерных летательных аппаратов (БМЛА).

**Таблица 1. – Спектрометрические блоки детектирования
на основе сцинтилляторов NaI(Tl)**

Основные характеристики	БДКГ-201М	БДКГ-203М	БДКГ-205М	БДКГ-11М БДКГ-211М	БДКГ-19М БДКГ-219М
Детектор NaI(Tl)	Ø25×16мм	Ø25×40мм	Ø40×40мм	Ø63×63мм	Ø63×160мм
Диапазон энергий	20 кэВ – 3 МэВ				
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МД)	50 нЗв/ч – 1 мЗв/ч	30 нЗв/ч – 500 мкЗв/ч	30 нЗв/ч – 300 мкЗв/ч	30 нЗв/ч – 150 мкЗв/ч	0,03 – 50 мкЗв/ч
Предел основной относительной погрешности измерения МД	±20 %				

Основные характеристики	БДКГ-201М	БДКГ-203М	БДКГ-205М	БДКГ-11М БДКГ-211М	БДКГ-19М БДКГ-219М
Энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ	$\pm 20\%$ (40 кэВ – 3 МэВ)				
Чувствительность к гамма-излучению ^{137}Cs	имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹				
	165	400	800	2450	6000
Временная дискретность измерения	1/3 с	1/3 с	1/3 с	1/3 с	1/3 с
Типовое энергетическое разрешение для энергии 662 кэВ (^{137}Cs)	8 %	8 %	7,5 %	7,5 %	8 %
Степень защиты	IP68	IP68	IP68	IP54 IP68	IP54 IP68
Интерфейс	USB / RS232 / RS485				
Диапазон рабочих температур	-35...+55°C	-35...+55°C	-35...+55°C	-20...+50°C -35...+55°C	-20...+50°C -35...+55°C
Относительная влажность воздуха ($\leq 35^\circ\text{C}$ без конденсации влаги)	$\leq 98\%$	$\leq 98\%$	$\leq 98\%$	$\leq 95\%$ $\leq 98\%$	$\leq 95\%$ $\leq 98\%$
Габаритные размеры, масса	Ø63×313 мм 1 кг	Ø63×333 мм 1 кг	Ø63×333 мм 1 кг	Ø78×320 мм 1,7 кг Ø90×350 мм 2 кг	Ø76×422 мм 3 кг Ø90×430 мм 3,3 кг

**Таблица 2. Дозиметрические блоки детектирования
на основе сцинтилляционной пластмассы**

Основные характеристики	БДКГ-04 БДКГ-204	БДКГ-24 БДКГ-224	БДКГ-30 БДКГ-230	БДКГ-32 БДКГ-232	БДКГ-103
Детектор на основе сцинтилляционной пластмассы	Ø30×15 мм	Ø50×40 мм	Ø50×40 мм	Ø70×80 мм	200×180× ×70 мм
Диапазон энергий	15 кэВ – 3 МэВ 60 кэВ – 3 МэВ	30 кэВ – 3 МэВ	50 кэВ – 3 МэВ	35 кэВ – 3 МэВ	80 кэВ – 3 МэВ
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы	50 нЗв/ч – 10 Зв/ч	30 нЗв/ч – 1 Зв/ч	–	30 нЗв/ч – 500 мЗв/ч	30 нЗв/ч – 50 мЗв/ч
Диапазон измерения мощности поглощенной дозы	–	–	30 нГр/ч – 1 Г/ч	–	–
Предел основной относительной погрешности измерений	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$ $\pm 15\%$	$\pm 20\%$ $\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
Чувствительность к гамма-излучению ^{137}Cs	имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹		имп·с ⁻¹ / мкГр·ч ⁻¹	имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹	
	70	530	600	1700	15000

Основные характеристики	БДКГ-04 БДКГ-204	БДКГ-24 БДКГ-224	БДКГ-30 БДКГ-230	БДКГ-32 БДКГ-232	БДКГ-103
Энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ	±35 % ±25 %	±25 %	±25 %	±25 %	±40 %
Временная дискретность измерения	0,1 с	0,1 с	0,1 с	0,1 с	0,1 с
Степень защиты	IP64 IP57	IP64 IP67	IP64 IP67	IP64 IP67	IP64
Интерфейс	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485	RS232 RS485
Диапазон рабочих температур	-35...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+50°C -40...+55°C	-40...+55°C
Относительная влажность воздуха (≤35°C без конденсации влаги)	≤98 %	≤98 %	≤98 %	≤95 % ≤98 %	≤95 %
Габаритные размеры, масса	Ø60×205 мм, 0,45 кг Ø60×230 мм, 0,55 кг	Ø60×200 мм, 0,65 кг Ø60×250 мм, 0,75 кг	Ø60×200 мм, 0,65 кг Ø60×200 мм, 0,75 кг	Ø76×245 мм, 0,78 кг Ø76×245 мм, 0,9 кг	360×220× ×80 мм, 5 кг

В частности, высокочувствительный блок детектирования БДКГ-111 и широкодиапазонный блок детектирования БДКГ-04 гамма-излучения в дозиметрическом решении используются в аппаратуре дистанционного радиационного контроля, созданной для оснащения белорусского летательного аппарата «Буревестник» (рисунки 1.1, 1.2).

Высокочувствительный спектрометрический блок детектирования БДКГ-11М, способный обеспечивать одновременно измерение мощности дозы гамма-излучения, а также спектра гамма-излучения для последующей идентификации радионуклидов в наземном комплексе управления и приема информации, установлен и апробирован на октокоптере «БАС» в Болгарии (рисунок 1.3) для построения карты радиационной обстановки в зоне пункта захоронения радиоактивных отходов.

Широкодиапазонный дозиметрический блок детектирования БДКГ-24 апробирован в составе октокоптера и БМЛА планерного типа российской компании «ZALA AERO GROUP» (рисунки 1.3, 1.4).

Для белорусского БМЛА вертолетного типа создан экспериментальный образец аппаратуры «АГСАТ» на основе блоков детектирования БДКГ-211М и БДКГ-24 (рисунок 1.6), а также макет «АГСАТ-1» на основе блока детектирования БДКГ-103 (рисунок 1.7).

Принцип дистанционной гамма-спектрометрии с последующей идентификацией радионуклидов во всех приведенных в таблице 1 блоках детектирования, а также других типов с использованием NaI(Tl) – сцинтилляционных спектрометров, наиболее эффективен для измерений на высотах полета не более 50 м. В таких случаях аппаратный спектр не перенасыщен компонентой рассеянного гамма-излучения, что позволяет успешно осуществить распознавание радионуклидов по линии полного поглощения в пределах энергетического разрешения. Более успешно благодаря значительно лучшему энергетическому разрешению задача идентификации может быть решена с использованием LaBr₃ или SrI₂(Eu) сцинтилляционных спектрометров, разработка которых завершается к концу 2019 г.

Принцип дистанционной дозиметрии заключается в определении усредненных по площади уровней радиации на высоте полета с использованием «высотных коэффициентов пересчета» к уровню 1 м от поверхности земли. Наименьшая зависимость (методическая погрешность) этих коэффициентов от энергии гамма-излучения наземных излучателей обеспечивается при высотах полета не более 150 м. Энергия первичного гамма-излучения – наиболее влияющий, но не единственный фактор,

сказывающийся на точности определения уровней мощности дозы на высоте 1 м. Другие факторы – аппаратная погрешность, погрешность из-за влияния реальных условий измерений и др. также вносят свой вклад, в итоге суммарная погрешность [3] дистанционных измерений в диапазоне высот полета до 150 м составляет 50 % при доверительной вероятности равной 0,95.

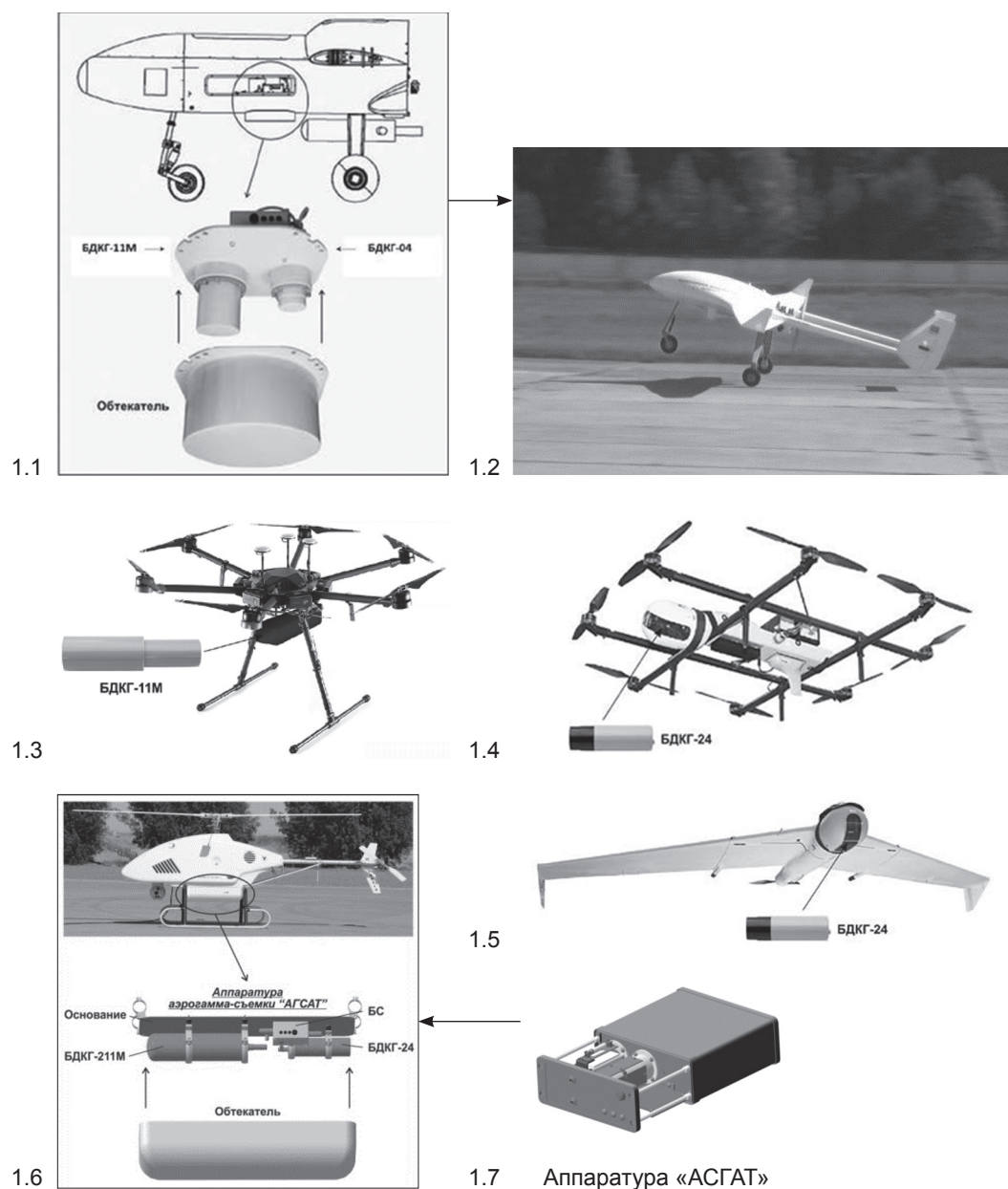


Рисунок 1. – Аппаратура радиационного контроля для:

1.1 и 1.2 – летательного аппарата «Буревестник»; 1.3 – октокоптера «БАС»;

1.4 – октокоптера и 1.5 – БМЛА планерного типа «ZALA AERO GROUP»;

1.6 и 1.7 – варианты для беспилотного вертолета

Проблема оценки масштаба и плотности загрязнения местности радионуклидом ^{137}Cs по-прежнему актуальна на территории стран, пострадавших от последствий Чернобыльской катастрофы, а также в Японии после аварии на АЭС «Фукусима». Имеется широкий спектр приборов и аппаратуры, позволяющий провести измерение мощности дозы и спектрального распределения гамма-излучения в полевых условиях с GPS-привязкой на местности. Но без соответствующего программного средства комплексный анализ полученных данных крайне трудоемкий и непроизводительный.

Ранее нами было разработано программное обеспечение «GARM», которое служит инструментом визуализации и анализа данных радиационных измерений, выполненных приборами и аппаратурой с наличием функции GPS-привязки на местности. В процессе полевых испытаний оборудования радиационного контроля (использовался прибор МКС-АТ6101С с блоками детектирования БДКГ-11М и БДКГ-04) на зараженной местности, была выявлена необходимость в предоставлении пользователю аналитической информации о масштабе и поверхностной плотности загрязнения местности радионуклидом ^{137}Cs на основе данных воздушной радиационной съемки. Для оценки масштаба загрязнения был разработан и реализован алгоритм построения изолиний и градиентной заливки области по интересующему параметру [4].

В ходе натурных испытаний получены большие массивы дозиметрических данных о радиоактивном загрязнении территории: значения мощностей доз гамма-излучения на уровне 1 м (рисунок 2) от поверхности земли и значения мощностей доз гамма-излучения на высоте 50, 100, 150 и 200 м над поверхностью земли с борта вертолета МИ-2. Результатом обработки данных в программе GARM является оценка мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 м над поверхностью земли по значениям мощности дозы гамма-излучения, измеренным на высотах от 50 до 200 м. При сличении результатов дистанционной съемки и наземных измерений на 1 м установлено их совпадение в пределах $\pm 10\%$ (таблица 3). При этом в качестве высотных коэффициентов пересчета использовались их численные значения, полученные путем математического моделирования (метод статистических испытаний Монте-Карло) с учетом высоты полета, температуры и давления атмосферы, глубины слоя преимущественного залегания радионуклида ^{137}Cs в почве, плотного лугового травяного покрова, а также экранирования блоков детектирования корпусом вертолета МИ-2.

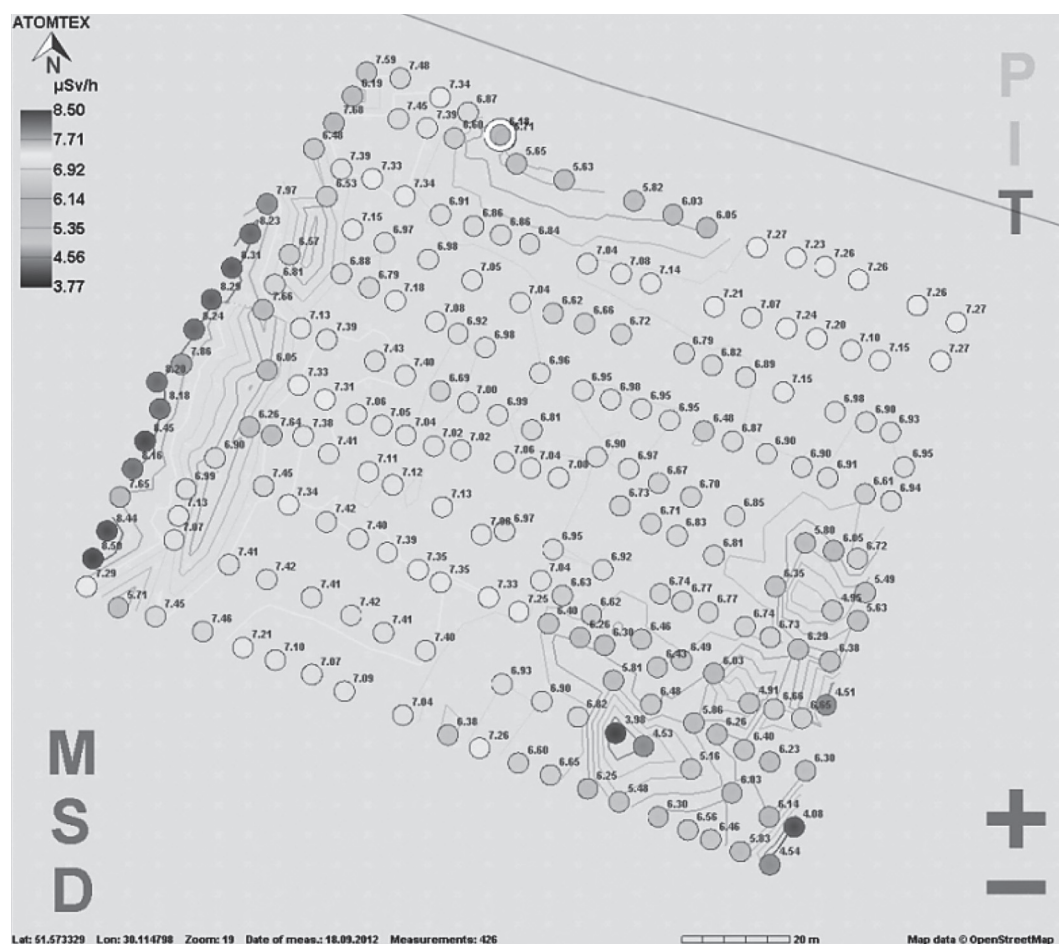


Рисунок 2. – Результаты пешеходного сканирования

Таблица 3. – Сличение дистанционной съемки и наземных измерений на высоте 1 м над поверхностью земли результатов

Высота h , м	$K_{h(11M)}^{экс}$	$K_{h(04)}^{экс}$	$\overline{K}_h^{экс}$	$K_h^{теор}$	$K_{nn}^{теор} \cdot K_h^{теор}$ ($K_h^{теор}$ с учетом поправки K_{nn})	Относительное отклонение теоретических данных от экспериментальных, %
50	1,87	2,28	2,07	2,16	1,94	+6,5
100	3,03	3,63	3,33	3,58	3,23	+3,0
150	4,28	4,96	4,62	5,64	5,08	-9,1
200	7,07	7,85	7,46	8,77	7,90	-5,8

На рисунках 3 и 4 приведены картограммы мощности дозы гамма-излучения при воздушной гамма-съемке на выбранном вполне однородном по уровням радиации участком-мишенью на территории ПГРЭЗ.

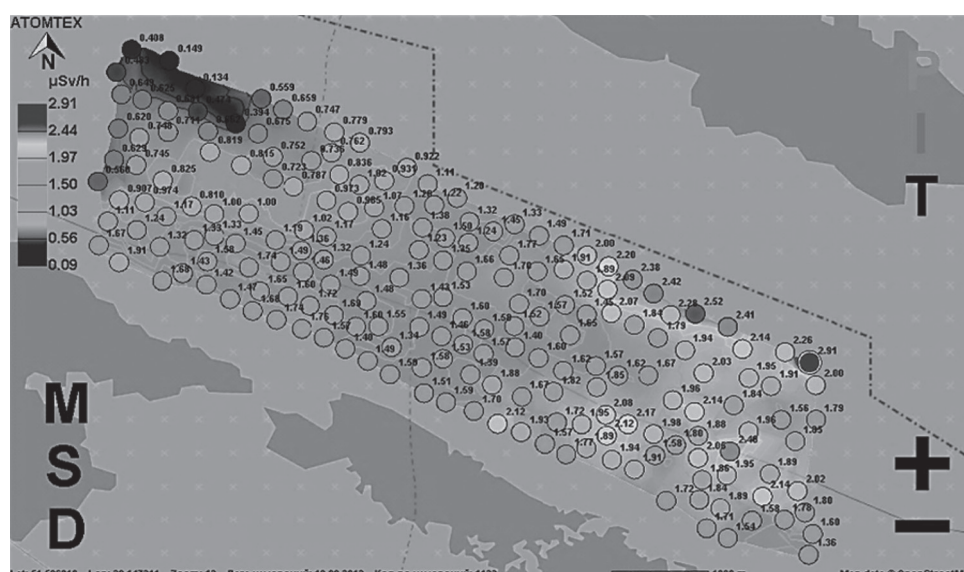


Рисунок 3. – Данные аэрогамма-съемки в ПГРЭЗ. Мощность дозы гамма-излучения на высоте 100 м над поверхностью земли. Размер площадки 8 км на 2 км

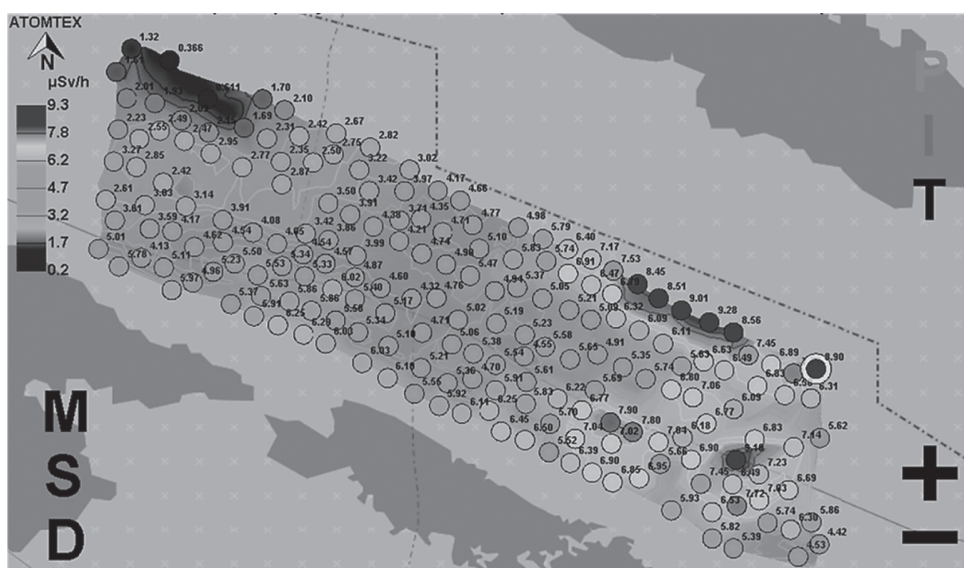


Рисунок 4. – Данные по оценке мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 м по результатам измерений на высоте 100 м

С использованием базы данных ПГРЭЗ по удельной активности и поверхностной плотности загрязнения почв радионуклидом ^{137}Cs было проведено их сравнение с данными по оценке плотности загрязнения, полученными при наземной и воздушной съемке. Предварительный анализ данных показал, что расхождение в определении поверхностной плотности загрязнения находится в пределах $\pm 30\%$ (рисунок 5).

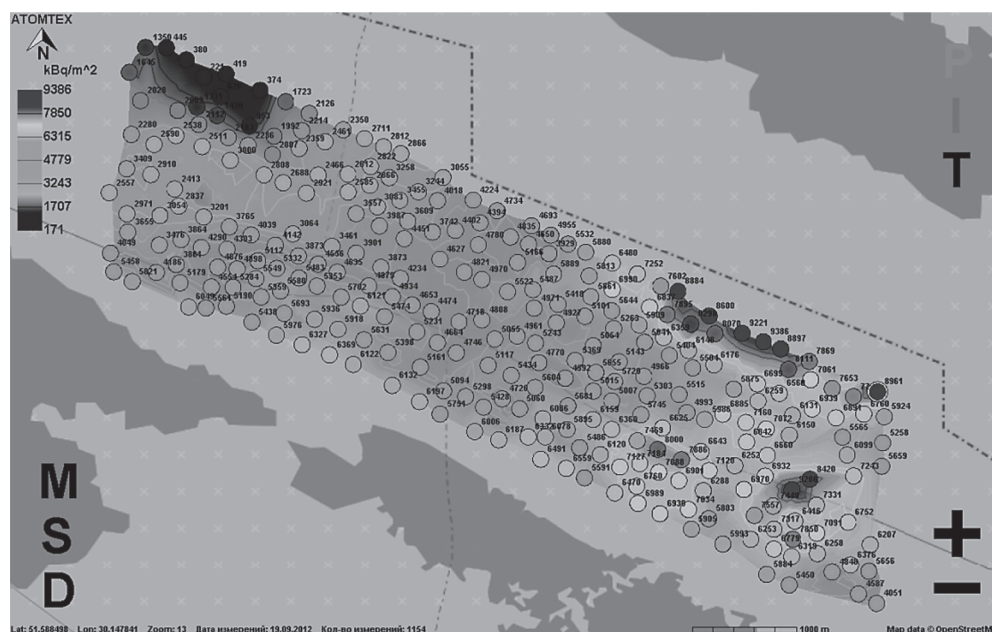


Рисунок 5. – Оценка плотности загрязнения местности радионуклидом ^{137}Cs (средняя глубина залегания ^{137}Cs в почве на всей территории составляет 5 см, средняя плотность почвы $1,26 \text{ г/см}^3$)

В случае точечных гамма-источников или локальных загрязнений (несколько десятков метров) наиболее целесообразным представляется решение задачи их поиска и обнаружения. При этом по направлению полета будет наблюдаться нарастание и спад уровней радиации, точка максимума фиксируется координатами его местоположения, а затем осуществляется пролет через данную точку, перпендикулярно начальному направлению полета.

На рисунках 6 и 7 представлены данные, полученные в процессе поиска, обнаружения и оценки уровней радиации от точечных гамма-источников бортовой аппаратурой установленной на БМЛА. Результаты свидетельствуют об успешном решении поставленной задачи.

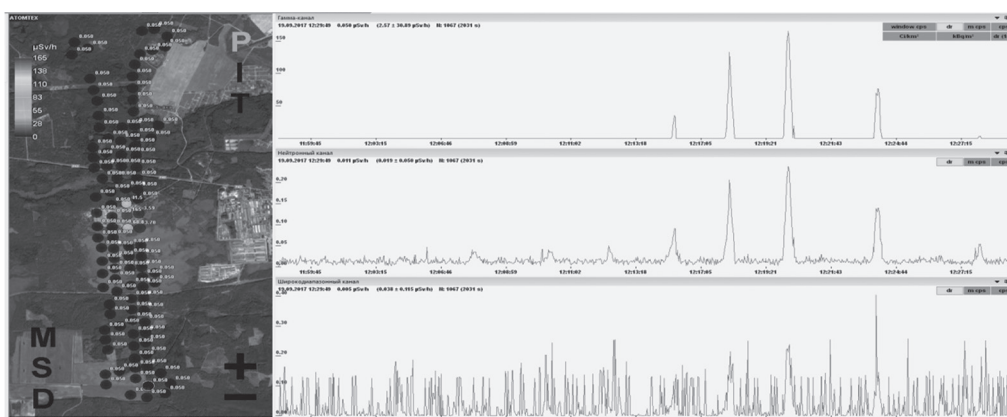


Рисунок 6. – Данные аэрогамма-съемки точечных источников для высоты полета 200 м (ПО «GARM»)

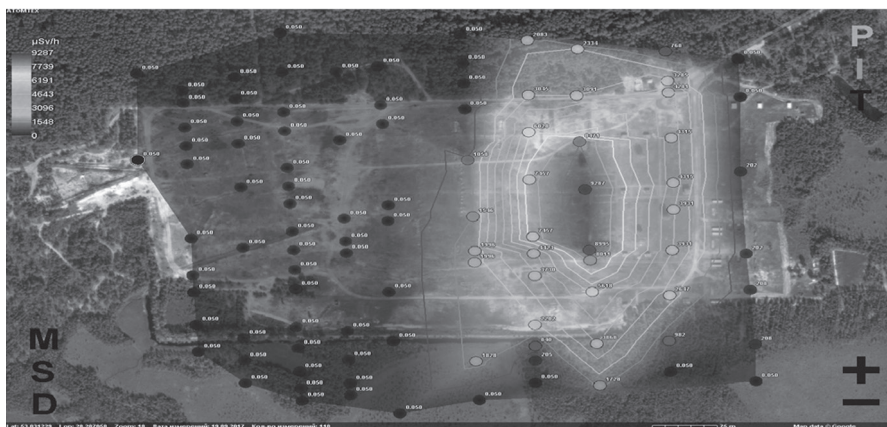


Рисунок 7. – Обнаружение, определение местоположения и оценка МД. Карта радиационных уровней от точечных источников для высоты 1 м по результатам аэрогамма-съемки на высоте 200 м (ПО «GARM»)

Работы по расширению линейки интеллектуальных датчиков радиации продолжаются. В частности, возникают потребности в создании измерительных каналов дозиметрического и спектрометрического назначения, в т.ч. широкодиапазонных блоков детектирования массой 100–400 г. На данный момент времени уже имеются экспериментальные образцы, удовлетворяющие этим требованиям.

Полученные результаты представляются актуальными для данного весьма быстро развивающегося направления использования беспилотных систем [5, 6].

В настоящее время рассматривается возможность оснащения средствами радиационного контроля таких беспилотников, как «Бусел-10», «Беркут-2», «Суперкам-С100», «Суперкам-С350».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Аварийно-спасательные работы при ликвидации последствий аварий на радиационно-опасных объектах. Общие требования. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 22.8.06-2002.
2. Израэль, Ю. А. Гамма-излучение радиоактивных выпадений / Ю. А. Израэль, Е. Д. Стукин // М., Атомиздат, 1967.
3. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. ГОСТ Р 8.736-2011.
4. Отчет о проведении натурных испытаний спектрометрических радиационных сканеров АТ6101С, изготовленных по заказу подготовительной комиссии организации договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Фонды УП «АТОМТЕХ», Минск, 2012.
5. Бахур, А. Е. Перспективы использования БПЛА в радиоэкологии и при поисковых геологоразведочных работах / А. Е. Бахур, А. В. Стародубов // АНРИ. – 2016. – № 3. – С. 2–8.
6. Кожемякин, В. А. Интеллектуальные датчики радиации для малоразмерных беспилотных систем / В. А. Кожемякин, В. П. Полищук // 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 20–22 мая 2017 г.): сб. научных статей. В 3 ч. Ч. 1. – Минск, 2017. – С. 164–173.

KOZHEMYAKIN V. A.
Atomtex SPE, Minsk, Belarus

GAMMA RADIATION DETECTION UNITS FOR USE WITH REMOTELY PILOTED AIRCRAFTS

Summary. Because of intensive development and practical application of small unmanned aerial vehicles into practice, it seems appropriate and effective to apply equipment of this class to radioecological monitoring. The range of new smart gamma radiation detection units for use as part of such small UAVs, capable of dosimetric and spectrometric remote monitoring of territories and sites, is offered.

The results of full-scale tests conducted in contaminated zones on the territory of the Republic of Belarus and their comparison with simulation data are presented. Examples of use of individual detection units in assembly with small UAVs are given.

Г. В. КОЗАК, С. В. ДАНИЛОВИЧ, А. Н. ТИХОМИРОВ, А. В. ШАРАНДО

Научно-производственное унитарное предприятие «Дисплей»
открытого акционерного общества «МНИПИ»

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР СО ВСТРОЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР, УСТОЙЧИВЫЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

Аннотация. Разработана конструкция и технология изготовления низкомultipлексного жидкокристаллического индикатора со встроенным управлением для изделий спецтехники. Индикатор работает при пониженной рабочей температуре минус 40°C, а при необходимости, для обеспечения высокого быстродействия при отрицательных температурах, вплоть до минус 50°C, используется специально разработанная система подогрева на основе оптически прозрачного тонкопленочного токопроводящего покрытия. Радиационная стойкость индикатора обеспечивается за счет подбора специальных материалов и комплектующих изделий. Индикатор содержит встроенную высокоэффективную светодиодную подсветку.

Создание современных устройств отображения информации для изделий спецтехники требует принципиально новых подходов к решению таких задач как обеспечение стойкости к спецвоздействиям и быстродействие при отрицательных температурах до минус 50°C.

Расширение диапазона рабочих температур жидкокристаллических устройств (ЖКУ) является сложной технической проблемой, представляющей собой комплекс научно-технических задач, сопряженных с поиском конструкционных, технологических и материаловедческих решений. Наиболее значимыми из них являются разработка широкотемпературных жидкокристаллических композиций, а также совершенствование конструкции ЖКУ в целом.

В настоящее время разработаны и используются в промышленном масштабе жидкокристаллические композиции с широким диапазоном рабочих температур. Но, к сожалению, расширение температурного диапазона в сторону отрицательных температур существования мезофазы достигается за счет значительного ухудшения таких параметров композиций как вязкость, пороговое и рабочее напряжения, которые определяют быстродействие ЖКУ. Например, ЖКМ фирмы «Merck» (Германия), мирового лидера в этой области, обеспечивают работоспособность ЖКУ в температурном интервале от -40 до +85°C, но при этом времена переключения при температуре минус 40°C составляют более 5 секунд, а температурный дрейф порогового напряжения превышает минус 6 мВ/градус, причем его величина аномально увеличивается при температурах ниже минус 30°C. Это приводит к тому, что в устройствах с multipлексным режимом управления $M=1/8$ и выше, величина напряжения, необходимая для управления устройством, становится выше чем величина напряжения, которое обеспечивают управляющие драйверы и устройство не работает. Это накладывает ограничения для использования многих типов ЖКУ при отрицательных температурах. К сожалению, физические свойства органических соединений, используемых при создании жидкокристаллических композиций, такие как вязкость и анизотропия диэлектрической проницаемости являются предельно возможными, так что ожидать существенного прорыва в этой области в ближайшие годы не приходится.

Единственной альтернативой является использование высокоэффективных миниатюрных нагревателей. Одним из таких направлений является создание высокоэффективной системы подогрева на основе прозрачного токопроводящего покрытия.

Учитывая особенности конструкции ЖКУ можно сформулировать основные требования к нагревателю:

- оптическое пропускание в видимой области спектра не менее 90 %;
- возможность формирования в виде тонкой пленки на одной из подложек ЖКУ;
- устойчивость к технологическим режимам, используемым в производстве ЖКУ.

Существует ряд окислов металлов, которые при толщине слоя порядка 10–50 нм, являются оптически прозрачными, обладая при этом электрической проводимостью.

В настоящее время одним из наиболее востребованных среди металлооксидных полупроводников является оксид индия, легированный оловом (ITO).

Уникальная особенность пленок этого материала заключается в том, что они, будучи электропроводящими, прозрачны для света видимой части спектра и отражают в ближней ИК-области.

Такое сочетание свойств делает весьма актуальным исследование пленок оксида индия для их применения в различных областях техники.

Достоинством пленок ИТО является также то, что для их распыления можно использовать стандартное вакуумное оборудование, а создание топологического рисунка по ИТО – отработанный технологический процесс, широко используемый в производстве ЖКУ.

Общий вид такой конструкции нагревателя приведен на рис. 1.

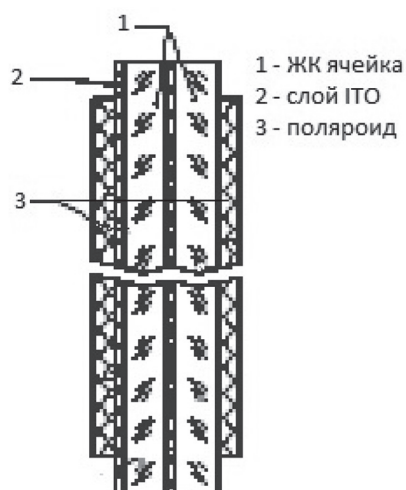


Рисунок 1. – Прозрачный нагреватель для жидкокристаллического устройства

Для контактирования нагревателя с источником подогрева использовались стандартные металлические выводы, которые обеспечивают контакт внешних выводов ЖКУ с печатной платой. Переходное сопротивление порядка 5 Ом обеспечивалось специальным токопроводящим клеем на основе эпоксидной смолы.



Рисунок 2. – Общий вид ЖКУ

Для определения эффективности нагревателя определялась температура на поверхности подложки в зависимости от режимов и длительности нагрева.

Подложка с нагревателем и закрепленным на ней датчиком температуры помещалась в Камеру климатическая СМ-60/100-80-ТХ и охлаждалась до минус 40°C.

Температура контролировалась Гигрометром-термометром ГТЦ-2 с датчиком рt 100. Напряжение на подсветке 12 В, мощность 3 Вт, удельное сопротивление 45 Ом·м.

Зависимость температуры на поверхности подложки с нагревателем от мощности нагрева и длительности выдержки приведена на графике.

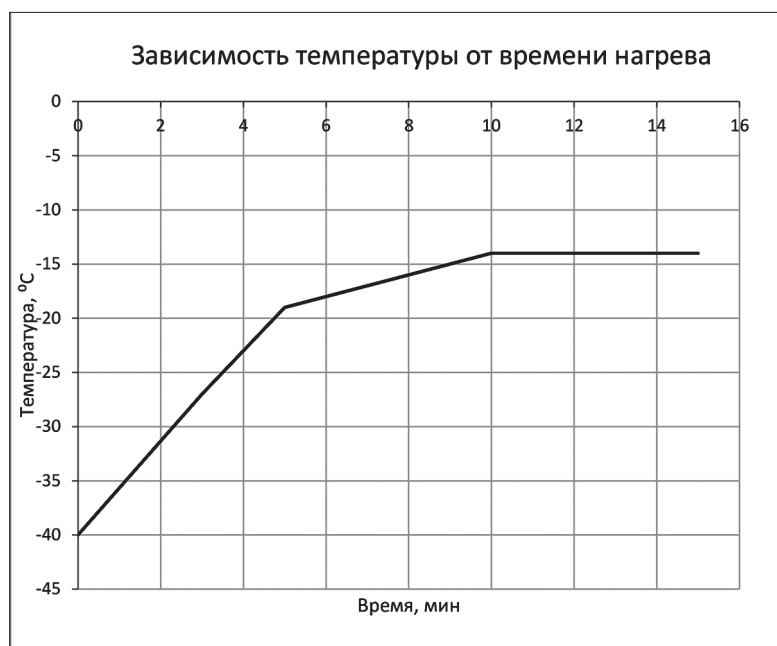


График 1. – Зависимость температуры ЖКУ от времени нагрева

Как видно из графика, уже в течение трех минут происходит нагрев подложки до -27°C , то есть до температуры, при которой обеспечиваются приемлемые времена переключений порядка 1–2 секунд. Через 10 минут при температуре -14°C наступает равновесие между процессом нагрева и потерей тепла за счет теплообмена. Времена переключения дисплея при этом составляет порядка 700 мсек.

Второй важнейшей задачей являлась обеспечение радиационной стойкости ЖКУ.

С учетом совокупности ряда параметров, определяющих электрооптические характеристики ЖКУ в заданном диапазоне рабочих температур и стойкость к воздействию специальных факторов был выбран мультиплексный метод управления с параметрами мультиплексирования $D=1/2$ и $B=1/2$, описанный, в частности, на сайте [1].

В качестве физической реализации схемы управления ЖКУ, устойчивой к воздействию специальных факторов, рассматривались три варианта.

Во-первых, вариант использования готовых, серийно освоенных отечественными производителями специализированных микросхем-драйверов. Таковых не оказалось. Однако, на НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» в свое время был разработан спецстойкий аналог драйвера ЖКИ типа PCF8576С фирмы «Philips» («NXP» в настоящее время) [2], который серийно, по разным причинам и, в первую очередь, из-за низкой потребности, серийно не был освоен.

Во-вторых, возможна реализация схемы управления ЖКУ на основе базовых матричных кристаллов, производства ряда отечественных производителей. От которого оказались по причине сжатости сроков и средств на разработку.

В-третьих, вариант на стандартных цифровых микросхемах типа 74(54)НС595 с динамическим управлением, в частности 5514БЦ1У1-595 производства АО «Ангстрем», который и был реализован в рассматриваемом ИВУ.

Наиболее критичными к воздействию специальных факторов являются комплектующие изделия, выполненные по КМОП технологии, а именно: интегральная КМОП микросхема 5514БЦ1У1-595 производства АО «Ангстрем» и полевой транзистор 2П524А9 производства ОАО «Интеграл». По данным, приведенным производителями на своих сайтах, указанные комплектующие изделия обеспечивают стойкость

к воздействию специальных факторов 7.И, 7.С, 7.К по ГОСТ РВ20.39.414.2 с ниже-приведенными характеристиками:

	7.И1	7.И6	7.И7	7.И8	7.С1	7.С4	7.К1	7.К2
5514БЦ1У1-595	3УС	2х5УС	100х1УС	0,02хУС	4УС	4УС	0,5·2К	–
2П524А9	3УС	4УС	4·4УС	–	5·4УС	1УС	5·1К	0,5·1К

Другие, используемые в изделии комплектующие изделия, менее критичны к воздействию специальных факторов и во внимание не принимались.

По приведенным данным, с учетом того, что непосредственно сам жидкокристаллический индикатор после воздействия указанных факторов незначительно изменяет свои электрооптические характеристики, что показал ряд исследований, проведенный нашим предприятием ранее, расчетным путем можно установить устойчивость к воздействию специальных факторов ЖКУ в целом.

В результате выполнения работы определена возможность создания низкомultipлексных ЖКУ с расширенным диапазоном рабочих температур с устойчивостью к специальным воздействующим факторам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. <https://www.display.by/ru/metvozb.htm>.
2. <https://www.nxp.com/products/analog/interfaces/lcd-drivers/lcd-segment-drivers/universal-lcd-driver-for-low-multiplex-rates:PCF8576C>.

KOZAK G., DANILOVICH S., TIHOMIROV A., SHARANDA A.

«Display» Research & Development Unitary Enterprise of «MNIPI» Joint Stock Company

LCD DISPLAY WITH EMBEDDED CONTROL FOR OPERATION OVER WIDE TEMPERATURE RANGE AND STABLE UNDER SPECIAL EFFECTS

Summary. Production process and design of low-multiplexed LCD display with embedded control for special application devices are developed. Displays operate at low operating temperatures of minus 40°C. A specially developed heating system based on optically transparent thin-film current-conducting coating is used to allow for fast response at negative temperatures up to minus 50°C, if required. Display radiation stability is achieved by the choice of special materials and components. Highly effective LED backlighting is implemented in displays.

Д. И. КОМАР, Е. В. БЫСТРОВ, Е. А. КОНОВАЛОВ, С. В. ПРИБЫЛЕВ
Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ЛИЧНОГО СОСТАВА ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ РАДИАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ

Аннотация. В работе представлены назначение и основные возможности и функции разработанного программно-аппаратного комплекса «SimRad», позволяющего имитировать виртуальные источники гамма-излучения, радиоактивное загрязнение местности и оценивать параметры радиационного поля. Приводятся результаты проверки корректности генерации программой поля мощности дозы для заданных источников посредством Монте-Карло моделирования.

Важным элементом обеспечения готовности аварийно-спасательных формирований к реагированию и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций с радиационным фактором на объектах атомной отрасли является уровень профессиональной подготовки личного состава. Персонал служб специального назначения, обеспечивающих реагирование на ядерные и радиационные аварии и инциденты должен уметь точно и правильно оценивать радиационную обстановку в этих условиях, принимать грамотные решения для того, чтобы минимизировать потери личного состава и гражданского населения, а также определить время начала аварийно-спасательных и других неотложных работ.

С целью эффективной подготовки персонала к действиям используются практико-ориентированные методы и средства. В настоящее время к числу таких продуктов относятся широко используемые системы программного обеспечения.

В докладе представлено разработанное программно-аппаратное средство моделирования радиоактивного загрязнения местности «SimRad». Программа «SimRad» позволяет имитировать виртуальные источники ионизирующего излучения и радиоактивное загрязнение местности с расчётом распределения интенсивности гамма-излучения по заданным параметрам источника. Время расчета зависит от количества источников и размеров учебной площадки. Корректность расчета результирующего распределения интенсивности излучения от точечных и площадных источников была проверена посредством Монте-Карло моделирования. Программное средство разрабатывалось с использованием эмпирической информации о поверхностных загрязнениях местности радионуклидами [1, 2].

Возможности и функции программы:

- задание параметров учебной площадки на картах OpenStreetMap, Google, Яндекс;
- расположение источников гамма-излучения;
- моделирование точечных источников гамма-излучения с радионуклидом ^{137}Cs ;
- моделирование поверхностного загрязнения почвы радионуклидом ^{137}Cs ;
- генерирование поля мощности дозы гамма-излучения в зоне учебной площадки;
- отслеживание положения и дозиметрических параметров тренируемого личного состава;

- отслеживание положения знаков ограждения, устанавливаемых личным составом. На рисунке 1 приведен скриншот главного окна программы «SimRad».

Требования к участку местности и оснащению специальных служб, для обеспечения работы программного комплекса:

- площадь учебной площадки – не более 4 км²;
- размер одной из сторон учебной площадки – не более 2 км;
- количество знаков ограждения на одного тренируемого – до 100 шт;
- защищенный, карманный всепогодный компьютер для тренируемого с установленной программой «SimRadMobile» для симуляции радиационного монитора (поискового дозиметра);
- ноутбук для тренера с программой «SimRad» для формирования задания и контроля хода учений;
- связь 3G для передачи данных между тренером и тренируемыми.

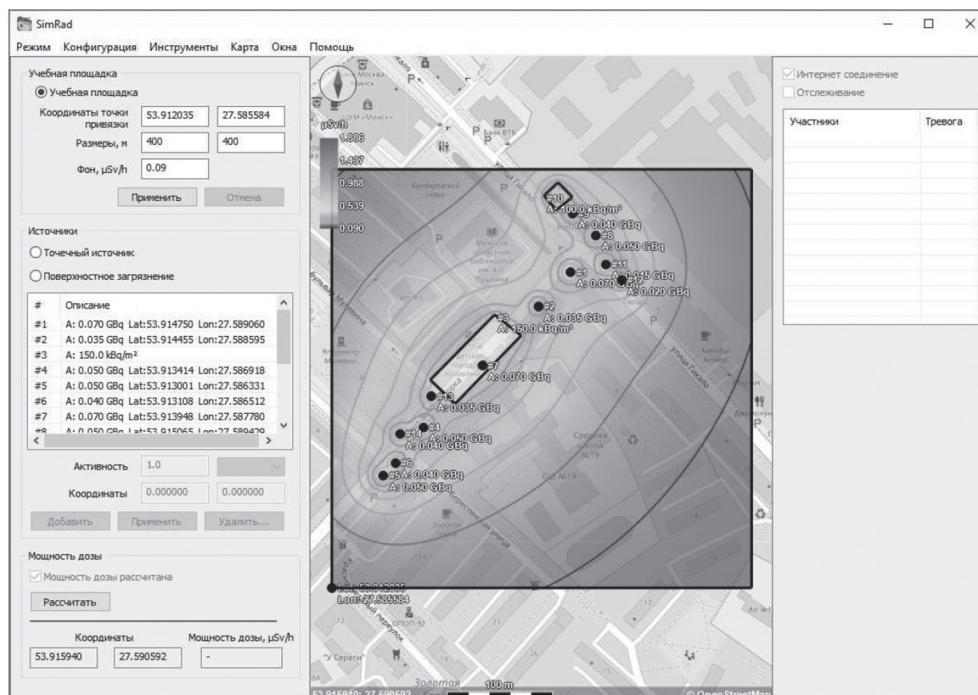


Рисунок 1. – Главное окно программы «SimRad»

Контроль участников:

- отображение списка участников;
- местоположение каждого участника;
- мощность дозы в точке нахождения каждого участника;
- координаты знаков ограждения, установленных каждым участником (рисунок 2).

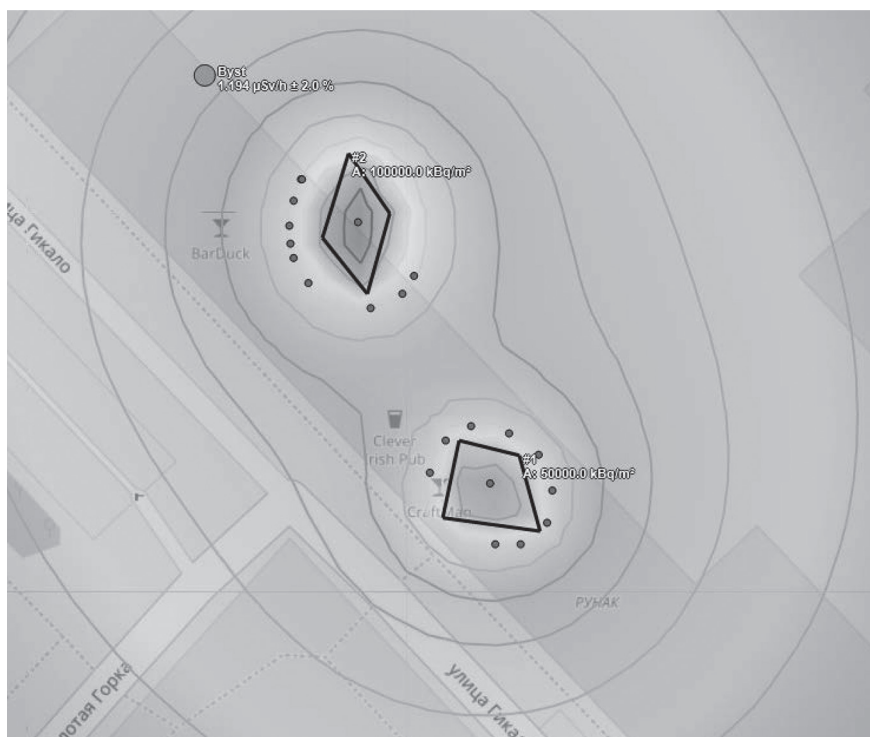


Рисунок 2. – Контроль расстановки знаков ограждения участниками тренировки

Мобильная версия программы «SimRadMobile» для моделирования радиационного монитора устанавливается на КПК. Она позволяет имитировать работу реального

поискового дозиметра-радиометра гамма-излучения. Программа позволяет работать в двух режимах: поисковый режим и режим измерения мощности дозы. Имеет возможность выбора блоков детектирования из широкого набора. Каждый блок детектирования характеризуется индивидуальной чувствительностью и диапазоном измерения мощности дозы по аналогии с реальным прибором (из состава дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М).

Пользователь программы «SimRadMobile» получает следующую информацию:

- мгновенную скорость счета импульсов гамма-излучения;
- среднюю скорость счета импульсов гамма-излучения и погрешность;
- мощность дозы гамма-излучения и статистическую погрешность измерения;
- накопленную дозу.

Пользователь имеет возможность устанавливать и удалять виртуальные ограждения.

При движении участника на местности, в автоматическом режиме составляется карта загрязнения местности. Координаты местоположения участника определяются из встроенного в КПК GPS – модуля (рисунок 3).



Рисунок 3. – КПК с рабочим окном программы «SimRadMobile»

Проверка корректности генерации программой поля мощности дозы гамма-излучения от заданных источников проводилась посредством Монте-Карло моделирования с помощью кода MCNP [3]. Была разработана Монте-Карло модель поверхности почвы для площадки 50×50 метров, на которой размещались источники гамма-излучения Cs-137 излучения. Результаты сличения значений мощности дозы, рассчитанных по программе «SimRad» со значениями, полученными Монте-Карло моделированием, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Сравнение значений мощности дозы, полученных «SimRad» и рассчитанных методом Монте-Карло

Точечный источник ($1 \cdot 10^8$ Бк)				Поверхностная активность ($1 \cdot 10^6$ Бк/м ²) Площадь загрязнения 50×50 м (левый нижний угол в координате 0;0)				
Расстояние, м	Мощность дозы, мкЗв/ч		Отклонение, %	Координаты, м		Мощность дозы, мкЗв/ч		Отклонение, %
	SimRad	М.-К.		x	y	SimRad	М.-К.	
0,1	8,99	10,3	-12,7	10	10	1,695	1,903	-10,9
0,2	8,78	10,01	-12,3	20	10	1,787	1,958	-8,7
0,5	7,36	8,38	-12,2	60	10	0,234	0,223	4,9

Точечный источник ($1 \cdot 10^8$ Бк)			Поверхностная активность ($1 \cdot 10^6$ Бк/м ²) Площадь загрязнения 50×50 м (левый нижний угол в координате 0;0)					
Расстояние, м	Мощность дозы, мкЗв/ч		Отклонение, %	Координаты, м		Мощность дозы, мкЗв/ч		Отклонение, %
	SimRad	М.-К.		х	у	SimRad	М.-К.	
1	4,6	5,29	-13,0	80	10	0,077	0,068	12,4
1,5	2,83	3,28	-13,7	60	40	0,238	0,22	8,2
2	1,84	2,12	-13,2	80	40	0,077	0,068	13,4
3	0,919	1,05	-12,5	10	55	0,386	0,372	3,8
5	0,353	0,391	-9,7	100	100	0,016	0,014	14,3
10	0,0905	0,0953	-5,0	70	70	0,061	0,052	16,7
20	0,0226	0,0226	0,0	10	50	1,105	1,056	4,6
50	0,0035	0,0032	9,4	10	45	1,59	1,736	-8,4

В массиве данных, приведенных в таблице 1, прослеживается хорошая сходимость результатов, полученных с помощью Монте-Карло моделирования и рассчитанных программой «SimRad».

Данный программный продукт может быть эффективно использован при тренировках личного состава специализированных служб, обеспечивающих реагирование на ядерные и радиационные аварии и инциденты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Бекман, И. Н. Ядерная индустрия : курс лекций / И. Н. Бекман. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 75 с.
2. Израэль, Ю. А. Гамма-излучение радиоактивных выпадений / Ю. А. Израэль, Е. Д. Стукин. – М.: Атомиздат, 1967. – 224 с.
3. Briesmeister, J. F. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B. LA-12625-M. изд. Los Alamos: Ed. Los Alamos National Laboratory, 1997. 736 с.

KOMAR D. I., BYSTROV E. V., KONOVALOV E. A., PRIBYLEV S. V.
Atomtex SPE, Minsk, Belarus

SOFTWARE AND HARDWARE TOOL FOR MODELING RADIOACTIVE CONTAMINATION OF AREAS FOR TRAINING PERSONNEL OF RADIATION RECONNAISSANCE UNITS

Summary. The paper presents the purpose and the main features and functions of the developed software and hardware complex «SimRad», which allows to simulate virtual sources of gamma radiation, radioactive contamination of the area and evaluate the parameters of the radiation field. The results of checking the correctness of the generation of the dose rate field by the program for given sources by means of Monte-Carlo simulation are given.

Б. Н. ЛИСЕНКОВ¹, Д. А. ОГОРОДНИКОВ²

¹ Открытое акционерное общество «МНИПИ»

² ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

КОММУТАЦИЯ ТЕСТОВЫХ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

Аннотация. Предложен метод коммутации испытательных сигналов по принципу «любой сигнал к любому электроду», который обеспечивает высокую точность с меньшими затратами, по сравнению с методом матричной коммутации. Описан автоматизированный измерительный комплекс (АИК) для реализации этого метода. Представлены достигнутые метрологические параметры макета коммутатора.

Одной из актуальных задач современной электроники является повышение надежности и радиационной стойкости электронных компонентов для жестких условий эксплуатации. Каждую произведенную партию изделий специального назначения испытывают на радиационную стойкость.

Требования к оперативности и к достоверности оценки радиационной стойкости весьма высоки и обеспечиваются за счет автоматизации и высокой точности измерений. Это ставит задачу прецизионной коммутации испытательных сигналов, решение которой весьма осложняется в связи с тем, что коммутаторы для нужд микроэлектроники в странах СНГ не производятся.

Для решения поставленной задачи разработан метод коммутации, реализующий принцип «любой сигнал к любому электроду», который, за счет многократного сокращения количества ключевых элементов (КЭ) и упрощения конструкции коммутатора, позволяет достичь высокой точности с меньшими затратами, по сравнению с методом матричной коммутации [1].

Согласно разработанному методу канал коммутации состоит из двух каскадов. Первый каскад выполнен на основе источника-измерителя (ИИ), который, наряду с формированием и измерением испытательного сигнала, обеспечивает коммутацию его вида (ток/напряжение) с помощью переключателя S1, как показано на рисунке 1.

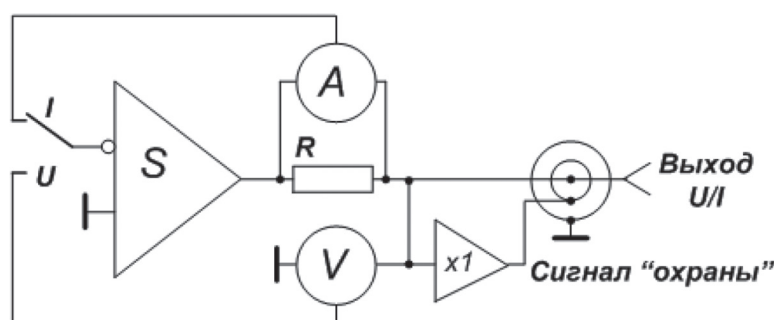


Рисунок 1. – Структурная схема ИИ: А – измеритель тока,
V – измеритель напряжения, S – источник сигнала,
S1 – переключатель обратной связи (ток/напряжение)

Новый метод основан на применении нескольких независимых каналов, каждый из которых подключает испытательный сигнал только к одному из электродов объекта подверженного тестированию (ОПТ). Для тестирования диодов, триодов и тетродов достаточно 4 канала коммутации.

Структурная схема канала коммутации приведена на рисунке 2 и включает ИИ, секцию мультиплексного коммутатора 1×12 в качестве второго каскада, и контроллер. Последовательное включение КЭ не ведет, в данном случае, к увеличению погрешности коммутации, так как КЭ в первом каскаде охвачен цепью обратной связи.

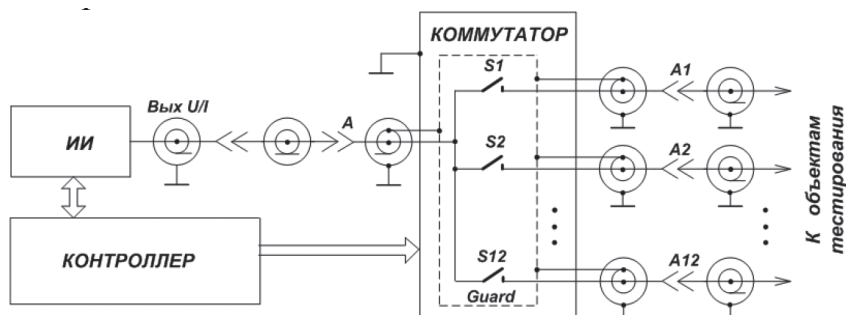


Рисунок 2. – Структурная схема канала коммутации

Для реализации предложенного метода разработан автоматизированный измерительный комплекс (АИК), включающий: 4 ИИ в составе ИППП-1/3, секционированный мультиплексный коммутатор и компьютер. Для автоматического тестирования группы ОПТ разработано программное обеспечение (ПО). Структурная схема АИК представлена на рисунке 3.

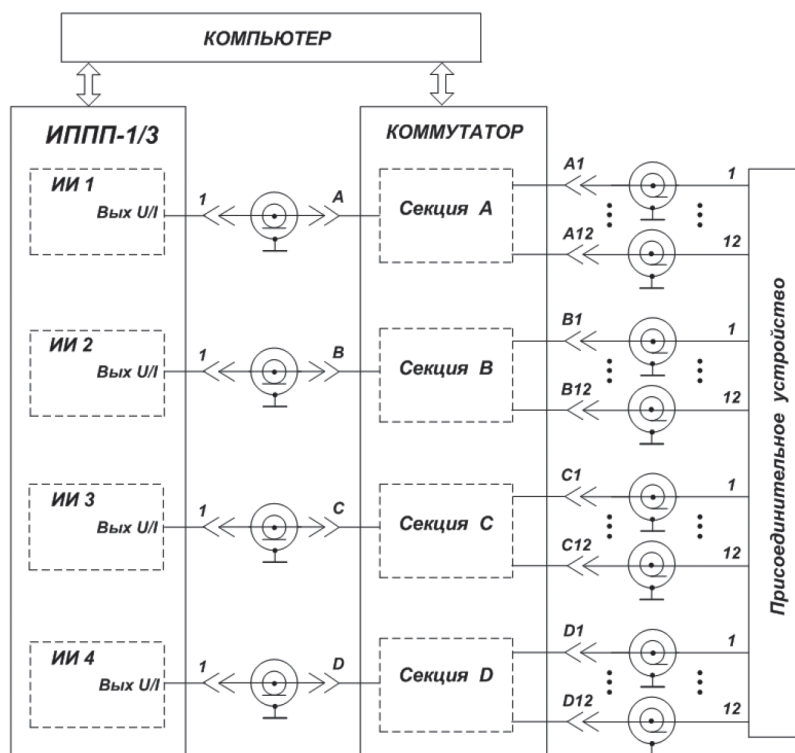


Рисунок 3. – Структурная схема АИК

Как видно из рисунков 1, 2, 3, АИК обеспечивает коммутацию любого вида сигнала к любому из $4 \times 12 = 48$ выходных портов и для реализации коммутатора требуется всего 48 КЭ (герконов), поскольку сигнал «охраны» с выхода ИИ является общим для всех портов секции коммутатора.

Матричный коммутатор с такими же возможностями содержит $4 \times 48 = 192$ узла, для каждого из которых требуется по два КЭ, один – для коммутации испытательного сигнала, другой – сигнала «охраны», то есть всего $192 \times 2 = 384$ КЭ, что в 8 раз превышает количество КЭ в АИК, реализующем новый метод.

Для реализации предложенного метода использованы известные средства формирования и коммутации испытательного сигнала, но, тем не менее, он не может быть отнесен ни к одному из известных методов, поскольку основан на применении в канале коммутации разнородных звеньев [1].

Внешний вид АИК, выполненного согласно структурной схеме (рис. 3), в составе макета коммутатора, измерителя ИППП-1/3 и компьютера, на экране которого отображается главное окно управляющего ПО, показан на рисунке 4.



Рисунок 4. – Внешний вид АИК

Экспериментальная проверка функциональных возможностей АИК и макета коммутатора, в части автоматической коммутации испытательных сигналов по принципу «любой сигнал к любому электроду», доступной ранее только матричному коммутатору, осуществлена с помощью стандартных полупроводниковых диодов и транзисторов.

Кроме того, мультиплексный коммутатор в составе АИК может быть использован и по прямому назначению. Это существенно расширяет область применения АИК и делает целесообразным его применение для испытаний электронных компонентов, например, на надежность.

Параметры макета коммутатора приведены для сигналов постоянного уровня, применяемых в АИК:

- ток смещения, не превышает – 1 фА ($1 \cdot 10^{-15}$ А);
- напряжение смещения – от 1,0 мкВ через 0,5 минуты после включения до 50 мкВ через 8 минут после включения канала;
- сопротивление изоляции канала, не менее – 50 ТОм ($50 \cdot 10^{12}$ Ом);
- сопротивление пути (сопротивление замкнутых контактов) составляет 0,35 Ом для секции коммутатора № 1, 0,44 Ом для секции № 2, 0,70 Ом для секции № 3 и 1,02 Ом для секции № 4. Сопротивление пути зависит от длины внутреннего кабеля между входным разъемом и собирающим проводом секции.

Поскольку канал коммутации предназначен для передачи испытательного сигнала только к одному из электродов ОПТ, соответствие между электродами всех объектов тестового модуля и портами коммутатора устанавливают вручную в процессе программирования АИК. Это значит, что предлагаемый метод обеспечивает автоматический выбор ОПТ только для модулей с идентичной разводкой (распиновкой) электродов, что несколько сужает его функциональные возможности, по сравнению с методом матричной коммутации.

Использование предложенного метода коммутации, при исследовании и испытании электронных компонентов на радиационную стойкость многократно повышает достоверность результатов и оперативность их получения. Это достигается увеличением количества электронных компонентов в составе одного модуля, подвергнутого радиационному воздействию, при высокой точности их коммутации и автоматизацией измерений. Возрастает достоверность контроля тестовых структур в области очень малых токов и напряжений, что особенно важно при контроле субмикронных микросхем.

Контроль радиационной стойкости микросэлектронных изделий специального применения может осуществляться с помощью АИК как на стадии изготовления пластин, так и на стадии готовых изделий.

Таким образом, предложенный метод позволяет существенно упростить конструкцию коммутатора, реализующего принцип «любой сигнал к любому электроду», и снизить издержки его изготовления при высокой точности коммутации испытательных сигналов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Лисенков, Б. Н., Влияние коммутатора на погрешность тестирования изделий микроэлектроники / Б. Н. Лисенков, Н. В. Грицев // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2018» (Минск, 14–16 нояб. 2018 г.). – С. 93–95.

LISENKOV B. N.¹, OGORODNIKOV D. A.²

¹ Public Joint Stock Company «MNIPI»,

² SSPA «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus»

TEST INSTRUMENTAL STRUCTURES COMMUTATION IN RADIATION HARDNESS TESTS

Summary. *A method of switching test signals according to the principle «any signal to any electrode» is proposed, which provides high switching accuracy with lower costs compared to the matrix switching method. The automated measuring complex (AMC) for the realization of this method is described. The achieved metrological parameters of switchboard layout are presented.*

В. Е. МАТЮШКОВ, А. А. ВИСКУШЕНКО, Т. Е. ПИНЧУК,
Т. М. ПРОТАЗАНОВА, Г. И. ТИХОНЧУК, А. Д. КАЗАКОВ
ОАО «КБТЭМ-ОМО»

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СПЕЦТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Аннотация. Уровень развития современной электроники, встроенной в бытовую, медицинскую, вычислительную технику и т.д. во многом определяется уровнем микроминиатюризации изделий микроэлектроники (микросхемы, транзисторы и т.д.). В связи с этим встает вопрос метрологического обеспечения измерений геометрических размеров топологических элементов на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах в нанометровом диапазоне (10–100 нм). В данной статье предлагается решение проблемы метрологического обеспечения процесса измерений в рамках ОЛИН СТО.

Метрологическое обеспечение геометрических измерений топологии полупроводниковых пластин и фотошаблонов является важнейшей проблемой развития микроэлектроники. Для решения этой проблемы необходимо решить ряд задач:

1. Изготовление или приобретение эталонных мер ширины и высоты нанометрового диапазона;
2. Приборное обеспечение методик измерения в нанометровом диапазоне;
3. Исследование геометрических форм топологии на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах;
4. Разработка методик измерения геометрических размеров в нанометровом диапазоне на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах;
5. Аттестация (калибровка) средств измерения геометрических размеров;
6. Аккредитация отраслевой лаборатории испытаний и нанодиагностики спецтехнологического оборудования (ОЛИН СТО) в части нанометрологии на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах.

Первая задача решается путем приобретения следующих эталонных мер:

- Мера ширины MRS-6 (Geller MicroAnalytical Laboratory, Inc.);
- Мера высоты Н8 (NANOSENSORS™);

Эти меры имеют сертификаты калибровки, что позволяет провести калибровку измерительной техники.

Для решения второй задачи составлен план оснащения ОЛИН СТО на 2017–2020 годы, который согласован с Министерством промышленности Республики Беларусь и Национальной академией наук Беларуси. В рамках выполнения этого плана и создания ОЛИН СТО уже закуплена часть оборудования, остальное будет приобретено в ближайшее время.

Таблица 1. – Приобретенное оборудование

№ п/п	Название	Назначение
1	Профилометр Talysurf CCI Lite (set)	Предназначен для измерения параметров шероховатости. Разрешение по оси, нм Z – 0,01 Воспроизводимость (ось Z), нм < 0,02 Диапазон измерений по оси Z, мм – до 2,2 Максимальные размеры детали, мм – 150×150
2	Электронный микроскоп Nova Nano Sem 650 (FP2054/25)	Предназначен для исследования критических размеров микроизображений на фотошаблонах при проведении фотолитографических испытаний оптико-механического оборудования, изготовлении оптических деталей методом фотолитографии. Разрешение макс, нм: 1,0; Диапазон увеличений, крат: 12–900 000
5	Спектрофотометр PhotonRT фирмы Эс-сентОптикс	Предназначен для измерения коэффициентов отражения и пропускания оптических покрытий. Спектральный диапазон – 190...1100 нм. Точность установки длины волны 0,24 нм. Спектральное разрешение 1,2 нм.

№ п/п	Название	Назначение
7	Микроскоп МА 300 с функцией ультрафиолета	Предназначен для контроля элементов топологического рисунка ИС на полупроводниковой пластине с топологической нормой от 0.18 мкм и более, на базе микроскопа, работающего в УФ области спектра ($\lambda = 365$ нм).
8	Установка монтажа пелликов	Предназначена для защиты фотошаблонов с помощью пелликов. Совместима с технологическими процессами уровня 90 нм
9	Камера микроклиматическая	Предназначена для размещения оборудования в соответствии с классом чистоты 4 ИСО по ГОСТ 18664 2000.
10	Автоматический сферометр Ultra Spherotronic	Предназначен для измерений радиусов кривизны сферических поверхностей и калибровок пластин с самыми высокими требованиями, позволит проводить измерения с минимальной погрешностью 0,005 %
12	Интерферометр ZYGO VeriFire	Предназначен для контроля точности формы сферических и асферических поверхностей диаметром до 300 мм и радиусом кривизны до 4500 мм. Комплект объективов с погрешностью волнового фронта менее $\lambda/20$
13	Комплект мер	Предназначен для проведения калибровки электронной и атомно-силовой микроскопии. Мера высоты ступени Н8 – 8 нм. Мера ширины MRS-6 – 80 нм.
14	Профилометр-профилограф SurfTest SJ-411	Измерительный прибор для высокоточных, оперативных измерений параметров шероховатости методом ощупывания алмазной иглой. Разрешение 0,01 мкм. Диапазон датчика ± 150 мкм. Длина трассы ощупывания 0,25...25,4 мм.
15	Координатно-измерительная машина ZEISS DuraMax	Предназначена для быстрого контроля между операциями для малогабаритных деталей, а также для контроля объемных партий в процессе производства. Максимально-допустимый диапазон измерений $2,4 + L/300$ мкм. Максимальный габаритный размер детали: 500×500×500 мм.
16	Лазерный сканирующий микроскоп LSM 800 Axio Imager.Z2 Vario	Предназначен для визуального контроля микроизображений при проведении фотолитографических испытаний оптико-механического оборудования, изготовлении оптических деталей методом фотолитографии. Размеры контролируемой пластины до 300×300 мм
17	Установка ионно-лучевой обработки для изготовления высокопрецизионных оптических линз OMF 450 комплектации BUHLER ALZENA	Предназначена для прецизионной обработки оптических деталей с повышенным требованием по качеству оптической поверхности (на уровне не менее $\lambda/200$ и выше)
18	Установка электронно-лучевой литографии EBPG5200	Предназначена для экспонирования пучком электронов изображения в фоторезисте, нанесенном на фотошаблонные заготовки или полупроводниковые пластины для обеспечения нужд полупроводниковой промышленности в области нанолитографии. Минимальная ширина линии ≤ 8 нм. Величина сшивания ≤ 10 нм. Точность совмещения второго слоя ≤ 5 нм.

Данное оборудование позволяет проводить измерения элементов на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах, производить прецизионную обработку оптических деталей с повышенным требованием по качеству оптической поверхности (на уровне не менее $\lambda/200$ и выше) и экспонировать пучком электронов изображения в фоторезисте, нанесенном на фотошаблонные заготовки или полупроводниковые пластины. Причем микроскоп Nova Nano Sem 650 и профилометр Talysurf CCI Lite прошли калибровку с помощью эталонных мер длины и высоты. На эти приборы получены свидетельства калибровки, выданные РУП «БелГИМ».

Таблица 2. – Планируемое к закупке оборудование

№ п/п	Название	Назначение
1	Оптический профилометр для бесконтактной 3D профилометрии	Предназначен для исследования поверхностей, измерения параметров объектов на поверхности, таких как, расстояние от точки до точки, радиус, угол и т.д. Размер исследуемых образцов: до 300 мм. Разрешение по осям X/Y: 0,5 мкм. Разрешение по оси Z: 10 нм.
3	Микроскоп измерительный MC-70T	Предназначен для измерения линейных размеров и глубины рельефа растровых оптических элементов, вакуумных столиков-держателей, сеток, шкал. Измерительный микроскоп отражённого и проходящего света с тринокулярной насадкой.
4	Интерферометрическая измерительная установка VeriFire Asphere	Интерферометрическая измерительная установка для быстрого, бесконтактного, высокоточного трехмерного измерения асферических поверхностей. Диаметр тестового пучка 152 мм. Простая воспроизводимость измерений ≤ 1 нм RMS. Диаметр детали от 1 до 130 мм.
5	Профилометр-профилограф Mar Surf LD 260	Профилометр-профилограф предназначен для комплексного измерения формы (контура) и шероховатости поверхности. Скорость измерения 0,02–10 мм/с. Скорость позиционирования 0,02–200 мм/с. Дискретность отсчета 0,8 нм.
6	Калибратор поворотных осей XR20-W	Предназначен для бесконтактного эталонного измерения с высокой достоверностью на удалении от проверяемой поворотной оси. Точность измерения ± 1 угл. сек
7	Кругломер Taylor Hobson Surtronic R50	Предназначен для измерения скругления. Скорость измерения, включая время подготовки, составляет – 3 детали/минуту. Точность (радиальная точность для шпинделя составляет ± 25 нм)
8	Спектрофотометр LINZA 150	Предназначен для измерения спектральных характеристик пропускания и зеркального отражения на сферических и цилиндрических поверхностях. Шаг сканирования спектра от 0,5 до 100 нм. Скорость сканирования спектра 3 000 нм/мин (при шаге сканирования 5 нм). Размер светового пятна на измеряемом образце: пропускание – 4,0×2,5 мм, отражение – 1,0×1,0 мм
9	Станция серии OptiSurf LTM для бесконтактного измерения толщины одиночных линз	Предназначена для бесконтактного измерения толщины одиночных линз. Диаметр объектива 1 мм... 350 мм. Толщина стекла от 0,2 мм до 50 мм (опционально до 150 мм). Точность измерения толщины центра (геометрическая толщина) 0,5 мкм. Разрешение 75 нм.
10	КИМ портально-мостовой конструкции суперпрецизионной точности модели XENOS	Координатно-измерительная машина позволяет проводить контроль деталей с пространственной погрешностью измерений не более: предельное значение погрешности линейного измерения по нормам ISO 10360-2009, $MPE_E \leq (0,3 + L/1500)$ мкм, где L – измеряемая длина в мм.

Оснащение предприятия перечисленным оборудованием позволит решить задачи по исследованию геометрических форм топологии, разработке и метрологическому обеспечению методик измерения геометрических размеров элементов на полупроводниковых пластинах и фотошаблонах в нанометровом диапазоне. Помимо этого, наличие такого оборудования позволит обеспечить контроль качества различных технологических процессов изготовления деталей и узлов спецтехнологического оборудования для производства изделий микроэлектроники. В частности, технологические процессы изготовления оптических деталей и узлов оборудования, обеспечивающего в перспективе выход на технологический уровень производства СБИС 20...40 нанометров.

Решение выше перечисленных задач позволит создать центр коллективного пользования, реализующий как метрологическое обеспечение производства спецтехнологического оборудования для производства изделий микроэлектроники, так и оказание услуг сторонним организациям в части измерений в нанометровом диапазоне.

MATYUSHKOV V. E., VISKUSHENKO A. A., PINCHUK T. E.,
PROTAZANOVA T. M., TIKHONCHUK G. I., KAZAKOV A. D.
KBTEM-OMO JSC

METROLOGICAL SUPPORT OF MANUFACTURING EQUIPMENT PRODUCTION FOR MICROELECTRONICS

Summary. *The level of development of modern electronics embedded in household, medical, computing equipment, etc., is largely determined by the level of microminiaturization of microelectronics items (integrated circuits, transistors, etc.). Consequently, there is an issue with metrological support of measuring geometric dimensions of pattern features on wafers and photomasks in the nanometer range (10 to 100 nm). The article suggests a solution to the problem of metrological support of measurement procedure within the scope of the ITNL ME.*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Рассмотрены возможности применения ресурсосберегающих технологий при создании энергосберегающих электромеханических испытательных стендов, позволяющих проводить нагрузочные испытания сложной военной техники. Приведены наиболее перспективные с точки зрения энергосбережения схемы построения испытательных стендов.

Современная военная техника (ВТ) представляет собой сложную техническую систему, состоящую из множества различных узлов и агрегатов. От их работоспособности и технических характеристик зависит общий уровень надежности эксплуатируемой и вновь создаваемой техники. В связи с этим испытания новых и модернизированных единиц военной техники – неотъемлемая часть процесса создания сложной техники на предприятиях военно-промышленного комплекса. Важной частью этого процесса являются стендовые испытания под нагрузкой наиболее ответственных элементов в конструкции боевых машин и комплексов – силовой установки (двигатель внутреннего сгорания) и механических преобразовательных элементов (коробки передач, редукторы, валы). Техническая сложность проведения таких испытаний связана со значительной мощностью силовых агрегатов современных боевых машин и сопровождается повышенными затратами энергии и ресурсов. Выходом из этой ситуации является использование энергосберегающих испытательных стендов.

Одним из направлений научно-практической деятельности кафедры «Автоматизированный электропривод» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого» является разработка, изготовление и модернизация энергосберегающих электромеханических испытательных стендов.

Электромеханические испытательные стенды по сравнению с электрогидравлическими и механическими обладают более широкими возможностями. Одним из таких преимуществ является их энергоэффективность [1, 2]. Механическая мощность испытуемого двигателя возвращается (рекупируется) в электрическую сеть практически полностью в виде электрической мощности, генерируемой нагружающим устройством, за вычетом обязательных потерь в элементах стенда. При этом КПД электрических машин довольно высокий – 0,8...0,9, а у статических преобразователей – еще выше – 0,95...0,98. Другими преимуществами электромеханических испытательных стендов является их быстродействие, способность воспроизводить динамические нагрузки и реализовать различные законы изменения нагрузки.

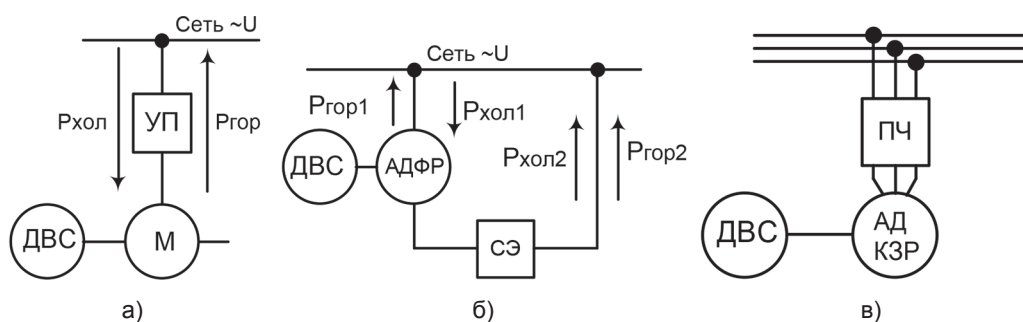
При всем разнообразии электромеханических испытательных стендов их можно разделить на несколько групп, основными из которых являются:

1. Стенды для испытаний двигателей внутреннего сгорания (ДВС)

Стенд на базе электрической машины постоянного тока (рис. 1а) обеспечивает два режима: холодной обкатки, в этом случае машина постоянного тока работает в двигательном режиме, и горячей обкатки – машина работает в генераторном режиме, нагружая испытуемый ДВС.

Управляемый преобразователь обеспечивает регулирование и стабилизацию технических и технологических показателей работы стенда при холодной и горячей обкатке, причем в последнем случае обеспечивая рекуперацию генерируемой электрической энергии в сеть.

В испытательном стенде (рис. 1б) холодная обкатка осуществляется в двигательном режиме работы асинхронного электродвигателя с фазным ротором (АДФР), горячая – в генераторном, при скорости вращения вала электродвигателя выше синхронной. Введение в цепь ротора согласующего элемента позволяет в обоих случаях возвращать в сеть часть активной мощности. Схемно согласующий элемент представляет собой ведомый сеть инвертор с промежуточным выпрямителем (асинхронно-вентильный каскад).



ДВС – испытуемый двигатель внутреннего сгорания; М – машина постоянного тока;
 УП – управляемый преобразователь, $P_{хол}$ – мощность в режиме холодной обкатки;
 $P_{гор}$ – мощность в режиме горячей обкатки; АДФР – асинхронный электродвигатель
 с фазным ротором; СЭ – согласующий элемент; АДКЗР – асинхронный электродвигатель
 с короткозамкнутым ротором; ПЧ – преобразователь частоты

Рисунок 1. – Функциональные схемы стендов для испытания двигателей внутреннего сгорания: а) – на базе электрической машины постоянного тока;
 б) – на базе асинхронного электродвигателя с фазным ротором;
 в) – на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

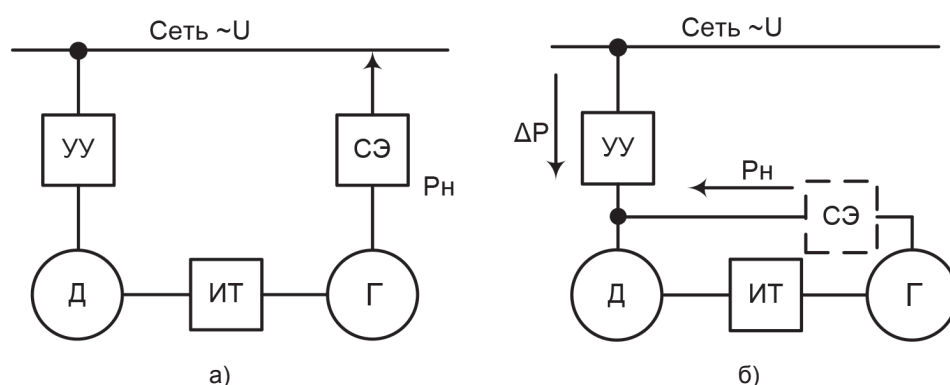
Коэффициент полезного действия (КПД) при рекуперации

$$\eta = \eta_M \cdot \eta_{УП}$$

где η_M – КПД машины постоянного тока;
 $\eta_{УП}$ – КПД управляемого преобразователя.

Управление работой асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗР) (рис. 1в) в режимах холодной и горячей обкатки осуществляется частотным преобразователем ПЧ, имеющим, также как и АДКЗР, высокие энергетические характеристики. При наличии в составе ПЧ рекуператора возврат энергии в сеть в режиме горячей обкатки осуществляется на всем диапазоне рабочих скоростей. Недостаток такой схемы – высокая стоимость частотного преобразователя.

2. Стенды для испытания трансмиссий, редукторов, и т.п.
 Стенды такого типа строят в основном по двум схемам (рис. 2).



УУ – управляющее устройство, Д – приводной двигатель, Г – нагружающий генератор,
 СЭ – согласующий элемент, ИТ – испытуемая трансмиссия

Рисунок 2. – Функциональные схемы стендов для испытания трансмиссий, редукторов и т.п. а) – с рекуперацией энергии в сеть; б) – по схеме взаимной нагрузки

Вариант по схеме (рис. 2б) предпочтителен, поскольку из сети потребляется лишь часть нагружаемой мощности, равная потерям мощности ΔP в двигателе, генераторе испытуемой трансмиссии и согласующих элементах. В этом случае, номинальная

мощность управляющего устройства (УУ) выбирается исходя из суммарных потерь мощности в элементах стенда, и для ряда схем, например, ДПТ – ГПТ, согласующий элемент (СЭ) не требуется.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Тодарев, В. В. Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и трансмиссий сельскохозяйственной техники / В. В. Тодарев, М. Н. Погуляев, И. В. Дорощенко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Технічні науки. Випуск 101. Проблеми енергозабезпечення та енергосбереження в АПК України. – Харків, 2010. – С. 90–91.

2. Тодарев, В. В. Взаимная нагрузка в электромеханических стендах для испытания электрических машин / В. В. Тодарев, М. Н. Погуляев, И. В. Дорощенко // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VIII междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 115-летию со дня рождения Павла Осиповича Сухого) (г. Гомель, 28–29 окт. 2010 г.) / под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель: ГГТУ, 2010. – С. 149–150.

TODAREV V. V., PAHULIAYEU M. N., SAVELIEV V. A.

Sukhoi State Technical University of Gomel

ENERGY EFFICIENT ELECTROMECHANICAL STANDS FOR TESTING MILITARY EQUIPMENT

Summary. *The possibilities of application of resource-saving technologies in the creation of energy-saving Electromechanical test benches, allowing to carry out load tests of complex military equipment. The most perspective from the point of view of energy saving schemes of construction of test stands are given.*

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И МОДЕРНИЗАЦИИ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Испытания под нагрузкой являются обязательной частью технологического процесса изготовления новой, либо ремонта бывшей в работе техники. Стендовые испытания новой техники позволяют сократить срок ввода в производство и снизить затраты на разработку. Испытательные стенды должны быть энергосберегающими и обеспечивать требуемый режим нагружения.

Испытания под нагрузкой являются обязательной частью технологического процесса производства как новых механизмов и машин, так и ремонта бывших в работе. Различают приемо-сдаточные и комплексные стендовые испытания. Первые характеризуются стационарностью режимов со стабилизацией заданных параметров нагрузки и, как следствие, относительно несложной системой управления.

Стендовые же испытания проводят на стадии разработки новой техники для практической проверки принятых технических решений. Наивысшим уровнем стендовых испытаний являются комплексные испытания разработанной машины в целом с нагрузкой на ее все узлы и агрегаты. Режим нагружения для стендовых испытаний гораздо сложнее, характеризуется большим диапазоном нагрузок, сложным законом их изменения, обязательным наличием переходных процессов.

Вместе с тем, стенды для приемо-сдаточных и стендовых испытаний объединяет одно обязательное условие – энергоэффективность. Они должны обеспечивать повторное использование, например, путем рекуперации, затраченной в процессе испытаний под нагрузкой энергии за вычетом потерь в элементах стенда [1, 4].

Если к сказанному добавить условие доступности подключения нагружающего устройства к рабочим узлам машин, высокие массогабаритные характеристики, низкую стоимость, блочную конструкцию, то сформируется спектр требований к испытательным стендам данного типа.

Как показывает практика, в наибольшей степени указанным требованиям удовлетворяют электромеханические испытательные стенды, в которых в качестве силового элемента используются электрические машины.

Кафедра «Автоматизированный электропривод» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого имеет многолетний опыт исследований и разработки энергосберегающих электромеханических испытательных стендов различных типов и назначения, а также модернизацией существующих испытательных стендов путем расширения параметров испытаний и переводом в энергосберегающий режим работы.

Научно-технические разработки энергосберегающих электромеханических испытательных стендов кафедры «Автоматизированный электропривод» успешно внедрены в производство на:

- ОАО «Научно-технический центр комбайностроения» (г. Гомель) – стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания;
- ОАО «Витебский мотороремонтный завод» (г. Витебск) – стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания на основе асинхронно-вентильного каскада;
- УП «Витебское отделение Белорусской железной дороги» Локомотивное депо, г. Полоцк – стенд для испытания электрических машин постоянного тока после ремонта;
- УП «Гродненское отделение Белорусской железной дороги» Локомотивное депо, г. Лида – стенд для испытания гидropередачи после ремонта.

С целью приближения условий проведения стендовых нагрузочных испытаний элементов приводной техники и трансмиссий к реальным условиям их эксплуатации, в составе испытательного комплекса необходимо иметь устройство для физического моделирования нагрузок, способное воспроизводить на валу испытуемого объекта широкий спектр характерных нагрузочных воздействий или сочетать несколько видов нагрузок [2].

Таковыми нагрузками могут быть:

- момент, не зависящий от координат движения $M_c = \text{const}$;
- момент, зависящий от угла поворота (пройденного пути) $M_c = f(\varphi)$;
- момент, зависящий от скорости вращения $M_c = f(\omega)$ – к этому моменту относятся момент сухого трения $M_c = M \cdot \text{sign}(\omega)$, момент вязкого трения $M_c = k \cdot \omega$, вентиляционный момент $M_c = k \cdot \omega^2$;
- момент, зависящий от ускорения (динамический момент) $M_d = f(\varepsilon)$;
- момент, зависящий от времени $M_c = f(t)$.

Например, при движении техники по ровной поверхности с постоянной скоростью двигатель преодолевает нагрузку типа сухого трения, величина которой зависит от массы техники, а знак – от направления движения.

При ускорении и замедлении техники, в соответствии с уравнением движения, двигатель испытывает динамическую нагрузку, величина которой пропорциональна ускорению (замедлению) и моменту инерции на валу двигателя.

Устройство для физического моделирования нагрузок представляет собой систему автоматического управления статическими и динамическими механическими параметрами нагрузки. Устройство рассматривается как система стабилизации заданной функции момента. При этом частота вращения испытываемого приводного механизма выступает в качестве возмущающего воздействия. Для повышения статической и динамической точности применяется принцип инвариантности по отношению к возмущающему воздействию во всем диапазоне нагрузок [3, 6, 7].

В ходе проведения любых испытаний ставится задача сбора необходимой информации об особенностях работы испытуемого устройства и его эксплуатационных характеристиках. Для решения этой задачи требуется не только задать необходимые параметры и условия нагружения, но и обеспечить достоверность и полноту измеряемых параметров, а также удобство их дальнейшей обработки. Эти задачи решаются измерительным комплексом и программным обеспечением испытательного стенда.

В настоящее время в Республике Беларусь достаточно активно используются так называемые энергозатратные стенды. Применительно к электромеханическому типу стендов можно сказать, что затраченная в процессе испытаний энергия преобразуется в тепло и рассеивается в окружающее пространство.

Сегодня сегмент таких испытательных стендов представлен универсальными стендами серий КС276 для испытания двигателей внутреннего сгорания (ДВС), КСАТ для испытания ДВС автомобилей, тракторов и комбайнов, КСС для испытания судовых и тепловозных двигателей, КС-02...03 для испытания коробок передач и раздаточных коробок и рядом других. Однако, заменить энергозатратные стенды на новые энергосберегающие для многих предприятий затруднительно, что объясняется уникальностью каждого типа стенда, и, как следствие, единичным характером производства и высокой ценой. Стоимость современных испытательных стендов составляет от \$50 000 до \$100 000 и выше в зависимости от степени универсальности [5].

Выход из такого положения в модернизации существующих энергозатратных стендов в энергосберегающие, что значительно дешевле, поскольку сохраняются основные конструктивные и силовые элементы стенда. Последние, как правило, при технически грамотной эксплуатации в состоянии отработать еще не один десяток лет, а их основные технические характеристики незначительно уступают современным аналогам. Стоимость такой модернизации применительно к электромеханическим стендам составляет 10–20 % от стоимости нового энергосберегающего стенда. Поскольку стенды функционируют в составе технологической производственной цепочки то и глубина модернизации зависит от технологических факторов.

В ходе модернизации также существует возможность:

- оборудовать испытательный стенд датчиками, приборами, устройствами и системами, расширяющими его функциональные возможности;
- установить управляющий контроллер, обеспечивающий возможность управлять испытательным стендом, собирать и обрабатывать информацию о параметрах нагружения и измерительную информацию;
- установить на рабочее место оператора специализированное программное обеспечение, обеспечивающее удобный компьютерный интерфейс управления стендом, задания рабочих параметров, анализа полученной информации, сохранения информации на ПК, автоматизированную подготовку отчетов о результатах испытаний.

Модернизированный таким образом испытательный стенд не только обеспечит измерение необходимых параметров, но и позволит задавать и поддерживать требуемые законы изменения нагрузки в соответствии с заданной заказчиком программой испытаний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Тодарев, В. В. Взаимная нагрузка в электромеханических стендах для испытания электрических машин / В. В. Тодарев, М. Н. Погуляев, И. В. Дорощенко // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов VIII Международной научно-технической конференции (научные чтения, посвященные 115-летию со дня рождения Павла Осиповича Сухого), Гомель, 28–29 октября 2010 года / под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель: ГГТУ, 2010. – С. 149–150.
2. Савельев, В. А. Нагружающие устройства испытательных стендов / В. А. Савельев, В. Б. Попов, В. В. Тодарев // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сборник тезисов докладов междунар. науч.-практ. конф., 21–22 декабря 2017. – Гомель, 2017. – С. 102–103.
3. Дорощенко, И. В. Математическая модель нагрузочной части испытательного стенда инвариантного к скорости вращения на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, В. С. Захаренко, В. А. Савельев // Вестник Гомельского гос. техн. универ-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 3. – С. 63–72.
4. Дорощенко, И. В. Энергоэффективные испытательные стенды / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев, В. А. Савельев, В. В. Тодарев // Энергоэффективность. – 2018. – № 8. – С. 46–56.
5. Дорощенко, И. В. Ресурсосберегающие электромеханические стенды для испытаний сложной техники на предприятиях транспортного машиностроения / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев, В. Б. Попов, В. А. Савельев, В. В. Тодарев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – № 8 (69). – С. 36–45.
6. Пат. 5694 BY, МПК7 H02P 5/00, H04R 29/00. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2003. – № 4.
7. Пат. 16927 BY, МПК7 G 01M 15/00. Нагрузочное устройство // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. Дата публикации 2013.04.30.

TODAREV V. V., SAVELIEV V. A.

EXPERIENCE OF DEVELOPMENT AND MODERNIZATION STANDS FOR TESTING COMPLEX TECHNOLOGY

Summary. Tests under load are an indispensable part of the technological process of making a new one, or repairing a used equipment. Bench tests of new equipment can reduce the time of entry into production and reduce development costs. Test benches must be energy efficient and provide the required loading conditions.

Ю. В. ТРОФИМОВ, С. И. ЛИШИК, В. С. ПОСЕДЬКО, А. В. ТИХОНОВИЧ,
Е. Ф. ОСТРЕЦОВ, К. И. БОРТНИК, А. Е. ЧЕЛЯПИН, Л. Н. СУРВИЛО,
Н. Н. ГРУШКО, Е. С. ЖУК, П. С. БЕГУНОВ

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси»

ТЕПЛОКОНТРАСТНАЯ МИШЕНЬ

Аннотация. При стрелковой подготовке личного состава из оружия с тепловизионным прицелом, а также для дезориентации потенциального противника, применяются теплоконтрастные мишени. Разработана эффективная теплоконтрастная мишень, устойчивая к изменяющимся факторам внешней среды и сохраняющая работоспособность при многократном поражении. Мишень оснащена контроллером, обеспечивающим автоматическую стабилизацию температуры $36\pm 5^\circ\text{C}$ излучательной поверхности мишени в диапазоне температур окружающей среды $-30^\circ\text{C} \dots +36^\circ\text{C}$ в условиях высокой влажности (дождь, снег и т.п.). Теплоконтрастная мишень прошла практическую апробацию и подтвердила преимущества перед существующими аналогами.

В настоящее время при стрелковой подготовке личного состава из оружия с тепловизионным прицелом, а также для дезориентации потенциального противника, применяются теплоконтрастные мишени (далее мишень).

Известны различные типы тепловых мишеней [1, 2]. Как правило, такие мишени состоят из нагревательного элемента – излучателя, установленного на опорное устройство и системы ее электрического питания. Существенным недостатком таких мишеней является использование материалов, обладающих высокой теплоемкостью и бронестойкостью, что увеличивает их массивность, а также стоимость. Кроме того, размещенный на мишени нагревательный элемент может быть разрушен или поврежден при стрельбе.

Целью настоящей работы было создание эффективной теплоконтрастной мишени, устойчивой к изменяющимся факторам внешней среды и сохраняющей работоспособность при многократном механическом воздействии (попадании пуль калибра 9 мм).

На рис. 1а представлен один из вариантов разработанной нами теплоконтрастной мишени, удовлетворяющий вышеуказанным требованиям. Диаметр мишени 200 мм, толщина до 2,0 мм, вес не более 200 г.

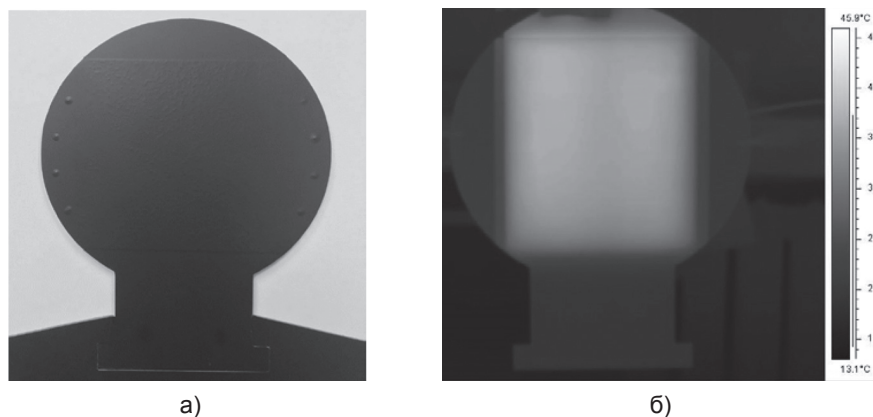


Рисунок 1. – Фотография теплоконтрастной мишени (а) и ее термограмма (б)

Каждая мишень оснащается контроллером, который устанавливается на заданном удалении от нее в защищенном от попадания пуль месте. Линия питания, идущая от контроллера к нагревательному элементу, трехкратно продублирована и разнесена в пространстве для снижения риска вывода ее из строя.

Особенностью мишени (в соответствии с ее назначением) является имитация теплового излучения человеческого тела. Данный контроллер обеспечивает автоматическую стабилизацию температуры $36\pm 5^\circ\text{C}$ излучательной поверхности мишени

в диапазоне температур окружающей среды $-30^{\circ}\text{C} \dots +36^{\circ}\text{C}$ в условиях высокой влажности (дождь, снег, туман и т.п.) даже с учетом разрушения части ее поверхности за счет попадания пуль.

Термограмма мишени, полученная посредством тепловизора A325 Flir AB в аккредитованной испытательной светотехнической лаборатории Государственного предприятия «ЦСОТ НАН Беларуси», представлена на рис. 1б. Измеренное значение средней температуры мишени составило $36,8^{\circ}\text{C}$. Площадь мишени и ее конфигурация могут быть различны.

Проверка работоспособности одной из мишеней в полевых условиях проходила на базе одного из силовых ведомств Республики Беларусь. Испытания мишени на сохранение ее работоспособности проводились при нарастающем количестве попаданий из стрелкового оружия калибра 9 мм. Экспериментально установлено, что мишень данной конфигурации выдерживает до 50 попаданий пуль калибра 9 мм при сохранении работоспособности, что подтверждается термограммой, представленной на рис. 2.

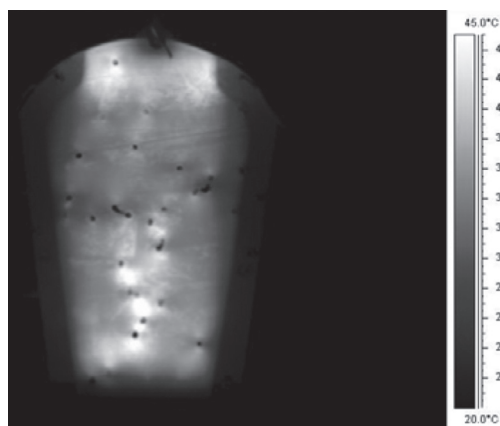


Рисунок 2. – Термограмма мишени после многократного попадания пуль из стрелкового оружия калибра 9 мм

Разработанная теплоконтрастная мишень подтвердила преимущества перед существующими аналогами и может быть использована в качестве тренажера для стрельбы из оружия с тепловизионным прицелом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Патент РФ № F41J5/08, 15.12.2002 // Тепловая мишень для практической стрельбы (варианты) / Семёнов А. Г. (RU).
2. Патент РФ № F41J 1/08 (2006.01) // Тепловая мишень / Абрамов Д. Г. (RU), Анциферов А. А. (RU), Вагин А. В. (RU), Клименко В. Ю. (RU), Кривченко Д. А. (RU), Пырьев В. А. (RU), Сидоров М. И. (RU), Суханов В. М. (RU), Ульянов В. М. (RU), Шунин В. М. (RU).

TROFIMOV Y. V., LISHIK S. I., POSED'KO V. S., TIKHONOVICH A. V., OSTRETISOV Y. F., BORTNIK K. I., CHELYAPIN A. YE., SURVILO L. N., GRUSHKO N. N., ZHUK E. C., BEGUNOV P. S.

Republican Scientific and Production Unitary Enterprise «Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus»

HEAT CONTRAST TARGET

Summary. Heat contrast targets are used for shooting training of personnel using firearms with a thermal imaging sight, as well as to disorient a potential adversary. An effective Heat Contrast Target was developed that is resistant to changing external factors and keep working with multiply target damages. Each target is equipped with a controller that automatically stabilizes the temperature of $36 \pm 5^{\circ}\text{C}$ of the radiation surface of the target in the range of ambient temperatures of -30°C to $+36^{\circ}\text{C}$ in high humidity (rain, snow, fog, etc.). The Heat Contrast Target was piloted and confirmed the advantages over the existing analogues.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЗАКЛАДНЫХ УСТРОЙСТВ

Аннотация. Разработана структурная схема аппаратно-программного комплекса, позволяющая с принципиально новой возможностью автоматизировать процессы поиска и идентификации электронных закладных устройств. Отмечены основные особенности разработанной структуры комплекса. Показана возможность автоматизированной идентификации на основе разработанного способа восстановления типа вольтамперной характеристики. Представлены результаты одного из современных и разработанного способов обнаружения электронных закладных устройств.

Одним из самых эффективных средств поиска и обнаружения электронных закладных устройств (ЭЗУ) является нелинейный радиолокатор, так как он способен обнаруживать и определять местоположение ЭЗУ независимо от их рабочего активного или пассивного состояния [1].

Современные нелинейные радиолокаторы имеют недостаточно высокую вероятность правильного обнаружения ЭЗУ из-за уменьшения габаритных размеров последних и внедрения их в элементы строительных конструкций помещений, включающих различные металлические арматурные и крепежные соединения. Это вносит неопределенность в правильную идентификацию объекта, вследствие чего увеличиваются время поиска и вероятность ложной тревоги [2], поэтому разработка автоматизированной системы с более высокой вероятностью правильного обнаружения ЭЗУ и возможностью идентификации является актуальной задачей.

Авторами данной работы предложен принципиально новый способ распознавания типа вольтамперной характеристики (ВАХ) исследуемых ЭЗУ на основе использования зондирующего АМ-сигнала с подавленной несущей [3]. На основе представленного способа разработан новый метод обнаружения с возможностью автоматизированной идентификации ЭЗУ [4] и спроектирован аппаратно-программный комплекс (АПК), который позволяет его реализовать [5].

Структурная схема АПК представлена на рисунке 1 и включает основные блоки: антенную систему (2), представляющую единую автономную конструкцию в одном корпусе и состоящую из трех спиральных антенн; передатчик (3), включающий программно-управляемый усилитель мощности (3.1) с переменным коэффициентом усиления и синтезатор зондирующего сигнала (3.2) с возможностью выбора сигнала излучения и регулирования его структуры (АМ сигнал с подавленной несущей, односторонней гармонический, гармонический фазоманипулированный); приемник (4) супергетеродинного типа, имеющий три отдельных канала приема, настроенных на комбинационные частоты зондирующего сигнала; микропроцессорную систему управления (5) (МПС) предназначенную для управления различными режимами работы, выводом данных предварительной обработки, самодиагностикой и настройкой всех модулей АПК; анализатор спектра (6), управляемый портативным компьютером (ПК) с помощью СУ и обеспечивающий повышенную чувствительность измерений уровней в каждом канале приемника; портативный компьютер (7) с ПО MATLAB для математической обработки и наглядной визуализации результатов обнаружения и идентификации ЭЗУ [6]. ПК содержит СУ (7.1), представляющую функциональный алгоритм, задающий команды МПС (5) на синтезирование зондирующего сигнала, на изменение его структуры и на регулировку уровня мощности излучения.

СУ обеспечивает накопление значений уровней, измеряемых в каждом канале приема переотраженного от ЭЗУ сигнала, и математическую обработку по результатам которой позволяет идентифицировать ЭЗУ [7]. При этом возможно повысить достоверность их идентификации и увеличить дальность действия АПК.

Отличительной особенностью АПК является использование прямой связи программного обеспечения MATLAB с оборудованием и периферийными устройствами, что позволяет в автоматизированном режиме обработать результаты измерений и предоставлять оператору сведения о характеристиках ЭЗУ и тем самым ускорить их локализацию [8].

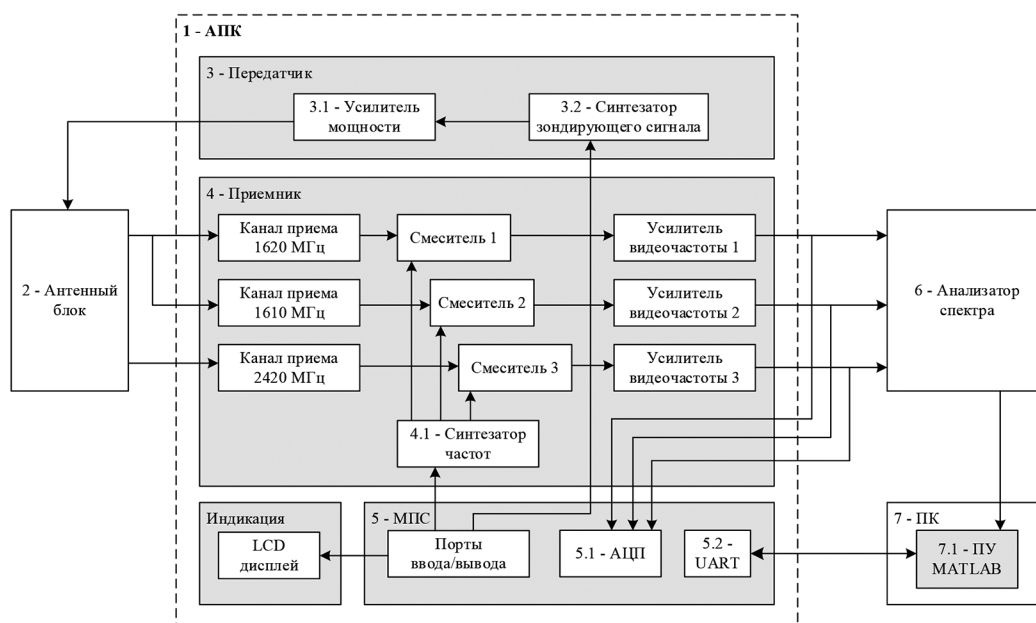


Рисунок 1. – Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Особенностью разработанного метода является возможность автоматизации поиска и идентификации ЭЗУ. Последняя производится на основе восстановленного вида ВАХ и идентификационного портрета исследуемого ЭЗУ, представляющего собой характер изменения коэффициентов аппроксимирующего полинома ВАХ, которые рассчитываются на каждом этапе увеличения мощности излучения и разности гармоник в составе зондирующего АМ-сигнала [9]. Идентификация предполагает поиск полученного идентификационного портрета в имеющейся базе эталонов.

В ходе проведенных экспериментов по оценке эффективности обнаружения ЭЗУ были уточнены основные тактические характеристики АПК и установлено, что вероятность правильного обнаружения, рассчитанная по данным эксперимента для полупроводников, составила 0,83 и оказалась на 14 % выше от аналогичного показателя рассмотренного современного способа обнаружения, опубликованного в открытой печати [10]. Вероятность неопределённого распознавания по данным экспонента составляла 0,71, что на 13 % выше от аналогичного показателя современного способа. Полученные результаты эксперимента доказывают улучшение показателей вероятности правильного обнаружения ЭЗУ в среднем на 12 % в условиях реальной помеховой обстановки в диапазоне излучаемых АПК частот 800–900 МГц. [4].

Применение разработанного АПК и принципиально нового алгоритма обнаружения и идентификации ЭЗУ существенно изменяет представление о возможностях нелинейной радиолокации применительно к задаче обнаружения ЭЗУ. Их совместное применение позволит повысить эффективность поиска и достоверность идентификации ЭЗУ, а также сократить время их локализации. Операторы поисковики будут иметь возможность не только обнаружить, но и получить информацию о характеристиках ЭЗУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Чертков, В. М. Использование фазоманипулированного сигнала в задачах нелинейной радиолокации / В. М. Чертков, С. В. Мальцев // Вестник Полоцкого Государственного Университета Серия С Фундаментальные Науки. – 2010. – № 3. – С. 129–134.
2. Чертков, В. М. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного поиска с возможностью идентификации радиоэлектронных средств скрытого съема информации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Известия НАН Беларуси Серия Физико-Технических Наук. – 2016. – № 4. – С. 99–105.
3. Чертков, В. М. Метод повышения достоверности идентификации закладных устройств с применением DSB-сигнала / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Интеллектуальные системы на транспорте: Материалы V международной научно-практической конференции «ИнтеллекТранс-2015». – СПб.: ПГУПС, 2015. – С. 293–298.

4. Чертков, В. М. Способ обнаружения электронных закладных устройств: результаты применения / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Современные средства связи : материалы XXIII Международ. науч.-техн. конф., 18–19 окт. 2018 года, Минск, РБ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.] / Белорусская государственная академия связи. – Минск, 2018. – С. 228–229.
5. Чертков, В. М. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного поиска с возможностью идентификации РЭС скрытого съема информации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Молодежь в науке – 2015 : материалы X Международ. науч. конф., 1–4 дек. 2015 г., Минск, РБ / НАН РБ. – Минск, 2015. – С. 292.
6. Чертков, В. М. Программное управление аппаратно-программным комплексом автоматизированного поиска радиоэлектронных средств скрытого съема информации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Информационные технологии и системы 2015 (ИТС 2015): материалы междунар. научной конференции, 28 окт. 2015 года, Минск, Респ. Беларусь / БГУИР; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.] / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 34–35.
7. Чертков, В. М. Решающее правило идентификации элементов с нелинейными вольт-амперными характеристиками в нелинейной радиолокации / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Технические средства защиты информации : тезисы докладов XVI Белорусско-российской научно-технической конференции, Минск, 5 июня 2018 г. / БГУИР. – Минск, 2018. – С. 98.
8. Чертков, В. М. Способ обнаружения нелинейного объекта с идентификацией типа нелинейности: пат. BY 19665 / В. М. Чертков, С. В. Мальцев G 01S 13/00 (2006.01), G 01S 13/88 (2006.01). – 2015.
9. Чертков, В. М. Алгоритм определения меры схожести идентификационных образов закладных устройств / В. М. Чертков, В. К. Железняк // Вестник Полоцкого Государственного Университета Серия С Фундаментальные Науки. – 2018. – № 4. – С. 20–27.
10. Каргашин, В. Л. Нелинейная ближняя радиолокация. Новые алгоритмы идентификации электронных устройств / В. Л. Каргашин, В. Н. Ткач, Д. В. Ткачев // Специальная Техника ОАО «Электрозавод» Москва. – 2006. – № 6. – С. 42–48.

CHERTKOV V. M., ZHELEZNJAK V. K.

HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM FOR DETECTION OF COVERT RADIOELECTRONIC MEANS

Summary. *The block-diagram of hardware-software system developed for detection and identification of covert radioelectronic means is designed. The main features of the developed block-diagram of hardware-software system are noted. The possibility of automated identification is shown on the basis of the developed method of restoring the type of current-voltage characteristic. The results of one of the modern and developed methods for detecting covert radioelectronic means are presented.*

К. Н. ЧУГАЙ¹, Е. С. МАКСИМОВИЧ²

¹ Государственное учреждение «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»

² Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»

ФОРМИРОВАНИЕ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА В РАДИОЛОКАТОРЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Аннотация. В докладе рассматриваются факторы, оказывающие влияние на распространение радиоволн СВЧ диапазона в железнодорожном полотне (насыпи) с учетом условий наблюдения, а также определены подходы к формированию отраженного сигнала от заглубленного объекта и от неоднородностей, которые могут возникать со временем в балластной призме.

Расширение спектра задач, решаемых с помощью радиолокаторов подповерхностного зондирования СВЧ диапазона в направлении повышения безопасности железнодорожных перевозок, обуславливает необходимость проведения исследований железнодорожного полотна (насыпи) на предмет решения задачи обнаружения и идентификации заглубленных, в том числе взрывоопасных объектов, а так же оперативного контроля элементов железнодорожного полотна (обнаружение линз, смещение слоев и пр.). Небольшие глубины (порядка 2 м), большой динамический диапазон регистрируемых сигналов (порядка 90 Дб), интерференция радиоволн, обусловленная большим количеством регулярно расположенных неоднородностей (шпалы, рельсы, металлические крепежи, гравийный слой) и наличием балластной призмы, формируют особые взгляды на построение радиолокаторов подповерхностного зондирования для спецприменения [1–4].

Радиолокационные методы, наряду с решением задачи обнаружения заглубленных объектов, позволяют оценивать их параметры, глубину залегания, а также получать некоторые структурные и диэлектрические характеристики укрывающих сред. Решение задачи определения диэлектрических свойств играет ключевую роль для достоверного восстановления границ слоя и глубины его залегания. В то же время при исследовании железнодорожного полотна с помощью радиолокатора подповерхностного зондирования следует выделить ряд специфических отличий от традиционной радиолокации, которые выражаются в следующем:

снижение дальности (глубины) обнаружения, обусловленное более существенным значением величины ослабления электромагнитной волны в укрывающей среде, чем в атмосфере;

антенная система в подповерхностной радиолокации работает в ближней зоне (часто непосредственно в контакте с объектом), поле формируется в среде вблизи апертуры, в отличие от антенных систем, используемых в традиционной радиолокации;

электромагнитная волна при прохождении в грунте претерпевает существенные дисперсионные искажения из-за частотной зависимости скорости распространения (показателя преломления) от диэлектрических свойств укрывающей среды и изменчивости профиля с глубиной [5].

Для эффективного обнаружения заглубленных взрывоопасных объектов и решения задачи оперативного контроля наличия пустот или смещения слоев железнодорожного полотна, учитывая характер изменения затухания в исследуемой слоистой среде [2–4], накладываются определенные ограничения на рабочий диапазон частот зондирования и при этом дополнительно должен учитываться эффект резонансного рассеяния электромагнитных волн [6]. Для данной конкретной задачи частотный диапазон целесообразно ограничивать 1,5 ГГц, что позволит минимизировать искажения принятого сигнала, обусловленные рассеянием на структурных неоднородностях укрывающей среды.

Рассматривая типовую ситуацию сканирования участка железнодорожного полотна, наряду с обнаружением заглубленных взрывоопасных объектов, можно выявить проблемные участки, обусловленные наличием линз в балластной призме. Схема

наблюдения неоднородностей в железнодорожном полотне, когда антенна с экранированной конструкцией (диполь типа «бабочка») стоит под углом слева, сверху бетонные шпалы и металлические рельсы, трехслойная система представляет собой слои песчаной смеси сверху и снизу, посередине – глинистый слой с линзой, показана на рисунке 1.

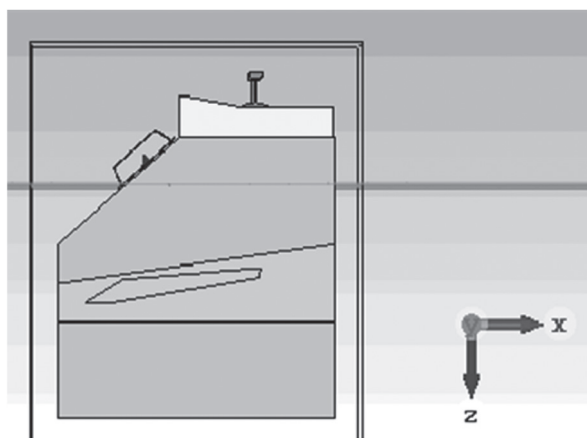


Рисунок 1. – Схема наблюдения

Результаты математического моделирования (при $f_0=400$ МГц) в случае:
распределения электрического поля в однослойной модели слой сухой песок с $\varepsilon=2,53$ (рисунок 2);

распределения электрического поля в трехслойной модели, без линзы, верхний слой сухой песок с $\varepsilon=2,53$, второй слой – глина влажная с $\varepsilon=13,8$, третий слой песок с $\varepsilon=2,53$ (рисунок 3);

распределения электрического поля в трехслойной модели, верхний слой сухой песок с $\varepsilon=2,53$, второй слой – глина влажная с $\varepsilon=13,8$, в которой расположена воздушная линза $\varepsilon=1$, третий слой песок с $\varepsilon=2,53$ (рисунок 4);

распределения электрического поля в трехслойной модели, верхний слой сухой песок с $\varepsilon=2,53$, второй слой – глина влажная с $\varepsilon=13,8$, в которой расположена водяная линза $\varepsilon=78$, третий слой песок с $\varepsilon=2,53$ (рисунок 5);

Специфика формирования отраженного сигнала в подповерхностной радиолокации обусловлена резким изменением диэлектрической проницаемости на границе раздела сред, наличием поглощающего (отражающего) слоя, наличием объекта ограниченных размеров. Все это существенно усложняет условия обнаружения объекта и интерпретации полученных результатов, особенно в случае многослойной укрывающей среды.

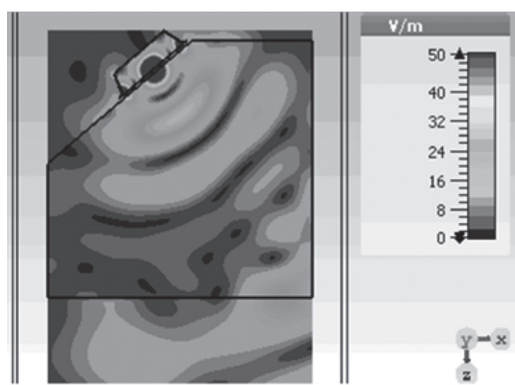


Рисунок 2. – Распределение электрического поля в однослойной модели на частоте 0,4 ГГц

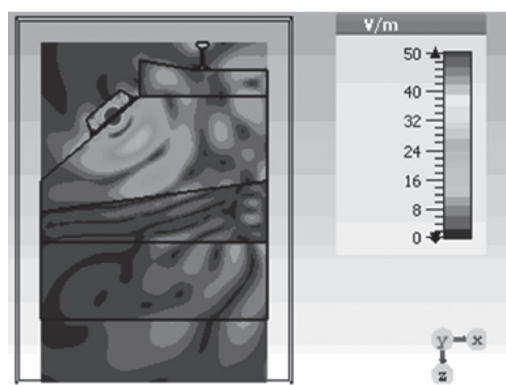


Рисунок 3. – Распределение электрического поля в трехслойной модели, без линзы на частоте 0,4 ГГц

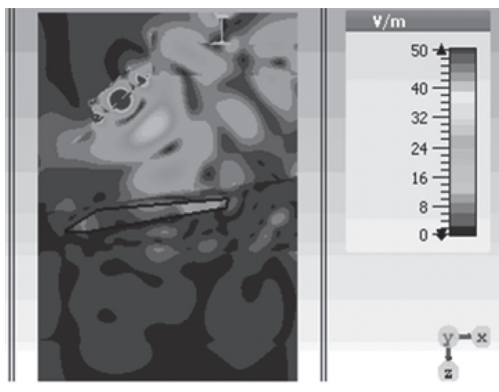


Рисунок 4. – Распределение электрического поля в трехслойной модели, в случае воздушной линзы на частоте 0,4 ГГц

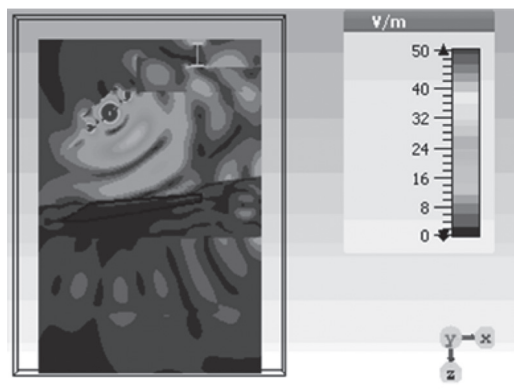


Рисунок 5. – Распределение электрического поля в трехслойной модели, в случае водяной линзы на частоте 0,4 ГГц

Основываясь на результатах моделирования можно обосновать требования к радиолокатору подповерхностного зондирования, способного решать конкретные задачи исследования, а именно, определить частотный диапазон, соответственно, глубину проникновения сигнала, оценить разрешающую способность с учетом разных частот, оценить распределение поля в среде, рассеяние от заглубленного объекта, что дает дополнительную информацию особенно при работе со сложными слоистыми средами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Горбунов, Ю. Н. Радиолокация: стохастический подход / Ю. Н. Горбунов, Г. В. Куликов, А. В. Шпак; под ред. Ю. Н. Горбунова. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2016. – 520 с.
2. Савенко, С. А., Чугай, К. Н., Максимович, Е. С. Теория и практика разработки радиолокатора подповерхностного зондирования железнодорожного полотна // Наука и воен. безопасность. – 2018. – № 4. – С. 31–36.
3. Изюмов, С. В., Дручинин, С. В., Вознесенский, А. С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие. – М.: Издательство «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.
4. Хакиев, З. Б., Шаповалов, В. Л., Кругликов, А. А., Явна, В. А. Георадиолокационный метод определения физических параметров конструктивных слоев автомобильных и железных дорог // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3. – С. 43–52.
5. Демьянюк, Д. В., Чугай, К. Н., Максимович, Е. С. Имитационная модель сигнала отраженного от заглубленного объекта с учетом свойств укрывающей среды // Доклады БГУИР. – 2018. – № 4. – С. 37–44.
6. De Chiara, F., Fontul, S., Fortunato, E. GPR laboratory tests for railways materials dielectric properties assessment // Remote Sensing. – Vol. 6. – 2014. – P. 9712–9728.

CHUGAI K. N.¹, MAKSIMOVICH E. S.²

¹ State Institution «Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus»

² State Scientific Institution «Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus»

FORMATION OF REFLECTED SIGNAL IN THE GROUND PENETRATING RADAR OF THE RAILROAD

Summary. The report discusses the factors influencing the propagation of microwave radio waves in the railroad, taking into account the conditions of observation, and also defines the approaches to the formation of the reflected signal from the hidden object and from the heterogeneities that may occur over time in the ballast.

К. Н. ЧУГАЙ, С. А. САВЕНКО

Государственное учреждение «Научно-исследовательский институт
Вооруженных Сил Республики Беларусь»

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАТОРЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. В докладе рассматриваются подходы к обработке принятого сигнала в радиолокаторе подповерхностного зондирования железнодорожного полотна. Приводятся результаты обработки сверхширокополосных сигналов наносекундной длительности, полученных в ходе экспериментальных исследований в интересах формирования радиолокационных изображений заглубленных объектов.

Современное развитие подповерхностной радиолокации невозможно без применения сверхширокополосных сигналов. Применение сверхширокополосных сигналов позволяет реализовать информационные технологии, которые вообще не имеют конструктивных аналогов в рамках традиционных («узкополосных», «широкополосных») подходов в радиотехнике [1, 2]. К сверхширокополосным сигналам следует относить сигналы, для которых выполняется условие $\frac{f_b - f_n}{f_b + f_n} \gg 0.2$, где $f_b(f_n)$ – верхняя (нижняя) граничная частота спектра по уровню 10 дБ.

Актуальность совершенствования методов обработки принятого сигнала в радиолокаторе подповерхностного зондирования определяется востребованностью таких систем при обнаружении и классификации заглубленных взрывоопасных объектов, а так же оперативного контроля элементов дорожного покрытия. Небольшие дальности (порядка 1,5 м), большой динамический диапазон регистрируемых сигналов (порядка 92 Дб), интерференция радиоволн определяют специфику построения радиолокаторов подповерхностного зондирования [3, 4, 5, 6, 7].

Учитывая существующий компромисс при выборе длины волны, где для минимальных энергетических потерь при распространении в укрывающих средах необходимо использовать низкочастотный диапазон, а для обеспечения предельной разрешающей способности длина волны должна быть сопоставима с размерами объектов зондирования [6, 8], то рабочие частоты целесообразно ограничивать до 2 ГГц, что также позволит минимизировать искажения принятого сигнала, обусловленных рассеянием на структурных неоднородностях укрывающей среды.

Приемлемый уровень энергетических потерь при требуемом разрешении по глубине возможно обеспечить лишь за счет использования сверхширокополосных сигналов, в частности непрерывных сигналов с модуляцией частоты, например, по пилообразному или ступенчатому (дискретному) закону с девиацией до сотен и более мегагерц (частотный метод подповерхностного обзора) или предельно коротких радиоимпульсов в виде однопериодной волны (моноимпульса) длительностью в единицы наносекунд (импульсный метод подповерхностного обзора).

Применение частотного метода предполагает получение информации о наблюдаемом объекте в результате обработки сигнала разностной частоты, получаемого на выходе смесителя $s(t)$, выражение для которого имеет вид

$$F(t) = f(t) u_{on}(t) \quad (1)$$

где $u_o(t) = U_o(t - nT_n) \exp(j(\omega_0 t + \varphi_0))$, $n = 0 \dots \infty$ – опорный сигнал.

При этом результат оценки разностной частоты с учетом пересчета можно интерпретировать в координаты глубины r с использованием выражения [9, 10]

$$\tilde{r}_m = \frac{F_p c T_0}{2 \Delta f_0}, \quad (2)$$

где Δf_0 – ширина спектра зондирующего сигнала; c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме; T_0 – длительность радиоимпульса.

Положение максимума полученного радиолокационного изображения на оси частот характеризует разностную частоту F_p , которая прямо пропорциональна времени запаздывания отраженного сигнала и зависит от достоверности априорных сведений о параметрах грунта, в частности, диэлектрической проницаемости и высоты подъема антенного модуля над поверхностью грунта. Значение разностной частоты определяется в соответствии с выражением [11]

$$F_p = \frac{4 \Delta f_0}{T_0 c} (r_z + r_m \sqrt{\varepsilon}), \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость исследуемой среды; r_z – высота подъема антенного модуля над поверхностью земли; r_m – глубина залегания наблюдаемого объекта.

При этом разрешающая способность по глубине Δ_r , которая определяется шириной спектра зондирующего сигнала [10, 12]

$$\Delta_r = \frac{V_i}{2 \Delta f_0}, \quad (4)$$

где V_i – скорость распространения электромагнитной волны в i -м слое грунта.

В результате в основе методов обработки принятого сигнала лежат достаточно хорошо разработанные методы обработки для узкополосных сигналов, которые доработаны с учетом условий наблюдения в подповерхностной радиолокации.

В случае импульсного метода подповерхностного обзора сигнал, отраженный от заглубленного объекта, представляет собой последовательность разнесенных во времени сигналов, отраженных от различных «блестящих точек» объекта, каждый из которых в свою очередь представляет собой свертку с импульсной характеристикой «блестящей точки». Данное обстоятельство требует разработки новых методов обработки принятого сигнала на основе теории стохастической радиолокации [3]. Учитывая условия формирования отраженного сигнала [6] принятый сигнал $f(t)$ следует рассматривать как:

аддитивную смесь помехи $h(t)$, в качестве которой выступает белый шум и сигнала, отраженного от поверхности укрывающей среды $n(t)$ в отсутствие заглубленного объекта;

в случае же наличия заглубленного объекта входной сигнал $f(t)$ равен

$$f(t) = n(t) + m(t) + h(t). \quad (5)$$

Полезный сигнал, обусловленный отражениями от заглубленного объекта может быть представлен в виде совокупности сигналов, отраженных от распределенных по поверхности объекта «блестящих точек»

$$m(t) = \sum_{k=0}^{K-1} m_0(t - kT), \quad (6)$$

где $m_0(t)$ – импульс неизвестной формы обусловленный отражением от «блестящей точки» длительностью T_0 ; K – количество импульсов последовательности; T – интервал следования импульсов.

Основываясь на достаточно эффективном алгоритме обнаружения стохастического сигнала на фоне белого шума, с учетом априорной информации об идентичности формы принимаемых радиоимпульсов [13, 14, 15] предлагается алгоритм обнаружения, учитывающий условия наблюдения сигнала отраженного от заглубленного объекта на фоне мощных отражений от регулярно расположенных неоднородностей, слоистой укрывающей среды вида

$$\int_0^{T_0} \left(\sum_{k=0}^{K-1} s(t + kT) \right)^2 dt \underset{<}{>} \Lambda_0, \quad (7)$$

где $s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t-\tau)d\tau$ – результат предварительной обработки принятого сигнала;
 $h(t)$ – импульсная характеристика фильтра; Λ_0 – порог обнаружения.

Предложенные в докладе подходы к обработке принятого сигнала в радиолокаторе подповерхностного зондирования железнодорожного полотна, позволяют решить задачу выделения полезного сигнала на фоне мощных отражений от регулярно расположенных неоднородностей, слоистой укрывающей среды, состоящей из щебня и песка, в условиях ограниченного времени наблюдения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Радзиевский, В. Г., Трифонов, П. А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. – М.: «Радиотехника», 2009. – 288 с.
2. Анцев, Г., Сарычев, В. Сверхширокополосная радиолокация // Радиоэлектронные технологии 2018. – № 1 – С. 60–67.
3. Горбунов, Ю. Н. Радиолокация: стохастический подход / Ю. Н. Горбунов, Г. В. Куликов, А. В. Шпак; под ред. Ю. Н. Горбунова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 520 с.
4. Савенко, С. А. Проблематика построения радиолокатора подповерхностного зондирования / С. А. Савенко [и др.] // Наука и военная безопасность. – 2013. – № 3. – С. 20–27.
5. Чугай, К. Н., Савенко, С. А., Батеновский, М. В., Демьянюк, Д. В. Подходы к обнаружению взрывоопасных объектов в железнодорожном полотне (насыпи) // Наука и военная безопасность. – 2017. – № 4. – С. 29–33.
6. Савенко, С. А., Чугай, К. Н., Максимович, Е. С. Теория и практика разработки радиолокатора подповерхностного зондирования железнодорожного полотна // Наука и воен. безопасность. – 2018. – № 4. – С. 31–36.
7. Изюмов, С. В., Дручинин, С. В., Вознесенский, А. С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие. – М.: Издательство «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2008. – 196 с.
8. David, J. Daniels Ground Penetrating Radar for Buried Landmine and IED Detection / J. Daniels David // Unexploded Ordnance Detection and Mitigation. – 2009. – С. 89–111.
9. Савенко, С. А., Гуринович, А. Н. Система подповерхностного зондирования заглубленных объектов // Наука и военная безопасность. – 2011. – № 3. – С. 42–46.
10. Вопросы подповерхностной радиолокации / А. Ю. Гринев [и др.]; под общ. ред. А. Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
11. Чугай, К. Н., Савенко, С. А., Лопатченко, А. С. Современный подход к обработке сложных сигналов в системе подповерхностного зондирования // Наука и военная безопасность. – 2015. – № 1. – С. 39–43.
12. Подповерхностная радиолокация / М. И. Финкельштейн [и др.]; под общ. ред. М. И. Финкельштейна. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.
13. Радиотехнические системы / [Ю. М. Казаринов и др.]; под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 592 с.
14. Сверхширокополосные технологии в радиолокации / Под ред. Д. Д. Тейлора. – В.: CRC Press, 2000. – 34 с.
15. Зиганшин, Э. Г. Обнаружение сверхширокополосных радиолокационных сигналов отраженных от сложных целей: Автореф... дис. кан. тех. наук. – М.: 2006. – 27 с.

CHUGAI K. N., SAVENKO S. A.

State Institution «Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus»

METHODS OF PROCESSING OF ULTRA-WIDEBAND SIGNALS IN THE GROUND PENETRATING RADAR

Summary. The report discusses approaches to processing the received signal in the ground penetrating radar of the railroad. The results of processing ultra-wideband signals of nanosecond duration obtained during experimental studies in the interests of the formation of radar images of hidden objects are given.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗАБРАЗИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ (БУФО) ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАТЕХНИКИ

Аннотация. В данной статье описывается влияние безабразивной ультразвуковой финишной обработки на шероховатость различных материалов (алюминиевого сплава Д16Т, стали 30ХГСА, титановых сплавов BT22, OT4-1) применяемых в авиатехнике.

Безабразивная ультразвуковая финишная обработка материалов (БУФО) достаточно известна. Применяется для упрочнения поверхности деталей, улучшения шероховатости поверхности. Преимуществом безабразивной ультразвуковой финишной обработки, по сравнению с известным методом алмазного выглаживания, является возможность упрочнения деталей с отверстиями, применение меньшего бокового давления на деталь, возможность упрочнения деталей не только из сталей, но также из титановых, алюминиевых и медных сплавов и получения на данных деталях низкой шероховатости поверхности. Сам процесс отличается простотой применения, низким энергопотреблением, высокой производительностью.

В данной работе рассмотрим применение БУФО с целью улучшения шероховатости поверхности деталей из титановых и алюминиевых сплавов, образцов из сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А с отверстиями.

Режимы обработки и полученная шероховатость:

1) Образец № 1 (вал) – из сплава Д16Т, размеры $\varnothing 33 \times 128$ мм, после чистового точения. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra0.92 мкм обработан методом БУФО на режимах:

- частота вращения детали – 315 об/мин;
- подача – 0.1 мм/об;
- усилие статического нагружения обрабатываемой детали – 0.25 мм по лимбу токарного станка.

Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra0.92 мкм.

Конечная шероховатость обработанной поверхности составила Ra0.09 мкм.

2) Образец № 4 (гильза) – из сплава BT22, размеры $\varnothing 20 \times 155$ мм, после чистового точения. Толщина стенки обрабатываемой поверхности – 2.5 мм. Имеются отверстия на обрабатываемой поверхности. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra1.1 мкм обработан методом БУФО на режимах:

- частота вращения детали – 315 об/мин;
- подача – 0.1 мм/об;
- усилие статического нагружения обрабатываемой детали – 0.25 мм по лимбу токарного станка.

Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra1.1 мкм.

Конечная шероховатость обработанной поверхности составила Ra0.14 мкм.

3) Образец № 5 (вал) – из стали 30ХГСА, размеры 23×210 мм, после чистового точения. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra1.8 мкм обработан методом БУФО на режимах:

- частота вращения детали – 400 об/мин;
- подача – 0.2 мм/об;
- усилие статического нагружения обрабатываемой детали – 4.5 мм по лимбу токарного станка.

Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra1.8 мкм.

Конечная шероховатость обработанной поверхности составила Ra0.4 мкм.

4) Образец № 6 (вал) – из стали 30ХГСА с хромовым покрытием, размеры $\varnothing 25 \times 230$ мм, после шлифования и полирования. Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra0.25 мкм обработан методом БУФО на режимах:

- частота вращения детали – 315 об/мин;
- подача – 0.1 мм/об;

– усилие статического нагружения обрабатываемой детали – 1.0 мм по лимбу токарного станка.

Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности Ra0.25 мкм.

Конечная шероховатость обработанной поверхности составила Ra0.17 мкм.

5) Образец № 7 БОЛТ ОТ4-1, параметры шероховатости представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры шероховатости образца № 7, Ra

Поверхность без обработки	Поверхность обработанная БУФО	Поверхность без обработки	Поверхность обработанная БУФО
2,81 2,80 2,88	1,69 1,6 1,665	2,94 2,54	1,39; 2,5; 1,5

6) Образец № 8 Шток ВТ6С без хромового покрытия, параметры шероховатости представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Параметры шероховатости образца № 8, Ra

Поверхность без обработки	Поверхность обработанная БУФО
1,3; 0,48; 0,32; 0,34; 0,43; 0,42	0,14; 0,17; 0,2; 0,19; 0,18

7) Образец № 9 Шток ВТ6С с хромовым покрытием (и шлифовкой), параметры шероховатости представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Параметры шероховатости образца № 9, Ra

Поверхность обработанная БУФО (1 проход)	Поверхность обработанная БУФО (2 прохода)	Поверхность без обработки
0,69; 0,169; 0,19	0,14; 0,13; 0,137; 0,142; 0,11; 0,12	0,31; 0,29; 0,29

8) Образец № 10 Сталь 30ХГСА, параметры шероховатости представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Параметры шероховатости образца № 10, Ra

Поверхность без обработки	Поверхность обработанная БУФО
1,9; 1,8	0,27; 0,29; 0,48; 0,48; 0,96; 0,48; 0,24; 0,59; 1,0; 0,18

9) Образец № 11 Алюминий Д16Т, параметры шероховатости представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Параметры шероховатости образца № 11, Ra

Поверхность без обработки	Поверхность обработанная БУФО	Поверхность без обработки
2,16; 2,2	0,098; 0,087; 0,111; 0,105; 0,094	3,14; 4,6; 4,6

Исследованиями установлено:

– наличие отверстий и пазов на обрабатываемой наружной поверхности не является препятствием для обработки методом БУФО сталей, титановых и алюминиевых сплавов;

– наличие тонких стенок обрабатываемых образцов отрицательно влияет на шероховатость поверхности после обработки методом БУФО из-за общей низкой жесткости конструкции и необходимости приложения усилия статического нагружения к обрабатываемой детали (особенность БУФО);

– износ сменного наконечника (сонотрода) пьезоэлектрической головки крайне отрицательно влияет на качество обработанной методом БУФО поверхности при обработке титановых и алюминиевых сплавов;

- применение СОЖ при обработке методом БУФО титановых и алюминиевых сплавов обязательно;
- качество хромового покрытия на стали 30ХГСА после обработки методом БУФО не ухудшается (сколов, растрескивания не наблюдается);
- получение значительно (на два или более класса) более высокой чистоты поверхности образцов из стали 30ХГСА, титановых и алюминиевых сплавов после обработки методом БУФО технологически возможно;
- первоначальный размер поверхности образца из стали 30ХГСА, измеренный с точностью до 0.01 мм, после обработки методом БУФО остался неизменным;
- первоначальный размер поверхности образца из стали 30ХГСА с хромовым покрытием, измеренный с точностью до 0.01 мм, после обработки методом БУФО остался неизменным;
- первоначальный размер поверхности образца из титанового сплава, измеренный с точностью до 0.01 мм, после обработки методом БУФО остался неизменным;
- первоначальный размер поверхности образца из алюминиевого сплава, измеренный с точностью до 0.01 мм, после обработки методом БУФО уменьшился на 0.01 мм;
- для гарантированного получения положительного результата целесообразно чистовую токарную обработку и безабразивную ультразвуковую финишную обработку проводить за один установ детали. В противном случае перед обработкой методом БУФО требуется выставлять обрабатываемую деталь с высокой (до 0.01 мм) точностью, что не всегда технологически возможно.

YURKEVICH S. N., VASHCHANKA I. M., YURKEVICH-PATOTSKAYA K. S.
JSC «558 Aircraft repair plant»

IMPROVEMENT THE SURFACE ROUGHNESS OF AIRCRAFT PARTS BY USING NON-ABRASIV ULTRASONIC FINISHING

Summary. *The article is about how non-abrasiv ultrasonic finishing improves the surface roughness of the different alloys (aluminum alloy Д16Т, steel 30ХГСА, titanium alloys BT22, OT4-1, BT6C).*

С. Н. ЮРКЕВИЧ, И. М. ВАЩЕНКО, К. С. ЮРКЕВИЧ-ПОТОЦКАЯ
ОАО «558 Авиационный ремонтный завод»

ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗАБРАЗИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ (БУФО) ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВИАТЕХНИКИ

Аннотация. В данной статье описывается влияние безабразивной ультразвуковой финишной обработки на прочность поверхности стали 30ХГСН2А применяемых в авиатехнике.

Безабразивная ультразвуковая финишная обработка материалов (БУФО) достаточно известна. Применяется для упрочнения поверхности деталей, улучшения шероховатости поверхности. Преимуществом безабразивной ультразвуковой финишной обработки, по сравнению с известным методом алмазного выглаживания, является возможность упрочнения деталей с отверстиями, применение меньшего бокового давления на деталь, возможность упрочнения деталей не только из сталей, но также из титановых, алюминиевых и медных сплавов и получения на данных деталях низкой шероховатости поверхности. Сам процесс отличается простотой применения, низким энергопотреблением, высокой производительностью.

В данной работе рассмотрим применение БУФО с целью упрочнения поверхности деталей из титановых и алюминиевых сплавов, образцов из сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А с отверстиями.

Режимы обработки и прочностные характеристики:

1. Образец № 1/2 (рисунок 1), с твердым хромом на стали 30ХГСН2А, с последующей шлифовкой и БУФО с двух сторон по разным режимам, при фиксированном прогибе на 0,5 мм выдерживает нагрузку 2943 Н (сторона а), 2639 Н (сторона б) с отсутствием трещин и отслоений на покрытии, при фиксированном прогибе на 1 мм выдерживает нагрузку 5483,8 Н (сторона а) при отсутствии трещин, 5748,7 Н (сторона б) с присутствием трещин шириной до 5 мкм на покрытии с локальными отслоениями от основы. Покрытие практически беспористое (до 5 %).

2. Образец № 2/1 (рисунок 1) с покрытием «молочный + твердый» хром на стали 30ХГСН2А с последующей шлифовкой и выглаживанием при фиксированном прогибе на 0,5 мм выдерживает нагрузку 2452,5 Н с присутствием трещин шириной до 5 мкм на покрытии, при фиксированном прогибе на 1 мм выдерживает нагрузку 4247,7 Н с отрывом и выкрашиванием покрытия, с присутствием трещин на стали. Средняя шероховатость со стороны трубы, из которой вырезаны образцы 0,331 Ra, исходной части трубы – 0,378 Ra. Покрытие плотное, практически беспористое, твердый хром сошлифован.

3. Образец № 3/2 (рисунок 1) без хрома из стали 30ХГСН2А с последующей шлифовкой и БУФО при фиксированном прогибе на 0,5 мм выдерживает нагрузку 1932,6 Н (образец 3/2-1), 3825,9 Н (образец 3/2-2) при фиксированном прогибе на 1 мм с трещинами на стали, только со-шлифовкой (без БУФО) выдерживает нагрузку 1795,2 Н (образец № 3/2-5) при фиксированном прогибе на 0,5 мм, 3521,8 Н (образец 3/2-6) при фиксированном прогибе на 1 мм. Средняя шероховатость со стороны трубы, из которой вырезаны образцы после БУФО – 0,098 Ra, после шлифовки – 0,244 Ra.

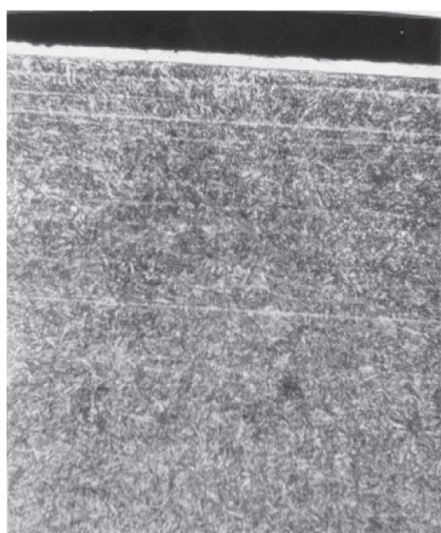
4. Образец № 3/1 (рисунок 1) без хрома, после шлифования и выглаживания при фиксированном прогибе на 0,5 мм выдерживает нагрузку 2060,1 Н с присутствием рваного края на стали, при фиксированном прогибе на 1 мм выдерживает нагрузку 4463,6 Н с присутствием рваного края на стали. Средняя шероховатость со стороны трубы, из которой вырезаны образцы 0,246 Ra, исходной части трубы – 0,315 Ra.

Нагрузка при прогибе на заданную величину (F), величина прогиба (1), ширина раскрытия трещины (а), величина отслоения покрытия от основы (в), структура представлены в таблице 1.

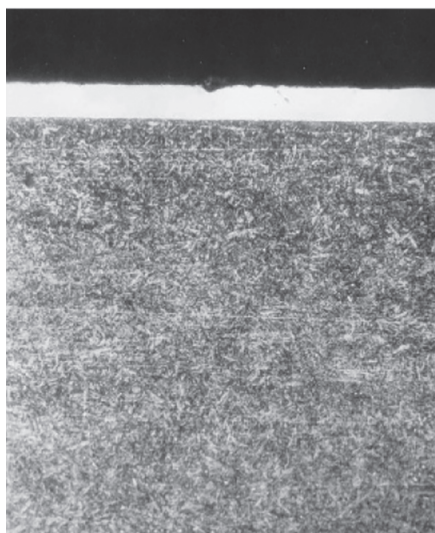
Таблица 1

Наименование образца, обработка	№ образца	Толщина образца, мм	Толщина покрытия, мкм	Структура и состояние хромового покрытия и основы	Шероховатость, $R_{\text{аср}}$, $R_{\text{заср}}$, мкм	Величина прогиба, I , мм	Нагрузка при прогибе, F , Н
1/2, твердый хром, шлифование, БУФО	1/2-2а	5,0	25–35	Покрытие практически беспористое (до 5 %)	0,160/ 0,488–0,500	0,5	2943
	1/2-6б	5,0	50–55	Покрытие практически беспористое (до 5 %).		1	5748,7
2/1, хром молочный +твердый, шлифовка, выравнивание	2/1-1	5,0	10–20	Покрытие плотное, практически беспористое. Трещины на покрытии и в стали до 5 мкм	0,331–0,378	0,5	2452,5
	2/1-2	5,0	10–20	Покрытие плотное, практически беспористое. Отрыв и выкрашивание покрытия, трещины на стали		1	4247,7
3/2, контрольный, без хрома, шлифовка, БУФО Шлифовка без БУФО	3/2-1	4,5		Покрытие отсутствует	0,098	0,5	1932,6
	3/2-2	4,5		Покрытие отсутствует		1	3825,9
	3/2-5	4,5	–	Покрытие отсутствует	0,244	0,5	1795,2
	3/2-6	4,5	–	Покрытие отсутствует		1	3521,8
3/1, без хрома, шлифование, выравнивание	3-1	5,0	–	Рваный край основы	0,246/0,315	0,5	2060,1
	3-2	5,0		Рваный край основы		1	4463,6

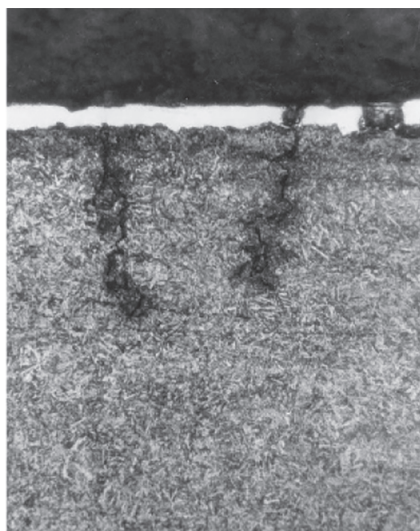
Примечание*. Шероховатость $R_{\text{аср}}$ – средняя шероховатость со стороны трубы, из которой вырезаны образцы, $R_{\text{заср}}$ – средняя шероховатость исходной части трубы.



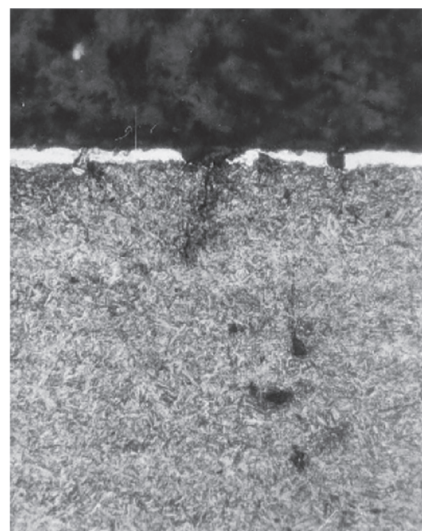
Образец 1/2-2а



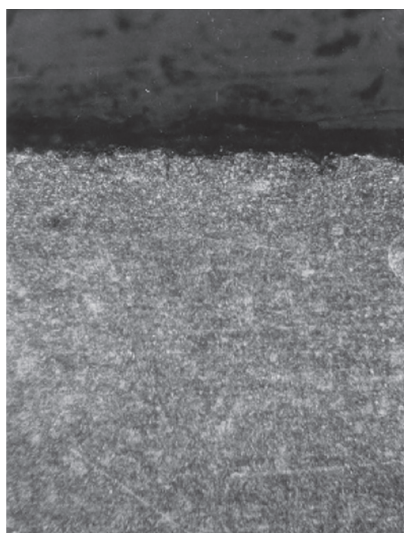
Образец 1/2-2б



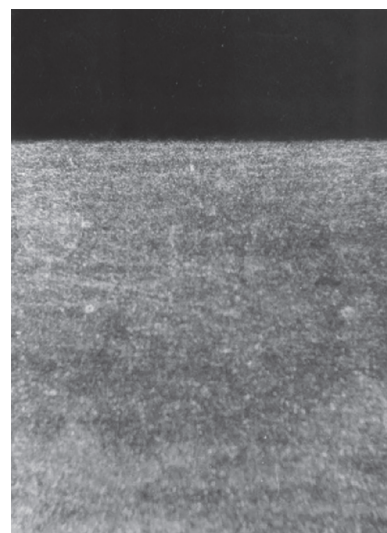
Образец 2/1-1



Образец 2/1-2



Образец 3/2-5



Образец 3/2-1

Рисунок 1. – Микрошлифы образцов, x200

Анализ результатов:

1. На образцах без хрома шероховатость поверхности лучше после обработки «шлифование + БУФО» (0,098–0,099 Ra при 0,244 Ra после шлифования), чем после «шлифования + алмазное выглаживание» (0,246 Ra при 0,315 Ra после шлифования).

2. Анализ дефектов показывает, что появление дефектов в виде отрыва и выкрашивания покрытий обуславливается качеством предыдущей обработки – качеством нанесения хрома и проведения шлифования, а не конечной – алмазного выглаживания или БУФО, или вида хрома («молочный + твердый» или «твердый»).

3. Трещины, видимые на основе образцов 2/1 и 2/2 являются дефектом материала, поскольку над частью трещин покрытие не разрушено.

4. На образцах с покрытием твердый хром параметры шероховатости поверхности после БУФО (0,160 Ra при 0,488–0,500 Ra после шлифования обр. 1/2) лучше, чем параметры шероховатости после обработки алмазным выглаживанием 0,335–0,395 Ra обр. 3/1). Требования по шероховатости к обрабатываемым поверхностям от 0,2 до 0,8 Ra.

5. Обработка БУФО (образцы 3/2-1, 3/2-2) приводит к упрочнению материала по сравнению с обработкой шлифованием (образцы 3/2-5, 2/2-6). После обработки

БУФО по твердому хрому образец 1/2-2а выдержал испытание на изгиб 1 мм без образования трещин на покрытии.

YURKEVICH S. N., VASHCHANKA I. M., YURKEVICH-PATOTSKAYA K. S.
JSC «558 Aircraft repair plant»

SURFACE STRENGTHENING OF AIRCRAFT PARTS BY USING NON-ABRASIV ULTRASONIC FINISHING

Summary. *The article is about how non-abrasiv ultrasonic finishing affect on strength of the steel 30XГCH2A.*

Научное издание

**8-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИМ ПРОБЛЕМАМ, ПРОБЛЕМАМ ОБОРОНЫ
И БЕЗОПАСНОСТИ, ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ ДВОЙНОГО
ПРИМЕНЕНИЯ**

(Минск, 16–17 мая 2019 г.)

Сборник научных статей

В пяти частях

Часть 1

Статьи публикуются в авторской редакции

Ответственный за выпуск *В. В. Казбанов*
Корректор *О. Г. Тихонович*
Компьютерная верстка *М. Р. Аксой*
Дизайн обложки *В. А. Рацкевич*

Подписано в печать 26.04.2019. Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 12,96. Уч.-изд. л. 6,6.
Заказ 4. Тираж 50 экз.

Издатель и полиграфическое исполнение:
ООО «Лаборатория интеллекта»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя
и распространителя печатных изданий № 1/529 от 13.04.2018.
Ул. Солтыса 187, 6 этаж, офис 21, 220070, г. Минск.
www.mozgpublisher.by
Тел.: +375 44 715-75-70, E-mail: editions@laboratory.by