

ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ МНОГОКАНАЛЬНАЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ АНАЛОГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

FAST NOISE-IMMUNE MULTI-CHANNEL FIBRE-OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM OF ANALOGUE INFORMATION

A. B. Родигин, А. В. Тельнов, С. Л. Эльяш
A. V. Rodigin, A. V. Tel'nov, S. L. Elyash

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center –All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Разработана помехоустойчивая четырёхканальная аналоговая волоконно-оптическая система передачи (ВОСП) на основе серийных модулей HFBR-1312 и HFBR-2316 с линеаризацией характеристики передачи, работающая в полосе частот от нуля до 100 МГц. ВОСП предназначена для мониторинга работы электрофизических установок (ЭФУ) и для передачи измерительных сигналов при радиационных испытаниях с использованием импульсных ускорителей.

Developed is a noise-immune four-channel analogue fibre-optical transmission system (FOTS) on the basis of serial modules HFBR-1312 and HFBR-2316 with linearization of transfer characteristic, operating within the frequency band from zero to 100 MHz. FOTS is meant for monitoring of electrophysics facilities' (EPF) operation as well as for transmission of measuring signals at radiation tests using pulsed accelerators.

Работа мощных импульсных электрофизических установок (ЭФУ), как правило, сопровождается значительными электромагнитными помехами с широким спектром частот. Передача аналоговой информации электрическим способом в полосе частот от нуля до 100 МГц с пространственно разнесённых датчиков, контролирующих работу установок, в этих условиях затруднена [1].

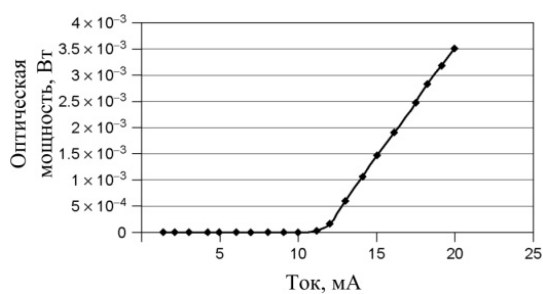
Для повышения помехоустойчивости передачи аналоговой информации по электрическим кабелям в условиях помех применяются специальные методы, которые не всегда оказываются эффективными [1]. Замена электрических кабелей на оптические позволяет в значительной мере решить задачу обеспечения помехоустойчивости при передаче аналоговых данных с ЭФУ.

Для передачи аналоговой информации с помощью ВОСП входной сигнал (напряжение, ток, поток фотонов или электронов) преобразуется в световой сигнал, который передаётся по оптическому волокну и затем преобразуется в пропорциональный выходной сигнал напряжения. В ВОСП могут применяться различные способы преобразования: аналоговый, с использованием модуляции интенсивности передаваемого света, и аналого-цифровой, с передачей по волокну кодированного светового сигнала с последующим декодированием.

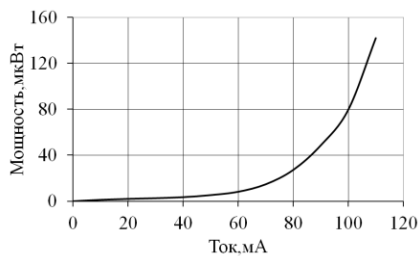
При использовании аналогового способа скорость передачи информации ограничивается только частотными свойствами тракта, а для повышения точности передачи требуются специальные меры по амплитудной калибровке измерительных каналов [2]. Аналоговый способ применялся в волоконно-оптической системе изоляции А6906S фирмы Tektronics, а также в отечественных устройствах передачи информации СУПИ21 и СУПИ32 разработки НИИИТ. В последних предусмотрены процедуры не только амплитудной калибровки, но и учёта нелинейности передачи сигнала. Упомянутые системы – одноканальные и весьма дорогостоящие (стоимость системы А6906S составляет ~\$7000).

Цифровые ВОСП (с применением АЦП-ЦАП, ШИМ, ЧИМ и других способов) обеспечивают высокую точность передачи аналогового сигнала и не требуют калибровок, однако процедуры оцифровки и модуляции существенно снижают скорость передачи информации по каналу или усложняют (и соответственно удорожают) конструкцию ВОСП [3]. В условиях электромагнитных и радиационных помех сложные аналого-цифровые оптические передатчики, из-за большого количества применяемых активных элементов, менее помехоустойчивы, чем более простые аналоговые.

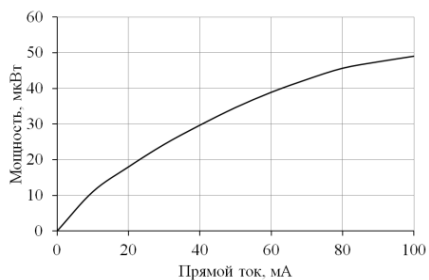
В ряде случаев необходимо осуществлять мониторинг работы ЭФУ: контролировать в широкой полосе частот (не менее 100 МГц) токи, напряжения, сигналы детекторов, подверженные воздействию помех. При этом точная калибровка каналов не требуется, так как необходимо контролировать лишь неизменность амплитуды и формы импульсных сигналов или временных задержек между импульсами. Для таких случаев целесообразно использовать аналоговые ВОСП с амплитудной модуляцией. Линейность каналов передачи сигнала должна быть достаточно высокой (не хуже ~5%). При радиационных испытаниях в отдельных случаях необходимо обеспечить передачу постоянной составляющей сигнала и проводить калибровку по амплитуде.



а



б



в

Рис. 1. Зависимости оптической мощности различных излучателей от тока: а – лазерный диод; б – суперлюминесцентный диод; в – светодиод

Основной вклад в нелинейность ВОСП с амплитудной модуляцией вносят передатчики – преобразователи электрической измеряемой

величины в свет. Фотоприёмники, преобразующие свет в пропорциональное выходное напряжение, обычно используют обратно смещённые фотодиоды. Такие приёмники линейны в широком диапазоне фототоков и практически не вносят искажений.

Амплитудная модуляция в волоконно-оптических каналах осуществляется изменением тока излучателя. В качестве излучателя можно использовать лазерный диод, суперлюминесцентный диод или светодиод. Все они обладают достаточно высоким быстродействием (полоса частот свыше 100 МГц). Типовые зависимости выходной оптической мощности от прямого

тока у этих приборов (рис. 1) существенно различаются по характеру нелинейностей.

Лазерный диод имеет линейную зависимость оптической мощности от тока (рис. 1а) (наклонная часть характеристики). Для стабилизации его рабочей точки требуется специальная следящая схема с обратной связью по оптической мощности. В лазерном излучателе амплитудная модуляция чаще всего осуществляется при помощи резистора, включённого последовательно с лазерным диодом, имеющим низкое входное сопротивление (единицы-десятки Ом) [2]. Стоимость лазерного диода значительно превышает стоимость суперлюминесцентного диода или светодиода.

Суперлюминесцентные диоды эффективнее по мощности, чем светодиоды, но обладают существенно нелинейными мощностными характеристиками (рис. 1б). Принципиальная электрическая схема передатчика разработанного в ИЯРФ на основе суперлюминесцентного диода ИЛПН 301-1 со схемой смещения и линейризации, изображена на рис. 2. Линейризация зависимости оптической мощности от тока осуществлялась ответвлением части входного тока передатчика в цепочку из быстродействующих диодов VD4 – VD7. Данная ВОСП на основе суперлюминесцентного диода имеет полосу рабочих частот до 50 МГц. Недостатками этой ВОСП являются невозможность передачи постоянной составляющей сигнала и низкое входное сопротивление (50 Ом).

С появлением на рынке недорогих волоконно-оптических светодиодных передатчиков HFBR-1312 и HFBR-1414, и соответствующих им приёмников с малощумящим широкополосным усилителем HFBR-2316 и HFBR-2416 (разработка фирмы Hewlett-Packard, далее Agilent и Avago) появилась возможность без существенных затрат строить аналоговые ВОСП с амплитудной модуляцией. В ИЯРФ, в частности для полигонных измерений, предпочтение было отдано HFBR-1312 и

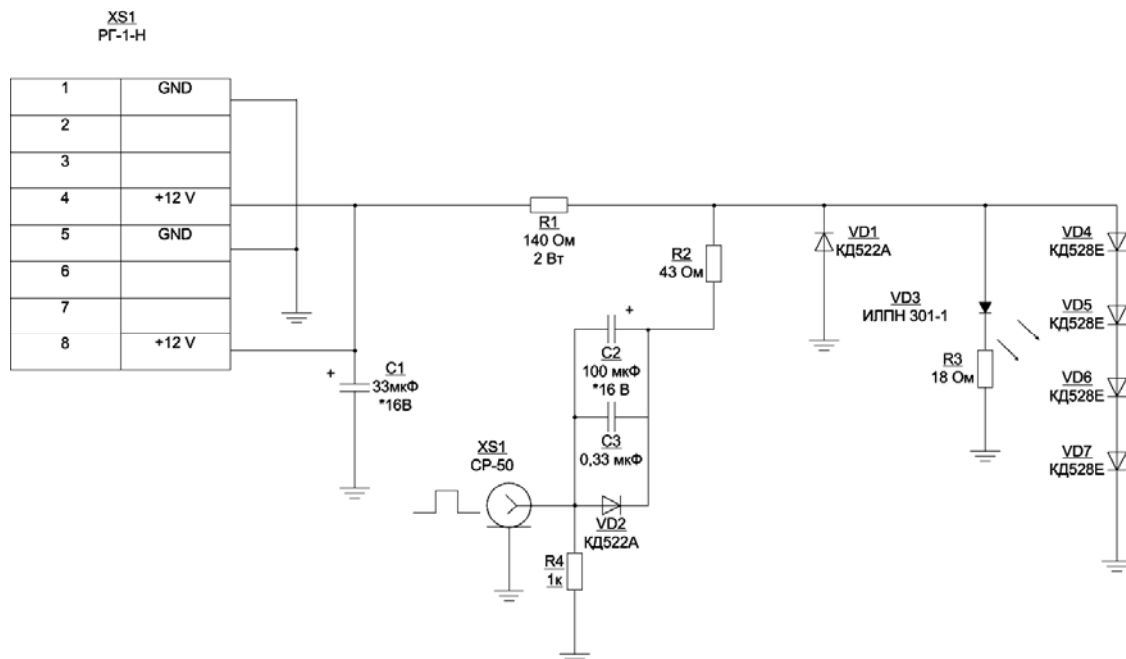


Рис. 2. Схема передатчика на основе суперлюминесцентного диода со схемой смещения и линейризации



а



б

Рис. 3. Зависимости от напряжения на светодиоде HFBR-1312: а – тока светодиода, б – выходной мощности светодиодного передатчика

HFBR-2316, работающим в диапазоне более длинных волн – 1300 нм [4]. Дело в том, что в условиях воздействия ионизирующего излучения с энергией более ~140 кэВ (рентгеновское, гамма, электроны) в оптических кабелях появляется черенковское излучение (ЧИ), являющееся помехой в тракте ВОСП. Основной спектр ЧИ лежит в фиолетовой области. Интенсивность ЧИ спадает по кубическому закону в зависимости от длины волны, поэтому помеха от ЧИ, регистрируемая в более длинноволновой области приёмника HFBR-2316 (1300 нм) существенно ниже, чем в области приёмника HFBR-2416 (820 нм).

На основе покупных модулей HFBR-1312 и

HFBR-2316 в ИЯРФ была разработана четырёхканальная ВОСП, состоящая из передатчика ПОМ-АС1-4К, многомодового (62,5 мкм) оптического кабеля (4 жилы) и приёмника ПРОМ-АФ1-4К. Линейризация зависимости излучаемой мощности HFBR-1312 от входного тока (рис. 1в) в ПОМ-АС1-4К была осуществлена следующим образом. Во первых, была использована нелинейная зависимость тока светодиода (рис. 3а) от напряжения на нём. На рис. 3б показано, что если на вход светодиодного передатчика подавать не токовый сигнал, а сигнал напряжения, то можно получить зависимость мощности светодиода от напряжения на нём близкую к линейной на начальном участке (рис. 3б).

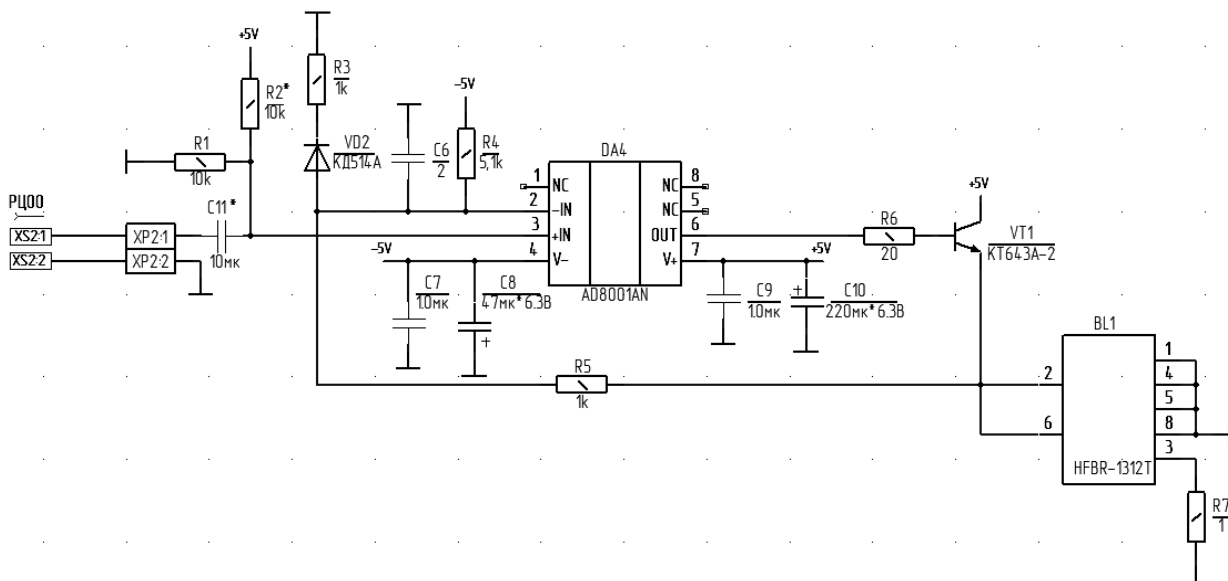


Рис. 4. Схема линейризации характеристики мощности светодиодного волоконно-оптического передатчика HFBR-1312

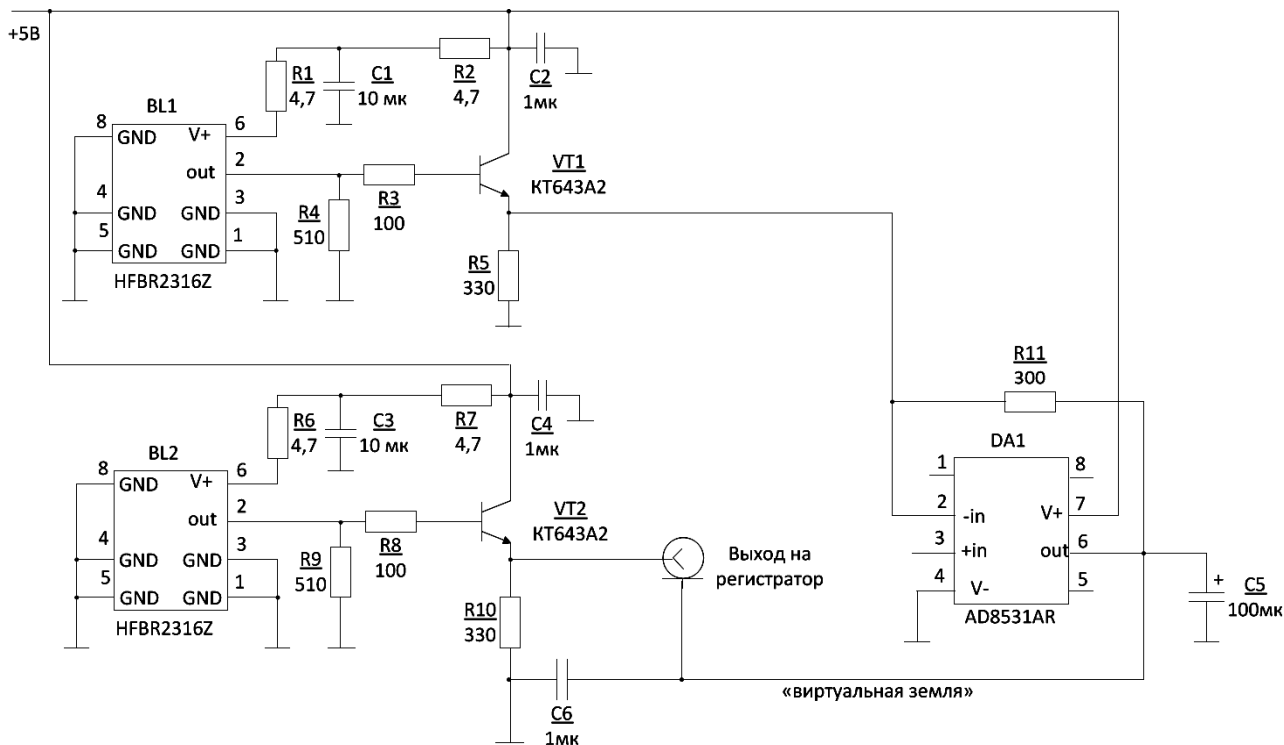


Рис. 5. Схема одного канала фотоприёмника ПРОМ-АФ1-4К со схемой организации «виртуальной земли»

Во вторых, при помощи введения нелинейной обратной связи в буферный усилитель была осуществлена дополнительная линейризация участка характеристики при входных напряжениях свыше 1,3 В. Принципиальная схема передатчика со схемой линейризации приведена на рис. 4.

Буферный усилитель (DA4) обеспечивает высокое входное сопротивление у передатчика (10 кОм) и выполнен на основе быстродействующего операционного усилителя (ОУ) AD8001AN дополненного эмиттерным повторителем (VT1) на выходе. Необходимая нелинейная обратная связь

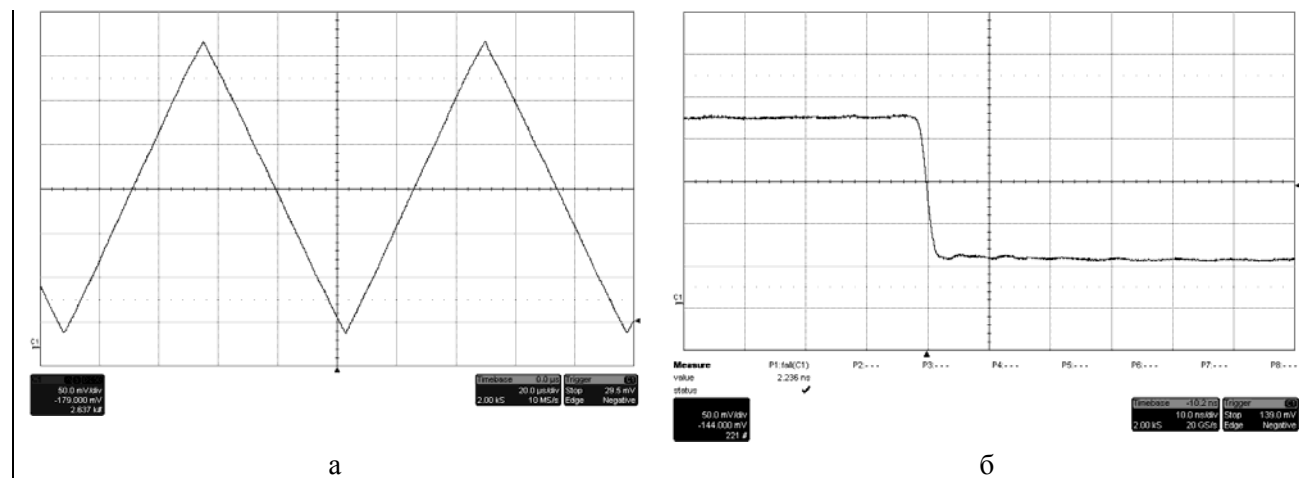


Рис. 6. Выходные осциллограммы ВОСП на основе ПОМ-АС1-4К и ПРОМ-АФ1-4К при подаче на вход: а – пилообразного сигнала, б – отрицательной ступеньки напряжения

организована подбором сопротивлений R3 и R5 и кремниевого диода (VD2), обладающего малой ёмкостью и подходящей нелинейной характеристикой. При достижении определённого напряжения на светодиодном модуле HFBR-1312 открывается диод VD2 и усиление буферного усилителя растёт, компенсируя спад зависимости выходной мощности модуля от напряжения на входе ОУ. При необходимости передачи постоянной составляющей резистор R2 исключается, а разделительный конденсатор C11 заменяется перемычкой.

В фотоприёмнике ПРОМ-АФ1-4К используются HFBR-2316, содержащие встроенный малощумящий широкополосный усилитель. HFBR-2316 обладает чувствительностью 13 мВ/мкВт в полосе частот до 125 МГц при использовании 62,5-микронного оптического кабеля. Недостаток модуля HFBR-2316 – наличие постоянного смещения на выходе около 1,8 В, причём с прогревом это напряжение «плывёт» на десятки милливольт. Кроме того, выход модуля не рассчитан на нагрузку 50 Ом, поэтому требуется на его выходе добавить эмиттерный повторитель. Для устранения упомянутых недостатков разработана схема, изображённая на рис. 5, которая обеспечивает передачу постоянной составляющей сигнала. Питание схемы осуществляется от гальванически развязанного источника питания. Выходной сигнал напряжения снимается относительно «виртуальной» земли, которая соединена с корпусом ПРОМ-АФ1-4К. Уровень «виртуальной земли» формируется на выходе схемы, включающей: дополнительный, заглушенный по входу модуль HFBR-2316 (BL1), повторитель VT1 и мощный буфер на операционном усилителе AD8531 (DA1).

Уровень «виртуальной земли» зависит от температуры так же, как и выходные уровни каналов. При этом достигается температурная компенсация смещения нулей на выходах фотоприёмника.

При помощи скоростного осциллографа LeCroy WaveMaster 8500A с полосой 5 ГГц сняты осциллограммы, характеризующие линейность и быстродействие ВОСП на основе ПОМ-АС1-4К и ПРОМ-АФ1-4К. Для измерения линейности ВОСП на вход подавался пилообразный сигнал от функционального генератора. Отклонение выходного сигнала от линейной характеристики не превысило 2% (рис. 6а). Зарегистрирован переходный процесс на выходе ВОСП при подаче на её вход отрицательной ступеньки напряжения 250 мВ с фронтом 150 пс от калибратора FLUKE 9500B. Осциллограмма переходного процесса приведена на рис. 6б, длительность переходного процесса на выходе ВОСП составила ~2,24 нс, величина ступеньки напряжения на выходе – 165 мВ.

Применение серийно выпускаемых волоконно-оптических модулей HFBR-1312 и HFBR-2316 позволило разработать относительно недорогую (стоимость модуля HFBR ~80\$) волоконно-оптическую систему передачи (ВОСП) аналоговой информации, способную работать в условиях электромагнитных помех. Данная ВОСП предназначена для использования совместно с регистрирующим осциллографом Tektronix-3034 или подобным и имеет следующие технические характеристики:

- наличие четырёх идентичных каналов, один из которых имеет дополнительный инвертирующий или неинвертирующий усилитель (по выбору);
- динамический диапазон входного сигнала – (0,01 ÷ 1) В, при использовании встроенного до-

- полнительного усилителя – (0,001 ÷ 0,1) В;
- входное сопротивление – 10 кОм;
 - коэффициент передачи ВОСП по напряжению – от 0,5 до 0,8;
 - коэффициент усиления дополнительного усилителя – 10;
 - длина волоконно-оптической линии без ухудшения характеристик – до 200 м;
 - обеспечивается передача постоянной составляющей сигнала;
 - полоса рабочих частот – от нуля до 100 МГц;
 - питание передатчика – от источника постоянного тока с напряжением от 6 до 12 В (аккумулятор или сетевой адаптер 220 В);
 - питание фотоприёмного блока – от шины USB или через сетевой адаптер 220 В;
 - габариты как передатчика, так и приёмника – 120×93×35 мм, масса каждого – 0,3 кг.

Макет ВОСП испытывался на линейном резонансном ускорителе электронов ЛУ-7-2 [5] для измерения выходных напряжений и тока с блока импульсного трансформатора. В результате в несколько раз были снижены наводки от работы ускорителя, защищён вход осциллографа от возможных перегрузок при воздействии импульсных наводок.

Кроме того, ВОСП использовалась для испытания интегральных микросхем на радиационную стойкость [6,7]. Измерялись отклики токов потребления и выходных напряжений микросхем на радиационное воздействие импульсного тормозного излучения ускорителя АРСА [8]. Влияние электромагнитных помех на измерения было пренебрежимо малым.

Список литературы

1. Герасимов А. И., Горкунов В. С., Скрипка Г. М. Обеспечение электромагнитной совме-

стимости при создании мощных электрофизических установок. Саров: Препринт. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»-97-2005, 1–34.

2. Средства диагностики однократного импульсного излучения / Составители Веретенников А. И., Даниленко К. И. Сб. трудов НИИИТ, Сборник 16 л.

3. Модуль преобразования информации / Руководство по эксплуатации СПН115 РЭ-ЛУ/ НИИИТ 2009.

4. 1300 nm Fiber Optic Transmitter and Receiver. Technical Data. Hewlett Packard. 5965-3011E (1/97).

5. Шориков И. В., Завьялов Н. В., Хохлов Ю. А., Иньков В. И., Тельнов А. В., Ситников Н. П., Таранасов В. П. Малогабаритный линейный ускоритель электронов для гаммаграфии крупногабаритных объектов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. Вып.3., Саров, с. 142–147.

6. Родигин А. В., Тетеревков А. В., Эльяш С. Л. помехоустойчивый программно-технический комплекс для испытания ЭКБ на радиационную стойкость в динамическом режиме // вопросы атомной науки и техники. Сер. физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013. Вып. 3. с. 64–66.

7. Пат. 2553831 РФ МПК G01R 31/00 (2006.01). Автоматизированный комплекс для испытаний элементов электронно-компонентной базы на радиационную стойкость / А. Н. Панченко, В. А. Пикарь, А. В. Родигин, А. В. Тетеревков, С. Л. Эльяш // бюллетень изобретений. 20.06.2015. № 17.

8. Эльяш С. Л., Профе Л. П. Применение малогабаритного ускорителя АРСА для оперативного контроля показателей стойкости элементной базы к воздействию ионизирующего излучения // вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып.3. с. 132–136.