

Перес Васкес Нельсон Отониель

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АНОДНОГО ТОКА ПРИ
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ТРЕНИРОВКЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ
РЕНТГЕНОВСКИХ ПРИБОРОВ**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов
электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт Петербург – 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Колгин Евгений Алексеевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, доцент
Гончаров Вадим Дмитриевич

кандидат технических наук,
Овчинников Валерий Павлович

Ведущая организация - Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ)

Защита состоится « 17 » декабря 2009 года в 14 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.
Автореферат разослан « 13 » ноября 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций
д.ф-м.н., профессор

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Открытые в конце XIX века Вильямом Конрадом Рентгеном невидимые глазом X – лучи, названные в России рентгеновскими лучами, нашли за свою более чем столетнюю историю применение в медицине, в технической дефектоскопии, в структурном и элементном анализе веществ, в горнодобывающей промышленности, в сельском хозяйстве, в досмотровой аппаратуре, в криминалистике и в ряде других отраслей.

Каждое из перечисленных применений предъявляет свои специфические требования к источнику рентгеновского излучения – рентгеновской трубке (РТ), что, в свою очередь, привело к появлению широкой номенклатуры промышленно-выпускаемых РТ. Это трубки непрерывного действия различной мощности, работающие в стационарной и переносной аппаратуре с ускоряющим напряжением от 100 до 300 кВ, импульсные РТ с ускоряющим напряжением 150 и 300 кВ, трубки с различными размерами фокусного пятна, двухфокусные трубки, РТ с узкой или круговой диаграммой направленности излучения.

Единственным в России промышленным предприятием, выпускающим рентгеновские трубки, является петербургское ЗАО «Светлана – Рентген». Данное предприятие обеспечивает потребности в РТ не только в России и странах СНГ, но и экспортирует свои приборы в европейские и азиатские страны. Предприятие имеет международный сертификат на систему менеджмента качества в соответствии с международным стандартом ISO9001, который ежегодно подтверждается международной аудиторской проверкой. В условиях жесткой конкурентной борьбы с зарубежными производителями РТ на предприятии остро встал вопрос повышения качества выпускаемой продукции, что напрямую связано с необходимостью обновления технологической базы и улучшения метрологического обеспечения технологического процесса.

Ключевой технологической операцией, определяющей качество готовых приборов, является высоковольтная тренировка. Для выпуска качественных приборов и прогнозирования из долговечности чрезвычайно важным на этапе тренировки является знание точного значения *тока утечки РТ* при ненагретом катоде, *числа электрических разрядов*, происходящих в РТ при постепенном увеличении анодного напряжения, амплитудного значения *анодного тока* при различных напряжениях накала РТ в широком интервале импульсных и пульсирующих ускоряющих напряжений.

Актуальность выполненной работы состоит в том, что в производстве рентгеновских приборов назрела острая необходимость перехода от ранее применяемых стрелочных измерительных приборов к новому, более точному информатизированному оборудованию, способному измерять импульсный и постоянный анодный ток в широком динамическом диапазоне, а также ток утечки

РТ с подсчетом числа электрических разрядов и выводом информации в цифровом виде.

Задача осложняется тем, что цепь тока находится внутри испытательной установки под потенциалом до 250 кВ в условиях воздействия сильных электромагнитных помех и мощного рентгеновского излучения, а также при наличии повторяющихся электрических разрядов внутри РТ.

Цель работы и задачи исследований

Целью диссертационной работы является исследование и разработка электрически безопасного, радиационно-стойкого, точного и удобного для промышленной эксплуатации метода измерения тока в анодной цепи РТ с передачей его значений из цепи высокого напряжения на пульт оператора с отображением информации в цифровом виде и создание на этой основе информатизированного измерительного оборудования для промышленных установок высоковольтной тренировки рентгеновских трубок.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. На основании изучения технологии тренировки рентгеновских приборов выработать требования к измерительным приборам, контролирующим ток в высоковольтных цепях промышленных установок тренировки и испытаний рентгеновских трубок.
2. Теоретически и экспериментально обосновать метод преобразования электрического сигнала, получаемого в высоковольтной цепи, в эквивалентный сигнал, принимаемый на стороне низкого напряжения, исследовать его точность и динамический диапазон измерений.
3. Обосновать выбор схемотехнических решений, минимально подверженных негативному воздействию рентгеновского излучения и разработать меры дополнительной защиты измерительных преобразователей от воздействия ионизирующего излучения.
4. Разработать алгоритмы обработки сигналов, принимаемых из высоковольтной цепи, и создать микропроцессорное устройство, реализующее разработанные алгоритмы, обеспечивающее измерения и отображение амплитуды, длительности протекания тока в высоковольтной цепи, размах колебаний тока и число электрических разрядов в рентгеновской трубке за время тренировки.
5. Изготовить экспериментальные образцы измерительных приборов и провести их длительные испытания в промышленных условиях для получения информации об устойчивости работы приборов при воздействии рентгеновского излучения со средней энергией квантов до 200 кэВ.

Методы исследований и использованная аппаратура

При решении поставленных задач применялись следующие основные методы исследований:

- анализ и обобщение литературных данных по физике явлений, происходящих при высоковольтной тренировке РТ, по методам измерений тока в высоковольтных цепях и по негативному воздействию ионизирующих излучений на электронные компоненты;
- аналитические и статистические методы обработки сигналов, компьютерное моделирование характеристик электронных схем;
- экспериментальные исследования с применением цифровых осциллографов, генераторов сигналов специальной формы, эталонных измерительных приборов, источников и датчиков оптического излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При совпадении максимума спектральной характеристики излучения светодиода волстропа с пологим участком спектральной характеристики чувствительности фотодиодов волстропа и равенстве температурных коэффициентов токовой чувствительности фотодиодов достигается погрешность измерений тока менее $\pm 1\%$ во всем динамическом диапазоне измерений кроме начального участка, составляющего не более 5% полной шкалы.
2. Максимальный динамический диапазон тока, измеряемого при помощи высоковольтного линейного волстропа со светоизлучающим диодом на основе AlInGaP, составляет 80% от предельного динамического диапазона изменений тока светоизлучающего диода. При использовании сверх-ярких светодиодов максимальный динамический диапазон измерений приближается к 500.
3. Разработанный импульсный миллиамперметр, использующий принцип линейного волстропа и аналоговую элементную базу, работая в среднем 1000 часов в год в условиях воздействия рентгеновского излучения со средней энергией квантов до 200 кэВ, сохраняет линейную передаточную характеристику с накапливающейся систематической погрешностью измерений 1% в год.
4. В схеме с электрическим преобразованием анодного тока рентгеновских трубок в эквивалентный оптический сигнал увеличение динамического диапазона измерений до 50000 и выше обеспечивается применением аналого-цифровых преобразователей с микропроцессорным управлением при условии защиты цифровых схем от рентгеновского излучения свинцовыми боксами с толщиной стенок не менее 5 мм.

Научная новизна работы

1. Разработана методика измерений тока в цепи с потенциалом относительно «земли» до 250 кВ на основе применения высоковольтного линейного волстропа, получены критерии, определяющие динамический диапазон и погрешность измерений, найдены численные значения нарастающей систематической погрешности прибора, обусловленной деградацией элементов по мере воздействия рентгеновского излучения.

2. Обоснован расчетом и подтвержден экспериментально факт работы микросхем с высокой степенью интеграции не менее, чем в течение 1000 часов под воздействием жесткого рентгеновского излучения со средней энергией квантов 200 кэВ при помещении электронных элементов в бокс из свинца с толщиной стенок не менее 5 мм, ослабляющий мощность рентгеновского излучения более чем в 10^5 – 10^6 раз.

Степень обоснованности и достоверности полученных научных результатов определяется:

- удовлетворительным согласием теоретических оценок, результатов моделирования и экспериментальных данных;
- непротиворечивостью полученной в работе информации и выводов, сделанных на ее основе, с результатами других исследователей;
- хорошей воспроизводимостью экспериментальных данных при многократном снятии экспериментальных точек.

Значимость полученных результатов для теории и практики

Разработана и использована в НИОКР, с последующим внедрением в промышленную эксплуатацию, методика измерений тока в цепи высокого напряжения с передачей по оптоволоконной линии связи аналоговых оптических сигналов, пропорциональных значениям измеряемых токов. Сформулированы принципы выбора оптоэлектронных элементов высоковольтного волстропа и компонентов электрической схемы, работающих под воздействием рентгеновского излучения. Разработанный прибор может применяться не только для измерений тока в цепи высокого напряжения, но и для передачи сигналов с датчиков других физических величин.

Обоснована расчетом и подтверждена экспериментально возможность продолжительной (свыше 1000 часов) работы микроэлектронных КМОП приборов высокой степени интеграции в условиях жесткого рентгеновского излучения со средней энергией квантов до 200 кэВ при помещении электронных элементов в корпус из стали и свинца с толщиной стенок 0,5 мм и 5,0 - 6,0 мм, соответственно.

Реализация и внедрение результатов исследований

1. В рамках Договора на передачу научно-технической продукции № 6619 / ЭПУ – 248 от 15.04.2006 г. были изготовлены и в 2007 г. внедрены на технологической операции тренировки импульсных рентгеновских трубок в ЗАО «Светлана – рентген» 2 импульсных амперметра с оптической аналоговой передачей сигналов, пропорциональных току, по оптоволоконной линии из цепи с потенциалом относительно земли до 200 кВ.

2. В рамках Договора на передачу научно-технической продукции № 6671 / ЭПУ – 253 от 05.02.2007 г. были изготовлены и в 2008 г. внедрены на технологической операции тренировки рентгеновских трубок непрерывного излучения в ЗАО «Светлана – рентген» 2 микроамперметра с цифровым

оптическим каналом передачи данных и линейной шкалой преобразования тока в 5 декадах от 1 мкА до 50 мА, имеющие счетчики количества разрядов в тренируемой РТ, находящейся под потенциалом относительно земли до 160 кВ.

Апробация работы

Результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на следующих научно-технических конференциях:

- Научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», 2003 г., Санкт-Петербург, СПбГЭТУ (ЛЭТИ);
- 61-я, 62-я и 64-я Научно-технические конференции, посвященные Дню радио, 2006, 2007, 2009 гг., Санкт-Петербург, СПбГЭТУ (ЛЭТИ);
- 60-я и 62-я Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, 2007 и 2009 гг., СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 4 статьи в научно-технических журналах, в том числе 1 статья, входящая в Перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК, 3 статьи в других изданиях, 4 доклада на российских научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из 5 глав, введения и заключения. Она содержит 166 страниц машинописного текста, 98 рисунков и 10 таблиц. Список литературы насчитывает 82 наименования, включая ссылки на ресурсы интернет.

Краткое содержание работы

Во введении кратко обоснована актуальность проблемы, её научная новизна и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании изучения процессов, происходящих на этапе тренировки рентгеновских трубок (РТ) рассматриваются особенности измерений тока в установках тренировки РТ. Отмечается, что РТ с вращающимся анодом для медицинской диагностики серии БД и трубки для промышленного просвечивания серий БПМ и БПК требуют измерений тока в цепи высокого напряжения с потенциалом относительно «земли» не менее 160 кВ. При этом измерительные устройства должны измерять постоянный ток утечки РТ в пределах от 1, 0 до 50 мкА и анодный ток РТ до 50 мА для РТ, работающих в непрерывном режиме и до 1,0 А для РТ, работающих в импульсном режиме. В импульсном режиме требуется также контролировать длительность импульсов в пределах от 10 мс до 10 секунд с погрешностью не хуже ± 1 мс. Погрешность измерений тока утечки не должна превышать ± 1 мкА, а анодного тока $\pm 1\%$ в середине шкалы и $\pm 5\%$ на концах шкалы измерений. Микроамперметры, находящиеся в цепи высокого напряжения,

дополнительно должны выдерживать ток пробоя РТ с амплитудой до нескольких ампер, регистрировать число пробоев и устойчиво работать под воздействием сильных электромагнитных помех и рентгеновского излучения со средней энергией квантов до 200 кэВ.

Вторая глава носит обзорный характер. В ней рассматриваются различные методы измерений тока, пригодные для обеспечения изоляции измерительной цепи от устройства индикации не менее чем на 250 кВ. В результате сделан вывод, о том, что метод измерения тока с помощью резистивного шунта с автономной схемой преобразования падения напряжения в эквивалентный оптический сигнал, передаваемый по оптоволоконной линии связи, наиболее прост в реализации, способен обеспечить требуемую точность измерений и гарантирует надежную электрическую изоляцию пульта оператора от высокого напряжения.

В третьей главе анализируются возможные последствия воздействия рентгеновского излучения (РИ) на различные компоненты измерительного преобразователя. Установлено, что все электронные компоненты изменяют свои характеристики под воздействием РИ, но наиболее сильное влияние испытывают полупроводниковые приборы. В результате изучения воздействия РИ на аналоговые и цифровые полупроводниковые функциональные узлы, определено что, наилучшей стойкостью к воздействию РИ обладают схемы на биполярных транзисторах с малой или средней степенью интеграции. В результате, в качестве первого шага поставлена задача создания высоковольтного импульсного преобразователя тока исключительно на аналоговых компонентах. Если же, невозможно обойтись без использования микроконтроллера и других сложных интегральных схем, то требуется изыскать дополнительные меры защиты схемы преобразователя от РИ, т.к. информация, сохраняемая в электронной памяти, подвергается угрозе удаления при прямом воздействии РИ.

В четвертой главе исследуются основные элементы импульсного миллиамперметра с аналоговым способом передачи на пульт оператора сигналов, пропорциональных измеряемому току. В основу работы преобразователя заложен принцип линейного волстрона (оптрон с оптоволоконной линией связи), рис. 1.

В схеме волстрона благодаря отрицательной обратной связи, охватывающей ОУ1 через оптический канал, образованный светоизлучающим диодом (СИД) и фотодиодом (ФД₁), выходной световой поток СИД является пропорциональным входному управляющему напряжению $U_{Вх}$. Данная пропорциональность может быть обеспечена только в том случае, если фотодиод ФД1 имеет линейную свет-сигнальную характеристику.

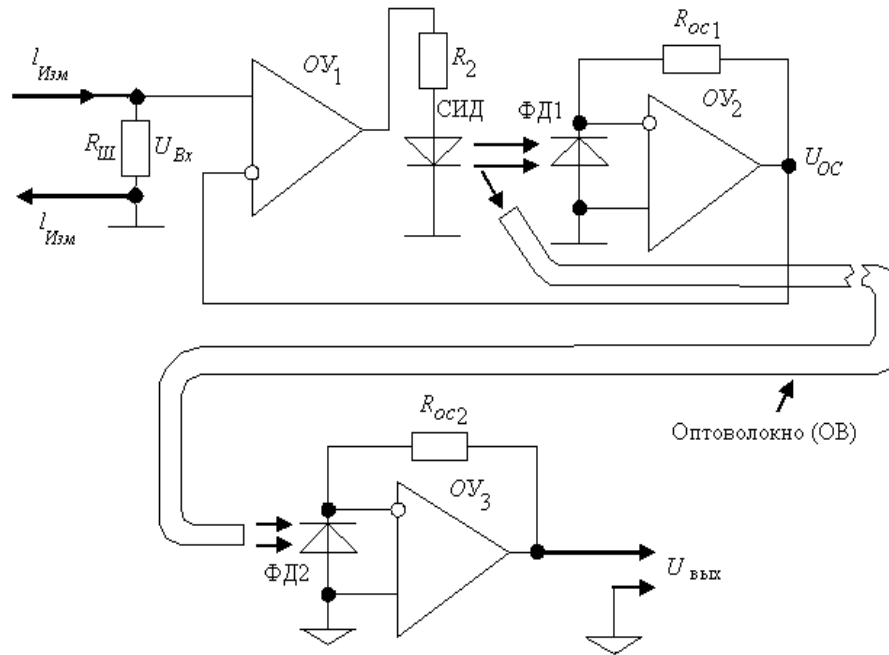


Рис. 1. Принцип работы линейного волстропа

Известно, что при воздействии оптического излучения в формуле Эберса-Молла, описывающей вольт-амперную характеристику диода, появляется новый компонент $I_{ФД}$, учитывающий фототок:

$$I = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{ФД}, \quad (1)$$

где I – ток диода при падении напряжения U ; I_s – ток насыщения диода при обратном смещении; q – элементарный электрический заряд; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Если напряжение U на фотодиоде установлено равным нулю, то из (1) следует:

$$I = -I_{ФД} \quad \text{или} \quad I = -S \cdot P_{ОПТ} \quad (2)$$

где S – интегральная токовая чувствительность к оптическому излучению; $P_{ОПТ}$ – приходящий на фотодиод оптический поток.

В этом случае ток I перестает зависеть от температуры и обратного тока I_s .

Данный режим ФД носит название фотогенераторного и реализуется с помощью преобразователя ток-напряжение на ОУ2 и ОУ3, причем он имеет линейную передаточную характеристику в 4-5 декадах.

Для тока светодиода (рис. 1) $I_{СИД}$ справедливо:

$$I_{СИД} = \frac{(U_{Вх} - U_{ОС})k - U_{СИД}}{R_2 + r_d}, \quad (3)$$

где k – коэффициент усиления ОУ1; $U_{СИД}$ – падение напряжения на СИД; r_d – динамическое сопротивление СИД.

Поскольку входной ток ОУ бесконечно мал, то $I_{ФД1} = I_{Roc1}$ тогда из (2) следует что $I_{Roc1} = S_1 \cdot P_{СИД}$, где S_1 – токовая чувствительность фотодиода ФД1 к излучению СИД.

Для входного сигнала $U_{Вх}$ и сигнала на выходе усилителя обратной связи справедливо:

$$U_{Вх} = I_{Изм} \cdot R_{Ш} \quad (4) \quad U_{Ос} = S_1 \cdot P_{СИД} \cdot R_{Ос1} \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (3) и решая относительно $P_{СИД}$, получим:

$$I_{СИД} = \frac{(I_{Изм} \cdot R_{Ш} - S_1 \cdot P_{СИД} \cdot R_{Ос1})k - U_{СИД}}{R_2 + r_d},$$

$$P_{СИД} = \frac{I_{Изм} \cdot R_{Ш} \cdot k - I_{СИД} \cdot (R_2 + r_d) - U_{СИД}}{S_1 \cdot R_{Ос1} \cdot k} \quad (6)$$

Если учесть, что $R_{Ос1} \geq 10^3$ Ом, $k \geq 10^5$, $S_1 \geq 0,05$ А/Вт, то (6) упростится:

$$P_{СИД} = \frac{I_{Изм} \cdot R_{Ш}}{S_1 \cdot R_{Ос1}}, \quad (7)$$

Из (7) вытекает, что мощность излучения светодиода, помещенного в схему с отрицательной обратной связью по оптическому сигналу, практически пропорциональна входному управляющему току лишь при неизменном коэффициенте S_1 преобразования лучистого потока $P_{СИД}$ в ток фотоприемника цепи отрицательной обратной связи и при условии, что температурные коэффициенты сопротивлений, входящих в (7) одинаковы.

Аналогично выражению (5), выходное напряжение волстроны равно: $U_{Вых} = P_{СИД} \cdot S_2 \cdot R_{Ос2}$, где S_2 – токовая чувствительность ФД₂ к излучению СИД.

Тогда, коэффициент усиления волстроны по напряжению K_u равен:

$$K_u = \frac{U_{Вых}}{U_{Вх}} = \frac{P_{СИД} \cdot S_2 \cdot R_{Ос2}}{P_{СИД} \cdot S_1 \cdot R_{Ос1}} = \frac{S_2 R_{Ос2}}{S_1 R_{Ос1}}, \quad (8)$$

После дифференцирования (8) для нестабильности K_u , можно записать:

$$\Delta K_u / K_u = \Delta S_2 / S_2 - \Delta S_1 / S_1 + \Delta R_{Ос2} / R_{Ос2} - \Delta R_{Ос1} / R_{Ос1}, \quad (9)$$

Предположим, что волстрон работает в помещении, где колебания температуры невелики, тогда температурную зависимость коэффициентов S_1 , S_2 и сопротивлений $R_{Ос1}$, $R_{Ос2}$ можно принять линейной:

$$S_i = S_{i0}(1 + \alpha(T - T_0)), \quad R_i = R_{i0}(1 + \beta(T - T_0))$$

где α , β – температурные коэффициенты токовой чувствительности и сопротивлений резисторов, соответственно; S_{i0} , R_{i0} – значения S_i и R_i при комнатной температуре T_0 . Тогда для температурной нестабильности токовой

чувствительности и сопротивлений имеем: $\frac{\Delta S_i}{\Delta T} = S_{i0} \alpha$, $\frac{\Delta R}{\Delta T} = R_{i0} \beta$, (10)

Из выражений (9) и (10) для оптической (ОП) и резистивной (R) составляющих нестабильности коэффициента K_u получим

$$\left| \frac{\Delta K_u}{K_u \Delta T} \right|_{ОП} = \alpha_2 - \alpha_1 \quad \left| \frac{\Delta K_u}{K_u \Delta T} \right|_R = \beta_{R_{Ос2}} - \beta_{R_{Ос1}} \quad (11)$$

Из (11) следует, что нестабильность Ku линейного волстроны определяется степенью согласования температурных коэффициентов оптопар СИД – ФД₁, СИД - ОВ - ФД₂ и сопротивлений R_{OC1} , R_{OC2} . Несогласованность температурных характеристик сопротивлений может быть значительно меньше, чем у оптрона, откуда следует вывод, что нестабильность Ku линейного волстроны определяется степенью согласования температурных характеристик оптопар СИД – ФД₁ и СИД - ОВ – ФД₂. Температурный дрейф коэффициента передачи по напряжению линейного волстроны будет близок к нулю, если $\alpha_1 = \alpha_2$. Отсюда следует, что фотодиоды цепи ООС и приемного узла должны иметь совпадающие параметры, т.е. быть однотипными.

Выбор СИД должен определяться исходя из минимального температурного дрейфа доминирующей длины волны излучения, а выбор ФД из необходимости иметь неизменную чувствительность в пределах дрейфа спектра излучения СИД, рис. 2.

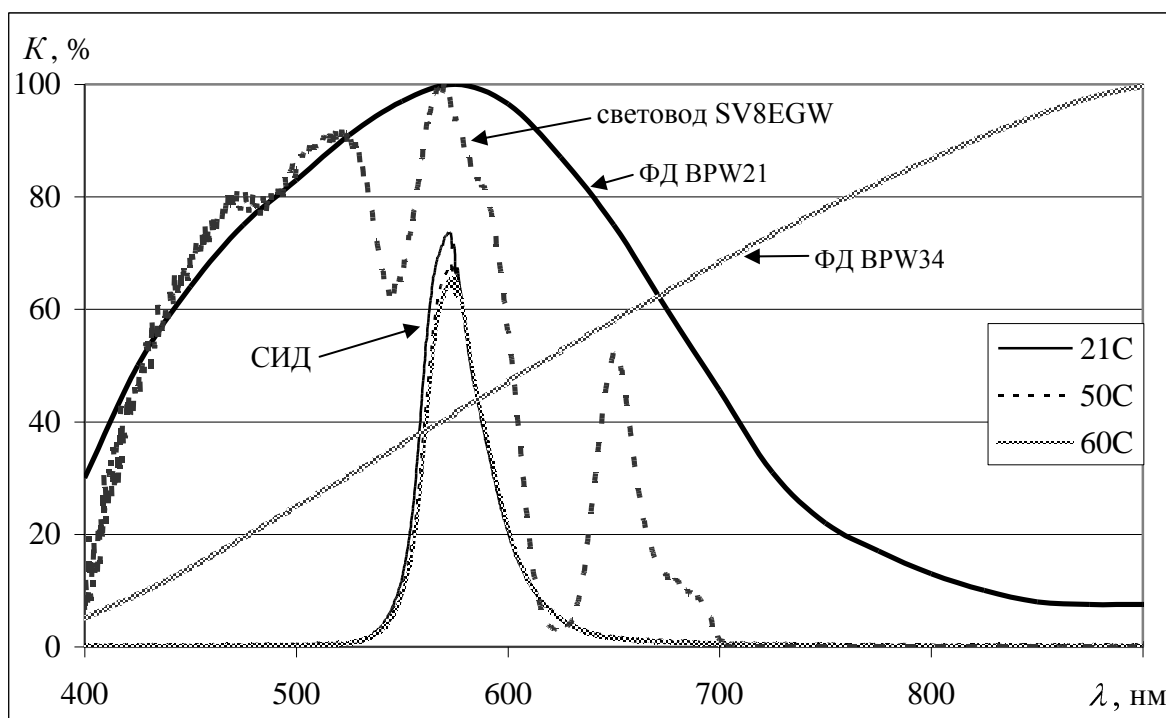


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность двух исследованных светодиодов, спектральный коэффициент пропускания световода и спектр излучения СИД типа НВ10В при различных температурах

Исследовались два типа кремниевых ФД: BPW21 и BPW34. Первый из них имел максимум чувствительности вблизи 550 нм, второй около 900 нм. Выбранный СИД НВ10В имел дрейф доминирующей длины волны излучения не выходящий из области максимума чувствительности ФД BPW21, что соответствовало наилучшим условиям согласования.

Для получения наилучшего соотношения сигнал-шум было выбрано оптоволокно из полиметилакрилата типа Supervision SV8EGW длиной 10 м,

максимум спектрального коэффициента пропускания которого совпадал с доминирующей длиной волны СИД

Напряжение $U_{\text{Вых}}$, снимаемое с выхода волстроны, поступало на низковольтный блок обработки и отображения информации, построенный на базе микроконтроллера Atmega16 и на выход для подключения осциллографа. Алгоритм преобразования сигнала $U_{\text{Вых}}$ в измеряемый ток, учитывающий температурный и радиационный дрейф «дежурного» тока СИД, поясняется рис. 3.

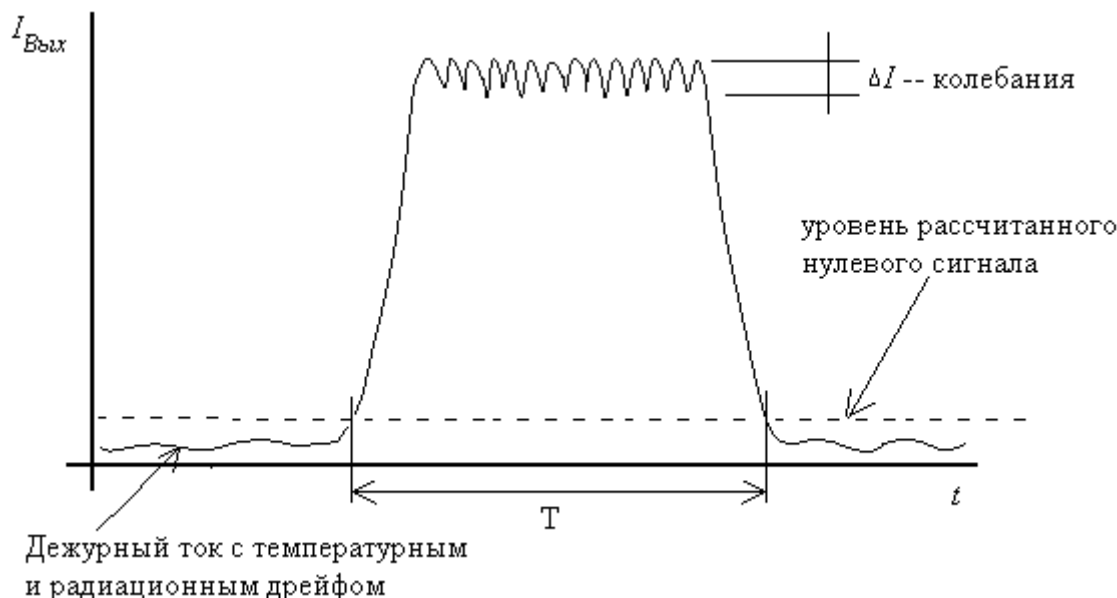


Рис. 3. Импульс тока, измеряемого с помощью волстроны

Блок обработки сигнала постоянно измерял «дежурный» ток СИД и рассчитывал плавающий уровень отсчета нулевого сигнала путем прибавления константы к найденному среднему значению «дежурного» тока за 500 миллисекунд. Плавающий уровень отсчета не превышал 1,6% от полной шкалы измерений, поэтому ошибка в определении длительности импульсов была незначительной. Наряду с измерением амплитуды импульсного тока в данном блоке производился расчет среднего значения тока за время импульса и размаха его колебаний.

Полученная экспериментально передаточная характеристика волстроны является линейной и максимальное её отклонение от идеальной прямой линии составило не более $\pm 1\%$ в интервале изменения сигнала от $0,05 U_{\text{Вх.Мах}}$ до $U_{\text{Вх.Мах}}$, рис. 4. Сравнение характеристик *a)* и *б)* на рис. 4 экспериментально подтверждает обоснованность выбора фотодиодов волстроны с положением максимума спектральной чувствительности в зоне температурного дрейфа спектра излучения СИД.

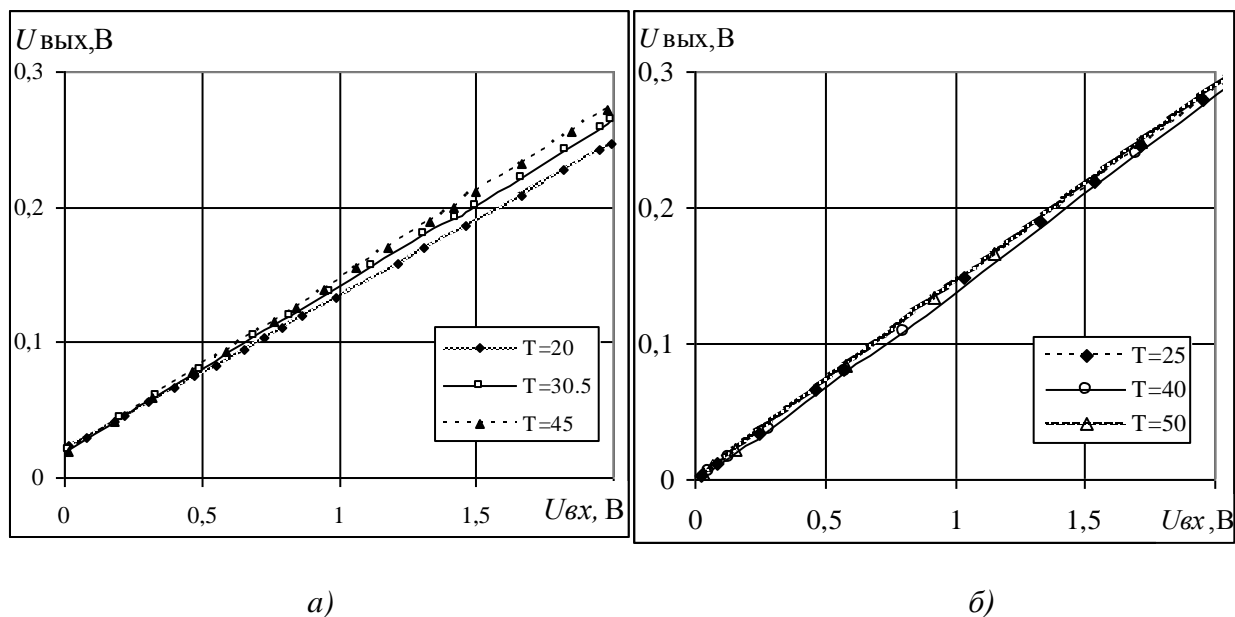


Рис. 4. Передаточная характеристика волстроны на светодиоде HPL-H77LG1C0 при разных температурах для двух фотодиодов: а) ФД BPW34; б) ФД BPW21

При увеличении температуры СИД система ООС волстроны увеличивает рабочий ток СИД для сохранения линейности передаточной характеристики. Отсюда, динамический диапазон измерений тока не совпадает с динамическим диапазоном изменения тока СИД и, как следует из рис. 5, он может быть вычислен как 80% от отношения предельного тока светоизлучающего диода волстроны к его «дежурному» току.

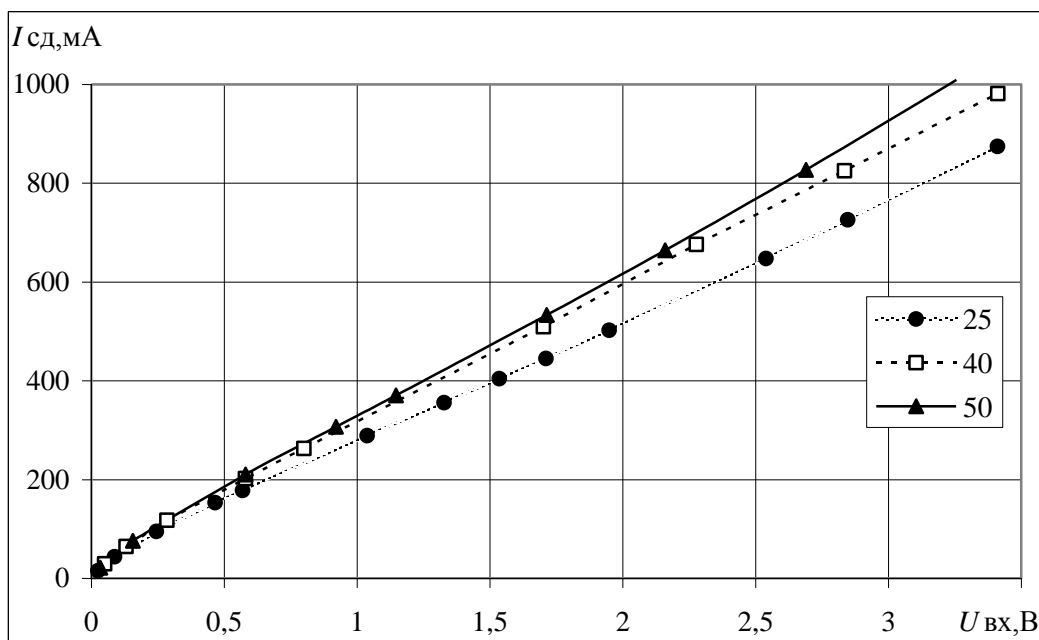


Рис. 5. Ток СИД, обеспечивающий пропорциональную входному сигналу $U_{\text{вх}}$ мощность излучения при разных температурах

Опытная эксплуатация первых двух экспериментальных образцов импульсного амперметра началась в ЗАО «Светлана Рентген» в 2004 г.

Периодическая проверка передаточной характеристики волстро́на, выполненного на аналоговых компонентах без специальной радиационной защиты, показала что, она остается линейной во всем его динамическом диапазоне несмотря на работу передатчика волстро́на в условиях сильных электромагнитных помех и рентгеновского облучения с энергией квантов до 200 кэВ. Однако накапливается систематическая ошибка результата измерений в среднем на 1% в год в результате медленной деградации элементов схемы, рис.6.

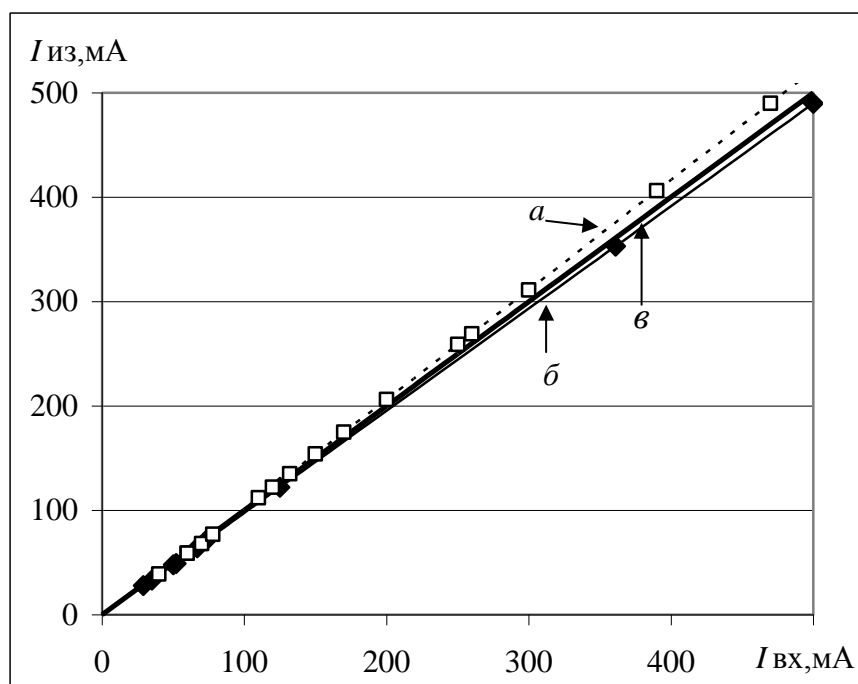


Рис. 6. Результаты проверки двух приборов после 5 лет эксплуатации
а) прибор номер 1; *б)* прибор номер 2; *в)* исходная характеристика

Между тем, динамический диапазон измерений тока с преобразователем на основе волстро́на не мог быть больше 500. Этого было достаточно для контроля импульсных РТ, но для трубок промышленного просвечивания требуется динамический диапазон более 50 тысяч.

В пятой главе приведены результаты исследования и разработки микроамперметра для измерения тока от единиц мкА до десятков мА, протекающего в цепи РТ под потенциалом относительно земли до 160 кВ. Измерение тока в пяти декадах потребовало размещения под высоким напряжением аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и микроконтроллера (МК), рис. 7. В данном случае информация передавалась по оптическому каналу в цифровой форме со скоростью 115 кбод. Для защиты интегральных микросхем с высокой степенью интеграции от воздействия РИ был рассчитан и изготовлен экран из стали и свинца.

Расчеты, описывающие спектр тормозного рентгеновского излучения, проводились по формуле Крамерса с учетом ослабления в прострельной мишени рентгеновской трубки, в её выпускном окне, в двух фильтрах, установленных на

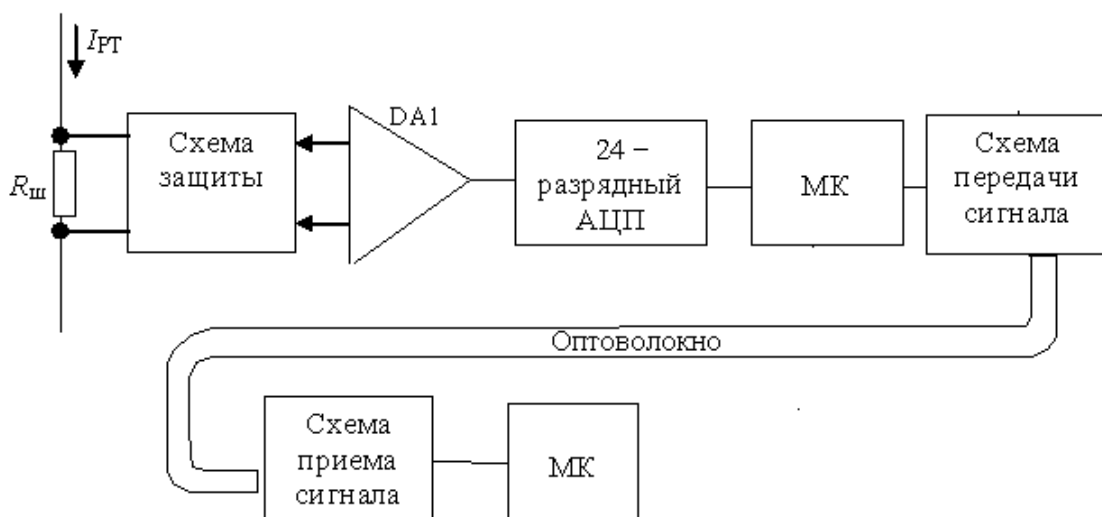


Рис. 7. Структурная схема микроамперметра с цифровой передачей данных

пути пучка, показали что, корпус, состоящий из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм и свинцового бокса со стенкой 5 мм ослабляет рентгеновское излучение в $4,1 \cdot 10^5$ раз:

$$I_{\text{торм}}(E) = \left[c_1 \cdot Z_W \cdot i_a \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{E_0}{E} - 1 \right) \cdot \frac{d_{S2}}{d_{S1}^2} \right] \times e^{-\mu_W(E) \cdot \rho_W \cdot \left(d_W - \frac{E_0}{50} \right) \cdot 10^{-4}} \times$$

$$\times e^{-\mu_{Be}(E) \cdot \rho_{Be} \cdot d_{Be} \cdot 10^{-4}} e^{-\mu_{Air}(E) \cdot \rho_{Air} \cdot d_{Air}}$$

$$I_{\text{торм}_1}(E) = \left[c_1 \cdot Z_W \cdot i_a \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{E_0}{E} - 1 \right) \cdot \frac{d_{S2}}{d_{S1}^2} \right] \times e^{-\mu_W(E) \cdot \rho_W \cdot \left(d_W - \frac{E_0}{50} \right) \cdot 10^{-4}} \times$$

$$\times e^{-\mu_{Be}(E) \cdot \rho_{Be} \cdot d_{Be} \cdot 10^{-4}} e^{-\mu_{Fe}(E) \cdot \rho_{Fe} \cdot d_{Fe} \cdot 10^{-4}} e^{-\mu_{Air}(E) \cdot \rho_{Air} \cdot d_{Air}}$$

$$I_{\text{торм}_2}(E) = \left[c_1 \cdot Z_W \cdot i_a \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{E_0}{E} - 1 \right) \cdot \frac{d_{S2}}{d_{S1}^2} \right] \times e^{-\mu_W(E) \cdot \rho_W \cdot \left(d_W - \frac{E_0}{50} \right) \cdot 10^{-4}} \times$$

$$\times e^{-\mu_{Be}(E) \cdot \rho_{Be} \cdot d_{Be} \cdot 10^{-4}} e^{-\mu_{Fe}(E) \cdot \rho_{Fe} \cdot d_{Fe} \cdot 10^{-4}} e^{-\mu_{Pb}(E) \cdot \rho_{Pb} \cdot d_{Pb} \cdot 10^{-4}} e^{-\mu_{Air}(E) \cdot \rho_{Air} \cdot d_{Air}}$$

$$K = \frac{\int_1^{E_0} I_{\text{торм}}(E) dE}{\int_1^{E_0} I_{\text{торм}_1}(E) dE} = 2,5 \quad K_1 = \frac{\int_1^{E_0} I_{\text{торм}_1}(E) dE}{\int_1^{E_0} I_{\text{торм}_2}(E) dE} = 1,6 \times 10^5 \quad K_2 = \frac{\int_1^{E_0} I_{\text{торм}}(E) dE}{\int_1^{E_0} I_{\text{торм}_2}(E) dE} = 4,1 \times 10^5$$

Здесь $I_{\text{торм}}(E)$ [фот/(с·кэВ·см)] - спектр первичного тормозного излучения рентгеновской трубки до фильтров, $I_{\text{торм}_1}(E)$ - после железного фильтра, $I_{\text{торм}_2}(E)$ - после железного и свинцового фильтра, K - коэффициент ослабления первого фильтра, K_1 коэффициент ослабления второго фильтра, K_2 - общий коэффициент ослабления системы фильтров.

Благодаря рассчитанным фильтрам, рентгеновское излучение не влияло на работу 24-х разрядного сигма-дельта АЦП и микроконтроллера с момента начала эксплуатации прибора в ЗАО «Светлана-Рентген», что к настоящему времени составило не менее 1000 ч. непрерывного воздействия РИ.

Полученная зависимость выходного сигнала от тока в диапазоне от 1 мкА до 50 мА имела линейный характер, рис.8.

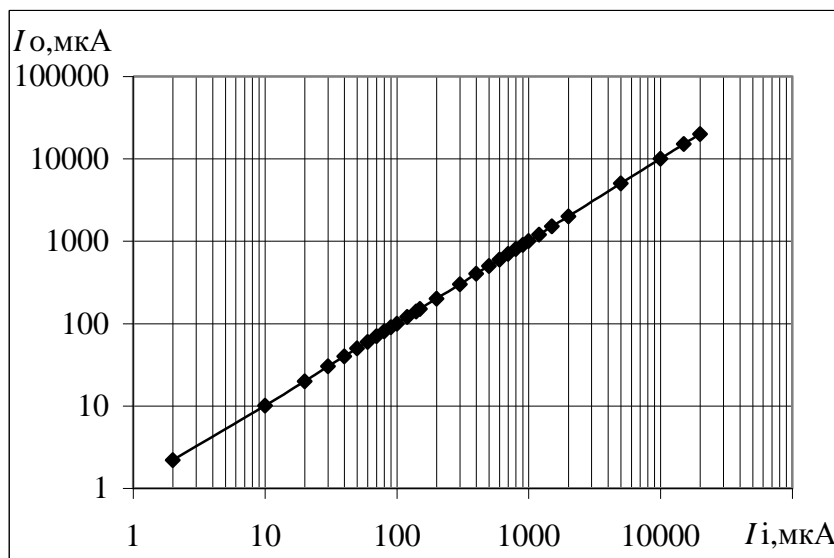


Рис. 8. Соответствие показаний микроамперметра эталонным значениям тока

Относительная погрешность измерений не превышала $\pm 1\%$ практически во всем диапазоне измерений за исключением тока менее 10 мкА, рис. 9.

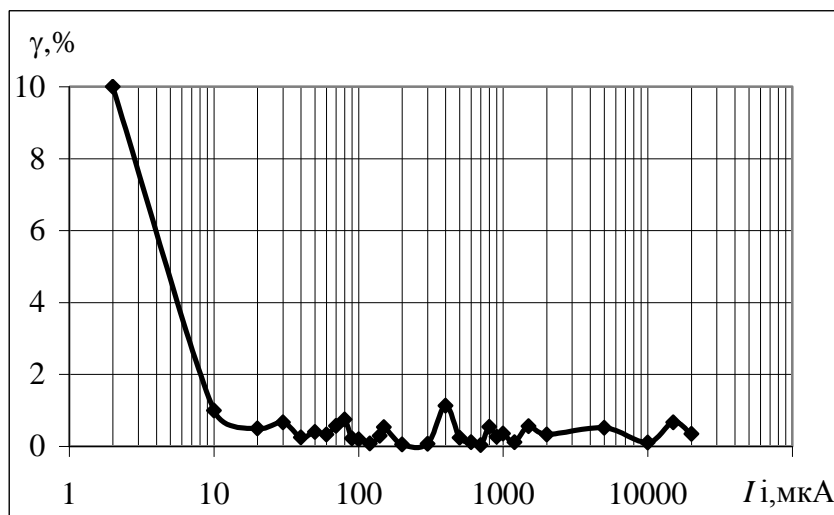


Рис. 9. Относительная погрешность цифрового микроамперметра

Дискретность отчетов тока во всем диапазоне равнялась 0,1 мкА, что позволило производителю РТ осуществлять ранее невозможное сравнение тока утечки РТ при его значениях ниже 5 мкА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным итогом диссертационной работы явилось решение актуальной научно-практической задачи разработки и создания информатизированного оборудования, измеряющего импульсный и постоянный анодный ток в цепях, находящихся под высоким напряжением, в широком динамическом диапазоне, а также ток утечки рентгеновских трубок с подсчетом числа электрических разрядов и выводом информации на пульт оператора в цифровом виде.

В результате, используя решения, предложенные в данной диссертации, в СПбГЭТУ (ЛЭТИ) в рамках хоздоговоров на передачу научно-технической продукции были сконструированы и изготовлены два вида экспериментальных образцов электронных микро- и миллиамперметров для участков тренировки рентгеновских трубок, которые уже несколько лет успешно эксплуатируются в цеховых условиях ЗАО «Светлана – Рентген».

Более детально диссертационная работа имеет следующие результаты:

1. Обоснована и экспериментально доказана возможность построения микро- и миллиамперметров на принципе линейного волстропа, измеряющих импульсный и постоянный ток в цепи высокого напряжения при потенциале измерительной цепи относительно земли до 250 кВ.
2. Экспериментально установлено соотношение для расчета динамического диапазона измерений тока при помощи волстропа со светодиодами на основе AlInGaP исходя из известных значений максимально-допустимого и «дежурного» тока СИД.
3. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено длительной эксплуатацией в заводских условиях, что несмотря на работу передатчика волстропа в условиях воздействия рентгеновского облучения с энергией квантов до 200 кэВ, характеристика прибора, выполненного на аналоговых компонентах и не имеющего специальной радиационной защиты, остается линейной во всем динамическом диапазоне, но с нарастанием систематического отклонения результата измерений в конечной точке шкалы преобразования в среднем на 1% в год в результате медленной деградации элементов схемы.
4. Установлено, что температурный дрейф и радиационное влияние на напряжение смещения операционного усилителя в передатчике волстропа обязывает не считать «дежурный» ток передатчика неизменным и требует строить алгоритм обработки сигнала, пропорционального измеряемому току, с применением уровня «плавающего» нуля.
5. Необходимость в высоковольтных микроамперметрах с линейной шкалой и динамическим диапазоном 50000 (от 1,0 мкА до 50 мА) потребовала размещения в тренировочном стенде прецизионного сигма-дельта АЦП и микроконтроллера. Для обеспечения устойчивой и продолжительной работы цифровых микросхем в условиях рентгеновского облучения был рассчитан и изготовлен защитный бокс, ослабляющий мощность рентгеновского излучения со средней энергией квантов до

200 кВ более чем в 10^5 раз и позволивший иметь к настоящему времени общую наработку преобразователя тока под воздействием излучения свыше 1000 часов.

6. В результате внедрения в технологический процесс тренировки цифрового микроамперметра с линейной шкалой измерений от 1 мкА до 50 мА удалось измерить ток утечки рентгеновских трубок с дискретностью отсчета 0,1 мкА и производить подсчет электрических разрядов при высоковольтной тренировке рентгеновских трубок. Число разрядов во время тренировки и точное значение тока утечки после тренировки дали технологам дополнительные сведения для оценки качества рентгеновских трубок и прогнозирования их срока службы.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Перес Васкес, Н. О. Импульсный амперметр с изоляцией на 100 кВ [Текст] /Н. О. Перес Васкес [и др.] //Известия государственного электротехнического университета. Серия: Физика твердого тела и электроника – 2003. -№ 2. – С. 46-48.

Другие статьи и материалы конференций:

2. Перес Васкес, Н. О. Высоковольтные измерительные приборы для контроля электрических параметров рентгеновских трубок [Текст] / Н. О. Перес Васкес [и др.] //Петербургский журнал электроники. – 2008.-№2-3.-С. 109-115.

3. Перес Васкес, Н. О. Исследование факторов, влияющих на точность преобразования электрических импульсов в пропорциональный оптический сигнал [Текст] /Н. О. Перес Васкес // Известия государственного электротехнического университета. -2008.-№ 1.- С. 76-81.

4. Перес Васкес, Н.О. Цифровой микроамперметр для производственного контроля токов утечки и количества пробоев в рентгеновских трубках [Текст] /Н.О. Перес Васкес // Известия государственного электротехнического университета. - 2009.-№ 7. -С. 7-11.

5. Перес Васкес, Н. О. Учет нелинейности делителя напряжения при разработке цифрового киловольтметра на 200 кВ [текст] /Н. О. Перес Васкес [и др.] // Доклад научной практической конференции «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», СПб, 2003,-С. 33-35.

6. Перес Васкес, Н. О. Цифровой микроамперметр с линейной шкалой в пяти декадах. [Текст]/ Н. О. Перес Васкес, А. А. Ухов, // Труды 61-ой научной тех. конференции, посвященной Дню Радио. Санкт-Петербург, 2006. -С. 167-169.

7. Перес Васкес, Н. О. Электронное устройство с изоляцией на 200 кВ для измерения тока от 1 мкА до 50 мА. [Текст]/ Н. О. Перес Васкес // Труды 62-ой научной тех. конференции, посвященной Дню Радио. СПб, 2007. -С. 185-187.

8. Перес Васкес, Н. О. Оптимизация параметров схемы измерительного преобразователя тока в оптическое излучение [Текст] / Н. О. Перес Васкес //Труды 64-ой научной тех. конференции, посвященной Дню Радио. СПб, -2009.-С. 192-193.