

# Опыт разработки и внедрения новых электронных компонентов и блоков для систем управления гиротронных комплексов

А.А. Терентьев<sup>1,2</sup>, А.Ю. Ермолаев<sup>2</sup>, В.В. Мохин<sup>2</sup>, Ю.М. Сатанова<sup>2</sup>, С.В. Толстопятых<sup>2</sup>, А.С. Ежин<sup>2</sup>  
Е.М. Тай<sup>3</sup>, И.И. Леонов<sup>1</sup>, А.Н. Куфтин<sup>1</sup>, М.Ю. Глявин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН

<sup>2</sup>ООО «Скоростные системы связи»

<sup>3</sup>ЗАО НПП «Гиком»

**Аннотация:** в данной статье представлены результаты разработки двух электронных компонентов систем управления и защиты гиротронных установок – регистратора оптического излучения и температурного монитора. Описаны основные схемотехнические подходы, принятые при разработке этих изделий. Приведены результаты опытного внедрения изделий.

**Ключевые слова:** гиротронные комплексы, системы управления и защиты, регистратор оптического излучения, температурный монитор

## 1. Введение

В последние годы всё более широкие технологические применения находят гиротронные источники микроволнового излучения. Так, наряду с фундаментальными научными вызовами, такими как создание СВЧ комплексов для нагрева плазмы и управления током в установках УТС [1], с использованием гиротронов успешно решается широкий круг прикладных задач, в частности, спекание керамических и композиционных материалов, выращивание алмазных плёнок и дисков, спектроскопия и диагностика различных сред [2,3]. При этом для эффективного внедрения гиротронных комплексов в технологические процессы ключевыми оказываются параметры не только самого гиротрона, но и системы его управления и защиты, которая должна обеспечивать стабильную и безопасную работу гиротрона в заданных режимах. Для построения таких систем традиционно используются оборудование и программное обеспечение ведущих мировых производителей, однако в современных условиях наибольший интерес может представлять опыт создания и использования оригинальных отечественных решений. В статье представлены последние разработки элементов систем управления гиротронных комплексов, успешно внедрённые в ИПФ РАН и ЗАО "НПП "Гиком". Представленные аппаратные решения могут представлять интерес и для использования во многих других отраслях.

## 2. Регистратор оптического излучения

В ходе эксплуатации гиротронной установки наибольшую опасность, как для оборудования, так и для персонала представляет СВЧ пробой. Неконтролируемый СВЧ пробой внутри гиротрона может привести к разрушению как элементов самого гиротрона, так и элементов системы его управления. Для предотвращения возникновения СВЧ пробоя применяются такие специальные методы, как применение бескислородной меди в области высоких СВЧ полей, безмасляного вакуума и непрерывного термического обезгаживания [4], а для предотвращения развития СВЧ пробоя целесообразно применение специальных аппаратных средств для быстрого обнаружения электрической дуги, возникающей в случае пробоя, и аварийного

отключения источников питания гиротрона.

Для решения задачи обнаружения электрической дуги при СВЧ пробое предложена конструкция 4-канального регистратора оптического излучения (рис. 1), подключаемого своими входами через оптический кабель к различным сечениям СВЧ тракта. При обнаружении свечения заданной интенсивности в одном или нескольких каналах происходит быстрое формирование управляющего сигнала для отключения источников питания гиротрона, а также отображение соответствующей информации на информационном дисплее прибора и передача этой информации по оптическому каналу связи в систему управления.



Рисунок 1. Внешний вид регистратора оптического излучения.

Принцип действия регистратора заключается в преобразовании оптического излучения, возникающего во время электрического пробоя (дуги), в электрический сигнал и формировании логического сигнала для устройств защиты оборудования. Оптическое излучение из точек контроля, находящихся на гиротроне, по оптоволоконным кабелям поступает на детекторы излучения каждого из 4 каналов. В фотодетекторах излучение преобразуется в электрический сигнал. После детекторов сигналы усиливаются трансимпедансными усилителями и поступают на компараторы, где сравниваются с заданными пороговыми напряжениями. Сигналы сравнения с компараторов вызывают срабатывание триггеров, фиксирующих наличие дугового разряда в соответствующем канале. С триггеров сигналы через схему ИЛИ, через оптрон, осуществляющий гальваническую развязку, поступают на буферные усилители, и далее на оборудование защиты. С триггера сигнал также поступает на реле, оптические передатчики (для формирования оптического управляющего сигнала) и микроконтроллер.

Как видно, микроконтроллер не участвует в формировании управляющих сигналов на источники питания, благодаря чему достигается высокая скорость реакции на обнаруженную дугу. Практические исследования и проведенные испытания подтвердили время задержки появления сигналов на оптических и проводных выходах регистрации излучения не более 2 мкс, время задержки появления сигнала на выходе типа «Сухой контакт» - не более 5 мс. Однако наличие микроконтроллера необходимо как для задания настроек и отображения информации на самом регистраторе, так и для обеспечения возможности встраивания регистратора в системы автоматического управления и защиты. Для этих целей разработан и реализован протокол информационного взаимодействия по оптическому интерфейсу RS-232 и медному интерфейсу RS-485.

Изготовленный и испытанный регистратор оптических сигналов успешно прошёл опытное внедрение в составе испытательного стенда ЗАО НПП ГИКОМ и подтвердил

заявленные технические характеристики, а также продемонстрировал высокую стабильность работы в составе системы автоматического управления.

### 3. Температурный монитор

Широко применимым на сегодняшний день подходом к построению гиротронных установок является формирование ведущего магнитного поля величиной до 5...20 Тл с использованием криомагнитов, внутрь которых помещают гиротрон [5,6]. Область значений температур для поддержания сверхпроводимости соленоидов криомагнита - от 2 до 4,2 К, точность определения температуры для корректной работы системы управления гиротронной установки - не хуже 0,02 К в указанной области температур. Закупка устройств для измерения температуры для таких систем за рубежом затруднительна, а российские аналоги на рынке отсутствуют, поэтому была поставлена задача разработки и внедрения специализированного устройства, применимого в системах управления гиротронных комплексов, для мониторинга и отображения текущей температуры соленоидов, которое обеспечит высокую точность измерения и возможность работы в условиях больших внешних электромагнитных наводок.

Результатом разработки является температурный монитор (рис. 2), подключаемый через разъем DB-15 к резистивному датчику температуры (RTD) по 4-проводной схеме подключения.



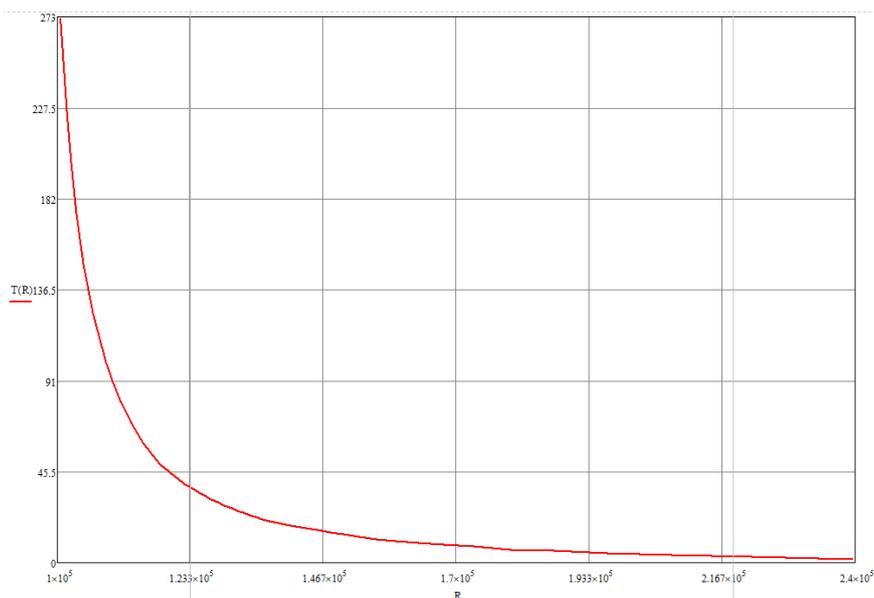
Рисунок 2. Внешний вид температурного монитора.

Для работы в условиях сильных магнитных полей используется резистивный датчик температуры на основе оксида рутения RO105. Данный датчик обеспечивает отличные рабочие характеристики в условиях магнитного поля, обладая отрицательным магнетосопротивлением. Зависимость сопротивления RTD от температуры окружающей среды представлена на рисунке 3.

RTD является пассивным датчиком, т.е. не производит выходной сигнал сам по себе. Поэтому для возбуждения RTD требуется известный источник постоянного тока для создания полезного выходного напряжения, пропорционального сопротивлению RTD. Выходное напряжение, снятое с датчика температуры, затем подается на АЦП с дифференциальным входом. С помощью этого метода можно легко рассчитать неизвестное сопротивление RTD, а затем преобразовать его в температуру с помощью программного алгоритма. Ток возбуждения, протекающий через RTD, сведен к минимуму, чтобы избежать самонагрев датчика, а для исключения из результата измерения возникающего падения напряжения на проводах, соединяющих прибор с датчиком, используется четырехпроводная схема подключения.

Использование ратиометрической схемы измерения дает значительное преимущество, поскольку ошибки, связанные с абсолютной точностью тока

возбуждения, и ошибки, связанные с дрейфом возбуждения, практически исключены. Это обеспечивается следующим механизмом измерения: в ратиометрической схеме ток возбуждения, протекающий через RTD, возвращается на землю через опорный резистор  $R_{REF}$ . В свою очередь,  $R_{REF}$  представляет собой прецизионный резистор с малым допуском и малым дрейфом. Падение напряжения на резисторах RTD и  $R_{REF}$  создается одним и тем же источником возбуждения, а выходной код АЦП представляет собой соотношение между входным напряжением и опорным напряжением. Поэтому ошибки из-за абсолютной точности тока возбуждения и ошибки из-за дрейфа возбуждения практически исключены. Кроме того, шум источника возбуждения в такой схеме измерения также компенсируется.



**Рисунок 3.** Зависимость сопротивления RTD от температуры окружающей среды.

RTD является пассивным датчиком, т.е. не производит выходной сигнал сам по себе. Поэтому для возбуждения RTD требуется известный источник постоянного тока для создания полезного выходного напряжения, пропорционального сопротивлению RTD. Выходное напряжение, снятое с датчика температуры, затем подается на АЦП с дифференциальным входом. С помощью этого метода можно легко рассчитать неизвестное сопротивление RTD, а затем преобразовать его в температуру с помощью программного алгоритма. Ток возбуждения, протекающий через RTD, сведен к минимуму, чтобы избежать самонагрев датчика, а для исключения из результата измерения возникающего падения напряжения на проводах, соединяющих прибор с датчиком, используется четырехпроводная схема подключения.

Использование ратиометрической схемы измерения дает значительное преимущество, поскольку ошибки, связанные с абсолютной точностью тока возбуждения, и ошибки, связанные с дрейфом возбуждения, практически исключены. Это обеспечивается следующим механизмом измерения: в ратиометрической схеме ток возбуждения, протекающий через RTD, возвращается на землю через опорный резистор  $R_{REF}$ . В свою очередь,  $R_{REF}$  представляет собой прецизионный резистор с малым допуском и малым дрейфом. Падение напряжения на резисторах RTD и  $R_{REF}$  создается одним и тем же источником возбуждения, а выходной код АЦП представляет собой соотношение между входным напряжением и опорным напряжением. Поэтому ошибки из-за абсолютной точности тока возбуждения и ошибки из-за дрейфа возбуждения практически исключены. Кроме того, шум источника возбуждения в такой схеме измерения также компенсируется.

Изготовленный и испытанный температурный монитор успешно прошёл опытное внедрение в составе экспериментальных стендов ИПФ РАН и подтвердил заявленные технические характеристики. Кроме этого, были проведены сравнительные испытания с прибором типа SCM10 производства Scientific Instruments, по результатам которых была продемонстрирована высокая сходимости результатов измерения.

#### 4. Заключение

Проведённые работы показали, что разработка и внедрение оригинальных аппаратных решений для систем управления гиротронных комплексов позволяет не только уменьшить использование импортного оборудования, но и повысить качество и функциональность систем управления за счёт учёта специфических требований, предъявляемых к отдельным узлам и блокам. Представленные в статье результаты продемонстрировали не только эффективность принятых ранее решений о разработке и внедрении оригинальных узлов систем управления, но и целесообразность проведения дальнейших работ в данном направлении с расширением номенклатуры используемых оригинальных средств. Кроме того, интерес также представляет возможность использования полученных результатов и для других отраслей и направлений техники.

#### Список литературы

1. A. G. Litvak, G. G. Denisov and M. Y. Glyavin, "Russian Gyrotrons: Achievements and Trends," IEEE Journal of Microwaves, vol. 1, no. 1, pp. 260-268, Jan. 2021, doi: 10.1109/JMW.2020.3030917
2. М.Ю.Глявин. Субтерагерцовая электроника и ее приложения. Сборник трудов 5 Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ, 30 мая - 02 июня 2016, Санкт-Петербург, Россия, с.367-368, Электроника и микроэлектроника СВЧ, 2016, 1, 1, 129-131.
3. М. Ю. Глявин, Г. Г. Денисов, В. Е. Запевалов, А. Н. Куфтин, А. Г. Лучинин, В. Н. Мануилов, М. В. Морозкин, А. С. Седов, А. В. Чирков. Терагерцевые гиротроны: состояние и перспективы // радиотехника и электроника, 2014, том 59, № 8, с. 745-751.
4. Н.А. Завольский, Е.В. Иляков, И.С. Кулагин. Экспериментальное исследование физических процессов, ограничивающих мощность и длительность излучения в мощном гиротроне на релятивистском пучке // XV Научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника». Материалы конференции. Октябрь 2008. С.96-99
5. Запевалов В.Е. Эволюция гиротронов // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2011. Vol. 54, № 8. P. 559.
6. Fokin A.P. et al. High power sub-terahertz microwave source with record frequency stability upto 1 Hz // Scientific Reports, 2018, T. 8. C. 4317