

# Усовершенствование автоматизации гиротронных комплексов на основе элементов современной микроэлектроники

М.В. Каменский<sup>1</sup>, М.В. Морозкин<sup>1</sup>, М.Д. Проявин<sup>1</sup>, А.А. Орловский<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Волжский государственный университет водного транспорта

**Аннотация:** в данной работе исследована возможность применения в гиротронных комплексах новой быстродействующей и помехозащищенной системы управления, построенной на элементах современной микроэлектроники. Решена проблема измерений низкого среднего уровня мощности при короткоимпульсном режиме работы гиротрона, а также высокого уровня постоянной мощности без использования дополнительной нагрузки. Добавлены и экспериментально проверены быстродействующие системы блокировок по уровню потока в системе охлаждения, а также по аварийному изменению профиля магнитного поля в коллекторной и катодной областях гиротрона.

**Ключевые слова:** гиротрон, система управления, автоматизация, система блокировок, система сбора и контроля данных, высоковольтная развязка

## 1. Введение

Комплекс на базе гиротрона является уникальным инструментом для различных научных и технологических направлений [1]. Свое признание данные СВЧ-генераторы сыскали благодаря их характеристикам выходного излучения (мощность, частота, эффективность), а также надежности при долговременной непрерывной работе. В отдельных случаях технологические процессы требовали бесперебойной работы в течение нескольких недель. Для таких приложений требуется автоматизированная система управления, которая помимо сбора и контроля данных для выполнения поставленных перед комплексом целей, должна также защищать сам комплекс и его работников от возникновения аварийных ситуаций. Учитывая, что в некоторых видах гиротронов мощности электронного пучка и излучения достигают мегаваттного уровня, наличие надежных блокировок является одной из основополагающих задач. В то же время, для других приложений, где используются маломощные приборы, существует проблема измерения мощности генерации, особенно в импульсном режиме, обеспечивающем крайне малые средние уровни мощности. В случае новых разработок в области так называемых технологических гиротронов с использованием квазиadiaбатических магнитных полей требуется наличие контроля токов и напряжений (блокировка по межвитковому замыканию и потере магнитного поля) маломощных коллекторных и катодных катушек, обеспечивающих корректное формирование и осаждение электронного потока. Отдельным направлением и ролью системы автоматизации является применение большого количества различных датчиков и микроконтроллеров для проведения сложных экспериментальных исследований процессов, протекающих внутри гиротрона, например, исследования эффекта вторичной эмиссии.

Современные технологии позволяют использовать все более новые подходы в области автоматизации гиротронных комплексов. Их применение существенно упрощает и ускоряет процесс получения различного рода информации для широких целей. В данной работе на примере гиротронного комплекса К-диапазона

демонстрируются результаты разработки новой системы автоматизации с использованием современных решений в области микроэлектроники.

## 2. Разработка и экспериментальное тестирование автоматизированной системы контроля уровня мощности гиротронного комплекса с низким уровнем средней мощности излучения.

Частота генерации гиротрона прямо пропорциональна величине магнитного поля в области электронно-волнового взаимодействия. Следовательно, при продвижении в более высокие частоты решается вопрос создания экстремально высоких магнитных полей. В связи с высоким энергопотреблением соленоидов, высокой стоимостью и ограниченными возможностями криомагнитов, в некоторых случаях оправдан переход к работе в импульсном режиме. Используя накопители, возможно реализовать магнитные поля длительностью в несколько десятков микросекунд и величиной в десятки тесла [2]. Однако, скважность таких импульсов очень велика, следовательно, средняя мощность получается крайне малой.

Соответственно, рождается проблема измерения мощности высокочастотного сигнала в импульсном режиме работы гиротрона. Измерения малых величин обычно сопровождается большими трудностями в связи с наличием большой абсолютной погрешности. Данный случай не является исключением, так как в процесс высокочувствительных измерений вносят большую погрешность, например, сильные наводки импульсы магнита и высокого напряжения гиротрона. В качестве измерителя мощности в таких случаях использовался поглотитель, на который был намотан провод большой длины. Нагрев поглотителя приводит к расширению и, следовательно, малому увеличению сопротивления намотанного провода, которое в дальнейшем измеряется миллиомметром. Подобный способ сопровождается большим числом внешних факторов и является слишком грубой оценкой мощности генерации.

Другим способом является измерение мощности с помощью водной калориметрической нагрузки, которое используется в большинстве гиротронов. Однако, металлические калориметры при низком уровне мощности недостаточно хороши из-за высокой теплопроводности и, соответственно, утечки измеряемой мощности. Необходимо было модифицировать систему измерений мощности для калориметрических измерений импульсного гиротрона 0,53 ТГц/200 кВт/20 мкс. Несмотря на высокую пиковую мощность, из-за короткой длительности импульса 20 мкс интегральная мощность составила около 4 Дж. Чтобы уловить изменение температуры между входной и выходной водой, необходимо повысить чувствительность калориметра. Для этого внутреннее пространство водяной камеры (место поглощения излучения) было сведено к минимуму. Толщина водяного канала была выбрана равной 0,3 мм, площадь выбрана исходя из диаметра выходного окна гиротрона (20 мм) и угла наклона окна калориметра 30 градусов.

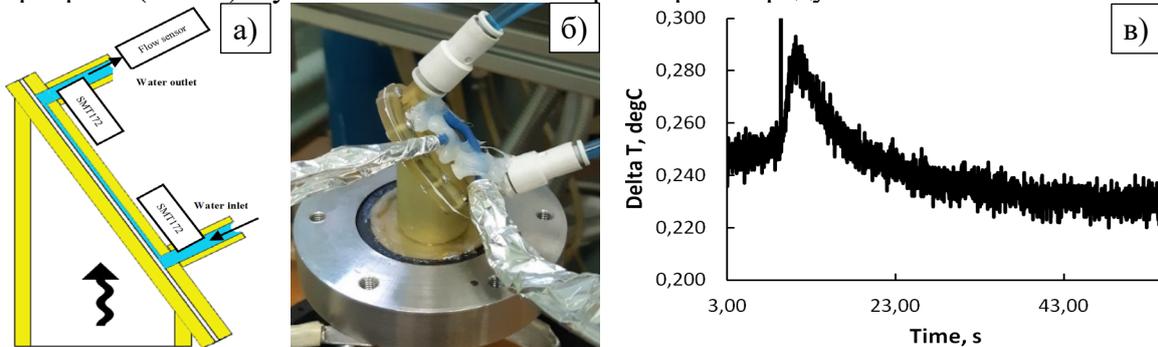


Рисунок 1. Схема (а) и внешний вид (б) нагрузки гиротронного комплекса, (в) – результаты экспериментальных данных разницы входной и выходной температур воды внутри калориметра в процессе импульса гиротрона.

Для предотвращения температурной утечки поглощенной мощности излучения водой корпус макета должен изготавливаться из материалов с низкой теплопроводностью. При этом датчики температуры следует размещать как можно ближе к абсорбционной камере (рис. 1 а, б). Для удовлетворения таких требований и создания модели сложной формы была использована технология SLA 3D-печати. Для получения значений мощности излучения были собраны данные о расходе воды и ее температуре на входе и выходе. Использование высокочувствительных сверхбыстрых (3 кГц) термодатчиков SMT172 позволило собрать достаточное количество данных, описывающих огибающую скачка температуры с точностью до сотых долей градуса. Для контроля массы воды, прошедшей через калориметр во время нагрева воды в процессе излучения, использовался калиброванный расходомер с низким уровнем протока (около 0.2 л/мин). Затем оценивалась интегральная поглощаемая мощность, которая пересчитывалась в мощность импульса по длине сигнала высокого напряжения с осциллографа. В результате экспериментов удалось осуществить регулярный автоматизированный сбор данных излучаемой мощности, которая находилась в пределах 190-220 кВт (рис. 1в).

Отметим, что надежность работы и корректность получаемых данных автоматизированной системы контроля мощности в условиях электрических наводок была реализована за счет специальной схемы. Передача данных с датчиков на главный контроллер происходила через цифровой повторитель сигналов ADuM 1200, ADuM 1201, что позволяло использовать независимые линии питания измерительной аппаратуры и платы управления. Цепи питания были также гальванически развязаны с остальным гиротронным стендом с помощью DC-DC преобразователя B1205S. Данный подход был использован при создании автоматизированных подсистем других узлов гиротронного комплекса и апробирован на мощном гиротронном комплексе.

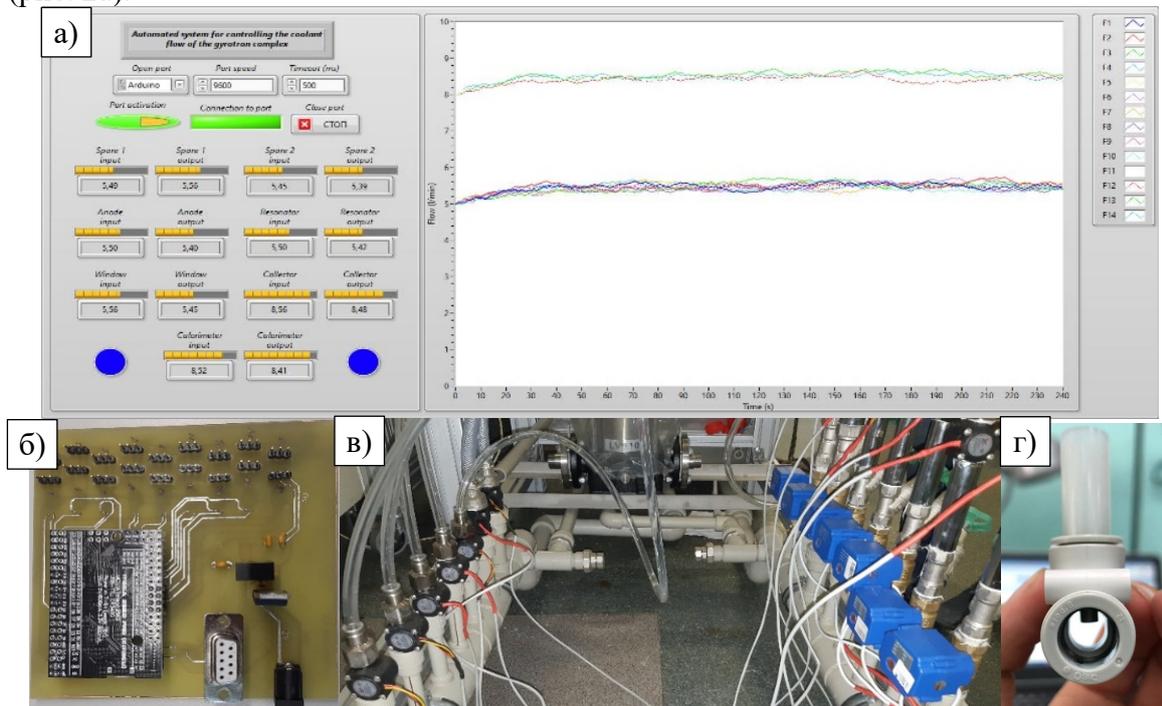
### **3. Система автоматизации узлов мощного технологического гиротронного комплекса.**

Технологические гиротронные комплексы являются самым распространенным видом гиротронов, так как применяются в широком спектре различных научных и технологических целях [3-5]. Соответственно, переход к современной системе автоматизации контроля данных и управления является актуальной задачей. Одной из проблем является контроль уровня мощности излучения в процессе работы на полезную нагрузку. Этого можно добиться путем учета потерь в каждом узле гиротрона, в основном в контурах системы охлаждения. Зная энергопотребление всех источников питания и тепловые потери можно определить мощность излучения без использования калориметрической нагрузки. Для этого был применен подход из п.2. По своей сути, каждый контур охлаждения гиротрона является калориметром при установке в него расходомера и датчиков контроля температуры. Для технологического комплекса нового поколения [6] была реализована подобная система.

В каждый канал системы охлаждения были интегрированы датчики температуры и расхода воды, что позволило реализовать в системе управления контроль поглощаемой мощности во всех элементах гиротрона: в резонаторе, выходном окне, аноде, коллекторе и др. Установка термодатчиков была выполнена через пластиковые быстроразъемные соединения SMC, для чего сам корпус датчика помещен в 3D-печатную гильзу с внешними размерами, соответствующими используемому фитингу. Такой подход позволил избежать внешнего теплового воздействия и повысить точность измерения. В результате удалось реализовать расчет мощности излучения гиротрона в реальном времени из баланса мощностей. Кроме того, данная система позволяет с хорошей точностью выставить проток воды в каждом контуре гиротрона.

В нашем случае мы использовали 14 расходомеров, которые стоят в каждом контуре попарно. Это сделано для улучшения точности измерений, а также для надежности работы комплекса в случае выхода из строя одного из датчиков. В систему блокировок на высоковольтный источник питания (ВИП) через реле по каналу «сухой контакт» был реализован сценарий экстренного отключения комплекса в случае отсутствия подачи охлаждающей жидкости ниже заданного уровня.

В качестве микроконтроллеров, в новой системе, используются ATmega2560 и ATmega328P. Данные микроконтроллеры превосходят используемые аналоги в предыдущих версиях систем автоматизации по быстродействию, возможности программирования на современных языках, использованию распространенной и недорогой микроэлектроники, обладают надёжностью, а также лёгкой взаимозаменяемостью компонентов системы при аварийном выходе из строя. Визуализация данных была реализована в программе, разработанной в среде LabVIEW (рис. 2а).



**Рисунок 2.** Система визуализации (а), внешний вид платы системы контроля и сбора данных водяного контура (б), фото контуров системы водяного охлаждения с датчиками и моторизованными кранами (в), внешний вид установки гильзованного термодатчика в SMC разъем (г).

Одним из ключевых отличий рассматриваемого технологического комплекса является магнито-экранированная система, которая имеет резкий спад магнитного поля в области коллектора и катода гиротрона и, следовательно, сложную топологию электронного потока [7]. Для ее корректной работы требуются несколько маломощных катушек. В случае выхода из рабочего состояния одной из них в результате, например, межвиткового замыкания, может выйти из строя сам гиротрон. Поэтому данный узел был также автоматизирован и заведена соответствующая блокировка в ВИП. Суть автоматизации заключалась в контроле тока и напряжения каждой катушке. Для этого была создана соответствующая плата с датчиками контроля тока и напряжений. Обработанные значения передавались на общий компьютер по каналу связи, для быстродействия блокировки был реализован отдельный канал в обход относительно более длительных процессов обработки данных на микроконтроллере. Визуализация данных была добавлена в отдельное окно программы системы управления.

Разработанные узлы автоматизированного контроля и сбора данных с использованием современной электроники были испытаны в процессе эксперимента.

Для проверки возникновения аварийной ситуации в процессе работы с малой энергией потока электронов, но с поданным высоким напряжением вручную изменялись значения показаний датчиков (выключение одной из катушек или перекрытие крана канала охлаждения) до критических отметок. В результате чего наблюдалось моментальное срабатывание блокировок и отключения питания гиротрона.

#### 4. Заключение

Разработаны и экспериментально исследованы узлы автоматизированной системы контроля и сбора данных, реализованные на компонентах современной микроэлектроники, позволяющей существенно упростить и качественно улучшить процесс получения и обработки данных гиротронных комплексов. Решена проблема измерений низкого среднего уровня мощности (2-4 Дж) излучения высокочастотного импульсного гиротрона 0,53 ТГц/200 кВт/20 мкс. Результат данной работы позволил успешно осуществить контроль уровня мощности непрерывного технологического гиротронного комплекса 28 ТГц/20 кВт в процессе работы на полезную нагрузку. Добавлена и успешно протестирована блокировка высоковольтного источника питания для случая недостаточного потока в контурах системы охлаждения гиротрона. Реализована система контроля токов и напряжений катодной и коллекторных катушек для гиротрона с магнито-экранированной системой. Система позволяет контролировать заданный профиль магнитного поля в области коллектора и препятствует попаданию высокоэнергетического потока электронов на элементы гиротрона вне расчетных областей. Соответствующая блокировка успешно протестирована в результате экспериментов. С использованием современных языков программирования созданы удобные для пользователя программы визуализации параметров работы СВЧ-комплексов.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00884)**.

#### Список литературы

1. A. G. Litvak, G. G. Denisov and M. Y. Glyavin, "Russian Gyrotrons: Achievements and Trends," in IEEE Journal of Microwaves, vol. 1, no. 1, pp. 260-268, Jan. 2021, doi: 10.1109/JMW.2020.3030917
2. M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, G. S. Nusinovich, et al, "A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency", Appl. Phys. Lett. 101, 153503 (2012) <https://doi.org/10.1063/1.4757290>
3. Golubev, S.V., Skalyga, V.A., Izotov, I.V. et al. On the Possibility of Creating a Point-Like Neutron Source. Radiophys Quantum El 60, 779–785 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11141-018-9846-y>
4. A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, A.V. Kozlov, et al, Diamond films grown by millimeter wave plasma-assisted CVD reactor, Diamond and Related Materials, Volume 15, Issues 4–8, 2006, Pages 502-507, ISSN 0925-9635, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.10.044>
5. Цветков А.И., Водопьянов А.В. и др. Получение высокодисперсного порошка монооксида олова методом испарения-конденсации при нагреве сфокусированным излучением субтерагерцевого гиротрона // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47. – №. 5.
6. Morozkin, M.V., Proyavin, M.D., Manuilov, V.N. et al. Optimization of Collector Systems of Technological Gyrotrons with Shielded Magnetic Systems. Radiophys Quantum El 63, 413–421 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10066-y>
7. Proyavin, M.D., Glyavin, M.Y., Zavol'sky, N.A. et al. Development of a High-Power Continuous-Wave Gyrotron for High-Efficiency Technological K-Band Microwave Complexes. Radiophys Quantum El 62, 506–512 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11141-020-09996-w>