

Разработка современной автоматизированной системы сбора и анализа данных исследовательского гиротронного комплекса по изучению свойств электронных пучков

М.В. Каменский, М.В. Морозкин, А.А. Орловский, М.Д. Проявин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аннотация: в работе представлена автоматизированная система сбора и анализа данных исследовательского гиротронного комплекса по изучению свойств электронных пучков. Спецификой системы является реализация возможности с высокой скоростью и точностью измерять температурный след электронного потока, падающего на коллектор гиротрона. Данная информация будет крайне востребована при уточнении расчётных моделей электронной оптики в гироприборах. Работоспособность разработанной системы подтверждена модельными экспериментами.

Ключевые слова: гиротрон, система управления, автоматизация, система сбора и контроля данных, вторичная эмиссия, электронно-оптическая система, винтовой электронный пучок, 3D-печать металлических элементов, аддитивные технологии, коллектор

1. Введение

Современные СВЧ-комплексы на основе мощных источников электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн – гиротронов – являются незаменимым инструментом в различных областях науки и техники [1]. Развитие данных систем, связанное с продвижением в более высокий диапазон частот и к большей выходной мощности, выявляет множество эффектов, которые ранее были незначительными и малозаметными. Для их изучения с целью улучшения работы устройства требуется более глубокое моделирование, а уточненные математические модели должны быть проверены путем сравнения результатов расчетов с данными, полученными в экспериментах. В то же время создание исследовательских СВЧ-комплексов требует больших временных и финансовых затрат. В связи с вышеперечисленными задачами в ИПФ РАН был разработан исследовательский гиротронный комплекс, основанный на разборном макете гиротрона, части которого изготовлены по технологии металлизации фотополимеров CMPS [2]. Данный комплекс предназначен для исследования свойств винтовых электронных пучков (ВЭП), создаваемых магнетронно-инжекторными пушками, а также эффектов вторичной электронной эмиссии при оседании ВЭП на коллектор гиротрона. Коллектор гиротрона выполнен цельномедным с водяным охлаждением, во внутреннюю стенку внедрен массив термодатчиков для анализа распределения температуры. Одной из ключевых систем созданного комплекса является система сбора и анализа данных, позволяющая, в том числе, собирать данные о тепловой нагрузке на коллектор с высокой точностью и хорошими пространственным и временными разрешениями.

2. Система автоматизации

Неотъемлемой частью современных гиротронных комплексов является система автоматизации, состоящая из подсистем сбора и анализа данных, а также подсистемы

защит и блокировок (см., например, [3]). В случае рассматриваемого СВЧ-прибора, сбор информации о температуре стенок коллектора необходимо получать из вакуумного объема, что может быть решено внедрением соответствующих датчиков в корпус прибора. Безусловно, это накладывает сложности на изготовление таких элементов. Однако современные технологии аддитивного производства, такие как CMPS, применяемые в ИПФ РАН, решают данную проблему и позволяют установить большой массив датчиков в прибор. В данном случае будет рассматриваться коллектор гиротрона с интегрированными термодатчиками, позволяющими получить информацию о тепловом следе электронного пучка на коллекторе. Данная информация будет использоваться для изучения свойств вторичной эмиссии электронов, в дальнейшем будет оцениваться изменение следа электронного пучка с наличием генерации излучения и использованием высокочастотной размазки. Для проведения подобных исследований была разработана специальная система анализа электронного потока. Ключевыми элементами данной системы являются 96 высокочувствительных сверхбыстрых (3 кГц ШИМ) цифровых термодатчиков SMT172, расположенных по спирали вдоль оси коллектора, 12 специально разработанных плат термодатчиков, сетевой коммутатор маршрутизатор и программное обеспечение для ПК, написанное в среде программирования Qt 5. Спиральное расположение датчиков температуры позволяет повысить разрешающую способность системы. Осесимметричный ВЭП будет осаждаться на коллектор «кольцом», поэтому расположение датчиков кольцами (7 датчиков по азимуту с шагом около 3 см по продольной оси) будет создавать дублирование информации датчиками с одинаковой продольной координатой. При расположении по винтовой линии появляется возможность увеличить детализацию измерений оседания осесимметричного пучка в 7 раз, то есть примерно до 4 мм.

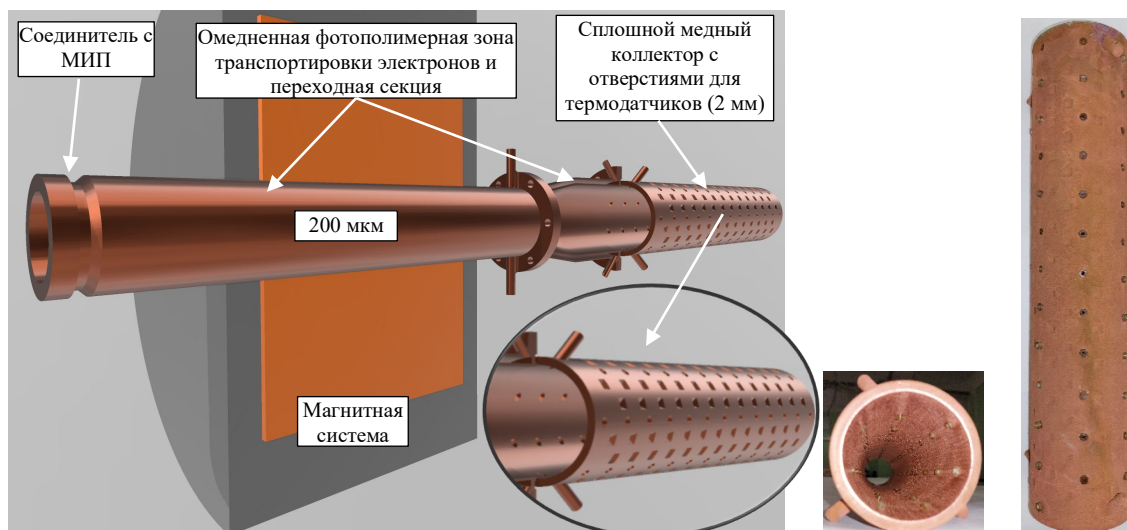


Рисунок 1. Напечатанные на 3D-принтере фотополимерный омеднённый коллектор (фото справа) и его расположение в исследовательском гиротроне.

Для прецизионных измерений температуры требуется «обвязка» из радиоэлементов, выполненная в виде отдельной платы (платы «обвязки»), что обеспечивает стабильную работу термодатчиков с высокой частотой ШИМ-сигнала, защиту от наводок и электромагнитных помех. Для защиты от влаги и механических воздействий место пайки проводов и плата «обвязки» были помещены в полую цилиндрическую гильзу, напечатанную на фотополимерном 3D принтере и залиты эпоксидной смолой.

Далее к разъёму каждой платы «обвязки» подключался удлинитель, представляющий собой трёхжильный провод с одной экранированной жилой. К этим жилам были припаяны и изолированы разъёмы на 3 контакта. В месте пайки разъёма с жилами кабеля со стороны датчика оплётка экранированной жилы была полностью удалена, а с обратной стороны она была присоединена к земляной жиле. Это повысило помехозащищённость сигнала от датчика, так как помехи, наводившиеся на относительно длинный провод, представляющий собой, по сути, антенну, уходили на землю, а не на линию сигнала.

Затем каждый удлинитель от термодатчика подключался к ответному разъёму, припаянному к разъёму DB-15M. Этот разъём подключался к ответному разъёму DB-15F расположенному на плате термодатчиков. Один из двенадцати комплектов системы приведён на рисунке 2.

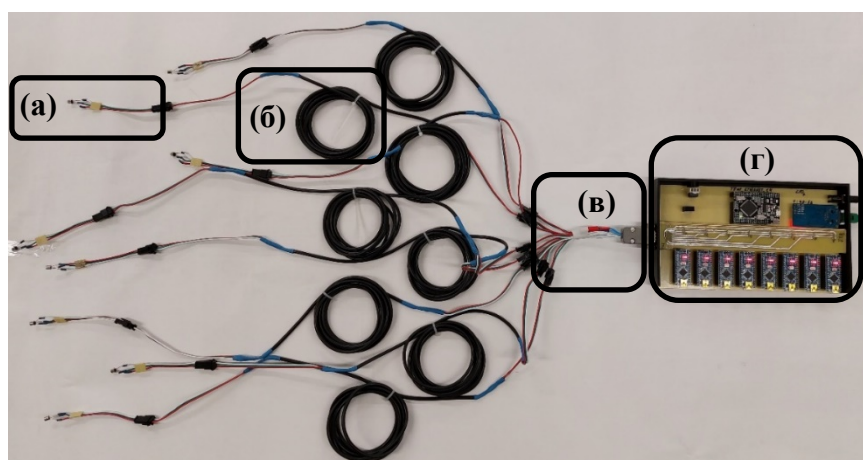


Рисунок 2. Один из двенадцати комплектов системы сбора и анализа данных: а) термодатчик с «обвязкой» и разъёмом; б) удлинитель с разъёмами; в) переходник на разъём DB-15M; г) плата термодатчиков.

Плата термодатчиков имеет прямоугольную форму с размерами 218x128 мм со всей необходимой комплектацией микроэлектроники, она состоит из нескольких ключевых блоков: электропитания, «ADUM», «NANO» и «MEGAðernet».

Блок «ADUM» представляет собой 4 двухканальных цифровых изолятора-повторителя сигналов ADUM 1200CRZ. Данные компоненты позволяют реализовать высоковольтную гальваническую развязку (2.5 кВ) при высокой скорости и качестве передачи сигнала. Они не требуют подключения дополнительных драйверов, операционных усилителей и других радиоэлементов, работают при напряжении в диапазоне от 2.7 до 5.5 вольт и имеют низкий потребляемый ток (макс 4.8 мА). Данные преимущества позволяют эффективно принимать сигнал от термодатчиков без риска повреждения других компонентов на плате в случае электрических наводок или пробоя.

Блок «NANO» состоит из установленных в терминалы 8 модулей Arduino NANO на базе восьмимбитного микроконтроллера ATmega328P, работающего на частоте 16 МГц. В каждый такой модуль загружен программный код, позволяющий обрабатывать сигнал с широтно-импульсной модуляцией, идущий от термодатчика через ADUM,

преобразовывать данный сигнал в значения температуры в °С, отфильтровывать и сглаживать их и отправлять данные по интерфейсу I2C на центральный микроконтроллер. Данный интерфейс благодаря своей архитектуре позволяет подключать к одной шине, состоящей из двух проводов SDA (данные) и SCL (тактовые импульсы), до 127 устройств одновременно, не используя дополнительного оборудования и радиокомпонентов. В результате с помощью программного кода был реализован алгоритм, при котором, с заданной периодичностью, центральный микроконтроллер отправлял запросы на все подключённые микроконтроллеры ATmega328P и при наличии данных принимал их по интерфейсу I2C. Данный подход позволил установить на плату 8 микроконтроллеров в режиме slave и организовать передачу данных между ними и центральным микроконтроллером с относительно высокой скоростью и стабильностью.

Главным блоком на плате является блок «MEGAðernet», состоящий из двух важнейших элементов. Это один модуль Arduino MEGA на базе восьмибитного микроконтроллера ATmega2560, работающего на частоте 16 МГц, являющимся центральным микроконтроллером на плате и ядром всей системы. И один модуль «Ethernet Shield» на базе микросхемы Wiznet 5500, который представляет собой аппаратный контроллер Ethernet, позволяющий подключаться к сети по протоколу TCP/IP через установленный разъём RJ45S (8P4C). Данный модуль взаимодействует с центральным микроконтроллером через интерфейс SPI и требует напряжения питания от 3.3 до 5 вольт. Как уже говорилось выше, сигнал от каждого термодатчика через ADUM поступает на соответствующий микроконтроллер ATmega328P. Далее обработанные данные от каждого микроконтроллера передаются на центральный микроконтроллер ATmega2560 по интерфейсу I2C, на котором с помощью специального программного кода происходит повторная обработка данных, формирование «посылки» и её отправка на модуль «Ethernet Shield», который в свою очередь пересылает эти данные по сетевому кабелю с разъёмами RJ-45 через сетевой коммутатор на ПК. Далее работа с данными и их визуализация происходит с помощью специальной программы, написанной для работы на ПК.

Система электропитания на плате устроена следующим образом. Изначально к каждой из плат подведена сеть электропитания напряжением 12 В. Первый узел, использующий DC-DC преобразователь B1205S с гальванической развязкой 1.5 кВ, обеспечивает стабильное напряжение 5 В DC для восьми термодатчиков, одну из гальванически изолированных сторон микросхем ADUM и обеспечивает их защиту от тока короткого замыкания или другой внештатной ситуации. Дополнительно в цепи преобразователя распаяны два конденсатора и резистор для защиты от электромагнитных помех и наводок, TVS-диод и самовосстанавливающийся предохранитель. Второй узел имеет в своем составе трёхполюсный регулятор напряжения L705CV, обеспечивающий стабильным напряжением 5 В DC все микроконтроллеры и модуль «Ethernet Shield», вторую, гальванически отвязанную от первой, сторону микросхем ADUM и обеспечивает их безопасную работу (ограничение тока, отключение при тепловой перегрузке, защита от короткого замыкания). В электрическую цепь также интегрированы два конденсатора,

обеспечивающие подавление электромагнитных помех.

Разработанная система сбора и анализа данных теплового следа электронного пучка на коллекторе гиротрона была реализована в полном объеме и успешно протестирована в результате модельного эксперимента. Результаты отображения значений температуры матрицы термодатчиков в окне программы приведены на рисунке 3. Для отображения продольного профиля температурного распределения программно реализована возможности развертки данных значений в двумерный вид в виде графика температуры от продольной координаты. Также возможна оценка азимутальной симметричности теплового следа путем анализа показаний близких по продольной координате, но разнесенных по азимуту датчиков температуры. Данная система полностью готова к установке в специально разработанный коллектор исследовательского гиротрона.

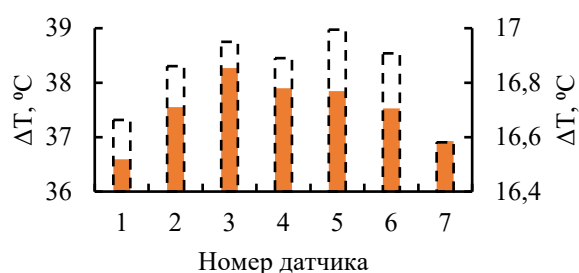
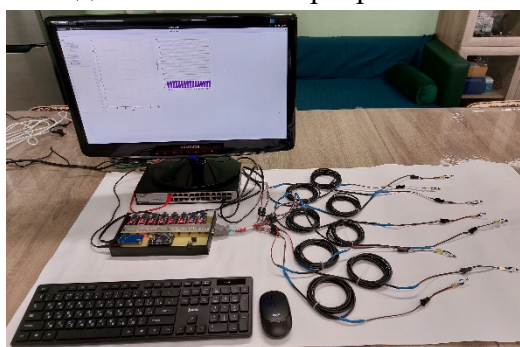


Рисунок 3. Фотографии модельного эксперимента и данных из программы визуализации.

4. Заключение

Для коллектора исследовательского гиротронного комплекса разработана современная автоматизированная система сбора и анализа данных, позволяющая с высокой точностью и хорошим пространственным разрешением получать информацию о температурном следе электронного потока. Реализована возможность построения из массива значений двумерного графика продольного распределения температуры вдоль продольной координаты, а также оценки азимутальной симметрии теплового следа. Разработанная система устойчива к электромагнитным помехам и электрическим пробоям, ее модули легко заменяемы и доступны. В настоящий момент система полностью готова для проведения реальных испытаний в коллекторе гиротрона.

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

Список литературы

1. Thumm, M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices. Update of Experimental Results 2021. (KIT Scientific Reports; 7761); Update 2021.; KIT Scientific Publishing, 2021.
2. Proyavin, M.D.; Morozkin, M. V.; Ginzburg, N.S.; Denisenko, A.N.; Kamenskiy, M. V.; Kotomina, V.E.; Manuilov, V.N.; Orlovskiy, A.A.; Osharin, I. V.; Peskov, N.Y.; et al. Experimental Studies of Microwave Tubes with Components of Electron–Optical and Electrodynamic Systems Implemented Using Novel 3D Additive Technology. *Instruments* 2022, 6, doi:10.3390/instruments6040081.
3. Bykov, Yu. V; Ereemeev, A.G.; Glyavin, M.Yu.; Denisov, G.G.; Kalynova, G.I.; Kopelovich, E.A.; Luchinin, A.G.; Plotnikov, I. V; Proyavin, M.D.; Troitskiy, M.M.; et al. Millimeter-Wave Gyrotron Research System. I. Description of the Facility. *Radiophysics and Quantum Electronics* 2019, 61, 752–762, doi:10.1007/s11141-019-09933-6.