

Разработка новых элементов систем управления технологических и мегаваттных гиротронных комплексов

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

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

Аннотация: в данной работе приведены результаты разработки и применения новых элементов автоматизации гиротронных комплексов. Показаны примеры различных электронных печатных плат системы управления, их особенности и архитектура. В статье рассказывается о основных принципах и особенностях работы системы управления гиротронными комплексами, приводятся примеры их использования в различных научных установках по всему миру. Также в данной работе показаны нововведения и перспективы развития данного направления.

Ключевые слова: гиротрон, система управления, автоматизация, система измерений, гиротронный комплекс

1. Введение

Гиротроны [1], представляющие собой наиболее мощные источники когерентного электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, уже несколько десятилетий занимают ключевое место в решении прикладных задач управляемого термоядерного синтеза и в ускорительной технике. Способность этих приборов генерировать мощное непрерывное или импульсное излучение на частотах от 14 до 170 ГГц и даже выше, делает их незаменимыми в тех областях, где требуется эффективное взаимодействие различных видов плазмы с СВЧ-излучением.

Гиротроны мегаваттного уровня мощности [2] успешно используются на различных установках УТС по всему миру. Один из наиболее известных примеров — это международный реактор ИТЭР, строящийся на юге Франции. Гиротронные комплексы на 170 ГГц и 1 МВт выходной мощности для него уже изготовлены и приняты. Однако, продолжаются работы по созданию новых мегаваттных гиротронов с частотой 230 ГГц [3] для перспективных проектов международной термоядерной электростанции ДЕМО и российского токамака с реакторными технологиями (РТТ).

Менее мощные «технологические» гиротронные комплексы [4], работающие на частотах до 100 ГГц с выходной мощностью в десятки киловатт, также успешно используются в научных центрах по всему миру, например, в ряде проектов в Китае и России. Наиболее востребованными являются комплексы, применяемые в ионных источниках и ускорителях частиц [5], комплексы для синтеза CVD-алмазов [6], а также установках по спеканию керамики [7].

Несмотря на различия в назначении и наборе рабочих параметров, оба типа комплексов требуют высокой степени автоматизации и контроля рабочего процесса. Это невозможно без применения современных средств измерений и передачи данных, работающих совместно со специализированным программным обеспечением (ПО). Необходимость использования систем управления (СУ) связана со сложностью структуры и устройства гиротронного комплекса, включающего в себя набор источников питания, в том числе высоковольтных, магнитные системы, систему охлаждения и ряд измерительных и блокировочных подсистем. Без развитых средств измерения и автоматического контроля невозможны ни безопасная эксплуатация комплекса, ни его эффективная работа.

2. Общая архитектура системы управления гиротронного комплекса

Гиротронный комплекс, кроме самого гиротрона, включает в себя набор различных источников питания, магнитные системы и систему охлаждения. Высоковольтные катодный и анодный источники питания (ВВИП) обеспечивают формирования электронного потока с определёнными характеристиками. ВВИП ионного насоса позволяет контролировать уровень вакуума внутри лампы. В комплекс также интегрированы ИП накала нити катода и ИП основного и дополнительных соленоидов. Магнитное поле основного соленоида заставляет электроны в пучке вращаться по спиральным траекториям с циклотронной частотой, которая прямо пропорциональна индукции этого поля и, в том числе, определяет частоту генерации гиротрона. Катодная и коллекторная дополнительные катушки обеспечивают формирование электронного пучка с правильными характеристиками и осаждение этого потока в безопасной зоне коллектора с равномерным распределением плотности мощности.

Как было показано выше, для эффективной работы гиротронного комплекса требуется достаточно обширный набор различных источников питания, имеющих различные интерфейсы и протоколы передачи данных. При этом оператор комплекса должен иметь возможность контролировать и управлять всеми ИП, а в случае возникновения аварийной ситуации все ИП должны быть автоматически выключены в определённой последовательности согласно заложенному алгоритму. Всё это невозможно реализовать без использования различных программных и аппаратных средств автоматизации и управления.

По мере развития СУ гиротронных комплексов, было принято решение осуществить переход на собственные решения, основанные на распространённой и легкодоступной элементной базе. Стоит отметить, что большинство элементов систем управления для российских мегаваттных гиротронных комплексов изготовлено на базе решений National Instruments, Siemens, Schneider Electric, MOXA, EtherWAN и другими. Это качественное и надёжное оборудование. Однако частичная или полная их недоступность и крайне высокая стоимость делает данный подход к производству готового комплекса ЭЦР-нагрева ненадёжным и нерациональным.

При разработке системы управления было принято решение использовать модульный подход. На каждую подсистему изготавливается отдельная плата со всеми необходимыми для защиты и работы элементами. Затем она устанавливается либо рядом с обслуживаемой подсистемой, либо в общем ящике СУ. Такой подход позволяет легко заменять вышедший из строя элемент, проводить модернизацию или внесение различных изменений. Также есть возможность осуществлять оперативное обслуживание СУ комплексов практически любым техническим специалистом за счёт замены готового блока.

На рисунке 1 приведена функциональная схема новой системы управления «технологического» гиротронного комплекса с МЭС, работающего на частоте 24 ГГц с выходной мощностью СВЧ-излучения 7 кВт, поставленного в 2026 году в Институт современной физики Китайской академии наук в Ланьчжоу, Китай. Она достаточно хорошо отражает основные принципы подхода к архитектуре построения СУ и показывает связи между различными ИП и элементами СУ. Самой главной является плата «Main», с установленным микроконтроллером семейства AVR и 9 парами оптических приемо-передающих устройств, позволяющих управлять всеми ИП посредством оптического канала связи. Исключением являются ИП магнитных систем, они работают по интерфейсу ethernet. Для работы с устройствами по протоколу ethernet в СУ предусмотрен специальный модуль, позволяющий осуществить взаимодействие платы «Main» с данными приборами («Ethernet» board). Также СУ предполагает наличие сетевого коммутатора или свитча. Стоит отметить,

что ещё плата блокировок («Interlock» board) имеет проводную связь по протоколу UART с платой «Main», реализованную через гальванически развязанный цифровой повторитель сигналов. Взаимодействие со всеми остальными платами и ИП происходит исключительно через оптическую связь.

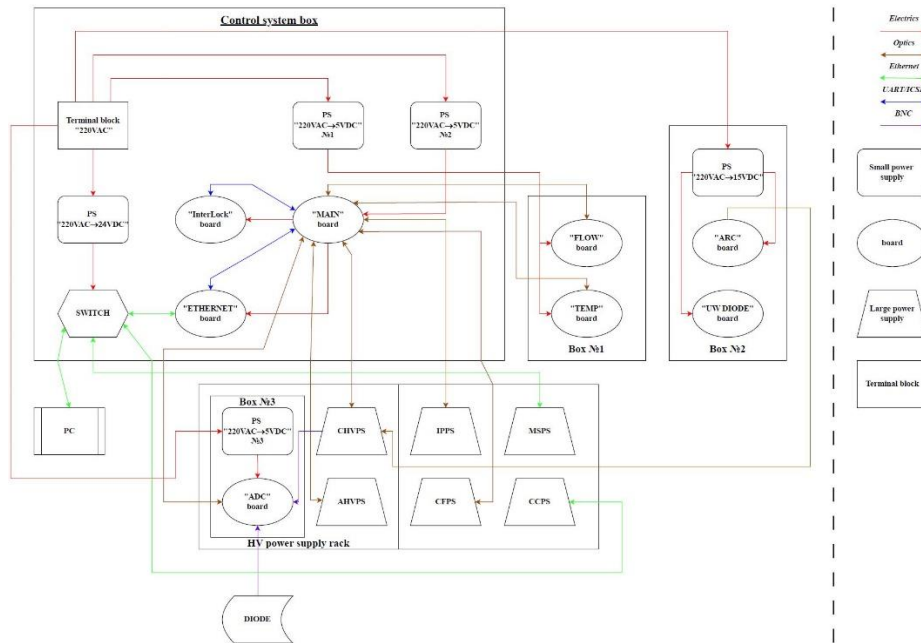


Рисунок 1. Функциональная схема системы управления технологического гиротронного комплекса.

3. Особенности построения схем элементов системы управления гиротронного комплекса

Работа с современными гиротронными комплексами, особенно мегаваттного уровня мощности в импульсном режиме, неизбежно совмещена с необходимостью использования мощных высоковольтных источников питания с напряжениями в несколько десятков киловольт. При таком режиме работы существует риск электрического пробоя в различных узлах лампы, появление наводок на передающей и измеряющей аппаратуре. Для защиты всех элементов СУ и обеспечения корректных измерений и передачи данных, вся возможная связь между устройствами осуществляется через оптический канал. Там, где нет возможности реализовать такую связь, используются гальванически развязанные цифровые повторители сигналов. Электропитание плат осуществляется через набор отдельных ИП с трансформаторной гальванической развязкой, а на самой плате установлены компактные изолированные преобразователи напряжения, что позволяет обеспечить электропитанием различные датчики системы измерений отдельно от питания микроконтроллера. Для передачи сигналов с датчиков, подключенных к плате, и работы входных портов на плате блокировок, электрически связанной проводами с различными ИП, используются оптроны. Такой подход позволяет полностью изолировать часть платы, связанную с микроконтроллером от источников питания и самого гиротрона. Это позволяет, как обезопасить элементы СУ, так и снизить уровень помех и наводок.

Ещё одной особенностью разрабатываемых систем управления гиротронных комплексов является внедрение новой системы измерения мощности [8]. Она позволяет измерять поглощённую мощность во всех контурах охлаждения гиротронного комплекса, что даёт возможность вычислить выходную мощность гиротрона без использования калориметра за счёт баланса мощностей. Это становится актуально, когда из-за наличия сильных отражений от нагрузки, системы измерения

мощности на основе СВЧ диодов с ответвителями начинают работать некорректно.

На рисунке 2 изображены различные элементы системы управления гиротронного комплекса. Платы «Main», «Interlock», «Ethernet» и свитч (А) располагаются в отдельном экранированном ящике внутри стенда. Платы для измерения протоков и температур (Б) находятся рядом с системой охлаждения. Платы ARC-детектора, диода и отдельный ИП для них (В) размещены рядом с платами протока и температур.

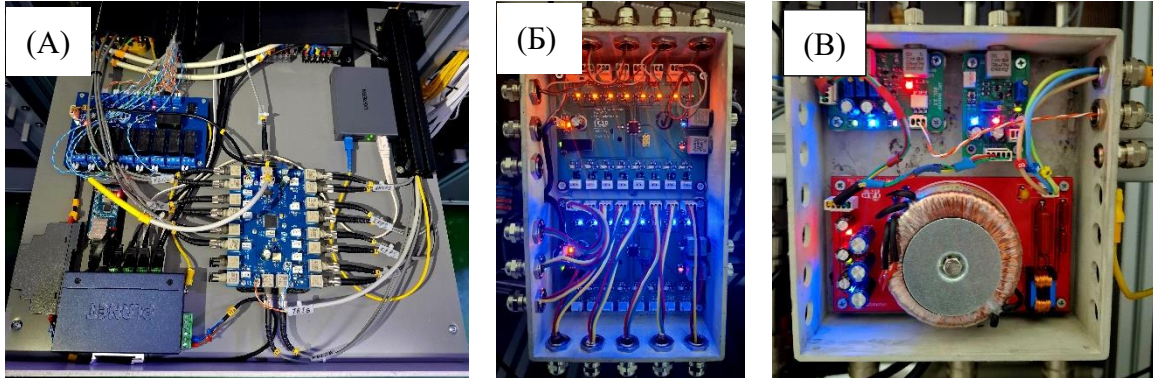


Рисунок 2. Элементы СУ гиротронного комплекса.

В качестве визуализации данных и управления гиротронным комплексом разработан графически интерфейс пользователя (ГИП). Глобально задача данной программы делится на два направления. Во-первых, функционал ГИП позволяет максимально детализировано получать информацию о состоянии всех узлов СВЧ-комплекса, а также осуществлять настройку их работы посредством представителей разработчика. Во-вторых, так как гиротронный комплекс должен управляться оператором, не имеющим глубоких знаний о работе гиротронного комплекса, ГИП должен обеспечивать максимально простой и безопасный механизм управления всей системой. Поэтому в ГИП заложены функции автоматического включения/выключения комплекса, задания режима работы непрерывный или импульсный (с заданием параметров длительности и скважности), а также необходимой мощности СВЧ-излучения. Иллюстрация основного функционала ГИП продемонстрирована на рисунке 3.

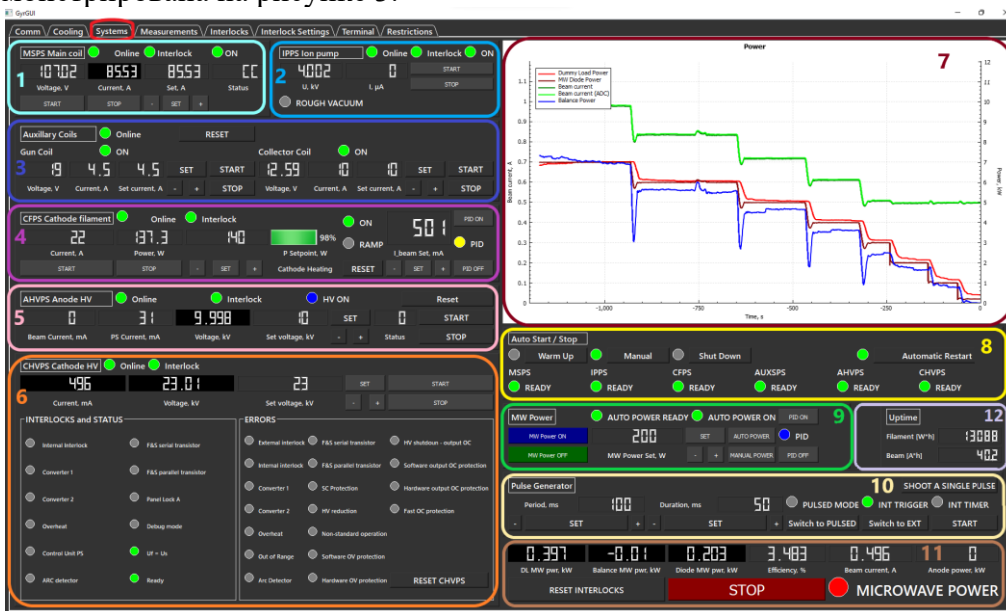


Рисунок 3. Основная вкладка ГИП системы управления технологическим гиротронным комплексом.

4. Заключение

В настоящей работе продемонстрированы разработанные и внедренные новые элементы систем управления для мегаваттных и «технологических» гиротронных комплексов. Предложенная модульная архитектура, основанная на использовании отдельных печатных плат, обеспечивает гибкость, масштабируемость и удобство обслуживания СУ. Применение оптических каналов связи и гальванической развязки позволило надёжно защитить оборудование от высоковольтных пробоев и электромагнитных помех, что критически важно для работы гиротронов установок большой мощности. Внедрение новой системы измерения по балансу мощностей расширяет возможности диагностики и контроля поглощаемой мощности во всех узлах гиротрона и позволяет проводить измерения в условиях сильных отражений СВЧ-излучения. Разработанные решения успешно апробированы на различных гиротронных комплексах и могут быть использованы на других установках. Дальнейшее развитие направления связано с полным переходом на оптическую связь между модулями и использования всех элементов СУ собственного производства, а также созданием унифицированных модулей СУ как для «технологических» комплексов, так и в гиротронах для термоядерных реакторов (ДЕМО, ТРТ).

Исследование выполнено в рамках проекта ИПФ РАН «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона» FFUF-2022–0007.

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. Thumm M.K.A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nucl. Fusion. 2019. Vol. 59, № 7. P. 073001.
3. A. A. Ananichev et al. Experimental Study of a Short-Pulse Prototype Megawatt-Power 230-GHz Gyrotron for the TRT Tokamak // IEEE Electron Device Letters, vol. 46, no. 11, pp. 2142-2144, Nov. 2025, doi: 10.1109/LED.2025.3604060
4. М. В. Морозкин, М. Д. Проявин, В. Н. Мануилов [и др.] Технологический гиротронный комплекс с частотой излучения 28-95 ГГц и высокой выходной мощностью // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2024. – № 6. – С. 154-155. – EDN CENEEO.
5. Skalyga V.A. et al. Status of the gasdynamic ion source for multipurpose operation (GISMO) development at IAP RAS // Rev. Sci. Instrum. 2019. Vol. 90, № 12. P. 123308.
6. С.А. Богданов, А.Л. Вихарев, М.Ю. Глявин, А.М. Горбачев, М.В. Каменский, М.В. Морозкин, А.А. Орловский, М.Д. Проявин, Д.И. Соболев, Е.А. Солуянова, Е.М. Тай, В.В. Холопцев «Разработка гиротронного комплекса 28 ГГц/20 кВт для оптимизации синтеза CVD-алмазов» // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» – 2025. – Т. 1. – С. 401-405. – EDN ZIMYCS;
7. Vykov, 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., & Kholoptsev, V. V. (2019). Millimeter-Wave Gyrotron Research System. I. Description of the Facility. Radiophysics and Quantum Electronics, 61(10), 752–762. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09933-6>
8. М. В. Каменский, М. В. Морозкин, М. Д. Проявин, А. А. Орловский Усовершенствование автоматизации гиротронных комплексов на основе элементов современной микроэлектроники // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – Т. 1. – С. 432-436. – EDN SRJMUF.