

## Системы фазовой автоподстройки частоты для стабилизации частоты импульсных гиротронов

А.П. Фокин<sup>1</sup>, Г.Ю. Голубятников<sup>1</sup>, А.Ф. Андриянов<sup>1</sup>, А.А. Терентьев<sup>1,2</sup>, Б.З. Мовшевич<sup>1</sup>,  
М.Ю. Глявин<sup>1</sup>, Г.Г. Денисов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>ООО «Скоростные Системы Связи», г. Нижний Новгород

**Аннотация:** в докладе представлены системы для стабилизации частоты импульсных гиротронов, основанные на фазовой автоподстройке частоты за счет управления напряжением на модулирующем аноде электронной пушки гиротрона.

**Ключевые слова:** гиротрон, стабилизация частоты, ФАПЧ

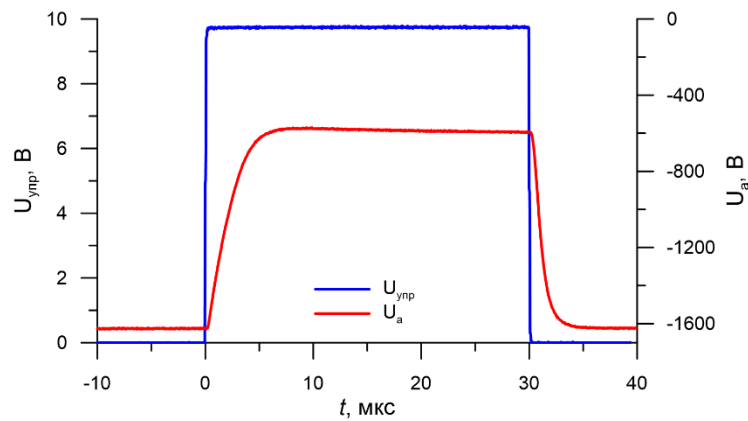
### 1. Введение

Стабильность частоты излучения является одним из ключевых параметров для источников, применяемых в спектроскопии и диагностике различных сред [1]. Для гиротронов, обеспечивающих рекордный уровень мощности в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне частот, стабильность частоты определяется в основном характеристиками высоковольтных источников питания [2]. При этом, в гиротронах с триодными электронно-оптическими системами существует быстрый способ управления частотой генерации за счет управления напряжением модулирующего анода электронной пушки [3]. Для гиротронов, работающих в непрерывном режиме, применимы стандартные системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), управляющие напряжением анода и обеспечивающие ширину спектра на уровне 1 Гц [4]. Однако для импульсных систем требуется модернизация систем ФАПЧ и блоков управления напряжением анода, чтобы обеспечить требуемое быстродействие и минимальное время захвата.

В работе представлены работы, выполненные в ИПФ РАН по модернизации и разработке новых систем ФАПЧ для стабилизации частоты излучения импульсных субтерагерцовых гиротронов.

### 2. Особенности управления частотой импульсных гиротронов

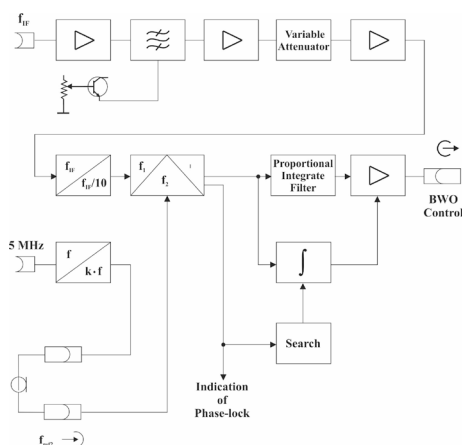
Исходя из длительности импульсов высоковольтных источников питания, имеющихся в ИПФ РАН, составляющей от 40 до 100 мкс, система ФАПЧ должна обеспечивать стабилизацию частоты за время не превышающее 10-20 мкс. Это, в свою очередь, накладывает ограничения на систему управления напряжением на модулирующем аноде [5]. Уменьшение характерного времени изменения напряжения при фиксированной емкости анода гиротрона около 100 пФ возможно только за счет уменьшения балластного сопротивления и увеличения тока в цепи анода. Такое изменение определяет требования к допустимой рассеиваемой мощности на элементе, управляющим напряжением. В экспериментах с гиротроном-драйвером с рабочей частотой 230 ГГц минимально время изменения напряжения при полной модуляции управляющего сигнала составило 5 мкс (см. Рис. 1). Измерения производились при величине балластного сопротивления 21,2 кОм, напряжении источника питания 2 кВ и токе цепи 77 мА. Продемонстрированное изменение напряжения анода на 1 кВ обеспечивает скорость перестройки частоты 16 МГц/мкс.



**Рисунок 1.** Осциллограммы управляющего напряжения и напряжения на аноде гиротрона-драйвера.

### 3. Синхронизаторы ФАПЧ

В ИПФ РАН ведется работы как по модернизации существующих блоков-синхронизаторов ФАПЧ, так и разработка нового блока, с учетом требований работы с импульсными системами. Принципиальная схема модернизированного синхронизатора приведена на Рис.2. Поскольку необходимо стабилизировать по частоте генератор очень высокой частоты, на систему преобразования частоты (ПЧ), получения биений между управляемым генератором и гармоникой опорного генератора-синтезатора, накладываются особые условия по коэффициенту усиления, полосе, шумовым характеристикам. Модернизированный синхронизатор включает в себя малошумящий усилитель промежуточной частоты (350 МГц), с делителем на 10, после чего сигнал поступает на вход частотно- фазового детектора (ЧФД). С формирователя опорного сигнала от стандарта частоты (10 МГц или GPS-сигнала) на 2-й вход ЧФД поступает сигнал в полосе 30-40 МГц. Сигнал ошибки, пропорциональный разности частоты-фазы, с ЧФД через широкополосный (2-5 МГц) усилитель мощности и пропорционально-интегрирующий фильтр подается на блок управления напряжением анода. Кроме того, для обеспечения минимального времени захвата выходное управляющее напряжение синхронизатора в режиме ожидания выставлялось приблизительно равным напряжению для соответствующей рабочей частоты гиротрона, а параметры пропорционально-интегрирующего фильтра устанавливались исходя из минимизации времени срабатывания. В результате экспериментов с модифицированным синхронизатором было достигнуто время стабилизации частоты 10-20 мкс.



**Рисунок 2.** Принципиальная схема модифицированного синхронизатора (слева) и внешний вид нового синхронизатора (справа).

На основании экспериментов с модифицированным блоком синхронизатора была разработана схема нового прибора, с использованием современной элементной базы. Так, использование современных широкополосных частотно-фазовых детекторов позволило исключить из входного каскада делитель промежуточной частоты на 10, а опыт использования систем ФАПЧ с гиротронами – подготовить набор установок выходного пропорционально-интегрирующего фильтра. Разработанный блок синхронизатора прошел лабораторные испытания, и в настоящий момент проходит испытания с гиротроном.

#### 4. Заключение

В работе приведены результаты работ с системами ФАПЧ для импульсных высокочастотных гиротронов. Продемонстрированы короткие (менее 20 мкс) времена стабилизации частоты и разработан современный блок синхронизатора.

Исследование выполнено в рамках проекта **«Теоретическое и экспериментальное исследование перспективных электровакуумных генераторов и усилителей, работающих от сантиметрового до терагерцового диапазона» (проект № FFUF-2024-0027).**

#### Список литературы

1. Sabchevski S. и др. Novel and Emerging Applications of the Gyrotrons Worldwide: Current Status and Prospects // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves 2021 427. Springer, 2021. Т. 42, № 7. С. 715–741.
2. Dumbrajs O., Nusinovich G.S. Effect of technical noise on radiation linewidth in free-running gyrotron oscillators // Phys. Plasmas. 1997. Т. 4, № 5. С. 1413–1423.
3. Fokin A.P.P. и др. Control of sub-terahertz gyrotron frequency by modulation-anode voltage: Comparison of theoretical and experimental results // Rev. Sci. Instrum. 2019. Т. 90, № 12. С. 124705.
4. Fokin A. и др. High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz // Sci. Rep. 2018. Т. 8, № 1. С. 4317.
5. Мовшевич Б.З. и др. Быстродействующий регулятор анодного напряжения гиротрона // Приборы и техника эксперимента. 2020. Т. 6. С. 40–45.