



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА
«Система питания ускоряющей структуры
от нескольких магнетронов»

выполнил студент 613 группы
Конеев А.Р.

научный руководитель
к.ф.м.н., с.н.с. Юров Д.С.



Проблема и актуальность исследования

Линейные ускорители электронов применяются в медицине, промышленности, досмотровых комплексах.

Ключевой элемент питания ускорителя — источник СВЧ-мощности для ускоряющей структуры.

- **Клистрон** (усилитель):

- КПД 60–70%, высокая стабильность, чистый спектр
- Сложный, дорогой, крупногабаритный

- **Магнетрон** (генератор):

- КПД 70–90%, простой, компактный, дешёвый (серийное производство)
- Широкий плавающий спектр, ограниченная выходная мощность одного прибора



Цель работы

- Создание ускорителя непрерывного действия на энергию 0.5 МэВ. Потребляемая мощность ускоряющей структурой **10 кВт**.
- Использование нескольких магнетронов:
 - **Внешняя синхронизация** — подача внешнего маломощного СВЧ-сигнала на магнетрон сужает спектр, фиксирует частоту и фазу.
 - **Суммирование мощностей** — когерентное сложение сигналов в волноводном сумматоре.
- **Цель работы** — разработка и экспериментальная проверка системы питания ускоряющей структуры, состоящей из четырёх промышленных магнетронов (по 3 кВт каждый), с применением внешней синхронизации и когерентного сложения их выходных мощностей.

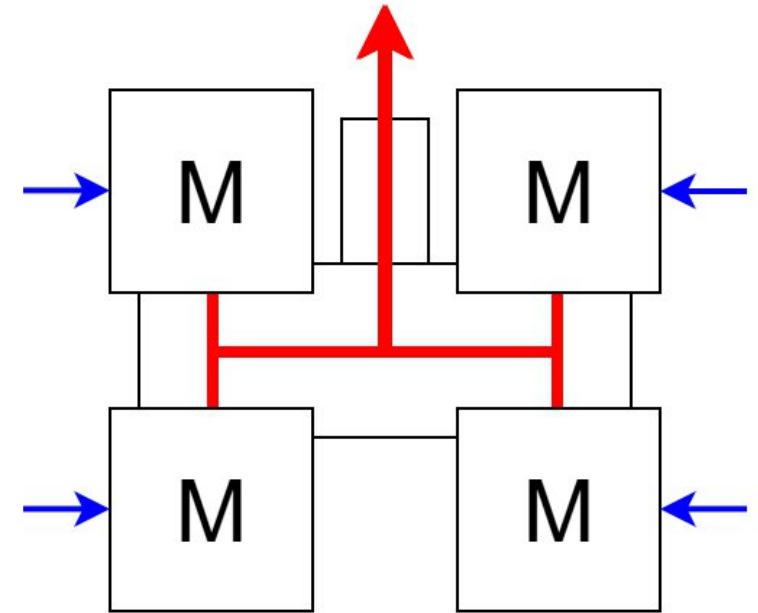


Схема сложения мощностей магнетронов в сумматоре.

- внешний синхронизирующий СВЧ-сигнал
- ↑ выходная мощность магнетронов



Постановка задач

1. Измерить реальные мощностные и частотные характеристики магнетронов LG 2M290.
2. Экспериментально исследовать синхронизацию магнетрона внешним сигналом.
3. Спроектировать, изготовить и испытать пятипортовый волноводный сумматор.
4. Собрать полную схему суммирования четырёх магнетронов и измерить выходную мощность, диапазон перестройки, время включения.



Магнетроны

- Магнетроны LG 2M290, непрерывный режим, паспортные данные: 3 кВт, 2450 МГц.
- **Измеренная выходная мощность** в номинальном режиме ≈ 3 кВт (от 2,9 до 3,1 кВт по 4 приборам).
- **Рабочие частоты на полной мощности:**
 - Магнетроны №1, 2, 4: **2454,5 – 2454,8** МГц.
 - Магнетрон №3: **2458,3** МГц (отличается на 4 МГц).





Синхронизация магнетрона внешним сигналом

- При подаче слабого внешнего СВЧ-сигнала на выход магнетрона происходит его **синхронизация**. Появляется возможность **управлять частотой** генерации и **фазой** выходного сигнала магнетрона в некотором диапазоне частот.

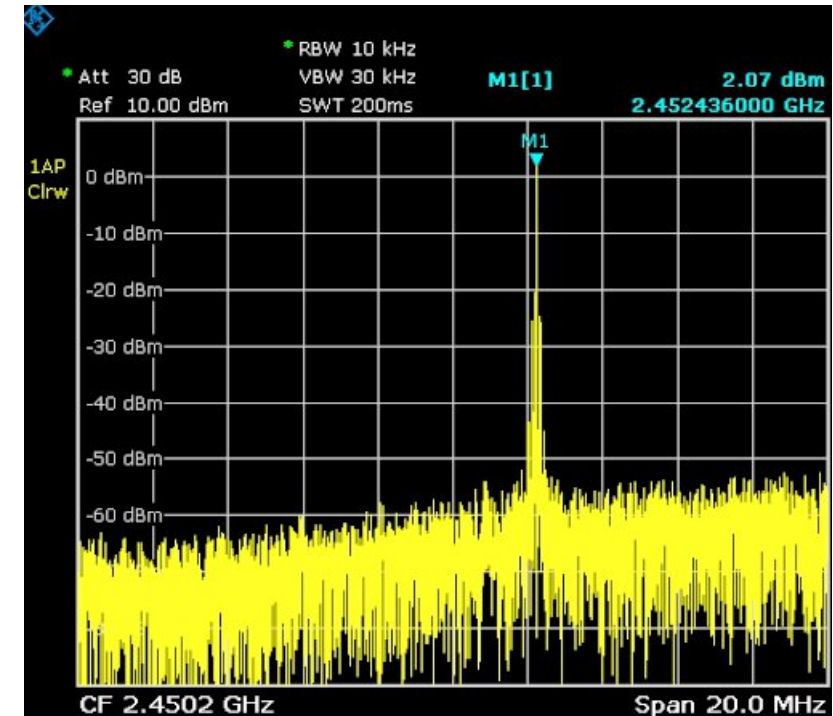
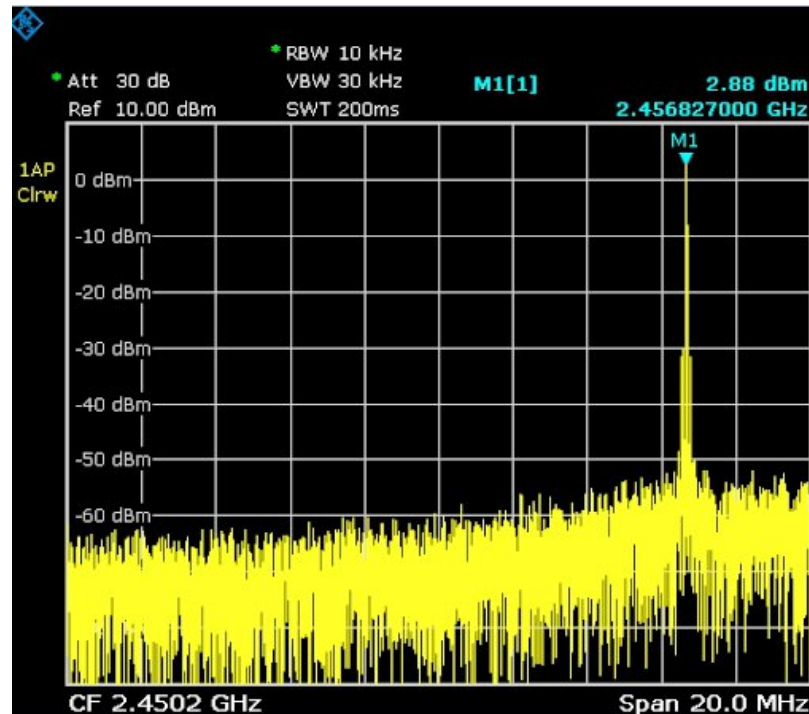
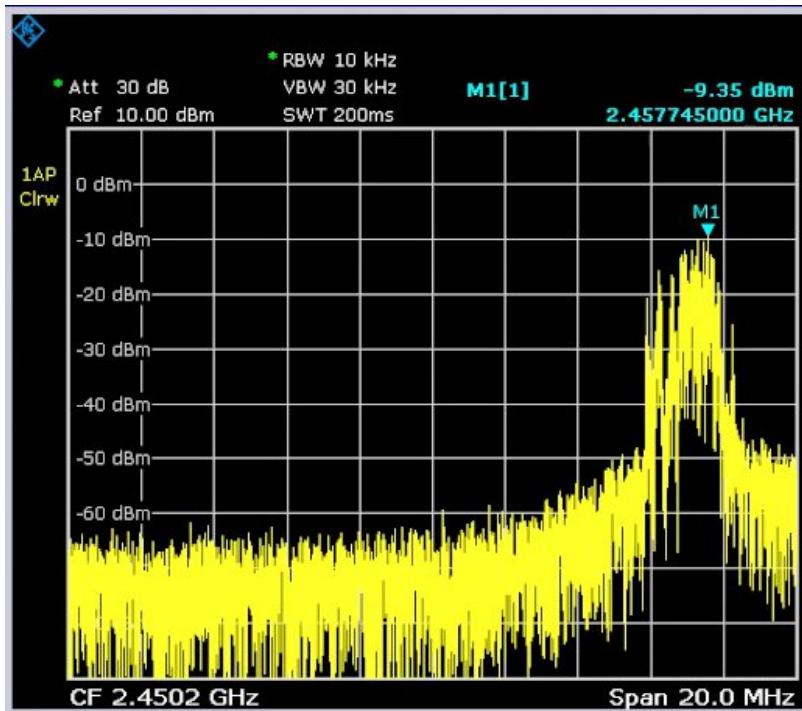
- **Критерий Адлера:**

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{2Q} \sqrt{\frac{P_{\text{синх}}}{P_{\text{маг}}}}$$

- **Эксперимент** на магнетроне №3 (с самой высокой частотой) с подачей синхронизирующего сигнала мощностью 200 Вт.
- При максимальной мощности магнетрона (3 кВт) полоса захвата составила около **10 МГц** — этого достаточно, чтобы преодолеть разницу собственных частот магнетронов в **4 МГц** и синхронизировать их на одной частоте.



Примеры спектра свободного и синхронизированного магнетрона



Сужение спектра 2 МГц → 20 кГц по уровню -20 дБ от пикового значения.



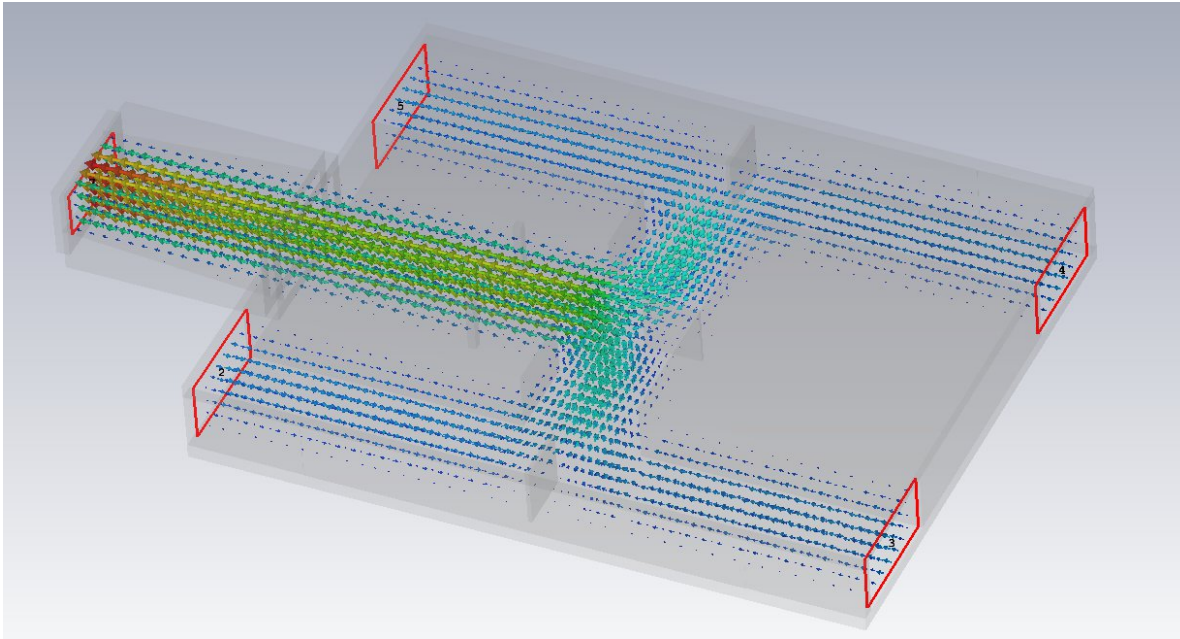
Разработка волноводного сумматора

- Тип: прямоугольный волновод WR340 (диапазон 2,2–3,3 ГГц), 5 портов (4 входа, 1 выход).
- Моделирование в CST Studio, оптимизация геометрии.
- Конструкция: фрезеровка алюминиевой заготовки.
- **Результаты измерений S-параметров (на векторном анализаторе):**

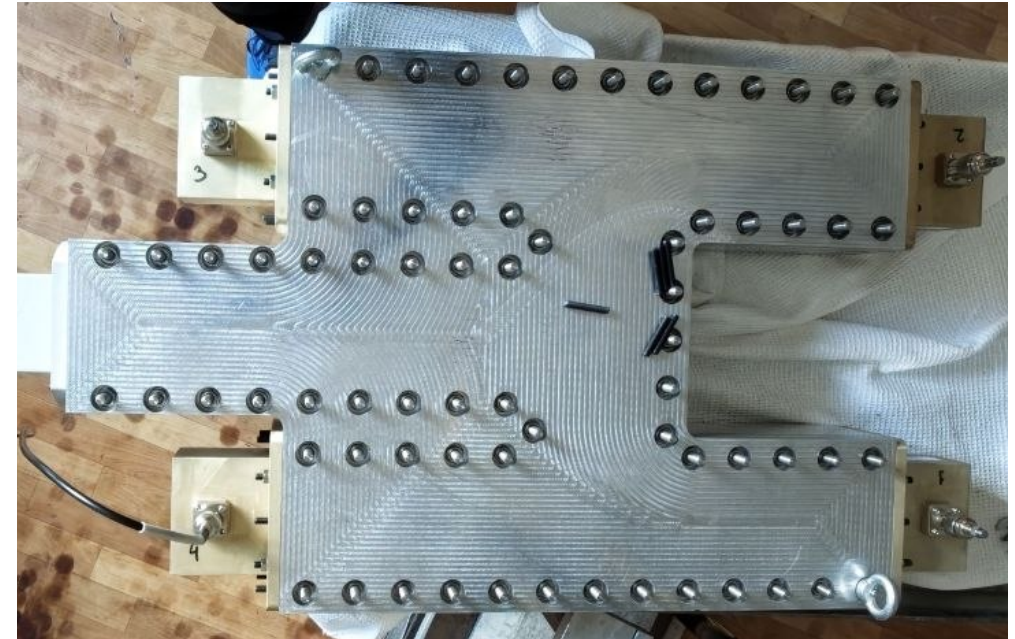
S-параметр	Измеренный набег фазы, °	Измеренное ослабление, дБ	Расчётное ослабление, дБ
$S_{4,1}$	133	6,6	6,04
$S_{3,1}$	133	6,04	6,04
$S_{2,1}$	132	6,04	6,00
$S_{5,1}$	132	6,3	6,00



Разработка волноводного сумматора



Модель в CST Studio



Фотография изготовленного сумматора



Схема суммирования

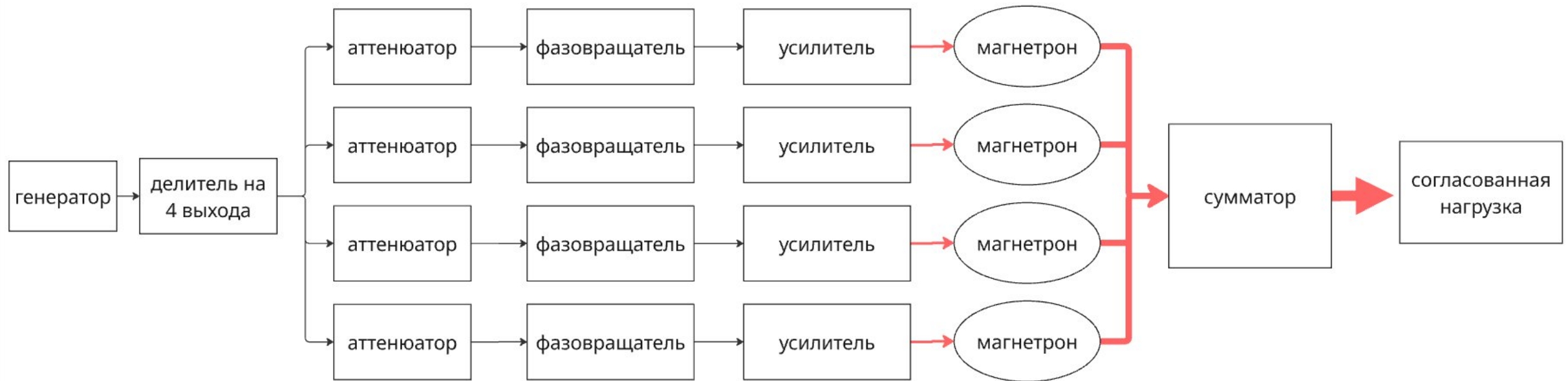
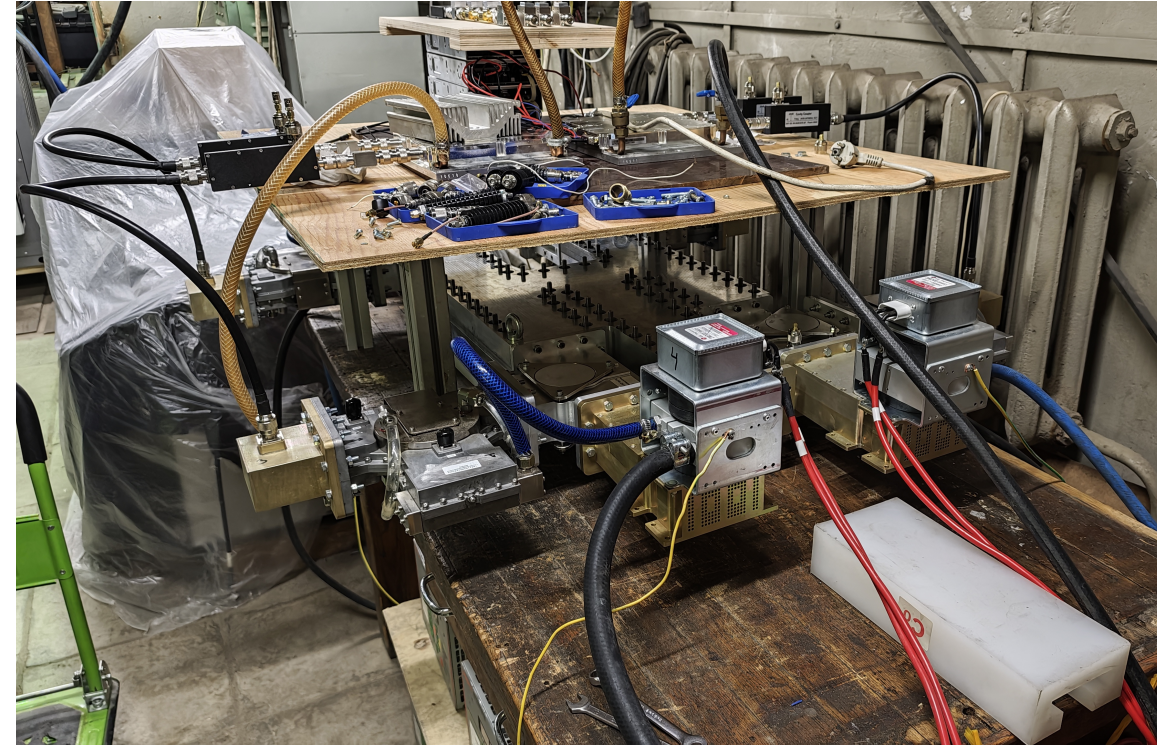
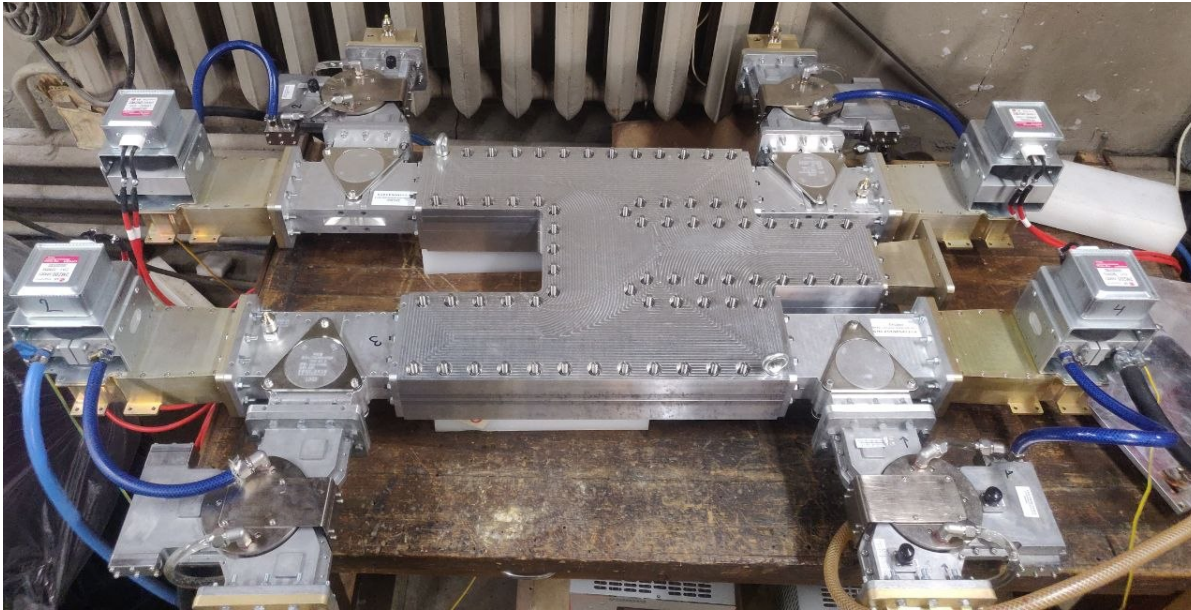




Схема суммирования



Внешний вид готовой
установки



Результаты

Максимальная достигнутая мощность:
9,9 кВт в номинальном режиме работы.

Сравнение:

- Сумма мощностей свободных магнетронов (измеренных по отдельности): **9,64**
(2,44+2,39+2,45+2,36) кВт.
- Суммирование (выходная мощность установки): **9,92 кВт.**

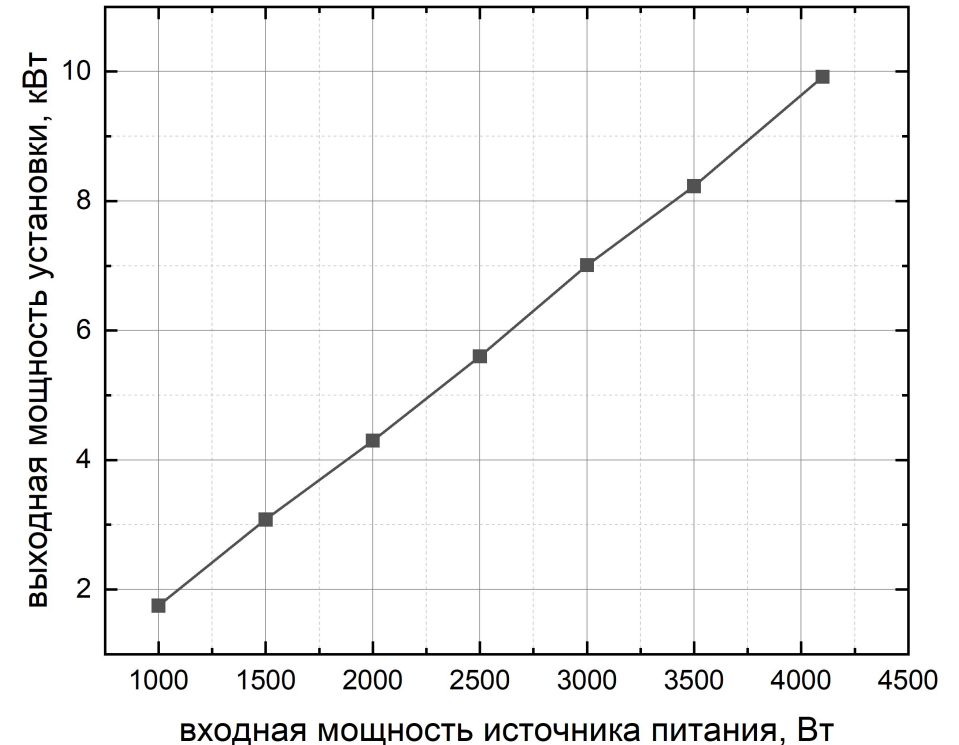


График уровня выходной мощности
по калориметрии в зависимости от уставки
входной мощности блоков питания магнетронов



Результаты

Диапазон перестройки частоты (при полной мощности): от 2453,5 до 2456,8 МГц (3,3 МГц).

- Покрывает температурное смещение резонансной частоты ускоряющей структуры за счет нагрева в процессе работы (~50 кГц/кВт).

Время включения:

- Запуск магнетронов (включение блоков питания): ≈ 3 с
- Включение синхронизирующего сигнала при уже работающих магнетронах: ≈ 10 мкс



Выводы

1. Создан и испытан стенд суммирования мощностей 4 магнетронов LG 2M290 (по 3 кВт каждый).
2. Синхронизация обеспечивает успешное синфазное сложение сигналов от четырех магнетронов.
3. Максимальная выходная мощность системы составила **9,9 кВт**.
4. Диапазон перестройки частоты 3,3 МГц, время запуска синхронизированного режима около 10 мкс.
5. Предложенная схема может служить экономичной альтернативой клистрону для питания ускоряющей структуры.



Благодарю за внимание!