

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.

подпись студента

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., с.н.с. Юров Д.С.

подпись научного руководителя

Допущена к защите _____

Зав. кафедрой _____
подпись зав. кафедрой

Москва
2026

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Теоретическая часть	5
1.1 Устройство магнетрона.	5
1.2 Принцип работы магнетрона.	7
1.2.1 Движение электрона в пространстве взаимодействия. . .	7
1.2.2 Формирование электронных спиц	10
1.2.3 Смещение частоты в зависимости от анодного тока . . .	14
1.3 Синхронизация магнетрона с внешним сигналом	15
1.4 Основы теории суммирования СВЧ-сигналов	16
1.5 Обзор схем суммирования	20
2 Экспериментальная часть	22
2.1 Измерение передаточных характеристик частей волноводного трак- та.	22
2.2 Обзор характеристик магнетронов и источников питания.	23
2.3 Измерение мощности и частот магнетронов.	25
2.3.1 Схема стенда, проведение измерений и полученные дан- ные.	25
2.3.2 Результаты измерений и их обсуждение	29
2.4 Эксперимент по синхронизации магнетрона	34
2.4.1 Схема стенда, методика измерений	34
2.4.2 Результаты эксперимента	40
2.5 Проектирование сумматора	45
2.6 Эксперимент по суммированию мощностей	49
2.6.1 Описание схемы суммирования	49
2.6.2 Результаты	54
ВЫВОДЫ	60
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	64
А Приложение А. Таблицы ослаблений элементов СВЧ-тракта	64

В	Приложение Б. Измеренные рабочие характеристики магнетронов №2-4	67
С	Приложение В. Диапазоны расстройки частоты для магнетрона №3	69

ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель электронов прочно вошел в научную и производственную сферу как один из фундаментальных приборов для научных исследований и решения прикладных задач. Современные ускорители применяются в медицине, промышленности, сельском хозяйстве, материаловедении, досмотровых комплексах. Для обеспечения высокого качества научных исследований и точного выполнения индустриальных задач ко всем узлам ускорителя предъявляются высокие требования, в том числе и к СВЧ-источнику питания ускоряющей структуры.

Одним из универсальных генераторов мощного СВЧ-сигнала является клистрон. Клистрон отличается высоким КПД, чистотой выходного сигнала, стабильностью работы, гибкостью настройки рабочих режимов. Существенный недостаток клистронов - их стоимость из-за сложностей в изготовлении. Другой генератор СВЧ-сигналов - магнетрон - обладает лучшим КПД по сравнению с клистроном, имеет меньшие габариты и дешевле в производстве. Однако у магнетрона есть ряд фундаментальных проблем, которые ограничивают его использование в ускорительной технике. Среди таких ограничений можно выделить два основных фактора: ограничения физического характера (такие как высоковольтные пробои; ограниченные размеры катода, определяющие максимальный ток эмиссии; уровень магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами) не позволяют получать с одного магнетрона количество СВЧ-мощности, которое необходимо для питания ускоряющей структуры в непрерывном режиме; спектр выходного сигнала магнетрона оказывается очень широким и не позволяет эффективно запитывать ускоряющую структуру, которая представляет из себя высокочастотный резонатор.

В данной работе предлагается и исследуется схема экспериментального стенда, который поможет преодолеть упомянутые выше ограничения. В установке используются четыре промышленных магнетрона с оптимальным соотношением стоимости к выходной мощности. С помощью спроектированного волноводного сумматора происходит сложение сигналов от магнетронов, что позволяет запитывать ускоряющую структуру необходимым уровнем СВЧ-мощности, не прибегая к использованию дорогостоящего мощного клистрона. Также в установке реализован широко известный метод внешней синхронизации магнетро-

на, когда частота управляющего сигнала, равная резонансной частоте ускоряющей структуры, навязывается магнетрону, за счет чего происходит сужение спектра к навязываемой частоте. В работе представлен обзор литературы вместе с небольшим теоретическим экскурсом и описана экспериментальная часть; результатом работы является испытательный стенд, на котором показана возможность реализации предложенной схемы и на котором в текущий момент происходит отработка всех тонкостей для возможного внедрения экономически выгодного источника питания в производство.

1 Теоретическая часть

1.1 Устройство магнетрона.

Рассмотрим принципиальное устройство магнетрона, не вдаваясь в глубокие технические подробности.

Магнетрон - электровакуумное СВЧ-устройство, которое представляет собой коаксиально совмещенные анодный и катодный блок. Катод в виде цилиндра располагается в центре, анод имеет форму цилиндра с вырезанными в нем полостями, идущими вдоль оси симметрии и имеющими доступ в пространство между электродами за счёт щелей связи. Полости используются в качестве резонаторов. Для наглядности см. рисунок 1 [1].

Система электродов помещена в постоянное магнитное поле, линии магнитной индукции проходят параллельно оси симметрии. Соответственно, полюса магнитов расположены с торцов электродов.

С помощью термоэлектронной эмиссии электроны с катода попадают в пространство взаимодействия, где начинают свое движение к аноду по сложным траекториям, на которые оказывают влияние постоянное электрическое поле катод-анод, постоянное поперечное магнитное поле, переменные электрические поля щелей резонаторов, переменные электрические поля остальных электронов в пространстве взаимодействия.

Основная задача магнетрона - превращение потенциальной энергии электронов, эмитированных с катода, в энергию СВЧ-поля путем преобразования этой потенциальной энергии в кинетическую энергию промодулированного в пространстве потока электронов, который взаимодействует с электрическими полями резонаторов на заданной частоте и отдает им свою кинетическую энер-

гию. СВЧ-энергия выводится из магнетрона с помощью петли связи, встроенной в один из резонаторов, и затем передается потребителю по волноводному СВЧ-тракту.

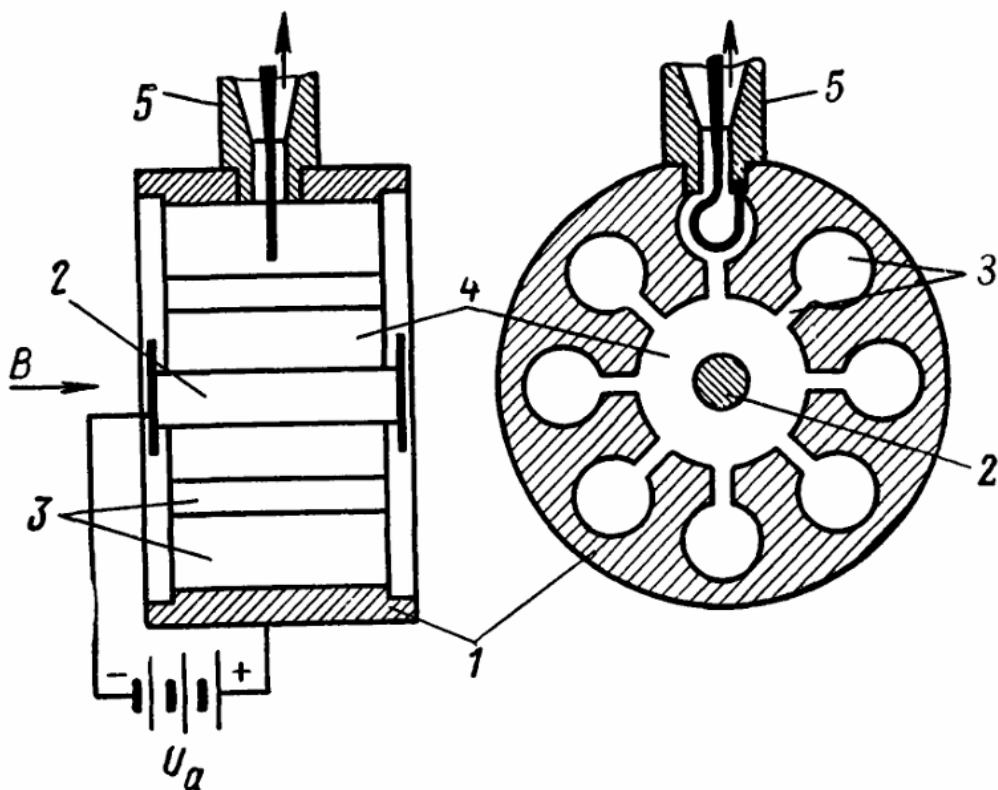


Рис. 1 – Устройство магнетрона. 1 - анодный блок, 2 - катод, 3 - полость резонатора с щелью связи, 4 - пространство взаимодействия, 5 - петля вывода СВЧ.

Относительное расположение линий магнитной индукции и электрической напряженности позволяет отнести магнетрон к приборам М-типа, которые определяются как приборы, где в пространстве взаимодействия присутствуют скрещенные постоянные магнитные и электрические поля. В этом главное отличие магнетрона от клистрона, который является прибором О-типа. О-тип приборов построен на принципе модуляции плотности непрерывного потока электронов за счет быстро меняющегося продольного электрического поля, а затем взаимодействия сгустков электронов с резонатором для преобразования их кинетической энергии в энергию СВЧ-поля. В приборах О-типа магнитное поле не играет роли в группировании электронного потока, но иногда используется для его фокусировки. В приборах М-типа поперечное магнитное поле используется для задания циклоидальных траекторий электронов. Рассмотрим этот механизм подробнее.

1.2 Принцип работы магнетрона.

1.2.1 Движение электрона в пространстве взаимодействия.

Для начала рассмотрим упрощенную модель, которая позволит понять роль скрещенных постоянных магнитных и электрических полей. В качестве модели рассмотрим плоский анод и катод (см. рисунок 2). Такая форма электродов используется для упрощения выкладок, однако результаты такого исследования могут быть применимы и к реальным магнетронам, в которых радиус катода лишь немногим меньше внутреннего радиуса анода.

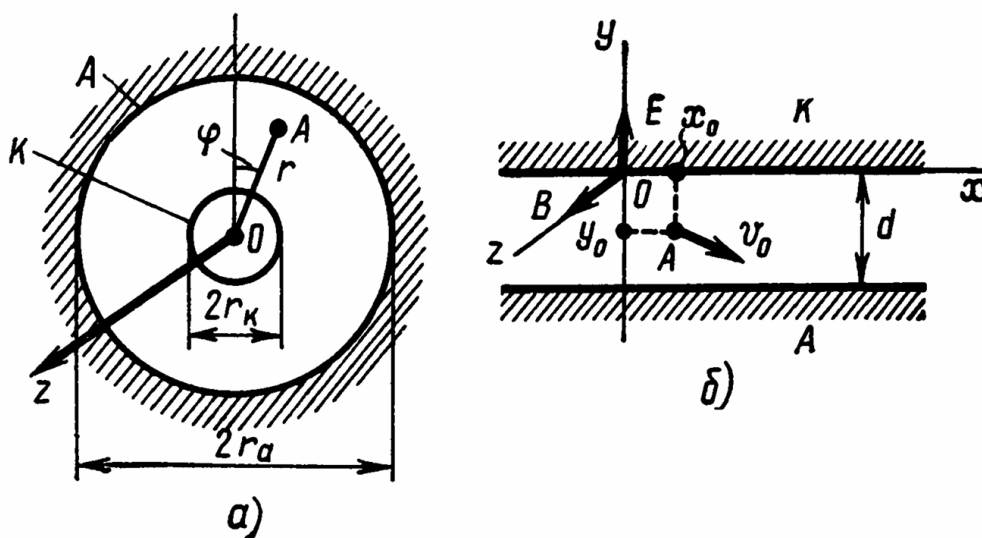


Рис. 2 – Упрощенная модель магнетрона. Цилиндрическая форма электродов (а) и плоская (б). Электрон находится в точке А.

Уравнение движения нерелятивистского электрона можно записать в виде

$$m \frac{dv}{dt} = -e \{ E + [vB] \} \quad (1)$$

Введем систему координат как показано на рисунке 2 (б). Постоянное магнитное поле сонаправлено с осью z , электрическое поле направлено по оси y . Против оси y движется электрон от катода к аноду. В такой конфигурации урав-

нение движения (1) принимает следующий вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eB}{m} \frac{dy}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{eE}{m} + \frac{eB}{m} \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = 0 \quad (4)$$

Решая данную систему уравнений с учетом начальных условий (считаем, что начальные скорости электронов у катода в плоскости $y = 0$ пренебрежимо малы), получаем:

$$x = x_0 + \frac{E}{B}t - \frac{mE}{eB^2} \sin(w_ct) \quad (5)$$

$$y = -\frac{mE}{eB^2}(1 - \cos(w_ct)) \quad (6)$$

$$z = z_0 \quad (7)$$

Здесь $w_c = \frac{eB}{m}$ - циклотронная частота.

Полученные уравнения (5-7) представляют собой уравнение циклоиды, лежащей в плоскости xy (см. рис. 3). Таким образом электрон движется по траектории, которую описывает точка, зафиксированная на окружности радиуса $R = \frac{mE}{eB^2}$. Центр окружности перемещается вдоль оси x со скоростью $v = \frac{E}{B}$, циклотронная частота w_c характеризует угловую скорость движения электрона относительно центра окружности.

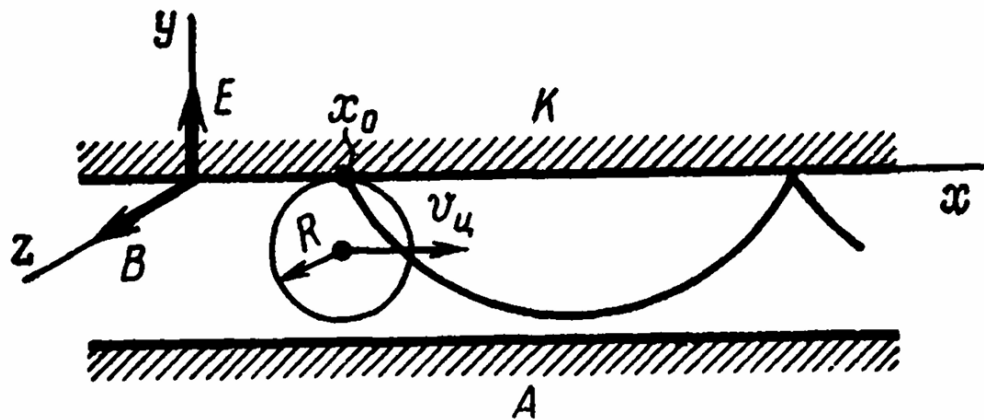


Рис. 3 – Циклоидальная траектория электрона в пространстве взаимодействия.

Из рисунка видно, что в зависимости от отношения $\frac{E}{B^2}$, которое входит для

выражения в радиус окружности R , траектории электронов могут достигать анода. Такая ситуация возникает при малом магнитном поле, которое не способно завернуть траекторию электрона, либо при сильном электрическом поле, которое разгоняет электрон до того, как магнитное поле успеет повернуть электрон от анода.

Если в некоторой конфигурации $\frac{E}{B^2}$ электроны, эмитируемые с катода, достигают анода, то мы фиксируем анодный ток. Величина магнитного поля, с которой начинается протекание анодного тока, называется критической индукцией B_{crit} . Если положить расстояние между электродами равным величине d , то напряженность электрического поля можно записать как $U = Ed$. Учитывая, что при критической величине магнитной индукции радиус окружности будет составлять $R = \frac{d}{2}$ (т.е. электрон будет двигаться по окружности и в максимальном удалении от катода касаться анода), то можно получить зависимость $B_{crit}(U)$:

$$B_{crit} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{2m}{e}} U \quad (8)$$

Такую зависимость называют параболой критического режима. Эта линия разделяет плоскость UB на две области. Выше (или левее) параболы находятся все точки, при которых электроны достигают анода. Ниже (или правее) - точки, в которых соотношение магнитного и электрического полей не позволяет электронам достигать анода.

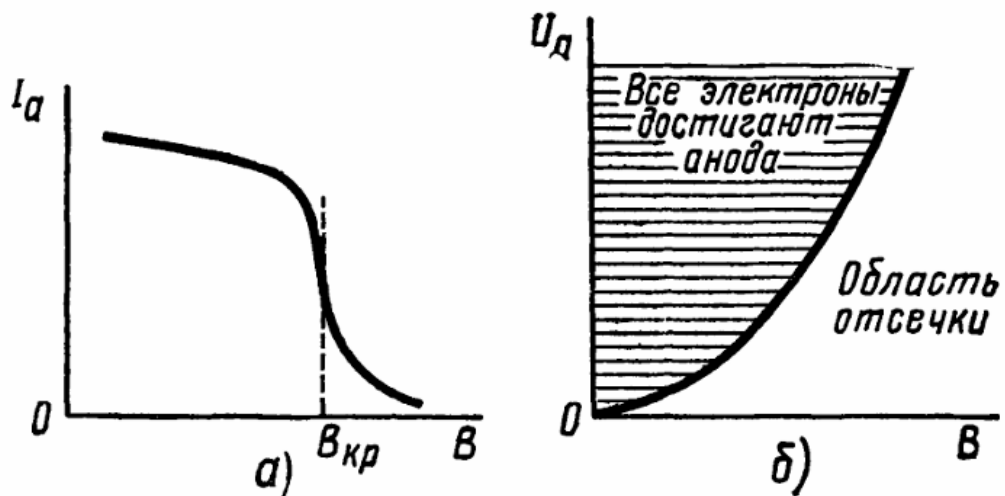


Рис. 4 – Зависимость анодного тока от величины магнитного поля (а), параболы критического режима (б).

Зависимость анодного тока от магнитной индукции на рисунке 4 отражает тот факт, что в практическом случае спад анодного тока в районе B_{crit} будет плавным, а выше B_{crit} будет наблюдаться слабый ток. Такие особенности обеспечены начальным разбросом скоростей электронов после термоэмиссии, рассеянием электронов в пространстве взаимодействия с атомами остаточных газов, а также за счет флуктуаций электронного потока.

1.2.2 Формирование электронных спиц

Теперь выясним, что происходит с потоком электронов, когда к рассмотрению добавляется внешнее электрическое поле резонаторов, которое проникает в пространство взаимодействия. Пока что мы знаем, что электроны движутся по циклоиде, описываемой уравнениями 5 - 7.

Так как резонаторы в анодном блоке формируют замкнутый на себя контур, то в нем могут существовать колебания, которые укладываются своей длиной волны целое число раз по периметру анода. Рассмотрение этого факта приводит к тому, что в системе из N одинаковых резонаторов оказывается возможным существование N различных типов колебаний э/м поля, которые отличаются друг от друга набегом фазы между резонаторами. Некоторые типы колебаний оказываются вырожденными, что означает, что резонансные частоты для них будут совпадать. Отдельно отметим невырожденные колебания π -вида, в которых фаза э/м поля отличается на 180 градусов между соседними резонаторами. Распределение электрического поля этого вида колебаний показано на рисунке 5.

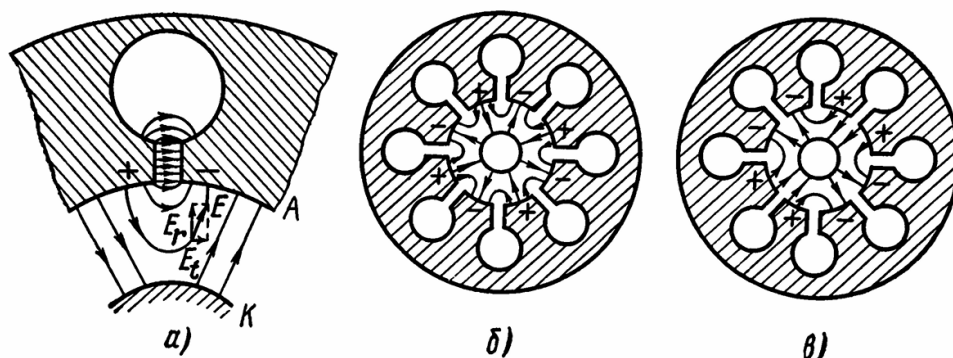


Рис. 5 – Линии напряженности электрического поля в зазоре резонатора (а), распределение электрического поля при колебаниях π -вида (б) и $\frac{\pi}{2}$ -вида (в).

Колебания π -вида оказываются удобными в практическом применении, они

наиболее устойчивы и просты для генерации, на них впоследствии и будем ориентироваться.

Теперь рассмотрим плоскую систему электродов, в которой мы оставим выпирающее в пространство взаимодействие электрическое поле резонаторов. Здесь нас будет интересовать, как это поле будет влиять на траектории электронов. Схема, о которой идет речь, изображена на рисунке 6.

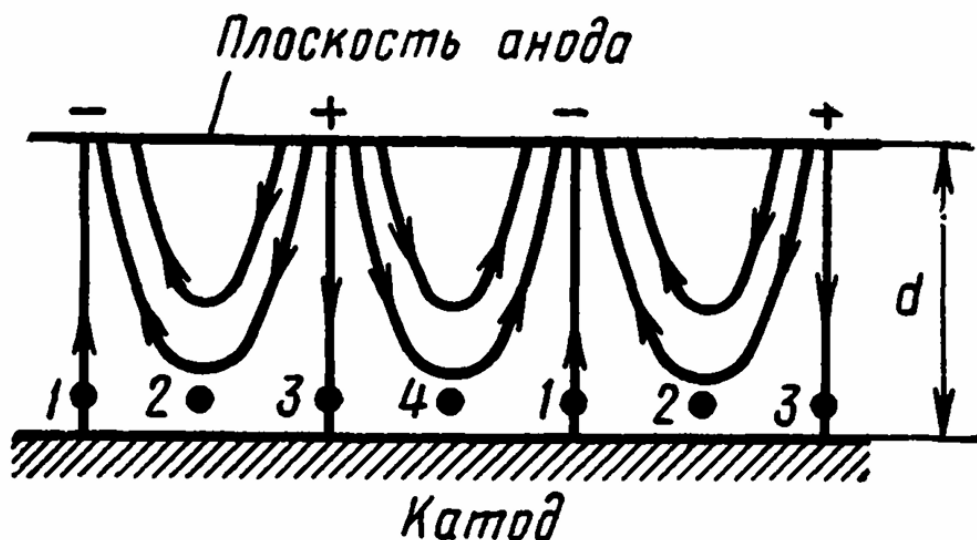


Рис. 6 – Линии напряженности электрического поля резонаторов в плоской модели электродов. Цифрами обозначены положения электронов относительно поля.

Колебания, представленные на рисунке 5(б) можно представить как стоячую волну, которая является результатом сложения двух бегущих волн, движущихся по периметру анода навстречу друг другу. Рассмотрим одну из таких бегущих волн, которая будет вращаться в одну сторону с движением электронов в пространстве взаимодействия. Перейдем в систему отсчета, в которой скорость этой волны равна нулю, т.е. волна покоится. Такая ситуация изображена на рисунке 6 и мы видим, что теперь можно рассматривать движение электронов в статическом э/м поле резонаторов.

Теперь добавим постоянное напряжение анод-катод, как указано на рисунке 7 и заметим, что в направлении оси x электроны движутся со скоростью $\frac{E}{B}$ согласно формуле 5 (без учета движения по окружности).

Как видно из рисунка, электрон под номером 1 попадает в замедляющий участок, ведь итоговое действующее на него электрическое поле оказывается меньше, чем поле катод-анод. Так как скорость в направлении оси x опреде-

ляется отношением $\frac{E}{B}$, то уменьшение действующего на электрон суммарного электрического поля означает меньшую скорость частицы. Поэтому электрон №1 будет постепенно отставать и смещаться в сторону электрона №4. Аналогично электрон №3 под действием суммарной напряженности будет ускоряться в сторону электрона №4, так как действующее на него электрическое поле оказывается выше.

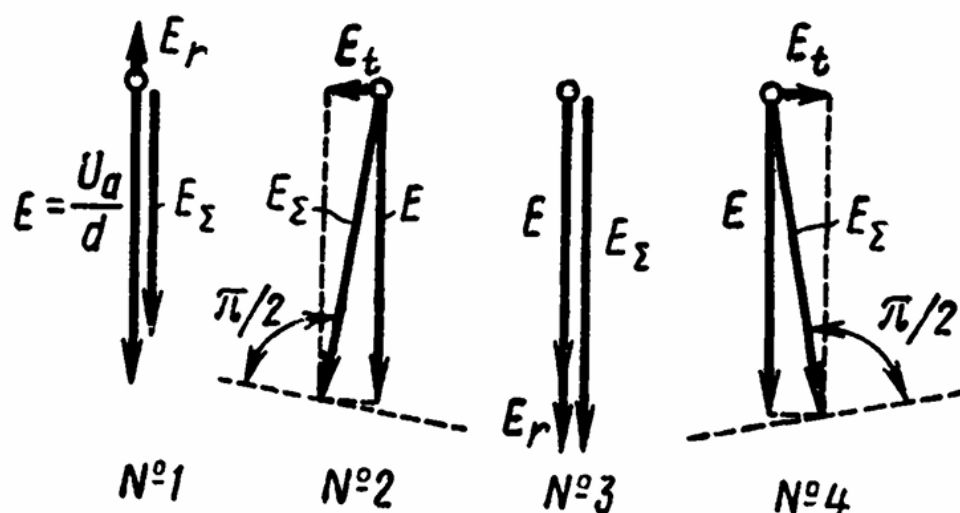


Рис. 7 – Суммарное электрическое поле, действующее на электрон в пространстве взаимодействия. E - поле катод-анод, E_r и E_t - радиальные и тангенциальные составляющие поля резонаторов, E_Σ - суммарное действующее на электрон поле.

Электрон под номером 2 окажется под действием результирующего электрического поля, которое имеет наклон относительно линий постоянного поля катод-анод. Этот наклон будет направлять электрон в сторону катода (эквивалентно тому, что мы поворачиваем ось x в катод). Таким же образом электрон №4 окажется на траектории, которая будет направлена в сторону анода. Это хорошо иллюстрирует рисунок 8.

Таким образом, если посмотреть на рисунок 9, то становится понятным механизм группирования электронов в так называемые электронные спицы. Происходит модуляция непрерывного потока электронов, которые вылетают с катода, за счет действия переменного электрического поля резонаторов. Электроны №1 и №3 пытаются оказаться вместе с электроном №4, тогда как электрон №2 движется по траектории в сторону катода. Если вспомнить, что картинка нарисована для случая, когда скорость наблюдателя синхронизирована с бегу-

щей волной в резонаторах, то можно представить, что после перехода в систему отсчета магнетрона такие электронные спицы будут вращаться вокруг катода синхронно с бегущей волной, отдавая резонаторам свою кинетическую энергию путем возбуждения в них наведенных токов.

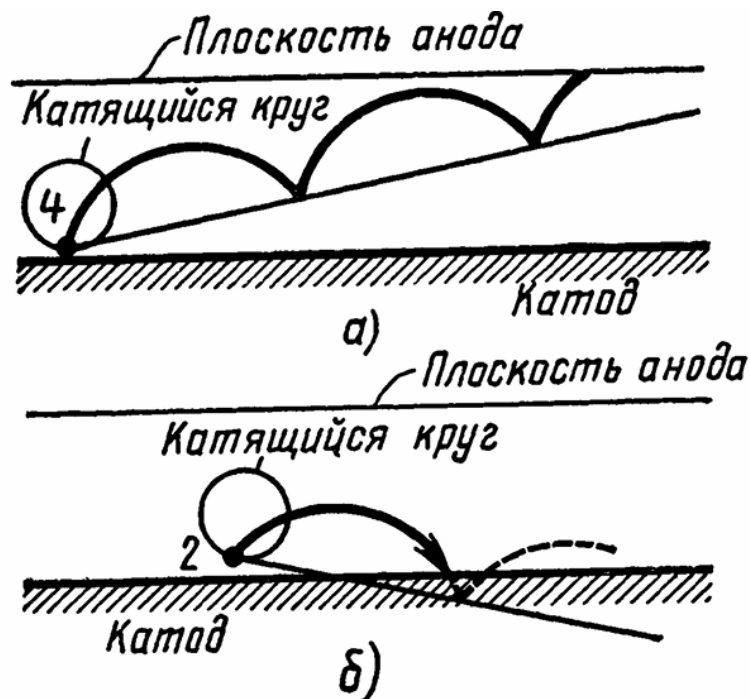


Рис. 8 – Траектории электронов №2 и №4 в суммарном поле катод-анод и переменном поле резонаторов.

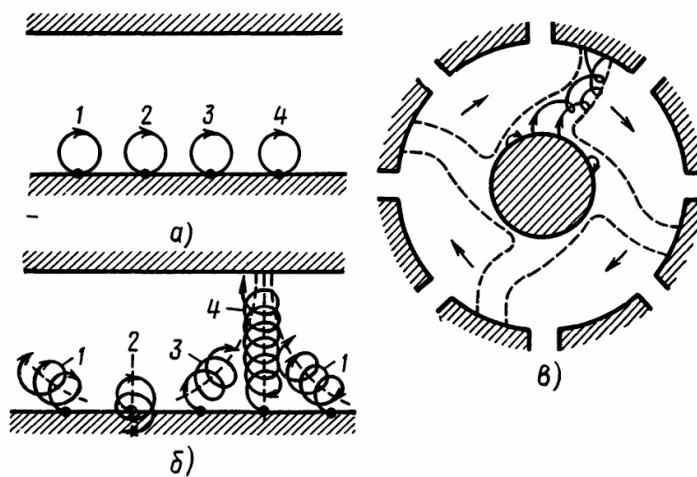


Рис. 9 – Формирование электронных спиц в пространстве взаимодействия.

1.2.3 Смещение частоты в зависимости от анодного тока

В магнетронах наблюдается зависимость частоты генерации от анодного тока. Это означает, что с ростом анодного тока частота генерируемых колебаний увеличивается. На практике используют величину, показывающую рост частоты при увеличении анодного тока на один ампер.

Кратко объяснить это явление можно следующим образом. Можно показать, что в зависимости от приложенного анодного напряжения изменяется толщина спиц и их положение относительно фазы бегущей волны. Зависимости следующие. С ростом анодного напряжения растет ширина спицы, а значит можно считать, что растет и анодный ток. Также с ростом анодного напряжения спица смещается относительно фазы бегущей волны так, что она оказывается ближе к прорези резонатора в тот момент времени, когда поле резонатора максимально замедляет пролетающие электроны.

Рассмотрим на примере картинке 10. На ней угол альфа отвечает за разницу фаз между положением спицы (условно её край, касающийся анода) и фазой бегущей волны. Значения угла альфа составляют от 0 до $\frac{\pi}{2}$. С ростом анодного напряжения угол альфа растет от нуля до $\frac{\pi}{2}$. Положение $\frac{\pi}{2}$ говорит о том, что спица проходит напротив зазора резонатора, когда тангенциальная составляющая поля резонатора максимальна по модулю и направлена так, чтобы замедлить спицу.

На картинке условно обозначена емкость между спицей и стенкой резонатора. Эта емкость входит в полную электронную проводимость магнетрона. С ростом анодного напряжения и уходом спицы от ламели резонатора эта емкость уменьшается. Частота генерации получается путем рассмотрения эквивалентной схемы магнетрона, показанной на том же рисунке 10. На схеме указаны емкость и индуктивность резонаторов C_1 и L_1 , а также емкость, образуемая спицей и стенкой резонатора C_2 .

Тогда согласно [2] частота генерации магнетрона определяется формулой

$$\omega = \left[\frac{L_1 C_2}{1 - \cos \varphi} + L_1 C_1 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

В формуле φ - смещение фазы поля при переходе в соседний резонатор. В формуле C_1 , L_1 задаются геометрией резонатора, φ определяется типом колебаний и количеством резонаторов. Как видно из 9 с уменьшением емкости C_2 частота генерации увеличивается.

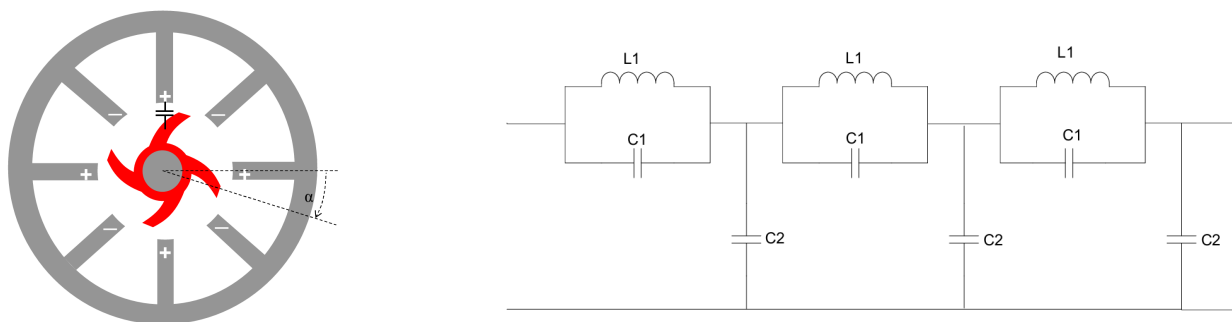


Рис. 10 – К явлению ухода частоты с ростом анодного тока. Слева - положение спиц относительно поля бегущей волны. Справа - эквивалентная схема магнетрона.

1.3 Синхронизация магнетрона с внешним сигналом

Для начала кратко опишем суть явления. Выходной сигнал свободного магнетрона представляет из себя комбинацию монохроматических сигналов в относительно широком непрерывном диапазоне частот, фаза которых оказывается произвольной. Однако при подаче на выход магнетрона внешнего сигнала небольшой мощности с частотой, близкой к собственной частоте генерации магнетрона, возможна его синхронизация, которая выражается тем, что выходной спектр заметно сужается к частоте внешнего сигнала, при этом фаза генерируемого сигнала становится постоянной относительно фазы навязываемого сигнала. Таким образом появляется возможность контролировать частоту генерации магнетрона в некоторых пределах, а также задавать необходимую фазу выходного сигнала.

Подробно это явление было описано в классической работе Р. Адлера [3]. В своей работе Адлер рассматривал схему лампового автогенератора с сосредоточенным колебательным контуром, но универсальность результатов статьи позволяет применять полученные соотношения для широкого класса приборов, выведенные в статье формулы будут верны в том числе и для магнетронов.

Для анализа Адлер использовал следующие допущения. Во-первых, мощность синхронизирующего сигнала должна быть мала по сравнению с собственным сигналом автогенератора. Во-вторых, навязываемая внешняя частота должна быть близка к собственной частоте автогенератора и находится внутри его полосы пропускания. В-третьих, все процессы, которые участвуют в механизме генерации, должны релаксировать к некоторому стабильному протеканию за время, меньшее чем длительность процессов, вызванных перестройками ча-

стоты.

Хорошо известно, что магнетрон удовлетворяет приведенным выше условиям, поэтому после синхронизации может служить источником когерентного сигнала. Это позволяет использовать магнетрон в качестве источника питания ускоряющей структуры [4], [5]; суммировать мощность нескольких магнетронов для увеличения выходной мощности.

Основным соотношением, полезным для дальнейшей работы будет критерий захвата, выполнение которого приводит к синхронизации. Численно оно выражается следующим образом:

$$\Delta\omega_0 = \frac{\omega_0}{2Q} \sqrt{\frac{P_{inj}}{P_0}} \quad (10)$$

Здесь $\Delta\omega_0$ - полоса захвата - максимальное отклонение навязываемой частоты от собственной частоты колебаний генератора, ω_0 - собственная частота магнетрона, Q - нагруженная добротность контура, P_{inj} - мощность синхронизирующего сигнала, P_0 - мощность магнетрона.

Помимо соотношения 10 стоит отметить следующее соотношение, которое связывает сдвиг фазы между сигналом генератора и навязываемой частотой α с критерием захвата:

$$\sin(\alpha) = 2Q \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} \sqrt{\frac{P_0}{P_{inj}}} \quad (11)$$

Формулы 10 и 11 имеют большую практическую ценность. Первая показывает, насколько может быть большим частотный диапазон для синхронизации. Вторая связывает разность фаз между выходным сигналом генератора и навязываемым сигналом - такая разница фаз важна для синфазного сложения сигналов. Помимо этого очевидна зависимость от уровня входной мощности - чем больше амплитуда синхронизирующих колебаний, тем больше частотный диапазон для подстройки частоты, а также меньше разность фаз α .

1.4 Основы теории суммирования СВЧ-сигналов

Начнем непосредственно с задачи, которая лежит в основе работы. Магнетроны, работающие в режиме синхронизации, можно воспринимать как усилители СВЧ-сигнала (благодаря возможности навязывания внешней частоты),

поэтому задача сводится к следующей. Необходимо создать такую схему, которая будет подавать на магнетроны сигнал, подлежащий усилению, а затем складывать выходные сигналы магнетронов так, чтобы выходная мощность была максимальной.

Для качественного анализа можно представить, что все волновые процессы в СВЧ-тракте, которые будут происходить в готовом устройстве, представляют из себя бегущую синусоиду, которая генерируется, усиливается или ослабевает (по амплитуде), получает приращение фазы, делится или складывается на соответствующих элементах.

Критически важным параметром сложения сигналов является их относительная фаза в точке сложения [6]. Это можно пояснить на следующем примере. Пусть у нас есть два сигнала единичной амплитуды, которые сдвинуты друг относительно друга на некоторый угол φ , но при этом имеют одинаковые частоты ω :

$$\sin(\omega t) + \sin(\omega t + \varphi) = 2 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (12)$$

Как видно из выражения 12, после сложения мы получили сигнал на исходной частоте с усредненным сдвигом фазы. Но амплитуда этого сигнала явно зависит от исходного сдвига фаз между сигналами. Так, если разность фаз $\varphi = 0$, то итоговый сигнал имеет удвоенную амплитуду. В противоположном случае $\varphi = \pi$ и мы получаем выходной сигнал с нулевой амплитудой. Таким образом необходимо обеспечить условие синфазности сигналов, суть которого в том, что разность фаз сигналов, приходящих от магнетронов, должна быть кратна 2π или равна нулю. К примеру, в статье [7] приводится схема синхронизации пяти магнетронов с помощью внешней кольцевой связи. В работе указано, что достигнуто дрожание фазы между магнетронами в пределах 4° , что авторы считают отличным результатом.

Основными схемами сложения мощностей являются древовидные схемы суммирования/деления и пространственные схемы сложения. Суть каждой схемы поясняет картинка 11.

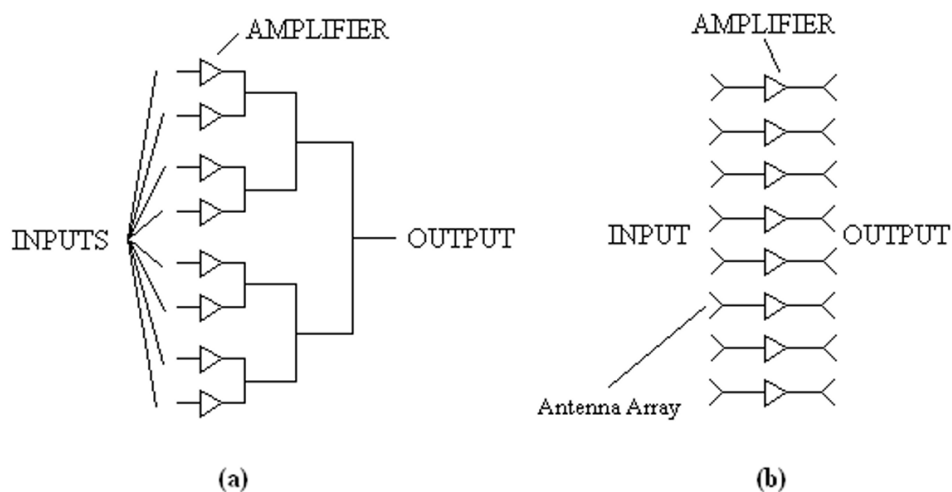


Рис. 11 – Основные схемы суммирования. Корпоративное (древовидное) суммирование (a) и пространственное сложение сигналов (b)

Для питания ускоряющей структуры, требующей передачи всей СВЧ-мощности через окно ввода мощности, схема пространственного сложения синхронизированных магнетронов (например, как в работе [8]) не подходит, поэтому будет рассматриваться древовидная структура сложения мощностей. Обычно такие схемы суммирования подразумевают парное сложение мощностей, которое образует многоуровневую систему слияния мощностей. Однако вполне реализуемы многопортовые схемы суммирования, когда одно устройство имеет большое количество входов и один выход (к примеру, [9]).

Отметим, что по основным физическим формам исполнения сумматоры могут представлять собой микрополосковые линии, коаксиальные линии передачи и волноводное исполнение. Примером микрополоскового делителя может служить вариант на основе схемы Вилкинсона. Многие виды сумматоров симметричны и могут работать в обратном направлении - в качестве делителей. Такое свойство схемы называется взаимностью. Также различают делители по количеству портов и по разнице фаз, которые получают сигналы на выходных портах относительно входных.

В учебнике [10] рассматриваются общие вопросы сложения сигналов автогенераторов с использованием мостовых схем. Показано, что основными параметрами, влияющими на работу сумматора, являются элементы его S-матрицы. Также отмечается, что возможна схема суммирования с использованием ферритового циркулятора для каждого автогенератора, а также в случае использования синфазного сумматора возможна подача мощности для синхронизации

генераторов на выходной порт сумматора.

Так как уровень СВЧ-мощности предполагаемой системы оказывается за пределами допустимых мощностей для передачи по коаксиальным и микрополосковым линиям, то безальтернативным вариантом остается сумматор на основе волноводного канала. Краткий обзор готовых схем суммирования магнетронов представлен в следующем разделе.

Как пример волноводного сумматора/делителя выделим двойной Т-мост (так называемый Magic Tee). Внешний вид сумматора представлен на рисунке 12. Его использование в суммировании сигналов синхронизированных магнетронов представлено, к примеру, в [11]. Особенностью данной схемы является наличие Е- и Н-портов, которые отмечены на рисунке. Сигнал, входящий в Е-порт, делится на два равных сигнала в противофазе, которые поступают в порты 1 и 2. Соответственно сигналы из портов 1 и 2, идущие синфазно на порт Е, будут эффективно вычитаться друг из друга и выходной сигнал Е-порта будет равен нулю. С другой стороны, при подаче сигнала на Н-порт в портах 1 и 2 выходят равные синфазные сигналы. Если пропускать мощность в обратную сторону, то синфазные сигналы с портов 1 и 2 будут складываться и мощность будет проходить в Н-порт. Свою "магичность" двойной Т-порт получил за большую развязку портов Е и Н, что позволяет использовать все четыре порта одновременно, к примеру как это реализовано в [12] - с Е-порта идет синхронизирующий сигнал на магнетроны, тогда как на Н-порт поступает мощность от самих магнетронов.

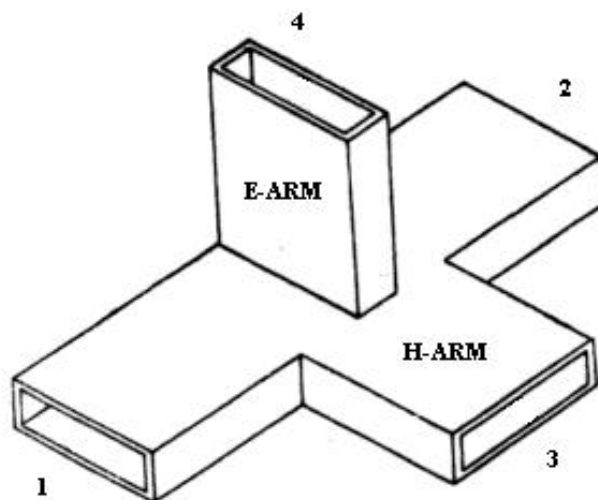


Рис. 12 – Внешний вид двойного Т-моста

1.5 Обзор схем суммирования

Ниже предлагается обзор готовых схем суммирования мощностей магнетронов. Выделены основные технические достижения, которые были достигнуты авторами, а также кратко описаны использованные схемы суммирования.

Статья [13] предлагает систему фазовой автоподстройки частоты для очень точного контроля фазы выходного сигнала ($0,95^\circ$ среднеквартичное значение). С её помощью авторы запитали сверхпроводящий резонатор от магнетрона мощностью 1.2 кВт. Авторы предлагают использовать двойной Т-мост для суммирования сигналов с двух магнетронов, управляемых системой ФАПЧ. Время реакции магнетрона около 200 нс позволяет использовать систему ФАПЧ для компенсации микрофонного эффекта.

В следующей статье [14] используются два магнетрона, которые объединяются посредством одного Т-моста. Каждый магнетрон синхронизирован через циркулятор и вентиль. Фаза навязываемого сигнала контролируется путем подбора его рабочей частоты, при этом в установке используется большая разность длин коаксиальных кабелей, которые идут в маломощном тракте до магнетронов. Авторы указывают на эффективность метода - КПД суммирования составило 94,6%.

Еще один метод, позволяющий подстройкой частоты получить высокий КПД суммирования, описан в [15]. В данной работе синхронизируется внешним сиг-

налом с обратной связью, позволяющей точно контролировать фазу, только один магнетрон. Второй магнетрон синхронизируется мощностью от первого, так как для суммирования используется асимметричный Т-мост (центральная перегородка смещена), который позволяет части мощности проходить из первого магнетрона во второй. Такая схема уменьшает количество циркуляторов и вентилях, а значит снижает потери в СВЧ-тракте и делает установку дешевле. Колебание фазы указано на уровне $\pm 0,5^\circ$, эффективность сложения составила 95,7% при выходной мощности 1,58 кВт.

Следующая статья [16] также описывает метод суммирования сигналов синхронизированных магнетронов с помощью двойного Т-моста и отрезка волновода $\frac{\lambda}{4}$. В установке использовались магнетроны мощностью приблизительно 600 Вт. Отмечается, что с уровнем синхронизирующей мощности в 40 Вт удалось добиться полосы захвата в 12 МГц. Также промерялось время реакции магнетрона на резкую смену фазы навязываемого сигнала, которое составило порядка сотен наносекунд.

Работа [17] описывает суммирование сигналов от двух мощных магнетронов непрерывного действия по 15 кВт каждый. Использовался Т-мост для суммирования. Для подбора фазы использовался фазовращатель с минимальным шагом 5.6° и управлением через компьютер. Эффективность сложения составила порядка 96%.

Статья [18] показывает результаты сложения двух мощных магнетронов. Магнетроны непрерывного действия и номинальной мощностью 20 кВт. Схема основана на использовании Т-моста с центральным стержнем посередине, который позволяет магнетронам синхронизировать друг друга. Для одного из магнетронов был применен трехстержневой тюнер, что позволило настроить его рабочую частоту максимально близко к рабочей частоте другого магнетрона. Синхронизирующий сигнал мощностью 100 Вт подавался только на один магнетрон. Общая эффективность суммирования составила 86.7%.

Схема для сложения мощностей от 4 магнетронов 1.2 кВт на основе трех двойных Т-мостов показана в [12]. Подбор фазы осуществляется за счет установки волноводных отрезков необходимой длины в несколько мест СВЧ-тракта. Установка позволяет обойтись одним генератором сигнала, предусилителем и маломощным делителем. КПД суммирования 93%.

Оригинальная конструкция пятипортового сумматора показана в [19]. Такая

компактная конструкция уменьшает потери по сравнению с длинными волноводными трактами. В схеме используются единый источник-генератор частоты, затем идет делитель с 4 выходными портами, после делителя сигналы проходят через усилители. Отдельно в каждой линии магнетрона установлен свой фазовращатель. Стабильность фазы указана $\pm 2,5^\circ$. КПД сложения доходил до 97.7%.

Рекордсменом по выходной мощности служит статья [20]. В ней показано сложение четырех 20 кВт магнетронов. Суммарная мощность превысила 60.6 кВт с КПД 91.5%. Используется пятипортовый сумматор с двумя Н-портами и выходным Е-портом. Наличие Е-порта требует предварительного сдвига фазы в 180° , что обеспечивается с помощью фазовращателя в маломощной части СВЧ-тракта. Порты сумматора развязаны не полностью, что позволяет использовать взаимную синхронизацию магнетронов.

2 Экспериментальная часть

2.1 Измерение передаточных характеристик частей волноводного тракта.

В качестве предварительных измерений было определено ослабление в разных направлениях элементов волноводного тракта - вентилях и циркуляторах. Измерения проводились с помощью стационарного векторного анализатора фирмы HP 8752C на частоте 2450 МГц. Перед измерениями была выполнена калибровка портов векторного анализатора на прохождение сигнала от выходного порта через измерительные кабели до входного порта. Результаты измерений представлены в приложении А.

Краткая сводка по результатам измерений дает следующие показатели. Ослабление в направлении вход-выход составляет около 0.3—0.5 дБ для всех элементов. Это означает потерю около 10% проходящей мощности и требует учета в дальнейших расчетах выходной мощности СВЧ-системы. В направлении выход-вход вентили обеспечивают ослабление около 20 дБ, что в пересчете на мощность дает 30 Вт при выдаваемой магнетроном мощности в 3 кВт. Это значение можно считать малым по сравнению с мощностью СВЧ-усилителя в 200Вт, используемого для навязывания частоты магнетрону.

Стоит отметить, что вентили имеют водяное охлаждение ферритовой части и согласованной нагрузки, которая установлена в одном из плечей. Отсутствие

охлаждающей жидкости в каналах вентиля приводит к рассогласованию нагрузки и потере функциональности вентиля. В ходе измерений обнаружена зависимость согласования нагрузки от температуры корпуса вентиля и охлаждающей жидкости. Измеренные значения в приложении указаны после установления теплового баланса корпуса с охлаждающей водой температурой 14-15°C.

На рисунке 13 представлен спектр одного из вентилях в направлении выход-вход в момент охлаждения проточной водой с температурой около 14°C. Хорошо виден пик резонанса, который обеспечивает минимум пропускания мощности в направлении выход-вход на частоте около 2450 МГц. Положение резонанса зависит от температуры согласованной нагрузки и смещается влево по частоте при её охлаждении. В ходе работы установки выделяемая мощность в вентиле будет поднимать температуру его корпуса и смещать пик резонанса вправо в нужную область частот, таким образом будет достигаться максимальная эффективность в рабочем режиме.

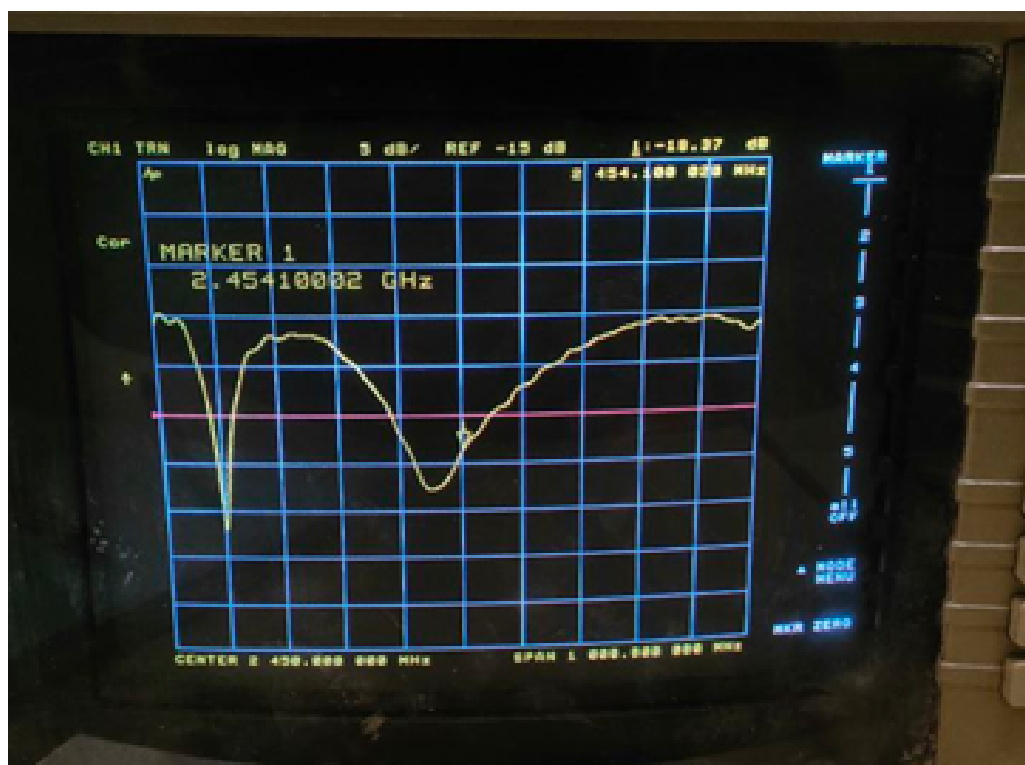


Рис. 13 – Спектр вентиля в направлении выход-вход при температуре 14°C.

2.2 Обзор характеристик магнетронов и источников питания.

Для корректного проведения эксперимента необходимо изучить характеристики магнетронов и элементов волноводного тракта.

В работе используются магнетроны фирмы LG модели 2M290. Их паспортные характеристики представлены в таблице ниже.

Таблица 1 – Заявленные характеристики магнетронов LG 2M290.

Характеристика	Значение	Примечание
Средняя выходная мощность	3000 Вт	Непрерывный режим
Рабочая частота	2455 МГц	Отклонение в пределах 2440-2470 МГц
Ток накала	19.5 А	Переменный ток
Напряжение накала	3.1 В	Переменное, рабочее
Ток анода	840 мА	Среднее значение для 3 кВт
Анодное напряжение	5.1 кВ	Номинальное пиковое
Охлаждение	водяное	2 л/мин и более

В качестве источников питания для магнетронов используются приборы WEREX 4000H - универсальные блоки питания для широкого ряда моделей магнетронов. Блок питания автоматически поддерживает заданную выходную мощность, регулируя анодное напряжение и ток, а также корректирует напряжение накала в зависимости от анодного тока (см. рис. 14 из документации к магнетрону). Здесь нужно отметить, что не все электроны, эмитированные с катода, достигают анода. Некоторая часть электронного потока возвращается обратно на катод, передавая ему свою кинетическую энергию. Такое явление называется обратной бомбардировкой катода. С увеличением анодного тока обратная бомбардировка также возрастает, что ведет к существенному дополнительному нагреву катода и отрицательно сказывается на производительности и сроке службы магнетрона.

Блок питания позволяет полностью контролировать режим работы магнетрона. Большинство параметров отслеживается в автоматическом режиме (такие как напряжение накала, напряжение катода, предварительный разогрев катода и т.д.). От пользователя требуется только указать входную мощность БП в заданном диапазоне (для магнетрона нашей модели - от 360 до 4100 Вт), которая откалибрована под рабочую выходную мощность магнетрона.

Помимо ручного управления с помощью кнопочной панели на лицевой стороне БП также имеется возможность управления прибором по интерфейсу RS-485 с помощью протокола ModBus RTU. Эта функция позволила проводить запуск и контроль параметров БП через компьютер.

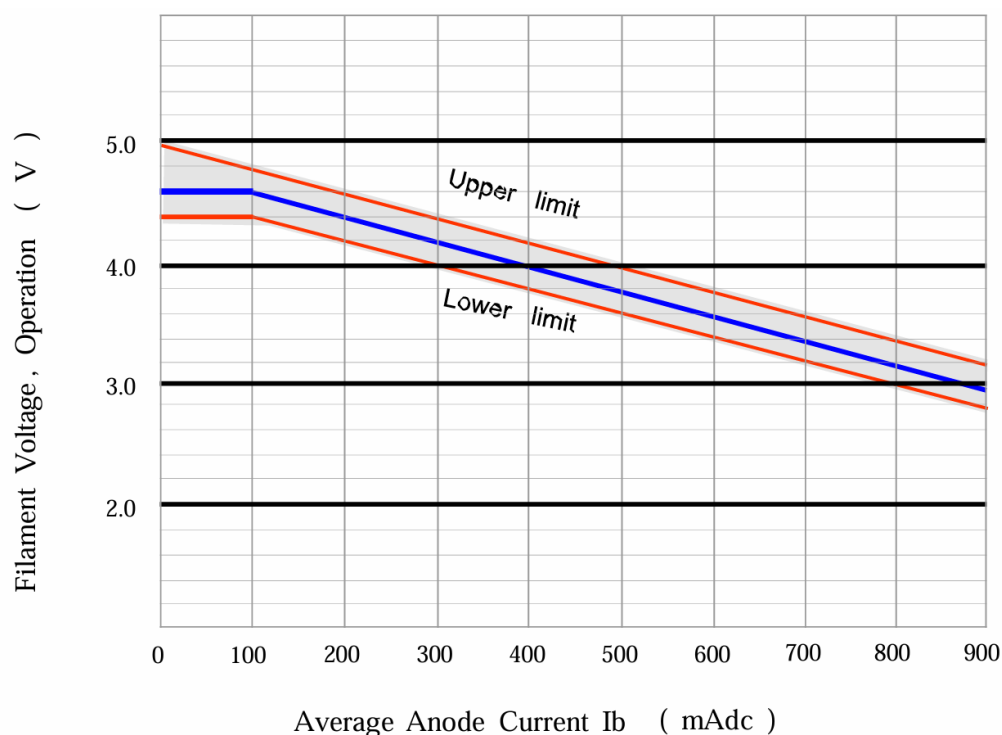


Рис. 14 – График снижения напряжения накала при увеличении анодного тока.

Знакомство с паспортными данными позволяет оценить возможные характеристики системы суммирования (такие как выходная мощность и рабочая частота). Однако реальные параметры могут отличаться от заявленных производителем. Для выяснения актуальных характеристик магнетронов были проведены измерения, которые описаны в следующем разделе.

2.3 Измерение мощности и частот магнетронов.

Для эффективного суммирования сигналов надо убедиться, что частоты магнетронов и их выходные мощности совпадают с заявленными производителем. С этой целью был создан стенд, схема которого показана на рисунке 15.

2.3.1 Схема стенда, проведение измерений и полученные данные.

Как видно по схеме, стенд состоит из магнетрона с блоком питания, направленного ответвителя (40 дБ), затем идут два вентиля, которые поглощают мощность магнетрона, затем идет коаксиально-волноводный переход. К порту направленного ответвителя подключался ваттметр проходной мощности. К коаксиально-волноводному переходу подключался анализатор спектра. Аттenuатор между портом КВП и входом анализатора спектра обеспечивает необ-

ходимое затухание сигнала для предотвращения выхода анализатора из строя.

Для того, чтобы убедиться в корректности запланированных измерений, вместо магнетрона был установлен коаксиально-волноводный переход, на который подавался сигнал с векторного анализатора. Таким образом были измерены ослабления на направленном ответвителе и на коаксиально-волноводном переходе после двух вентилях. Результаты измерений представлены на рисунке 16.

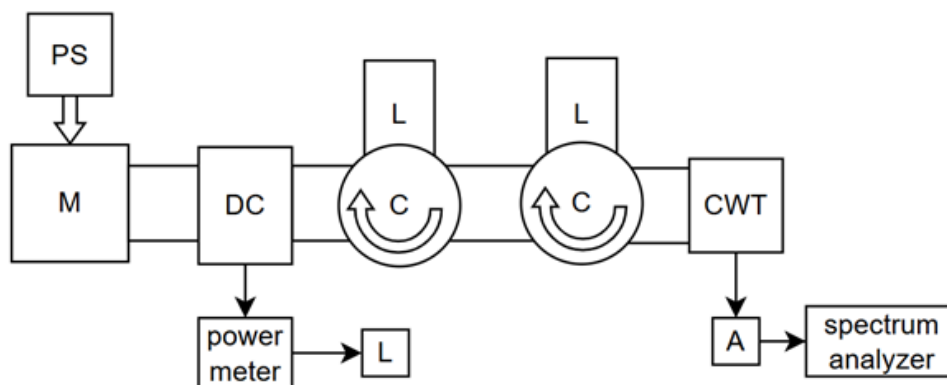


Рис. 15 – Схема стенда для измерения мощности и частотного спектра магнетронов. PS - блок питания магнетрона, M - магнетрон, DC - направленный ответвитель, L - согласованная нагрузка, C - циркулятор, CWT - коаксиально-волноводный переход, A - аттенюатор.

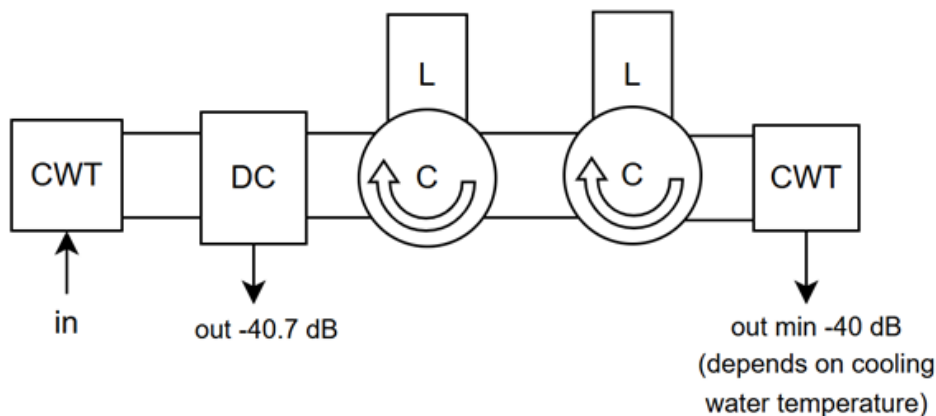


Рис. 16 – Ослабление схемы для измерения мощности и частотного спектра магнетронов.

Так как ослабление на коаксиально-волноводном переходе после вентилях зависит от их теплового состояния (см. 2.1), то для измерения мощности такой порт не подходит. Для измерений частот магнетронов использовался анализатор спектра фирмы Rohde and Schwarz серии FSL.

Для измерения мощности использовался проходной ваттметр фирмы Rohde and Schwarz серии NLT. Во всех измерениях на ваттметре отмечался ненулевой фоновый уровень входной мощности (порядка 0.023 Вт), который затем вычитался из значений, полученных в момент работы магнетрона.

Измерения проходили следующим образом. На БП магнетрона выставлялась уставка входной мощности, затем снимались следующие характеристики: ток анода I_a , высокое напряжение на катоде U_a , снимаемая с направленного ответвителя мощность P , показывающая уровень выходной мощности магнетрона, частота наибольшей амплитуды сигнала f_{max} , правая f_R и левая f_L границы спектра (частоты, соответствующие падению амплитуды на 20 дБ относительно максимальной), температура корпуса T магнетрона. Уставка входной мощности начиналась от значения 1000 Вт и увеличивалась с шагом 500 Вт, доходя до 4000 Вт (по документации к БП магнетрона максимальная уставка входной мощности БП для данного типа магнетрона рекомендуется не более 4100 Вт). После серии измерений происходила замена магнетрона. Таким образом были измерены частотные и мощностные характеристики всех 4 магнетронов. Для примера оставлена таблица 2 снятых результатов магнетрона №1, остальные результаты можно посмотреть в приложении В.

Максимальная частота f_{max} находилась с помощью встроенных инструментов анализатора спектра, тогда как левые и правые частоты f_R и f_L вследствие нестабильности показаний определялись визуально.

Во всех измерениях использовался один и тот же блок питания магнетрона WEPXH 4000H.

Таблица 2 – Магнетрон №1

Уставка, Вт	I_a , мА	U_a , кВ	P , Вт	f_L , МГц	f_{max} , МГц	f_R , МГц	T , °С
0	0	0,00	0,023	--	--	--	14
1000	125	4,40	0,066	2439,8	2441,5	2443,1	20
1500	229	4,42	0,106	2442,0	2442,5	2443,0	22
2000	334	4,42	0,146	2441,6	2442,4	--	25
2500	440	4,41	0,183	2445,7	2450,1	2451,1	28
3000	545	4,40	0,220	2448,2	2451,7	2453,2	30
3500	651	4,40	0,257	2450,4	2453,8	2454,5	31
4000	753	4,41	0,298	2452,7	2454,7	2455,2	32

Для наглядности ниже приведены графики изменения спектра магнетрона №4 с ростом анодного тока.



Рис. 17 – Спектры магнетрона №4 при уставке входной мощности БП 1000 Вт (слева) и 1500 (справа).



Рис. 18 – Спектры магнетрона №4 при уставке входной мощности БП 2000 Вт (слева) и 2500 (справа).

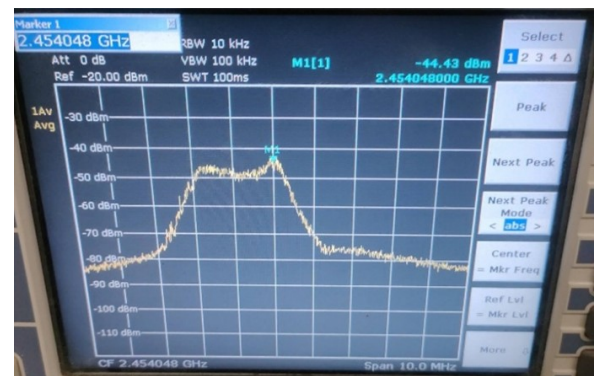


Рис. 19 – Спектры магнетрона №4 при уставке входной мощности БП 3000 Вт (слева) и 3500 (справа).

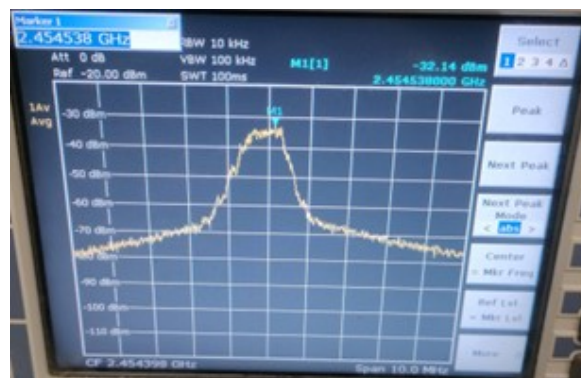
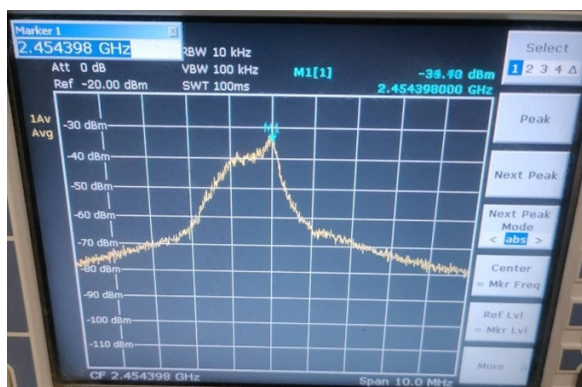


Рис. 20 – Спектры магнетрона №4 при уставке входной мощности БП 4000 Вт. Слева - сразу после переключения с входной мощности 3500 Вт, справа - в установившемся режиме.

2.3.2 Результаты измерений и их обсуждение

С учетом ослабления тракта до порта направленного ответвителя (см. рис 16) и с учетом фона проходного ваттметра были построены выходные мощности магнетронов в зависимости от уставки входной мощности источника питания. Результаты вычислений показаны в таблице 3. Математически проведенные вычисления можно описать с помощью следующей формулы:

$$P_{\text{out}} = (P_{\text{meas}} - P_{\text{noise}}) \cdot 10^{(\text{dB}/10)} \quad (13)$$

Видно, что мощностные характеристики магнетронов соответствуют заявленным. Каждый магнетрон выдает около 3 кВт мощности. Полученные результаты согласуются с паспортными данными в пределах технологии измерений. Так, измерения ослабления тракта вносят большую погрешность в итоговые результаты. Если считать ослабление равным -40.5 дБ, то это снижает выходную мощность приблизительно на 150 Вт от указанной.

В дальнейшем для избежания громоздкости чисел будем использовать значение уставки входной мощности источника питания, значение которой всегда можно перевести в выходную мощность магнетрона по таблице.

Дальше посмотрим на частотные характеристики магнетронов. Их удобно отразить следующими графиками.

Таблица 3 – Зависимость выходной мощности (Вт) от уставки входной мощности источника питания для четырёх магнетронов

Уставка мощности, Вт	Магнетрон 1	Магнетрон 2	Магнетрон 3	Магнетрон 4
1000	482	493	505	470
1500	931	940	952	893
2000	1380	1375	1398	1328
2500	1795	1821	1856	1751
3000	2210	2279	2338	2185
3500	2626	2738	2785	2620
4000	3086	3125	3243	3055

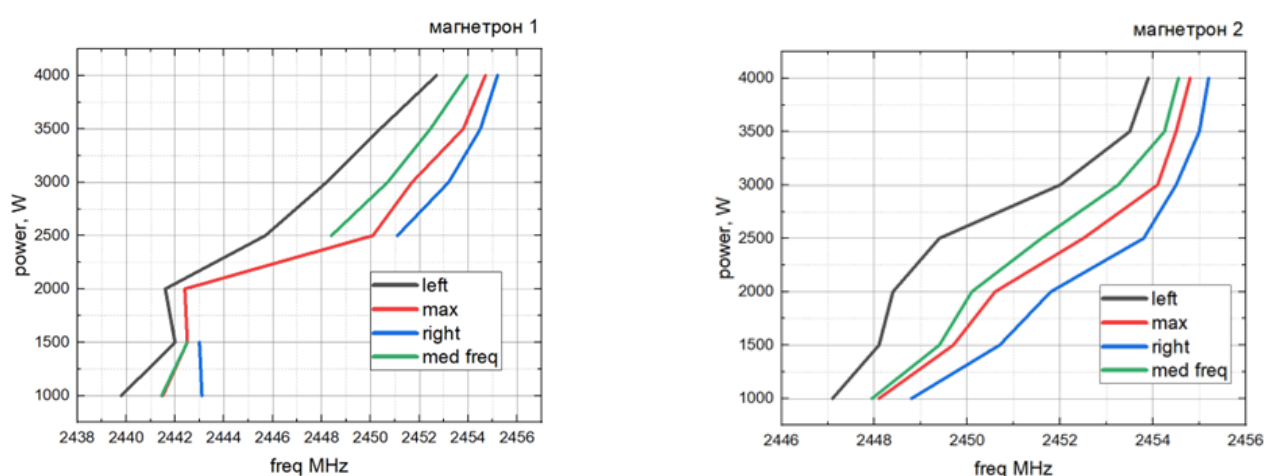


Рис. 21 – Изменение частоты генерации (левой, средней, правой, максимальной) в зависимости от мощности для магнетронов №1 и №2.

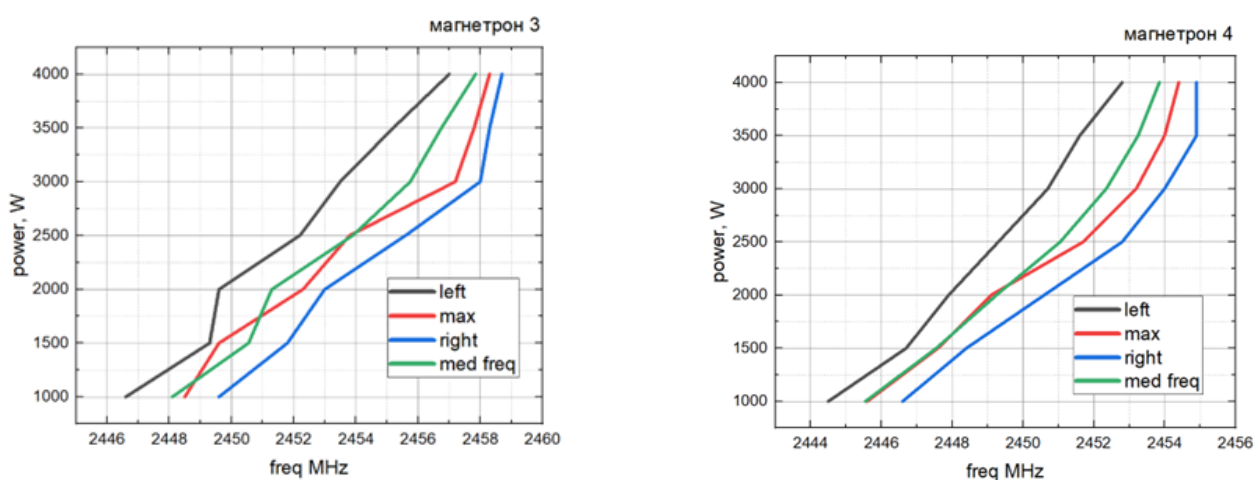


Рис. 22 – Изменение частоты генерации (левой, средней, правой, максимальной) в зависимости от мощности для магнетронов №3 и №4.

На графиках наблюдается постоянный рост частоты генерации магнетрона

с ростом выходной мощности. Ширина спектра (разница между правой и левой частотой) составляет порядка нескольких мегагерц и зависит от магнетрона и уровня мощности.

Наблюдение классического эффекта смещения частоты (см. 1.2.3) при увеличении анодного тока иллюстрирует график 23. Оценивая через граничные точки на графике величину смещения частоты от анодного тока, можно прийти к численному значению около 21 МГц/А для магнетрона №4.

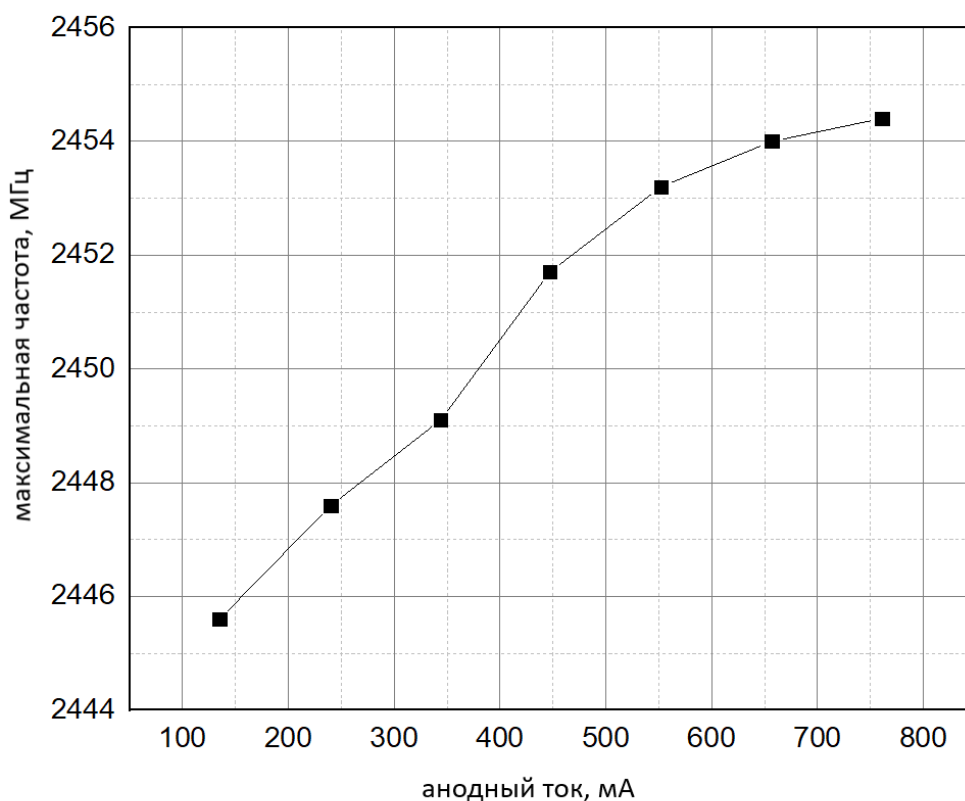


Рис. 23 – Увеличение частоты генерации с ростом анодного тока на примере магнетрона №4.

Отметим детали, которые зависят от магнетронов. Во-первых, для магнетрона №1 на малых мощностях асимметричная форма спектра не позволяла снять правую границу, отсюда отсутствие данных на графике. Иллюстрация спектра первого магнетрона приведена на картинке 24. Такая неправильная, шумная форма спектра наблюдается только на уровне мощностей 1500 и 2000 Вт, что не является критическим для дальнейшего эксперимента на полной мощности.

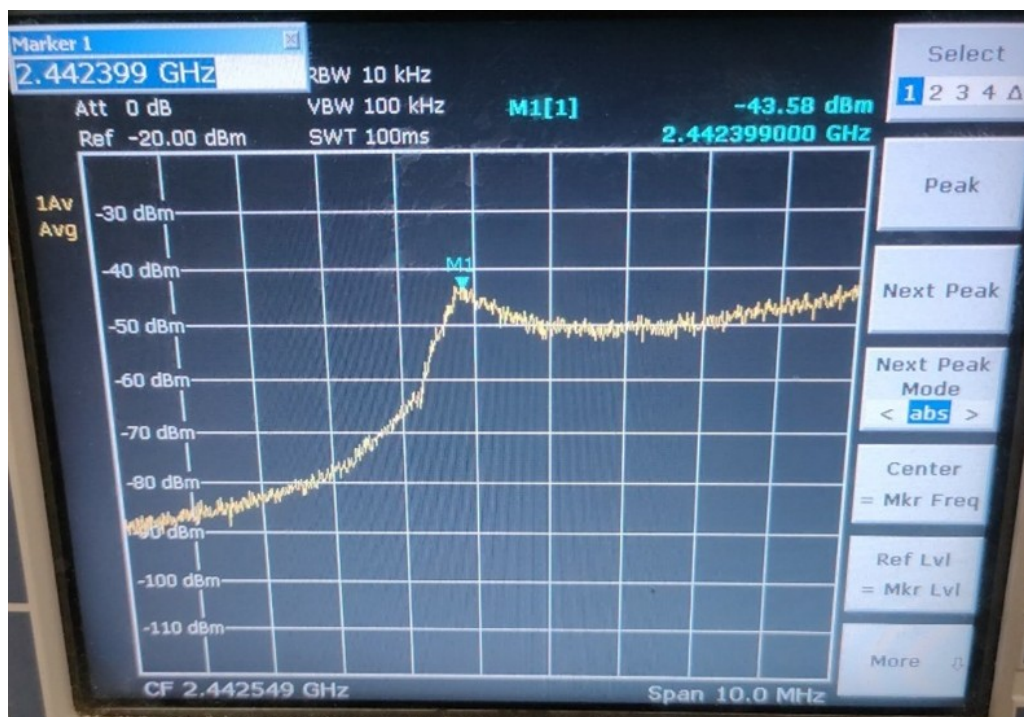


Рис. 24 – Спектр магнетрона №1 при уставке мощности 2000Вт.

Во-вторых, наблюдается различие частот магнетронов как на малой мощности, так и на полностью рабочем значении. Это иллюстрируют следующие графики. Разброс по стартовым частотам составляет более 6 МГц, но не является критичным, так как не соответствует номинальному режиму работы.

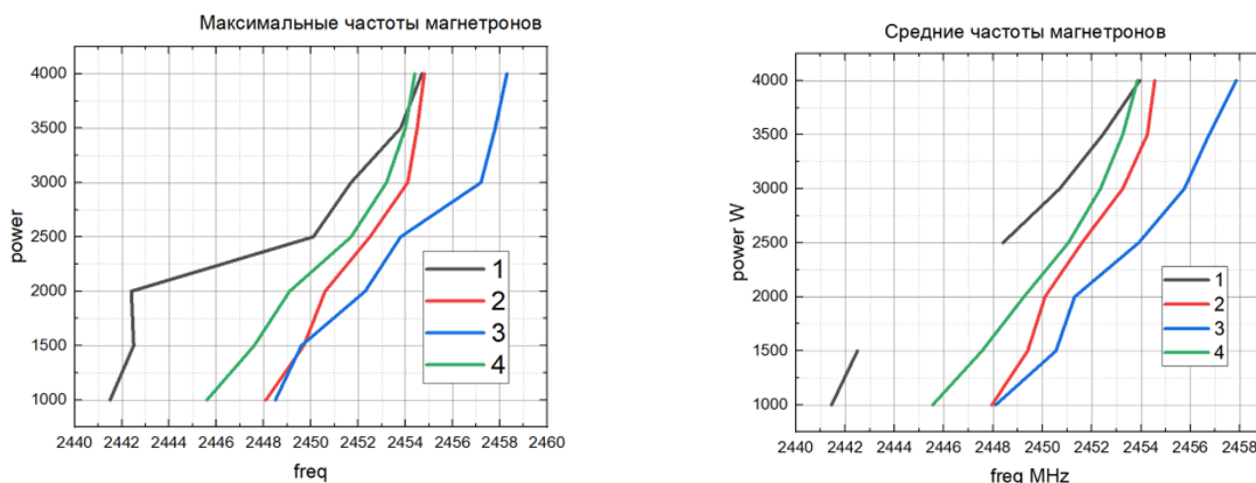


Рис. 25 – Сравнение максимальных и средних частот магнетронов при различной мощности.

Для наглядности приведем график сравнения формы спектров в момент подачи максимальной мощности на магнетрон.

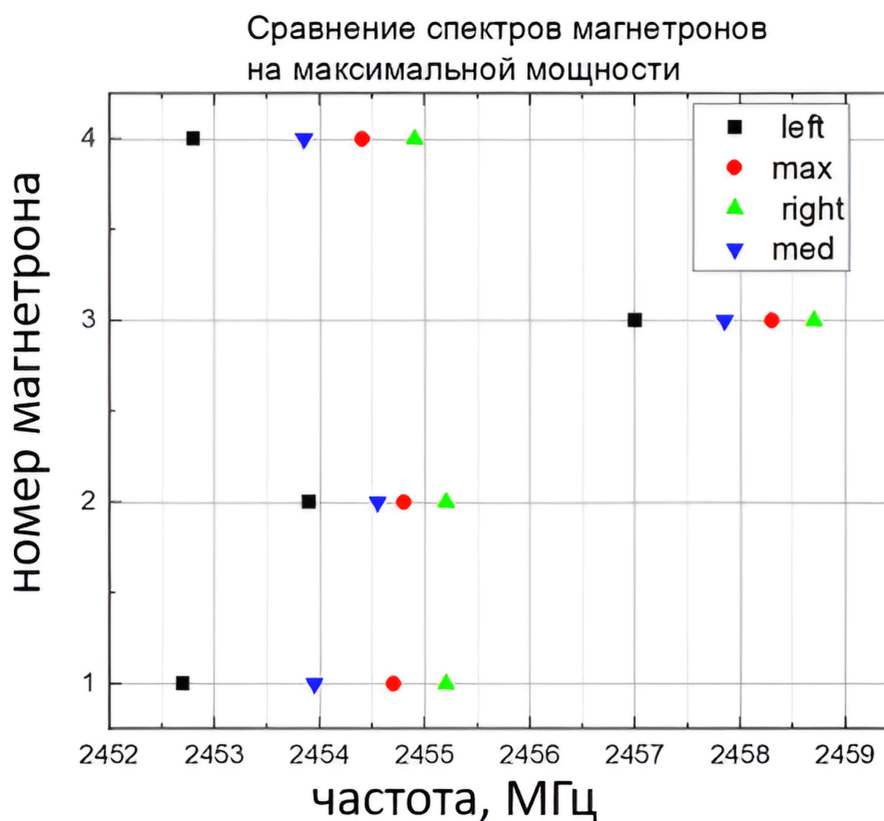


Рис. 26 – Сравнительные характеристики спектров магнетронов при максимальной мощности.

Таблица 4 – Максимальные частоты магнетронов при уставке 4000 Вт

Магнетрон	Максимальная частота, МГц
1	2454,7
2	2454,8
3	2458,3
4	2454,4

Как мы видим, в рабочем режиме три магнетрона остаются на приблизительно равных частотах, но магнетрон под номером 3 выбивается из группы. Согласно таблице 4, отличие по частоте 3 магнетрона от остальных составляет порядка 4 МГц.

Таким образом проведенные измерения показали, что рабочие характеристики магнетронов соответствуют заявленным производителем. Измеренные мощности магнетронов составляют около 3 кВт. Частотные характеристики магнетронов также удовлетворительные. У трех из четырех магнетронов частоты генерации составляют 2454.4, 2454.7, 2454.8 МГц, что очень удобно с точки зрения синхронизации магнетронов с помощью внешнего сигнала. Чем меньше

разница в частотах, тем менее мощный управляющий сигнал можно подавать. Однако магнетрон №3 довольно сильно выбивается по частоте, которая составляет 2458.3 МГц. Это обстоятельство приводит к тому, что необходимо экспериментально проверить возможности подстройки частоты всех четырех магнетронов к одной задающей. Описанию этих измерений будет посвящен следующий раздел.

2.4 Эксперимент по синхронизации магнетрона

Цель эксперимента — исследовать синхронизацию магнетрона внешним сигналом. Особый интерес представляет полоса захвата - частотный диапазон синхронизации магнетрона, работающего в полную мощность. Для анализа будет использоваться критерий Адлера для синхронизации магнетрона, который был показан в 1.3. Из этого критерия следует, что максимальная расстройка по частоте будет пропорциональна квадратному корню из мощности навязываемого сигнала. Таким образом результаты раздела позволят выяснить, получится ли с помощью усилителей на 200 Вт, используемых в нашем эксперименте, добиться такого уровня навязываемого сигнала, что в рабочем режиме получится синхронизировать все четыре магнетрона на одной частоте.

2.4.1 Схема стенда, методика измерений

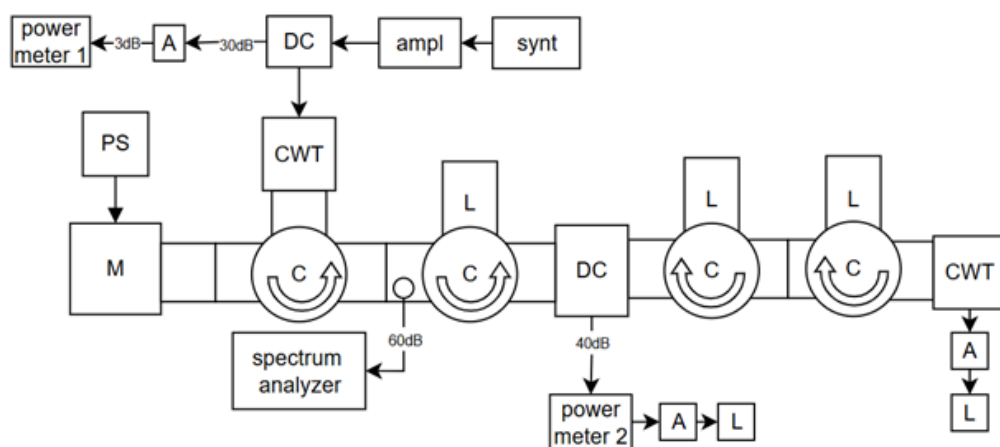


Рис. 27 – Схема стенда для испытаний

Для проведения измерений была собрана испытательная установка, схема которой показана на рисунке 27.

Во всех измерениях этого раздела использовался магнетрон №3, собственная частота которого сильно отличалась от собственных частот остальных магнетронов.

Для создания сигнала навязываемой частоты использовался генератор APSIN 3000 (на схеме – synt). С него сигнал передавался на усилитель выходной мощностью 200 Вт. Затем через направленный ответвитель часть сигнала уходила на калориметрический ваттметр ПрофКип М3-54 (power meter 1). Суммарное ослабление сигнала до ваттметра составляло 33 дБ. Мощность с усилителя передавалась на коаксиально-волноводный переход, где затем через циркулятор проходила до магнетрона.

Для снятия спектра выходного сигнала с магнетрона использовался анализатор спектра R&S серии FSL. Мощность выходного сигнала измерялась проходным ваттметром R&S серии NLT. Для поглощения мощности использовались два СВЧ-вентили с водяным охлаждением.

В ходе измерений определялись такие значения частоты, при которых выходной спектр сигнала магнетрона сохранял свою рабочую форму (в спектре отсутствовали лишние пики и искажения).

В ходе эксперимента изменялась выходная мощность магнетрона – уставки на источнике питания составляли 2000, 3000, 3500 и 4000 Вт. Таким значениям уставки соответствуют следующие значения выходной мощности магнетрона, измеренные ваттметром №2.

Таблица 5 – Зависимость выходной мощности от уставки (исходные и скорректированные значения)

Уставка, Вт	2000	3000	3500	4000
Измерения (исходные), Вт	1210	1870	2270	2610
С коррективкой (0.9 дБ), Вт	1488	2300	2792	3210

Стоит отметить, что измеренные значения выходной мощности не учитывают потери на циркуляторе и вентиле, тогда как суммарные потери на этом участке СВЧ-тракта могут составлять до 0.9 дБ (согласно приложению А). С учетом этого фактора составлена нижняя строка таблицы.

Для каждого уровня выходной мощности магнетрона проводились замеры при различном уровне выходной мощности с усилителя. Уровень мощности регулировался уровнем подаваемой мощности с генератора APSIN. Измерения проводились на 4 точках: -2, 0, 2, 4 дБм. Такая уставка выходной мощности

с генератора соответствовала выходной мощности с усилителя следующим образом.

Таблица 6 – Зависимость выходной мощности усилителя от входной мощности генератора

Выходная мощность генератора, дБм	-2	0	2	4
Выходная мощность усилителя, Вт	99,6	147,6	198,5	227,5

Данные показатели выходной мощности снимались с ваттметра №1 в отсутствии сигнала с магнетрона, после установления показаний прибора в течение некоторого времени (порядка нескольких минут работы усилителя для выхода на рабочий температурный режим). Частота подаваемого сигнала составляла 2450 МГц. В ходе дальнейших измерений с включенным магнетроном показания ваттметра колебались в диапазоне около 5-10%.

Для нахождения частоты генератора, на которой начинался срыв генерации с утягивающей частоты была использована следующая методика. На генераторе выставлялся режим работы, позволяющий проходить заданный частотный диапазон по заданному количеству точек. Начальная частота диапазона выбиралась максимально близкой к собственной частоте магнетрона при данной мощности, а затем пробегался диапазон по частотам вверх и вниз относительно стартовой частоты. В таблице ниже указаны начальные частоты генератора в зависимости от уставки мощности магнетрона на его источнике питания:

Таблица 7 – Зависимость начальной частоты от уставки на источнике питания

Мощность, Вт	2000	3000	3500	4000
Начальная частота, МГц	2452	2455	2457	2458

К примеру, одно из измерений проходило по следующим настройкам. Уставка выходной мощности магнетрона – 2000Вт. Для этой мощности начальная частота на генераторе составляла 2452 МГц. Уставка выходной мощности усилителя 4 дБм. Так как ожидалось, что выходная мощность магнетрона мала, а мощность синхронизируемого сигнала максимальна, то был выставлен диапазон сканирования вниз по частоте до 2438 МГц – довольно далеко от собственной частоты магнетрона. Каждый раз диапазон проходил по 50 точкам, вне зависимости от его ширины, с остановкой в каждой точке на 2 секунды. Окно программы генератора в данном измерении указано ниже.



Рис. 28 – Окно программы генератора для проведения конкретного измерения

Все показания анализатора спектра записывались на компьютер с помощью встроенной функции подключения по удаленному рабочему столу. Таким образом происходил быстрый набор серии измерений, результатом которого был видеоряд для последующего удобного анализа. Так, для данных настроек частота срыва генерации определилась как 2439.7 МГц.

Точность определения граничной частоты задавалась в первую очередь количеством точек в диапазоне сканирования и, соответственно, шагом по частоте. Приведенный выше случай рассмотрен как максимальный, в котором шаг составлял 286 кГц (50 точек на диапазон 14 МГц). Все дальнейшие измерения имели меньший шаг по частоте. Так, к примеру, при уставке мощности магнетрона 4000Вт и мощности генератора -2 дБм, диапазон сканирования вниз по частоте составил 5 МГц (с 2458МГц до 2453МГц). В таком случае шаг по частоте составлял порядка 102кГц. Именно такой порядок величин — одна-две сотни кГц — определяют порядок точности измерения срыва частоты во время синхронизации магнетрона.

Критерий выбора частоты, при котором начинается срыв генерации, а также типичный спектр выходного сигнала с магнетрона проиллюстрированы картинками ниже.

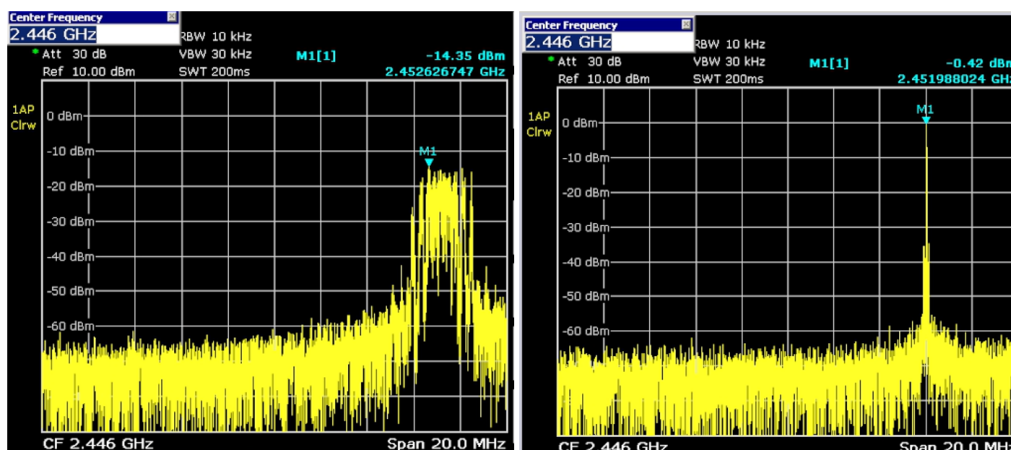


Рис. 29 – Спектр магнетрона на мощности 2000Вт (слева). Спектр синхронизированного магнетрона на частоте 2452МГц (справа)

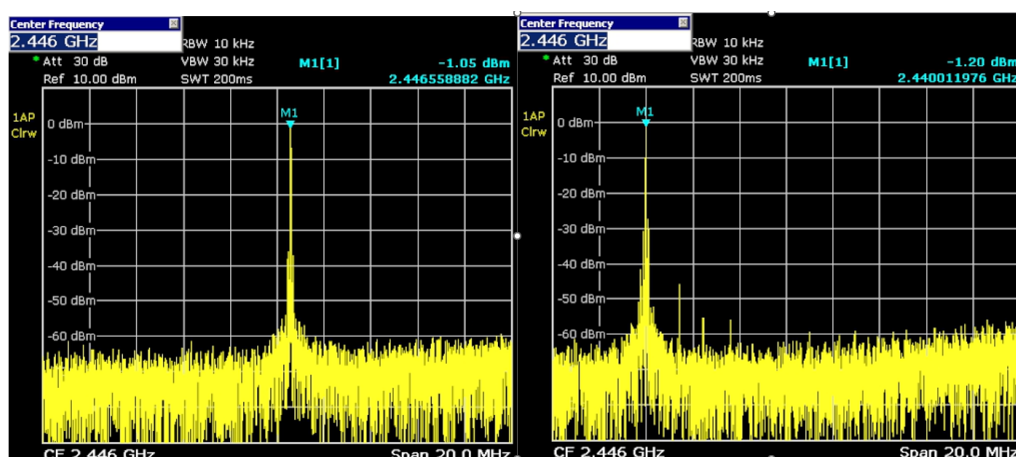


Рис. 30 – В процессе утягивания частоты магнетрона до 2446.6МГц (слева). Спектр перед началом срыва (справа)

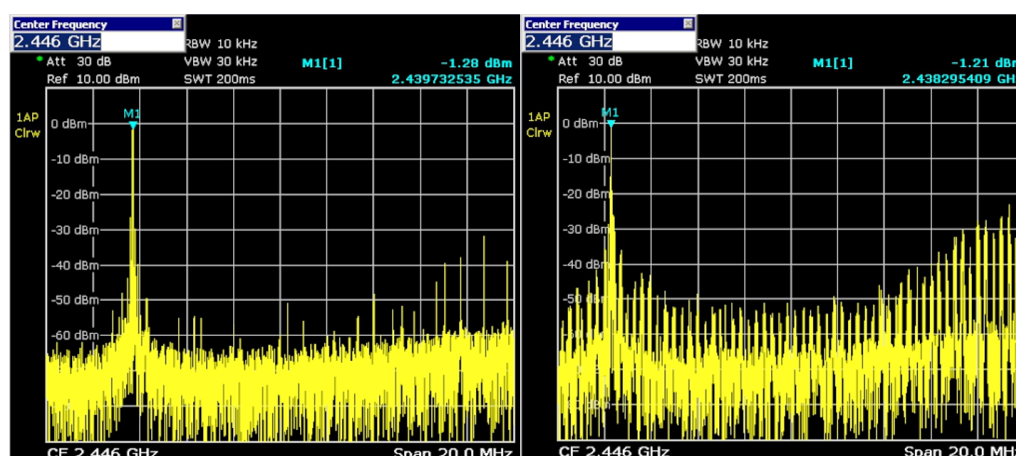


Рис. 31 – Появление пиков как критерий начала срыва (слева). Развитие пиков и ухудшение спектра синхронизированного магнетрона (справа)

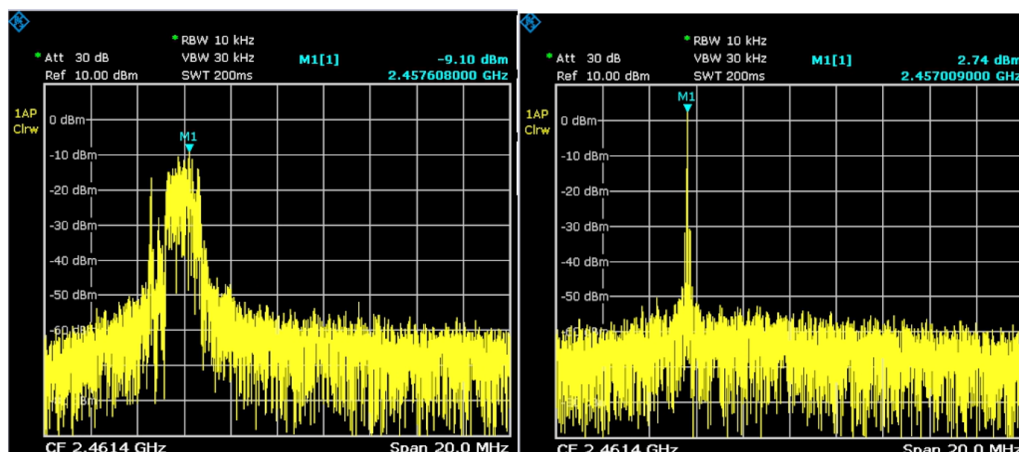


Рис. 32 – Спектр свободного магнетрона на мощности 3500Вт (слева). Синхронизация частотой 2457МГц (справа)

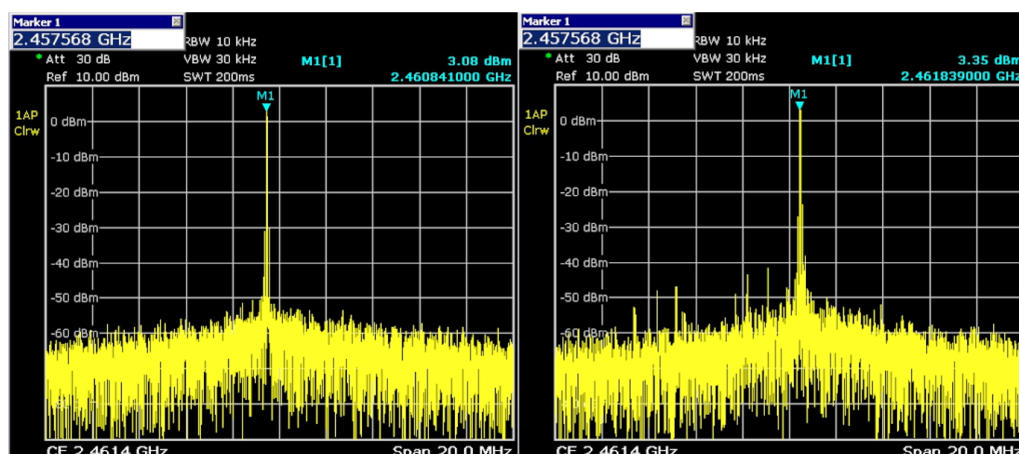


Рис. 33 – В процессе утягивания вверх до 2460.8 МГц (слева). До появления нестабильностей (справа)

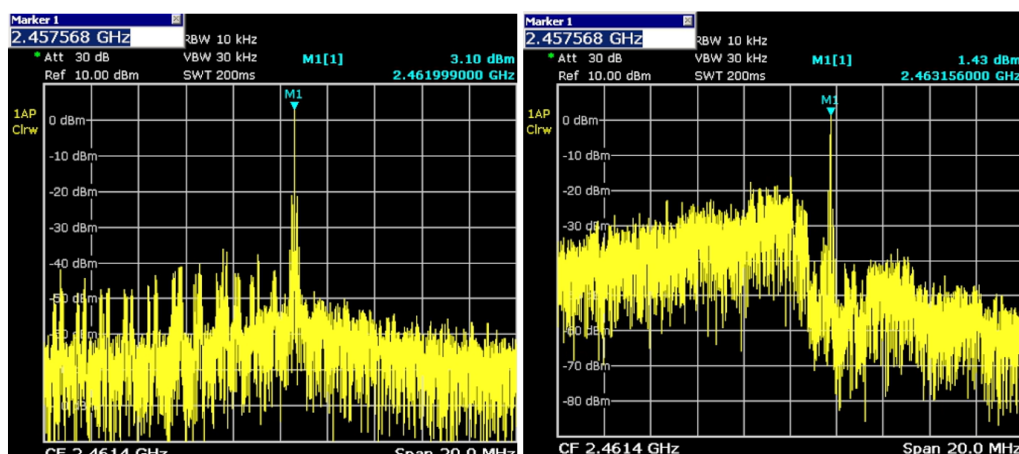


Рис. 34 – Резкое ухудшение спектра на частоте 2462 МГц (слева). Развитие нестабильности (справа)

Приведенные выше иллюстрации спектров при затягивании частоты магнетрона вверх (с 24557 МГц до 2460.8 МГц) и вниз (с 2452 МГц до 2446.6 МГц) дают наглядное представление о проведении измерений и определению граничной частоты захвата. Видно, что пока магнетрон полностью синхронизован, его спектр достаточно узкий (см. рис 35) и фон находится на минимальном уровне. На граничном режиме наблюдается резкое ухудшение фона спектра, которое проявляется в виде резких пиков и искажения средней линии фона.

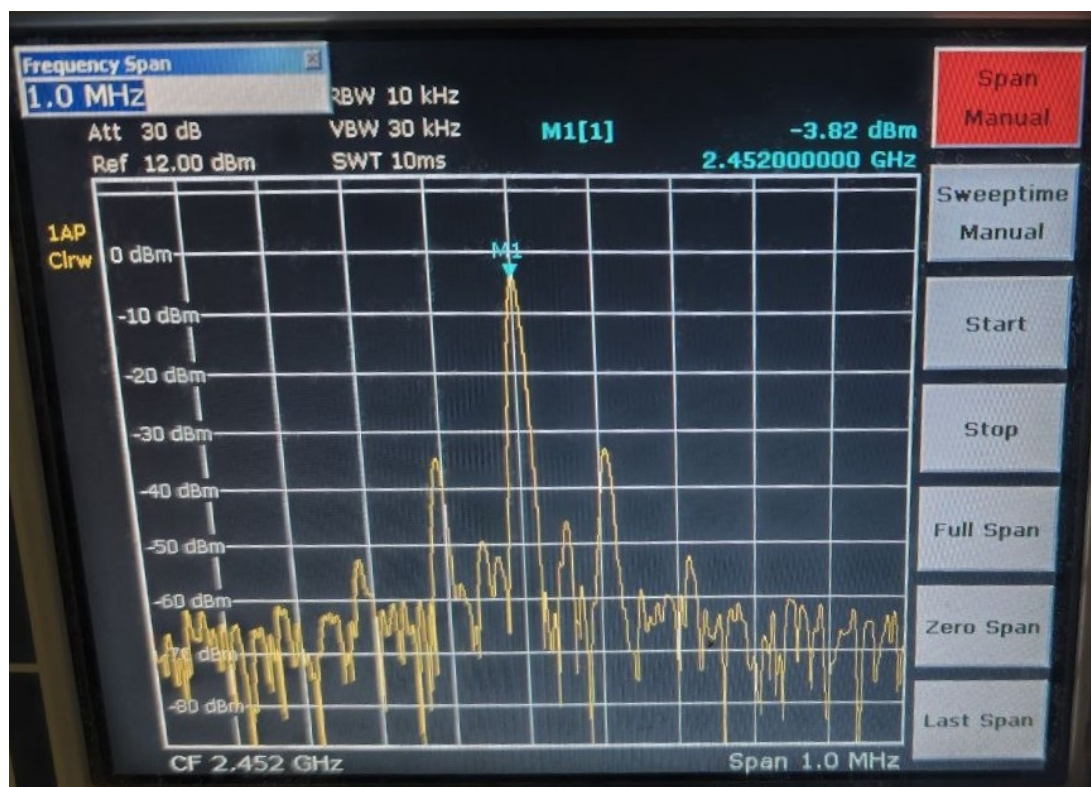


Рис. 35 – Пример спектра синхронизированного магнетрона

2.4.2 Результаты эксперимента

Таким образом в ходе измерений были полученные следующие результаты о возможном диапазоне расстройки для соответствующих мощностей усилителя и магнетрона. В таблицах приложения С указаны значения частот при сдвиге частоты магнетрона вниз (т.е. влево) и при сдвиге вверх (т.е. вправо) относительно начальной частоты для данной мощности. Для каждой строки указана мощность синтезатора APSIN, подаваемая на усилитель. Соответствующую выходную мощность усилителя можно найти согласно таблице 6.

Для анализа результатов приведем графическую визуализацию таблиц приложения С. По графикам 36 и 37 видно, что стартовые частоты были выбраны

достаточно верно - ветви граничных значений по частоте примерно симметричны относительно начальной частоты, которая должна совпадать с рабочей частотой магнетрона при подаче на него соответствующего уровня мощности. Как упоминалось ранее, для магнетронов характерно увеличение рабочей частоты с ростом выходной мощности (см. 1.2.3), поэтому при отрисовке правых и левых границ синхронизации на одном графике мы видим асимметричность - левые ветви раздвинуты на несколько мегагерц по диапазону, тогда как правые ветви прижаты друг к другу сильнее и даже перекрываются. С ростом мощности магнетрона его рабочая частота сдвигается вверх, причем полоса захвата в соответствии с критерием Адлера уменьшается, поэтому левая граница полосы синхронизации сдвигается сильнее в след за увеличением частоты (шаг 8.6, 3.7 и 1.2 МГц), тогда как правая граница остается в диапазоне 1 МГц (если говорить про ситуацию, когда навязываемый сигнал имеет максимальную мощность).

Таким образом, текущие результаты показывают, что мощности сигнала порядка 200 Вт достаточно для синхронизации третьего магнетрона в области рабочих частот магнетронов №1, 2, 4 (напомним, их рабочая частота составляет около 2454 МГц). Выбор итоговой рабочей частоты синхронизирующего сигнала остается в некоторой степени произвольным - можно как занижать частоту третьего магнетрона и настраивать суммирование сигнала на частоте 2454 МГц, так и повышать частоту трех остальных магнетронов до 2548 МГц при условии, что для остальных магнетронов характерные ширины синхронизации окажутся такими же, как для магнетрона №3.

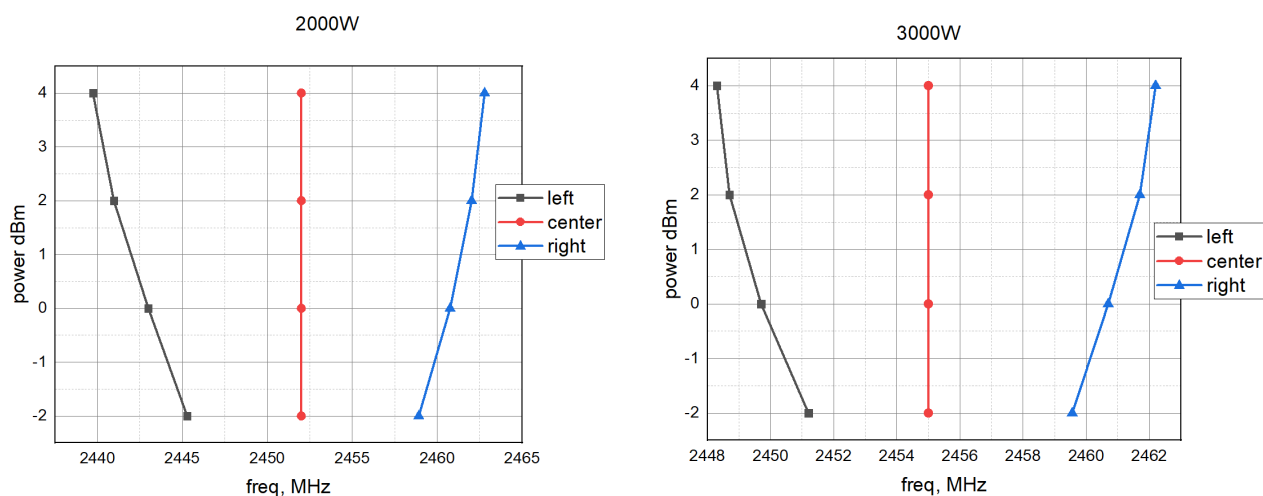


Рис. 36 – Диапазон синхронизации частот для мощностей магнетронов в 2000 Вт (левый график) и 3000 Вт (правый график) в зависимости от подаваемой мощности с усилителя

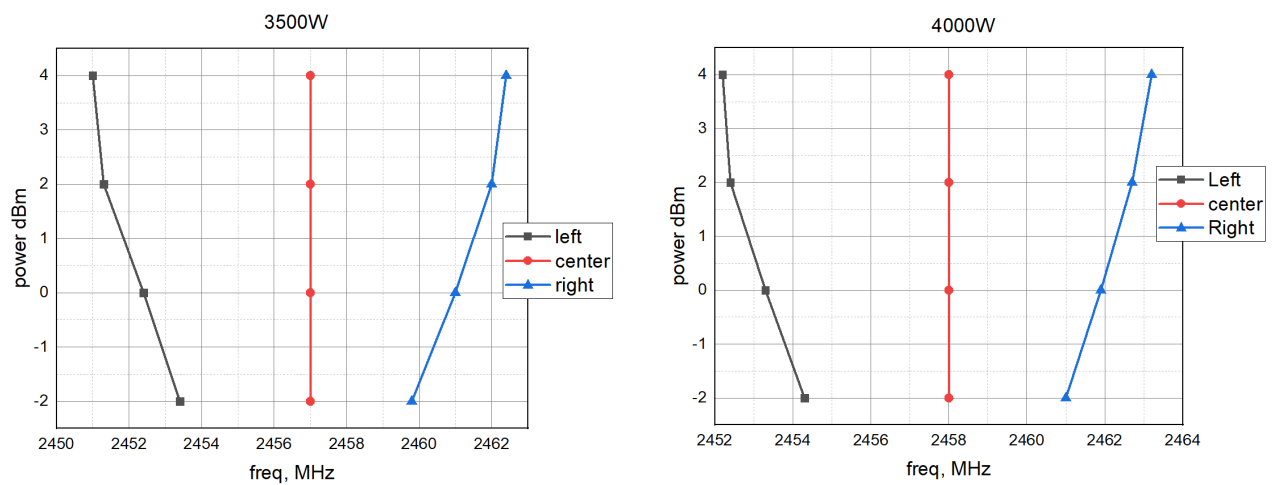


Рис. 37 – Диапазон синхронизации частот для мощностей магнетронов в 3500 Вт (левый график) и 4000 Вт (правый график) в зависимости от подаваемой мощности с усилителя

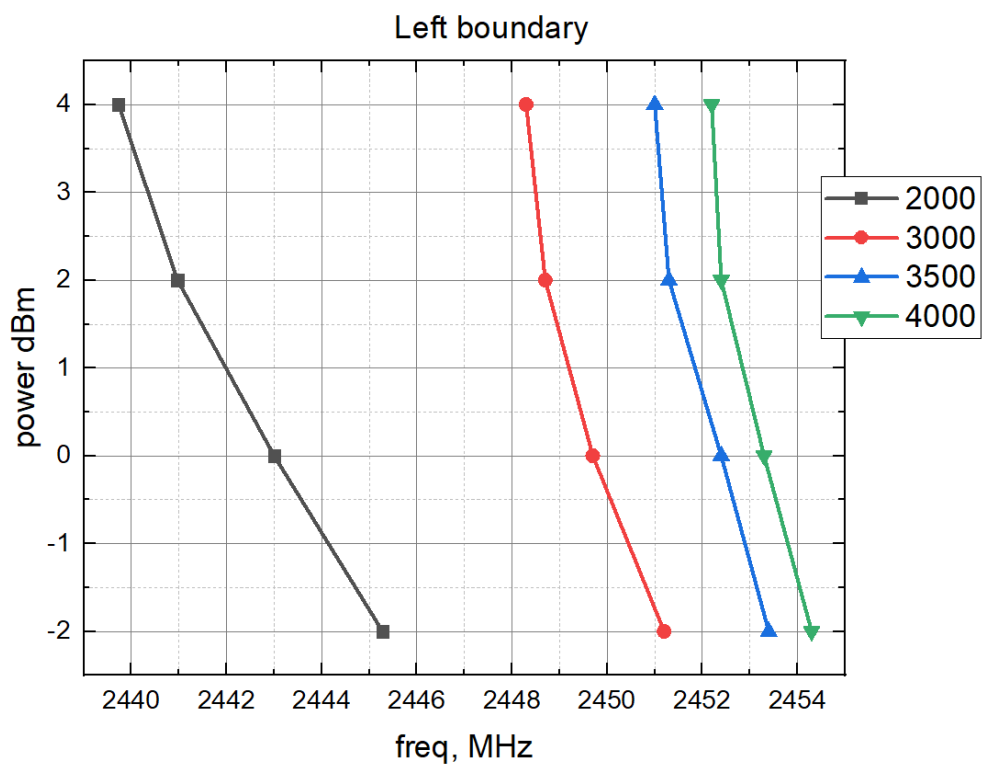


Рис. 38 – Левые границы частот синхронизации для различных уставок мощности магнетрона и мощности навязываемого сигнала

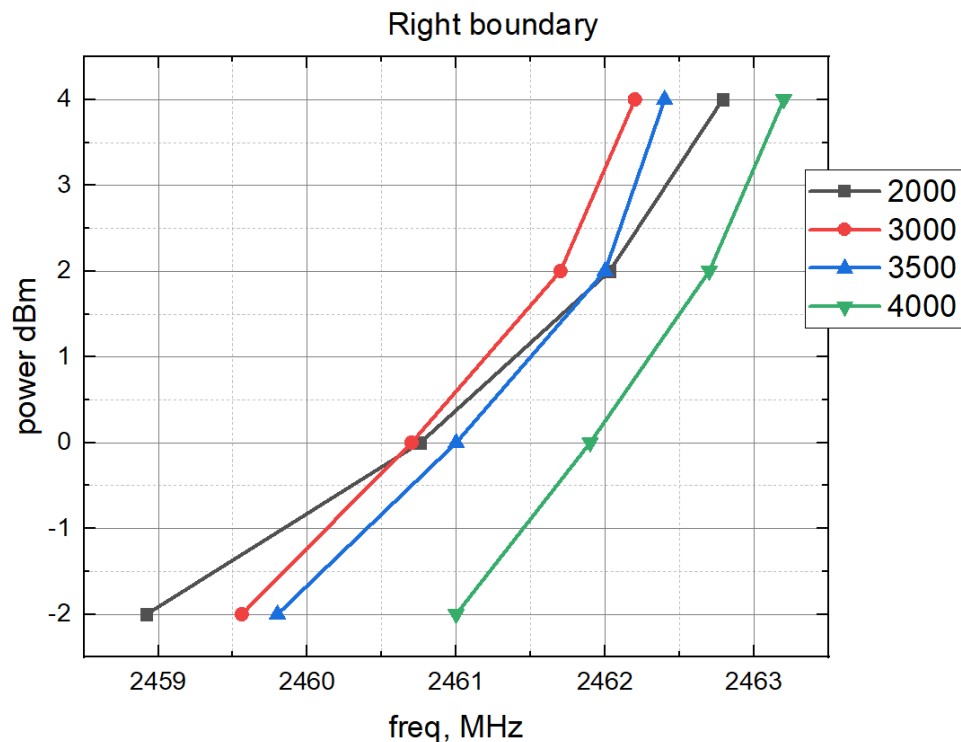


Рис. 39 – Правые границы частот синхронизации для различных уставок мощности магнетрона и мощности навязываемого сигнала

Для устранения сдвига по частоте построим зависимость полной ширины полосы синхронизации от подаваемой мощности. Такой график позволяет исключить из рассмотрения эффект роста рабочей частоты магнетрона в зависимости от его мощности и проанализировать экспериментальные точки с использованием формулы Адлера 10. Аппроксимация критерием захвата Адлера показана на графиках 41 и 42. Как видно по результатам аппроксимации, ширина полосы синхронизации с хорошей точностью растет как квадратный корень мощности синхронизирующего сигнала. Также с неплохой точностью выполняется зависимость ширины полосы синхронизации как обратного квадратного корня из выходной мощности магнетрона. В данном случае аппроксимация не является идеальной, что говорит о неучтенных параметрах. Так, можно добавить зависимость сдвига собственной частоты магнетрона с ростом мощности, как это сделано в статье [21].

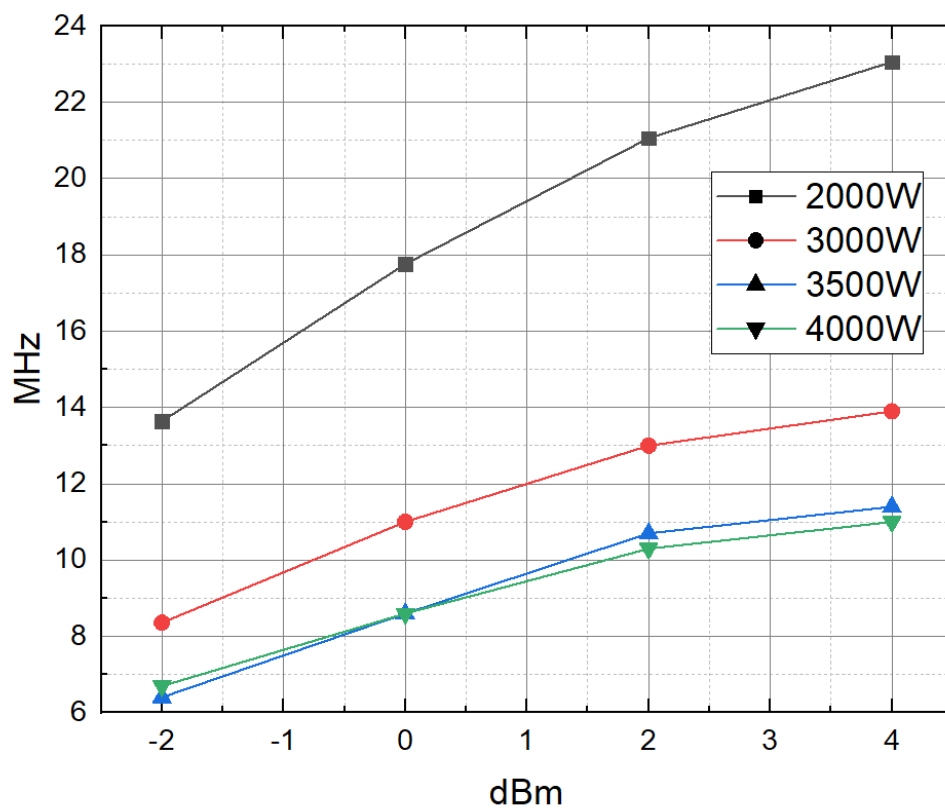


Рис. 40 – Полная ширина полосы синхронизации для всех мощностей магнетрона в зависимости от уровня внешнего сигнала

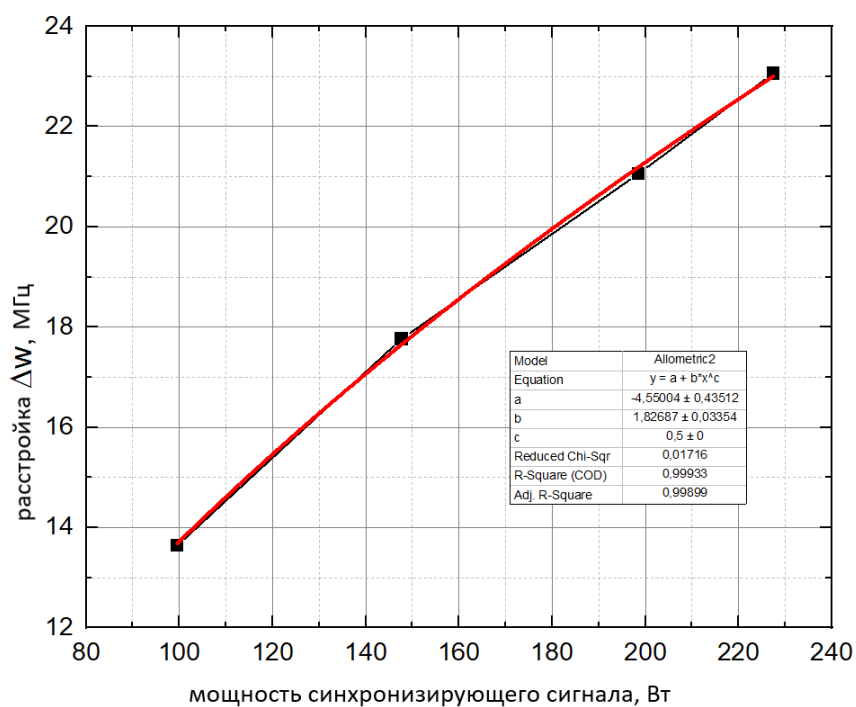


Рис. 41 – Зависимость полосы синхронизации от уровня навязываемой мощности для установки входной мощности на блоке питания магнетрона 2000Вт. Красным - аппроксимация по критерию захвата Адлера

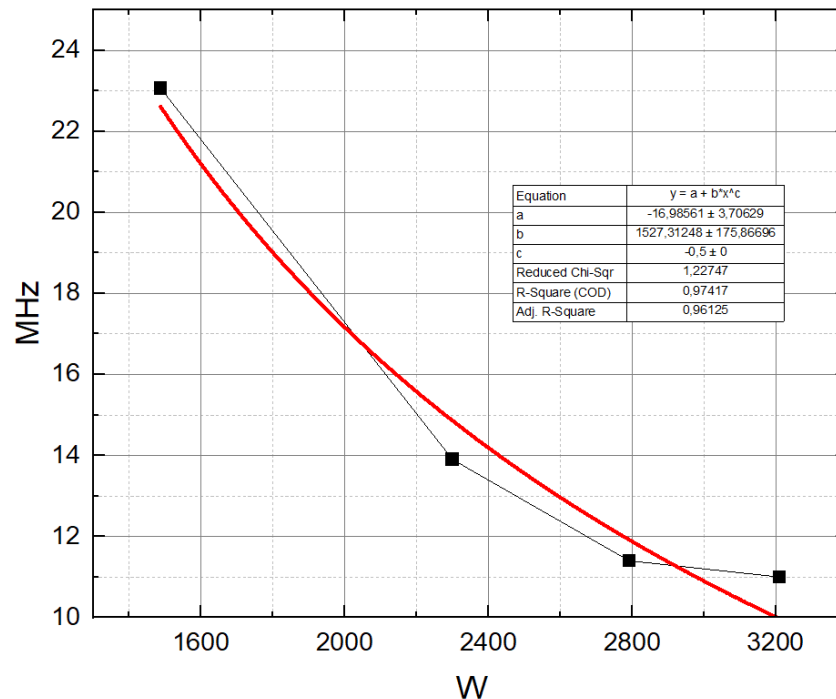


Рис. 42 – Полная ширина полосы синхронизации в зависимости от выходной мощности магнетрона при максимальном синхронизирующем сигнале +4 dBm. Красным показана аппроксимация экспериментальных точек по критерию захвата Адлера

2.5 Проектирование сумматора

Небольшой обзор актуальных схем суммирования сигналов магнетронов, проведенный в 1.5, выводит следующие требования к устройству суммирования.

Во-первых, конструкция устройства должна обеспечивать передачу большой мощности сигнала, поэтому из всех линий передач выбирается схема суммирования с волноводами.

Во-вторых, необходима компактность и универсальность схемы. Компактность подразумевает минимальные размеры длин волноводов для минимизации потерь. Универсальность означает возможность работы с большим количеством вариантов схем синхронизации магнетронов.

Помимо таких основных параметров, как согласованность портов и максимальная эффективность передачи сигналов, к устройству предъявляются такие практические требования, как простота конструкции и отсутствие сложностей в изготовлении.

Для решения всех поставленных задач была взята схема суммирующего устрой-

ства, показанная на рисунке 43. Сумматор представляет из себя пятипортовое устройство с четырьмя боковыми входами и одним центральным выходом.

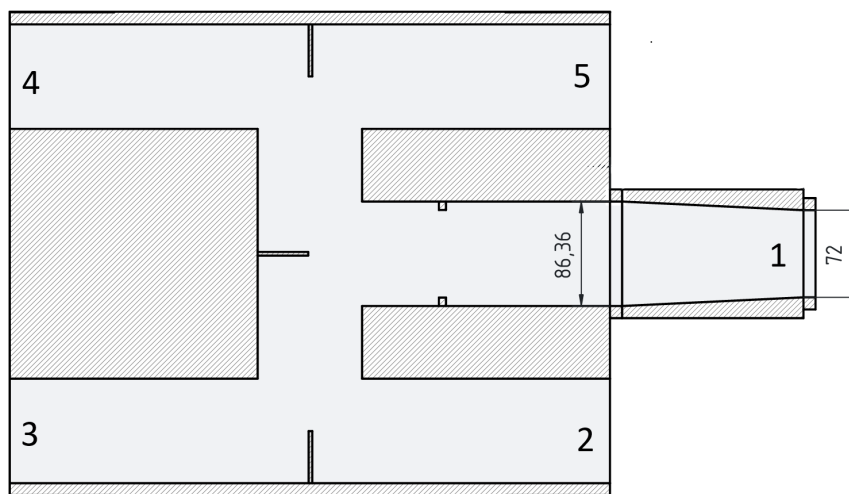


Рис. 43 – Схема сумматора в разрезе, указаны номера портов. Порт 1 - выходной суммарный, порты 2-5 - входные порты.

Размеры волновода соответствуют стандарту WR340. Характеристики стандарта WR340 приведены в таблице 8 ниже. Такой же стандарт применяется на участке волновода, в который выводится мощность магнетрона.

Таблица 8 – Технические характеристики волновода WR340

Рекомендуемый диапазон частот	2,2 - 3,3 ГГц
Тип волновода	Прямоугольный
Размер фланца, EIA WR	3.4(86.36 mm) x 1.7 (43.18 mm)
Диапазон волновода	S
Частота отсечки основной моды	1.736 ГГц
Частота отсечки следующей моды	3.471 ГГц

Помимо основного размера волновода в выходном канале есть конусообразное сужение до размеров 72*34 мм, что продиктовано размерами фланца узла ввода мощности на ускоряющей структуре.

В волноводных каналах сумматора расположены вставки для согласования портов и баланса распределения мощности из входных плечей. Их положение и размеры определяют основные частотные характеристики сумматора.

Создание геометрии и её оптимизация выполнялись в программном пакете CST Studio. Основными параметрами для оптимизации были размеры и положение вставок. Результаты оптимизированной геометрии представлены ниже.

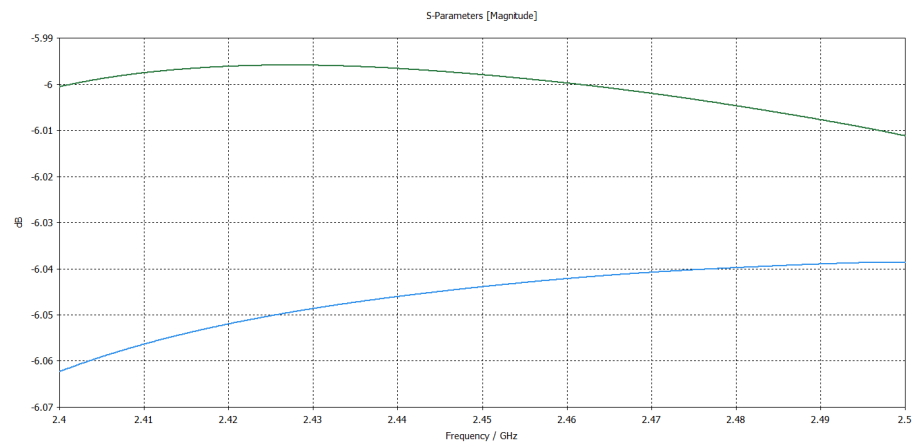


Рис. 44 – S21 и S31 (номера портов как на схеме выше)

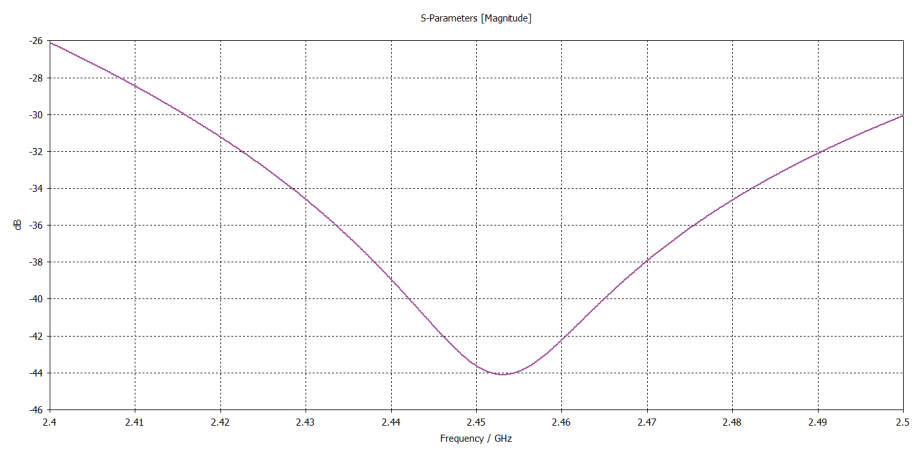


Рис. 45 – S11

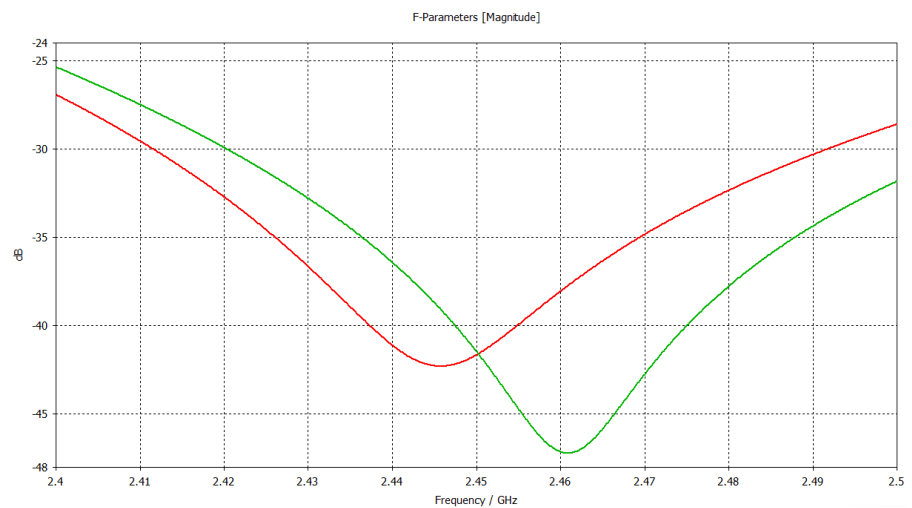


Рис. 46 – F2 и F3 при синфазном сложении равных по амплитуде всех 4 сигналов

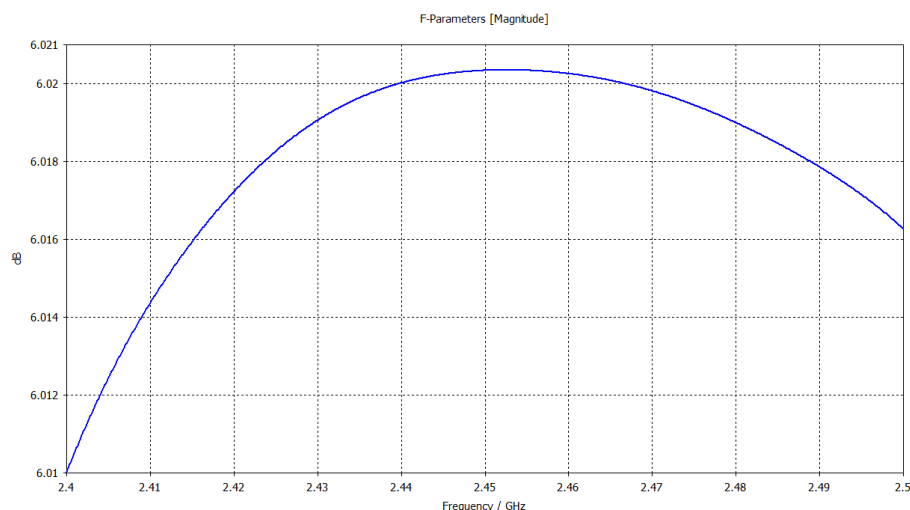


Рис. 47 – F1 при аналогичных условиях

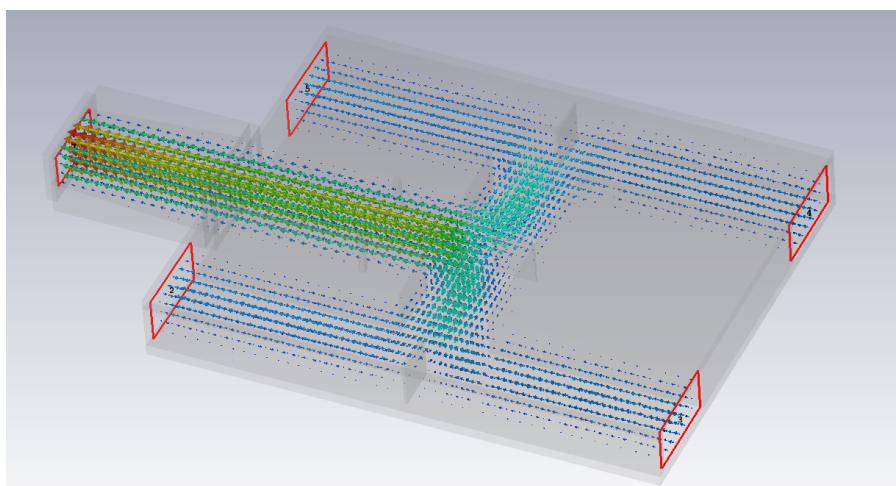


Рис. 48 – Поток мощности при сложении одинаковых синфазных сигналов

В качестве критериев оптимизации использовались S-параметры сумматора (который при возбуждении выходного порта работал в качестве делителя), а также F-параметры при возбуждении одновременно всех четырех входных портов. Как видно из приведенных графиков, удалось подобрать внутреннюю геометрию сумматора таким образом, чтобы обеспечить равное распределение мощности по плечам в случае использования сумматора как делителя (графики 44 и 45), а также максимизировать F-параметр выходного порта в случае синфазного сложения сигналов (графики 46 и 47).

После моделирования были составлены чертежи, по которым был изготовлен сумматор из алюминия путем фрезерования. После изготовления сумматор был проверен с помощью векторного анализатора, результаты измерений указаны в таблице 9.

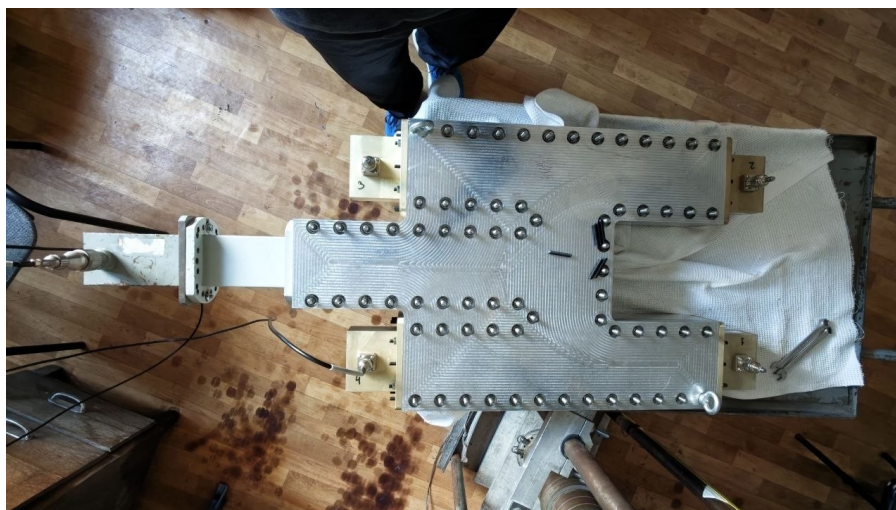


Рис. 49 – Внешний вид сумматора во время замеров рабочих характеристик на векторном анализаторе

Таблица 9 – S-параметры первого порта

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

Таблица 10 – S-параметры второго порта

S-параметр	Измеренное ослабление, дБ	Измеренный набег фазы, °	Расчётное ослабление, дБ
$S_{1,2}$	6,04	132	6,0
$S_{4,2}$	13,0	95	12,0
$S_{3,2}$	3,5	126	3,6
$S_{5,2}$	13,0	93	12,0

Полученные результаты хорошо согласуются с предсказанными теорией, поэтому разработку и изготовление сумматора можно признать удачной.

2.6 Эксперимент по суммированию мощностей

2.6.1 Описание схемы суммирования

Схема суммирования магнетронов выбрана близкой к [19]. В упрощенном варианте она выглядит следующим образом (см. рис. 50).



Рис. 50 – Схема суммирования четырех магнетронов

В качестве генератора используется уже упомянутый APSIN 3000. Он позволяет изменять частоту и мощность генерируемого сигнала через LAN-интерфейс, что удобно для проведения эксперимента. Сигнал генератора делится на 4 равные части с помощью делителя Вилкинсона. Стоит отметить, что два порта делителя смещены по фазе относительно двух других на 90 градусов. Для компенсации этой разницы были изготовлены четыре коаксиальных кабеля, два из которых имели дополнительный набег фазы приблизительно в 90 градусов на частоте 2450 МГц. Набор изготовленных кабелей был размещен в участке СВЧ-тракта между фазовращателями и усилителями.

В схеме используются ручные аттенюаторы с ослаблением 2,5-17,7 дБ, которые позволяют регулировать уровень мощности, идущий на усилители и затем на соответствующие магнетроны. Это позволяет независимо настраивать уровень мощности сигнала, синхронизирующего каждый магнетрон.

Критически важные элементы схемы - фазовращатели. С их помощью настраивается фаза сигнала, синхронизирующего каждый магнетрон. Так как синхронизированный магнетрон вносит свою разность фаз, жестко заданную при определенной расстройке, выходной мощности магнетрона и мощности сигнала инжекции (см. 11), то с помощью фазовращателя можно подогнать фазы всех четырех магнетронов так, чтобы их сигналы складывались синфазно на выходном порту сумматора.

Схема суммирования спроектирована таким образом, чтобы минимально задействовать фазовращатели. Для этого длины всех коаксиальных кабелей (исключая уже упомянутые 4 кабеля, два из которых с дополнительным сдвигом фазы около 90 градусов) на одних и тех же параллельных участках схемы имеют одинаковую длину. Это позволяет использовать в каждом плече по два фа-

зовращателя, суммарный максимальный набег фазы которых составляет около 100 градусов - такого диапазона подстройки должно хватить для компенсации всех неконтролируемых сдвигов фазы в СВЧ-тракте каждого магнетрона.

В схеме применяется водяное охлаждение магнетронов (в соответствии с паспортными данными не менее 2 л/мин) последовательно соединенными с вентилями, отдельно охлаждается выходной циркулятор, согласованная нагрузка на нем, панели охлаждения усилителей. В охлаждающий контур выходной нагрузки сумматора встроены входные и выходные термосопротивления типа PT100, а также расходомер AMFLO MAG Smart. Термодатчики и расходомер подключены к калькулятору калориметрической мощности CALEC ST-II, с помощью которого снимались показания выходной мощности.

Помимо калориметрии в установке использовались детекторные головки, устанавливаемые на коаксиальные выходы волноводов. С их помощью определялась выходная мощность магнетронов, поглощаемая вентилями мощность, выходная мощность с усилителей, выходная мощность с сумматора и отраженная от нагрузки. Также в качестве измерительного оборудования использовался ваттметр ПрофКип МЗ-54 и анализатор спектра R&S серии FSL.

Калибровка входной мощности на детекторной головке производилась с помощью генератора APSIN 3000. Результаты калибровки представлены на графике 52.

На схеме 51 указаны все основные элементы СВЧ-тракта. Сигнал с генератора G поступает на делитель мощности с 4 выходными портами D. Затем каждый сигнал проходит через аттенюатор, фазовращатель, вентиль и поступает в усилитель А. После усилителя располагаются направленные ответвители с последующими вентилями, с которых синхронизирующий сигнал по коаксиальному кабелю передается на коаксильно-волноводный переход. Через вентиль и циркулятор мощность проходит к магнетрону. Магнетроны М передают свою мощность на входные порты сумматора. После выходного порта установлен направленный ответвитель 40 дБ, после которого установлена нагрузка с жидкостным охлаждением. Красными и синими стрелками указаны элементы с водяным охлаждением. Не указаны охлаждающие пластины, которые отбирают излишки тепла от усилителей.

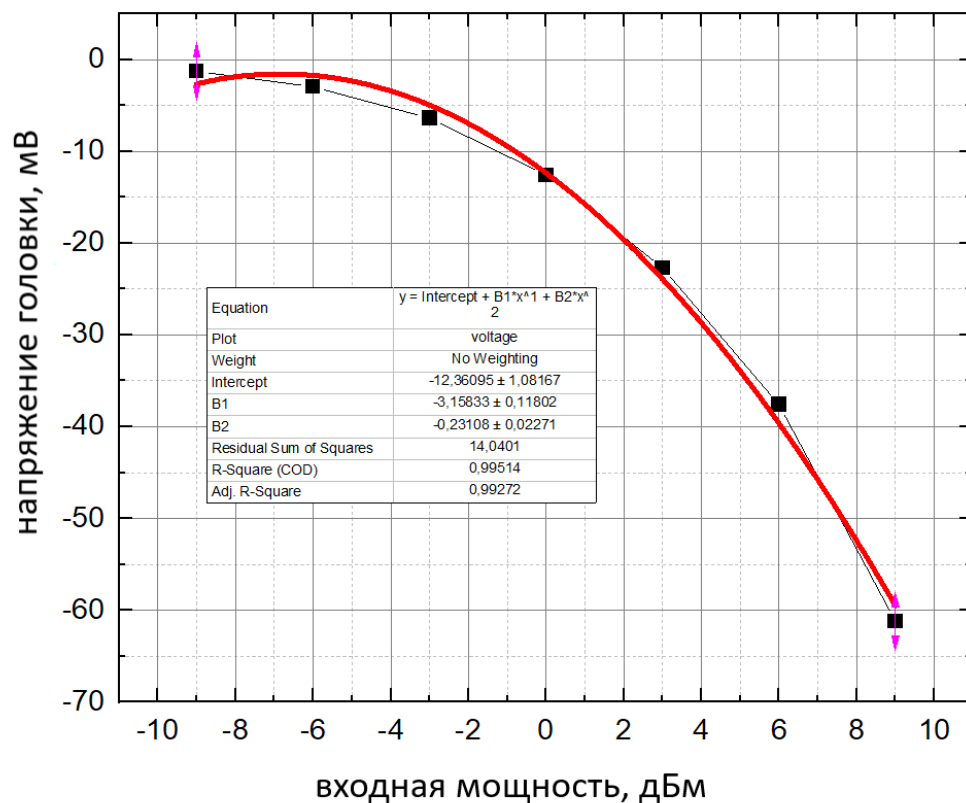


Рис. 52 – Калибровка детекторной головки. Зависимость показаний детекторной головки на осциллографе с входным сопротивлением 50 Ом от уровня входной мощности

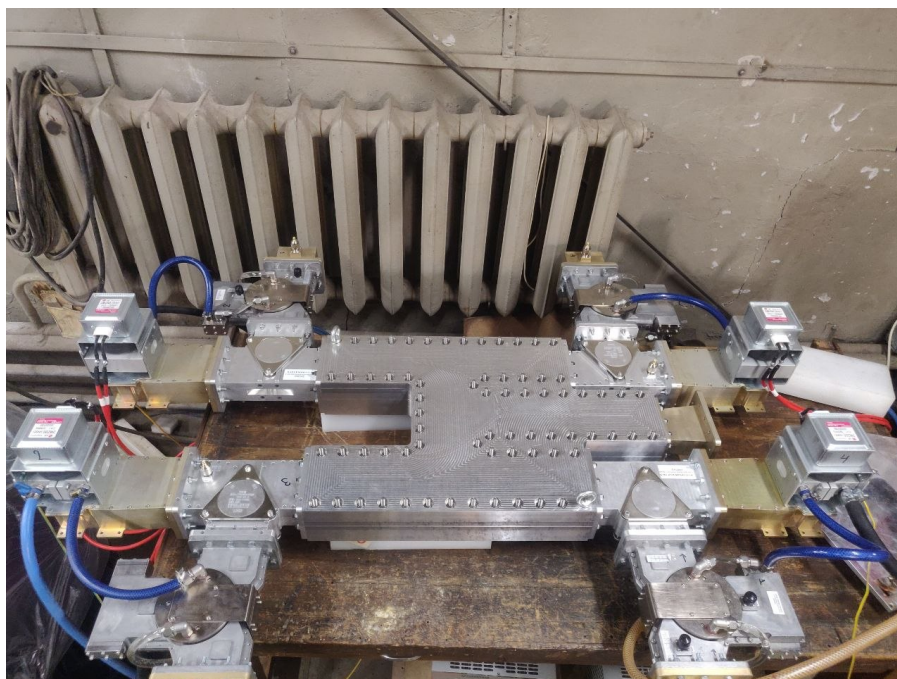


Рис. 53 – Внешний вид сумматора после подключения к нему магнетронов

2.6.2 Результаты

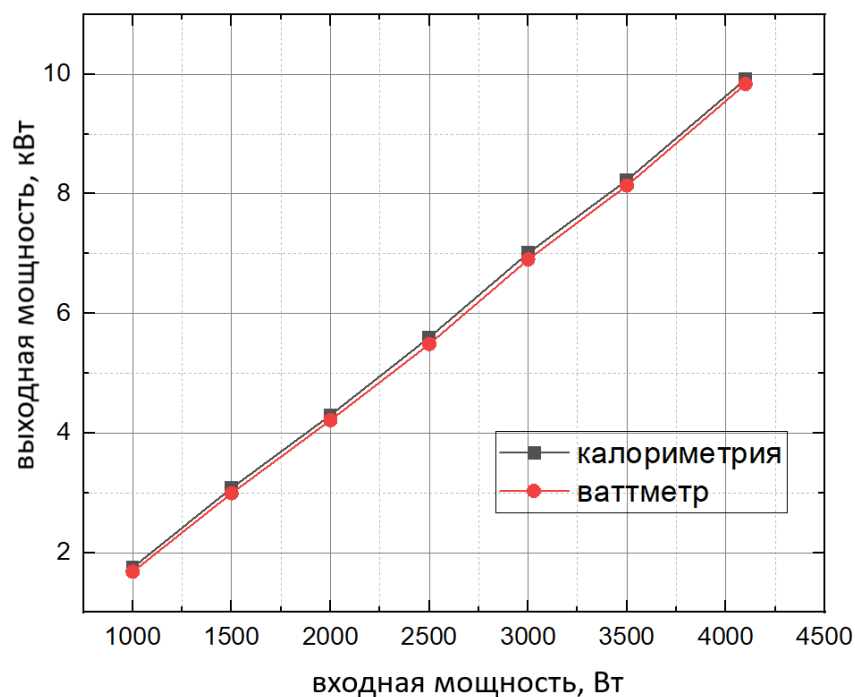


Рис. 54 – Суммарная выходная мощность установки в зависимости от входной мощности на каждый источник питания магнетрона

Основные результаты иллюстрирует график 54. На нем отображены данные, снятые калориметрическим методом с согласованной нагрузки, подключенной

к выходному порту сумматора, а также данные, снятые ваттметром ПрофКип МЗ-54 с выхода направленного ответвителя с ослаблением 40 дБ, установленным также на выходе сумматора. Показатели мощности снимались после тщательной настройки фазы каждого магнетрона.

Настройка фазы состояла в следующем. Фазовращатель каждого магнетрона устанавливался таким образом, что любое его отклонение приводило к уменьшению выходной мощности. Уровень выходной мощности контролировался по калориметрии в выходной нагрузке сумматора и по сигналу с направленного ответвителя с ослаблением 40 дБ, который был установлен непосредственно перед согласованной нагрузкой.

Таблица 11 – Значения уставки навязываемой частоты магнетронам от уровня входной мощности одного источника питания магнетрона. Все четыре источника питания имеют одинаковую уставку мощности

Входная мощность, Вт	Частота генератора, МГц
1000	2450
1500	2450
2000	2450
2500	2451
3000	2452
3500	2454
4100	2454

В таблице 11 указаны частоты, которые выставлялись на генератора запирающего сигнала для каждой мощности, указанной на графике 54. Как видно из таблицы, для максимальной выходной мощности магнетронов была выбрана частота синхронизации 2454 МГц. По уровню выходной мощности и отсутствию шумов на детекторных головках, установленных на направленных ответвителях 60 дБ на волноводных вентиллях, можно сказать, что магнетроны были успешно синхронизированы на этой частоте при данной мощности. Таким образом отличие собственной частоты магнетрона №3 от остальных частот магнетронов было успешно преодолено.

В отдельном измерении синхронизация магнетронов была успешно осуществлена на максимальной мощности 4100 Вт источников питания в диапазоне частот от 2453,5 МГц до 2456,8 МГц. Такой диапазон покрывает возможные отклонения резонансной частоты ускоряющей структуры при её изготовлении, а также зависимость резонансной частоты от температуры стенок ускоряющей

структуры, характерный сдвиг которой составляет порядка 50 кГц на 1 кВт постоянной мощности.

В таблице 12 сведены данные калориметрических измерений выходной мощности. Столбец «Свободные магнетроны» получен арифметическим сложением мощностей каждого из четырёх магнетронов, измеренных по отдельности в режиме свободной генерации (схема на рис. 55). Столбец «Синхронизация» — сумма мощностей магнетронов, синхронизированных внешним сигналом мощностью около 100 Вт, но по-прежнему работающих сразу на согласованную нагрузку по схеме 55. Частота синхронизирующего сигнала соответствует уровню входной мощности источника питания магнетрона согласно таблице 11. Столбец «Суммирование» — выходная мощность всей системы, когда сигналы четырёх синхронизированных магнетронов складывались в общем сумматоре (рис. 51) - по этим данным построен график 54.

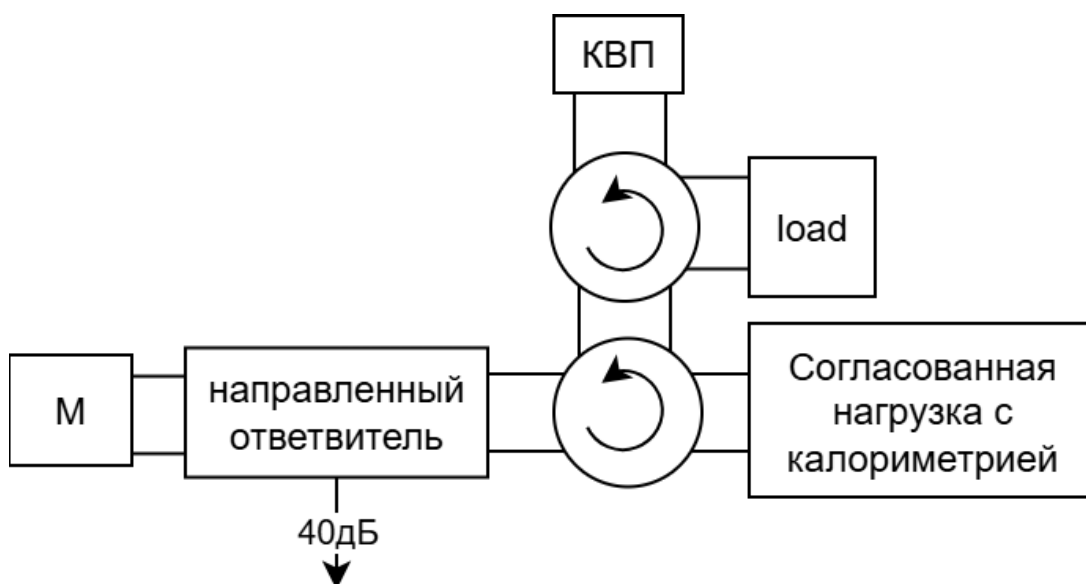


Рис. 55 – Схема измерения мощности магнетронов

Как видно из таблицы, мощность при суммировании оказывается несколько выше, чем арифметическая сумма мощностей отдельных магнетронов, работающих как в свободном режиме, так и в условиях синхронизации. На графике 56 показано отношение $P_{\text{суммарная}}/P_{\text{просуммированная}}$, где $P_{\text{просуммированная}}$ — суммарная мощность четырёх магнетронов (столбцы 1 и 2 таблицы 12). Это отношение во всех точках превышает единицу, что физически невозможно для пассивного сумматора и указывает на вклад неучтённых в простом расчёте факторов.

Таблица 12 – Суммарная выходная мощность по данным калориметрии

Входная мощность БП, Вт	Свободные магнетроны, кВт	Синхронизация (без сложения), кВт	Суммирование, кВт
1000	1,52	1,67	1,75
2000	4,03	4,24	4,30
3000	6,70	6,80	7,01
4100	9,64	9,61	9,92

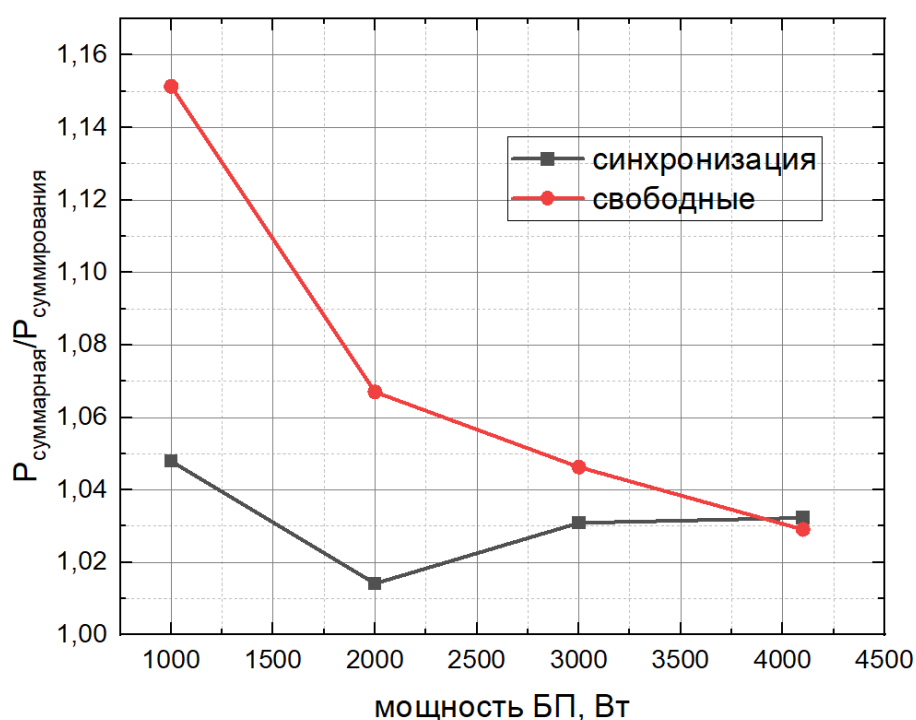


Рис. 56 – Отношение мощности суммарной к просуммированной при различной уставке мощности источника питания магнетрона

Одна из возможных причин такого превышения — некорректный учет мощности синхронизирующих усилителей, которая в режиме суммирования может достигать $4 \times 200 \approx 800$ Вт. Колонка "Синхронизация" таблицы 12 учитывает дополнительную мощность усилителей порядка 100 Вт, но мощность синхронизирующего сигнала прямо не соответствует той, которая была в эксперименте с сумматором (там уровень запирающего сигнала был порядка 400-500Вт). Также интересно отметить, что добавление мощности усилителей не всегда приводит к увеличению выходной мощности магнетрона, что видно по последней строке таблицы 12. Кроме того, на результатах сказываются погрешности калориметрии,

которые зависят от погрешностей измерений расхода жидкости и температуры с датчиков.

Таким образом, прямое деление выходной мощности сумматора на сумму мощностей отдельных магнетронов не даёт корректной величины КПД суммирования — для точного расчёта необходимы синхронные измерения мощности на каждом входе сумматора и учёт мощности усилителей. По этой причине не совсем корректно будет оценивать КПД по данным таблицы 3, так как значения мощности получены здесь в другой конфигурации установки и другим методом измерения (с помощью проходного ваттметра). Тем не менее, близость отношения мощностей, измеренных по калориметрии, к единице и абсолютное значение выходной мощности около 9,9 кВт при входной мощности БП $4 \times 4,1$ кВт свидетельствуют о высокой эффективности разработанной системы.

Помимо уровня выходной мощности важным фактором является время включения установки. В эксперименте была возможность осуществить подачу мощности двумя путями - одновременное включение магнетронов при уже работающих усилителях, задающих сигнал синхронизации, либо одновременное включение усилителей при уже работающих магнетронах в свободном режиме.

Временные процессы этих включений показаны на осциллограммах ниже. На графике 57 показано включение магнетронов. Характерное время выхода на стационарный режим - порядка трех секунд. На графике 58 показано включение усилителей. Желтая линия - сигнал включения усилителей, по которому выставлялся триггер. Синяя линия - сигнал с детекторной головки на выходе сумматора. Характерное время процесса составляет порядка 10 мкс.

Приведенные измерения по оценке времени включения такого источника питания могут оказаться полезными в случае, если в ускоряющую структуру необходимо начать подавать СВЧ-мощность в течение малого промежутка времени (к примеру, при использовании ускорителя в досмотровом комплексе). Подходящим режимом будет включение подачи мощности через включение усилителей (при заранее включенных магнетронах), так как подача мощности через включение магнетронов осуществляется за много большее время. Однако такой метод требует дополнительных затрат энергии на поддержание работы магнетронов в режиме свободной генерации во время ожидания включения синхронизирующего сигнала, что отрицательно сказывается на экономической выгоде использования такого источника.

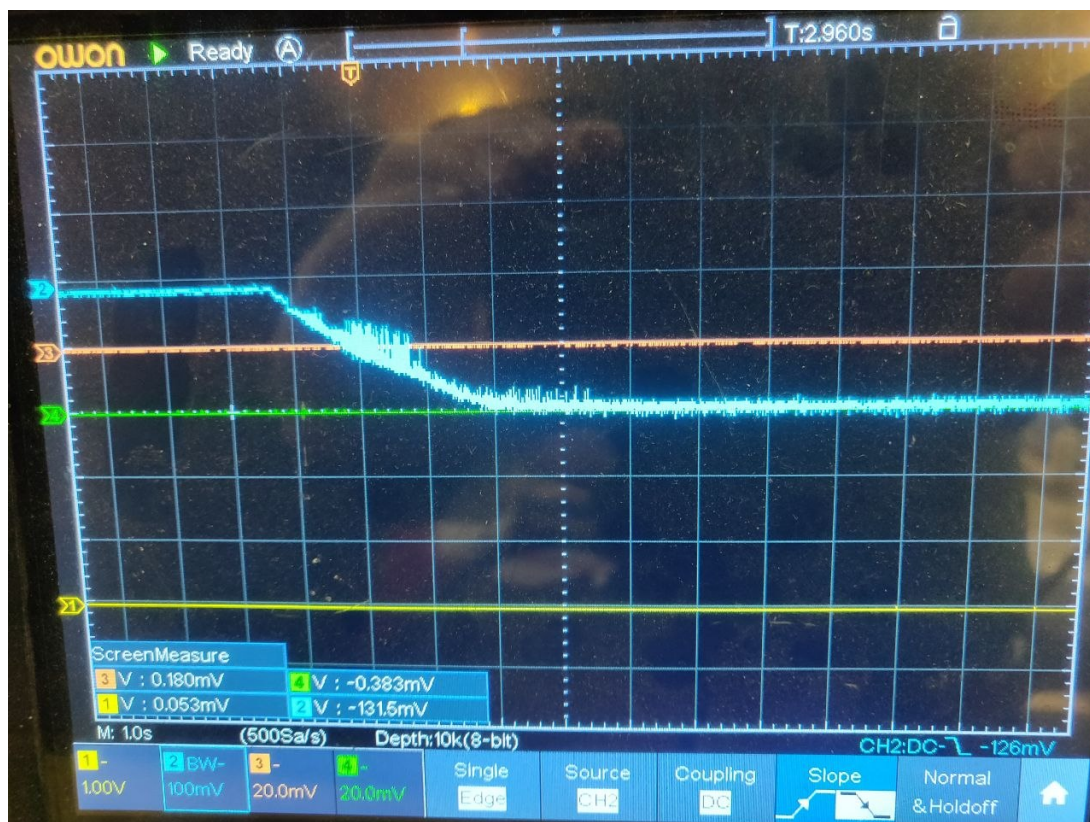


Рис. 57 – Временная шкала нарастания подачи мощности при включении магнетронов

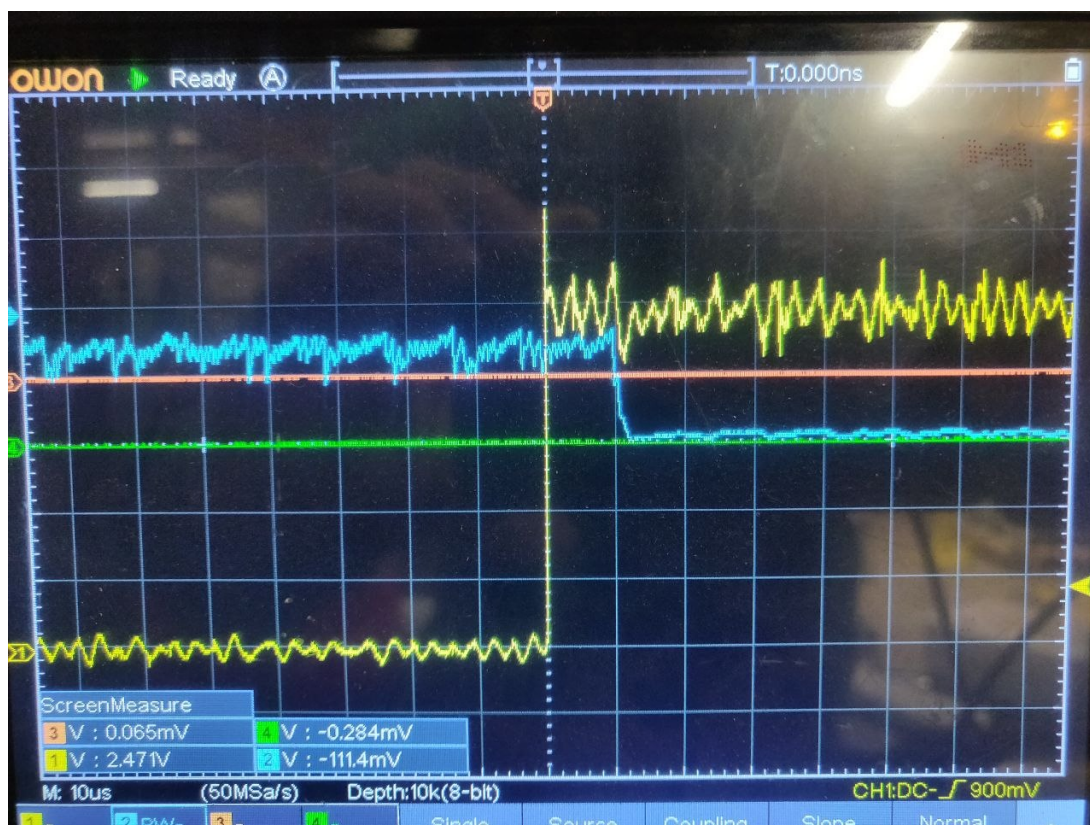


Рис. 58 – Временная шкала нарастания подачи мощности при включении синхронизирующих усилителей

ВЫВОДЫ

Разработан и экспериментально исследован СВЧ-тракт для суммирования мощностей четырёх промышленных магнетронов с целью создания экономически эффективного источника питания ускоряющей структуры. Изготовлен и испытан пятипортовый волноводный сумматор на базе стандарта WR340 с оптимизированной геометрией, обеспечивающий сложение сигналов от магнетронов в непрерывном режиме.

Измерены характеристики четырёх магнетронов LG 2M290. Показано, что выходная мощность каждого прибора составляет около 3 кВт, что соответствует паспортным данным. Рабочие частоты трёх магнетронов (№1, 2, 4) находятся в диапазоне 2454,5–2454,8 МГц, тогда как магнетрон №3 имеет собственную частоту около 2458,3 МГц. Экспериментально подтверждён эффект смещения частоты с ростом анодного тока (то же самое, что рост мощности); для магнетрона №4 коэффициент смещения составил 21 МГц/А.

Исследовано явление внешней синхронизации магнетрона. Для магнетрона №3 измерены границы полос захвата при различных уровнях выходной мощности (2000–4000 Вт) и мощности синхронизирующего сигнала (до 228 Вт). Эксперимент показал хорошее соответствие теоретическому критерию Адлера для автогенераторов. Показано, что мощности синхронизирующего сигнала 200 Вт достаточно для удержания магнетрона №3 в области частот остальных трёх приборов (2454 МГц).

Продемонстрировано когерентное суммирование мощностей четырёх синхронизированных магнетронов. Максимальная выходная мощность системы составила 9,9 кВт при суммарной входной мощности источников питания 16 кВт. КПД суммирующей системы корректно установить не удалось, однако по результатам измерений можно говорить о большой эффективности установки.

Показана возможность перестройки рабочей частоты системы. Синхронизация всех четырёх магнетронов успешно осуществлялась в диапазоне от 2453,5 до 2456,8 МГц при максимальной мощности, что перекрывает типовые отклонения резонансной частоты ускоряющей структуры.

Время начала подачи мощности в ускоряющую структуру определено на временной шкале порядка 10 мкс за счет включения синхронизирующих усилителей, что позволяет использовать исследуемый источник питания в ускорителе.

телях, работа которых требует малого времени включения пучка.

Основными направлениями дальнейшего исследования являются: разработка автоматизации режимов работы и системы контроля; дальнейшие испытания для установления практических пределов работы установки в различных условиях; оптимизация работы всех элементов схемы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Лебедев И. В.* Техника и приборы СВЧ. Т. 2. Электровакуумные приборы СВЧ / под ред. Н. Д. Девяткова. — Москва : Высшая школа, 1972. — С. 376.
2. *Tahir M. I., Carter R., Dexter A.* Frequency and phase locking of a CW magnetron: with a digital phase locked loop using pushing characteristics : PhD thesis / Tahir Muhammed Imran, Carter Richard, Dexter Amos. — Lancaster University, 2008. — URL: <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/76594/>.
3. *Adler R.* A Study of Locking Phenomena in Oscillators // Proceedings of the IRE. — 1946. — Т. 34, № 6. — С. 351—357. — DOI: 10.1109/JRPROC.1946.229930.
4. Phase locked magnetrons as accelerator rf sources / T. Overett [и др.] // IEEE Particle Accelerator Conference. — IEEE, 1987. — С. 1464. — URL: <http://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987pac.conf.14640/abstract>.
5. *Chernogubovskij M., Danilin A.* Studying the synchronization process in the magnetron HF-supply system for the resonator accelerator. — 1989.
6. *Özbey B.* Design of an S-band Power Combiner System with Two Parallel Power Amplifiers and Phase Shifters : дис. ... маг. / Özbey Burak. — Ankara, Turkey : Bilkent University, 08.2011. — URL: <https://dspace2.bilkent.edu.tr/items/8c525b1e-797d-4c7c-944b-4151e421977d>.
7. Demonstration of a Scalable Magnetron Array Through Extracavity Coupling / W. Li [и др.] // IEEE Electron Device Letters. — 2025. — Т. 46, № 10. — С. 1877—1880. — DOI: 10.1109/LED.2025.3601902.
8. A 5.8-GHz Phased Array System Using Power-Variable Phase-Controlled Magnetron for Wireless Power Transfer / B. Yang [и др.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2020. — Ноябрь. — Т. 68, № 11. — С. 4951—4959. — ISSN 1557-9670. — DOI: 10.1109/TMTT.2020.3007187. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9159488>.

9. *Toit H. J. du, Villiers D. I. L. de.* A Fully Isolated N-Way Radial Power Combiner // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2020. — Т. 68, № 7. — С. 2531—2538. — DOI: 10.1109/TMTT.2020.2988673.
10. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / В. В. Заенцев [и др.]. — Москва : Советское радио, 1980. — С. 296.
11. A High-Efficiency Microwave Power Combining System Based on Frequency-Tuning Injection-Locked Magnetrons / X. Chen [и др.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2020. — Т. 67, № 10. — С. 4447—4452. — DOI: 10.1109/TED.2020.3013510.
12. A Power Combination System Based on Phase-Shifterless Scheme for Four Injection Locked S-Band Magnetrons / M. A. Shahid [и др.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2024. — Т. 52, № 3. — С. 744—752. — DOI: 10.1109/TPS.2024.3366181.
13. First demonstration and performance of an injection locked continuous wave magnetron to phase control a superconducting cavity / A. Dexter [и др.] // Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. — 2011. — Март. — Т. 14. — DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.14.032001.
14. Highly Efficient Microwave Power System of Magnetrons Utilizing Frequency-Searching Injection-Locking Technique With No Phase Shifter / C. Lai [и др.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2020. — Т. 68, № 10. — С. 4424—4432. — DOI: 10.1109/TMTT.2020.3006488.
15. Low-Noise Dual-Way Magnetron Power-Combining System Using an Asymmetric H-Plane Tee and Closed-Loop Phase Compensation / X. Chen [и др.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2021. — Февр. — Т. PP. — С. 1—1. — DOI: 10.1109/TMTT.2021.3056550.
16. Magnetron R&D for High Efficiency CW RF Sources for Industrial Accelerators / H. Wang [и др.] // Proc. IPAC'21 (Campinas, SP, Brazil). — JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 08.2021. — С. 2318—2321. — (International Particle Accelerator Conference ; 12). — ISBN 978-3-95450-214-1. — DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB348. — URL: <https://jacow.org/ipac2021/papers/tupab348.pdf>.

17. Microwave power combining system based on two injection-locked 15 kW CW magnetrons / H. Huang [и др.] // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. — 2015. — С. 1—3. — DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7166876.
18. Phase-Shifterless Power Controlled Combining Based on 20-kW S-Band Magnetrons With an Asymmetric Injection / Z. Liu [и др.] // IEEE Electron Device Letters. — 2018. — Т. 39, № 9. — С. 1425—1428. — DOI: 10.1109/LED.2018.2857808.
19. Coherent Power Combining of Four-Way Injection-Locked 5.8-GHz Magnetrons Based on a Five-Port Hybrid Waveguide Combiner / H. Huang [и др.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2024. — Т. 72, № 7. — С. 4395—4404. — DOI: 10.1109/TMTT.2023.3347549.
20. Experimental Studies on a Four-Way Microwave Power Combining System Based on Hybrid Injection-Locked 20-kW S-Band Magnetrons / Z. Liu [и др.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2018. — Ноябрь. — Т. PP. — С. 1—8. — DOI: 10.1109/TPS.2018.2876574.
21. Theoretical and Experimental Study on Frequency Pushing Effect of Magnetron / K. Li [и др.] // Chinese Physics B. — 2019. — Ноябрь. — Т. 28. — DOI: 10.1088/1674-1056/ab4d3d.

А Приложение А. Таблицы ослаблений элементов СВЧ-тракта

Таблица 13 – Ослабление для вентиляей.

Номер элемента	Направление	Значение, дБ
1	вход-выход	-0,4
	выход-вход	-20,1
	вход-нижний ответвитель	-62
	выход-верхний ответвитель	-60
2	вход-выход	-0,4
	выход-вход	-19,2
	вход-нижний ответвитель	-60
	выход-верхний ответвитель	-62
3	вход-выход	-0,3
	выход-вход	-18.5
	вход-нижний ответвитель	-60
	выход-верхний ответвитель	-61
4	вход-выход	-0,3
	выход-вход	-17.7
	вход-нижний ответвитель	-61
	выход-верхний ответвитель	-61

Таблица 14 – Ослабление для циркуляторов.

Номер элемента	Ослабление	Значение, дБ
1	вход-выход	-0,5
	вход-нагрузка	-26,4
	вход-ответвитель	-60,8
	выход-вход	-29,7
	выход-нагрузка	-0,5
2	вход-выход	-0,5
	вход-нагрузка	-27,4
	вход-ответвитель	-61
	выход-вход	-37,3
	выход-нагрузка	-0,6
3	вход-выход	-0,5
	вход-нагрузка	-25,6
	вход-ответвитель	-61
	выход-вход	-32,1
	выход-нагрузка	-0,7
4	вход-выход	-0,5
	вход-нагрузка	-26,8
	вход-ответвитель	-60
	выход-вход	-29,2
	выход-нагрузка	-0,7

Таблица 15 – Ослабление для направленного ответвителя.

Ослабление	Значение, дБ
вход-выход	-0,4
вход-ближний ответвитель	-40,9
вход-ответвитель дальний	-60
выход-ответвитель ближний	-41
выход-ответвитель дальний	-61

В Приложение Б. Измеренные рабочие характеристики магнетронов №2-4

Таблица 16 – Магнетрон 2 (2311 – 000004)

Устав- ка, Вт	Ток анода, мА	HV, кВ	P, W	F left, MHZ	F max, MHZ	F right, MHZ	T housing, °C
0	0	0,00	0,026	--	--	--	14
1000	133	4,22	0,068	2447,1	2448,1	2448,8	21
1500	241	4,25	0,106	2448,1	2449,7	2450,7	24
2000	350	4,25	0,143	2448,4	2450,6	2451,8	26
2500	457	4,26	0,181	2449,4	2452,5	2453,8	30
3000	564	4,28	0,220	2452,0	2454,1	2454,5	34
3500	686	4,19	0,259	2453,5	2454,5	2455,0	37
4000	783	4,27	0,292	2453,9	2454,8	2455,2	39

Таблица 17 – Магнетрон 3 (2311 – 000002)

Устав- ка, Вт	I_a , мА	U_a , кВ	P, Вт	f_L , МГц	f_{max} , МГц	f_R , МГц	T, °C
0	0	0,00	0,027	--	--	--	13
1000	131	4,32	0,070	2446,6	2448,5	2449,6	20
1500	236	4,36	0,108	2449,3	2449,6	2451,8	22
2000	340	4,37	0,146	2449,6	2452,3	2453,0	26
2500	443	4,40	0,185	2452,2	2453,8	2455,6	29
3000	546	4,41	0,226	2453,5	2457,2	2458,0	31
3500	649	4,42	0,264	2455,2	2457,8	2458,3	32
4000	752	4,44	0,303	2457,0	2458,3	2458,7	33

Таблица 18 – Магнетрон 4 (2311 – 000005)

Устав- ка, Вт	I_a , мА	U_a , кВ	P , Вт	f_L , МГц	f_{max} , МГц	f_R , МГц	T, °C
0	0	0,00	0,022	--	--	--	16
1000	135	4,22	0,062	2444,5	2445,6	2446,6	26
1500	240	4,26	0,098	2446,7	2447,6	2448,4	27
2000	344	4,31	0,135	2447,9	2449,1	2450,6	30
2500	447	4,34	0,171	2449,3	2451,7	2452,8	35
3000	552	4,36	0,208	2450,7	2453,2	2454,0	39
3500	657	4,37	0,245	2451,6	2454,0	2454,9	42
4000	761	4,37	0,282	2452,8	2454,4	2454,9	45

С Приложение В. Диапазоны расстройки частоты для магнетрона №3

Таблица 19 – Мощность магнетрона 2000 Вт, стартовая частота 2452 МГц

Мощность синтезатора, дБм	f_L , МГц	f_c , МГц	f_R , МГц
-2	2445,28	2452,00	2458,92
0	2443,00	2452,00	2460,76
2	2440,97	2452,00	2462,03
4	2439,73	2452,00	2462,79

Таблица 20 – Мощность магнетрона 3000Вт (стартовая частота 2455 МГц):

Мощность синтезатора, дБм	f_L , МГц	f_c , МГц	f_R , МГц
-2	2451,2	2455,0	2459,56
0	2449,7	2455,0	2460,7
2	2448,7	2455,0	2461,7
4	2448,3	2455,0	2462,2

Таблица 21 – Мощность магнетрона 3500Вт (стартовая частота 2457 МГц):

Мощность синтезатора, дБм	f_L , МГц	f_c , МГц	f_R , МГц
-2	2453,4	2457,0	2459,8
0	2452,4	2457,0	2461,0
2	2451,3	2457,0	2462,0
4	2451,0	2457,0	2462,4

Таблица 22 – Мощность магнетрона 4000Вт (стартовая частота 2458 МГц):

Мощность синтезатора, дБм	f_L , МГц	f_c , МГц	f_R , МГц
-2	2454,3	2458,0	2461,0
0	2453,3	2458,0	2461,9
2	2452,4	2458,0	2462,7
4	2452,2	2458,0	2463,2