

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ МАГНЕТРОНОВ 3-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

И.Иванов, Н.Скрипкин, К.Ходатаев, С.Боев, А.Вагин

Создание эффективных устройств для суммирования мощностей магнетронных генераторов – одно из ключевых направлений развития СВЧ-техники. Активное освоение 3-миллиметрового диапазона длин волн требует проведения экспериментальных работ по исследованию процессов синхронизации и суммирования мощностей с учетом режимов генерации магнетронов и конструкции внешних электромагнитных устройств в данном диапазоне. Целью исследований, описанных в данной статье, является подтверждение возможности когерентной синхронизации и суммирования мощности магнетронных генераторов 3-миллиметрового диапазона и создания прототипов суммирующих устройств.

Экспериментальные работы по синхронизации магнетронов сантиметрового и 8-миллиметрового диапазонов [1, 2, 3, 4, 5] показали возможность создания устройств для когерентного сложения мощностей подобных магнетронов. Исследование процессов сложения мощностей генераторов 3-миллиметрового диапазона длин волн требует учета особенностей работы СВЧ-устройств в этом диапазоне.

К таким особенностям относятся: снижение электрической прочности волноводных устройств вследствие уменьшения геометрических размеров (максимальная мощность при использовании стандартного сечения  $2,4 \times 1,2$  мм ограничена уровнем около 15 кВт), увеличение потерь при передаче СВЧ-сигналов по волноводным трактам (около 3 дБ/м), относительно низкий КПД магнетронных генераторов (не более 10%) вследствие резкого уменьшения пространства взаимодействия и относительно большой разброс магнетронов по собственной частоте генерации, причиной которого является сравнительно невысокая точность изготовления этих устройств при крайне

малых геометрических размерах пространства взаимодействия.

Кроме того, режимы импульсной работы подобных магнетронов (длительность импульса 50...200 нс) определяют дополнительные требования к системам высоковольтного питания магнетронов. Особую роль играют переходные процессы при синхронном включении нескольких генераторов, накладывающие дополнительные требования к длительности фронтов питающего напряжения и коэффициентам отражения синхронизирующих устройств. В ряде случаев эти проблемы приводят к необходимости перехода на квазиоптические способы обработки сигналов.

Рассмотрим результаты экспериментальных работ по исследованию самосинхронизации магнетронных генераторов.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для исследования процесса синхронизации нескольких магнетронов со сложением когерентного излучения в эфире или пассивной нагрузки была разработана и изготовлена экспериментальная установка,

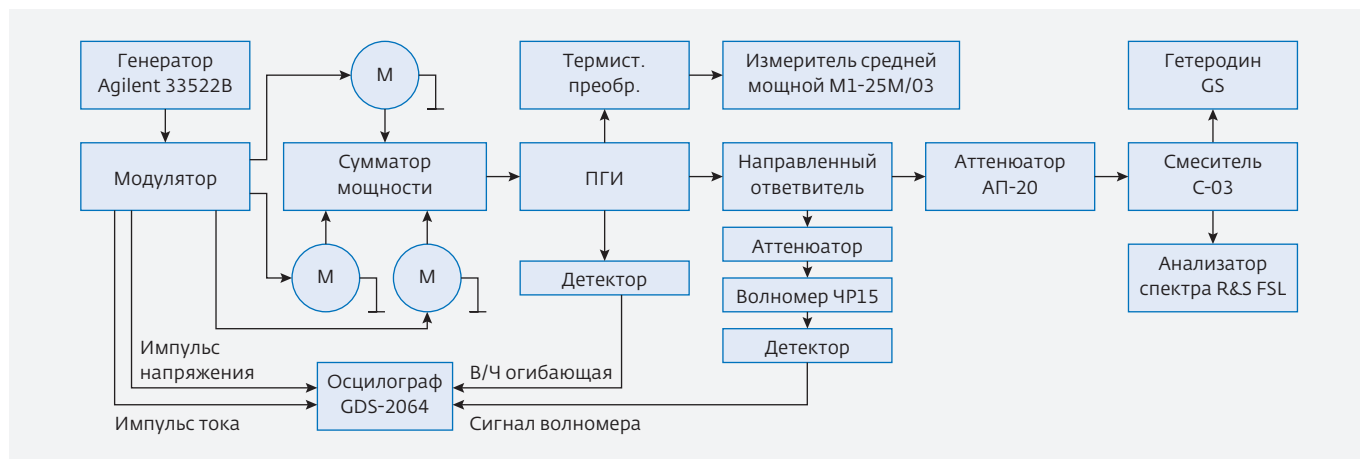


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки (волноводный вариант)

включающая в себя блок из трех магнетронов с источником импульсного питания (модулятором), систему синхронизации и сложения мощностей (сумматор), антенную и зеркальную системы, систему диагностики и блок управления (рис.1–2).

Модулятор, разработанный в ИСЭ СО РАН (г. Томск), позволяет регулировать уровень выходного импульсного напряжения и длительность импульса как в режиме синхронного запуска, так и в режиме задержки по требуемым каналам. Особенностью модулятора является использование трех сильноточных твердотельных коммутаторов с высоковольтным импульсным трансформатором в каждом канале. Кроме того, в модулятор интегрированы системы обеспечения накала и воздушного охлаждения магнетронов.

Основные параметры одного канала модулятора:

- импульсное напряжение: не более 13 кВ;
- длительность фронта (по уровню 0,1/0,9): не менее 100 нс;
- длительность спада (по уровню 0,1/0,9): не более 400 нс;
- длительность импульса тока (по уровню 0,5): 40...350 нс;
- частота повторения модулирующих импульсов: не более 2,5 кГц;
- ток анода магнетрона по одному каналу: не более 9 А.

## СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ

Импульсное напряжение измерялось с использованием делителей компании Tektronix. Измерения импульсных токов магнетронов проводились с помощью датчиков тока типа "пояс Роговского", встроенных в модулятор.

В состав диагностических приборов для измерения параметров генерации вошли: прибор горячих измерений (ПГИ), представляющий собой систему

направленных ответвителей с согласованной нагрузкой; рассогласователь с устройством изменения фазы; встроенный детектор СВЧ-излучения и управляющие аттенюаторы; calorиметрический измеритель средней мощности; анализатор спектра с гетеродином и смесителем; проходной измерительный резонатор с детекторной секцией. В процессе экспериментов регистрировались следующие параметры: импульсное анодное напряжение и импульсный катодный ток по каждому из каналов, огибающая высокочастотного импульса, спектр высокочастотных выходных сигналов, центральная частота на выходе установки, средняя мощность высокочастотного излучения. Кроме того, при выводе излучения в свободное пространство использовалась безэховая камера со специальным поглощающим покрытием и экраном, позволяющим визуализировать двухмерную проекцию



Рис.2. Модулятор с магнетронами, элементы волноводного тракта и измерительная аппаратура

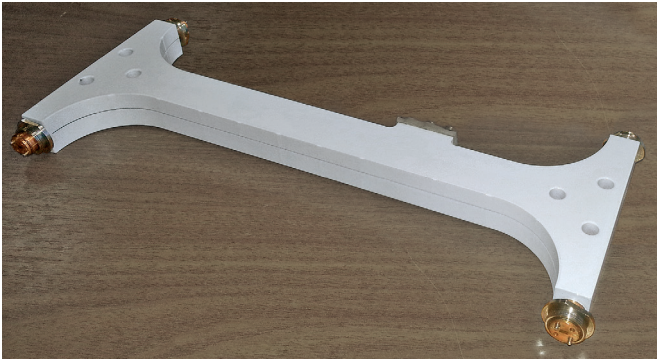


Рис.3. Волноводный мост

диаграммы направленности с помощью тепловизора FLIR.

### КОГЕРЕНТНОЕ СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВУХ МАГНЕТРОНОВ В СУММАТОРЕ В ВИДЕ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО МОСТА

В качестве основного элемента для синхронизации и суммирования мощности магнетронов был выбран балансный смеситель в виде трехдецибельного моста. В 3-миллиметровом диапазоне классические волноводные мосты имеют крайне малые размеры отверстий связи, а электрическая прочность подобных устройств недостаточна для работы с киловаттными уровнями импульсной мощности. В связи с этим было принято решение о переходе на квазиоптические принципы формирования суммированного сигнала. Сотрудники компании "Гиком" и ИПФ РАН Г.Денисов и М.Шмелев разработали квазиоптический мост (рис.3), имеющий следующие параметры:

- рабочая частота: 95 ГГц;
- рабочая полоса: не менее 800 МГц;
- импульсная мощность входных сигналов: не более 10 кВт;
- максимальная импульсная мощность в выходном плече: 30 кВт;
- направленность: 20 дБ;
- переходное ослабление:  $4 \pm 1$  дБ.

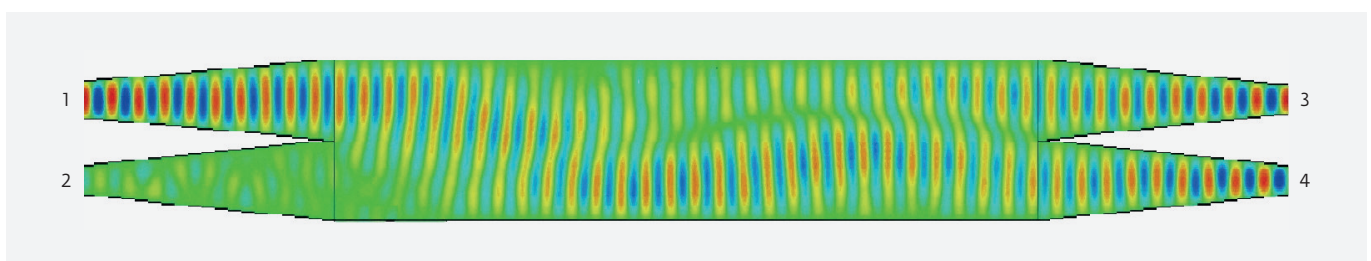


Рис.4. Мгновенное распределение поля в модели моста

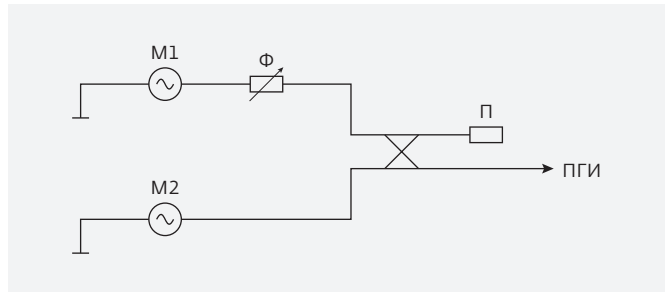


Рис.5. Схема проведения эксперимента по синхронизации двух магнетронов (M1, M2 – магнетроны, Ф – фазовращатель, П – поршень, ПГИ – прибор горячих измерений)

Принцип работы моста основан на эффекте Тальбота [6, 7] в сверхразмерном волноводе. Плоский сверхразмерный волновод возбуждается на входе двумя плоскими рупорами, и такие же рупоры имеются на выходе. Мгновенное распределение электрического поля в модели моста было получено с помощью программы CST Suite Studio 2014 (рис.4).

Один рупор на входе моста (1 на рис.4) возбуждает первую и вторую моды колебаний, удовлетворяющих граничному условию отсутствия излучения в другом входном рупоре. Обе моды распространяются с различными фазовыми скоростями.

Разница в волновых числах составляет:

$$\Delta k = \sqrt{k_0^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} - \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2}, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны в вакууме,  $a$  – ширина плоского волновода.

Длина волновода  $L$  подбирается из условия равенства набега фаз  $90^\circ$ :

$$\Delta k \cdot L = \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

Приближенно условие можно представить в виде:

$$L = \frac{1}{3} \cdot \frac{2a^2}{\lambda}, \quad \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 \ll 1. \quad (3)$$

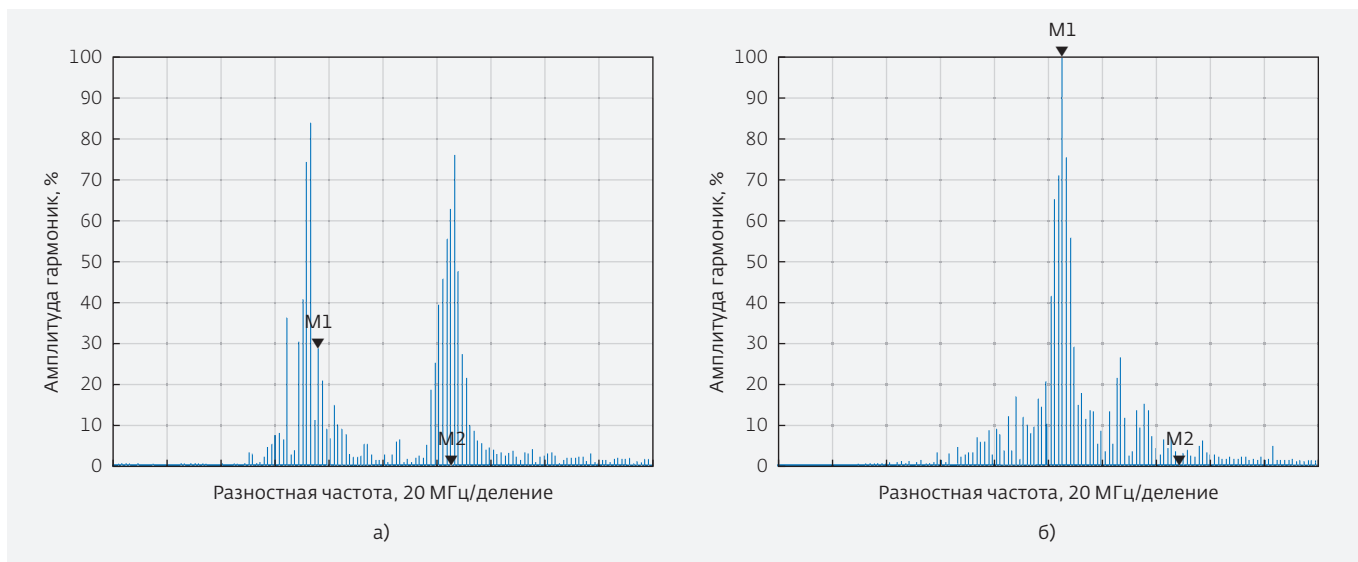


Рис.6. Спектрограммы несинхронного (а) и синхронного (б) режимов

Отметим, что величина  $L$  соответствует части длины Тальбота ( $a$  – период оптической системы):

$$Z_T = \frac{\lambda}{1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{a^2}}} \approx \frac{2a^2}{\lambda}, \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 \ll 1. \quad (4)$$

Если выполнено условие (2), то в каждый выходной рупор (3 и 4 на рис.4) войдет волна от обеих мод со сдвигом  $90^\circ$ . В обратном случае, когда на входе оба рупора (3 и 4 на рис.4) запитаны генераторами со сдвигом  $90^\circ$ , на выходе оба излучения суммируются в одном рупоре (1 на рис.4). Требование ортогональности двух

излучений на входе является неперенным условием возбуждения обеих мод.

### САМОСИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХ МАГНЕТРОНОВ ПРИ РАБОТЕ НА ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Эксперимент по синхронизации двух магнетронов на квазиоптическом мосте был проведен по схеме, аналогичной описанной в [5] (рис.5).

Взаимная фазировка двух магнетронов обеспечивалась фазосдвигателем  $\Phi$ , согласование со стороны плеча 2 – короткозамыкающим поршнем П (см. рис.5). Рабочие частоты двух магнетронов составляли  $f_0 - 25$  МГц и  $f_0 + 30$  МГц (где,  $f_0$  – частота

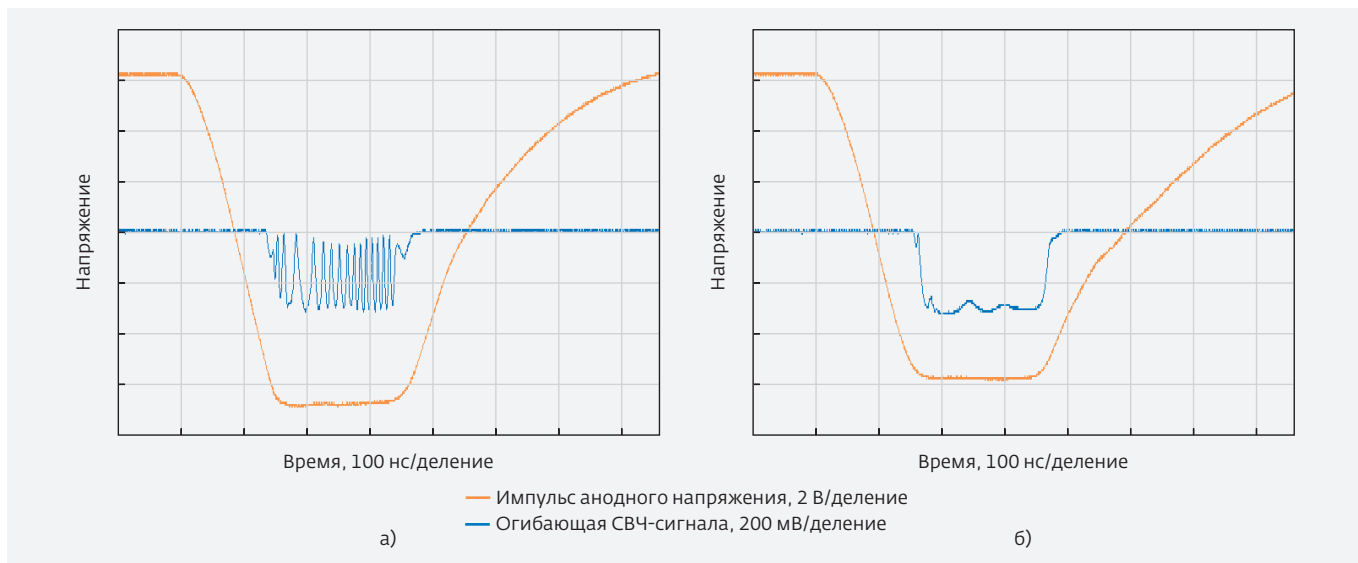
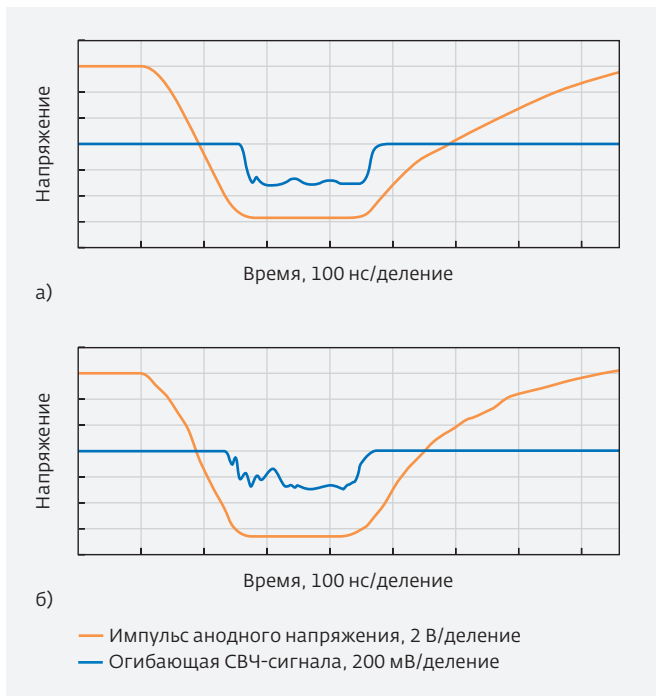


Рис.7. Огибающие СВЧ-сигнала несинхронного (а) и синхронного режимов (б)



**Рис.8.** Две формы сигналов в одной пачке импульсов: а) самозахват без задержки, б) сбой самозахвата на фронте импульса

синхронизированных магнетронов). Мощность каждого из магнетронов на согласованную нагрузку – 4,2 кВт и 5,1 кВт. Длительность импульса СВЧ – 200 нс.

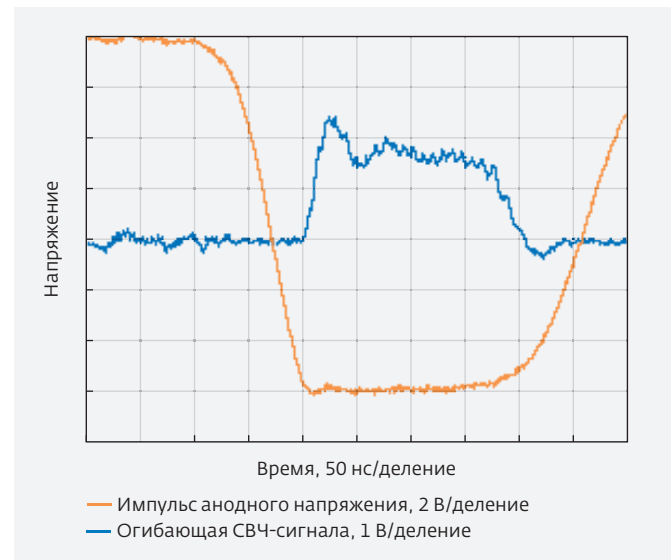
Путем перемещения поршня П суммированный сигнал направлялся на вход прибора горячих измерений (ПГИ), где выполнялись измерения суммированной мощности, частоты, спектра и огибающей СВЧ-импульса. Подбором положения поршня обеспечивался максимальный коэффициент суммирования  $K_{\text{СВМ}}=0,8$  ( $P_{\text{СВМ}}=7,5$  кВт) на частоте  $f_0$ . При перемещении поршня на расстояние, превышающее  $0,1 \lambda_b$  (где  $\lambda_b$  – длина волны в волноводе), магнетроны рассинхронизировались. При этом каждый из них начинал работать на собственной частоте. В синхронном и несинхронном режиме были сняты спектрограммы и огибающие СВЧ-сигнала (рис.6–7).

Максимальная полоса частоты суммирования при фазовом ограничении  $\Delta\varphi=90^\circ$  составила  $\Delta f=60$  МГц, что соответствует условию синхронизации:

$$\Delta f = 2 \frac{\Gamma \cdot f_0}{Q_{\text{ext}}} \cdot \sin(\Delta\varphi), \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – модуль коэффициента отражения,  $f_0$  – собственная частота магнетрона,  $Q_{\text{ext}}$  – внешняя добротность.

Во время переходного процесса фазовой синхронизации магнетронов (в интервале 1–50 нс) особую роль играет время нарастания фронта импульсного анодного



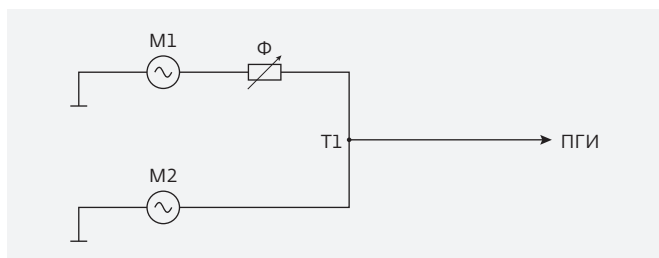
**Рис.9.** Импульс анодного напряжения и огибающая СВЧ-сигнала при сокращенной длительности фронта импульса

напряжения. В условиях относительно короткой длительности плоской вершины импульса (порядка 200 нс) возможна потеря части синхронизированной энергии, что может привести к уменьшению среднего коэффициента суммирования (рис.8). На осциллограмме (см. рис.8б) отчетливо виден неустойчивый характер переднего фронта огибающей СВЧ-сигнала, причем его форма не повторяется от импульса к импульсу в пачке.

Это явление хорошо известно из теории синхронизированных генераторов [8]. Расчет переходного процесса может быть проведен с помощью уравнения Вандер-Поля [9]. В любом случае время установления фазы в синхронизирующих системах прямо пропорционально длительности фронта анодного напряжения генератора и обратно пропорционально коэффициенту отражения нагрузки.

В условиях данного эксперимента (при длительности фронта 110 нс) максимальный интервал времени переходного процесса фазовой синхронизации составил 50 нс, что требует сокращения длительности фронта до 50–70 нс. В связи с этим было принято решение о проведении аналогичных экспериментов на тиратронном модуляторе и модернизации твердотельного модулятора с целью сокращения длительности фронта до требуемых значений.

Исследования, проведенные на тиратронном модуляторе, показали, что в результате сокращения длительности фронта анодного напряжения до 60 нс формы импульсов СВЧ-огибающей в пачке стали идентичными (рис.9), что привело к обнулению потерь энергии



**Рис.10.** Схема эксперимента с тройником в качестве сумматора (M1, M2 – магнетроны, Ф – фазовращатель, T1 – тройник, ПГИ – прибор горячих измерений)

в первой четверти импульса. По результатам исследований принято решение о модернизации основного трехканального модулятора.

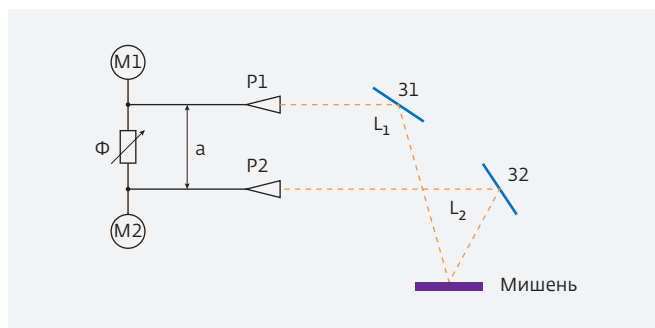
### САМОСИНХРОНИЗАЦИЯ ТРЕХ МАГНЕТРОНОВ ПРИ РАБОТЕ НА ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Для синхронизации трех магнетронов был использован квазиоптический мост в режиме три входа/один выход. Схема эксперимента аналогична схеме, показанной на рис.5, единственное ее отличие состоит в том, что вместо короткозамыкающего поршня подключается третий магнетрон с фазосдвигателем. Ранее проведенное совместно с А.Курушиным численное моделирование процесса синхронизации трех магнетронов в волноводных мостах в 8-миллиметровом диапазоне показало принципиальное отличие от случая синхронизации двух магнетронов: фазы трех входных сигналов должны иметь фазовый сдвиг около  $120^\circ$  относительно друг друга. Как выяснилось, в исследуемом диапазоне квазиоптический мост демонстрирует аналогичные свойства. В результате достигнута устойчивая синхронизация и суммирование мощностей трех магнетронов с коэффициентом суммирования  $K_{\text{сум}} = 0,61$ .

### КОГЕРЕНТНОЕ СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВУХ МАГНЕТРОНОВ В СУММАТОРЕ В ВИДЕ ТРОЙНИКА

В ранних экспериментах в качестве сумматора использовалась простейшая схема с применением волнового тройника H-типа. Проведение экспериментов с суммированием и синхронизацией двух магнетронов на волноводном тройнике (рис.10) показало полное соответствие с теорией синхронизации [9].

Относительно большая величина КСВН тройника (около 2) обеспечивала "быструю" фазовую синхронизацию даже на "длинных" фронтах, однако коэффициент суммирования составлял не более 0,65, что объясняется рассогласованием эквивалентного сопротивления плеч тройника, выполненного на идентичных



**Рис.11.** Схема эксперимента по самосинхронизации двух магнетронов со сложением в эфире (M1, M2 – магнетроны, Ф – фазовращатель, 31, 32 – зеркала, P1, P2 – рупоры)

волноводах. При этом полоса синхронизации (максимальная полоса частот суммирования) увеличилась до 100 МГц.

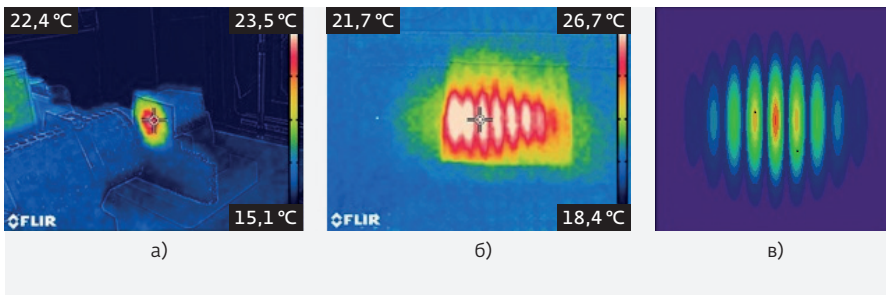
Схема синхронизации на двух тройниках была использована в экспериментах по сложению мощностей в эфире.

### САМОСИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХ МАГНЕТРОНОВ СО СЛОЖЕНИЕМ МОЩНОСТИ В ЭФИРЕ

В процессе проведения экспериментов по синхронизации и сложению мощности магнетронов в свободном пространстве была предложена оригинальная схема синхронизации двух магнетронов с выводом энергии на два рупора (рис.11). Схема эксперимента включала в себя: безэховую камеру, поглощающий термочувствительный экран, тепловизиорную установку FLIR, рупорную систему приема сигналов для контроля спектра и огибающей СВЧ-излучения, защитные экраны, систему зеркальных отражателей с возможностью пространственной регулировки с целью наведения лучей на поглощающий экран для получения интерференционной картины.

Излучение магнетронов в свободном пространстве суммировалось с помощью системы зеркальных отражателей, позволяющих осуществлять наведение и фазовую регулировку двух лучей.

Метод самосинхронизации основан на базовой схеме Дейвида [9] с преобразованием числа нагрузок (рупоров) до требуемого по условиям эксперимента. Регулировка режима синхронизации выполнялась фазовращателем на основе щелевого волнового моста. Диаграммы излучения обоих рупоров на мишени совмещались путем перемещения и поворота зеркал. Коэффициент сложения мощностей в волноводных элементах достигал 0,7. При этом плотность потока энергии на мишени возрастала в пучностях интерференционной картины.



**Рис.12.** Экран тепловизора: а) след пучка от одного рупора, б) результат интерференции излучения двух рупоров, в) результат численного моделирования процесса интерференции

Визуализация излучения осуществлялась тепловизором FLIR на основе поглощения в специальном поглотителе типа "Карбопан" (рис.12). Полученные интерференционные картины свидетельствуют о высокой эффективности предлагаемой схемы. Было также выполнено численное моделирование процесса интерференции, воспроизводящего условия эксперимента (см. рис.12в).

Условие противофазности излучений из рупоров в первом минимуме относительно главного максимума имеет следующий вид:

$$k\left(\sqrt{(\Delta+a)^2+z^2}-\sqrt{(\Delta-a)^2+z^2}\right)=\pi, \quad (6)$$

$$k=\frac{2\pi}{\lambda},$$

где  $2\Delta$  – расстояние между минимумами распределения;  $2a$  – расстояние между осями двух рупоров,  $z=(L_1+L_2)/2$  (см. рис.11).

После преобразований получим:

$$\frac{kz}{2}\left[\left(\frac{\Delta+a}{z}\right)^2-\left(\frac{\Delta-a}{z}\right)^2\right]=\pi. \quad (7)$$

Таким образом, длина волны излучения будет определяться следующим выражением:

$$\lambda=\frac{4\Delta a}{z}. \quad (8)$$

О когерентности излучения обоих рупоров свидетельствует факт наблюдения минимумов в распределении плотности потока энергии в поперечной плоскости.

\* \* \*

Рассмотренные в данной статье экспериментальные исследования показали возможность синхронной работы двух и трех магнетронов 3-миллиметрового диапазона в режиме самозахвата с помощью сумматоров различного типа со сложением на общей нагрузке и в эфире.

В дальнейших работах по исследованию синхронизации магнетронов предполагается использовать квазиоптический мост для создания регенеративного усилителя 3-миллиметрового диапазона. Подобное устройство, построенное на основе идеи И.Лебедева\* и работающее в 3-сантиметровом диапазоне, было описано в [10]. В этой работе был выполнен расчет и получены экспериментальные данные, согласно которым коэффициент усиления достигал

значения 20 дБ.

Согласно предварительным расчетам ожидается, что предложенный в данной статье квазиоптический мост сможет обеспечить аналогичную величину коэффициента усиления и позволит расширить рабочую полосу (полосу захвата) до 200 МГц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Егоров Ю., Иванов И., Артамонов В., Юсупов У.** Устройство сложения мощностей генераторов на магнетронах. Патент РФ № 2394357.
2. **Иванов И.** Сложение мощностей при синхронизации импульсных магнетронов миллиметрового диапазона // Технологии информационного общества. 2013. № 10. С. 53–55.
3. **Иванов И., Курушин А.** Синхронизация магнетронов с выводом энергии в свободное пространство // Современная электроника. 2013. № 7.
4. **Канаев Г., Новиков С., Сулакшин А. и др.** Когерентные процессы в системе двух связанных релятивистских магнетронов // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 20. С. 51–54.
5. **Иванов И., Петюшин Н., Скрипкин Н.** Сумматор мощности магнетронов 3-миллиметрового диапазона длин волн // Наукоемкие технологии. 2014. № 11.
6. **Talbot H.F.** – Phil. Mag., 1936, v. 9. P. 401.
7. **Rayleigh L.** – Phil. Mag., 1881, v.11. P. 196.
8. **Князь И., Витренко А.** Самосинхронизация нелинейных осцилляторов Ван дер Поля // Журнал нано- и электронной физики. 2010. Т. 2. № 4. С.22–30.
9. **Дейвид Э.** Фазирование высокочастотными сигналами // Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями: ИЛ, 2, 1961. С. 327.
10. **Бецкий О., Гутцайт Э.** Балансный регенеративный усилитель СВЧ // Радиотехника и электроника. 1966. № 4. С. 709–720.

\* Лебедев И. Балансный усилитель СВЧ. Авторское свидетельство №25550, 01.06.1962.