



Получено: 24.10.2022 г. | Принято: 30.10.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.458.465>

Научная статья

## КОМПЛЕКСИРОВАННЫЙ СВЧ-МОДУЛЬ С СИНХРОНИЗИРОВАННЫМИ МАГНЕТРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Н.И.Скрипкин<sup>1</sup>, нач. лаб. / [n.scripkin@pluton.msk.ru](mailto:n.scripkin@pluton.msk.ru)

А.В.Шмелев<sup>1</sup>, вед. инж.

А.И.Проников<sup>1</sup>, вед. инж.

И.М.Иванов<sup>1</sup>, науч. сотр.

**Аннотация.** В АО "Плутон" создана установка генераторного модуля СВЧ 2-см диапазона длин волн на основе технического решения – способа когерентного суммирования мощностей двух генераторов в волноводном сумматоре мощности – волноводном 3-дБ мосте. При этом на выходе модуля синхронизированного устройства мощность в пределах полосы синхронизации может достигать 95% от суммарной мощности генераторов.

**Ключевые слова:** комплексированный СВЧ-модуль, генератор, магнетрон, когерентное суммирование мощностей, суммирующее устройство, 3-дБ мост

**Для цитирования:** Н.И. Скрипкин, А.В. Шмелев, А.И. Проников, И.М. Иванов. Комплексированный СВЧ-модуль с синхронизированными магнетронными генераторами. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 7–8. С. 458–465. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.458.465>

Received: 24.10.2022 | Accepted: 30.10.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.458.465>

Original paper

## COMPLEXED UHF-MODULE WITH SYNCHRONIZED M-TYPE GENERATORS

N.I.Skripkin<sup>1</sup>, Head of Laboratory / [n.scripkin@pluton.msk.ru](mailto:n.scripkin@pluton.msk.ru)

A.V.Shmelev<sup>1</sup>, Principal Engineer

A.I.Pronikov<sup>1</sup>, Principal Engineer

I.M.Ivanov<sup>1</sup>, Research Engineer

**Abstract.** JSC "Pluton" has developed complexed UHF-module in the 2 cm wavelength range based on a technical solution – a method of coherent summation of the UHF-powers of two M-type generators in a waveguide power combiner – a waveguide 3-dB power coupler. The UHF-power can reach 95% of the total UHF-powers of two generators in the output of a synchronized device.

**Keywords:** complexed UHF-module, generator, magnetron, coherent summation of the UHF-powers, power combiner, 3-dB power coupler

**For citation:** N.I. Skripkin, A.V. Shmelev, A.I. Pronikov, I.M. Ivanov. Complexed UHF-module with synchronized M-type generators. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 7–8. PP. 458–465. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.458.465>.

<sup>1</sup> АО "Плутон", Москва, Россия / Joint-stock company Pluton, Moscow, Russia



## ВВЕДЕНИЕ

Современная СВЧ-техника характеризуется большим разнообразием типов генераторов. Среди них магнетрон зарекомендовал себя как надежный в эксплуатации, простой по конструкции, экономичный вакуумный прибор с высоким КПД.

В 2-см диапазоне длин волн номенклатура разработанных магнетронов достаточно велика и зависит от конкретных задач. Стремление создать конструкции сверхмощных магнетронов (0,5 МВт и более) [1] является актуальной, но не простой задачей.

В конце 80-х годов ОКБ при заводе "Плутон" были созданы уникальные единичные образцы магнетронов в 2-см диапазоне длин волн с импульсной мощностью до 1 МВт. Такие магнетроны представляли собой обращенно-коаксиальную конструкцию, имеющую как преимущества, так и недостатки. Для них создавались специальные откачные посты и модуляторные стенды, откачка производилась несколько дней, а тренировка – до двух месяцев. Прибор выпускался со встроенным технологическим магнитным электроразрядным насосом (МЭРН), позволяющим вести постоянную откачку при работе магнетрона в генераторном режиме. Магнетроны нуждались в длительной тренировке, так как необходимо было избавиться от искрений и стабилизировать электрические параметры.

В 90-е годы после спада экономики пострадали многие предприятия электронной промышленности. Это коснулось и ОКБ при заводе "Плутон". Оно было расформировано, численность рабочего персонала завода резко уменьшилась. Резко уменьшилась и номенклатура изделий. Сохранить все технологические процессы изготовления единичного производства магнетронов не удалось.

В настоящее время становятся востребованными сверхмощные магнетроны для выполнения конкретных задач, например для формирования зондирующих мощных импульсных сигналов. Возобновлять производство не выпускаемых более 30-ти лет магнетронов является сложной задачей и по срокам, и по стоимости создания технологических процессов.

В данной статье описывается установка "СВЧ-модуль", в которой используется способ когерентного суммирования мощностей двух магнетронов в сумматоре мощности. Питание магнетронов осуществляется высоковольтным двухканальным модулятором. Серийно выпускаемые магнетроны в 2-см диапазоне

## INTRODUCTION

Modern microwave technology is characterised by a wide variety of generator types. Among these, the magnetron has established itself as a reliable, simple to operate and economical vacuum appliance of high efficiency.

In the 2-centimetre wavelength range, the nomenclature of developed magnetrons is quite large and depends on specific tasks. The pursuit to develop super-power magnetron designs (0.5 MW or more) [1] is a relevant but not easy task.

In the late 80's the experimental design bureau at the Pluton factory developed unique single samples of magnetrons in the 2-centimeter wavelength range with a pulse power up to 1 MW. These magnetrons presented inverted-coaxial designs that had both advantages and disadvantages. Special exhaust units and modulator benches were built for them, the pumping was performed for several days and training for up to two months. The device was produced with an integrated technological magnetic electrodischarge pump (MEDP), which allowed of continuous pumping during operation of the magnetron in the generator mode. The magnetrons needed a long training period because it was necessary to get rid of sparks and stabilise the electrical parameters.

In the 1990s, after the economic downturn, many companies in the electronics industry suffered. This situation also affected the experimental design bureau at the Pluton factory. It was disbanded, and the number of employees decreased sharply. The range of products was also sharply reduced. It was not possible to retain all technological processes for production of single magnetrons.

Nowadays, super-power magnetrons are beginning to be in demand for specific tasks, such as generating high-power pulsed signals for probing. The production of magnetrons that have not been in manufacturing for more than 30 years is a challenge, both in terms of time and in terms of the cost of developing the processes.

This paper describes a "microwave module" installation which uses the coherent power summation method of two magnetrons in a power summator. The magnetrons are powered by a high voltage dual channel modulator. Series-produced magnetrons in the 2-centimeter wavelength range with a pulsed power of 270-300 kW allow of obtaining a pulsed power at the output of the summator at least 500 kW.

Based on previous studies [2, 3], in our opinion, it is found that the most efficient and simple in design method for coherent summation of power of two generators with a waveguide output is to use a waveguide 3-decibel bridge as summator. In this case the output power of the synchronised device within the synchronisation bandwidth can reach 95% of the total power of the generators. The synchronisation scheme is shown in Fig.1.

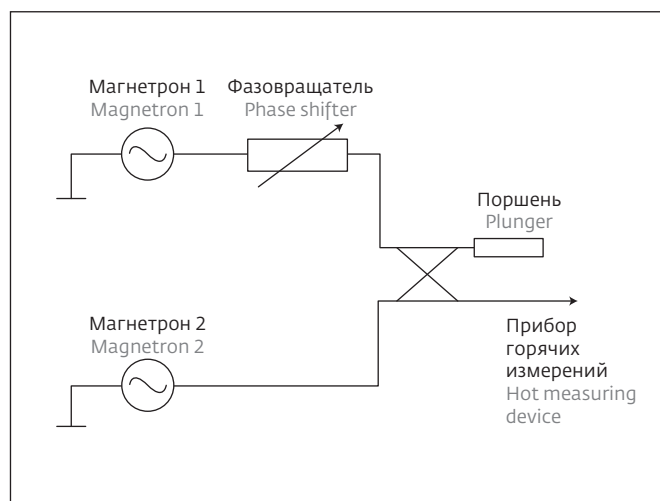


Рис.1. Схема синхронизации двух магнетронных генераторов  
Fig.1. Synchronisation diagram for two magnetron generators

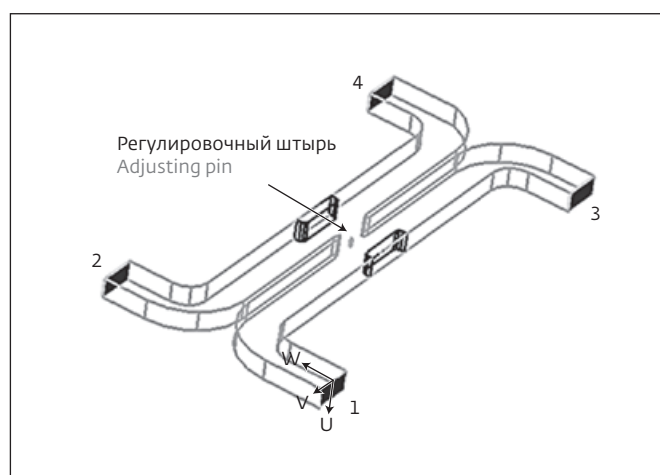


Рис.2. Расчетная модель суммирующего устройства (суммирующее устройство)  
Fig.2. Calculation model of the summator (summer unit)

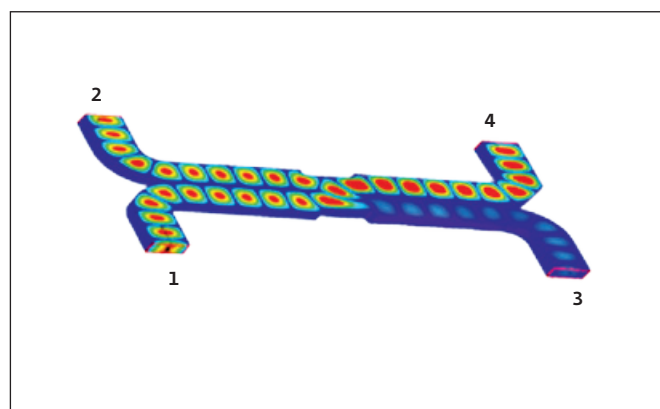


Рис.3. Согласование плеч в расчетной модели  
Fig.3. Shoulder matching in the calculation model

Mutual phasing (synchronisation) of two magnetrons (M1 and M2) is provided by the phase shifter (F), matching is provided by the short-circuit plunger (P). The summed signal is sent to the output (antenna) path of the radar or to the input of the hot measurement device (HMD). Precise selection of the plunger position ensures maximum summation factor. The UHF generator module is designed to generate probing pulse signals in a multifunctional transceiver radar measurement complex.

### SELECTION OF A SUMMATOR

Classic waveguide bridges are divided into three groups [4]:

- slotted waveguide bridge with wide or narrow wall coupling;
- waveguide bridge based on a 2nd waveguide tee (E and H);
- ring-type waveguide bridges.

Narrow-wall bridges are characterised by the best coordination and electrical strength. The waveguide bridge with narrow wall coupling (Fig.2) was selected for further work. Electrical strength has been achieved due to excess pressure of sulphur hexafluoride (sulphur hexafluoride gas) in the waveguide path. The computational model of such a summing device in the software for three-dimensional modelling of microwave processes is shown in Fig.2.

Figure 3 shows equal summation of the signals from shoulder 1 and shoulder 2 to shoulder 4.

The calculation was carried out in the frequency range 14.5 to 15.6 GHz. The gain (S-parameters) for different positions of the tuning (matching) pin are shown in Fig.4-7. The tuning pin can be moved between 2.5 and 4.0 mm in the waveguide path of the power combiner.

Figure 8 shows a simplified diagram of the bridge. Numbering of the arms is: 1, 2 - input, 4 - output.

The dissipation matrix of an ideal summator can be represented as

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & jd & f & jg & jd & 0 & jg & f & f & jg & 0 & jd & jg & f & jd & 0 \end{bmatrix},$$

where  $d$  characterises directivity of the slotted bridge;  $f$  and  $g$  are the levels of the branching signals. Based on the power balance, we have:

$$d^2 + f^2 + g^2 = 1.$$

In this case, ideally the elements  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$ .

The S-parameters were measured for the fabricated summer on a four-arm (eight-pole) transmission ratio meter.

At 15GHz, the position (length) of the adjusting pin was ~3mm, ensuring perfect matching, directivity and branching balance of the signals.

длин волн с импульсной мощностью 270–300 кВт позволяют получить импульсную мощность на выходе сумматора не менее 500 кВт.

На основании ранее проведенных работ [2, 3], по нашему мнению, установлено, что наиболее эффективным и простым по конструкции способом для когерентного суммирования мощности двух генераторов с волноводным выводом является использование в качестве сумматора волноводного 3-дБ моста. При этом на выходе мощность синхронизированного устройства в пределах полосы синхронизации может достигать 95% от суммарной мощности генераторов. Схема синхронизации представлена на рис.1.

Взаимная фазированная (синхронизация) двух магнетронов (M1 и M2) обеспечивается фазовращателем (Ф), согласование обеспечивается короткозамыкающим поршнем (П). Суммированный сигнал направляется в выходной (антенный) тракт РЛС, либо на вход прибора горячих измерений (ПГИ). Точный подбор положения поршня обеспечивает максимальный коэффициент суммирования. Генераторный модуль СВЧ предназначен для формирования зондирующих импульсных сигналов в многофункциональном приемопередающем радиолокационном измерительном комплексе.

### ВЫБОР СУММИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Классические волноводные мосты делятся на три группы [4]:

- волноводный мост щелевой со связью по широкой или узкой стенке;
- волноводный мост на основе 2-го волноводного тройника (E и H);
- кольцевые волноводные мосты.

Наилучшим согласованием и электрической прочностью отличаются мосты со связью по узкой стенке. Для дальнейших работ был выбран волноводный мост со связью по узкой стенке (рис.2). Электрическая прочность достигалась за счет избыточного давления гексафторида серы (элегаз) в волноводном тракте. Расчетная модель такого суммирующего устройства в программе для трехмерного моделирования СВЧ-процессов представлена на рис.2.

Рис.3 показывает равное суммирование сигналов из плеча 1 и плеча 2 в плечо 4.

Расчет производился в диапазоне частот 14,5–15,6 ГГц. Коэффициенты передачи (S-параметры) для различного положения регулировочного (согласующего) штыря представлены на рис.4–7. Регулировочный штырь может

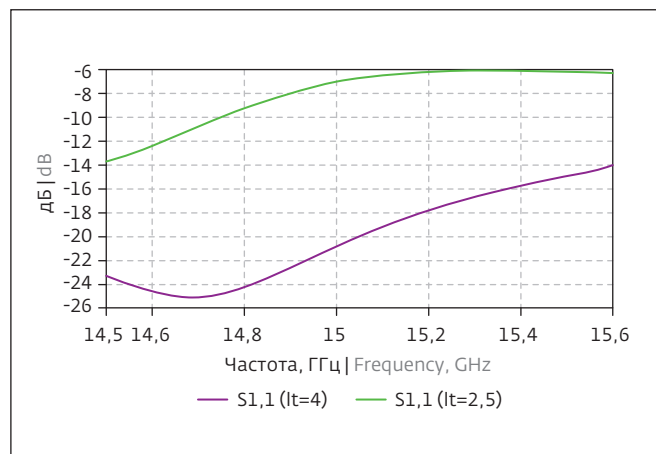


Рис.4. S11-параметр

Fig.4. S11-parameter

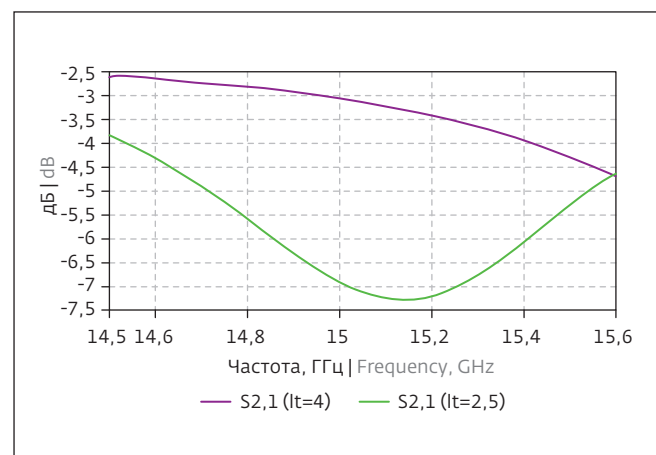


Рис.5. S13-параметр

Fig.5. S13-parameter

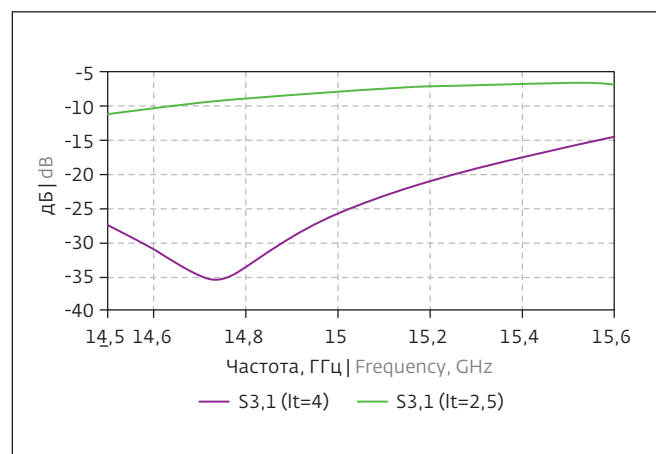


Рис.6. S12-параметр

Fig.6. S12-parameter

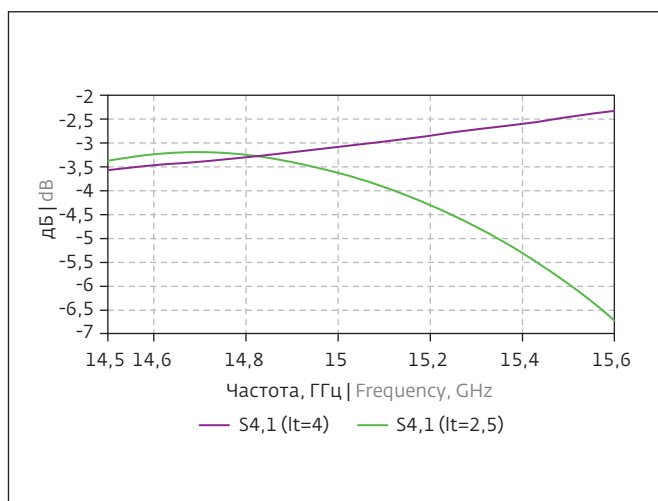


Рис.7. S14-параметр  
Fig.7. S14-параметр

перемещаться в волноводном тракте сумматора мощности на 2,5–4,0 мм.

На рис.8 представлена упрощенная схема моста. Нумерация плеч: 1, 2 – входные, 4 – выход.

Матрица рассеивания идеального сумматора может быть представлена в виде:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & jd & f & jg \\ jd & 0 & jg & f \\ f & jg & 0 & jd \\ jg & f & jd & 0 \end{bmatrix},$$

где  $d$  характеризует направленность щелевого моста;  $f$  и  $g$  – уровни разветвленных сигналов. На основании баланса мощностей:

$$d^2 + f^2 + g^2 = 1.$$

При этом в идеальном случае элементы  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$ .

Для изготовленного сумматора на измерителе коэффициентов передачи четырехплечных (восьмиполюсных) устройств были проведены измерения S-параметров.

На частоте 15 ГГц при положении (длине) регулировочного штыря ~ 3 мм обеспечивалось идеальное согласование, направленность и баланс разветвления сигналов.

#### Измерение модулей S-параметров:

$$\begin{aligned} S_{11} \approx S_{22} \approx S_{33} \approx S_{44} &\approx 0,1 \pm 0,05 \\ S_{12} \approx S_{21} \approx S_{34} \approx S_{43} &\approx 0,1 \pm 0,05 \\ S_{13} \approx S_{31} \approx S_{24} \approx S_{42} &\approx 0,7 \pm 0,05 \\ S_{14} \approx S_{41} \approx S_{23} \approx S_{32} &\approx 0,7 \pm 0,05. \end{aligned}$$

#### Измеренный баланс мощностей:

$$(S_{11})^2 + (S_{12})^2 + (S_{13})^2 + (S_{14})^2 \approx 1 \pm 0,04.$$

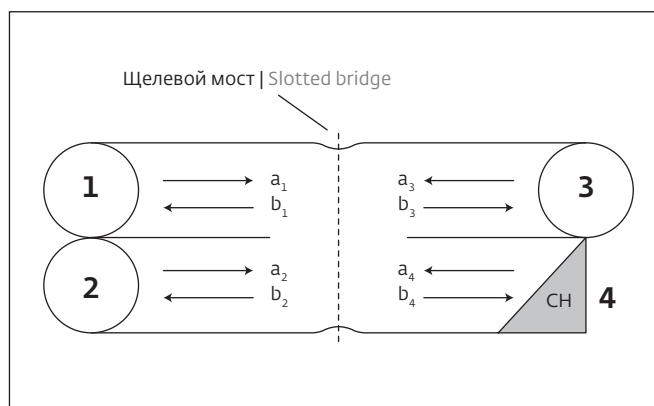


Рис.8. Упрощенная схема моста  
Fig.8. Simplified diagram of the bridge

#### Measurement of S-parameter modules:

$$\begin{aligned} S_{11} \approx S_{22} \approx S_{33} \approx S_{44} &\approx 0,1 \pm 0,05 \\ S_{12} \approx S_{21} \approx S_{34} \approx S_{43} &\approx 0,1 \pm 0,05 \\ S_{13} \approx S_{31} \approx S_{24} \approx S_{42} &\approx 0,7 \pm 0,05 \\ S_{14} \approx S_{41} \approx S_{23} \approx S_{32} &\approx 0,7 \pm 0,05. \end{aligned}$$

#### Measured power balance:

$$(S_{11})^2 + (S_{12})^2 + (S_{13})^2 + (S_{14})^2 \approx 1 \pm 0,04.$$

By changing the length of the adjusting pin, the symmetry of the bridge is broken and the balance between the inputs (outputs) is missing. Accordingly, the bridge is fully compliant with the requirements for summing and synchronising signals when correctly adjusted.

#### COHERENT SUMMING MODE

The coherent power summation mode of the two magnetrons was tested in the microwave module setup shown in Fig.9.

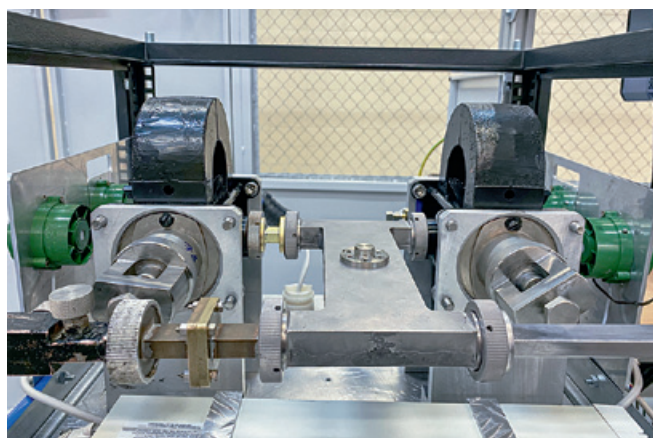


Рис.9. Два магнетрона, нагруженные на сумматор мощности, в составе "СВЧ-модуля"

Fig.9. Two magnetrons loaded on a power summator as a part of a "microwave module"

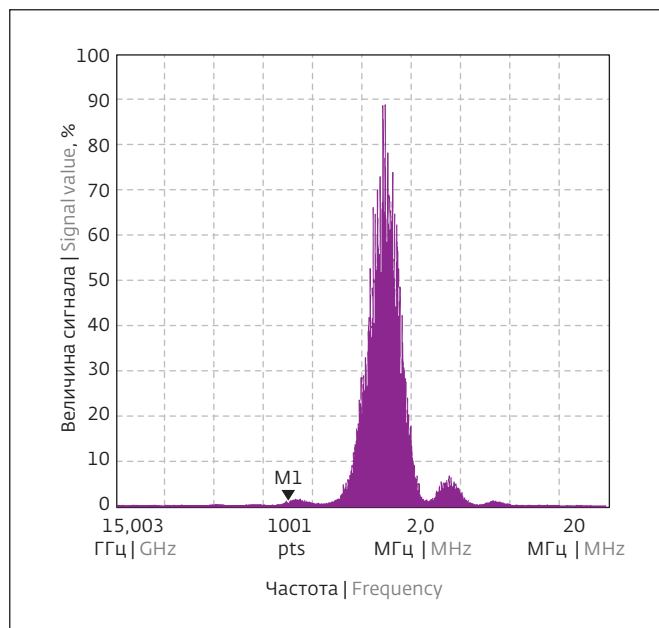


Рис.10. Спектр выходного сигнала  
Fig.10. Output signal spectrum

При изменении длины регулировочного штыря симметрия моста нарушалась, баланс между входами (выходами) отсутствовал. Соответственно, при правильной настройке моста он полностью соответствует требованиям для суммирования и синхронизации сигналов.

### РЕЖИМ КОГЕРЕНТНОГО СЛОЖЕНИЯ

Произведена отработка режима когерентного сложения мощности двух магнетронов на установке "СВЧ-модуль", которая представлена на рис.9.

Полученные рабочие параметры представлены в табл.1.

Модулирующий импульс, импульс тока, ВЧ-огибающая и спектр выходного сигнала (синхронизированный по фазе режим) представлены на рис.10 и 11. Режимы охлаждения с помощью встроенных высокоэффективных кулеров обеспечили бесперебойную работу модуля. Избыточное давление в волноводном тракте создавалось гексафторидом серы (элегазом) и составляло 2 ати.

На рис.12 представлены осциллограммы модулирующего импульса, импульса тока и ВЧ-огибающая при несинхронизированном по фазе режиме работы магнетронов. ВЧ-огибающая представляет собой осциллограмму биений.

Разработанный СВЧ-модуль представляет собой устройство, состоящее из двух

Таблица 1. Полученные рабочие параметры СВЧ-модуля  
Table 1. Obtained operating parameters of the UHF-module

Рабочая частота, МГц Working frequency, MHz	15 000
Выходная импульсная мощность, кВт Output pulse power, kW	500
Частота посылок, Гц Frequency of parcels, Hz	800
Длительность импульса, мкс Pulse duration, $\mu$ s	0,6
Диапазоны регулировки выходной мощности, % Output power adjustment ranges, %	-100
Охлаждение магнетронов Magnetron cooling	Воздушное принудительное Forced air
Ток анода магнетронов импульсный, А Magnetron anode current pulsed, A	87
Напряжение анода магнетронов, кВ Magnetron anode voltage, kV	16,0; 16,2

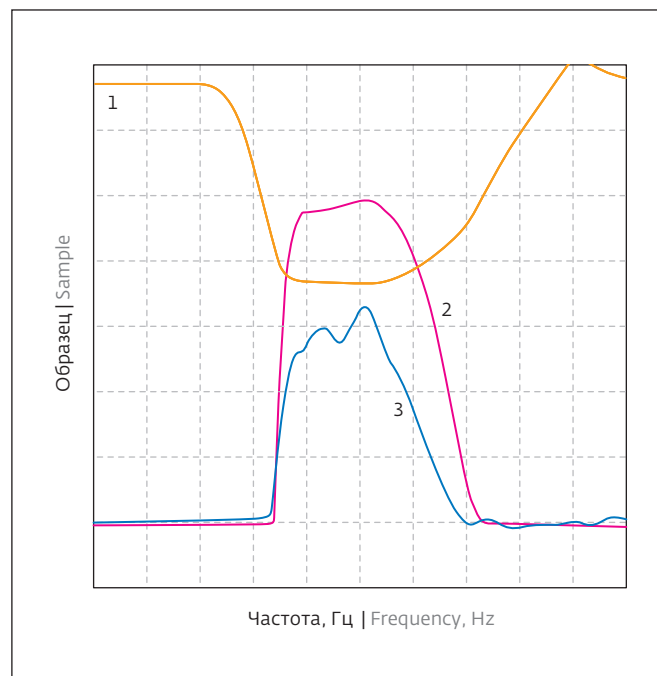


Рис.11. Рабочее напряжение – 1, ВЧ-огибающая – 2, анодный ток – 3  
Fig.11. Operating voltage – 1, UHF envelope – 2, anode current – 3

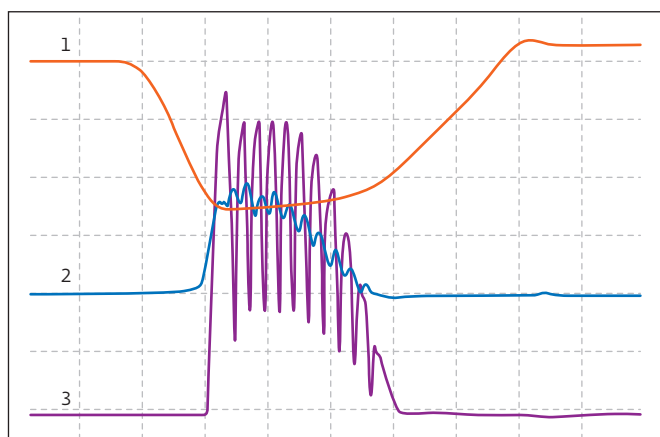


Рис.12. Осциллограммы при несинхронизированном режиме работы магнетронов: рабочее напряжение – 1, анодный ток – 2, ВЧ-огибающая – 3

Fig.12. Oscillograms for unsynchronised magnetron operation: operating voltage – 1, anode current – 2, UHF envelope – 3

магнетронов, питающихся от двухканального, высоковольтного, импульсного модулятора и сумматора мощности,



Рис.13. Стенка с выходным трактом модуля  
Fig.13. Wall with module output path



Рис.14. Глухая стенка модуля  
Fig.14. Module blank wall

The following operating parameters are obtained:

The modulating pulse, current pulse, HF envelope and output signal spectrum (phase-synchronised mode) are shown in Figs.10 and 11. Cooling modes with integrated high efficiency coolers ensured smooth operation of the module. The overpressure in the waveguide path was created by sulphur hexafluoride (sulphur hexafluoride) and was equal to 2 atm.

Figure 12 shows the oscillograms of the modulating pulse, the current pulse and the HF envelope for a non-synchronised magnetron operating mode. The HF envelope is a beat oscillogram.

The developed microwave module is a device consisting of two magnetrons, powered from two-channel, high-voltage, pulse modulator and power summator placed in a special 750×550×800 mm cabinet in one of the walls of which the waveguide path for its further connection through the necessary elements to the antenna (Fig.13, 14). The mass of the UHF module device is ~ 150 kg.

The microwave module is controlled by a remote computer using special programmes that allow of adjusting in each channel: power supply, amplitude and duration of the modulating pulse, pulse repetition frequency, magnetron incandescence current (Fig.15, 16).

размещенных в специальном шкафу с габаритами 750×550×800 мм, в одной из стенок которого выходит волноводный тракт для дальнейшего подсоединения его через необходимые элементы к антенне (рис.13, 14). Масса устройства СВЧ-модуля составляет ~150 кг.

Управление работой СВЧ-модуля осуществляется от удаленного компьютера по специальным программам, позволяющим производить регулировки в каждом канале: источника питания, амплитуды и длительности модулирующего импульса, частоты следования импульсов, тока накала магнетрона (рис.15, 16).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В АО "Плутон" впервые в России создана установка "СВЧ-модуль" в 2-см диапазоне длин волн, позволяющая использовать принцип когерентного сложения мощностей двух магнетронов, серийно выпускаемых в производстве. Стоимость установки и сроки изготовления во много раз меньше вновь разрабатываемого магнетрона на параметры, представленные в данной статье.

### ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

**Декларация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Петроченков В.И.** Электронная техника, 2010, сер.1, вып. № 2, Оптимизация характеристик магнетрона.
2. **Иванов И.М., Скрипкин Н.И., Ходатаев К.В., Вагин А.И.** Экспериментальное исследование самосинхронизации магнетронов 3-миллиметрового диапазона // СВЧ-электроника. 2015. № 6 (00146). С. 98–104.
3. **Вагин А.И., Ефремова М.В., Иванов И.М., Курушин А.А., Скрипкин Н.И.** Расчет и экспериментальное исследование прототипа излучателя ФАР на синхронизированных магнетронах 3-мм диапазона // СВЧ-техника. 2016. № 3 (530). С. 14–19. Серия 1.
4. **Собенин Н.П., Милованов О.С.** Техника сверхвысоких частот / 2-е изд.: Энергоатомиздат, 2007.

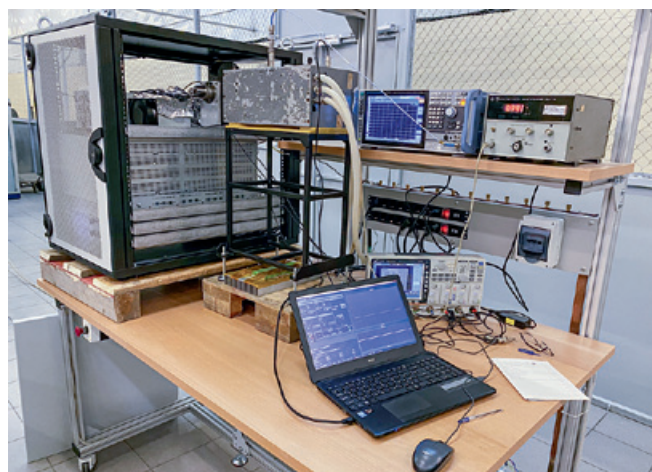


Рис.15. Общий вид на управление модулем  
Fig.15. General view of the module control

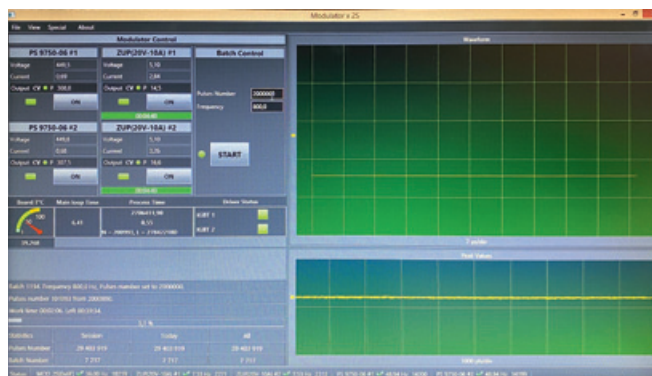


Рис.16. Интерфейс программы управления  
Fig.16. Interface of the control software

### CONCLUSIONS

Pluton JSC was the first in Russia to create a microwave module installation in the 2-centimeter wavelength range which made use of the principle of coherent summation of the power of two commercially available magnetrons. The cost of the installation and manufacturing time is many times less than the magnetron being newly developed with the parameters presented in this article.

### PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

**Declaration of Competing Interest.** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.