

Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 2 (42). С. 72-80
Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2022; (2-42): 72-80

Научная статья
УДК 315.322.365
Код ВАК 4.3.2.

DOI: 10.52463/22274227_2022_42_72
EDN: HQBMEK

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ МОЩНОСТИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА В УСТАНОВКАХ СУШКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Евгений Александрович Четвериков¹, Людмила Александровна Лягина², Андрей Валерьевич Волгин^{3✉}, Алексей Петрович Моисеев⁴

^{1,2,3,4} Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

¹saratov-79@list.ru

²lyagina@mail.ru

³saratov-79@list.ru

⁴moiseevap-distant20-21@mail.ru

Аннотация. В настоящее время одним из инновационных способов сушки сельскохозяйственной продукции является сочетание активного вентилирования с использованием сверхвысокочастотного излучающего поля. В таких установках в силу их конструктивных особенностей высокий уровень мощности отраженного сигнала, что ведет к снижению КПД процесса сушки и сокращению ресурса работы магнетрона. **Целью научного исследования** является изучение влияния отраженных сигналов на параметры магнетрона, поиск режимов работы, в которых влияние отражений минимально, и способов, позволяющих реализовать эти режимы. **Методика.** Исследованы режимы работы магнетронного генератора в тракте, содержащем СВЧ-нагрузку с высоким значением коэффициента стоячей волны по напряжению. Экспериментально изучена зависимость выходной мощности и КПД магнетрона от модуля коэффициента отражения СВЧ-нагрузки. Показано, что существуют простые и эффективные способы снижения негативного влияния неидеально согласованной СВЧ-нагрузки магнетрона на его характеристики. Спецификой описанных в настоящей работе экспериментов является изучение нагрузочных характеристик в непрерывном режиме работы магнетронного генератора.

Результат. Теоретические и экспериментальные исследования показали эффективность технического решения при использовании в сушильных установках стандартных магнетронных источников, включенных навстречу друг другу. Данное техническое решение позволит значительно выровнять распределение поля внутри рабочей камеры и значительно уменьшить влияние отраженного сигнала на катод магнетронов, увеличив тем самым срок службы источников СВЧ-мощности. **Научная новизна.** Результаты научного исследования показывают, что предложенная схема включения двух магнетронных генераторов, работающих на несогласованную нагрузку, с участком волновода, сдвигающего фазы источников относительно друг друга, снижает мощность отраженного сигнала.

Ключевые слова: магнетронный генератор, мощность отраженного сигнала, коаксиально-волновой переход, коэффициент отражения.

Для цитирования: Четвериков Е.А., Лягина Л.А., Волгин А.В., Моисеев А.П. Исследование характеристик магнетронного генератора при высоких уровнях мощности отраженного сигнала в установках сушки сельскохозяйственной продукции // Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 2 (42). С. 72-80. https://doi.org/10.52463/22274227_2022_42_72

Scientific article

INVESTIGATION OF THE MAGNETRON GENERATOR CHARACTERISTICS AT HIGH POWER PARAMETERS OF THE REFLECTED SIGNAL IN THE AGRICULTURAL DRYING EQUIPMENT

Evgeniy A. Chetverikov¹, Ludmila A. Lyagina², Andrey V. Volgin^{3✉}, Alexey P. Moiseev⁴

^{1,2,3,4}Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

¹saratov-79@list.ru

²lyagina@mail.ru

³saratov-79@list.ru

⁴moiseevap-distant20-21@mail.ru

Abstract. Nowadays, one of the innovative ways of drying agricultural products is a combination of active ventilation using an ultra-high-frequency radiating field. In such installations there is a high level of reflected signal power, due to their design features, which leads to a decrease in the efficiency of the drying process and a reduction in the life of the magnetron. **The purpose of the research is** to study the influence of the reflected signals on the parameters of the magnetron, to search for operating modes in which the influence of the reflections is minimal and ways to implement these modes. **Methodology.** The modes of the operation of a magnetron generator in a path contain-

ing a microwave load with a high value of the standing wave voltage coefficient are investigated. The dependence of the output power and efficiency of the magnetron on the modulus of the microwave load reflection coefficient has been experimentally studied. It is shown that there are simple and effective ways to reduce the negative impact of an imperfectly matched microwave load of a magnetron on its characteristics. The specificity of the experiments described in this paper is the study of the load characteristics in the continuous operation of a magnetron generator. **Result.** Theoretical and experimental studies have shown the effectiveness of the technical solution when using standard

magnetron sources switched towards each other in drying plants. This technical solution will significantly align the field distribution inside the working chamber and significantly reduce the influence of the reflected signal on the cathode of magnetrons, thereby increasing the service life of microwave power sources. **Scientific novelty.** The results of the scientific study show that the proposed scheme of switching on two magnetron generators operating on an inconsistent load with a section of the wave-water shifting the phases of the sources relative to each

Введение. В настоящее время одним из инновационных способов сушки сельскохозяйственной продукции является сочетание активного вентилирования с использованием сверхвысокочастотного излучающего поля. В таких установках в силу их конструктивных особенностей высокий уровень мощности отраженного сигнала, что ведет к снижению КПД процесса сушки и сокращению ресурса работы магнетрона [1, 2, 3].

В настоящей работе излагаются результаты теоретического и экспериментального исследования влияния отраженных сигналов на выходную мощность магнетрона, поиск режимов работы, в которых влияние отражений минимально, и способов, позволяющих реализовать эти режимы.

В качестве основных характеристик магнетронного генератора приняты зависимости выходной (генерируемой) мощности магнетрона от фазы коэффициента отражения при заданной амплитуде последнего. Результаты взаимодей-

other reduces the power of the reflected signal.

Keywords: magnetron generator, reflected signal power, coaxial-wave transition, reflection coefficient.

For citation: Chetverikov E.A., Lyagina L.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. Investigation of the magnetron generator characteristics at high power parameters of the reflected signal in agricultural drying equipment. Vestnik Kurganskoy GSKhA. 2022; (2-42): 72-80. https://doi.org/10.52463/22274227_2022_42_72 (In Russ).

ствия в магнетроне, вид и траектории «электронных спиц» зависят от суммарного СВЧ-сигнала, его амплитудных и фазовых характеристик в каждом резонаторе и в каждой точке пространства взаимодействия [4, 5]. Последние же зависят от результатов сложения собственного СВЧ-сигнала магнетрона (в резонаторе, в котором расположена петля связи) и волны, отраженной внутрь него от неидеально согласованной СВЧ-нагрузки, т.е. от амплитудных и фазовых соотношений этих двух волн. Зависимость выходной мощности магнетрона от фазы коэффициента отражения его СВЧ-нагрузки можно измерить, изменяя фазовую длину СВЧ-тракта на участке от вывода энергии магнетрона до неоднородности, определяющей амплитуду отраженного сигнала.

Методика. В экспериментальной установке варьирование фазовой длины тракта осуществлялось с помощью последовательного включения в измерительную схему (рисунок 1)

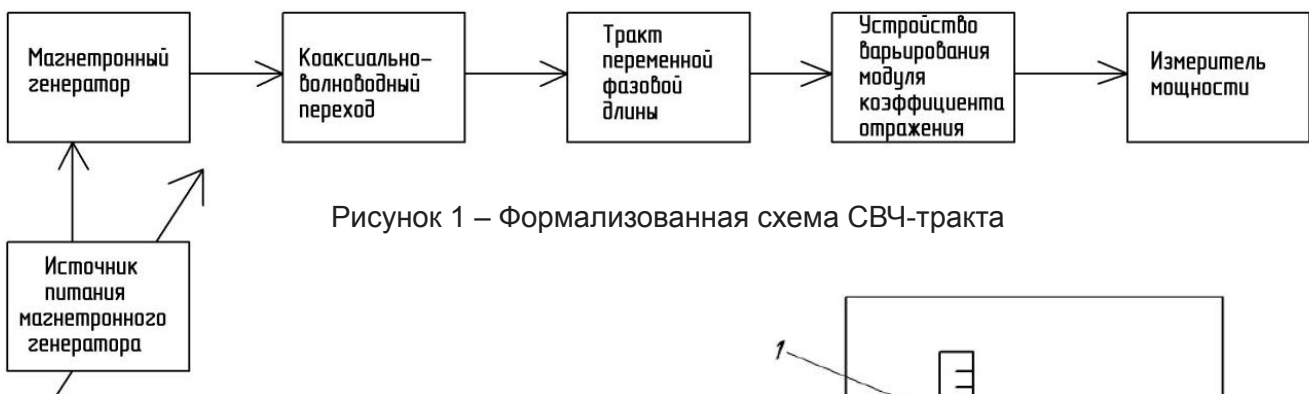
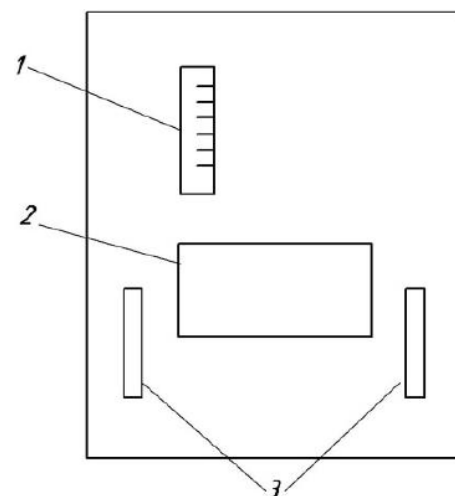


Рисунок 1 – Формализованная схема СВЧ-тракта

волноводных элементов различной длины, изменение же амплитуды коэффициента отражения осуществлялось за счет использования специальной диафрагмы (рисунок 2), перемещением которой в поперечном сечении волновода представлялось возможным частично перекрывать его канал, уменьшая при этом его узкую стенку без изменения ширины, изменяя модуль коэффициента отражения $|\rho|$ в полном диапазоне его возможных значений ($0 < |\rho| < 1$) [6, 7, 8].

Определение зависимости между положением диафрагмы в отражающей плоскости и создаваемым ею в этом положении значением модуля коэффициента отражения проводилось на экспериментальной установке (рисунок 3).



1 – шкала, 2 – приемник волновода, 3 – регулируемые отверстия диафрагмы
Рисунок 2 – Диафрагма для измерения коэффициента отражения

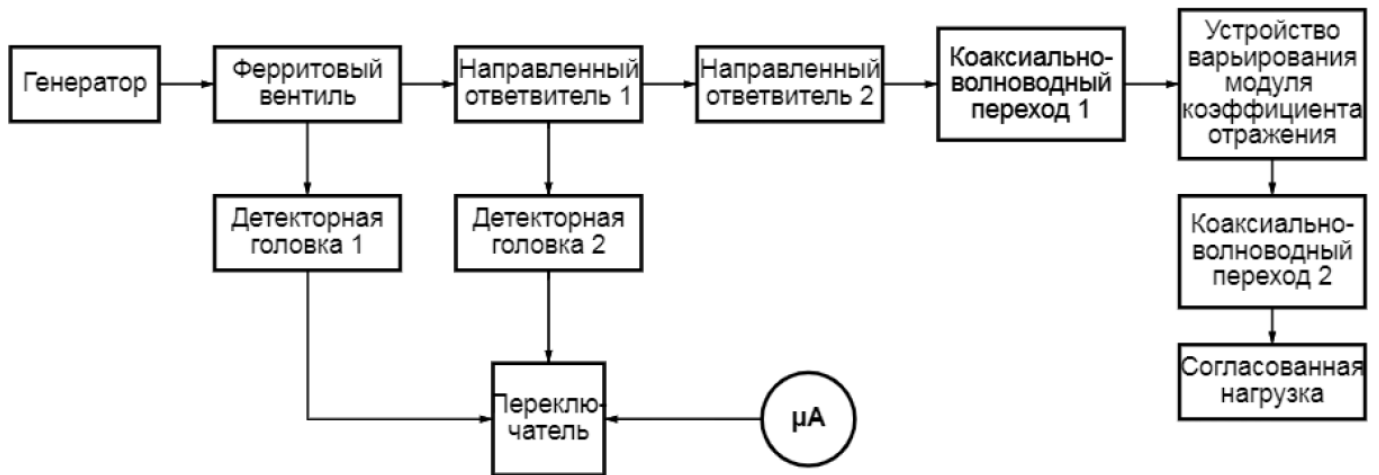


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки для определения коэффициента отражения.

Полученная экспериментальная зависимость модуля коэффициента отражения (по мощности) от положения диафрагмы свидетельствует (рисунок 4) о принципиальной возможности реализации практически любых величин модуля в диапазоне $0,05 < |\rho| < 1$ (значения $|\rho| < 0,05$ недостижимы в силу влияния других неоднородностей волноводной системы).

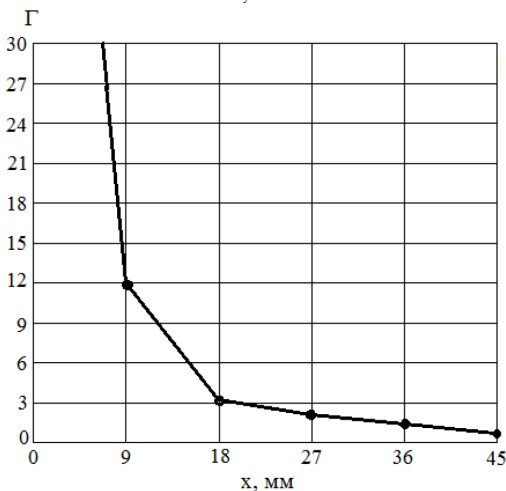
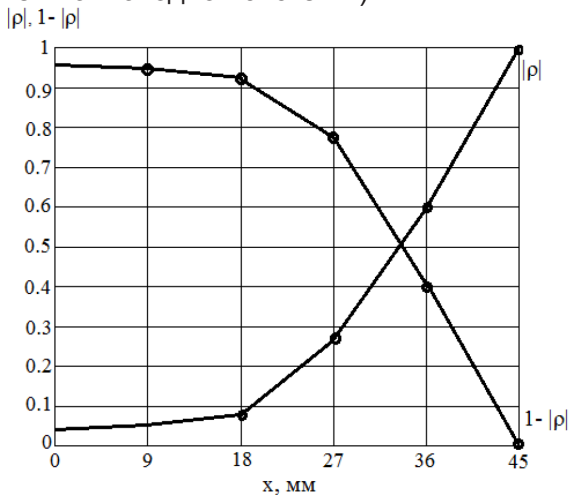


Рисунок 4 – Полученные экспериментальные зависимости для коэффициента отражения в зависимости от фазовой длины магнетрона

Полученная зависимость использовалась в дальнейшем в качестве градуировочной для последующих экспериментов (рисунок 5).

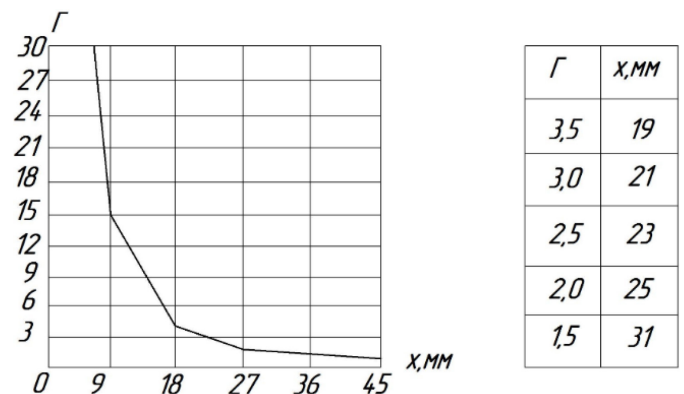


Рисунок 5 – Полученная экспериментально градуировочная зависимость для коэффициента отражения

Соотношение фаз прямого и отраженного сигнала в различных экспериментах отличалось на величину, кратную 30 градусам (12 точек на период). Применительно к рассматриваемой схеме это соответствовало изменению фазовой длины встраиваемого участка регулярного волновода на 15 градусов, поскольку этими участками одновременно (без изменения знака фазы) изменялись фазовые пути и прямой, и обратной волны. Для упрощения проведения эксперимента было изготовлено не 12, а только 5 участков дополнительного волновода. Длины участков, а также вносимые ими фазовые сдвиги приведены в таблице 1.

Геометрические длины элементов (участков волновода) тракта переменной фазовой длины (ТПФД) задавались, исходя из расчетной длины волны рабочего сигнала магнетрона (частота $f=2,45$ ГГц) в стандартном волноводе

Таблица 1 – Расчет фазовых сдвигов, вносимых элементами технологического перехода фазовой длины (ТПФД)

Обозначение элемента	Длина, мм	Δφ		(2Δ-2π)	
		рад	град	рад	град
1 ₁	90	1,079π	194,2	0,158π	28,4
1 ₂	97	1,163π	209,4	0,326π	58,8
1 ₃	104	1,247π	224,5	0,494π	89,0
1 ₄	110	1,319π	237,4	0,638π	114,8
1 ₅	123	1,475π	265,5	0,95π	171,0

на фундаментальной моде Н10 [9, 10], которая определялась из соотношения:

$$\Lambda_{10} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр10}}\right)^2}}, \quad (1)$$

где λ_{кр10} – критическая длина волны на типе колебаний Н₁₀ в стандартном волноводе сечением а×b (90×45 мм): λ_{кр10} = 2а, λ – рабочая длина волны магнетрона λ=c/f, с – скорость света

и составляла на частоте генерации магнетрона для типа колебаний Н10 16,68 см. С учетом этой величины ТПФД комплектовался из участков регулярного волновода длиной 90; 97; 104; 110 и 123 мм.

В процессе измерений использовались составленные из двух-трёх элементов варианты ТПФД:

$$l_6 = l_1 + l_4, \quad l_7 = l_1 + l_5, \quad l_8 = l_2 + l_5, \quad l_9 = l_3 + l_5, \quad l_{10} = l_4 + l_5, \\ l_{11} = l_2 + l_4 + l_5, \quad l_{12} = l_3 + l_4 + l_5.$$

Значения вносимых такими вариантами ТПФД фазовых длин представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчет фазовых длин составных ТПФД

Обозначение	Состав	2Δφ, град
l ₆	l ₁ +l ₄	28,4+114,8=143,2
l ₇	l ₁ +l ₅	28,4+171,0=199,4
l ₈	l ₂ +l ₅	58,8+171,0=229,8
l ₉	l ₃ +l ₅	89,0+171,0=260,0
l ₁₀	l ₄ +l ₅	114,8+171,0=285,8
l ₁₁	l ₁ +l ₄ +l ₅	28,4+114,8+171,0=314,2
l ₁₂	l ₂ +l ₄ +l ₅	58,8+114,8+171,0=344,8

Совокупность всех этих участков (вариантов ТПФД) давала практически полное и равномерное заполнение диапазона значений величин 2Δφ от 0 до 2π (рисунок 6). Нулевой фазовый сдвиг прямого и отраженного сигналов может быть обеспечен в отсутствие в общем измерительном тракте элементов ТПФД.

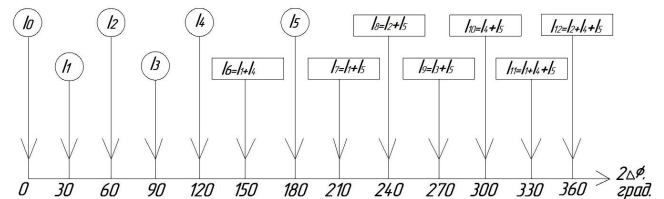


Рисунок 6 – Распределение фазовых длин волноводов

Измерения в рабочем режиме проводились на установке, блок-схема которой представлена на рисунке 3. Сигнал с выхода магнетронного генератора P₀ проходит через СВЧ-тракт, содержащий устройства – ТПФД и УВМ, частично – P₀(1-|ρ|), проходит через диафрагму УВМ, а частично – |ρ| P₀, отражается и поступает обратно в магнетрон. Уровень |ρ| задается и определяется положением шкалы на диафрагме УВМ относительно края фланца одного из регулярных волноводов УВМ. Прошедшая через УВМ мощность P = (1-|ρ|) P₀ поступает в измеритель мощности. Для последующих построений воспользуемся фактическим значением мощности генерации магнетрона [11]:

$$P_0 = \frac{\bar{P}}{1 - |\rho|}. \quad (2)$$

Измерения проводились в следующей последовательности:

1. Снимались зависимости выходной мощности магнетрона от величины анодного напряжения при работе на согласованную нагрузку (охлаждаемую нагрузку calorиметрического измерителя мощности). Устройства ТПФД и УВМ из схемы, представленной на рисунке 3, при этих измерениях исключались. Варьирование анодного напряжения осуществлялось с помощью регулируемого автотрансформатора (ЛАТР), управляющего напряжением первичной обмотки трансформатора в источнике питания магнетрона (ИПМ). Измерения проводились при напряжениях анода 3.8, 3.85, 3.9...4.25 кВ (ано-

дное напряжение 4,0 кВ соответствует напряжению на входе первичной обмотки упомянутого выше силового трансформатора 220В); зависимость анодного напряжения от напряжения питания трансформатора: в рассматриваемом достаточно узком диапазоне значений анодного напряжения можно считать линейной.

2. Устанавливалось напряжение, соответствующее нижней границе первой зоны генерации магнетрона (~3,8 кВ). В схему вводился один из элементов ТПФД с фазовой длиной $7\pi/1_2$ (I_1) и УВМ, диафрагма которого установлена в положение ($x=22$ мм), соответствующее $|\rho|=0,1$ (КСВН ГН = 1,92), и производились измерения мощности генерации. Эти измерения затем последовательно проводились для всех значений напряжения (по п. 1) при фиксированных положениях ТПФД и УВМ.

3. В тракте ТПФД производилась замена волноводного участка с фазовой длиной $7\pi/12$ на тракт с фазовой длиной $2\pi/3$ (I_2), и вновь проводились измерения по п.п. 2, а затем они последовательно повторялись с длинами ТПФД от I_3 до I_{12} .

4. Диафрагма УВМ последовательно перемещалась в положения, соответствующие значению $|\rho|=0,2; 0,3; 0,4; 0,5$, в каждом из которых производились измерения мощности со всеми участками волноводного тракта в составе ТПФД и их комбинациями (от I_1 до I_{12}). В режимах с большими значениями $|\rho|$ измерения не проводились, т.к. в них быстро расходуется ресурс магнетрона.

В результате проведенных по такой методике измерений строились зависимости выходной мощности магнетрона от соотношения фаз прямого и отраженного сигналов при фиксированной для каждой зависимости величине модуля коэффициента отражения [I_2, I_3]. Совокупность этих кривых разделялась по семействам, каждое из которых характеризовалось своим анодным напряжением. Внутри каждого семейства кривые отличались друг от друга величинами фазового соотношения прямого и отраженного сигналов.

Выбрав на каждой из кривых минимальное значение мощности, можно каждое из отмеченных семейств превратить в зависимость величины минимально возможной мощности генерации от величины модуля коэффициента отражения. Семейство таких зависимостей, каждая из которых построена для своего анодного напряжения, содержит практически всю необходимую информацию и для анализа влияния нагрузочных характеристик на основные параметры магнетро-

на, и для поиска решений, позволяющих частично скомпенсировать это влияние [14, 15].

Предварительные испытания, проведенные для рабочего напряжения магнетрона (напряжение первичной обмотки трансформатора источника его питания – 220 В) и малых отражений от плоскости рассогласования (смещение диафрагмы $X=0$; 9 и 18 мм соответственно), показали (рисунок 7) высокую изрезанность зависимостей $P_{\text{ВЫХ}}=f(2\Delta\phi)$, чего при задаваемых значениях КСВН нагрузки ($\Gamma_{\text{н}} \leq 1,8$, см. рис.5) принципиально быть не должно: максимальная изрезанность зависимости выходной генерируемой мощности от фазы коэффициента отражения составляет при таких значениях КСВН нагрузки (в соответствии с паспортными данными на магнетрон) не более 7%.

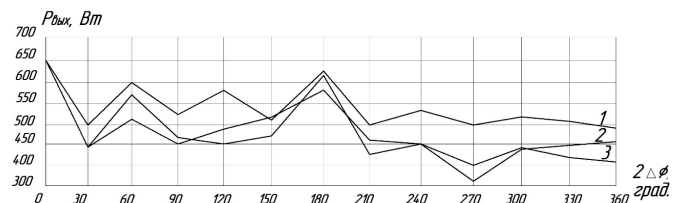


Рисунок 7 – Выходные характеристики магнетронных источников при включении с одной стороны рабочей камеры

Для каждой из снятых зависимостей и для каждого значения $2\Delta\phi$ была определена величина коэффициента перерасчета мощности $K_{\text{пн}}$:

$$K_{\text{пн}} = P_{\text{пн}} / P_{\text{п0}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{пн}}$ – мощность, измеренная для случая комплектации ТПФД в варианте I_i ; $P_{\text{п0}}$ – мощность, измеренная в отсутствие в измерительном тракте элементов ТПФД.

Затем для каждого значения $2\Delta\phi$ было рассчитано среднее геометрическое трех величин $K_{\text{п}}$, измеренных и рассчитанных для малых уровней отражений (при $x=0, 9, 18$ мм) – $K_{\text{п}}$, которое и использовалось для корректировки зависимостей, измеренных при больших уровнях отражений. В качестве окончательного варианта коэффициента пересчета было принято среднее геометрическое $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{х}}$, рассчитанное для каждого значения величины $2\Delta\phi$ (рисунок 8). Использование этого коэффициента пересчета позволило преобразовать измеренные ранее зависимости $P_{\text{ВЫХ}}$ от величины $2\Delta\phi$ к более соответствующему реальности виду (рисунок 9).

Их изрезанность была снижена по сравнению с результатами, представленными на рисунке 7, соответственно с величины $P_{max}/P_{min}=1,71$ до величины 1,23 ($X=0$) (рис.10 а); с 1,45 до 1,28 ($X=9$) (рисунк 9, б); с 1,81 до 1,3 ($X=18$) (рисунк 9, в).

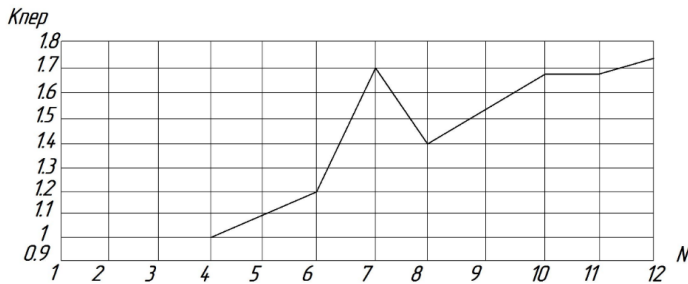


Рисунок 8 – Коэффициент пересчета для каждого значения сдвига фазы

В более привычных обозначениях изрезанности:

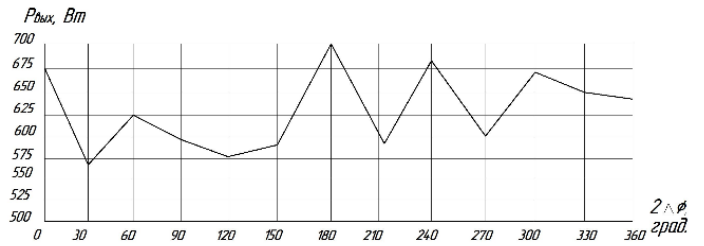
$$\Delta \tilde{P} = 2 \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}, \quad (4)$$

где P_{max} и P_{min} соответственно максимальные и минимальны значения мощности, ΔP изменилось соответственно с 49 до 21% ($X=0$); с 40 до 24% ($X=9$) и с 58 до 25% ($X=18$).

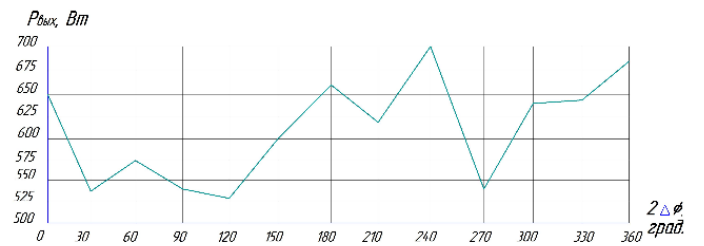
На рисунке 9 приведены также построенные с учетом коэффициента пересчета зависимости для больших смещений диафрагмы $X=27$ ($|p|=0,25$, рис. 9, г) и $X=36$ ($|p|=0,6$, рис. 9, д). Все эти кривые получены при номинальном анодном напряжении 220 В.

Результаты. Анализ полученных результатов позволяет выявить важную тенденцию, характеризующую влияние неидеально согласованной нагрузки на параметры магнетронного генератора.

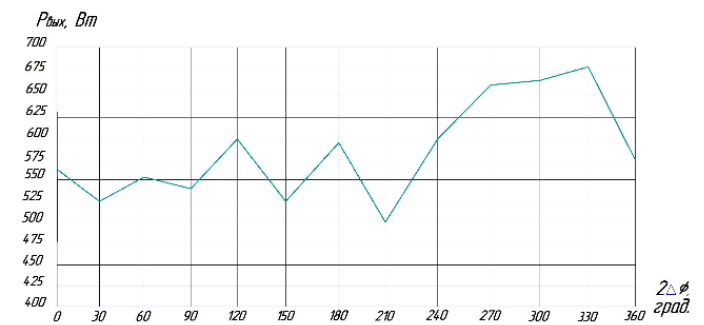
С ростом величины модуля коэффициента отражения существенно увеличивается изрезанность зависимости $P_{вых} = P_{вых}(2\Delta\phi)$ и снижается средний по круговой фазе уровень генерируемой мощности, пересчитанной с учетом отражений от рассогласующей диафрагмы и соответствующего снижения мощности, попавшей в охлаждаемую нагрузку измерителя СВЧ-мощности. Кроме то-го, из анализа выходных характеристик (рисунк 10) можно сделать вывод, что чередование максимумов и минимумов выходной мощности повторяется через каждые $\pi/3$ градусов, что соответствует длине ТПФД 9 мм.



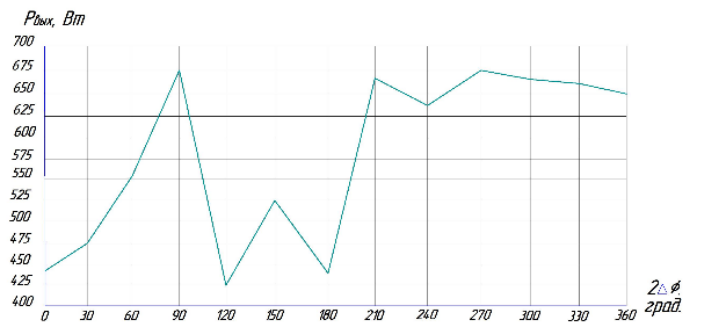
а)



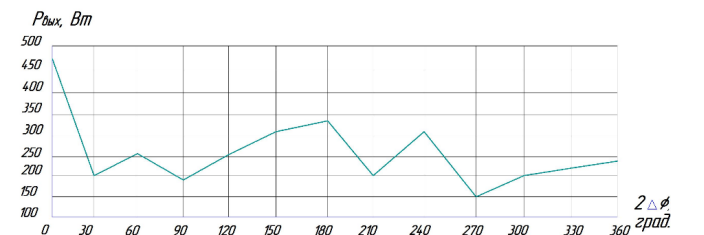
б)



в)



г)



д)

Рисунок 9 – Изрезанность поля при разных уровнях отражения: а – $X=0$, б – $X=9$, в – $X=18$, г – $X=27$ и д – $X=36$.

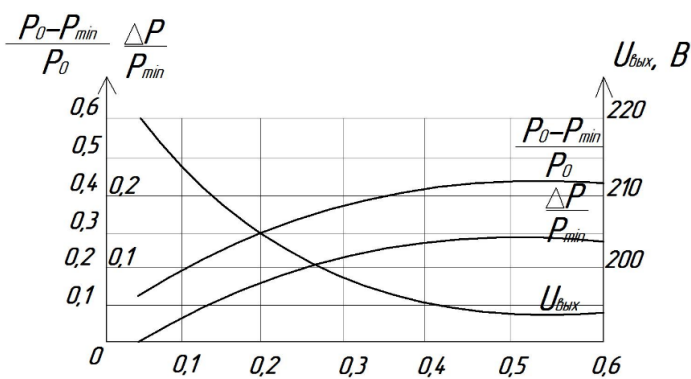


Рисунок 10 – Выходные характеристики магнетронных генераторов, включенных по схеме «навстречу друг другу»

На основании проведенных исследований было предложено включить второй магнетронный генератор навстречу первому через участок ТПФД, равный длине, соответствующей сдвигу фазы относительно первого магнетрона $\pi/3$ или кратной этой длине. С одной стороны, это вдвое увеличит потребление энергии, но с другой – возрастет действие поля на объект, а вследствие уменьшения изрезанности будет повышен КПД передачи энергии поля и значительно сократится влияние отраженной энергии на магнетронные источники.

Распределение поля при схеме включения источников навстречу друг другу представлено на рисунке 11.

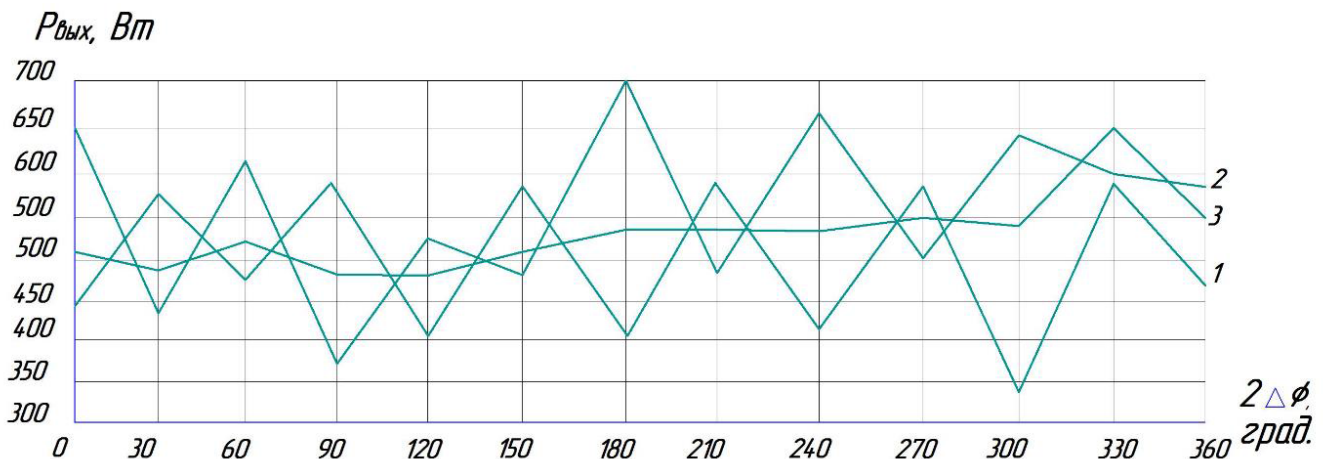


Рисунок 11 – Изрезанность поля при включении магнетронных источников по схеме «навстречу друг другу» с использованием участка волноводного перехода 90 мм на одном из источников

Кривая 3 здесь будет суммой распределения мощности от двух магнетронных источников. Для кратных длин волновода картина распределения не будет существенно отличаться.

Как видно, кривая 3 практически лишена изрезанности, а перепад на ней будет составлять не более 3 дБ, что позволяет судить о правильном решении при использовании отрезка волновода длиной 90 мм и кратных ей.

Вывод. Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования показывают эффективность технического решения при использовании в сушильных установках стандартных магнетронных источников, включенных навстречу друг другу. Данное техническое решение позволит значительно выровнять распределение поля внутри рабочей камеры и значительно уменьшить влияние отраженного сигнала на катод магнетронов, увеличив тем самым срок службы источников СВЧ-мощности.

Список источников

1 Четвериков Е.А., Шестаев А.Е. Обоснование параметров сушки зерна микроволновым полем // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX Международной научно-практической конференции. Саратов, 2018. С. 29-30.

2 Морозов С.М., Реут В.А. Электродинамическое моделирование СВЧ-установок // Теория и практика современной науки. 2016. № 12 (18). С. 877-883

3 Volgin A.V., Kargin V.A., Chetverikov E.A., Moiseev A.P., Lagina L.A. Improving the efficiency of convective grain drying by using low-intensity RF radiation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. № 954 (1). P. 012017

4 Ганеев И.Р., Тагирова А.А., Каримов Х.Т., Масалимов И.Х. Влияние режимов сушки с применением СВЧ-нагрева на ферментативную активность, энергию прорастания и всхожесть семян рапса // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021.

№ 1 (57). С. 92-98.

5 Горелов М.В., Бастрон Т.Н. Установка для предпосевной обработки и сушки семян СВЧ-энергией // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3 (83). С. 195-198.

6 Ганеев И.Р., Каримов Х.Т., Масалимов И.Х. Исследование режимов сушки семян подсолнечника в СВЧ-установке непрерывного действия // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (42). С. 67-71.

7 Кокорев А.В., Логачёв А.В., Заплетина А.В. Анализ установок для предпосевной обработки семян овощных культур ЭМП СВЧ // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы X Международной научно-практической конференции молодых учёных, посвященной Году экологии и 65-летию Красноярского ГАУ. Красноярск, 2017. С. 121-124.

8 Бастрон А.В., Василенко А.А., Горелов М.В. Обработка семян СВЧ-энергией // Сельский механизатор. 2017. № 4. С. 14 -15.

9 Горелов М.В., Бастрон Т.Н. Исследование режимов обработки семян сосны в ЭМП СВЧ // Вестник ИрГСХА. 2017. Вып. 81/2. С. 55-61.

10 Чуринова М.С. Учет и использование нелинейности и распределение параметров процесса сушки зерна // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 1 (25). С. 126-131.

11 Сивяков Д.Б. Камера с бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2. С. 29-33.

12 Сивяков Б.К., Григорьян С.В. Установка СВЧ-сушки сельскохозяйственных продуктов в фермерских хозяйствах // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1. С. 9-13.

13 Sivyakov B.K., Grigorjan S.V., Sivyakov D.B. Mathematical model of microwave camera on the groovewaveguide with additional injection of the microwave energy // International conference on actual problems of electron devices engineering, APEDE. 2018. Vol. 1. P. 334- 337.

14 Цугленок Г.И., Заплетина А.В. Исследования влияния параметров СВЧ- энергии на качественные и количественные показатели семян гречихи // Вестник КрасГАУ. 2008. № 6. С. 157-165.

15 Исаев А.В., Бастрон А.В., Яхонтова В.С. Исследование влияния степени неравномерности нагрева семян рапса в ЭМП СВЧ на их энергию прорастания и всхожесть // Вестник КрасГАУ. 2016. № 4. С. 131-137.

References

1 Chetverikov E.A., Shestakov A.E. Obosnovanie parametrov sushki zerna mikrovolnovym polem [Substantiation of grain drying parameters by microwave field]. Materials of the IX International Scientific and Practical Conference "Actual problems of agroindustrial power engineering". Saratov; 2018: 29-30. (In Russ.).

2 Morozov S.M., Reut V.A. Jelektrodinamicheskoe modelirovanie SVCh- ustanovok [Electrodynamic modeling of microwave installations]. Teorija i praktika sovremennoj nauki. 2016; (12-18): 877-883. (In Russ.).

3 Volgin A.V., Kargin V.A., Chetverikov E.A., Moiseev A.P., Lagina L.A. Improving the efficiency of convective grain drying by using low-intensity RF radiation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022; (954-1): 012017.

4 Ganeev I.R., Tagirova A.A., Karimov H.T., Masalimov I.H. Vlijanie rezhimov sushki s primeneniem SVCh-nagreva na fermentativnuju aktivnost', jenergiju prorastanija i vshozhest' semjan rapsa [Influence of drying modes using microwave heating on enzymatic activity, germination energy and germination of rapeseed seeds]. Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2021; (1-57): 92-98. (In Russ.).

5 Gorelov M.V., Bastron T.N. Ustanovka dlja predposevnoj obrabotki i sushki semjan SVCh-jenergij [Installation for pre-sowing treatment and drying of seeds with microwave energy]. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2020; (3-83): 195-198. (In Russ.).

6 Ganeev I.R., Karimov H.T., Masalimov I.H. Issledovanie rezhimov sushki semjan podsolnechnika v SVCh-ustanovke nepreryvnogo dejstvija [Investigation of sunflower seed drying modes in a continuous microwave installation]. Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2017; (2-42): 67-71. (In Russ.).

7 Kokorev A.V., Logachev A.V., Zapletina A.V. Analiz ustanovok dlja predposevnoj obrabotki semjan ovoshhnyh kul'tur JeMP SVCh [Analysis of installations for pre-sowing treatment of vegetable seeds by microwave EMF]. Materials of the X International scientific and practical conference of young scientists dedicated to the Year of Ecology and the 65th anniversary of the Krasnoyarsk State Agrarian University "Innovative trends in the development of Russian science". Krasnoyarsk; 2017: 121-124. (In Russ.).

8 Bastron A.V., Vasilenko A.A., Gorelov M.V. Obrabotka semjan SVCh-jenergij [Seed treatment with microwave energy]. Selskiy Mechanizator. 2017; (4): 1415. (In Russ.).

9 Gorelov M.V., Bastron T.N. Issledovanie rezhimov obrabotki semjan sosny v JeMP SVCh [Investigation of pine seed treatment modes in microwave EMF]. Vestnik IrGSHA. 2017; (81-2): 55-61. (In Russ.).

10 Churina M.S. Uchet i ispol'zovanie nelinejnosti i raspredelenie parametrov processa sushki zerna [Accounting and use of nonlinearity and distribution of grain drying process parameters]. Bulletin of Omsk State Agricultural University. 2017; (1-25): 126-131. (In Russ.).

11 Sivyakov D.B. Kamera s begushhimi volnami na volnovode, svernutom v kol'co [A camera with traveling waves on a waveguide rolled into a ring]. Journal of Electrotechnics. 2017; (2): 29-33. (In Russ.).

12 Sivyakov B.K., Grigoryan S.V. Ustanovka SVCh-sushki sel'skohozjajstvennykh produktov v fermerskikh hozjajstvakh [Installation of microwave drying of agricultural products in farms]. Journal of Electrotechnics. 2019; (1): 9-13. (In Russ.).

13 Sivyakov B.K., Grigorjan S.V., Sivyakov D.B. Mathematical model of microwave camera on the groove waveguide with additional injection of the microwave energy. International conference on actual problems of electron devices engineering, APEDE. 2018; (1): 334-337.

14 Tsuglenok G.I., Zapletina A.V. Issledovanie vlijanija parametrov SVCh-jenergii na kachestvennye i kolichestvennye pokazateli semjan grechihi [Studies of the influence of microwave energy parameters on qualitative and quantitative indicators of buckwheat seeds]. The Bulletin of KrasGAU. 2008; (6): 157-165. (In Russ.).

15 Isaev A.V., Bastron A.V., Yakhontova B.

Issledovanie vlijanija stepeni neravnomernosti nagreva semjan rapsa v JeMP SVCh na ih jenergiyu prorastanija i vshozhest' [With the study of the influence of the degree of uneven heating of rapeseed seeds in microwave EMF on their germination energy and germination]. The Bulletin of KrasGAU. 2016; (4): 131-137. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.А. Четвериков - кандидат технических наук, доцент; AuthorID: 473680.

Л.А. Лягина - кандидат технических наук, доцент; AuthorID: 729900.

А.В. Волгин - кандидат технических наук, доцент; AuthorID: 289865.

А.П. Моисеев - кандидат технических наук, доцент; AuthorID: 507316.

Information about the authors

E.A. Chetverikov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID: 473680.

L.A. Lyagina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID: 729900.

A.V. Volgin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID: 289865.

A.P. Moiseev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; AuthorID: 507316.

Статья поступила в редакцию 01.04.2022; одобрена после рецензирования 28.04.2022; принята к публикации 26.05.2022.

The article was submitted 01.04.2022; approved after reviewing 28.04.2022; accepted for publication 26.05.2022.