



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-37-44>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.385.6

## ГЕЛИТРОН: РАБОТА НА ВЫСОКИХ ГАРМОНИКАХ ОРБИТАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ И РЕЖИМ ФАЗОВОЙ СЕЛЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

А. А. КУРАЕВ, В. В. МАТВЕЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 01.06.2023*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Исследованы возможности улучшения выходных характеристик гелитрона в двух направлениях – повышение КПД в режиме фазовой селекции электронов и увеличение рабочей частоты за счет использования многоламельной электродинамической системы (увеличение азимутального индекса  $n$  рабочей моды). Полученные в процессе экспериментов результаты свидетельствуют об уникальных возможностях работы гелитрона на очень высоких гармониках орбитальной частоты электронов: вплоть до  $n = 96$  прибор имеет приемлемый КПД для генераторов малой мощности в режиме фазовой селекции электронов. Это открывает перспективы применения подобного генератора в миллиметровом диапазоне длин волн. Однако в данном диапазоне следует вместо высокочастотной многоламельной линии использовать азимутально гофрированный стержень с глубиной продольных канавок  $\Delta r = \lambda/4$ . Это наиболее эффективно в обеспечении теплового режима.

**Ключевые слова:** гелитрон, высокие гармоники орбитальной частоты, режим фазовой селекции, КПД.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Кураев, А. А. Гелитрон: работа на высоких гармониках орбитальной частоты и режим фазовой селекции электронов / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 37–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-37-44>.

## HELITRON: OPERATION AT HIGH FREQUENCY ORBITAL HARMONICS AND THE MODE OF ELECTRON PHASE SELECTION

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 01.06.2023*

**Abstract.** The possibilities of improving the output characteristics of the helitron in two directions have been studied – increasing the efficiency in the phase selection mode of electrons and increasing the operating frequency through the use of a multi-lamella electrodynamic system (increasing the azimuthal index  $n$  of the operating mode). The results obtained during the experiments indicate the unique capabilities of the helitron at very high harmonics of the electron orbital frequency: up to  $n = 96$ , the device has an acceptable efficiency for low-power generators in the electron phase selection mode. This opens up prospects for using such a generator in the millimeter wavelength range. However, in this range, instead of a high-frequency multi-lamella line, an azimuthally corrugated rod with a depth of longitudinal grooves  $\Delta r = \lambda/4$  should be used. This is most effective in providing thermal conditions.

**Keywords:** helitron, extremely high frequency orbital electron harmonics, phase selection mode, efficiency.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interest.

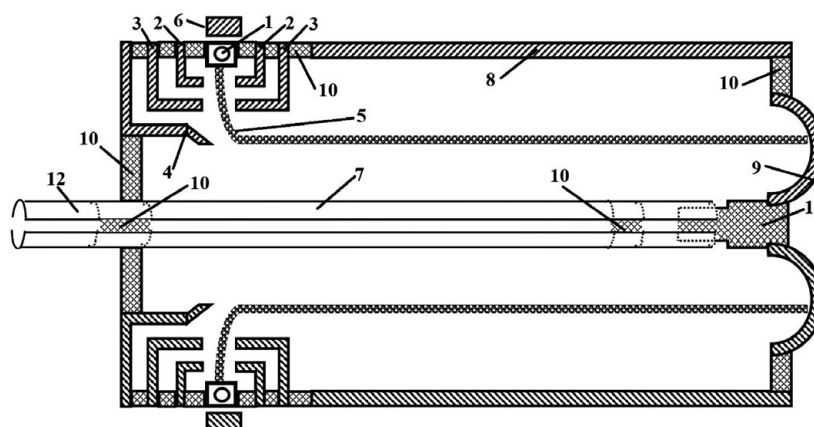
**For citation.** Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2023) Helitron: Operation at High Frequency Orbital Harmonics and the Mode of Electron Phase Selection. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 37–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-37-44> (in Russian).

## Введение

Гелитрон был предложен в 1958 г. [1] и в последующие годы подробно исследовался теоретически (в основном в пределах линейных моделей) и экспериментально [2–7]. Он обладает преимуществом перед электронными приборами СВЧ О- и М-типов, поскольку в нем используется центробежно-электростатическая фокусировка электронного потока [8], и тяжелые системы магнитной фокусировки не нужны. Предложенный D. A. Watkins и G. Wada [1] гелитрон представляет собой электронный прибор с центробежно-электростатической фокусировкой. Электронный поток радиусом  $r_0$  имеет азимутальную  $v_\phi = r_0\omega_c$  ( $\omega_c$  – орбитальная частота вращения электронов) и продольную  $v_z$  скорости. Траектория электронов представляет собой спираль, расположенную между высокочастотной (ВЧ) многоламельной линией радиусом  $b_1$  и экраном радиусом  $b_2$  (отсюда название *helical* – спиральный). Орбитальная частота определяется из выражения  $\omega_c = \sqrt{\frac{eU_0}{mr_0^2}}$ , где  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона;  $U_0 = \frac{\Delta U}{\ln(b_1/b_2)}$ ;  $\Delta U$  – разность потенциалов между ВЧ-линией и экраном. Таким образом, частотой  $\omega_c$  можно управлять с помощью напряжения  $\Delta U$ , т. е. частота гелитрона в режиме генерации, определяемая как  $n\omega_c$  ( $n$  – число пар ламелей ВЧ-линии (азимутальный индекс рабочей моды)), может меняться с изменением  $\Delta U$ . В режиме регенеративного усиления таким же образом меняется частотный диапазон полосы усиления. Следовательно, гелитрон имеет два преимущества: отсутствие габаритной и тяжелой системы магнитной фокусировки электронного потока и наличие электрической (безынерционной) перестройки. Кроме того, частота генерации или узкая полоса усиления в регенеративном режиме гелитрона перестраиваются электрически, и гладкость частотной характеристики определяется короткой длиной ВЧ-системы. Также многоламельная электродинамическая система гелитрона создает естественную селекцию рабочей моды на высоких гармониках частоты вращения электронов  $\omega_c$ , в отличие от гирорезонансных приборов с гладкими электродинамическими системами.

Благодаря перечисленным преимуществам гелитрон в 60-е и начале 70-х годов прошлого века нашел широкое применение в бортовых системах радиопротиводействия радиолокационных станций противовоздушной обороны, а также в системах наведения и захвата целей. Однако с середины 1970-х твердотельные модули вытеснили все электровакуумные (ЭВП) СВЧ-усилители и генераторы малой и средней мощности в наземной и бортовой электронике. Но техническая мысль развивается по спирали, подобно движению электронов в гелитроне. Примеры хорошо известны: паровой двигатель во флоте в начале XX века был замещен дизельным, но в конце XX века паровой двигатель вернулся на флот в виде паровой турбины, только вместо угля – атомный реактор. Первыми автомобилями 1893 года были электромобили [9] со свинцовыми аккумуляторами, но их быстро вытеснили автомобили с двигателями внутреннего сгорания. А теперь наступает век электромобилей. Такая же ситуация с гелитроном и ЭВП СВЧ. Появление СВЧ-пушки резко изменило ситуацию. Ее субнаносекундные электромагнитные импульсы мощностью 1–10 ГВт, беспрепятственно проникающие через блокирующие устройства, наносят физическое и функциональное поражение твердотельным модулям. ЭВП СВЧ не имеют физического поражения, а функциональное происходит только в момент действия импульса (распыляется электронный поток, затем фокусировка восстанавливается). То же самое относится к действию электромагнитного импульса при ядерном взрыве. Поэтому происходит «возвращение» ЭВП СВЧ в оборонную электронику, возрождаются исследования, разработки и производство различных типов этих приборов с улучшенными выходными параметрами [10]. Это касается и гелитрона.

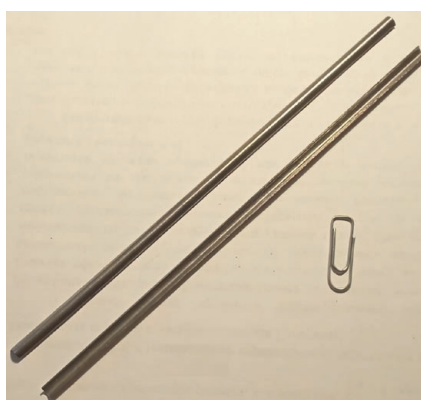
Настоящая статья посвящена исследованию возможностей улучшения выходных характеристик гелитрона в двух направлениях: повышение КПД в режиме фазовой селекции электронов и увеличение рабочей частоты за счет использования многоламельной электродинамической системы (увеличение азимутального индекса  $n$  рабочей моды). На рис. 1 изображена схема экспериментального макета гелитрона с обращенной электронной оптикой и азимутальным индексом рабочей моды  $n = 1$  (двухпроводная линия внутри экрана).



**Рис. 1.** Схема конструкции гелитрона  
**Fig. 1.** Construction diagram of the helitron

На рис. 1 приведены следующие обозначения: 1 – кольцевой катод с внутренней эмитирующей поверхностью; 2 – кольцевые электроды, формирующие электронный поток, изготовлены из стали АРМКО – магнитопроводящего материала; 3, 4 – кольцевой анод и направляющий электрод соответственно, изготовленные из немагнитной нержавеющей стали 1ХН9Т; 5 – вращающийся электронный поток; 6 – внешний кольцевой магнит; 7 – внутренняя двухпроводная линия, изготовленная из тантала ( $Ta^{181}$ ); 8 – внешний цилиндрический экран, изготовленный из меди; 9 – медный коллектор; 10, 11 – изоляторы из радиотехнической керамики 22ХС, спаянные вакуумно-плотно с металлическими элементами конструкции; 12 – двухпроводный вывод сигнала. Следует отметить, что изолятор 11 не спаян с изолятором 7, имеется запас лифта для линии 7 при ее разогреве.

На рис. 2 изображена фотография элементов внутренней двухпроводной линии (рис. 1, поз. 7). Формирование электронного потока (рис. 1) происходит следующим образом: эмитируемые с поверхности катода электроны формируются в радиальный поток полями электронной линзы, образуемой электродами 2 и анодами 3, и одновременно отклоняются в азимутальном направлении магнитной системой 6–2. Далее поток ускоряется полем внутренней двухпроводной линии и направляется полем электрода 4 в область взаимодействия, где осуществляется центробежно-электрическая фокусировка электронов за счет разности потенциалов между внешним цилиндрическим экраном и внутренней двухпроводной линией.



**Рис. 2.** Элементы двухпроводной внутренней линии гелитрона  
**Fig. 2.** The elements of helitron two-wire internal line

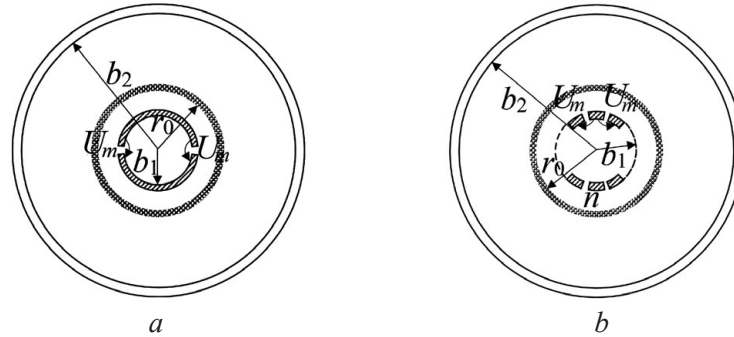
Тантал в качестве материала для внутренней двухпроводной линии был выбран по следующим причинам:

- 1) предполагался режим работы гелитрона с фазовой селекцией электронов с осаждением их на внутреннюю линию, что могло привести к ее сильному разогреву; тантал же – один из наиболее тугоплавких металлов (температура плавления  $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- 2) легко обрабатывается (например, штамповкой), в отличие от вольфрама;

3) обладает уникальным свойством: при нагревании он адсорбирует газы  $H_2$ ,  $N_2$  и другие с образованием твердых растворов.

Последнее очень важно для экспериментальных макетов: остаточные газы легко удаляются, и необходимый уровень вакуума (менее  $10^{-6}$  мм рт. ст.) сохраняется.

На рис. 3 изображены поперечные сечения области взаимодействия гелитронов.



**Рис. 3.** Поперечное сечение гелитрона: *a* – для описываемой конструкции с азимутальным индексом  $n = 1$ , число ламелей 2; *b* – в общем случае при рабочей моде с  $n$ , число ламелей  $2n$ ;

$U_m$  – напряжение ВЧ-поля между ламелями;  $b_1$  – внешний радиус многопроводной линии;  $b_2$  – внутренний радиус экрана;  $r_0$  – радиус пучка на входе области взаимодействия

**Fig. 3.** Cross section of the helitron: *a* – for the described design with  $n = 1$ , number of lamellas 2; *b* – in the general case, for an operating mode with an azimuthal index  $n$ , number of lamellas  $2n$ ;

$U_m$  – RF field voltage between the lamellas;  $b_1$  – outer radius of the multiwire line;  $b_2$  – inner radius of the screen;  $r_0$  – beam radius at the entrance of the interaction region

При работе гелитрона на высоких гармониках орбитальной частоты вращения электронов  $\omega_c$  ( $n > 1$ ) в структуре многоламельной линии должны быть предусмотрены внутренние связи, соединяющие однопотенциальные ламели и обеспечивающие селекцию  $\pi$ -вида поперечной структуры волны (точно так же, как в магнетроне). Описанный выше экспериментальный макет гелитрона имел следующие параметры:  $b_1 = 1,9$  мм;  $b_2 = 4,0$  мм; длина области взаимодействия  $d = 320$  мм; напряжение на аноде (рис. 1, поз. 3)  $U_a = 135$  В; напряжение между линией 7 и экраном  $8 - \Delta U = 650 - 1700$  В. Диапазон генерируемых частот составлял 1,40–2,07 ГГц. КПД  $\eta(f)$  по диапазону частот имел следующие значения: 1,40 ГГц – 7,2 %; 1,52 ГГц – 9 %; 1,80 ГГц – 6 %; 1,94 ГГц – 4,5 %; 2,00 ГГц – 7,5 %; 2,07 ГГц – 7,3 %. Режим работы прибора соответствовал отсутствию осаждения электронов на внутреннюю линию, т. е. это был режим без фазовой селекции электронов.

### Математическая модель гелитрона

Безразмерные уравнения движения ансамбля  $N$  крупных частиц с номерами  $i$ , моделирующих электронный поток, в поле  $T_{n|l}$  моды многопроводной линии в экране имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_{zi}}{d\theta} = \frac{\gamma_i \beta_{\varphi i}^2}{r_i} - E_r + \beta_{zi} B_\varphi - \frac{D}{r_i}; \\ \frac{dP_{\varphi i}}{d\theta} = -\frac{\gamma_i \beta_{ri} \beta_{\varphi i}}{r_i} - \beta_{zi} B_r - E_\varphi; \\ \frac{dP_{zi}}{d\theta} = -\beta_{ri} B_\varphi + \beta_{\varphi i} B_r; \\ \frac{dr_i}{d\theta} = \beta_{ri}; \quad \frac{d\varphi_i}{d\theta} = \frac{\beta_{\varphi i}}{r_i}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $0 \leq z \leq d$ ;  $i$  – номер электрона (крупной частицы),  $i = \overline{1, N}$ ;  $\gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_i^2}} = \sqrt{1 + P_{ri}^2 + P_{\varphi i}^2 + P_{zi}^2}$ ;  $\beta_i = v_i/c$ ,  $\beta_{ri} = v_{ri}/c$ ,  $\beta_{zi} = v_{zi}/c$ ;  $c$  – скорость света в пустоте;  $\theta_i = \omega t_i$ ;  $\omega$  – рабочая частота генератора;  $z = z'\omega/c = 2\pi z'/\lambda$ ;  $z'$  – длина вдоль оси;  $r = r'\omega/c = 2\pi r'/\lambda$ ;  $r'$  – радиус  $i$ -го электрона;  $\overline{P}_i = \gamma_i \overline{\beta}_i$  – импульс  $i$ -го электрона;  $D$  – нормированная разность потенциалов между линией (радиус  $b_1$ ) и экра-

ном (радиус  $b_2$ ),  $D = \frac{eU_0}{m_0c^2}$ ;  $m_0$  – масса покоя электрона;  $U_0 = \frac{\Delta U}{\ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right)}$ ;  $\Delta U$  – разность потенциа-

лов между линией (радиус  $b_1$ ) и экраном (радиус  $b_2$ );  $b_1 = b'_1k$ ;  $b_2 = b'_2k$ ;  $k = \omega/c$ ;  $b'_1, b'_2$  – радиусы.

Начальные условия к системе (1):  $\varphi_i(0) = \frac{2\pi}{nN}$ ;  $\gamma(0) = \left[1 - \beta_{\varphi 0}^2 \left(1 + \frac{1}{q^2}\right)\right]^{-\frac{1}{2}}$ ;  $z_i(0) = 0$ ;  $P_{ri}(0) = \gamma(0)\beta_{\varphi 0}$ ;  $r_i(0) = \beta_{\varphi i}(0)\frac{n}{S}$ ;  $\beta_{ri}(0) = 0$ ;  $\beta_{zi}(0) = \frac{\beta_{\varphi i}(0)}{q}$ . Безразмерные составляющие синхронной компоненты поля  $T_{n1l}$  моды с круговой поляризацией имеют вид:

$$\begin{cases} E_{\varphi} = A_0 \frac{n}{r} \mathfrak{I}_n(r) \sin z \cos(\theta - n\varphi); \\ E_r = -A_0 \frac{d\mathfrak{I}_n(r)}{dr} \sin z \sin(\theta - n\varphi); \\ B_r = -A_0 \frac{n}{r} \mathfrak{I}_n(r) \cos z \sin(\theta - n\varphi); \\ B_{\varphi} = A_0 \frac{d\mathfrak{I}_n(r)}{dr} \cos z \cos(\theta - n\varphi), \end{cases} \quad (2)$$

где  $A_0$  – нормированное ВЧ-напряжение между соседними ламелями,  $A_0 = \frac{eU_m}{2m_0c^2}$ ;  $U_m$  – ВЧ-нап-

ряжение между соседними ламелями (рис. 3);  $\mathfrak{I}_n(r) = \frac{\left(\frac{b_2^2 b_1}{r}\right)^n - (rb_1)^n}{b_2^{2n} - b_1^{2n}}$ ;  $b_1 = 2\pi b'_1/\lambda$ ;  $b_2 = 2\pi b'_2/\lambda$ .

Оптимизацию гелитрона проводили по КПД, который определяли по формуле

$$\eta(z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_0 - \gamma_i(d)}{\gamma_0 - 1}. \quad (3)$$

### Результаты расчета гелитрона

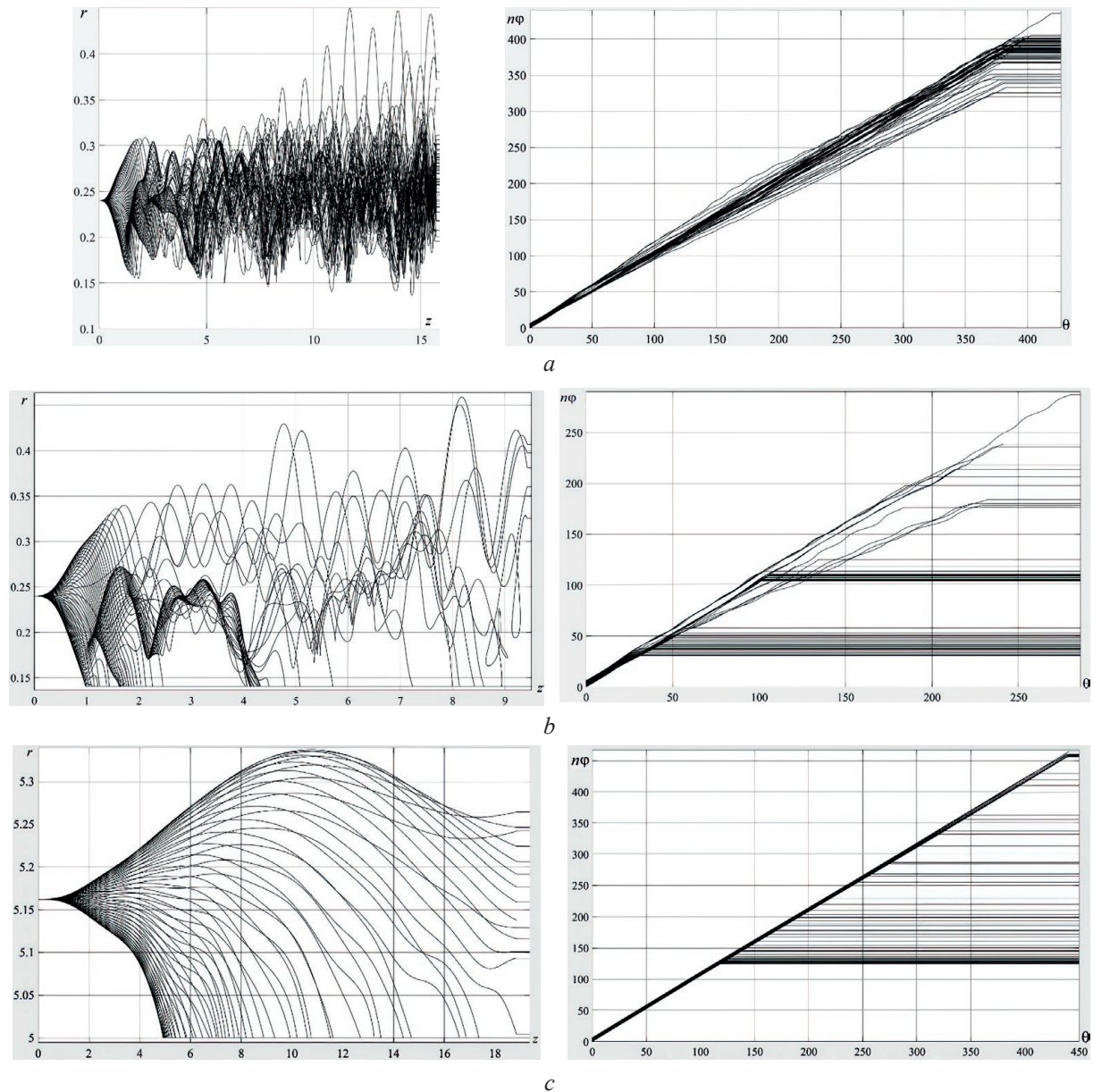
Расчеты гелитрона выполняли для конструкции, представленной на рис. 1, с многоламельной электродинамической системой колебания  $T_{n1l}$ . В табл. 1 показаны варианты оптимальных параметров гелитрона для разного количества ламелей. Режим фазовой селекции отражен в табл. 1 в виде значений параметров для различного числа ламелей с осаждением электронного потока на них.

**Таблица 1.** Варианты оптимальных параметров гелитрона  
**Table 1.** Options for optimal helitron parameters

Параметр / Parameter	Значение параметра для числа ламелей $n$ / Parameter value for the number of lamellas $n$									
	С осаждением электронного потока на ламелях / With electron flow deposition on lamellas					Без осаждения электронного потока на ламелях / Without electron flow deposition on the lamellas				
	1	2	4	16	96	1	2	4	16	96
$b_1$	0,031	0,065	0,140	0,6600	5,00000	0,01500	0,0510	0,120	0,6300	4,75000
$b_2$	0,070	0,150	0,550	1,3300	5,50000	0,12000	0,2400	0,550	1,3000	5,50000
$A_0$	0,001	0,002	0,001	0,0011	0,00005	0,00051	0,0009	0,001	0,0012	0,00009
$\beta_{\varphi 0}$	0,055	0,068	0,060	0,0570	0,05700	0,04400	0,0600	0,060	0,0570	0,05300
$q$	1,300	1,400	1,400	1,3500	1,33000	1,17000	1,2000	1,400	1,3700	1,30000
$S$	1,030	1,040	1,000	1,0500	1,06000	1,03000	1,0200	1,000	1,0400	1,01000
$d$	$2\pi$	$2\pi$	$3\pi$	$10\pi$	$6\pi$	$2\pi$	$4\pi$	$5\pi$	$10\pi$	$8\pi$
$\eta$	0,200	0,360	0,410	0,2900	0,12000	0,08400	0,1000	0,071	0,0362	0,00800



На рис. 4 приведены варианты оптимальных параметров гелитрона для числа ламелей  $n = 4$  с осаждением и без осаждения электронного потока на них и для числа ламелей  $n = 96$  с осаждением электронного потока на них.



**Рис. 4.** Движение электронов в плоскостях  $rz$  и  $n\varphi\theta$ :  
 $a, b$  – для числа ламелей  $n = 4$  без осаждения и с осаждением электронного потока на них;  
 $c$  – для  $n = 96$  с осаждением электронного потока на ламелях  
**Fig. 4.** Movement of electrons in the  $rz$  and  $n\varphi\theta$  planes:  
 $a, b$  – for the number of lamellas  $n = 4$  without deposition and with deposition of the electron flow on them;  
 $c$  – for  $n = 96$  with electron flow deposition on the lamellas

Приведенные результаты свидетельствуют об уникальных возможностях работы гелитрона на очень высоких гармониках орбитальной частоты электронов  $\omega_c$ : вплоть до  $n = 96$  прибор имеет приемлемый КПД для генераторов малой мощности в режиме фазовой селекции электронов. Это открывает перспективы применения таких генераторов в миллиметровом диапазоне длин волн. Однако в данном диапазоне вместо высокочастотной многоламельной линии лучше использовать азимутально гофрированный стержень с глубиной продольных канавок  $\Delta r = \lambda/4$ , что наиболее эффективно в обеспечении теплового режима.

Следует отметить, что при  $n \sim 96$  область взаимодействия электромагнитного поля с электронным потоком приближается к плоской:  $b_1/b_2 \sim 1,1$ . Это соответствует в режиме токооседания

клиноотрону О-типа с типичным для такого прибора КПД = 12 %. Однако у гелитрона два преимущества: эту область взаимодействия электронный поток проходит многократно (электроны вращаются по азимуту) и не требуется массивная магнитная система фокусировки. Результаты экспериментов для  $n = 1$  в режиме отсутствия токооседания хорошо коррелируют с полученными на экспериментальном макете гелитрона данными. Это свидетельствует о приемлемой достоверности используемой модели гелитрона.

### Заключение

Анализ результатов проведенных исследований свидетельствует об уникальных возможностях работы гелитрона на очень высоких гармониках орбитальной частоты электронов: вплоть до  $n = 96$  прибор имеет приемлемый КПД для генераторов малой мощности в режиме фазовой селекции электронов. Это открывает перспективы применения гелитронов в качестве генераторов малой мощности с возможностью электрической перестройки орбитальной частоты электронов в различных диапазонах длин волн, включая миллиметровый диапазон.

### Список литературы

1. Watkins, D. A. The Helitron Oscillator / D. A. Watkins, G. Wada // Proceedings of the IRE. 1958. Vol. 46, No 10. P. 1700–1712.
2. Кураев, А. А. Стартовые условия в генераторах Е-типа / А. А. Кураев, Б. Н. Романов, В. Н. Шевчик // Радиотехника и электроника. 1964. Т. 9, № 6. С. 983–993.
3. Pantell, R. H. Small-Signal Analysis of the Helitron Oscillator / R. H. Pantell // IRE Trans. 1960. ED-7, No 1. P. 20–34.
4. Nunn, W. M. Some Characteristics of Certain Electrostatically-Focused Devices / W. M. Nunn, J. E. Rowe // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50, No 1. P. 110–121.
5. Wada, G. Design, Theory and Characteristics of the Helitron – a New Type of Microwave Oscillator / G. Wada, R. H. Pantell // I.R.E. Wescon Convent. Rec. 1959. Vol. 3, No 3. P. 92–118.
6. Lindsay, P. A. Some General Properties of E-Type Devices / P. A. Lindsay, J. Caunter // Mikrowellen, Vortrage der Internationalen Tagung. 1960. Vol. 1. P. 224–241.
7. Кураев, А. А. Сверхвысококачественные приборы с периодическими электронными потоками / А. А. Кураев. Минск: Наука и техника, 1971. 312 с.
8. Генератор на циклотронном резонансе: пат. Респ. Беларусь № 11964; опубл. 11.07.2007 / А. А. Кураев, А. С. Рудницкий, А. К. Синицын.
9. Чернов, З. С. Методы фокусировки электронов в современных приборах СВЧ / З. С. Чернов // Радиотехника и электроника. 1958. Т. 3, № 10. С. 1227–1235.
10. Карцев, В. П. Приклучение великих уравнений / В. П. Карцев. М.: Знание, 1971. 317 с.
11. Викулов, И. Н. Вакуумная СВЧ-электроника в США. Состояние и тенденции развития / И. Н. Викулов, Н. И. Кучаева // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007, № 5. С. 66–71.

### References

1. Watkins D. A., Wada G. (1958) The Helitron Oscillator. *Proceedings of the IRE*. 46 (10), 1700–1712.
2. Kurayev A. A., Romanov B. N., Shevchik V. N. (1964) Initial Conditions in E-type Generators. *Radio Engineering and Electronics*. 9 (6), 983–993 (in Russian).
3. Pantell R. H. (1960) Small-Signal Analysis of the Helitron Oscillator. *IRE Trans*. ED-7 (1), 20–34.
4. Nunn W. M., Rowe J. E. (1962) Some Characteristics of Certain Electrostatically-Focused Devices. *Proceedings of the IRE*. 50 (1), 110–121.
5. Wada G., Pantell R. H. (1959) Design, Theory and Characteristics of the Helitron – a New Type of Microwave Oscillator. *I.R.E. Wescon Convent. Rec.* 3 (3), 92–118.
6. Lindsay P. A., Caunter J. (1960) Some General Properties of E-Type Devices. *Mikrowellen, Vortrage der Internationalen Tagung*. 1, 224–241.
7. Kurayev A. A. (1971) *Microwave Devices with Periodic Electron Flows*. Minsk, Science and Technology. 312 (in Russian).
8. Kurayev A. A., Rudnitsky A. S., Sinitsyn A. K. (2007) *Cyclotron Resonance Generator*. Patent of the Republic of Belarus No 11964, Publ. 11.07.2007 (in Russian).
9. Chernov Z. S. (1958) Methods of Focusing Electrons in Modern Microwave Devices. *Radio Engineering and Electronics*. 3 (10), 1227–1235 (in Russian).

10. Kartsev V. P. (1971) *The Adventure of Great Equations*. Moscow, Znanie Publ. 317 (in Russian).
11. Vikulov I. N., Kuchaeva N. I. (2007) Vacuum Microwave Electronics in the USA. Status and Development Trends. *Electronics: NT Electronics: Science, Technology, Business B.* (5), 66–71 (in Russian).

### **Вклад авторов**

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to the writing of the article.

### **Сведения об авторах**

**Кураев А. А.**, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Матвеев В. В.**, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-89-56  
E-mail: kurayev@bsuir.by  
Кураев Александр Александрович

### **Information about the authors**

**Kurayev A. A.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Matveyenka V. V.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-89-56  
E-mail: kurayev@bsuir.by  
Kurayev Alexander Alexandrovich