

УДК 621.385.632.1

ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КПД ЛБВО Ку- И К-ДИАПАЗОНА**Ю. Н. Щербаков****АО «НПП Алмаз», г. Саратов, 410033, ул. Панфилова, д. 1**

Статья поступила в редакцию 14 марта 2019 г.

Аннотация. Описывается методика синтеза квазиоптимального закона изменения шага спирали ЛБВО на основе задания закона изменения разности фаз сгруппированного тока пучка и электромагнитной волны. Приводятся результаты применения методики для Ку и К-диапазонов частот. Синтезированный закон изменения шага спирали для ЛБВ К-диапазона обеспечивает существенный рост электронного КПД по сравнению с традиционными однородными и изохронной спиралями.

Ключевые слова: ЛБВО, электронный КПД, спиральная ЛБВ, шаги спирали, синтез закона изменения шага спирали ЛБВ.

Abstract. The method of synthesis of the quasi-optimal law of the TWT helix pitch change on the basis of the law of change of the phase difference of the grouped beam current and the wave is described. The dependence of the phase difference between the electromagnetic wave and the beam current along the longitudinal coordinate have the form of a constant for the input and middle sections of the TWT and have the form of a two-segment broken for the output section. The phase difference of the fields and currents at the ends of the broken line was taken to be equal to π radians and had varied at the middle point.

The results of the application of this method for Ku and K-frequency bands are presented. It is shown that the dependence of the electronic efficiency on the value of the phase difference between the current and the electromagnetic wave in the middle of the output section is significantly different for Ku and K-frequency ranges. In the first case, the maximum takes place in the region of $0.8 \cdot \pi$ radian, in the second cast $1.1 \cdot \pi$ radian. In the transition region at frequencies of 17-18 GHz there are both maxima. Synthesized the variation of the helix pitch for the Ku-band has a traditional

look with the isochronism. Synthesized the variation of the helix pitch for the K-band takes a bizarre form of "splashes" and provides a significant increase in electronic efficiency compared to traditional homogeneous and isochronous spirals.

Key words: TWTO, efficiency, helical TWT, helical pitch, synthesized law of the helix pitch.

Одним из основных параметров ЛБВО является КПД первой гармоники η_1 – отношение мощности полезного сигнала к мощности электронного пучка (электронный КПД). Более эффективное преобразование энергии электронного потока в полезную энергию помимо увеличения технического КПД прибора позволяет понизить напряжение и эмиссионный ток катода, что в свою очередь предоставляет широкий круг возможностей: уменьшить диаметр катода, облегчить задачу транспортировки электронного потока через пролётный канал, увеличить долговечность прибора, уменьшить его длину, увеличить усиление.

В настоящее время достижение η_1 не менее 30% вплоть до X-диапазона не является проблемой, тогда как для диапазона меньших длин волн не удается добиться столь высоких его значений.

В работе [1] предложена основанная на программном комплексе FENIX [2] методика синтеза квазиоптимального закона изменения шага спирали и продемонстрирована её эффективность для прибора С-диапазона. Суть методики заключается в задании закона изменения вдоль прибора разности фаз сгруппированного тока пучка и электромагнитной волны $\Delta\phi(z)$. При этом закон изменения шага спирали $h(z)$ синтезируется автоматически. Существенным моментом является то, что $\Delta\phi(z)$ имеет гораздо более простой вид. В указанной работе этот закон имел вид константы на входной и средней секциях прибора и представлял собой двухсегментную ломанную на выходной секции. Причем в начале и в конце секции $\Delta\phi \sim \pi$. В этом случае задача оптимизации сводится к варьированию двух координат одной (средней) точки $\Delta\phi(z_{cp})$ в выходной секции. Этого оказывается достаточно, чтобы получить значительно более

сложный закон изменения шага спирали. В [1] был получен закон изменения шага спирали традиционного вида с изохронностью в конце замедляющей системы, что свидетельствует об эффективности методики.

В настоящей работе на основе методики [1, 2] проводились исследования 3-х секционной ЛБВ с двумя разрывами напряжением 7500 В и током 120 мА для частот 15, 17, 18, 20 и 25 ГГц. Для каждой частоты бралась соответствующая электродинамика и синтезировался шаг спирали, исходя из варьирования значения $\Delta\phi(z_{cp}) = \Delta\phi_{cp}$, где z_{cp} – середина выходной секции. Как видно из рис.1 КПД первой гармоники η_1 имеет для частоты 15 ГГц ярко выраженный максимум 20,9 % при $\Delta\phi_{cp} = 0,8 \cdot \pi$. На частоте 17 ГГц величина максимума при $\Delta\phi_{cp} = 0,8 \cdot \pi$ уменьшается до 18,7%, и появляется второй, почти равнозначный, максимум при $\Delta\phi_{cp} = 1,1 \cdot \pi$ на уровне 19,5%. При дальнейшем увеличении частоты имеет место снижение уровня первого максимума, вплоть до его исчезновения при 25 ГГц, а второй максимум, достигнув 21,3% при 20 ГГц, на частоте 25 ГГц падает до 19,3%.

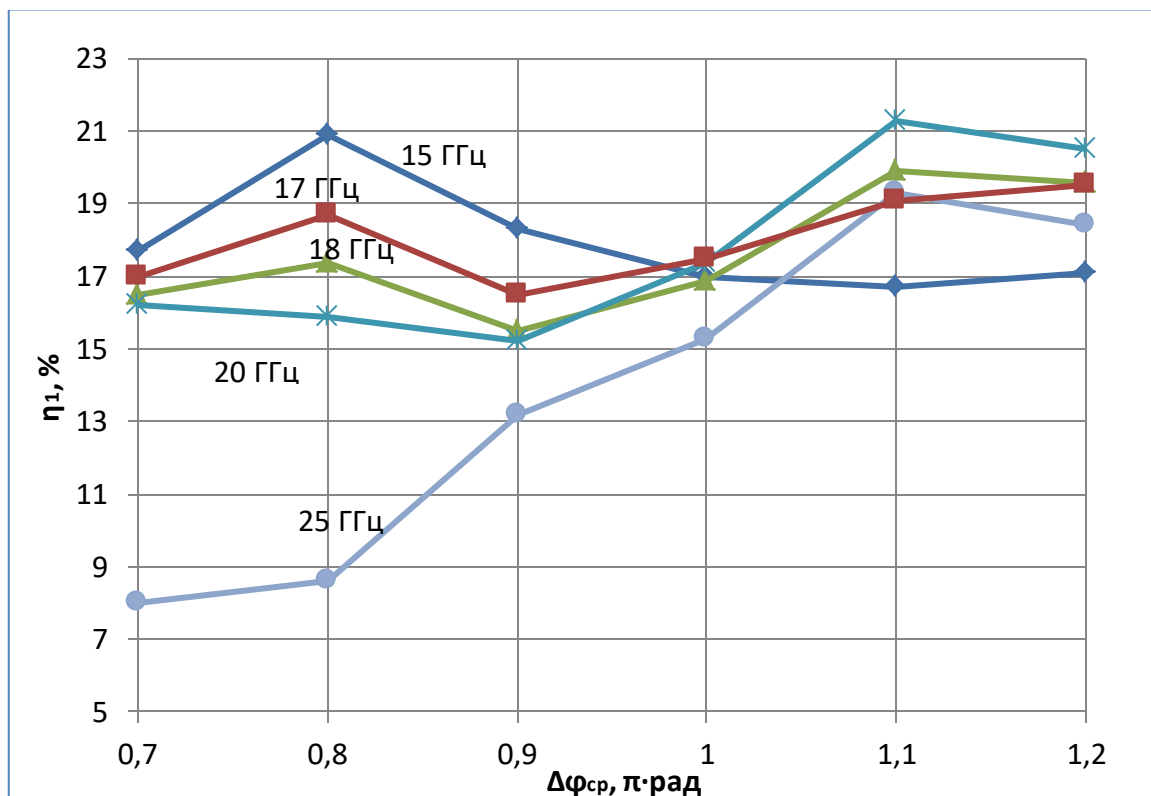
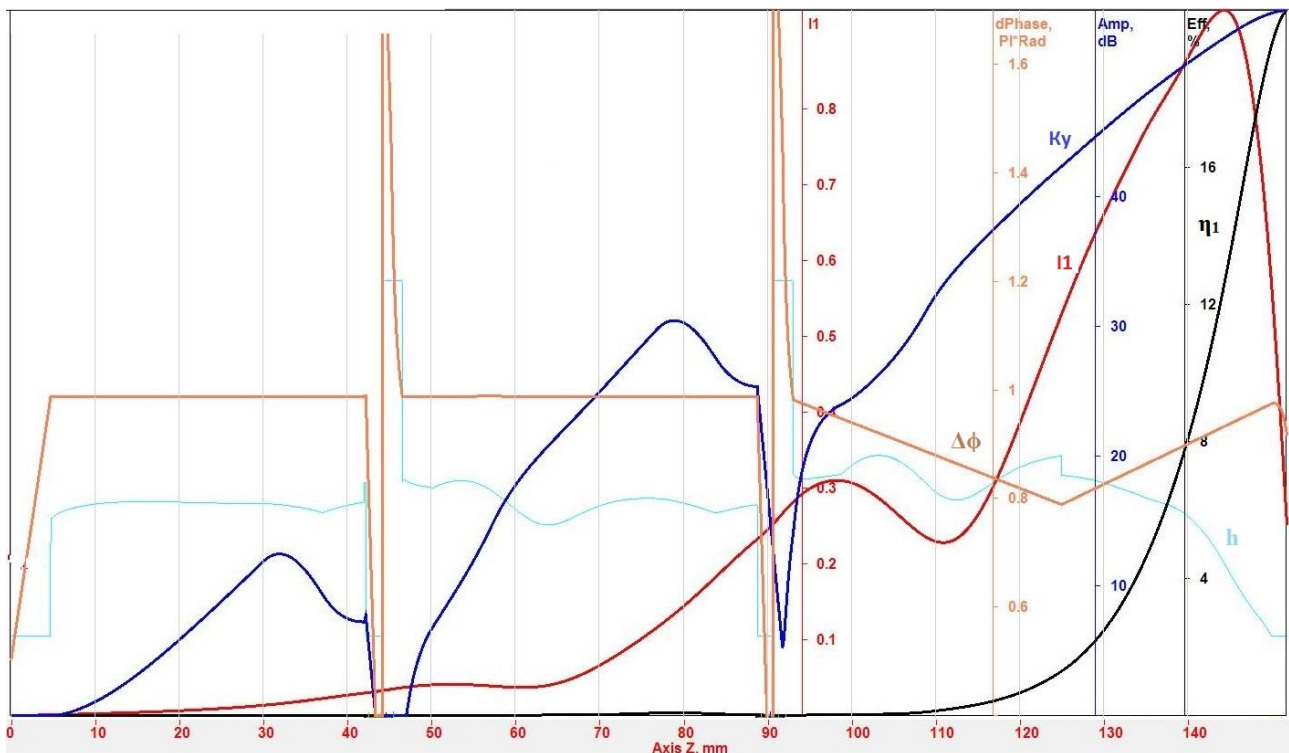


Рис.1. Зависимость КПД первой гармоники от $\Delta\phi_{cp}$

Физические процессы группировки электронного потока и энергоотбора для обоих максимумов существенным образом отличаются.

В первом случае группировка осуществляется в интервале $0,5 \cdot \pi < \Delta\phi < \pi$, т.е. в области между максимально эффективной группировкой и максимального энергоотбора и оба процесса идут параллельно (рис.2). Затем, на 1-ом участке изохронности, фаза сгруппированного потока плавно подводится к фазе максимального токоотбора, а на втором участке изохронности поддерживается неизменность условия $\Delta\phi \sim \pi$ рад. В приборах длинноволнового диапазона с высоким сопротивлением связи происходит быстрая конвертация кинетической энергии сгруппированных электронов в энергию электрического поля (полезного сигнала) вблизи вывода энергии.

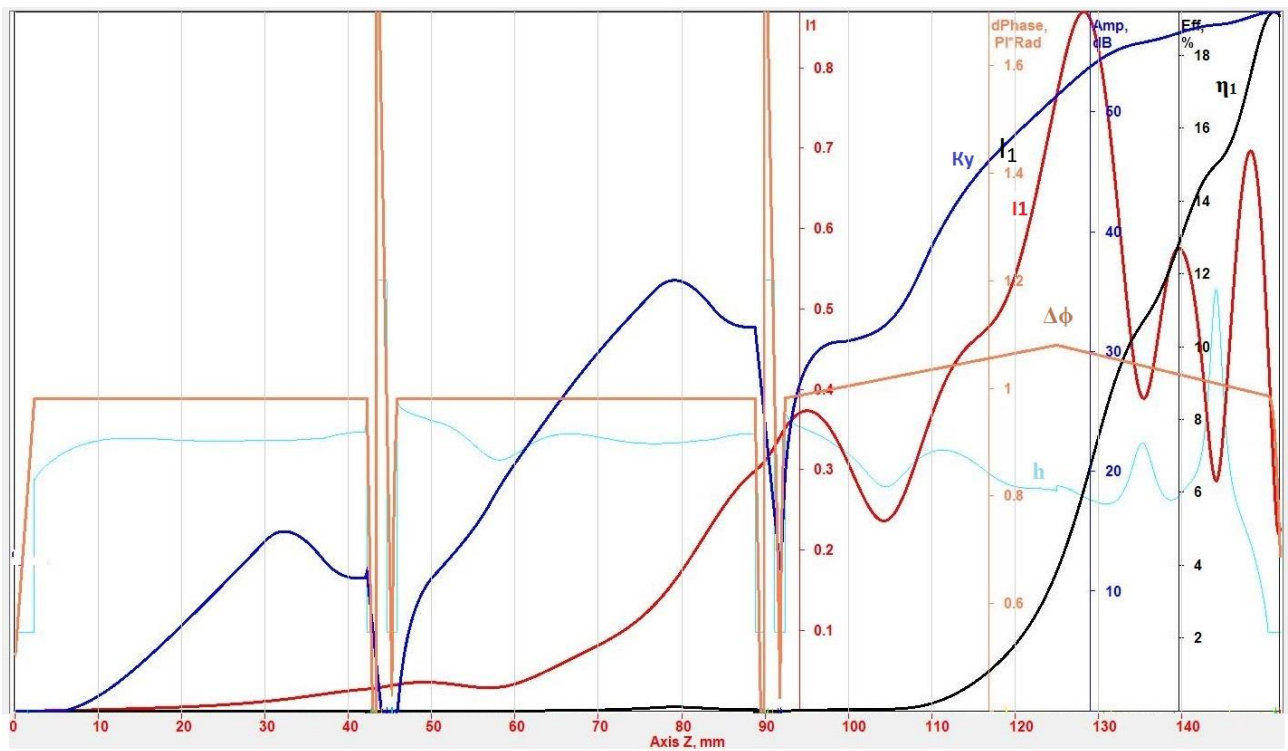


η_1 – КПД первой гармоники; $\Delta\phi$ – разность фаз первых гармоник тока и электромагнитной волны; I_1 – первая гармоника тока; h – шаг спирали; K_y – коэффициент усиления

Рис.2. Расчет ЛБВО 15 ГГц диапазона

На высоких частотах относительно малое сопротивление связи препятствует как эффективной группировке электронного потока, так и

быстрому энергоотбору. Поэтому под действием сил пространственного заряда группировка электронного потока в значительной мере рассыпается до того, как осуществлен глубокий энергоотбор, что не позволяет получить высокое значение КПД первой гармоники. Представленная методика позволяет осуществить перегруппировку электронного потока (рис.3). При этом формирование сгустка происходит не в фазе максимальной фокусировки, а вблизи фазы максимального торможения (энергоотбора) за счет сил пространственного заряда. Закон изменения шагов спирали при этом принимает причудливый вид с «выплесками».



η_1 – КПД первой гармоники; $\Delta\phi$ – разность фаз первых гармоник тока и электромагнитной волны; I_1 – первая гармоника тока; h – шаг спирали; K_y – коэффициент усиления

Рис.3. Расчет ЛБВО 25 ГГц диапазона

Таким образом, для рассмотренных конструкций ЛБВ методика синтеза $h(z)$ для приборов Ку-диапазона генерирует традиционный закон изменения шага спирали с изохронностью, причем оптимальное значение $\Delta\phi_{cp} = 0,8 \cdot \pi$ радиан. Для приборов К-диапазона оптимальное значение $\Delta\phi_{cp}$ составило $1,1 \cdot \pi$

радиан, причем вид зависимости шага спирали от продольной координаты $h(z)$ в выходной секции существенно отличается от такового для традиционных однородных и изохронных спиралей. КПД первой гармоники по сравнению с таковым для однородной и изохронной выходной спирали увеличивается в 1,3 и более раз, и достигает 19,3% для частоты 25 ГГц.

Литература

1. Шалаев П.Д., Щербаков Ю.Н. Синтез квазиоптимального закона изменения шага спиральных ЛБВ // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международной Науч.-техн. конф. Саратов: Издат. Центр «Наука», 2018, С.155-160.
2. Шалаев П.Д., Щербаков Ю.Н. Программа расчета и оптимизации параметров пространства взаимодействия ЛБВ О-типа // Радиотехника. 2017. № 7. С.48-52.

Для цитирования:

Ю.Н. Щербаков. Повышение электронного КПД ЛБВО Ку- и К-диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.9