

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.15

УДК 621.385.632.1

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛБВО С ВЫСОКИМ ТЕХНИЧЕСКИМ КПД

Ю. Н. Щербаков

АО «НПП Алмаз», 410033б, Саратов, ул. Панфилова, д. 1

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2020 г., после доработки – 30 марта 2020 г.

Аннотация. Описывается методика проектирования ЛБВО с высоким КПД, основанная на задании закона изменения разности фаз сгруппированного тока электронного пучка и электромагнитной волны с последующим синтезом шагов спирали замедляющей системы. Приводятся результаты применения методики для ЛБВ с рабочей частотой 11, 18, 25 ГГц. Показано, что предложенная методика позволяет проектировать ЛБВО с КПД более 63% во всех рассматриваемых диапазонах частот за счет балансировки следующих параметров: электронного КПД, мощности ВЧ-потерь, левой границы энергетического спектра отработанного пучка. При этом уровень расчетной амплитудно-фазовой характеристики не превышает 4,0 град/дБ.

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

Abstract. The design technique for achieving a high technical efficiency of TWTO is described. The proposed method is based on the assigning the law of change of phase difference of the grouped beam current and the electromagnetic wave along the device with the subsequent synthesis of the helix pitch of the slow-wave system.

The dependence of the phase difference between the electromagnetic wave and the beam current along the longitudinal coordinate has the form of a constant for the input section of the TWT and has 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 varied at the middle point.

The results of application of the methodology for TWTO with operating frequency 11, 18, 25 GHz are presented. It is shown that the proposed methodology allows designing the TWTO with an efficiency of more than 63% in all considered frequency ranges by balancing the following parameters: electronic efficiency, RF-loss power, left border of the energy spectrum of the spent beam. Shortage of electronic efficiency by 2.9, 9.0 and 2.8% gave a gain in total efficiency by 5.9, 14.7 и 9.8% for 11, 18, 25 GHz, respectively. The technique allows for a simple choice of a compromise solution between high technical efficiency and high electronic efficiency of the device. The level of the calculated amplitude-phase characteristic in the case of optimization by technical efficiency does not exceed 4.0 deg/dB, which is significantly less than in the case of optimization by electronic efficiency, when this parameter reaches 6.5 for the 18 GHz device.

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

Основным потребителем электроэнергии на ИСЗ является выходные каскады связной аппаратуры, проектируемые, как правило, на базе ЛБВ. В связи с этим актуальность повышения КПД ЛБВ остаётся неизменно высокой.

В [1-3] изложена основанная на программном комплексе FENIX методика синтеза квазиоптимального закона изменения шага спирали ЛБВ в целях достижения максимального электронного КПД (отношение выходной мощности к мощности электронного пучка). Этот параметр имеет важнейшее значение при проектировании ЛБВ, однако спираль, оптимальная для электронного КПД, не обязательно будет таковой для технического КПД (отношение выходной и потребляемой мощностей). В настоящей работе предложена модификация указанной методики в целях получения максимального технического КПД ЛБВ. Эффективность предлагаемой методики рассмотрена для 3-х приборов с рабочими частотами 11, 18, 25 ГГц. Электродинамическая модель ВЧ-пакета включала следующие параметры: внутренний диаметр спирали 0,8 мм, плющенко из МАГТ 0,2 x 0,1 мм, диаметр

экрана 2,8 мм, опорные стержни из BeO прямоугольного сечения шириной 0,4 мм.

В методике [1-3] задается закон изменения разности фаз $\Delta\phi(z)$ сгруппированного электронного пучка и электромагнитной волны вдоль прибора. Этот закон на предварительных секциях имеет вид $\Delta\phi = \pi$ радиан, а в выходной секции представляет собой двухсегментную ломаную с $\Delta\phi = \pi$ в начале и в конце секции. Подобно [4], оптимизация значения электронного и технического КПД проводится путем варьирования продольной координаты и величины $\Delta\phi$ средней точки этой ломаной $\Delta\phi(z_{cp}) = \Delta\phi_{cp}$, но помимо того, варьировалась также и величина входного сигнала $P_{вх}$. Закон изменения по продольной оси шага спирали $h(z)$, обеспечивающий заданную $\Delta\phi(z)$, синтезируется автоматически.

В [2] показано, что при варьировании $\Delta\phi_{cp}$ максимумы электронного и технического КПД достигаются при различных значениях $\Delta\phi_{cp}$. Ранее, в [4] описано проектирование ЛБВ для частоты 11,5 ГГц, где указывалось на неэффективность оптимизации параметров пространства взаимодействия по электронному КПД для получения высокого КПД технического.

В данной работе представлено исследование поведения электронного и технического КПД при изменении $P_{вх}$ в рамках методики [1-3]. Технический КПД брался без учета КСВ вывода энергии, мощности подогревателя и в предположении идеальной 4-ступенчатой рекуперации отработанного электронного потока, т.е. в предположении, что каждый электрон осаждается на электрод с потенциалом, обеспечивающим наименьшую скорость в момент осаждения (наиболее полное торможение в электростатическом поле). При этом потенциалы электродов оптимизированы, исходя из анализа спектра скоростей отработанного пучка. Поскольку этот параметр показывает предельный КПД прибора для спроектированного пространства взаимодействия (исключает конструктивно-технологические особенности коллектора), именно его обычно используют для оценки.

На рис.1-3 для разных рабочих частот показаны зависимости

технического КПД прибора (η_T), электронного КПД ($\eta_{\text{Э}}$), левой границы спектра энергий частиц электронного пучка на выходе из ЗС (E_{min}), высокочастотных потерь в ЗС (L) от отношения заданного входного сигнала $P_{\text{вх}}$ и входного сигнала с максимальным электронным КПД $P_{\text{вх}0}$.

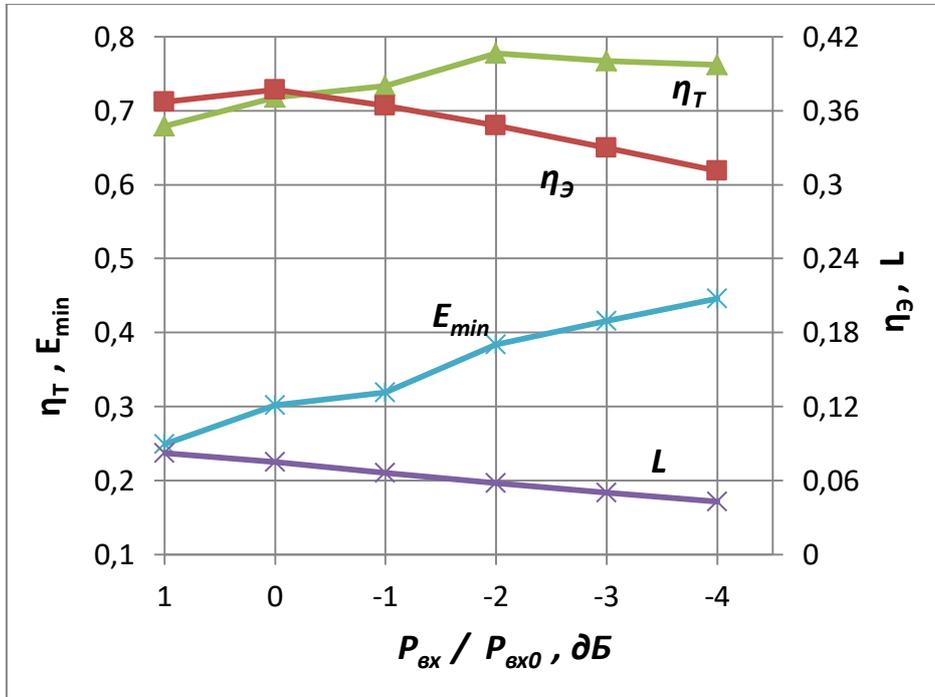


Рис. 1. Расчетные параметры ЛБВ с рабочей частотой 11 ГГц

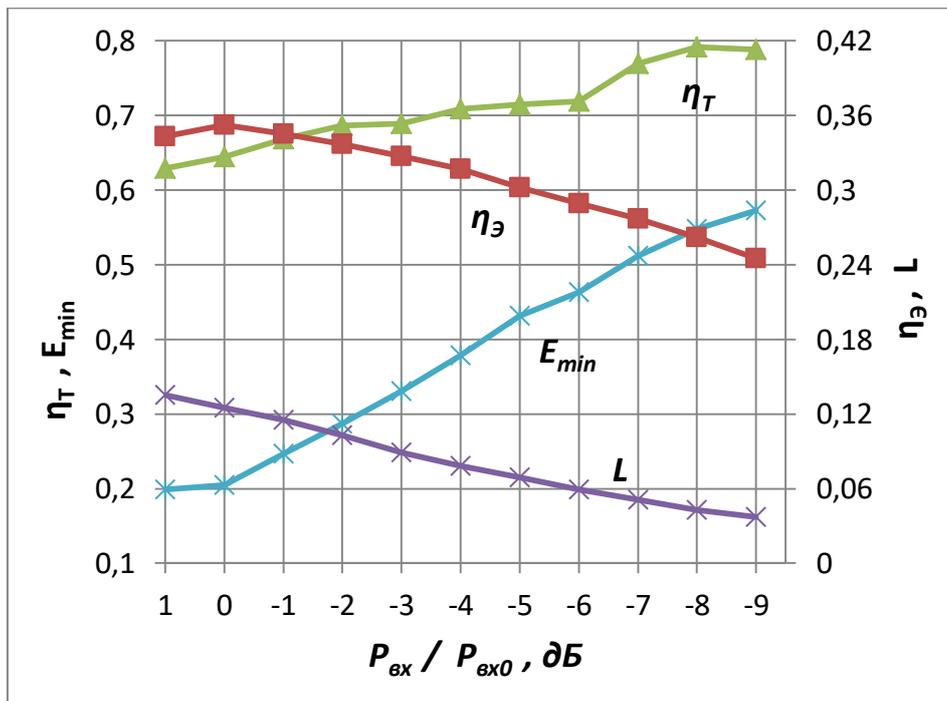


Рис. 2. Расчетные параметры ЛБВ с рабочей частотой 18 ГГц

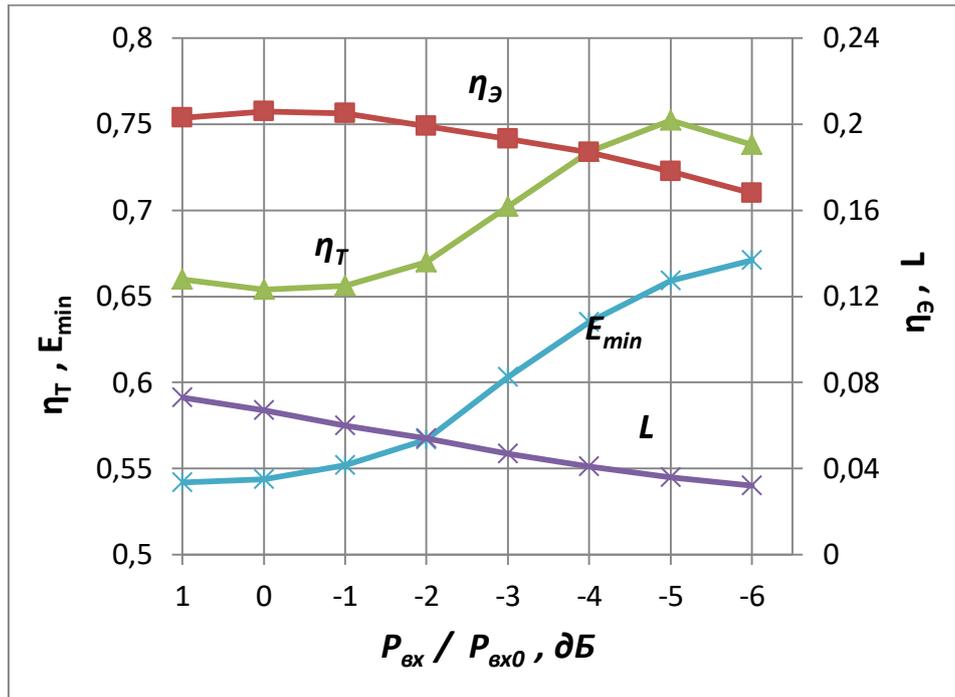


Рис. 3. Расчетные параметры ЛБВ с рабочей частотой 25 ГГц

Во всех трех случаях имеем схожую картину: по мере уменьшения $P_{вх}$ электронный КПД уменьшается, а технический растет до некоего предела, когда дальнейшее уменьшение потерь и увеличение скорости самого медленного электрона отработанного потока, способствующее эффективной рекуперации энергии в коллекторе, не компенсируют уменьшения электронного КПД. Причем промежуток между максимумами η_{T} и $\eta_{\text{Э}}$, образующий область компромиссных решений, минимален для самой малой рабочей частоты 11 ГГц, где составляет всего -2 дБ, тогда как для частот 18 и 25 ГГц величина этого промежутка составляет -8 и -5 дБ соответственно. Недобор η_{T} в случае оптимизации по $\eta_{\text{Э}}$ также минимален на частоте 11 ГГц: 5,9%, против 14,7 и 9,8% для 18 и 25 ГГц (см. таблицу 1). Обращает на себя внимание отсутствие монотонности технического КПД по частоте, вызванное скачком η_{T} на рис.2 при $P_{вх} / P_{вх0} = -7$ дБ. Исследования показали, что данный эффект обусловлен скачкообразным ростом в этой области КПД коллектора (отношение рекуперированной мощности и мощности пучка на влете в коллектор) с 91,3% до 94,8. Заметим, что КПД коллектора для 11 ГГц ЛБВ в

точке максимального технического КПД составляет всего 90,6%. Указанный рост КПД коллектора стал возможным благодаря формированию специфической конфигурации спектра скоростей электронов отработанного потока, удобного для многоступенчатой рекуперации, что является, как и указывалось в [4], дополнительным фактором повышения КПД прибора.

Таблица 1

$F, ГГц$	11,0		18,0		25,0	
<i>Способ оптимизации</i>	по η_T	по η_{Σ}	по η_T	по η_{Σ}	по η_T	по η_{Σ}
$\eta_{\Sigma}, \%$	34,8	37,7	26,2	35,2	17,8	20,6
$\eta_T, \%$	77,7	71,8	79,1	64,4	75,2	65,4
<i>АФХ, град/дБ</i>	4,0	4,8	3,9	6,5	4,0	5,3

Следует отметить, что оптимизация по η_T дает неизменно высокий результат во всем исследуемом диапазоне частот: разница в техническом КПД составила всего 3,9%, тогда как при оптимизации по η_{Σ} таковая составила 7,4%.

Важным параметром для связанных ЛБВ является также амплитудно-фазовая характеристика (АФХ). Она также лучше в случае оптимизации по техническому КПД и не превышает 4,0 град/дБ для всех трех частот, в то время как при оптимизации по электронному КПД достигает 6,5 град/дБ для 18 ГГц ЛБВ.

Примем во внимание, что реальный технический КПД, учитывающий отражение волны от вывода энергии, мощность подогревателя катода, неидеальное токораспределение в коллекторе, будет ниже приведенных расчетов на 8-12 %.

Таким образом, предложенная методика позволяет проектировать ЛБВ с высоким, более 63% техническим КПД в диапазоне до 25 ГГц. Достижение высоких значений КПД обеспечивается балансировкой следующих параметров: электронного КПД, мощности ВЧ-потерь, левой границы энергетического спектра отработанного пучка. При этом уровень расчетной амплитудно-

фазовой характеристики не превышает 4,0 град/дБ. Помимо этого, методика допускает простой выбор компромиссного решения между высоким техническим КПД и высоким электронным КПД прибора.

Литература

1. Шалаев П.Д., Щербаков Ю.Н. Программа расчета и оптимизации параметров пространства взаимодействия ЛБВ О-типа // Радиотехника.- 2017. – Вып.7.- С.48-52.
2. Шалаев П.Д., Щербаков Ю.Н. Синтез квазиоптимального закона изменения шага спиральных ЛБВ // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. Науч.-техн. конф. Саратов: Издат. Центр «Наука», 2018, С.155-160.
3. 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](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.9)
4. Шалаев П. Д. Результаты разработки образца ЛБВ средней мощности в трёхсантиметровом диапазоне с КПД до 69% // Материалы научно-технической конференции "Перспективы развития электроники и вакуумной техники на период 2001 – 2006 гг." Саратов. ГНПП "Контакт". Изд. Саратовского ун-та. 22 – 23 февраля 2001. С 62.- 67.

Для цитирования:

Щербаков Ю.Н. Методика проектирования ЛБВО с высоким техническим КПД. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/15/text.pdf>. DOI [10.30898/1684-1719.2020.4.15](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.4.15)