

Вакуумна, плазмова та квантова електроніка

УДК 621.385

DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.2.93577](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.2.93577)Саурова Т. А., к.т.н., OrcID [0000-0002-7600-8266](https://orcid.org/0000-0002-7600-8266)e-mail: t.a.saurowa@gmail.comНациональный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ В БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРАХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОФАЗНОЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЛБВ С ПЕРЕМЕННОЙ ФАЗОВОЙ СКОРОСТЬЮ

С продвижением в область более коротких длин волн для создания СВЧ узлов большой мощности применяют вакуумные приборы. Доминирующее положение на рынке мощных нерелятивистских СВЧ усилителей занимают лампы бегущей волны (ЛБВ). Существенному снижению массогабаритных и эксплуатационных характеристик способствует многолучевая конструкция ЛБВ (МЛБВ) прибора. Характеристики эффективности МЛБВ улучшены применением режима захвата электронных сгустков полем электромагнитной волны (автофазный режим). Ранее на основе теории автофазной МЛБВ и баланса энергии при движении и взаимодействии электронных сгустков многолучевого потока с полем волны замедляющей системы получены соотношения, позволяющие оценить в размерных параметрах основные характеристики эффективности прибора (полевой и электронный КПД, коэффициент усиления). В данной работе решена задача первичной оценки характеристик эффективности автофазной МЛБВ на основе используемых в теории приборов СВЧ О-типа безразмерных параметров, удобных на этапе эскизного проектирования.

Библ. 9, рис. 1.

Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ); многолучевая ЛБВ (МЛБВ); автофазный режим; автофазная ЛБВ (АЛБВ); способ усиления СВЧ сигнала; характеристики эффективности; КПД; коэффициент усиления.

Постановка проблемы. Усилительные приборы на основе ЛБВ наиболее востребованы в сантиметровом диапазоне длин волн. Многолучевая конструкция ЛБВ О-типа способствует существенному снижению эксплуатационных и массогабаритных характеристик прибора [1]. Для повышения характеристик эффективности ЛБВ предложен режим с захватом электронных сгустков полем электромагнитной волны (автофазный режим) [2, 3]. На этапе эскизного проектирования СВЧ усилителя на основе автофазной МЛБВ (АМ ЛБВ) проблемой является оценка характеристик эффективности прибора.

Анализ последних достижений. Для АМ ЛБВ предложены схема конструкции [3], строгая теория [4], приближенная нелинейная теория [5]. На основе [4] получены условия устойчивости электронных сгустков [6], рассмотрены вопросы оценки основных характеристик прибора [7], оп-

тимизации автофазного режима [8]. Решим задачу первичной оценки характеристик эффективности прибора на основе используемых в теории ЛБВ безразмерных параметров.

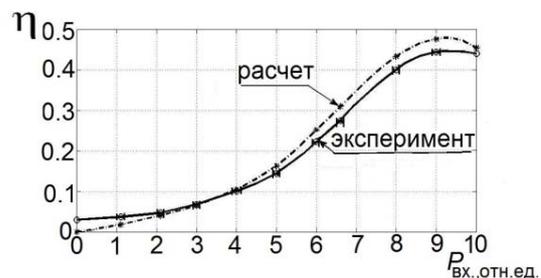


Рис. 1 Расчетная и экспериментальная зависимость КПД η от мощности входного сигнала $P_{вх}$

Формулировка целей (постановка задачи). Данная работа посвящена созданию методики



упрощенного расчета характеристик эффективности автофазной МЛБВ с переменной фазовой скоростью на основе безразмерных параметров.

Основная часть. В работе [9] проведена экспериментальная верификация численной нелинейной модели АМ ЛБВ (рис. 1). Показано достаточно хорошее соответствие расчетной и экспериментальной характеристики эффективности прибора: погрешность моделирования не превышает 17%.

Воспользуемся уравнением баланса энергии, вытекающего из численной нелинейной модели АМ ЛБВ [4]:

$$E^2 - E_0^2 + 2\alpha \int_0^z E^2 dz = 2Rl_0 \int_0^z E_3 dz, \quad (1)$$

$$E_3 = -\frac{d}{dz} \left(\frac{\omega^2}{2\eta h_0^2} \right),$$

где $E = |\dot{E}|$, \dot{E} – комплексная амплитуда волны ЗС; E_0 – начальное значение E ; α – затухание (в неперах на метр); z – продольная координата; $R = E^2/2P$ – параметр связи, P – мощность, проходящая через поперечное сечение ЗС; $l_0 = \sum_{i=1}^N l_{0i}$ – суммарный ток невозмущенного потока, проходящего через все каналы ЗС, l_{0i} – невозмущенный ток i -го луча (потока), N – число лучей в МЛБВ; E_3 – эквивалентное электростатическое поле; ω – круговая частота сигнала; $\eta = e/m_0$ – отношение заряда электрона к его массе покоя; $h_0 = \frac{\omega}{v_\phi}$, v_ϕ – фазовая скорость волны.

В теории приборов СВЧ О-типа применяют следующие безразмерные параметры:

$b = \frac{h_0 - \beta_e}{C\beta_e}$ – параметр несинхронности;

$\beta_e = \frac{\omega}{v_e}$; $v_e = \sqrt{2\eta U_0}$ – продольная скорость невозмущенного потока; U_0 – ускоряющее напряжение;

жение; $C = \left[\frac{l_0 R_m}{4U_0 \beta_e^2} \right]^{1/3}$ – параметр усиления;

$R_m = \frac{E^2}{2 \cdot P}$ – параметр связи R на m -том виде колебаний; $x = C\beta_e z$ – безразмерная длина;

$d = \frac{\alpha}{C\beta_e}$ – параметр затухания;

$F = |\dot{F}| = \frac{\eta}{\omega v_e C^2} E$ – безразмерная амплитуда

синхронной волны в ЗС.

Применение безразмерных параметров позволит записать уравнение (1) в следующем виде:

$$F^2 - F_0^2 + 2 \cdot d \int_0^x F^2 dz = 4 \int_0^x F_3 dx, \quad (2)$$

$$F_3 = -\frac{d}{dx} \left[\frac{1}{2C(1+Cb)^2} \right],$$

где F_3 – безразмерное значение эквивалентного электростатического поля.

Продифференцируем соотношение (2) по x и обозначив $\sin \psi_0 = F_3/F$, получим

$$\frac{dF}{dx} + dF = 2 \sin \psi_0,$$

общее решение которого имеет следующий вид:

$$F(x) = F_0 e^{-dx} + 2e^{-dx} \int_0^x e^{dx} \sin \psi_0 dx. \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет получить формулу расчета коэффициента усиления в безразмерных параметрах для АМ ЛБВ с переменной фазовой скоростью:

$$G(x) = 20 \lg \frac{F(x)}{F_0} = 20 \lg \left(e^{-dx} \left[1 + \frac{2}{F_0} \int_0^x e^{dx} \sin \psi_0 dx \right] \right), \text{ дБ.} \quad (4)$$

При отсутствии потерь ($d = 0$) энергии в ЗС (4) принимает вид:

$$G(x) = 20 \lg \left(1 + \frac{2}{F_0} \int_0^x \sin \psi_0 dx \right), \text{ дБ.}$$

Расчетное соотношение для полевого КПД в безразмерных параметрах с учетом (3) имеет вид:

$$\eta_F = \frac{c}{2} \left(\left[F_0 e^{-dx} + 2e^{-dx} \int_0^x e^{dx} \sin \psi_0 dx \right]^2 - F_0^2 \right).$$

Электронный КПД АМ ЛБВ [5, 7] определяется формулой:

$$\eta_e = \frac{\int_0^L E_3 dz}{U_0} = \frac{1}{U_0} \left\{ \frac{\omega^2}{2\eta h_0^2(0)} - \frac{\omega^2}{2\eta h_0^2(L)} \right\}, \quad (5)$$

где $z = 0$ – координата начала автофазного участка, L – координата выхода (длина автофазного участка). Соотношение (5) в безразмерных параметрах принимает вид:

$$\eta_e(x) = \left(\frac{1}{1 + Cb(0)} \right)^2 - \left(\frac{1}{1 + Cb(x)} \right)^2.$$

Выводы. На основе численной нелинейной модели АМ ЛБВ с переменной фазовой скоростью разработана методика оценки характеристик эффективности прибора в безразмерных параметрах. На этапе эскизного проектирования полученные соотношения позволят провести оценку эффективности усилительного прибора СВЧ на основе рассмотренной модификации АЛБВ.

Предложенная методика даст возможность спроектировать новые структуры АЛБВ для сантиметрового диапазона длин волн и решать вопросы оптимизации их характеристик.

Надійшла до редакції 20 лютого 2017 р.

УДК 621.385

Саурова Т. А., к.т.н., OrcID [0000-0002-7600-8266](https://orcid.org/0000-0002-7600-8266)

e-mail: t.a.saurowa@gmail.com

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИКА ОЦІНКИ В БЕЗРОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРАХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОФАЗНОЇ БАГАТОПРОМЕНЕВОЇ ЛБХ ЗІ ЗМІННОЮ ФАЗОВОЮ ШВИДКІСТЮ

З просуванням в область більш коротких довжин хвиль для створення НВЧ вузлів великої потужності застосовують вакуумні прилади. Домінуюче стан на ринку потужних нерелятивістських НВЧ підсилювачів займають лампи біжучої хвилі (ЛБХ). Суттєвому зниженню масогабаритних і експлуатаційних характеристик сприяє багатопроменева конструкція ЛБХ (БЛБХ) приладу. Характеристики ефективності БЛБХ поліпшені застосуванням режиму захвату електронних згустків полем електромагнітної хвилі (автофазний режим). Раніше на основі теорії автофазних БЛБХ і балансу енергії при русі і взаємодії електронних згустків багатопроменевого потоку з полем хвилі сповільнючої системи отримані співвідношення, що дозволяють оцінити в розмірних параметрах основні характеристики ефективності приладу (польовий і електронний ККД, коефіцієнт підсилення). У даній роботі вирішена задача первинної оцінки характеристик ефективності автофазних БЛБХ на основі безрозмірних параметрів, що використовують у теорії приладів НВЧ О-типу, зручних на етапі ескізного проектування.

Бібл. 9, рис. 1.

Ключові слова: лампа бежучої хвилі (ЛБХ); багатопроменева ЛБХ (БЛБХ); автофазний режим; автофазна ЛБХ (АЛБХ); спосіб підсилення НВЧ сигналу; характеристики ефективності; ККД; коефіцієнт підсилення.

UDC 621.385

T. A. Saurova, PhD, OrcID [0000-0002-7600-8266](https://orcid.org/0000-0002-7600-8266)

e-mail: t.a.saurowa@gmail.com

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHOD OF ESTIMATION OF EFFICIENCY CHARACTERISTICS IN AUTO-PHASE MULTI-RAY TWT WITH VARIABLE PHASE VELOCITY IN KEY OF DIMENSIONLESS PARAMETERS.



With the advancement in to range of shorter wavelengths we are using the vacuum devices for designing high power microwave components. A Traveling Wave Tube (TWT) takes the dominant position in market of powerful non-relativistic microwave amplifiers. Multi-ray TWT (MTWT) structure of device is contributing to signification decrease in weight and size, and performance characteristics. A characteristic of MTWT efficiency was improved by using of electron bunches capturing by electromagnetic wave field (auto-phase mode). Obtained earlier correlation based on the auto-phase theory of MTWT and motion and interaction energy balance of electron bunches in multi-ray flow with the wave field retarding system allows to estimate primary efficiency characteristics of the device in key of dimensional parameters (electromagnetic field and electron efficiency, gain factor). In this paper was solved the problem of the initial evaluation of auto-phase MTWT characteristics which based on dimensionless parameters that are using in the theory of O-type microwave devices in step of convenient conceptual design.

Ref. 9, fig. 1.

Keywords: traveling-wave tube; self-phasing mode; self-phasing traveling-wave tube; a way to amplify microwave signals; optimization of energy conversion.

References:

- [1]. T. A. Saurova, «Analiticheskie nelineinye priblizhonnaia teoriia mnogoluchevoi avtofaznoi lampy s peremennoi fazovoi skorostiu Analytical nonlinear approximation theory of a multipole-beam autophase lamp with variable phase velocity],» in COMINFO, Kyiv, 2009.
- [2]. Beliaivskiy, Ye. D.; Saurova, T. A., «Mnogoluchevaya avtofaznaya lampa begushey volnyi [Multi-beam self-phasing traveling-wave tube],» *Electronics and Communications*, vol.. 12, no. 4, pp. 36-38, 2007.
- [3]. Danovich, I.A.; Perekupko, V.A., «Mnogoluchevyie sektionirovannyye LBV s bolshim usileniem i fokusirovkoj periodicheskim magnitnyim polem [Multi-beam sectioned TWT with great gain and focusing with periodic magnetic field],» *Tekhnika i Pribory SVCh*, no. 1, pp. 7-11, 2009.
- [4]. Y. D. Beliaivskiy, «O rezhime raboty priborov O-tipa s zahvatom elektronnyih sgustkov polem elektromagnitnoy volnyi [O-type microwave devices with capturing of electron bunches by electromagnetic wave field],» *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 208-210, 1971.
- [5]. Beliaivskiy, Ye. D.; Saurova, T. A., «Optimizatsiya preobrazovaniya energii v mnogoluchevoy avtofaznoy lampe begushey volnyi [Optimization of energy transformation in the multi-ray auto-phase traveling-wave tube],» *Tekhnika i Pribory SVCh*, no. 1, pp. 3-7, 2010.
- [6]. T. A. Saurova, "Research of characteristics of self-phasing multi-beam traveling-wave tube with variable phase velocity," *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 7, no. 56, pp. 365-369, 2013, DOI: [10.3103/S0735272713070054](https://doi.org/10.3103/S0735272713070054).
- [7]. Beliaivskiy, Ye. D.; Saurova, T. A.; Telichkina, O.V., «Teoriya mnogoluchevoy avtofaznoy lampyi begushey volnyi [Theory of a multipath auto-phase traveling wave lamp],» *Electronics and Communications*, vol.. 16, no. 2, pp. 60-62, 2011.
- [8]. T. A. Saurova, «Metodika rascheta osnovnyih harakteristik avtofaznoy mnogoluchevoy LBV s peremennoy fazovoy skorostyu [Methods of calculating the basic characteristics of self-phasing multi-beam TWT with variable phase velocity],» in *V-i Vseukrainskaia naukovopraktychnoi konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh*, Kyiv, 2016.
- [9]. Beliaivskiy, Ye. D.; Saurova, T. A., «Vliyanie ob'emnogo zaryada na zahvat elektronnyih sgustkov volnoy v mnogoluchevoy avtofaznoy lampe begushey volnyi [Effect of space charge on capturing of electron bunches in a multi-ray auto-phase traveling-wave tube],» *Tekhnika i Pribory SVCh*, no. 2, pp. 11-14, 2011.