

УДК 621.385.6

## ОБ ОТСУТСТВИИ «ДЕФЕКТА» КПД В КЛИНОТРОНАХ

В.Д. ЕРЁМКА<sup>1</sup>, А.А. КУРАЕВ<sup>2</sup>, В.В. МАТВЕЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Украина

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23 января 2018

**Аннотация.** Показано, что эффект ограничения КПД («дефект» КПД), возникающий в приборах О-типа с коллектором электронов вне области электронно-волнового взаимодействия, вследствие аккумуляции энергии в потенциальном поле фазового электронного сгустка, отсутствует в ЛОВО-клинотронах.

**Ключевые слова:** «дефект» КПД, аккумуляция энергии в электронном пакете, прибор типа «О», ЛОВО-клинотроны.

**Abstract.** The paper exposes the fact that the effect of limiting efficiency (efficiency "deficiency") arising in O-type devices with a collector outside the region of electron-wave interaction because of energy accumulation in the potential field of the phase electron bunch is absent for O-type BWO-clinotron devices.

**Keywords:** efficiency "deficiency", energy accumulation in electron bunch, O-type device, BWO-clinotrons.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 111, No. 1, pp. 103-104**

**The absence of the «defect» efficiency in the clinotrons**

**V.D. Yeryomka, A.A. Kurayev, V.V. Matveyenko**

В приборах О-типа (черенковских усилителях и генераторах) [1] в процессе взаимодействия прямолинейного электронного потока с волной замедленной пространственной гармоникой поля периодической замедляющей структуры (ПЗС) формируются фазовые пакеты электронов, аккумулирующие часть энергии электронного потока в форме энергии взаимодействия электронов [2]. Эта часть энергии исключается из общей энергии электронного потока, расходуемой на генерирование электромагнитного поля в приборе, и тем самым образуется «дефект» КПД в приборах О-типа [2]. В соответствии с [2] полная энергия  $W$  ансамбля  $n$  крупных заряженных частиц (моделирующих электронный поток) на один период электромагнитных колебаний без внешнего поля выражается в случае одномерного движения как

$$\frac{W}{m_0 c^2} = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{v_i^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} + \frac{e}{4\pi\epsilon_0 m_0 c^2} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{q_j}{|z_i - z_j|} \left(1 + \frac{v_i v_j}{c^2}\right), \quad (1)$$

где  $m_0$  – масса покоя электрона,  $e$  – заряд электрона по модулю;  $c$  – скорость света в пустоте,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная пустоты;  $q_j$  – относительный электрический заряд  $j$ -й частицы;  $v_j$  – скорость  $j$ -й частицы;  $z_i$  – координата  $i$ -частицы;  $z_j$  – координата  $j$ -частицы.

Первое слагаемое в (1) определяет полную кинетическую энергию ансамбля частиц, второе слагаемое описывает энергию взаимодействия электронов в фазовом пакете.

Без множителя  $\left(1 - \frac{v_i^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$  эта составляющая соответствует потенциальной энергии

сгруппированных частиц, иначе говоря – энергии потенциального электрического поля фазового пакета. Эта энергия не участвует в процессе энергообмена электронного потока с ВЧ-полем, но в тоже время она образована за счет потери энергии заряженных частиц одного знака, слетающих в сгусток. Таким образом, часть энергии источника напряжения, ускоряющего электроны (источника питания прибора), потрачена на образование

потенциального поля электронных пакетов. Это и определяет «дефект» КПД – не вся энергия электронного потока в обычных приборах О-типа может быть израсходована в процессе возбуждения высокочастотных электромагнитных колебаний. Но возникает вопрос, как эта часть энергии возвращается источнику питания? Очевидно, что должен выполняться закон сохранения энергии. Действительно, это и происходит, но уже не в области взаимодействия, а на коллекторе электронов. Механизм возврата энергии осуществляется следующим образом: на металлической стенке коллектора в силу граничных условий на металле возникает зеркальное изображение сгустка электронов с положительным знаком. В результате появляется ускоряющее для электронов поле, возвращающее им энергию, затраченную на формирование сгустка. После полного прохождения сгустка на коллектор это поле (как и поле сгустка) исчезает.

В обычных приборах О-типа (релятивистских и нерелятивистских усилителях и генераторах) коллектор находится вне области взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем. Поэтому потенциальная энергия электронного сгустка возвращается только источнику питания прибора. Однако существует модификация приборов О-типа – ЛОВО-клинотроны [3]. В этих приборах направление движения электронного потока составляет острый угол с рабочей поверхностью ПЗС. Поток электронов осаждается на рабочую поверхность ПЗС в области электронно-волнового взаимодействия, поэтому в таких приборах начальная кинетическая энергия электронного потока используется полностью, т. е. в клинотронах «дефект» КПД отсутствует.

### Список литературы

1. Кураев А.А., Рак А.О., Гуринович А.Б. Черенковские усилители и генераторы на нерегулярных волноводах. LAPLAMBERT, Mauritius, Saarbrucken, 2017. 118 с.
2. Кураев А.А., Кураев Н.А., Синицын А.К. КПД релятивистских приборов О-типа с учетом энергии взаимодействия электронов // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 11. С. 2179–2185.
3. Клинотрон / под ред. А.Я. Усикова. Киев: Наукова думка, 1992. 200 с.

### References

1. Kuraev A.A., Rak A.O., Gurinovich A.B. Cherenkovskie usiliteli i generatory na nereguljarnyh volnovodah. LAPLAMBERT, Mauritius, Saarbrucken, 2017. 118 s. (in Russ.)
2. Kuraev A.A., Kuraev N.A., Sinicyn A.K. KPD reljativistskih priborov O-tipa s uchetom jenergii vzaimodejstvija jelektronov // Radiotehnika i jelektronika. 1991. T. 36, № 11. S. 2179–2185. (in Russ.)
3. Klinotron / pod red. A.Ja. Usikova. Kiev: Naukova dumka, 1992. 200 s. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Ерёмка В.Д., к.ф.-м.н., с.н.с., с.н.с. отдела квазиоптики ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины.

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвееенко В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Yeryomka V.D., PhD, senior researcher, senior researcher of Quasioptics Department IRE named after A.Ja. Usikov of NAS of Ukraine.

Kurayev A.A., D.Sci, professor, professor of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Matveyenka V.V., PhD, associate professor, associate professor of computational methods and programming department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

### 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: vladzimir66@bsuir.by  
Матвееенко Владимир Владимирович

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-17-293- 89-56;  
e-mail: vladzimir66@bsuir.by  
Matveyenka Vladimir Vladimirovich