

**ХIII Международная отраслевая  
научно-техническая конференция**

**«ТЕХНОЛОГИИ  
ИНФОРМАЦИОННОГО  
ОБЩЕСТВА»**

**Сборник трудов**

**Том 1**

**Москва  
2019**

**Технологии информационного общества.** Сборник трудов XIII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества». (20-21 марта 2019 г. Москва, МТУСИ). В 2-х томах. Том 1. М.: ИД Медиа Пабlishер, 2019. 480 с.

*Материалы даны в авторской редакции.*

© МТУСИ, 2019

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ СВЯЗИ

**Полесский Сергей Николаевич,**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», доцент, к.т.н., Москва, Россия,*  
[spolessky@hse.ru](mailto:spolessky@hse.ru)

**Королев Павел Сергеевич,**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ассистент, Москва, Россия,*  
[pskorolev@hse.ru](mailto:pskorolev@hse.ru)

**Серебрякова Юлия Олеговна,**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», студент, Москва, Россия,*  
[yuoserebryakova@edu.hse.ru](mailto:yuoserebryakova@edu.hse.ru)

**Цеплина Алена Евгеньевна,**

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», студент, Москва, Россия,*  
[aetseplina@edu.hse.ru](mailto:aetseplina@edu.hse.ru)

## Аннотация

*Лампы бегущей волны активно применяются в различных радиопередающих устройствах. Однако анализ современных источников литературы показал, что отсутствуют математические модели, позволяющие учитывать влияние технических параметров ламп бегущей волны на интенсивность отказов, и, как следствие, на наработку до отказа и ресурс.*

## Ключевые слова

*Надежность, безотказность, интенсивность отказов, наработка до отказа, широкополосный усилитель, лампа бегущей волны.*

## Введение

Передающие устройства радио- и телевизионного вещания, мобильной связи, радиолокационного и радионавигационного оборудования, ускорителей заряженных частиц, устройств бытового и промышленного нагрева, медицинской аппаратуры и др. нуждаются в усилителях колебаний сверхвысокочастотного СВЧ диапазона высокой мощности. Бортовая аппаратура космических аппаратов использует широкополосные лампы бегущей волны (ЛБВ) для различного назначения. Качество бортовых радиопередатчиков во многом зависит от электрических и массогабаритных параметров ЛБВ, а также показателей надежности. Особое внимание при их разработке уделяется вопросам обеспечения высоких значений тока и напряжения, необходимого коэффициента полезного действия, отвода рассеиваемой мощности, предотвращения электрического пробоя [1]. Отказы ЛБВ обычно вызываются разрушением какого-либо элемента конструкции в результате старения, износа и др. деградационных процессов [2].

Очевидно, что можно повысить надежность за счет уменьшения напряжения накала, а, следовательно, за счет уменьшения рабочей температуры катода. Однако это не всегда возможно, например, при больших значениях катодного тока.

## Исследование математических моделей эксплуатационной интенсивности отказов ЛБВ

Математическая модель (ММ) эксплуатационной ин-

тенсивности отказов (ЭИО)  $\lambda_{\Sigma}$ , приведенная в справочнике «Надежность ЭРИ 2006» [3], разработанного 22 Центральным научно-исследовательским испытательным институтом МО РФ (22 ЦНИИИ МО РФ) имеет вид (1):

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\sigma}(\lambda_{\sigma.c.c.}) \cdot K_{\Sigma} \cdot K_{PP}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\sigma}(\lambda_{\sigma.c.c.})$  - базовая интенсивность отказов, значение которой определяется по таблице характеристик надежности отдельных технологических групп [3], 1/ч;  $K_{\Sigma}$  - коэффициент эксплуатации, который учитывает степень жесткости условий эксплуатации и показывает, во сколько раз интенсивность отказов электрорадиоизделий в аппаратуре конкретного класса (группы эксплуатации по ГОСТ Р В 20.39.304-98 [4]) выше при всех прочих равных условиях, чем в наземной стационарной аппаратуре (группа 1.1);  $K_{PP}$  - коэффициент приемки, который отражает два уровня качества изготовления изделий: общего военного применения (ОВП) - приемка «5», повышенной надежности (ОС) - приемка «9» (в эту же группу входят изделия повышенной надежности, выпускаемые малыми партиями (ОСМ) - приемка «7») [4].

Математическая модель ЭИО  $\lambda_p$ , приведенная в американском справочнике MIL-HDBK-217f [5] представляется в следующем виде (2):

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_E, \quad (2)$$

где  $\lambda_b$  - базовая интенсивность отказов, 1/ч, определяется выражением (3);  $\pi_E$  - коэффициент эксплуатации, учитывающий жесткость эксплуатации, для группы аппаратуры Gb (по ГОСТ Р В 20.39.304-98 - группа 1.1.), равен 1 [5].

$$\lambda_b = 11 \cdot (1.00002)^{P \cdot 0.001} \cdot (1.1)^F \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где  $P$  - выходная номинальная мощность (поправка: если импульсный режим, то используется пиковая мощность), Вт;  $F$  - рабочая частота, ГГц;

Математическая модель ЭИО  $\lambda_p$ , приведенная в справочнике Chinese Standard GJB/z 299B [6] имеет вид (4):

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_L, \quad (4)$$

где  $\lambda_b$  - базовая интенсивность отказов, 1/ч, определяется математической моделью (5);  $\pi_Q$  - коэффициент приемки, учитывающий уровень качества [4];  $\pi_E$  - коэффициент эксплуатации, учитывающий жесткость эксплуатации [6];  $\pi_L$  - коэффициент, учитывающий фактор производства ЛБВ.

$$\lambda_b = 14.6 \cdot (1.00006)^{P \cdot 0.001} \cdot (1.1)^F \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

где  $P$  - выходная мощность, Вт;  $F$  - рабочая частота, ГГц.

Математическая модель ЭИО  $\lambda_{\Sigma}$  согласно источнику [7] имеет вид (6):

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_0(\lambda_{0,c,c}) \cdot K_{\Sigma}, \quad (6)$$

где  $\lambda_0(\lambda_{0,c,c})$  - базовая интенсивность отказов, учитывающая параметры ЛБВ – оценивается по выражению (7):

$$\lambda_0(\lambda_{0,c,c}) = \lambda_0^* \cdot (1.000053)^{P \cdot 0.001} \cdot (1.114)^F, \quad (7)$$

где  $\lambda_0^*$  - базовая интенсивность отказов: определяется на основании технологической группы [7];  $P$  - выходная мощность, Вт;  $F$  - рабочая частота, Гц;  $K_{\Sigma}$  - коэффициент эксплуатации, учитывающий жесткость внешних воздействующих факторов (ВВФ).

Рассмотрим применение перечисленных ММ эксплуатационной интенсивности отказов (1, 2, 4 и 6) на примере современного усилителя мощности на базе ЛБВ (см. рисунок 1), работающего в диапазоне от 26 ГГц до 31 ГГц.



Рис. 1. Внешний вид усилителя мощности на базе ЛБВ

Необходимые параметры для оценки надежности по ММ (1, 2, 4 и 6): диапазон частот от 26 до 31 ГГц; минимальная выходная мощность 200 Вт; выходная мощность 220 Вт. Необходимые сведения: повышенная надежность в военном исполнении; возможность модернизации и работы как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Таблица 1

Результаты оценки ЭИО ММ (1, 2 и 4)	
ММ	ЭИО, $\lambda_{\Sigma}(\lambda_p) \cdot 10^{-4}$ 1/ч
(1)	0.18
(2)	1.31
(4)	1.74
(6)	2.93

Стоит отметить, что математическая модель (1) не учитывает ни электрических, ни конструктивно-технологических параметров ЛБВ, однако это недопустимо в силу того, что повышение интенсивности отказов вызывается различными видами нагрузок, причем, как правило, эти нагрузки влияют друг на друга. Напряжение на сетке ЛБВ не должно превышать 10 кВ, потери тока на сетке не превышают 5 %, предельная глубина торможения порядка 30 % [2].

Ухудшение работы может наблюдаться на более ранних этапах жизненного цикла, когда неоднородность покрытия приводит к частичной потере оксидного слоя. Кроме испарения покрытия может происходить испарение основного материала катода. Все продукты испарения конденсируются на холодных частях ЛБВ и могут вызвать не желаемые явления, например, утечку тока через изоляторы или эмиссию сетки. Так как скорость испарения зависит от температуры, то очень важно обеспечить соответствующее напряжение накала. [2].

Когда ЛБВ работает длительное время при напряжениях накала выше номинального, причем в течение нескольких тысяч часов у них может наблюдаться тенденция к постепенному отказу вследствие возрастания по-

верхностного сопротивления катода. Это сопротивление обычно проявляет себя как дополнительное катодное сопротивление смещения. Увеличение смещения приводит к ухудшению работы ЛБВ [2].

Как следует из приведенных выше математических моделей (1, 2, 4 и 6), надежность ЛБВ высокой мощности зависит от 3-х факторов: величин электрических нагрузок, эксплуатационных условий и технологий изготовления.

Инженер-конструктор не может осуществлять контроль над технологией изготовления, но благодаря правильному проектированию, он может так обеспечить первые два фактора, чтобы средняя наработка до отказа  $T_o$  ЛБВ была доведена до наработки, предусмотренной изготовителем. Изготовитель определяет предполагаемую наработку ЛБВ, исходя из наиболее тяжелых условий ее эксплуатации.

На величину средней наработки до отказа  $T_o$  ЛБВ влияют следующие факторы: выходная мощность, мощность на накале, напряжение на сетке, напряжение на аноде, рабочая частота и др. Например, на рисунке 2, продемонстрирована зависимость  $T_o$  от рабочей частоты  $F$ .

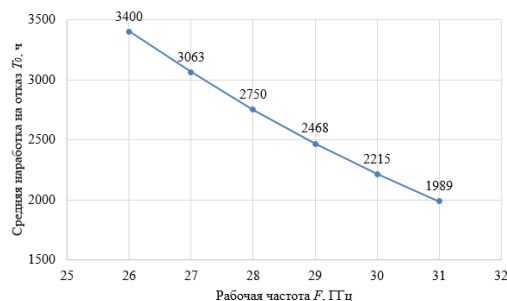


Рис. 2. Зависимость средней наработки до отказа  $T_o$  от рабочей частоты  $F$

Температуры элементов внутри ЛБВ сильно влияют на интенсивность отказов. Под действием высокой температуры освобождается некоторое количество адсорбированных поверхностью газов, и эти газы неблагоприятно влияют на эмиссионную способность катода. Кроме того, газы вызывают увеличение тока сетки, что может привести к нестабильности работы ЛБВ. Высокая температура также ведет к испарению геттера внутри ЛБВ, в результате чего образуется нежелательный осадок на поверхностях элементов.

Поскольку температуры элементов зависят не только от температуры окружающей среды, но и от мощности рассеяния, следует одновременно учитывать оба этих фактора. Иногда повышение температуры окружающей среды может быть скомпенсировано уменьшением полной мощности рассеяния так, чтобы температура элементов и поверхности ЛБВ осталась неизменной.

В связи с этим, как показала практика подконтрольной эксплуатации ЛБВ ФГУП «ВЭИ», наиболее ненадежными элементами являются следующие (перечислены в порядке их значимости): катод, анод, сетка, защитный электрод, вакуумные уплотнения.

Как было показано выше, надежность ЛБВ в значительной степени зависит от рабочих температур его элементов, в первую очередь от температуры катода, которая может достигать тысячи градусов. В свою очередь, температура может дестабилизировать разные электрические параметры ЛБВ, такие как напряжения на аноде,

мощности накала, напряжения на сетке и др.

В источнике [7] приведена ММ эксплуатационной интенсивности отказов  $\lambda_{\text{Э}}$  (8), учитывающая не только влияние электрических режимов, но и температуры катода одновременно:

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_0(\lambda_{0\text{сг}}) \cdot \left[ 0.4 + 0.6 \cdot \left( \frac{U_A}{U_{\text{Аном}}} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{U_C}{U_{\text{Сном}}} \right)^\alpha \right] \cdot \left( \frac{P_H}{P_{\text{Нном}}} \right)^\beta \cdot \left( \frac{\theta_K}{\theta_{\text{Кном}}} \right)^\gamma \cdot K_{\text{Э}}, \quad (8)$$

где  $\lambda_0(\lambda_{0\text{сг}})$  - базовая интенсивность отказов, учитывающая параметры ЛБВ [33];  $K_{\text{Э}}$  - коэффициент эксплуатации, учитывающий жесткость условий внешних в зависимости от ВВФ;  $U_{\text{Аном}}$ ,  $U_{\text{Сном}}$ ,  $P_{\text{Нном}}$ ,  $P_{\text{Кном}}$  - номинальные значения напряжения анода, напряжения сетки, мощности накала и температуры катода;  $U_A$ ,  $U_C$ ,  $P_H$ ,  $P_K$  - действительные (рабочие) значения напряжения анода, напряжения сетки, мощности накала;  $\alpha = 10 \div 12$ ,  $\beta = 1.7 \div 1.8$ ,  $\gamma = 5.5$  - поправочные коэффициенты.

Значение температуры катода  $\theta_K$  определяется по следующей эмпирической формуле (9):

$$\theta_K = \theta_{K0} + (C_a - C_b \cdot P_a) \cdot \theta_c + C_c \cdot P_a, \quad (9)$$

где  $\theta_{K0}$ ,  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  - постоянные для данного типа (определяются технологической группой и номинальными значениями параметров ЛБВ), °С, отн. ед., 1/Вт, °С/Вт [7];  $P_a$  - мощность, рассеиваемая анодом;  $\theta_c$  - средняя температура на аноде.

На рисунке 3 изображена зависимость средней наработки до отказа  $T_o$  от мощности накала  $P_H$  по математической модели (8).

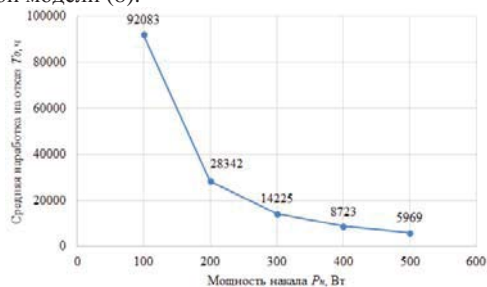


Рис. 3. Зависимость средней наработки до отказа  $T_o$  от мощности накала  $P_H$

Как видно из рисунка 3, изменение мощности накала ЛБВ в интервале от 10 до 500 Вт приводит к изменению средней наработки до отказа ЛБВ более чем в 15 раз.

### Заключение

Обзор математических моделей ЭИО показал, что наиболее эффективную оценку дает ММ (8), т.к. позволяет учитывать большое количество электрических и эксплуатационных параметров ЛБВ.

Необходимо отметить то, что наибольшее влияние на интенсивность отказов ЛБВ оказывает мощность накала и коммутируемая мощность. Для обеспечения требуемого уровня надежности необходимо выдерживать заданные электрические и тепловые режимы работы ЛБВ в целом.

Кроме того, повышению надежности ЛБВ будет действовать его упрощение, облегчение временных и иных условий функционирования в составе преобразователя.

### Литература

1. Белов Л. Мощные усилители сверхвысоких частот // Электроника: НТБ, 2006, №6. С. 66-70.
2. Гилмор А.С. Лампы с бегущей волной. М.: Техносфера, 2013. 616 с.
3. Надежность ЭРИ 2006: справочник. М.: МО РФ, 2006. С. 641.
4. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Менеджмент риска. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. [Дата введения 1998-07-09]. М.: МО РФ, 1998.
5. Military Handbook (1991). Reliability prediction of electronic equipment. MIL-HDBK-217F, 205 p.
6. Reliability Prediction Model For Electronic Equipment. Chinese Standard GJB/z 299B. 104 p.
7. Надежность изделий электронной техники для устройств народнохозяйственного назначения: Справочник. Л.: ВНИИ Электронстандарт, 1989. 188 с.

<b>Елизаров А.А., Лаврухин И.Р., Башкевич С.В., Ларионов А.А., Каравашкина В.Н.</b> <b>РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ RFID-СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</b>	271
<b>Иванюшкин Р.Ю., Разин К.О.</b> <b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ ПО СХЕМЕ У. ДОГЕРТИ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ РЕЖИМА ПО ПИТАНИЮ</b>	275
<b>Комаров С.Н., Коцыганова К.Д.</b> <b>ДУХФАЗНО-ДУХТАКТНЫЙ СИНТЕЗАТОР ЧАСТОТ С МОЩНЫМ ВЫХОДОМ</b>	278
<b>Константинов А.С., Пестряков А.В.</b> <b>АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПЕРЕДАЧИ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ НИСХОДЯЩЕГО НАПРАВЛЕНИЯ СТАНДАРТА LTE-ADVANCED / 5G</b>	283
<b>Корнюхин В.И., Седов В.М.</b> <b>ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА АНТЕНН ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ</b>	287
<b>Полесский С.Н., Королев П.С., Серебрякова Ю.О., Цеплина А.Е.</b> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ СВЯЗИ</b>	291
<b>Рябов И.В., Стрельников И.В., Ключев Е.С., Толмачев С.В.</b> <b>ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИНТЕЗАТОРЫ СЛОЖНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ</b>	294
<b>Самойлов А.Г., Самойлов В.С., Самойлов С.А.</b> <b>СОГЛАСОВАНИЕ МОЩНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С НАГРУЗКАМИ</b>	298
<b>Смирнов Е.В.</b> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОГЛАСОВАНИЯ АНТЕННЫ И ЕЕ НАГРУЗКИ НА ИНФОРМАЦИОННУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН</b>	301
<b>Чебышев В.В., Ястребцова О.И.</b> <b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ФАР С ЦЕЛЕВЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ</b>	306
<b>Чиков В.А., Петров А.С., Прилуцкий А.А.</b> <b>ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СУБАПЕРТУРНОЙ АФАР НА ЭВМ</b>	311
<b>Шмаков Н.Д.</b> <b>ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УСИЛЕНИЯ В РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ</b>	315
<b>Ястребцова О.И.</b> <b>УЛУЧШЕНИЕ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ СВОЙСТВ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК</b>	318

Подписано в печать 22.05.2019  
Формат 60x84/16. Печать офсетная. Тираж 500 экз.  
ООО “ИД Медиа Паблшер”,  
Москва, 111024, ул. Авиамоторная, д.8, стр. 1  
[www.media-publisher.ru](http://www.media-publisher.ru)