

МОЩНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИИ

*Белявский Б.А., Мельников В.А., Платонов С.А.
ООО «ОКБ «Плутон», г. Москва*

Рассмотрена возможность улучшения выходных характеристик усилителей мощности миллиметрового диапазона за счет ограничения выходной импульсной мощности ЛБВ уровнем (1 – 2) кВт и снижения ее коэффициента усиления в режиме насыщения до (30 – 33) дБ, а также целесообразность построения вакуумно-полупроводниковых усилителей на основе прозрачных ЛБВ.

В ООО «ОКБ «Плутон» разработаны ЛБВ 8-мм диапазона с выходной импульсной/средней мощностью 250/50 Вт, 1,0/0,2 кВт, 3,0/0,3 кВт и 6,0/0,4 кВт, которые используются в нескольких радиолокационных проектах [1]. Практика показала, что усилители с выходной импульсной мощностью (1 – 2) кВт, позволяющие работу при средней скважности (3 – 4), являются наиболее востребованными. При указанном уровне выходной мощности успешная конкуренция ЛБВ с полупроводниковыми устройствами возможна при выполнении следующих условий:

- отсутствие электрических пробоев;
- технический КПД (50 – 60) %;
- снижение стоимости;
- поставка готовых усилителей мощности, а не ЛБВ.

Рассмотрим реалистические пути выполнения сформулированных требований. Для исключения пробоев необходимо обеспечить напряженность электрического поля в рабочих зазорах электронной пушки и коллектора не более (4 – 5) кВ/мм. В ЛБВ миллиметрового диапазона пакетированной с МПФС, и сроком службы порядка 10^4 часов это возможно, как раз при уровне выходной импульсной мощности (1 – 2) кВт.

Увеличение технического КПД лампы предполагает использование рекуперации энергии отработанного электронного пучка. В [2] сообщено о достигнутом уровне технического КПД 70% в ЛБВ сантиметрового диапазона космического базирования с помощью пятиступенчатого коллектора. Наши исследования показали практическую возможность создания коллектора относительно высоковольтной ЛБВ миллиметрового диапазона, обеспечивающего уровень технического КПД (50 – 60) % [3]. Это примерно в два раза превышает текущее значение параметра и представляется приемлемым значением для ЛБВ наземного применения.

Снижение стоимости ЛБВ можно обеспечить, упростив ее конструкцию за счет уменьшения коэффициента усиления. Типичное значение входной мощности нашей ЛБВ УВИ-161 с выходной импульсной мощностью 1 кВт в диапазоне частот (33,00 – 34,75) ГГц составляет 25 мВт, что соответствует величине коэффициента усиления в режиме насыщения примерно 47 дБ. Это вынуждает использовать замедляющую систему (ЗС), состоящую из трех изолированных по высокочастотному полю секций. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ЛБВ УВИ-161 представлена на рисунке 1 (график 1). В настоящее время распространенное значение выходной мощности синтезаторов частот составляет 0,5 Вт. Это обстоятельство позволяет снизить величину коэффициента усиления лампы до 33 дБ и исключить одну секцию из состава ЗС. Расчетная АЧХ двухсекционной ЛБВ УВИ-161 при уровне входной мощности 0,5 Вт представлена на рисунке 1 (график 2). Как видно, ожидаемый уровень выходной импульсной мощности в ней выше, чем в прототипе, что объясняется снижением потерь внутри ЗС вследствие устранения двух поглотителей СВЧ энергии. Дальнейшее уменьшение коэффициента усиления двухсекционной ЛБВ не приводит к заметному выигрышу в уровне выходной импульсной мощности (график 3 на рисунке 1). Наиболее простую конструкцию имеют односекционные (прозрачные) ЛБВ. У них отсутствуют упоминавшиеся СВЧ поглотители, что упрощает технологию изготовления. В ООО «ОКБ «Плутон» имеется опыт создания прозрачных ЛБВ

8-миллиметрового диапазона с выходной импульсной мощностью до 12 кВт [4]. Коэффициент усиления таких ламп не превышает (15 – 17) дБ. При появлении достаточно эффективных твердотельных усилителей миллиметрового диапазона с выходной импульсной мощностью 50 Вт возможно создание вакуумно-твердотельных усилителей с выходной импульсной/средней мощностью примерно 1,5/0,5 кВт. АЧХ односекционной ЛБВ УВИ-161-03 при уровне входной мощности 50 Вт представлена на рисунке 1 (график 4). Как видно, ожидаемый уровень выходной мощности в таком усилителе самый высокий. При расчете АЧХ ЛБВ УВИ-161 с индексами 01...03 использовался программный комплекс «Вега» [5]. Наш опыт разработок ЛБВ с ЗС на основе цепочек связанных резонаторов показал его достаточную для практики точность.

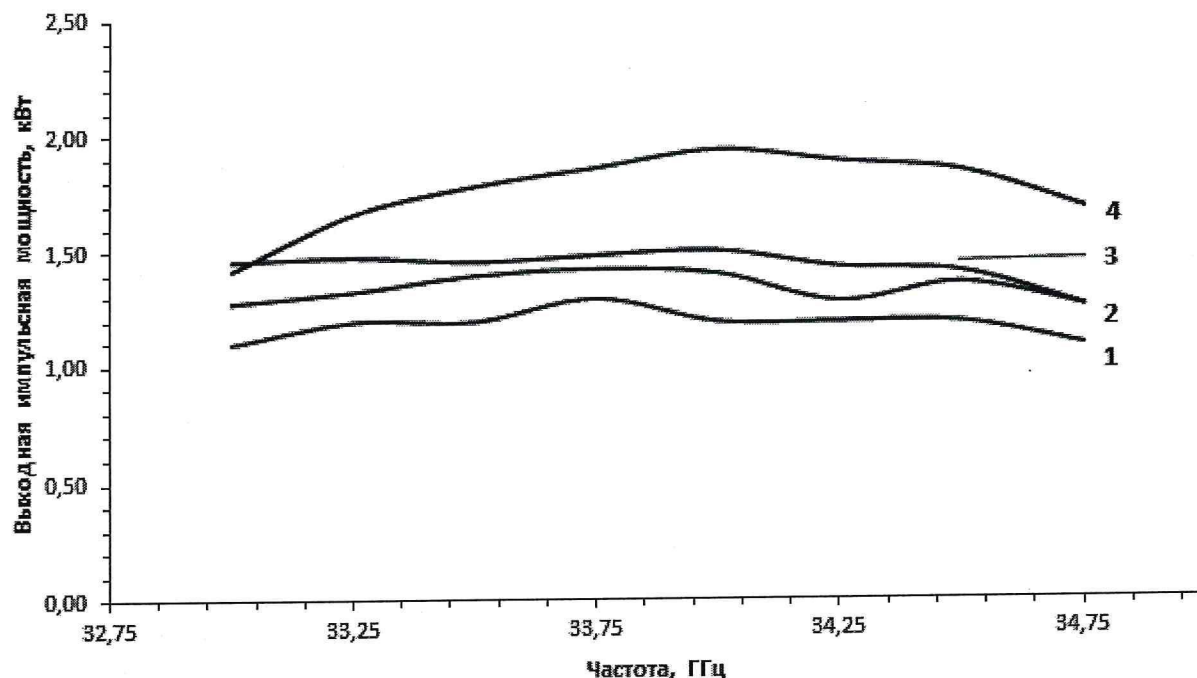


Рисунок 1 – АЧХ четырех вариантов ЛБВ УВИ-161 при оптимальных значениях входной мощности $P_{вход}$.

- 1 – УВИ-161 (3 секции). $U_{катода}=19,0$ кВ, $I_{катода}=0,68$ А, $P_{вход} = 25$ мВт
- 2 – УВИ-161-01 (2 секции). $U_{катода}=19,2$ кВ, $I_{катода}=0,60$ А, $P_{вход} = 0,5$ Вт
- 3 – УВИ-161-02 (2 секции). $U_{катода}=19,4$ кВ, $I_{катода}=0,60$ А, $P_{вход} = 5,0$ Вт
- 4 – УВИ-161-03 (1 секция). $U_{катода}=19,5$ кВ, $I_{катода}=0,60$ А, $P_{вход} = 50$ Вт

Следует отметить, что для определения практической целесообразности построения двухкаскадных усилителей мощности 8-миллиметрового диапазона с использованием в выходном каскаде прозрачной ЛБВ необходимо знать реальную эффективность входного каскада на основе транзисторов. Величина технического КПД всего усилителя η (без учета потребления энергии системой охлаждения) определяется следующим образом:

$$\eta = K \times \eta_1 \times \eta_2 / (\eta_2 + K \times \eta_1),$$

где K – коэффициент усиления выходной прозрачной ЛБВ в раз;

η_1 и η_2 – технический КПД входного и выходного каскадов усилителя.

Анализ приведенной формулы показывает, что при эффективности выходного каскада $\eta_2 = 0,5$ и $K = 30$ (14,8 дБ) эффективность входного каскада η_1 , при которой КПД η всего усилителя не слишком отличается от эффективности η_2 выходного каскада, составляет примерно 0,2.

В настоящее время наиболее целесообразно создать усилитель мощности на основе ЛБВ УВИ-161-01 с уровнем входной мощности примерно 0,5 Вт. Основные параметры такого усилителя приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры усилителя на основе ЛБВ УВИ-161-01.

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Рабочий диапазон частот, ГГц	33,25 – 34,75
Выходная импульсная мощность, кВт	1,2
Минимальная скважность	4
Входная мощность, Вт	0,5
Потребляемая мощность, Вт	850
Габаритные размеры, мм	500×500×280
Масса, кг	40
Охлаждение	Воздушное принудительное

1. Белявский Б.А., Бородин В.А., Носовец А.Ф. Мощные импульсные ЛБВ миллиметрового диапазона. Радиотехника и электроника, 2014. Т. 51. №8. С. 766 – 769.

2. Шалаев П.Д. и др. Мощная ЛБВ X-диапазона для радиопередающих трактов спутников связи. XXI координационный научно-технический семинар по СВЧ технике. Нижний Новгород, 7 – 9 сентября 2021 г.

3. Исследование возможности увеличения технического КПД ЛБВ УВИ-159Б за счет использования двухкаскадного коллектора с теплопроводящими втулками из нитрида алюминия. Справка-отчет. Руководитель работы Белявский Б.А. ООО «ОКБ «Плутон». Москва, 2023 г.

4. Белявский Б.А., Фокин К.Л. Мощная усилительная цепочка миллиметрового диапазона. VII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, 28 – 31 мая 2018 г.

5. Мухин С.В. Программный комплекс «VEGA» для моделирования резонаторных замедляющих систем и процессов взаимодействия в ЛБВ, построенных на их основе. Журнал Радиоэлектроники (электронный журнал). 2002 г. №12. <http://jre.cplire.ru>