

Лампы бегущей волны с рекуператорами энергии радиосигналов для линеаризованных усилителей СВЧ-мощности спутников связи

В.А. Царев, П.Д. Шалаев

АО «НПП «Алмаз»

Аннотация: в работе приведены результаты экспериментальных исследований линеаризации усиления рабочих сигналов в ЛБВ с помощью дополнительного сигнала на её входе. ЛБВ предназначена для работы в радиопередающих трактах спутников связи. Частота дополнительного сигнала выбирается за пределами рабочей полосы канала связи. Показаны положительные возможности этого метода и его недостаток. Для снижения влияния этого недостатка на параметры усилителя СВЧ-мощности предлагаются конструкции ЛБВ с рекуператором мощности СВЧ-сигналов.

Ключевые слова: ЛБВ, линеаризация усиления, рекуператор мощности СВЧ-сигналов

1. Введение

Технические параметры ЛБВ О-типа (ЛБВ) в наибольшей степени, по сравнению с другими типами усилительных приборов, соответствуют требованиям к СВЧ-радиопередающей аппаратуре спутников связи. При этом ЛБВ имеют важный для аппаратуры связи недостаток – в режиме работы с высоким КПД усиление сигналов в них имеет существенно нелинейный характер.

Необходимое для систем связи уменьшение нелинейных искажений сигналов в ЛБВ достигается при её работе в режиме усиления малых сигналов (в линейном режиме). Но мощность усиленных сигналов на выходе ЛБВ в этом режиме уменьшается на 10-15 дБ по сравнению с режимом насыщения выходной мощности. Это приводит к уменьшению КПД ЛБВ по сравнению с режимом насыщения в 5-7 раз даже при многоступенчатой рекуперации энергии электронов электронного потока в коллекторе прибора. Кроме этого, для достижения требуемой величины выходной мощности на частотах входных сигналов (мощности рабочих сигналов) в линейном режиме необходимо многократного увеличивать мощность, соответственно и ток электронного потока в лампе. Это приводит к снижению надёжности ЛБВ из-за увеличения плотности токоотбора с катода и повышения тепловой нагрузки на её электроды.

Разработанные и применяемые на практике методы улучшения линейности параметров усилителей с помощью внешних по отношению к ЛБВ устройств (линеаризаторов), основанные на специальных способах предварительной модуляции входных сигналов, требуют создания на входе ЛБВ сигналов с высокой фазовой стабильностью и поддержания высокой стабильности амплитудно-фазовых характеристик ЛБВ в течение всего времени их эксплуатации. Но амплитудно-фазовые характеристики ЛБВ и характеристики радиоэлектронных компонентов линеаризаторов в процессе их эксплуатации изменяются, соответственно эффективность линеаризации параметров усилителей снижается.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований линеаризации параметров ЛБВ с помощью немодулированного дополнительного входного сигнала с произвольной фазой. Показаны положительные возможности этого метода и его недостаток. Для снижения влияния этого недостатка на параметры усилителя СВЧ-мощности предлагаются конструкции ЛБВ с рекуператором мощности СВЧ-сигналов.

2. Результаты исследований

В работе [1], опубликованной в 1984 году, теоретически обоснована возможность снижения амплитудно-фазовой зависимости и уровня комбинационных составляющих в ЛБВ с помощью дополнительного сигнала на её входе. Но до настоящего времени такой метод снижения нелинейных искажений рабочих сигналов в ЛБВ не получил практического применения. Связано это с тем, что значительные затраты энергии электронного потока в ЛБВ на усиление дополнительного сигнала, который после усиления не имеет полезного применения и должен быть с помощью дополнительных устройств утилизирован снижет энергетическую эффективность ЛБВ и усилителя СВЧ-мощности.

Экспериментальные исследования, выполненные на образцах ЛБВ с высоким электронным КПД [2], показали, что, не смотря на указанный выше недостаток, метод обладает важными полезными особенностями, создающими ему преимущество по сравнению с методами, которые используются в настоящее время. Особенности линеаризации усиления сигналов в ЛБВ с помощью дополнительного сигнала состоят в следующем. Первое - на вход ЛБВ может подаваться немодулированный дополнительный сигнал с произвольной фазой, при этом отпадает необходимость в сложных устройствах модуляции, отслеживания сравнения и преобразования входных сигналов в соответствии с изменяющимися характеристиками ЛБВ. Это обеспечивает независимость уровня линеаризации от изменения параметров ЛБВ и стабильность параметров линеаризации в течение всего срока эксплуатации усилителя. Второе – необходимые уровни линеаризации достигаются в слабо нелинейном режиме работы ЛБВ, при значительно большем значении электронного КПД по сравнению с линейным режимом. Это позволяет многократно снизить мощность и ток электронного потока в ЛБВ по сравнению с работой в линейном режиме при тех же значениях её выходной мощности. Соответственно повышается надёжность ЛБВ. Эти особенности подтверждаются экспериментальными результатами, представленными на рисунках 1, 2.

На рисунке 1 показано каким значениям КПД преобразования мощности электронного потока в суммарную выходную мощность рабочих сигналов (электронного КПД, рассчитанного по суммарной выходной мощности рабочих сигналов) $\eta_{\Sigma(BVIX)}$ соответствуют одинаковые уровни комбинационных составляющих третьего порядка α_3 при усилении двух равных по величине рабочих сигналов в случаях линеаризации усиления без дополнительного сигнала и с дополнительным сигналом на входе ЛБВ. Здесь $\eta_{\Sigma(BVIX)} = (\Sigma P_{вых}^{f1,f2})/P_0$, где $\Sigma P_{вых}^{f1,f2}$ – суммарная выходная мощность рабочих сигналов ЛБВ, $P_0 = I_0 U_0$, - мощность электронного потока, I_0 – ток электронного потока, U_0 – напряжение замедляющей системы (ЗС) относительно катода. При расчёте $\eta_{\Sigma(BVIX)}$ не учитываются потери СВЧ-энергии в виде омических потерь в ЗС, мощности гармонических составляющих и отражённых волн.

На рисунке 2 приведены сравнительные данные изменения уровня амплитудно-фазовых преобразований при переходе в линейный режим работы ЛБВ без дополнительного сигнала и с дополнительным сигналом на входе ЛБВ.

На рисунке 1 точке $P_{ВХf3} = 0$, $\alpha_3 = -10$ дБ, $\Sigma P_{вых}^{f1,f2}$ имеет значение близкое к насыщению (0 дБ – точка отсчёта) соответствуют входные мощности на рабочих частотах, каждая из которых равна 1/3 от входной мощности в режиме насыщения выходной мощности в односигнальном режиме работы ЛБВ. Кривая 1 получена при уменьшении суммарной входной мощности равных по величине рабочих сигналов при отсутствии на входе ЛБВ дополнительного сигнала. Кривая 2 получена при постоянной суммарной входной мощности равных по величине рабочих сигналов и увеличении дополнительного немодулированного сигнала с произвольной фазой на входе ЛБВ от $P_{ВХf3} = 0$ до $P_{ВХf3} = P_{ВХf1} = P_{ВХf2}$. На рисунке 2 кривая 1 получена при

уменьшении суммарной входной мощности равных по величине рабочих сигналов при отсутствии на входе ЛБВ дополнительного сигнала. Кривая 2 получена при постоянной мощности дополнительного немодулированного сигнала с произвольной фазой на входе ЛБВ равной 1/3 от входной мощности в режиме насыщения выходной мощности в односигнальном режиме работы ЛБВ и уменьшении суммарной входной мощности равных по величине рабочих сигналов.

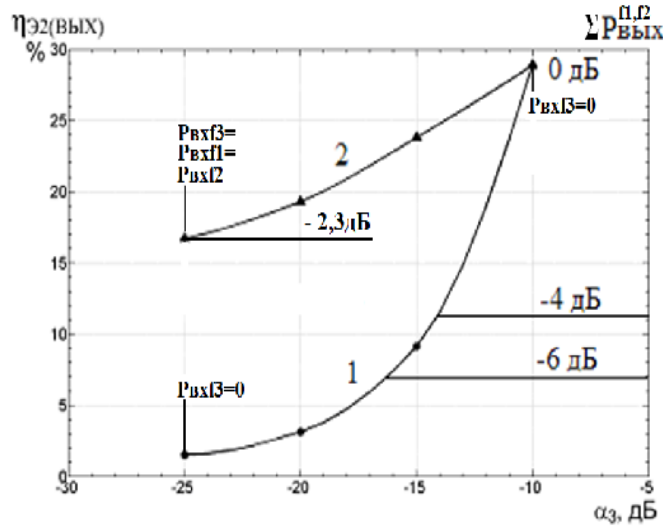


Рисунок 1. Значения $\eta_{Э2(ВЫХ)}$ при различных уровнях α_3 : 1 - при уменьшении мощности рабочих сигналов на входе ЛБВ, 2 - при постоянной мощности рабочих сигналов и увеличении мощности немодулированного дополнительного сигнала с произвольной фазой на входе ЛБВ

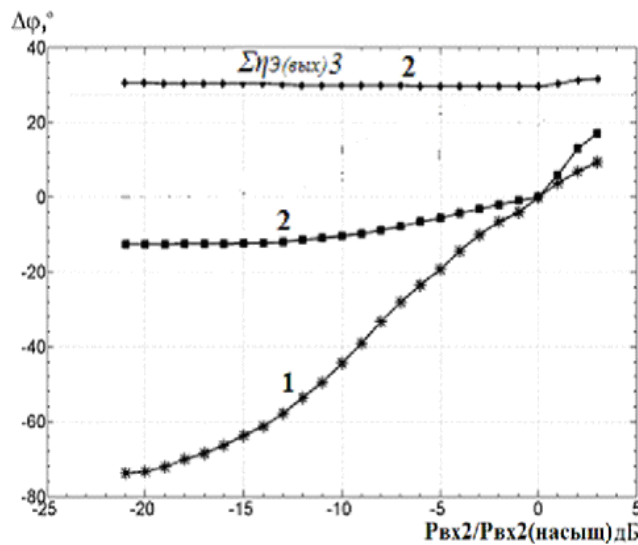


Рисунок 2. Зависимость фазы выходных сигналов на рабочих частотах f_1 и f_2 от их суммарной входной мощности: 1- без дополнительного сигнала на входе ЛБВ, 2 - с дополнительным немодулированным сигналом с произвольной фазой на входе ЛБВ

На рисунках 1,2 видно, что дополнительный сигнал на входе ЛБВ обеспечивает эффективную линеаризацию характеристик ЛБВ при отмеченных выше полезных особенностях метода линеаризации.

Однако, как видно на рисунке 2, с уменьшением суммарной выходной мощности равных по величине рабочих сигналов и постоянной величине входной мощности дополнительного сигнала электронный КПД, рассчитанный по суммарной выходной мощности трёх сигналов (рабочих и дополнительного) $\eta_{Э(ВЫХ)3}$, не уменьшается. Поэтому КПД ЛБВ, как показано в [3], остаётся примерно на том же уровне, что и при

её работе в линейном режиме с сопоставимым уровнем нелинейных искажений без дополнительного входного сигнала. Отсутствие роста КПД ЛБВ связано с затратой энергии электронного потока на усиление дополнительного входного сигнала. Для обеспечения практического применения метода линеаризации параметров ЛБВ с помощью дополнительного входного сигнала необходимо решить задачу повышения её КПД при достижении высоких уровней линейности.

Увеличить КПД ЛБВ в этом случае можно возвращая электронному потоку энергию усиленной электромагнитной волны на частоте дополнительного сигнала [3]. Это возможно в ЛБВ с рекуперацией энергии СВЧ-сигналов, предложенных в [4], [5]. Их схематическое изображение показано на рисунке 3.

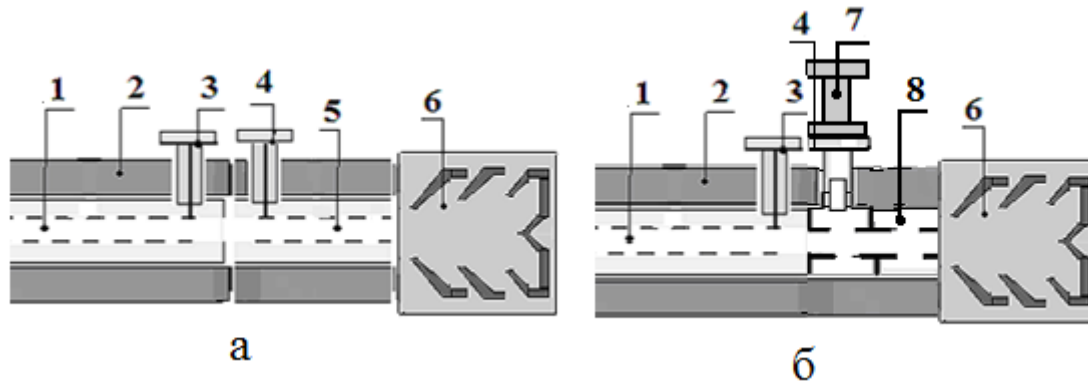


Рисунок 3. Схематическое изображение части конструкции ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов: а – рекуператор с ЗС, б – рекуператор с резонаторной системой

На рисунке 3 обозначены: 1 – ЗС ЛБВ на участке усиления электромагнитных волн, 2 – магнитная система ЛБВ, 3 - вывод СВЧ-сигналов в ЛБВ, 4 - ввод СВЧ-сигналов в рекуператор энергии СВЧ-сигналов, 5 - ЗС рекуператора энергии СВЧ-сигналов, 6 – коллектор-рекуператор энергии электронного потока, 7 – фазовращатель, 8 - резонаторная система рекуператора энергии СВЧ-сигналов.

Рекуператор энергии СВЧ-сигналов располагается между ЗС и коллектор-рекуператором энергии электронного потока. Рекуператор энергии СВЧ-сигналов может быть выполнен в виде участка ЗС или резонаторной системы.

ЗС (5) в рекуператоре энергии СВЧ-сигналов (рисунок 1а) имеет период, при котором скорость электромагнитной волны превышает скорость электронного потока на столько, что параметр рассинхронизма b в пространстве взаимодействия рекуператора принимает отрицательное значение ($b < 0$). Эффективное преобразование энергии дополнительного СВЧ-сигнала в кинетическую энергию электронов электронного потока в рекуператоре энергии СВЧ-сигналов достигается при значениях b в пределах минус 1,5 – минус 2,0. Достоинством рекуператора энергии СВЧ-сигналов с ЗС является то, что эффективная рекуперация достигается при произвольной фазе сигнала на его вводе СВЧ-сигналов.

Достоинство рекуператора энергии СВЧ-сигналов с резонаторной системой заключается в том, что в резонаторной системе может быть достигнута более высокая эффективность рекуперации по сравнению с ЗС. При этом длина резонаторной системы меньше длины ЗС. Но при использовании резонаторной системы необходимо обеспечивать оптимальное или близкое к оптимальному соотношение фазы рекуперированного сигнала и фазы первой гармоники переменного тока электронного потока в рабочих зазорах резонаторного блока. Это достигается с помощью фазовращателя, который может устанавливаться на вводе СВЧ-сигналов в рекуператор их энергии или в линии подачи дополнительного сигнала на ввод ЛБВ. При наличии дополнительного сигнала на входе ЛБВ амплитудная модуляция рабочих сигналов не приводит к большим изменениям фаз выходных сигналов, поэтому

последний вариант может быть предпочтительней, т.к. в этом варианте не требуется фазовращатель большой мощности.

Выходной СВЧ-сигнал с частотой дополнительного сигнала выделяется из спектра сигналов в выходном тракте радиопередатчика и подаётся в рекуператор энергии СВЧ-сигналов. В ЗС или резонаторном блоке рекуператора энергии СВЧ-сигналов, в результате взаимодействия электромагнитной волны с модулированным по плотности и скорости электронным потоком, происходит преобразование энергии электромагнитной волны в кинетическую энергию электронов электронного потока. Далее электронный поток поступает в коллектор-рекуператор ЛБВ. В нём энергия электронов преобразуется в энергию постоянного электрического поля источника питания ЛБВ. Энергия электромагнитного поля дополнительного сигнала преобразуется в энергию постоянного электрического поля источника питания ЛБВ в два этапа. На первом этапе рекуператор энергии СВЧ-сигналов работает как СВЧ-ускоритель электронов. На втором этапе дополнительная кинетическая энергия электронов, полученная в результате ускорения, рекуперирована известным способом в коллекторе-рекуператоре ЛБВ. Использование энергии электромагнитного поля дополнительного сигнала для увеличения энергии электронного потока приводит к повышению КПД ЛБВ в слабо нелинейном режиме работы с низким уровнем нелинейных искажений.

В предложенных конструкциях ЛБВ для повышения их КПД могут быть также использованы СВЧ-сигналы с любой частотой в пределах рабочей полосы частот рекуператора энергии СВЧ-сигналов, как полученных от ЛБВ, так и от других источников СВЧ-сигналов.

3. Заключение

ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов позволяет использовать энергию СВЧ-сигналов в рабочей полосе частот рекуператора, поступающих на его СВЧ-ввод, для повышения КПД ЛБВ. Представленные конструкции ЛБВ обеспечивают повышение их КПД по сравнению с ЛБВ без рекуператора энергии СВЧ-сигналов при одинаковом уровне линеаризации их характеристик с помощью дополнительного входного СВЧ-сигнала.

Список литературы

1. Кац А.М., Кудряшов В.П., Трубецков Д.И. Сигнал в лампах с бегущей волной: в 2 ч. Ч.1. Лампа с бегущей волной О-типа// Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. СГУ. 1984. 144с.
2. Шалаев П.Д., Симонов Д.Л. Уменьшение нелинейных искажений сигналов в ЛБВ О-типа в полосе рабочих частот выходных усилителей СВЧ-мощности спутников связи// Радиотехника. 2017. №7. С. 14-18.
3. Шалаев П.Д. Линеаризация характеристик усилителей СВЧ-мощности на ЛБВ в режимах с высоким КПД с помощью немодулированного дополнительного сигнала и рекуперации энергии СВЧ-электромагнитного поля // Радиотехника. 2018. № 8. С. 187-191.
4. Шалаев П.Д. Лампа бегущей волны для линейных усилителей СВЧ мощности спутников связи // Патент РФ на изобретение №2706644. Н01J 25/34 (2006.01) Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 19 ноября 2019 г. Опубликовано 19.11.2019 г. Бюл. № 32. Заявка № 2019109342. Приоритет изобретения 29 марта 2019 г.
5. Царев В.А., Шалаев П.Д. Лампа бегущей волны линеаризованного усилителя СВЧ-мощности // Патент РФ на изобретение №2738394. Н01J 25/34 (2020.08) Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 11 декабря 2020 г. Опубликовано 11.12.2020 г. Бюл. № 35. Заявка № 2020114964. Приоритет изобретения 24 апреля 2020 г.