

## Нелинейное подавление сигналов в лампе бегущей волны

© С.В. Гришин, **Б.С. Дмитриев**, Ф.П. Разуваев, В.Н. Скороходов, В.Н. Титов, **Д.И. Трубецков**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410012 Саратов, Россия  
e-mail: sergrsh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 28 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 18 июня 2021 г.

Принято к публикации 20 июня 2021 г.

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследований прохождения монохроматического и импульсно-модулированного сверхвысокочастотных сигналов через лампу бегущей волны, работающую в режиме нелинейного подавления. Установлено, что в зависимости от величины ускоряющего напряжения и тока пучка лампа может работать либо как насыщающийся поглотитель, либо как ограничитель мощности. В первом случае максимальный уровень подавления сигнала, соответствующий срыву Компфнера, реализуется в линейном режиме, а во втором случае — в нелинейном режиме, при определенной мощности входного сигнала. Показано, что в случае максимального подавления на фронте радиоимпульсов формируется короткий импульс. В режиме нелинейного срыва Компфнера длительность такого импульса уменьшается с увеличением мощности входного радиоимпульса. Результаты расчета, полученные по нелинейной нестационарной теории лампы бегущей волны, находятся в хорошем качественном соответствии с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, срыв Компфнера, насыщающийся поглотитель, ограничитель мощности.

DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51543.129-21

### Введение

Лампа бегущей волны (ЛБВ) — является первым широкополосным вакуумным усилителем, работающим в микроволновом диапазоне, который был разработан А. Гаевым и Р. Компфнером независимо друг от друга [1]. Работа ЛБВ как усилителя сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала реализуется, как правило, при положительных значениях параметра несинхронности, когда скорость электронов немного превосходит фазовую скорость электромагнитной волны, распространяющейся вдоль замедляющей системы (ЗС). В этом случае электронные сгустки формируются в области тормозящих фаз поля, что обеспечивает передачу энергии от потока электронов бегущей электромагнитной волне и ее усиление. Однако в ЛБВ возможно реализовать и другую ситуацию, когда при определенных значениях тока пучка и ускоряющего напряжения скорость электронов становится немного меньше фазовой скорости электромагнитной волны. Это приводит к тому, что при отрицательных значениях параметра несинхронности электроны оказываются в области ускоряющих фаз поля, и энергия электромагнитной волны тратится на их ускорение. В этом случае ЛБВ работает уже не как усилитель, а как подавитель СВЧ сигнала.

Режим бесконечного затухания или полного подавления СВЧ сигнала реализуется при некоторых строго определенных значениях потенциала и тока пучка ЛБВ, которые получили в литературе название условий срыва Компфнера (*Kompfner dip conditions*) [2–4]. В отсут-

ствии затухания и в пренебрежении пространственным зарядом упомянутые выше условия имеют следующий вид:  $CN = 0.315$ ,  $\Phi_0 = \pi$  (где  $C = [I_d R_c / (4U_d)]^{1/3}$  — параметр усиления Пирса,  $I_d$  и  $U_d$  — ток и напряжение пучка, соответствующие бесконечному затуханию волны,  $R_c$  — сопротивление связи пучка и волны,  $N$  — электрическая длина пространства взаимодействия и  $\Phi_0$  — невозмущенный относительный угол пролета электронов) [4]. ЛБВ подавитель, работающий в режиме срыва Компфнера, использовался в основном для определения сопротивления связи и дисперсии ЗС [5]. Преимущество использования срыва Компфнера для определения электродинамических характеристик ЗС связаны прежде всего с тем, что условия бесконечного затухания СВЧ сигнала очень чувствительны к величине потенциала и тока пучка. Малейшее отклонение от их критических значений ( $I_d$  и  $U_d$ ) приводит к появлению СВЧ сигнала на выходе ЛБВ. Кроме того, для определения указанных выше электродинамических характеристик ЗС можно не учитывать согласование ЗС с подводящим трактом, так как явление срыва Компфнера объясняется интерференцией электромагнитной волны, подаваемой на вход ЛБВ, и волны, наводимой в системе электронным потоком. Явление бесконечного затухания волны использовалось также в параметрических приборах для перекачки энергии от структуры к пучку. Устройство со спиральной замедляющей системой, применяемое для этих целей, получило название преобразователя Компфнера [6,7]. Однако во всех перечисленных выше работах исследования проводились в линейном режиме ЛБВ.

Первые теоретические и экспериментальные исследования условий бесконечного затухания СВЧ сигнала в нелинейном режиме работы ЛБВ подавителя были проведены в Саратовском государственном университете в середине 60-х годов прошлого столетия [8,9]. На основе аппроксимации уравнений линейной теории, полученных методом последовательных приближений, в нелинейную область были получены приближенные условия полного подавления сигнала в нелинейном режиме работы ЛБВ. Экспериментальные исследования влияния уровня входной мощности ( $P_{in}$ ) на условия бесконечного затухания сигнала были проведены на ЛБВ дециметрового диапазона со спиральной ЗС и заключались в изучении зависимостей  $I_d$ ,  $U_d$  от  $P_{in}$  и сопоставления этих зависимостей с рассчитанными по нелинейной одномерной модели в отсутствие затухания и в пренебрежении пространственным зарядом. В [10] сообщалось об использовании режима полного подавления СВЧ сигнала для создания разнообразных конструкций широкополосных ЛБВ-вентилей, которые использовались в усилительных цепочках на входе мощных прозрачных ЛБВ усилителей для подавления отраженного от их входа СВЧ сигнала.

Интерес к нелинейному режиму работы ЛБВ, работающей в условиях срыва Компфнера, возобновился в последние годы, когда группой российских ученых было предложено использовать ЛБВ подавитель в качестве насыщающегося поглотителя, у которого, по аналогии с оптическими системами, величина подавления сигнала зависит от уровня его мощности (интенсивности) [11–14]. Было установлено, что для монохроматического СВЧ сигнала большого уровня мощности подавление является минимальным. Оно возрастает с уменьшением уровня  $P_{in}$  и насыщается, достигая максимального значения для СВЧ сигнала малого уровня мощности. В теоретических работах [11–13] на основе разработанных численных нелинейных моделей была продемонстрирована возможность использования компфнеровских поглотителей в цепи обратной связи кольцевого автогенератора для формирования мощных ультракоротких импульсов. Экспериментальная реализация пассивной синхронизации мод с помощью ЛБВ-подавителя, работающего в режиме срыва Компфнера, была осуществлена в работе [14].

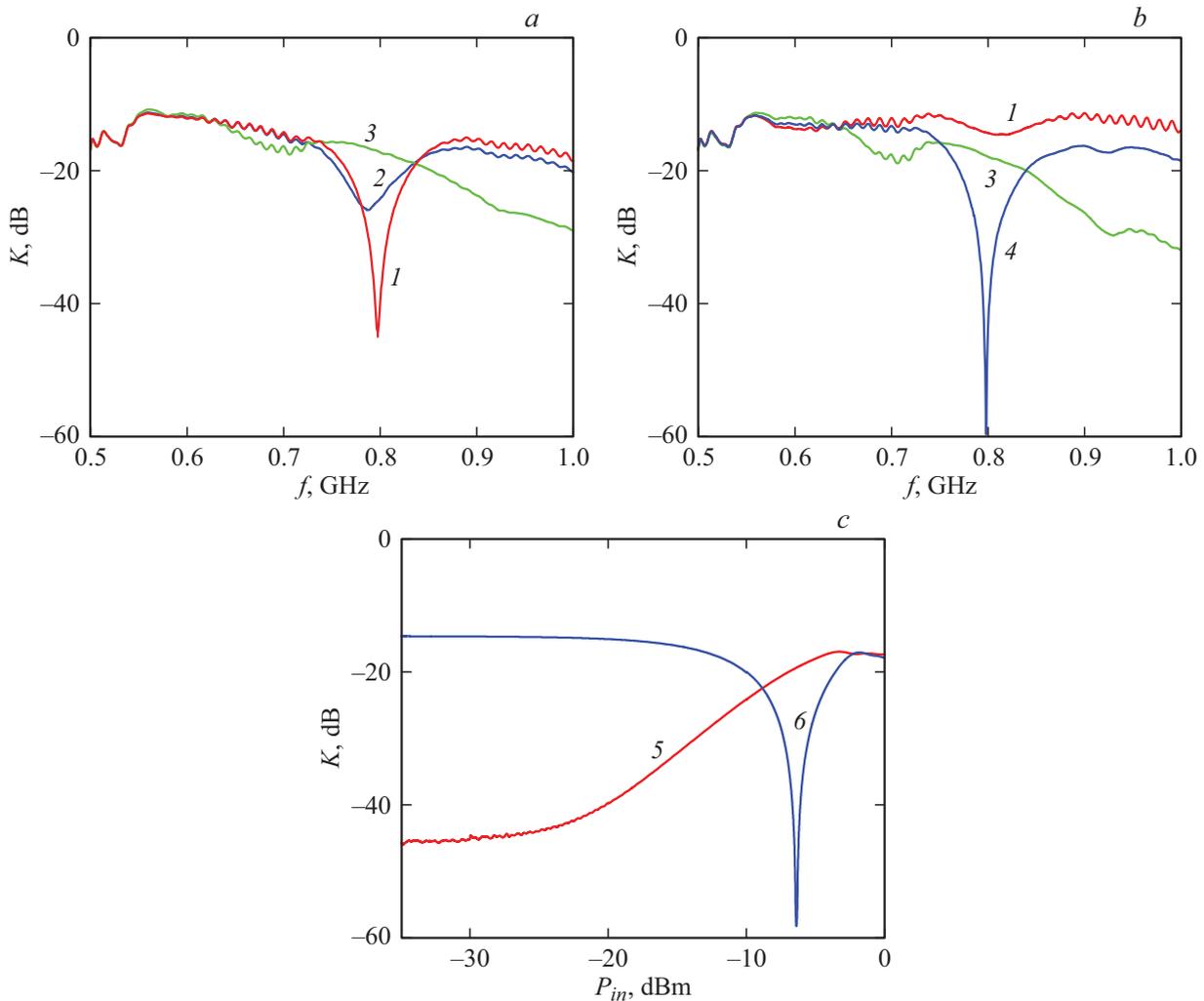
Описанные выше импульсные режимы были получены, когда максимальный уровень подавления монохроматического СВЧ сигнала достигался в линейном режиме работы ЛБВ-подавителя. В настоящей работе демонстрируется возможность формирования коротких импульсов с длительностями порядка нескольких наносекунд вне кольцевой генераторной схемы, когда максимальный уровень подавления сигнала реализуется либо в линейном, либо в нелинейном режиме работы ЛБВ подавителя.

## 1. Экспериментальные результаты

### 1.1. Нелинейное подавление монохроматического СВЧ сигнала

Эксперименты проводились с прозрачной ЛБВ, выполненной на основе регулярной спиральной ЗС без поглотителя. Лампа работала в дециметровом диапазоне на частотах от 600 до 1130 МГц. Коэффициент усиления лампы достигал значения  $\sim 20$  dB на частоте 800 МГц при токе пучка  $I_0 = 60 \mu\text{A}$  и ускоряющем напряжении  $U_0 = 117$  В. Длина однородного участка спирали ЗС — 186 мм, шаг спирали — 0.27 мм, диаметр витка спирали — 3.6 мм, диаметр провода спирали — 0.2 мм, материал спирали — молибден. Для измерения S-параметров ЛБВ использовался анализатор цепей, обеспечивающий изменение уровня мощности монохроматического СВЧ сигнала на входе ЛБВ в диапазоне от  $-30$  до 0 dBm. Измерения модуля коэффициента передачи  $K$  проводились как в режиме свипирования частоты  $f$  при фиксированном значении входной мощности  $P_{in}$ , так и в режиме свипирования входной мощности на фиксированной частоте.

На рис. 1 приведены АЧХ ЛБВ-подавителя, полученные при условии, что центральная частота полосы подавления  $f_0$  находится в центральной части рабочей полосы частот лампы. Измерения проводились для разных значений тока пучка, ускоряющего напряжения и входной мощности. Из представленных на рис. 1, а результатов следует, что при малых уровнях  $P_{in}$  на АЧХ лампы присутствует относительно узкий провал, на центральной частоте которого  $f_0 \cong 800$  МГц наблюдается практически полное подавление монохроматического СВЧ сигнала. При выбранных значениях тока пучка и ускоряющего напряжения электронный пучок попадает в область максимального ускоряющего поля, забирая практически всю энергию от электромагнитной волны. В этом случае реализуется режим срыва Компфнера [2–4]. Увеличение уровня  $P_{in}$  приводит к уменьшению уровня подавления сигнала на частоте  $f_0$ , что обусловлено уменьшением скорости электронов из-за их торможения бегущей волной. В этом случае электроны начинают уходить из области максимального ускоряющего поля, не отбирая всю энергию от электромагнитной волны. Как следует из результатов, представленных на рис. 1, с (кривая 5), на зависимости модуля коэффициента передачи от входной мощности  $K(P_{in})$  наблюдаются два участка, один из которых соответствует линейному режиму работы ЛБВ, а другой — ее нелинейному режиму работы. Нелинейный участок начинается при  $P_{th0} = -26.3$  dBm, когда зависимость  $K(P_{in})$  отклоняется от линейной на 1 dB. Возникновение нелинейного участка обусловлено уменьшением скорости электронов с ростом амплитуды электромагнитной волны. При  $P_{in} > P_{th0}$  коэффициент передачи возрастает, а при достаточно больших уровнях входной мощно-



**Рис. 1.** *a, b* — АЧХ ЛБВ подавителя, измеренные в режиме срыва Компфнера ( $I_0 = 3 \mu\text{A}$ ,  $U_0 = 108 \text{V}$ ) (*a*) и в режиме нелинейного срыва Компфнера ( $I_0 = 10 \mu\text{A}$ ,  $U_0 = 107 \text{V}$ ) (*b*), при разных уровнях входной мощности  $P_{in}$ :  $-30 \text{ dBm}$  (кривая 1),  $-10 \text{ dBm}$  (кривая 2),  $0 \text{ dBm}$  (кривая 3)  $-6.4 \text{ dBm}$  (кривая 4); зависимости модуля коэффициента передачи  $K$  от мощности сигнала на выходе ЛБВ-подавителя  $P_{in}$ , измеренные на частоте  $f_0$  в режиме срыва Компфнера (кривая 5), и в режиме нелинейного срыва Компфнера (кривая 6) (*c*).

сти достигает максимального значения. В этом случае ЛБВ-подавитель работает как насыщающийся поглотитель [11,14].

При других значениях тока пучка и ускоряющего напряжения (рис. 1, *b*) ситуация меняется кардинальным образом. Здесь при малых уровнях  $P_{in}$  на АЧХ лампы не наблюдается полного подавления монохроматического СВЧ сигнала. Практически полное подавление сигнала достигается на частоте  $f_0$  только в нелинейном режиме при значении входной мощности  $P_{in} = -6.4 \text{ dBm}$ . Однако при уровнях мощности  $P_{in} > -6.4 \text{ dBm}$  оно опять уменьшается. Таким образом, при  $P_{in} = -6.4 \text{ dBm}$  наблюдается режим практически полного подавления монохроматического сигнала, аналогичный классическому срыву Компфнера, с той лишь разницей, что наибольшее подавление наблюдается на частоте  $f_0$  не только за счет выбора соответствующих значений тока пучка и

ускоряющего напряжения, но и за счет выбора амплитуды бегущей электромагнитной волны. Как следует из результатов, представленных на рис. 1, *c* (кривая 6), на зависимости  $K(P_{in})$  также присутствуют два участка: линейный и нелинейный. Однако, в отличие от результатов, представленных на рис. 1, *c* (кривая 5), здесь имеются два характерных уровня мощности, один из которых  $P_{th1} = -16.7 \text{ dBm}$  соответствует началу нелинейного режима работы лампы, а другой  $P_{th2} = -6.4 \text{ dBm}$  соответствует максимальному уровню подавления сигнала в нелинейном режиме. Если предположить, что, как и в предыдущем случае, основное влияние на скорость движения электронов в нелинейном режиме оказывает амплитуда бегущей волны, то на качественном уровне получение максимального уровня подавления сигнала при определенном уровне его входной мощности можно трактовать следующим образом. В линейном режиме,

когда  $P_{in} < P_{th1}$ , электронный пучок при выбранных значениях тока и напряжения не находится долгое время в области максимального ускоряющего поля. Увеличение мощности входного сигнала приводит к формированию электронного сгустка, который находится в ускоряющем поле существенную часть времени движения вдоль ЗС. Таким образом, в интервале значений входной мощности  $P_{th1} < P_{in} < P_{th2}$  нарастание амплитуды бегущей волны приводит к ускорению электронов, которые при взаимодействии с бегущей волной приобретают большую энергию. Это обуславливает ограничение мощности СВЧ сигнала на выходе ЛБВ подавителя. При  $P_{in} = P_{th2}$  сформировавшийся электронный сгусток находится долгое время в области максимального ускоряющего поля, забирая практически всю энергию от электромагнитной волны. При  $P_{in} > P_{th2}$  мощность СВЧ сигнала на выходе ЛБВ подавителя начинает возрастать из-за того, что электронный сгусток находится теперь долгое время в области тормозящего поля, отдавая свою энергию электромагнитной волне. Однако на обоих нелинейных участках зависимости  $K(P_{in})$  значения модуля коэффициента передачи не превышают значений, полученных в линейном режиме. Таким образом, ЛБВ подавитель при выбранных значениях тока пучка, ускоряющего напряжения и мощности входного СВЧ сигнала работает как ограничитель мощности.

Необходимо отметить, что в эксперименте для выбранных значений тока и напряжения пучка пороговые уровни мощности  $P_{th0}$  и  $P_{th1}$ , соответствующие началу нелинейного режима работы лампы в двух разных режимах подавления, отличаются друг от друга на величину  $\sim 10$  dB. Кроме того, как следует из результатов, представленных на рис. 1, *a, b*, наибольшие уровни подавления СВЧ сигнала удается получить в режиме нелинейного срыва Компфнера, хотя в теории бесконечное затухание СВЧ сигнала должно наблюдаться и в линейном режиме. Данный факт обусловлен тем, что при проведении экспериментальных исследований более высокие уровни подавления сигнала, наблюдаемые в режиме нелинейного срыва Компфнера, обеспечиваются за счет более плавной перестройки входной мощности сигнала, которая изменялась с шагом 0.1 dB. В режиме срыва Компфнера изменение тока пучка осуществлялось с шагом  $1 \mu\text{A}$ , что было недостаточно для получения большего уровня подавления сигнала.

## 1.2. Нелинейное подавление импульсно-модулированного СВЧ сигнала

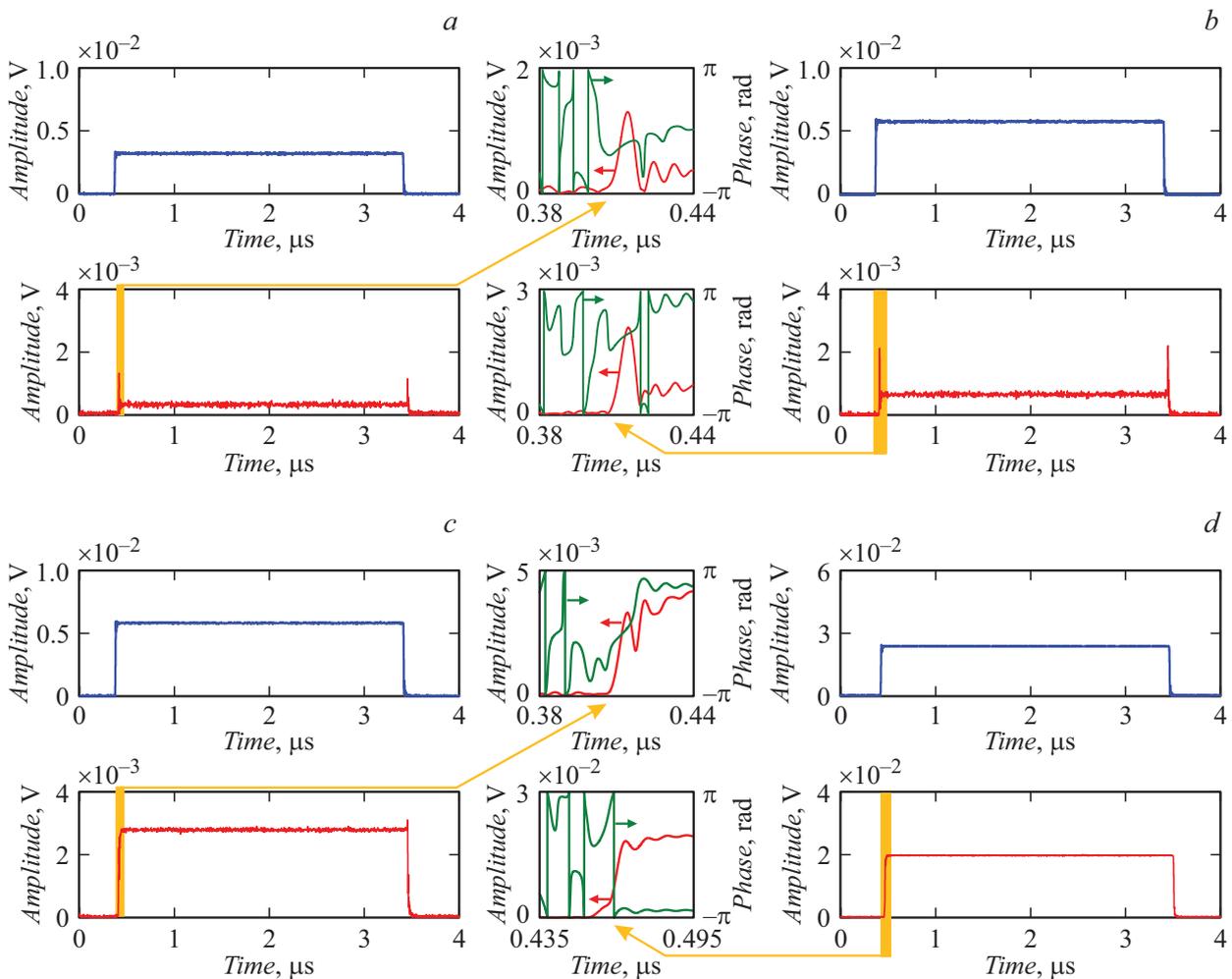
Были проведены экспериментальные исследования прохождения импульсно-модулированного (ИМ) СВЧ сигнала через ЛБВ подавитель. Частота несущей ИМ СВЧ сигнала соответствовала частоте  $f_0$ , на которой наблюдалось практически полное подавление монохроматического СВЧ сигнала либо в линейном режиме (срыв Компфнера), либо в нелинейном режиме (нелинейный срыв Компфнера). ИМ СВЧ сигнал, посту-

павший на вход ЛБВ-подавителя, представлял собой периодическую последовательность радиоимпульсов с несущей частотой  $f_0$ , длительностью  $3 \mu\text{s}$  и скважностью  $q = 2$ . Длительность радиоимпульсов выбиралась, исходя из того, чтобы спектр ИМ СВЧ сигнала был относительно узкополосным и находился в полосе частот срыва Компфнера. Для измерения временных рядов использовался осциллограф реального времени с полосой пропускания 10 GHz и частотой дискретизации 20 Gs/s.

На рис. 2 и 3 приведены огибающие радиоимпульсов, измеренные как на входе, так и на выходе ЛБВ, работающей в одном из двух режимов подавления. Из представленных результатов следует, что в обоих режимах, когда подавление монохроматического СВЧ сигнала является максимальным, основная часть радиоимпульса практически полностью подавляется (рис. 2, *a* и 3, *b*).<sup>1</sup> Однако на фронте и срезе огибающей радиоимпульса остаются „выплески“ в виде относительно коротких импульсов огибающей, длительность которых является намного меньше длительности исходного радиоимпульса. Необходимо отметить, что аналогичное поведение огибающей радиоимпульса наблюдается при прохождении последнего через режекторный фильтр, свойствами которого в данном случае обладает ЛБВ-подавитель, работающий либо в режиме срыва Компфнера (рис. 2), либо в режиме нелинейного срыва Компфнера (рис. 3). В первом случае, при  $P_p \sim P_{th0}$  (рис. 2, *a*), длительность короткого импульса огибающей, находящегося на фронте исходного радиоимпульса, имеет величину  $\sim 6$  ns, которая измерена по половинному уровню от максимального значения амплитуды. Во втором случае, при  $P_p = P_{th2}$  (рис. 3, *b*), длительность короткого импульса огибающей имеет величину  $\sim 11$  ns, которая практически в два раза больше той, которая была получена в условиях срыва Компфнера.

Дальнейшее увеличение пиковой мощности входных радиоимпульсов приводит к отличному поведению коротких импульсов огибающей для двух рассматриваемых режимов нелинейного подавления. Как следует из результатов, представленных на рис. 2, *b-d*, в режиме срыва Компфнера увеличение пиковой мощности входных радиоимпульсов приводит к уменьшению уровня подавления основной части выходного радиоимпульса, амплитуда которой растет быстрее пиковых амплитуд коротких импульсов огибающей. Увеличение пиковой мощности входного радиоимпульса в три раза (рис. 2, *b*) приводит к небольшому увеличению длительности короткого импульса огибающей на фронте выходного радиоимпульса до величины  $\sim 7$  ns. Увеличение пиковой мощности входного радиоимпульса практически

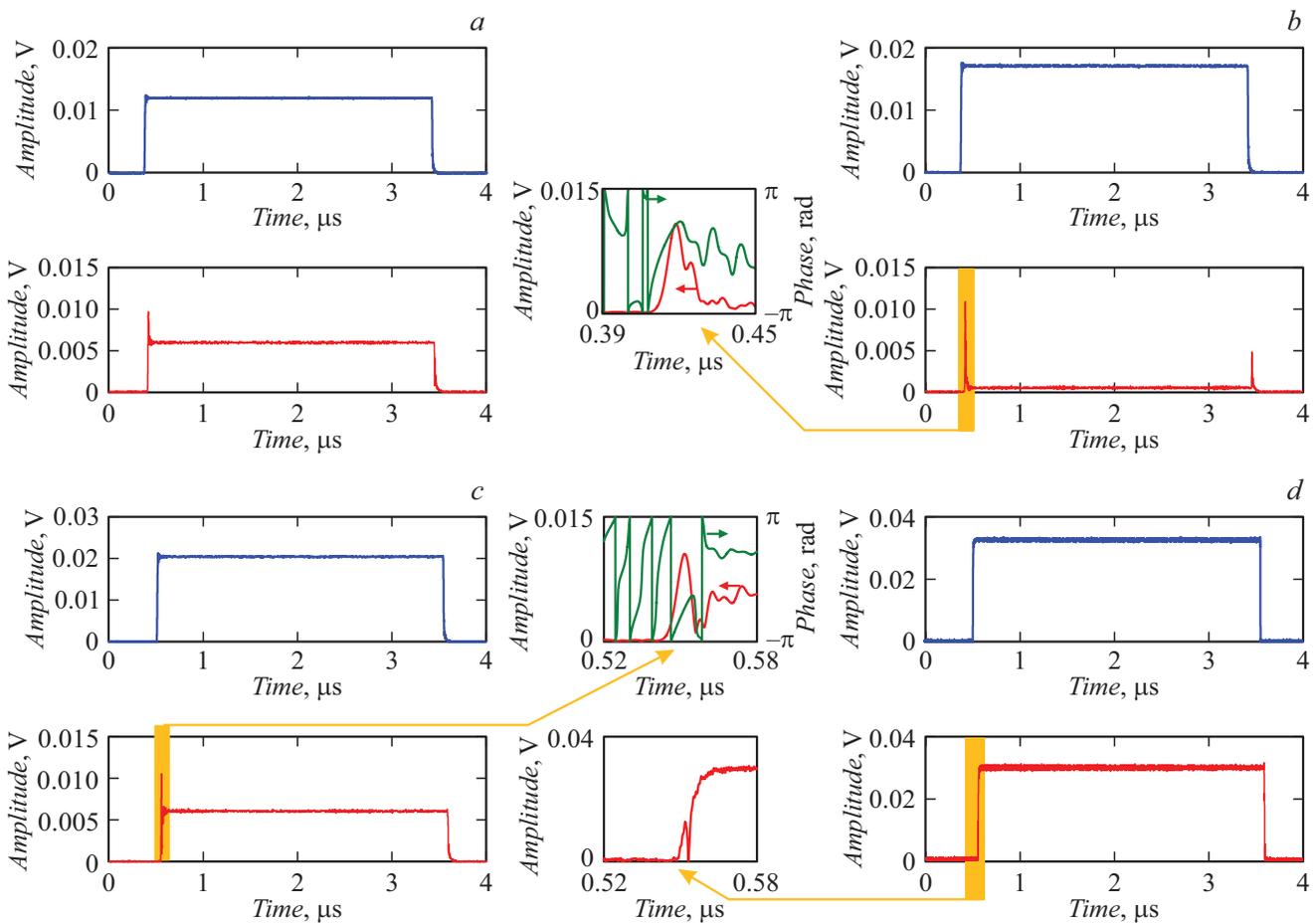
<sup>1</sup> На рис. 2, *a* результаты получены при  $P_p > P_{th0}$ , так как при  $P_p \leq P_{th0}$  радиоимпульсы, проходя через ЛБВ подавитель и испытывая сильное ослабление, не регистрируются на экране осциллографа. Однако, как следует из результатов, представленных на рис. 1, *c*, при  $P_p = -20$  dBm уровень подавления сигнала все еще остается близким к уровню максимального компфнеровского подавления.



**Рис. 2.** Огибающие радиоимпульса на входе (верхние фрагменты рисунков (a)–(c)) и выходе (нижние фрагменты рисунков (a)–(c)) ЛБВ подавителя, работающего как насыщающийся поглотитель при различных значениях пиковой мощности  $P_p$ :  $-20$  (a),  $-15$  (b),  $-9$  (c) и  $-3$  dBm (d). На вставках показаны увеличенные фрагменты амплитудных и фазовых профилей коротких импульсов огибающей. Измерения проведены при  $U_0 = 108$  В и  $I_0 = 3$   $\mu$ А.

в тринадцать раз (рис. 2, c) обуславливает слияние коротких „выплесков“ с основной частью выходного радиоимпульса. При уровнях пиковой мощности, соответствующих максимальному коэффициенту передачи ЛБВ подавителя (рис. 2, d и 1, c), короткие импульсы огибающей полностью сливаются с основной частью выходного радиоимпульса и становятся неразличимыми на его фоне. В то же самое время, как следует из результатов, представленных на рис. 3, c, d, в режиме нелинейного срыва Компфнера увеличение пиковой мощности входного радиоимпульса не приводит к слиянию „выплесков“ с основной частью выходного радиоимпульса. Напротив, с увеличением пиковой мощности длительность коротких импульсов огибающей уменьшается, т.е. короткие импульсы огибающей испытывают своего рода компрессию при  $P_p > P_{th2}$ . Так, при превышении пиковой мощности входного радиоимпульса над порогом  $P_{th2}$  в 1.4 раза (рис. 3, c) длительность короткого импульса огибающей, находя-

щегося на фронте выходного радиоимпульса, уменьшается до 6.2 ns, а при превышении пиковой мощности входного радиоимпульса над порогом  $P_{th2}$  в 4 раза (рис. 3, d) длительность короткого импульса огибающей уменьшается до 2.7 ns. Отсюда следует, что длительность коротких импульсов огибающей практически линейно зависит от уровня пиковой мощности входного радиоимпульса. При этом, как следует из результатов, представленных на рис. 3, c, фаза внутри короткого импульса огибающей имеет практически линейное нарастание во времени, что характерно для импульсных сигналов с линейно-частотной модуляцией [15]. Отметим, что длительность коротких импульсов огибающей определяется временем переключения ЛБВ из линейного режима работы в нелинейный режим. Как показывает эксперимент, это время уменьшается с увеличением мощности входного сигнала, так как уменьшается длительность коротких импульсов огибающей.



**Рис. 3.** Огибающие радиоимпульса на входе (верхние фрагменты рисунков (a)–(c)) и выходе (нижние фрагменты рисунков (a)–(c)) ЛБВ подавителя, работающего как ограничитель мощности при различных значениях пиковой мощности  $P_p$ :  $-9.4$  (a),  $-6.4$  (b),  $-4.9$  (c) и  $-0.4$  dBm (d). На вставках к рисункам (b–d) показаны увеличенные фрагменты амплитудных и фазовых профилей коротких импульсов огибающей. Измерения проведены при значениях  $U_0 = 107$  В и  $I_0 = 10$   $\mu$ А.

Для сравнения были проведены экспериментальные исследования прохождения радиоимпульсов через данную ЛБВ, которая работала в режиме нелинейного усиления ИМ СВЧ сигнала. Исследования были выполнены при схожих значениях ускоряющего напряжения лампы, а также пиковой мощности и длительности входных радиоимпульсов. Установлено, что в режиме нелинейного усиления основная часть радиоимпульса также начинает подавляться, а на его фронте и срезе также образуются короткие „выплески“. Однако в данном случае это происходит из-за ограничения коэффициента усиления лампы, что не приводит к практически полному подавлению основной части выходного радиоимпульса и к отделению от нее „выплесков“ в виде коротких импульсов огибающей. С физической точки зрения это обусловлено тем, что в режиме нелинейного усиления трудно добиться практически полного подавления СВЧ сигнала за счет изменения амплитуды бегущей волны, так как электроны даже при больших уровнях мощности входного СВЧ сигнала по-прежнему находятся в тормозящей фазе поля. Наибольшее ускорение электронного

пучка с помощью варьирования амплитуды бегущей волны достигается только в режиме нелинейного срыва Компфнера, когда электроны долгое время находятся в ускоряющей фазе поля при любых уровнях мощности входного сигнала. Именно в этом случае и происходит формирование коротких импульсов огибающей на фронте и срезе выходного радиоимпульса.

## 2. Нестационарная нелинейная модель ЛБВ подавителя

### 2.1. Основные уравнения

Для численного моделирования нестационарных процессов воспользуемся традиционной численной моделью, построенной на основе нестационарной нелинейной теории [16,17]. Ранее подобный подход применялся, в частности, для исследования сложной динамики ЛБВ генератора миллиметрового диапазона с запаздывающей обратной связью и замедляющей системой типа „петляющий волновод“ [18]. Уравнения, описывающие

взаимодействие электронного пучка с электромагнитной волной, имеют следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} = -L^2 \left( 1 + \frac{1}{2\pi N} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right)^2 \times \operatorname{Re} \left[ F \exp(i\theta) + iq \sum_m \frac{R_m^2 I_m \exp(im\theta)}{m} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + dF = -LI_1, \quad (2)$$

где  $\theta = (\omega_0 t - k_0 x)$  — фаза электрона в поле волны,  $\omega_0$  — частота, на которой скорость электронного пучка  $v_0$  равна фазовой скорости электромагнитной волны  $v_{ph}$ ,  $k_0 = \omega_0/v_0$ ,  $\xi = x/l$  — безразмерная координата,  $l$  — длина пространства взаимодействия,  $L = 2\pi CN$  — безразмерный параметр, имеющий смысл нормированной длины пространства взаимодействия,  $C = [I_0 R_c / (4U_0)]^{1/3}$ ,  $I_0$  и  $U_0$  — ток и напряжение пучка,  $N = k_0 l / (2\pi)$  — электрическая длина пространства взаимодействия,  $q \equiv 4QC = (\omega_p / \omega_0 C)^2$  — параметр пространственного заряда,  $\omega_p$  — плазменная частота,  $R_m$  — коэффициент редукции плазменной частоты, учитывающий поперечные размеры пролетного канала,  $F$  — безразмерная нормированная амплитуда сигнала,  $\tau = (t - x/v_0) / (l/v_g - l/v_0)$  — безразмерное время,  $v_g = |\partial \omega / \partial k|$  — групповая скорость волны на частоте  $\omega_0$ ,  $d$  — параметр затухания,  $I_1$  — комплексная амплитуда первой гармоники сгруппированного тока, нормированная на постоянный ток пучка  $I_0$ ,  $I_m$  —  $m$ -я гармоника сгруппированного тока, нормированная на постоянный ток пучка  $I_0$ :

$$I_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-im\theta) d\theta, \quad (3)$$

где  $\theta_0 = \theta(x=0)$  — начальная фаза ( $\theta_0 \in [0; 2\pi]$ ). Сформулированные выше уравнения (1)–(3) справедливы только в случае, когда групповая скорость волны меньше ее фазовой скорости.<sup>2</sup>

Уравнения (1)–(3), описывающие динамику системы „электронный поток–электромагнитная волна“, следует дополнить граничными и начальными условиями в виде

$$\theta|_{\xi=0} = \theta_0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0, \\ F|_{\xi=0} = F_{in}, \quad F|_{\tau=0} = F^0(\xi). \quad (4)$$

Условия (4) означают, что на вход волноведущей структуры поступает невозмущенный электронный поток, не модулированный ни по скорости, ни по плотности, а амплитуда поля электромагнитной волны на левой границе системы задана усиленным сигналом.

Для численного решения нелинейной нестационарной модели в виде уравнений (1)–(4) использовалась модификация хорошо зарекомендовавшего себя конечно-разностного метода второго порядка точности [19,20]. Выбор данного подхода обусловлен тем, что он широко применяется для теоретического анализа нестационарных процессов в приборах О-типа и имеет аналогичные управляющие параметры.

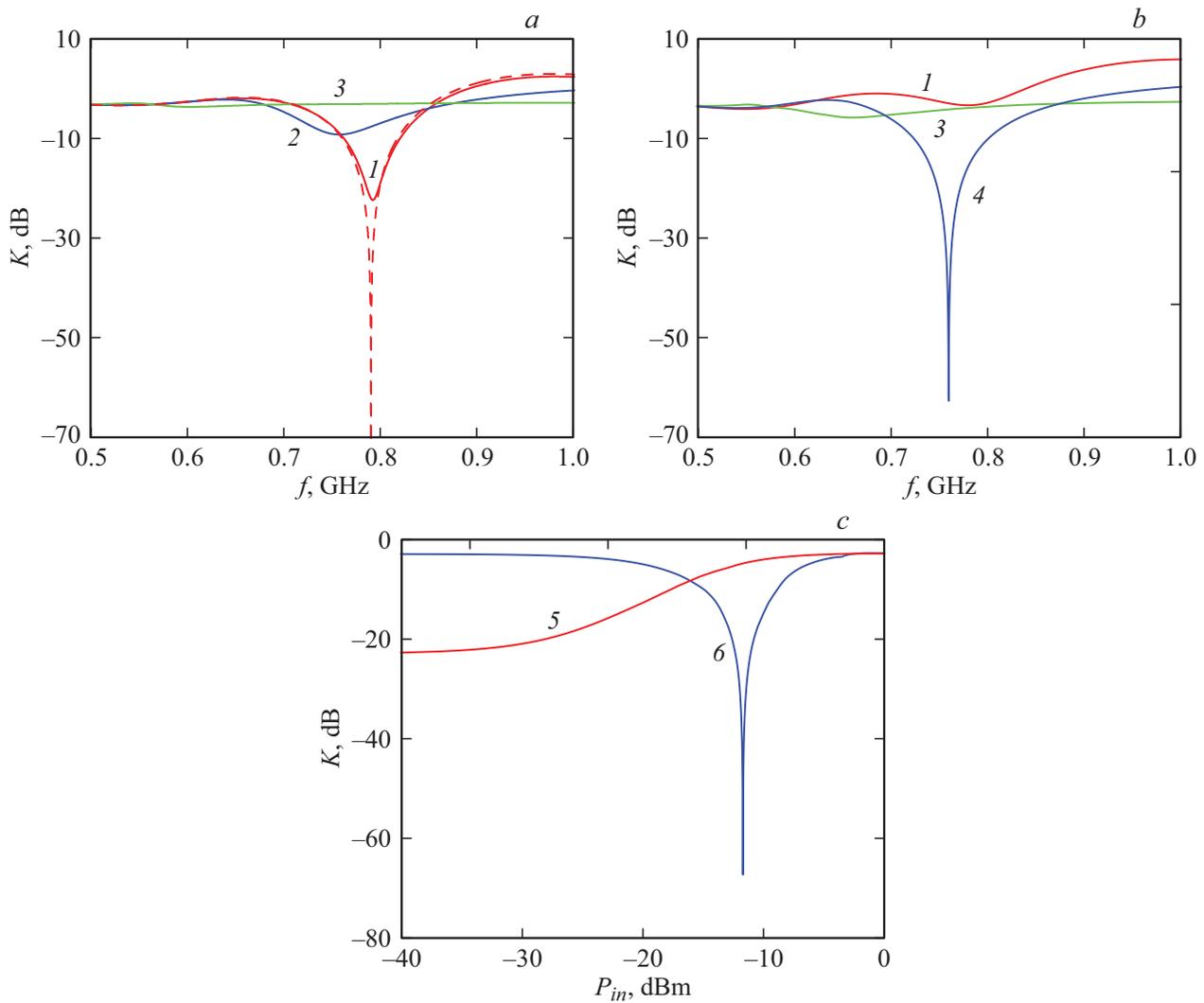
## 2.2. Результаты численного моделирования

### 2.2.1. Нелинейное подавление монохроматического сигнала

Нелинейное подавление монохроматического сигнала в ЛБВ исследовалось с использованием одномерной стационарной многочастотной нелинейной теории ЛБВ [21]. Электродинамические параметры спиральной ЗС рассчитывались по методике, описанной в [22]. Моделирование нелинейного подавления сигнала в стационарном режиме проводилось с использованием модуля TWT1D из программы TWT3D [23]. При этом величины, соответствующие экспериментальным параметрам, а также рассчитанные выходные характеристики лампы представлялись непосредственно в размерном виде. Кроме того, были определены значения безразмерных параметров лампы, которые использовались в дальнейшем в нелинейной нестационарной модели.

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования зависимостей коэффициента передачи ЛБВ подавителя как от частоты, так и от уровня мощности входного сигнала. Моделирование проводилось для двух значений тока пучка и ускоряющего напряжения, соответствующих режиму срыва Компфнера (рис. 4, а, с) и режиму нелинейного срыва Компфнера (рис. 4, б, с). Из представленных на рис. 4, а результатов расчета следует, что при малых уровнях входной мощности сигнала (линейный режим) на зависимости  $K(f)$  наблюдается глубокий провал, центральная частота которого  $f_{01} \cong 792$  МГц близка к частоте  $f_0$ . Увеличение мощности приводит к уменьшению глубины провала, к сдвигу его центральной частоты вниз по частоте и к его полному исчезновению при больших значениях входной мощности. В эксперименте аналогичный эффект наблюдался в режиме срыва Компфнера (рис. 1, а). На рис. 4, а штриховой линией показана АЧХ ЛБВ подавителя, рассчитанная в линейном режиме, но при значении тока пучка, превышающем предыдущее значение на величину  $\sim 0.4 \mu\text{A}$ . Видно, что плавная настройка величины тока пучка в численном моделировании позволяет добиться практически бесконечного уровня подавления сигнала, что не удавалось достичь в эксперименте из-за грубой регулировки величины тока. Необходимо отметить, что расхождение в 5.3 дБ между уровнями входной мощности, при которых в эксперименте и численном моделировании наблюдается максимальный уровень подавления сигнала, связано, по всей видимости, с неидеальностью

<sup>2</sup> Это условие выполняется в рабочем режиме исследуемой ЛБВ.

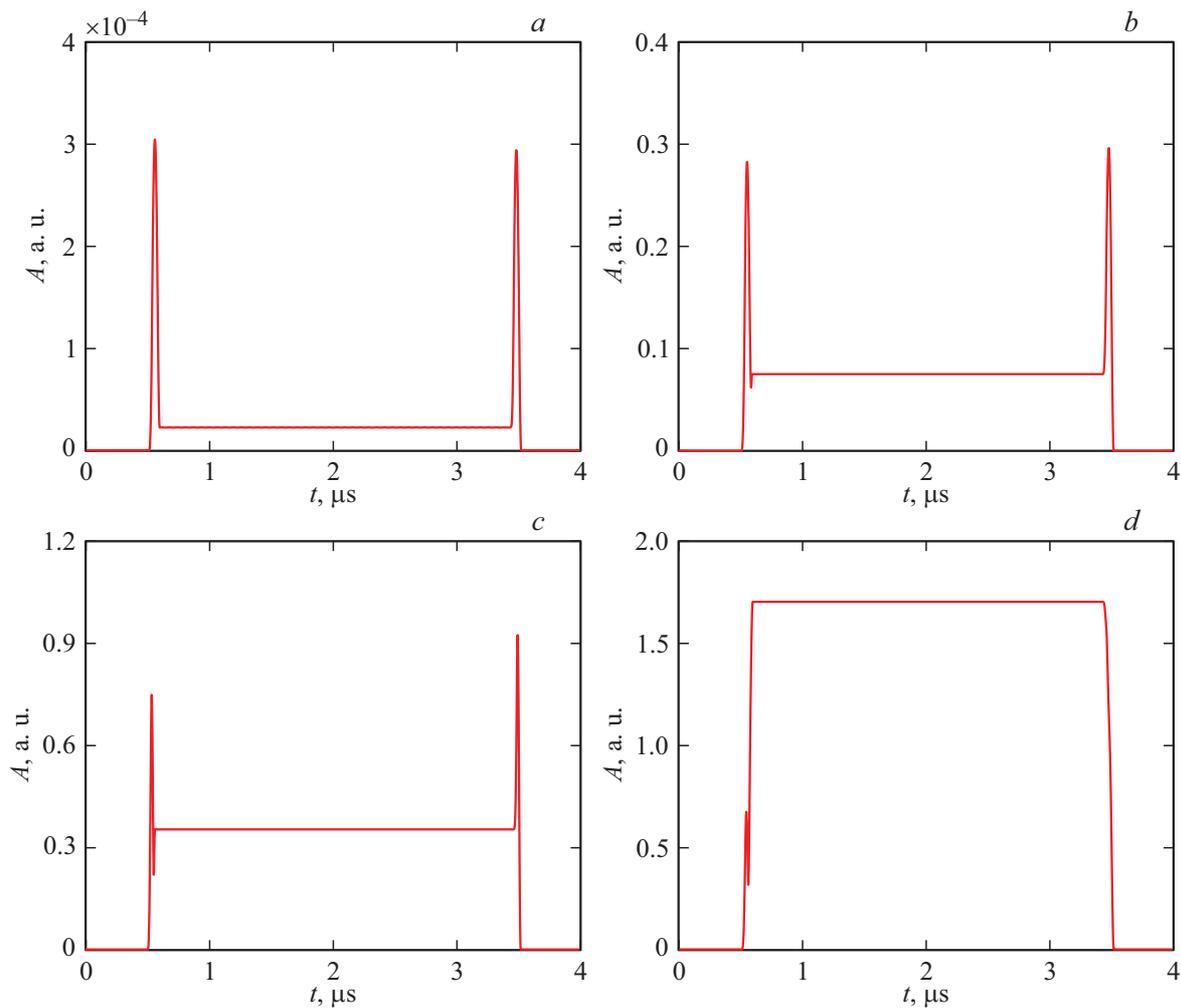


**Рис. 4.** *a, b* — АЧХ ЛБВ, рассчитанные в режиме срыва Компфнера ( $I_0 = 3 \mu\text{A}$ ,  $U_0 = 108 \text{ V}$ ) (*a*) и в режиме нелинейного срыва Компфнера ( $I_0 = 10 \mu\text{A}$ ,  $U_0 = 107 \text{ V}$ ) (*b*), при разных значениях входной мощности  $P_{in}$ :  $-35.3$  (кривая 1),  $-15.3$  (кривая 2),  $-5.3$  (кривая 3) и  $-11.7 \text{ dBm}$  (кривая 4); *c* — зависимости модуля коэффициента передачи  $K$  от мощности сигнала на выходе ЛБВ подавителя  $P_{in}$ , рассчитанные на частоте  $f_{01}$  в режиме срыва Компфнера (кривая 5), и на частоте  $f_{02}$  в режиме нелинейного срыва Компфнера (кривая 6). На *a* штриховой линией показана АЧХ, рассчитанная для  $I_0 = 3.4259807 \mu\text{A}$  и  $U_0 = 108 \text{ V}$ .

моделирования системы ввода/вывода энергии лампы из-за отсутствия о ней точной технической информации.

На рис. 4, *c* (кривая 5) представлена зависимость  $K(P_{in})$ , рассчитанная на частоте  $f_{01}$  в режиме срыва Компфнера, которая демонстрирует изменение коэффициента передачи ЛБВ-подавителя с ростом входной мощности. Видно, что, как и в эксперименте (рис. 1, *c*), при больших уровнях входной мощности коэффициент передачи является максимальным. С уменьшением уровня входной мощности он уменьшается и в линейном режиме становится минимальным (насыщается). Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают тот факт, что в режиме срыва Компфнера при изменении амплитуды электромагнитной волны ЛБВ подавитель работает как насыщающийся поглотитель.

На рис. 4, *b, c* приведены результаты численного моделирования частотных и амплитудных зависимостей модуля коэффициента передачи ЛБВ подавителя, рассчитанные для режима нелинейного срыва Компфнера. Из результатов расчета следует, что при выбранных значениях тока и напряжения пучка режим практически полного подавления сигнала наблюдается уже не в линейном, а в нелинейном режиме, на частоте  $f_{02} \cong 760 \text{ MHz}$ . Здесь, так же как и в эксперименте (рис. 1, *b*), минимальный уровень подавления сигнала наблюдается в линейном режиме, а практически полное подавление сигнала происходит только при определенном уровне мощности. Такое избирательное по мощности подавление сигнала приводит к тому, что ЛБВ-подавитель работает как ограничитель мощности (рис. 4, *c* и 1, *c* — кривые 6).



**Рис. 5.** Рассчитанные по нестационарной нелинейной теории огибающие радиоимпульса на выходе ЛБВ подавителя, работающего как насыщающийся поглотитель при различных значениях пиковой мощности  $P_p$ :  $-80$  (a),  $-20$  (b),  $-15$  (c) и  $-9$  dBm (d).

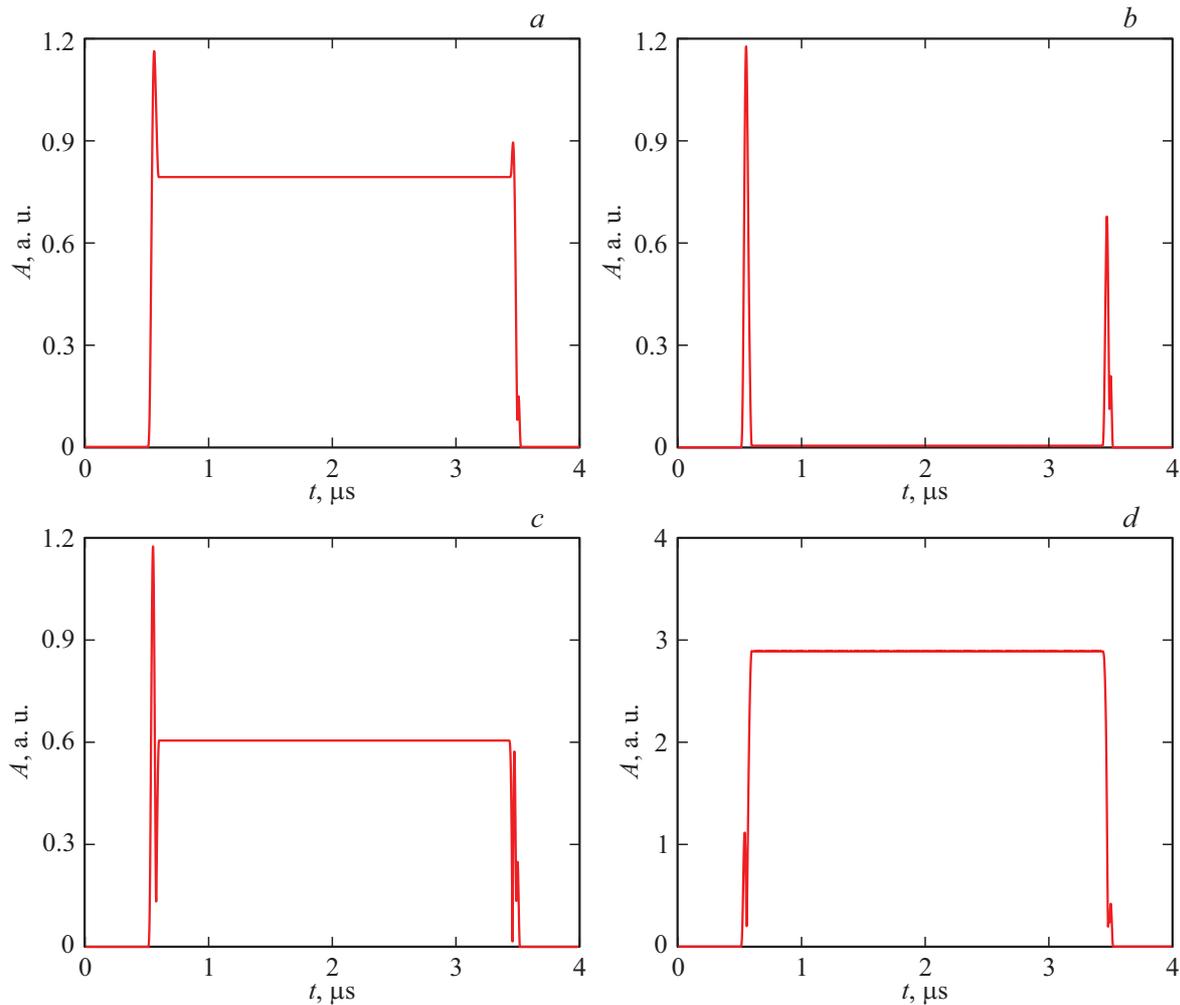
## 2.2.2. Нелинейное подавление импульсного сигнала

Помимо численного моделирования режимов подавления монохроматического сигнала было проведено численное моделирование прохождения импульсного сигнала разного уровня мощности через ЛБВ подавитель, работающий в режиме срыва Компфнера и в режиме нелинейного срыва Компфнера. Для этих целей использовалась нелинейная нестационарная модель в виде уравнений (1)–(4). При моделировании использовался импульс со сглаженным фронтом, характеризующийся временем нарастания порядка  $60$  ns (при пересчете в размерные величины). Безразмерные параметры модели выбирались близкими к экспериментальным данным. Так, электрическая длина пространства взаимодействия бралась равной  $N = 24.15$ , параметр затухания  $d = 0.345$ , а параметр пространственного заряда  $Q = 3.173$ . Моделирование проводилось для двух значений тока пучка и ускоряющего напряжения, которым соответствовали два значения  $CN$ :  $0.3$  — режим

срыва Компфнера и  $0.45$  — режим нелинейного срыва Компфнера. Результаты моделирования нестационарных процессов приведены на рис. 5 и 6.

Из представленных на рис. 5, a результатов следует, что в режиме срыва Компфнера наблюдается практически полное подавление основной части импульса, на фронте и срезе которого остаются „выплески“ малой длительности, что наблюдалось ранее в эксперименте (рис. 2, a). По мере увеличения входной мощности импульса (рис. 5, b, c) подавление его основной части уменьшается, и она начинает подрастать вместе с амплитудами „выплесков“. При достаточно больших уровнях пиковой мощности входного импульса (рис. 5, d) срезы „выплесков“, как и в эксперименте, практически полностью сливаются с основной частью выходного импульса.

В режиме нелинейного срыва Компфнера (рис. 6) численное моделирование демонстрирует схожее с экспериментом поведение выходного импульса при изменении его входной мощности (рис. 3). Как следует из результатов, представленных на рис. 6, a, подавление



**Рис. 6.** Рассчитанные по нестационарной нелинейной теории огибающие радиоимпульса на выходе ЛБВ подавителя, работающего как ограничитель мощности при различных значениях пиковой мощности  $P_p$ :  $-9.4$  (a),  $-6.4$  (b),  $-4.9$  (c) и  $-0.4$  dBm (d).

основной части импульса и образование на его фронте и срезе „выплесков“ в виде коротких импульсов огибающей происходит только при переходе в нелинейный режим. Практически полное подавление основной части импульса и образование коротких импульсов огибающей на его фронте и срезе, как и в эксперименте, регистрируется при уровне входного сигнала, значительно превышающем аналогичный уровень, соответствующий режиму линейного подавления (рис. 6, b). При дальнейшем увеличении входной мощности импульса (рис. 6, c, d), хотя длительность короткого „выплеска“ на фронте импульса уменьшается практически в 1.5 раза, однако срез короткого „выплеска“ начинает сливаться с основной частью выходного импульса. Данный факт, может быть, обусловлен тем, что используемая нелинейная нестационарная модель пригодна, в основном, для моделирования узкополосных процессов, характерный временной масштаб которых ограничен снизу временем распространения огибающей сигнала по ЗС.

## Заключение

В заключение отметим, что в работе продемонстрирована возможность формирования импульсов огибающей наносекундной длительности с помощью ЛБВ подавителя, у которого максимальный уровень затухания СВЧ сигнала наблюдается либо в линейном режиме (классический срыв Комфнера), либо в нелинейном режиме (нелинейный срыв Комфнера). Показано, что наименьшей длительностью обладают импульсы огибающей, полученные в режиме нелинейного срыва Комфнера. В практическом плане полученные результаты могут быть полезными при разработке источников импульсных сигналов для систем связи и локации.

## Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00666).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Д.И. Трубецков, Г.М. Вдовина. УФН, **190** (5), 543 (2020).
- [2] R. Kompfner. J. British IRE, **10** (8–9), 283 (1950).
- [3] H.R. Johnson. PIRE, **7**, 874 (1955).
- [4] В.Н. Шевчик, Д.И. Трубецков. *Аналитические методы расчета в электронике СВЧ* (Сов. радио, М., 1970)
- [5] D.A. Watkins, A.E. Siegman. J. Appl. Phys., **7**, 917 (1953).
- [6] R.W. Gould. IRE Trans., **ED-2** (4), 37 (1955).
- [7] A. Ashkin, W.H. Louisell, C.F. Quate. J. Electronics and Control. **7**, 1 (1959).
- [8] Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков. В сб.: *Сборник докладов секции электроники XXI Всесоюзной научной сессии НТОРЭ* (М., 1965), с. 37.
- [9] Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков. В сб.: *Вопросы электроники сверхвысоких частот* (Сарат. ун-т, Саратов, 1966), в. 2, с. 3.
- [10] Ю.А. Калинин, Ю.А. Григорьев, В.К. Семенов. *Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ.*, **2** (1329), 48 (1988).
- [11] Н.С. Гинзбург, Э.Б. Абубакиров, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев. *Письма в ЖТФ*, **43** (18), 47 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.18.45033.16444b
- [12] N.S. Ginzburg, G.G. Denisov, M.N. Vilkov, A.S. Sergeev, I.V. Zotova, S.V. Samsonov, S.V. Mishakin. *Phys. Plasmas*, **24** (2), 023103 (2017). DOI: 10.1063/1.4975084
- [13] Н.С. Гинзбург, Э.Б. Абубакиров, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев. *ЖТФ*, **88** (8), 1241 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.08.46316.2581
- [14] S.V. Grishin, B.S. Dmitriev, O.I. Moskalenko, V.N. Skorokhodov, Yu.P. Sharaevskii. *Phys. Rev. E*, **98** (2), 022209 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevE.98.022209
- [15] И.С. Гоноровский. *Радиотехнические цепи и сигналы* (Сов. радио, М., 1977)
- [16] Ю.П. Блюх, М.Г. Любарский, В.О. Подобинский, Я.Б. Файнберг. *Физика плазмы*, **20** (7–8), 718 (1994).
- [17] Yu.P. Bliokh, M.G. Liubarskii, V.O. Podobinskii, Ya.B. Fainberg, G.S. Nusinovich, S. Kobayashi, Y. Carmel, V.L. Granatstein. *Phys. Plasmas*, **5** (11), 4061 (1998). DOI: 10.1063/1.873128
- [18] N.M. Ryskin, V.N. Titov, S.T. Han, J.K. So, K.H. Jang, G.S. Park. *Phys. Plasmas*, **11** (3), 1194 (2004). DOI: 10.1063/1.1640622
- [19] Н.С. Гинзбург, С.П. Кузнецов, Т.Н. Федосеева. *Изв. вузов. Радиофизика*, **21** (7), 1037 (1978).
- [20] Б.П. Безручко, Л.В. Булгакова, С.П. Кузнецов, Д.И. Трубецков. В сб. *Лекции по электронике СВЧ и радиофизике (5-я зимняя школа-семинар инженеров)*. Кн. 5. (Сарат. ун-т, Саратов, 1980), с. 25.
- [21] А.М. Кац, Е.М. Ильина, И.А. Манькин. *Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием* (Сов. радио, М., 1975)
- [22] D. Chernin, T.M. Antonsen, B. Levush. *IEEE Trans. on ED*, **46** (7), 1472 (1999). DOI: 10.1109/16.772493
- [23] A.G. Rozhnev, N.M. Ryskin, D.V. Sokolov, D.I. Trubetskov, A.S. Pobedonostsev, S.A. Romyantsev, V.B. Khomitch. *Fifth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)* (Monterey, 2004), p. 144. DOI: 10.1109/IVELEC.2004.1316240