

УДК 621.385.6

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА

Э. Б. Абубакиров, А. Н. Денисенко, А. П. Конюшков*, Е. И. Солуянов, В. В. Ястребов

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Статья посвящена исследованию работы релятивистской лампы обратной волны под воздействием внешнего электромагнитного сигнала. Экспериментально реализованы такие режимы её работы, как жёсткое возбуждение автоколебаний и усиление внешнего сигнала. Обсуждены условия возможной синхронизации релятивистской лампы обратной волны внешним сигналом. Экспериментально подтверждена возможность ускорения её старта под действием внешнего сигнала. Определены условия реализации режима усиления и основные эффекты, ограничивающие коэффициент усиления. Полученные результаты могут быть применены для оптимизации параметров генераторов и усилителей на основе релятивистской лампы обратной волны.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время достаточно активно ведутся исследования способов и приёмов управления выходными характеристиками релятивистских источников мощного микроволнового излучения, в том числе и с помощью внешнего высокочастотного сигнала. При этом последний предлагается использовать не только для прямого усиления входного сигнала, но и для воздействия на автогенераторы (см., в частности, работы [1–6]). В последнем случае исследуются возможности как синхронизировать частоту и фазу автоколебаний [3], так и укоротить длительность переходных процессов [4–6]. Следует сразу отметить специфику применения управляющих высокочастотных сигналов в мощной релятивистской электронике, которая связана с коротким импульсом излучения: выходной сигнал, как правило, содержит не более нескольких сотен периодов высокочастотных колебаний. В связи с этим основное внимание требует исследование влияния внешнего высокочастотного излучения на переходные процессы в релятивистских сильноточных устройствах. Кроме того, в таких системах, как правило, существенно отличаются мощность выходного сигнала ($10^8 \div 10^9$ Вт) и мощность сигнала, подаваемого на вход прибора. Последняя обычно не превышает 10^5 Вт (при использовании традиционных источников электромагнитного излучения). Это означает, что амплитуда внешнего сигнала может оказаться мала для того, чтобы значительно повлиять на работу прибора.

Данная статья направлена на исследование динамики работы релятивистской лампы обратной волны при воздействии на неё внешним электромагнитным сигналом с умеренной мощностью. Основное внимание уделено разграничению режимов работы прибора при различных параметрах системы и внешнего сигнала.

1. ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМОЙ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе [7] было показано, что релятивистской лампе обратной волны могут быть присущи различные режимы установления генерации. Для относительно длинных ламп (с длиной $L > L_{\text{cr}} = 1,3\gamma^2\lambda$) характерен мягкий сценарий установления генерации, в то время как в более

* konyushkov@appl.sci-nnov.ru

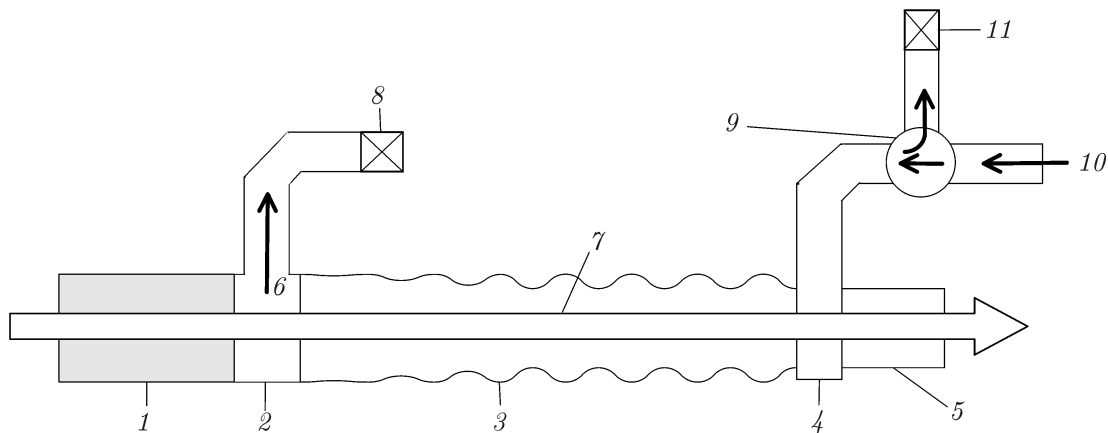


Рис. 1. Схема эксперимента с релятивистской лампой обратной волны, управляемой внешним сигналом: 1 — поглотитель, 2 — выходной преобразователь мод, 3 — релятивистская лампа обратной волны, 4 — входной преобразователь мод, 5 — закритический волновод, 6 — выходной сигнал, 7 — электронный пучок, 8 — СВЧ датчик 1, 9 — развязывающий циркулятор, 10 — СВЧ датчик 2, 11 — внешний сигнал

коротких приборах ($L < L_{cr}$) возможна реализация жёсткого режима установления колебаний. Здесь γ — релятивистский масс-фактор электронов при входе в пространство взаимодействия, а λ — рабочая длина волны.

В качестве генератора выгодно использовать относительно короткие лампы обратной волны. Для них характерны большой коэффициент полезного действия (КПД) и малые времена переходных процессов. Кроме этого, за счёт существования областей параметров с жёстким сценарием возникновения генерации, в них достигается приемлемый КПД уже при небольшом превышении рабочего тока над стартовым значением. Однако при реализации сценариев управления частотой (работа в режимах усиления или захвата частоты) наличие областей жёсткой генерации может привести к неконтролируемому возбуждению автоколебаний.

Для возможности реализовать различные режимы работы релятивистской лампы обратной волны при воздействии на неё внешним сигналом, в том числе и режимов управления выходным излучением, в качестве объекта исследования была выбрана достаточно длинная лампа обратной волны с длиной $L \approx 1,5\gamma^2\lambda$ с ожидаемым мягким режимом возникновения генерации. В качестве рабочей моды использовалась низшая осесимметричная волна E_{01} .

Экспериментальные исследования проводились в следующих условиях: использовался трубчатый электронный пучок с энергией частиц $U = 500 \div 600$ кэВ, импульсным током $I = 2,5 \div 3$ кА и длительностью импульса τ более 150 нс; пучок формировался и транспортировался в фокусирующем магнитном поле с индукцией около 3 Тл. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

На коллекторный конец лампы обратной волны подавался внешний сверхвысокочастотный (СВЧ) сигнал от импульсного магнетрона с максимальной мощностью 80 кВт и длительностью около 2 мс. Он вводился в рабочее пространство лампы обратной волны с помощью преобразователя мод, который представляет собой соединение круглого волновода и широкой стенки прямоугольного волновода с закритическим сужением на одном из концов круглого волновода. Преобразователь мод трансформирует моду H_{10} прямоугольного волновода в рабочую моду релятивистской лампы обратной волны (мода E_{01} круглого волновода) с эффективностью, превышающей 70 % в частотном диапазоне $9,3 \div 10$ ГГц.

Работа устройства диагностировалась при помощи двух СВЧ детекторов, на один из которых (№ 1 на рис. 1) поступала часть выходного излучения лампы обратной волны, а другой

(№ 2) был установлен в одном из плеч развязывающего ферритового циркулятора и регистрировал отражённый сигнал во входном волноводе.

Исследование проводилось при различных отношениях параметра связи $S = \sqrt{2e\gamma_0^3 IZ/(\pi mc^2)}$ к его стартовому значению S_{st} . Здесь Z — импеданс связи электронов с волной, e и m — заряд и масса покоя электрона соответственно. В эксперименте параметр связи варьировался с помощью изменения радиуса r электронного пучка. Это изменяло импеданс связи Z , пропорциональный модифицированной функции Бесселя $I_0(pr)$, и тем самым изменяло параметр связи S . Здесь p — константа, зависящая от свойств замедляющей системы.

2. «НАДПОРОГОВЫЙ» РЕЖИМ РАБОТЫ ($S > S_{st}$)

Как правило, мощность внешнего сигнала мала по сравнению с мощностью выходного излучения лампы обратной волны. Поэтому при большой отстройке внешнего сигнала от частоты самовозбуждения лампы, внешний сигнал не оказывает заметного влияния на работу прибора. В случае близости частоты внешнего сигнала к рабочей частоте лампы обратной волны наиболее интересными представляются следующие режимы работы: ускорение старта генерации и захват частоты и фазы выходного излучения возбуждённой релятивистской лампой обратной волны.

2.1. Ускорение старта генерации

Внешний электромагнитный сигнал может служить «затравкой» для возникновения генерации в релятивистской лампе обратной волны и сократить время установления генерации в ней (рис. 2). Наиболее заметно это проявляется при частоте внешнего сигнала, близкой к частоте самовозбуждения прибора, т. е. к его рабочей частоте f_{se} при малых амплитудах генерации. Для исследуемой лампы обратной волны частота $f_{se} = 9,67$ ГГц. В случае большой (более 300 МГц) отстройки частоты входного сигнала от частоты f_{se} внешний сигнал не оказывает существенного влияния на работу лампы обратной волны. В этом случае время установления в ней генерации под действием внешнего сигнала совпадает со временем старта в случае её самовозбуждения.

Большое (примерно равное 120 нс) время самовозбуждения в эксперименте обусловлено двумя факторами: неоптимальными параметрами лампы обратной волны для работы в режиме автогенерации (была выбрана достаточно длинная лампа с мягким режимом возбуждения и небольшим КПД) и работой вблизи порога самовозбуждения. Полученные результаты позволяют оценить параметры высокочастотной шумовой компоненты, которая является «затравкой» для начала генерации в лампе обратной волны в режиме самовозбуждения.

Будем считать, что на начальном участке амплитуда микроволнового излучения изменяется по экспоненциальному закону $E = E_0 \exp(t/t_i)$ с характерным временем нарастания t_i . Анализ

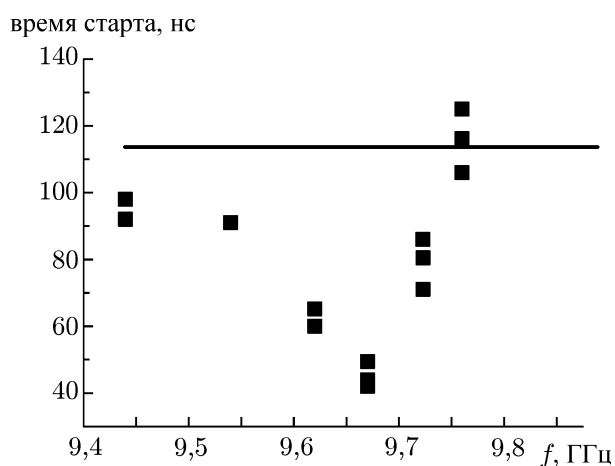


Рис. 2. Экспериментальная зависимость задержки времени установления амплитуды выходного излучения в лампе обратной волны по отношению к фронту импульса электронного тока от частоты управляющего сигнала f . Горизонтальной линией обозначена задержка начала автогенерации в отсутствие внешнего сигнала

формы выходного сигнала позволяет определить, что в рассматриваемых условиях время t_i порядка 40 нс. Поскольку изменение задержки генерации при подаче внешнего задающего сигнала достигает $\Delta t \approx 75$ нс, то можно считать, что отношение амплитуды внешнего сигнала к эффективной начальной «затравке» при самовозбуждении прибора составляет $K = \exp(\Delta t/t_i) \approx 6,5$. Импульсная мощность P_{in} внешнего сигнала, поступавшего на вход лампы обратной волны от магнетронного генератора (с учётом эффективности входного преобразователя мод), составляет 50 кВт. Если предположить, что затравкой для самовозбуждения лампы является шумовое излучение электронного потока, то, согласно проведённым оценкам, его полная мощность P_{noise} в полосе возбуждения равна $P_{in}/K^2 \approx 1,2$ кВт.

Принимая во внимание то, что ширина f_{ex} частотной полосы возбуждения, определяемой по уровню -3 дБ по отношению к максимуму, составляет около 150 МГц, можно оценить, что спектральная плотность мощности шумового излучения в рассматриваемых условиях составляет величину $P_{in}/(K^2 \Delta f_{ex}) \approx 8$ Вт/МГц. Это значение близко к теоретическим оценкам [8] уровня крупномасштабного «дробового» шума взрывоэмиссионных электронных пучков.

2.2. Захват генерации внешним сигналом

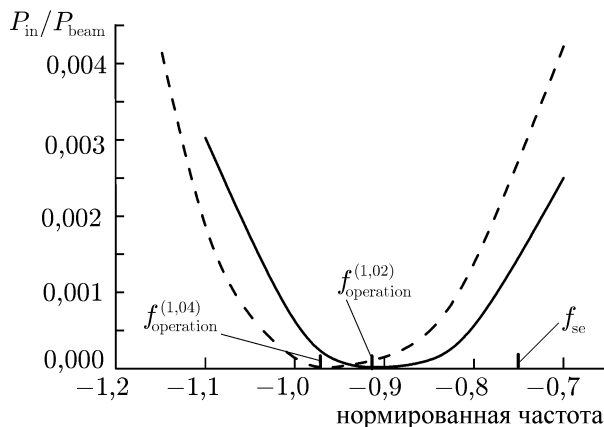


Рис. 3. Границы области захвата частоты выходного излучения лампы обратной волны внешним сигналом, построенные по результатам численного моделирования. Сплошная кривая отвечает отношению $S/S_{st} = 1,02$, пунктирная — $S/S_{st} = 1,04$, длина лампы $L \approx 1,5\gamma^2\lambda$, P_{beam} — мощность электронного потока, $f_{operation}^{(1,04)}$ и $f_{operation}^{(1,02)}$ — нормированные частоты генерации лампы при отношении $S/S_{st} = 1,04$ и $S/S_{st} = 1,02$ соответственно

его стартового значения. На рис. 3 приведена граница области захвата в переменных «нормированная частота» — «относительная мощность внешнего сигнала». Если в режиме ускорения старта наибольшее влияние внешнего сигнала наблюдается на частоте, соответствующей работе лампы обратной волны при малых амплитудах генерации f_{se} , то в режиме захвата наименьший уровень входного сигнала, достаточный для захвата лампы, наблюдается при его частотах, близких к частоте генерации лампы обратной волны $f_{operation}$ — установившейся частоте её работы после выхода на стационарный уровень.

Помимо увеличения уровня «затравочной» компоненты для старта генерации, внешний сигнал может оказывать и более существенное влияние на работу возбуждённой лампы обратной волны, что заключается в захвате её генерации. В этом режиме после выхода генерации на стационарный уровень частота выходного излучения совпадает с частотой внешнего сигнала, а фаза выходного излучения навязывается фазой внешнего сигнала.

Характерные значения параметров, при которых возможен захват частоты и фазы релятивистской лампы обратной волны внешним сигналом, определялись теоретически на основании численного решения описывающих её работу нестационарных уравнений [9]. Зависимость от амплитуды внешнего сигнала носит пороговый характер: режим захвата проявляется при амплитудах внешнего сигнала, превышающих определённое значение, зависящее от отстройки частоты входного сигнала от рабочей частоты лампы и от степени превышения параметром связи

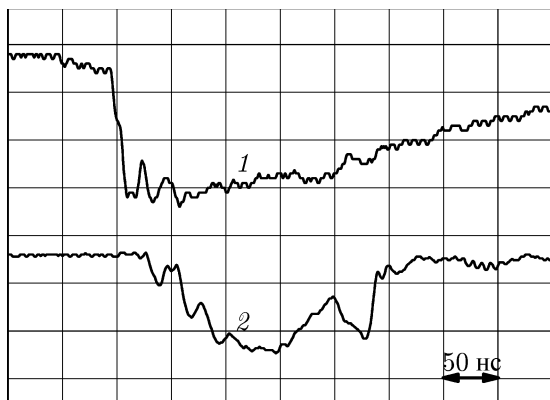


Рис. 4. Экспериментальная реализация режима усиления в релятивистской лампе обратной волны: осциллограммы анодного напряжения (кривая 1) и огибающей усиленного сигнала, регистрируемой СВЧ датчиком 1 (кривая 2)

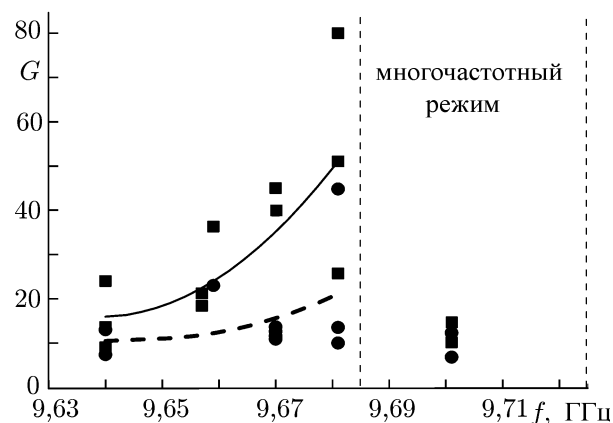


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициента усиления G релятивистской лампы обратной волны от частоты f внешнего сигнала при различных радиусах электронного пучка (квадраты и аппроксимация сплошной линией соответствуют $r = 17,5$ мм, кружки и аппроксимация пунктиром — $r = 17$ мм). В области многочастотной генерации указана усреднённая по нескольким периодам биений мощность

Оценки показывают, что при параметрах внешнего сигнала и электронного пучка, соответствующих условиям эксперимента ($P_{in}/P_{beam} \approx 6 \cdot 10^{-5}$), захват генерации возможен в довольно узкой полосе частот, ширина которой составляет 0,4 % от частоты генерации лампы обратной волны, а центр близок к частоте генерации. Отношение мощностей выходного и входного сигналов при этом может достигать 20 дБ.

Для реализации режима захвата частоты в сколько-либо заметной полосе частот требуется существенный уровень входного сигнала, что делает данные режимы труднореализуемыми на практике. В работе [3] описана реализация режима захвата при небольшой (20 МГц) отстройке частоты внешнего источника от рабочей частоты лампы обратной волны. Мощность входного сигнала составляла 390 кВт, выходная мощность — 200 МВт.

3. РАБОТА НИЖЕ ПОРОГА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ($S < S_{st}$)

3.1. Усиление внешнего сигнала

Релятивистская лампа обратной волны может быть использована как элемент мощных усилительных систем [1, 10]. При её работе в режиме регенеративного усиления, т. е. вблизи порога возбуждения, возможно получить высокий коэффициент усиления $G \sim (1 - S/S_{st})^{-1}$. Вместе с тем в этом режиме она обладает узкой полосой усиления $\Delta f/f \sim 1 - S/S_{st}$. Работа вблизи порога возбуждения делает режим регенеративного усиления чувствительным к вариациям параметров электронного пучка из-за опасности паразитного возбуждения. Именно поэтому в качестве усилителей выгодно использовать достаточно длинные релятивистские лампы обратной волны с мягким режимом установления генерации. Это позволяет максимально приблизить параметр связи к стартовому значению и получить большое усиление.

В эксперименте определяющим признаком режима усиления было отсутствие биений в выходном сигнале (рис. 4), что свидетельствовало о совпадении частот магнетрона и выходного

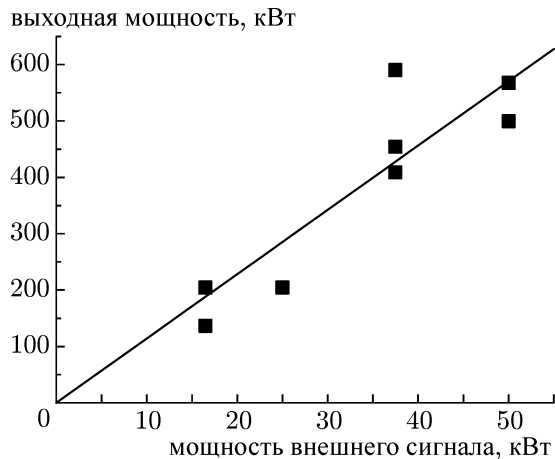


Рис. 6. Экспериментальная зависимость мощности выходного излучения (СВЧ датчик 1) от мощности внешнего сигнала. Линейная аппроксимация соответствует коэффициенту усиления $G = 11,5$. Частота внешнего сигнала 9,66 ГГц, радиус электронного пучка 17 мм

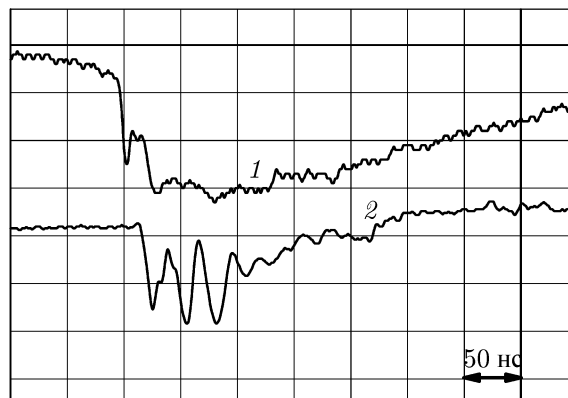


Рис. 7. Осциллограмма выходного сигнала лампы обратной волны при многочастотном режиме работы: анодное напряжение (кривая 1), сигнал с выхода СВЧ датчика 1 (кривая 2). Частота внешнего сигнала 9,71 ГГц, радиус электронного пучка 17,5 мм

сигнала. В случае возбуждения на приборах обоих датчиках наблюдались биения, что свидетельствовало о многочастотном режиме работы.

Как видно, исследуемая лампа обратной волны обладает довольно узкой полосой усиления вблизи частоты возбуждения $f_{se} = 9,67$ ГГц (рис. 5). Частота выходного сигнала в этом случае совпадает с частотой магнетрона, а выходная мощность пропорциональна мощности входного сигнала (рис. 6). Несимметричная относительно частоты f_{se} полоса усиления (рост коэффициента усиления при увеличении частоты) является одной из особенностей нелинейного усиления.

Режим усиления граничит с многочастотным режимом работы при $9,69 < f < 9,73$ ГГц. В этой области наблюдались биения (рис. 7), а выходной сигнал содержал компоненты на частоте возбуждения лампы обратной волны и на частоте магнетрона. Данный эффект может быть обусловлен жёстким возбуждением прибора: без внешнего сигнала генерация отсутствовала, а в случае подачи на вход внешнего сигнала на выходе, наряду с усиленной компонентой на частоте внешнего сигнала, появлялась компонента на частоте возбуждения лампы. Отметим, что для усилителя этот эффект существенно сужает полосу усиления прибора (со стороны высоких частот). Ширина области многочастотной генерации не превышает 40 МГц. При большей отстройке магнетрона от частоты f_{se} внешний сигнал перестаёт влиять на работу релятивистской лампы обратной волны, и она не возбуждается.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования демонстрируют, что внешний сигнал может существенно влиять на работу релятивистской лампы обратной волны. В простейшем случае он может служить начальной затравкой для возникновения генерации и способствовать ускорению старта генерации. Также продемонстрирована возможность управления параметрами мощного выходного излучения с помощью внешнего относительно слабого сигнала. Однако необходимо отметить, что неавтономные режимы работы релятивистской лампы обратной волны отличаются, как правило, сложным многочастотным излучением. В свою очередь, режимы

управления частотой выходного излучения реализуются в довольно узкой (менее 0,5 % от частоты генерации) полосе усиления или захвата, поэтому для них требуется высокая стабильность параметров электронного потока.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-08-00719-а и 14-02-31643).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abubakirov E. B., Denisenko A. N., Fuks M. I., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30, No. 3. P. 1041.
2. Yang W., Zhou X., Xiao J., et al. // Acta Phys. Sin. 2011. V. 60, No. 4. Art. no. 044102.
3. Teng Y., Song W., Sun J., et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111, No. 2. Art. no. 043303.
4. White W. M., Gildenbach R. M., Jones M. C., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34, No. 3. P. 627.
5. Song W., Teng Y., Zhang Z. Q., et al. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19, No. 8. Art. no. 083105.
6. Abubakirov E., Denisenko A., Konyushkov A., et al. // EAPPC 2012 / BEAMS 2012 Conf. Proc. Art. no. 247.
7. Абубакиров Э. Б., Конюшков А. П., Сергеев А. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 8. С. 675.
8. Абубакиров Э. Б., Конюшков А. П., Сергеев А. С. // Радиотехника и электроника. 2009. № 8. С. 1009.
9. Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 7. С. 1037.
10. Волков А. Б., Зайцев Н. И., Иляков Е. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, № 12. С. 6.

Поступила в редакцию 27 ноября 2013 г.; принята в печать 24 марта 2014 г.

PECULIARITIES OF OPERATION OF A RELATIVISTIC BACKWARD-WAVE OSCILLATOR DRIVEN BY AN EXTERNAL ELECTROMAGNETIC SIGNAL

É. B. Abubakirov, A. N. Denisenko, A. P. Konyushkov, E. I. Soluyanov, and V. V. Yastrebov

We study operation of a relativistic backward-wave oscillator driven by an external electromagnetic signal. Such operation regimes as hard excitation of self-oscillations and amplification of the external signal are implemented experimentally. The conditions for possible synchronization of the relativistic backward-wave oscillator by an external signal is discussed. The possibility of accelerating the onset of oscillations by the action of an external signal is confirmed experimentally. The conditions of realization of the amplification regime and the main effects, which limit the amplification coefficient, are determined. The obtained results can be used to optimize the parameters of oscillators and amplifiers based on relativistic backward-wave oscillators.