

УДК533.9.01;

А.М. Горбань<sup>1</sup>, А.Ю. Звягинцев<sup>2</sup>, Ю.Ф. Лонин<sup>1</sup>, А.Г. Пономарев<sup>1</sup><sup>1</sup> ННЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, Харьков<sup>2</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## АНАЛИЗ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

В работе приведен анализ научной литературы о мощных импульсных СВЧ генераторах, которые используют энергию релятивистских электронов. Даются сравнительные характеристики генераторов с разными типами электродинамических структур. Приведен анализ уровней мощности в зависимости от длины волны для разных типов генераторов. Показан уровень развития этого направления в Украине. Приведенные отдельные примеры использования таких устройств с военной целью в зарубежных странах.

**Ключевые слова:** релятивистские электроны, электродинамические структуры (ЭДС), магнетрон, виркатор, генераторы сверхширокополосных (СШП) импульсов.

### Введение

Анализ военных конфликтов в Югославии, Иране и Афганистане указывает на постоянное увеличение использования в них различных видов высокоточного оружия (ВТО). Разнообразие спектра видов такого оружия определяется как тактикой их применения, так и родами войск, которые используют их. Высокая точность и маневренность, малая площадь эффективного рассеяния, мощный ударный потенциал обеспечиваются за счет высокой концентрации современной полупроводниковой элементной базы в радиоэлектронных системах (РЭС) навигации, управления, бортовых ЭВМ ВТО.

Однако факты свидетельствуют о том, что элементы, которые обеспечивают эти преимущества, становятся уязвимыми при воздействии импульсно-электромагнитного излучения.

Решение задач стойкости полупроводниковой элементной базы и РЭС в проблемах функционального поражения требует широкий спектр генераторов электромагнитного излучения с разнообразными параметрами, такими как: длина волн; мощность; длительность импульса; коэффициент полезного действия (КПД); массогабаритные характеристики и другие.

На диаграмме рис. 1 приведена зависимость мощности излучения от длины волны

### 1. Импульсные СВЧ – генераторы большой мощности

Интенсивная разработка короткоимпульсных СВЧ - генераторов большой мощности начата в первой половине 80-х годов благодаря бурному росту ускорительной техники. В настоящее время эти работы широко развиты в целом ряде ведущих научно-исследовательских центрах США, России, Великобритании, Франции, Китае, Южной Кореи и др. странах.

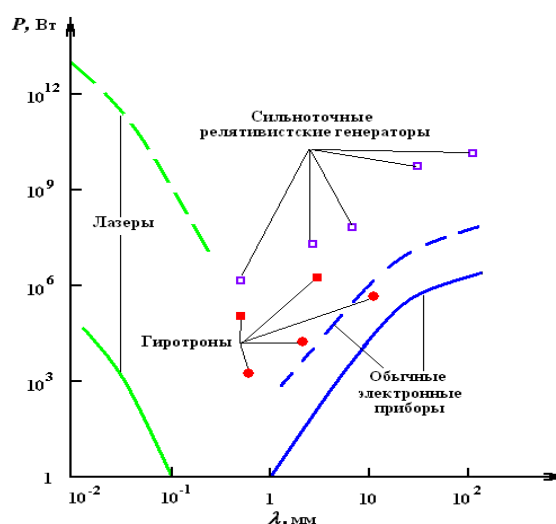


Рис. 1. Мощность генераторов от длины волны

Интерес к разработкам в области короткоимпульсных СВЧ генераторов большой мощности определяется, в первую очередь, использованием таких систем, как микроволнового оружия для функционального поражения РЭА и элементной базы, от штатного функционирования которых зависит выполнение боевых задач.

Из-за отсутствия достоверных данных о сверхмощных СВЧ генераторах, оценки их тактико-технических и массогабаритных характеристиках, назначениях и исполнении можно судить только на основании открытых публикаций научно-исследовательских работ. Успешное развитие импульсной высоковольтной техники и создание на ее основе сильноточных ускорителей электронных пучков с энергией частиц  $0,5 \div 10$  МэВ и токами пучка от  $10^3 \div 10^7$  А создало энергетическую базу для реализации СВЧ генераторов с мощностью излучения на уровне  $10^7 \div 10^{10}$  Вт в импульсе.

Структурная схема практически любого СВЧ генератор на основе сильноточного импульсного ускорителя РЭП, показана на блок-схеме рис. 2 и состоит из таких основных частей:

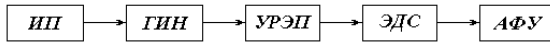


Рис. 2. Блок-схема импульсного мощного СВЧ генератора

Общая картина о таких генераторах приведена на рис. 3.

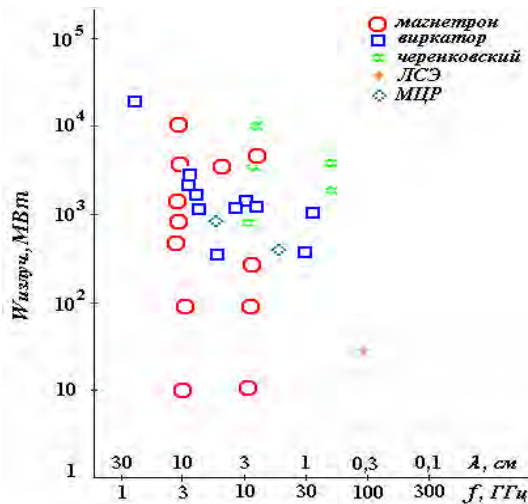


Рис. 3. Общая картина тактико-технических данных сверхмощных СВЧ генераторов

Первый элемент генератора – первичный источник питания (ИП), который служит для преобразования бортового или стационарного низковольтного напряжения в высоковольтное постоянное напряжение для зарядки генератора импульсных напряжений (ГИН). ГИН фактически определяет габариты и длительность работы генератора. Если СВЧ генератор работает в микросекундном диапазоне длительности, то в дополнительных элементах необходимости нет. Однако при переходе в наносекундный диапазон длительности ( $10^{\pm 100}$  нс). ГИНу необходим дополнительный элемент – формирующая линия, которая позволяет укорачивать импульс и делать передний фронт круче. Оба эти элемента оказывают существенное влияние на массогабаритные характеристики СВЧ генератора в целом. Сформированный импульс высокого напряжения (более  $10^2 \div 10^3$  кВ) подается на диод ускорителя релятивистских электронных пучков (УРЭП), в котором создается сильноточный пучок. Дальше пучок, распространяясь в электродинамической структуре (ЭДС), где трансформирует свою кинетическую энергию в энергию СВЧ излучения, которая через антенно-фидерное устройство (АФУ) излучается в свободное пространство. Следует отметить, что тактико-технические и массово-габаритные характеристики СВЧ генераторов существенным обра-

зом зависят от ГИН'а. Так ГИН, собранный на традиционных накопителях энергии (емкостные, индуктивные, механические) занимает  $\sim 75 \div 85\%$  веса и объема всего генератора, что составляет тонны и десятки  $\text{м}^3$ .

Параметры ускорителя и ЭДС определяют тактико-технические характеристики СВЧ генератора, а именно частоту, длительность, мощность СВЧ излучения, эффективность. На рис. 3 приведены тактико-технические данные существующих научно-исследовательских, лабораторных генераторов СВЧ излучения, работающих на различных уровнях мощности от десятков мегаватт до десятков гигаватт и частотах от гигагерц до сотен гигагерц. На данной диаграмме приведены данные генераторов, в которых применяются четыре типа наиболее распространенных видов ЭДС: релятивистский магнетрон, черенковский, виркаторная система и магнитоциклотронный резонанс МЦР [1 – 18].

### 1.1. Релятивистский магнетрон

Принцип действия релятивистского магнетрона (РМ) основан на преобразовании кинетической энергии электронов, движущихся в скрещенных электрическом и магнитном полях, в энергию СВЧ поля [3, 5, 6]. Как показано в [3, 6], при напряженности электрического поля в пространстве взаимодействия больше  $10^7$  В/м, зависимость скорости электронов от анодного напряжения заметно влияет на электронные процессы и взаимодействие электронов с генерируемым СВЧ полем. От обычных магнетронов РМ отличается многими конструктивными признаками, обусловленными высоким напряжением питания, большим током эмиссии катода, малым временем возбуждения, большим уровнем выходной мощности [6]. Практически все испытанные к настоящему времени РМ работают в десяти или трехсантиметровом диапазонах длин волн. Рекордными параметрами к настоящему времени являются уровни мощности и КПД, достигнутые:

для 10-см диапазона 10 ГВт и 40% КПД [5];

для 3-см диапазона 4 ГВт и 12% КПД,  $\tau \approx 30 - 50$  нс и  $N \approx 5-10$  кЭ [6]. Практически все генераторы выполнены по классической схеме длинный анодный блок с числом резонаторов  $N = 6$  или 8.

### 1.2. Генераторы на гофрированном волноводе

Основными задачами, стоящими в настоящее время при теоретических исследованиях работы карсинотрона, является определение оптимальных условий генерации мощного СВЧ излучения по электронному КПД, а также анализ различных режимов возбуждения электромагнитных колебаний в ЭДС. Поскольку протекающие процессы носят импульсный характер, применение традиционного подхода неприемлемо, поэтому необходима разра-

ботка нелинейной нестационарной теории генераторов О-типа. Рассмотрим результаты теоретических исследований взаимодействия РЭП с отрезком слабогофрированного волновода [4, 10, 11], рис. 4.

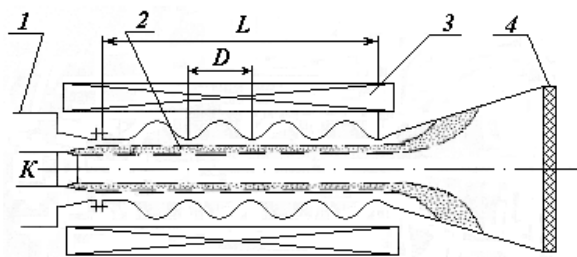


Рис. 4. Схема ЭДС черенковского типа:  
1 – анод, 2 – трубчатый пучок РЭП,  
3 – магнитное поле, 4 – выходное окно

Рассмотрим отрезок гофрированного волновода длиной  $L$ ,  $D$  – период гофрировки ЭДС,  $R_0$  – радиус гофрированного волновода,  $L$  – общая длина ЭДС,  $\Delta R/R_0$  – глубина гофрировки ЭДС, боковая поверхность которого задана уравнением

$$a(z) = a_0(1 + \alpha \cos k_0 z),$$

где  $a_0$  – средний радиус волновода,  $\alpha = \Delta a/a_0$ ;  $\Delta a$  – глубина гофра;  $k_0 = 2\pi/D$ ;  $D$  – период структуры.

Так, релятивистские карсинотроны в диапазоне  $\lambda \approx 5$  см имеют  $P \approx 5$  ГВт,  $\tau \approx 60-80$  нс и  $N \approx 10$  кЭ для  $\lambda \approx 0,9-0,85$  см,  $P \approx 1,5$  ГВт,  $N \approx 40$  кЭ, КПД  $\approx 15-20\%$  [11].

### 1.3. Генераторы на основании виртуального катода

#### Триоды с ВК

Отражательные триоды были первыми генераторами излучения сантиметрового диапазона длин волн классической СВЧ электроники [5, 7 – 9]. Механизм генерации в этих приборах связан с осцилляциями электронов вокруг сетки-анода между катодом и отражателем. Этот же принцип положен в основу и релятивистских триодов, в которых колебания происходят между реальным катодом и ВК.

На рис. 5 схематически показано устройство триода с ВК. Высоковольтный планарный диод помещается в резонансную систему, размеры которой значительно больше размеров катода и сетки-анода и зазора между ними. Резонансная система одновременно служит вакуумным объемом электронного потока. Катод, представляющий собой металлический диск диаметром несколько сантиметров и резонансная система находятся под нулевым потенциалом, анодом является натянутая на обод металлическая сетка с геометрической прозрачностью 0,5 – 0,9.

Электромагнитное излучение выводится из резонатора через вакуум уплотняющее окно и излучающую антенну в свободное пространство.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями выяснены закономерности работы и параметры триодов с ВК в релятивистской области значений энергии [7, 13]. Прежде всего, следует отметить, что это генератор сантиметрового и дециметрового диапазона длин волн.

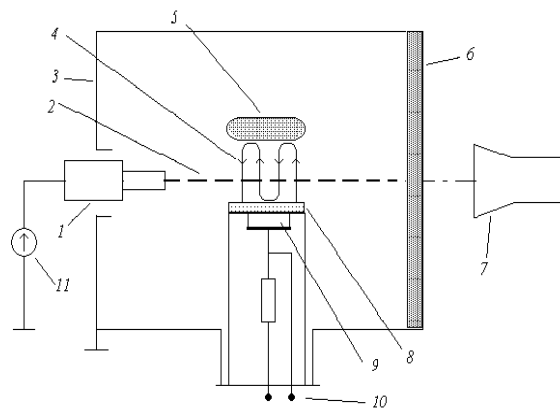


Рис. 5. Схема триода с виртуальным катодом (прибор с отраженными электронами):  
1 – анододержатель, 2 – сетка-анод,  
3 – металлическая камера, 4 – траектории осциллирующих электронов, 5 – виртуальный катод, 6 – окно для вывода энергии, 7 – приемная антенна, 8 – катод, 9 – цилиндр Фарадея, 10 – клеммы регистратора тока, 11 – генератор высокого напряжения

Как видно из таблицы, эффективность его достигает 30% в 10-см области, а мощность составляет  $\sim 10^9$  Вт при использовании сравнительно скромных импульсных ускоряющих систем в качестве источников напряжения.

#### Виркаторы с пролетными электронами

Генераторы этого типа отличаются тем, что отрицательный потенциал подается на катод, а анод и дрейфовая камера находятся под одним потенциалом (заземлены). На рис. 6 показана принципиальная схема виркатора с пролетными электронами.

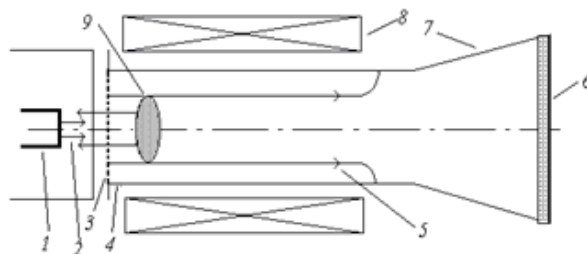


Рис. 6. Схема виркатора с пролетными электронами:  
1 – катод, 2 – траектории осциллирующих электронов, 3 – сетка-анод, 4 – волновод-коллектор, 5 – пролетные электроны, 6 – выходное окно, 7 – излучающий рупор, 8 – соленоид, 9 – виртуальный катод

Электроны ускоряются в промежутке катод-анод и через анодную фольгу или сетку, прозрачную для высокоэнергетичных электронов, попадают в дрейфовое пространство [12, 14 – 18].

Если ток инжектируемых электронов выше предельного тока для данной геометрии, то часть электронов тормозится собственным полем потока и отражается в сторону анода, частицы другой части электронного потока продолжают свое движение, пока не достигнут коллектора или стенок камеры.

Таким образом, в этом случае из области ВК в стационарном состоянии испускаются электроны и в прямом, и в обратном направлении. Отраженные электроны, как и в случае триода с ВК, могут образовывать поток осциллирующих электронов.

Отличительной чертой виркаторных систем является то, что могут работать в широком диапазоне частот  $f \approx 3,1-17$  ГГц, уровень мощности  $P \approx 0,5 - 4$  ГВт,  $\tau \approx 30 - 80$  нс, КПД  $\approx 0,5 - 8\%$  [16 – 18]. Эти системы могут работать как с магнитным полем, так и без него, а кроме того, обладают конструктивной простотой.

#### Генераторы сверхширокополосных и миллиметровых сигналов

В последнее время особое внимание исследованиям в генерации миллиметровых и СШП сигналов. Наибольшее развитие эти работы получили в США и России, Японии и Германии. Так, Россия (Нижний Новгород) является монополистом в создании гиротрона мегаваттного уровня мощности с алмазным окном для вывода микроволнового излучения, а США уже приступили к промышленному выпуску гиротрона мощностью 50 кВт на частоте 95 ГГц, с постоянным магнитом массой 90 кг (\$ 330 т.) предназначенный для систем нелетального оружия МО США.

Следует отметить, что в Украине вопросами генерации в сантиметровом диапазоне занимались в Харьковском физико-техническом институте [17, 18]. В настоящее время в ННЦ ХФТИ совместно с ИРЭ АН Украины теоретически и экспериментально исследуется импульсный 8-мм релятивистский магнетрон. Назначение этого прибора в формировании электромагнитного поля заданной мощности, определении порогов стойкости радиоэлектронных систем к действию электромагнитного излучения, радиолокация [31].

Характеристики его таковы:

Длина волны, мм .....	8
Рабочее напряжение, кВ .....	160
Длительность импульса, нс .....	50
Пиковая мощность, кВт .....	500
Период прохождения импульсов, с .....	30
ККД (не меньше), % .....	5

Кроме того, в том же диапазоне длины волны исследуется автоколебательная система на основе диэлектрического резонатора с модами "шепчущей галереи" [32].

Возбуждение осуществляется на высокой моде  $HE_{mnl}$  в квазиоптическом ЦДР возмущенным аксиальным многоструйным электронным потоком. Типичные осциллограммы возбужденных ММ волн в ЦДР приведены на рис. 7.

Особое внимание уделяется экспериментальным исследованиям генерации СШП излучения, которое моделирует ЭМИ ядерного взрыва. СШП сигналы обладают целым рядом полезных свойств, определяющих области их применения. Уже в середине 70-х годов 20 века существовал довольно большой интерес к СШП локационным системам различного применения.

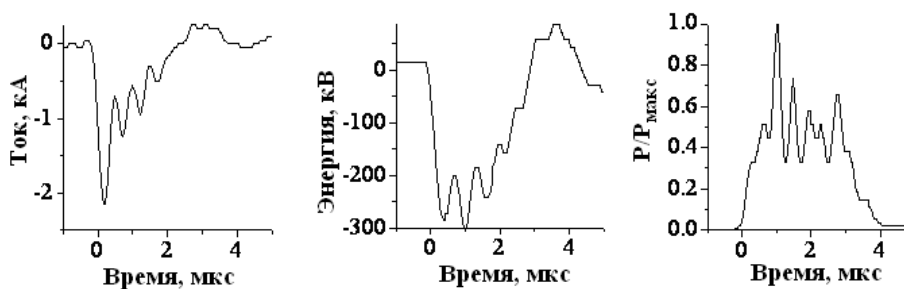


Рис. 7. Значения параметров мм излучения

Крайне заманчивой с практической точки зрения представляется перспектива использования радиосигналов, которые способны проходить большие расстояния без затухания, так называемый "электромагнитный снаряд" [20 – 23]. В работе [20] было показано, что вполне реально обнаруживать при помощи СШП радиолокационной аппаратуры подводные лодки, находящиеся в морской воде на глубинах порядка

нескольких десятков метров. В этой же работе предложен принципиально новый способ определения глубины погружения отражающего объекта, основанный на анализе формы отраженного сигнала, искажения которого как раз и несут эту информацию. СШП радиолокация шагнула и в медицину. В настоящее время делаются попытки заменить опасные для человека рентгеновские методы исследования тканей

организма человека совершенно безопасными радиолокационными.

В ННЦ ХФТИ активно ведутся исследования антенных систем, непосредственно возбуждаемых электронными пучками. Данное направление в настоящее время является очень актуальным и важным направлением исследований. Проведение таких исследований позволит найти оптимальные конструктивные особенности антенных систем, наиболее эффективно преобразующих кинетическую энергию пучка в энергию электромагнитного поля.

Экспериментальные и теоретические исследования, направленные на создание искусственных источников электромагнитного импульса, аналогичного ЭМИ ЯВ показали, что возбуждение электронно-пучковых антенн сильноточными релятивистскими электронными пучками позволяет генерировать сверхширокополосные электромагнитные импульсы, поля которых  $E$  значительно превышают поля ЭМИ ЯВ [24 – 29]. Следует отметить, что в этих импульсах передний фронт импульса значительно короче. Такая форма сигнала оказывает более эффективное воздействие на бортовые ЭВМ, радиоприемные устройства систем навигации и управления ВТО, даже при использовании современных средств защиты.

Предполагаемый механизм излучения аналогичен переходному излучению, а следовательно, мощность излучения, как и в когерентных источниках, пропорциональна  $\sim N^2$ , где  $N$  – плотность пучка.

Частотные характеристики электромагнитного импульса определяются как характеристиками сильноточного релятивистского электронного пучка ( $N$  и  $\tau$ ), так и геометрическими параметрами антенны. Верхняя частота импульса определяется плазменной частотой

$$\omega_p = \sqrt{4\pi N e^2 / m},$$

где  $N$  – плотность пучка, а  $e$  и  $m$  – заряд и масса электронов соответственно и передним фронтом электронного пучка. Нижняя частота СШП импульса в основном определяется геометрическими параметрами излучающей антенны.

### Выводы

Из анализа научной литературы о мощных импульсных СВЧ генераторах следует, что данное направление имеет важное значение, так как решают народнохозяйственные и оборонные проблемы, а именно:

- в решение задач стойкости и совместимости полупроводниковой элементной базы;
- в создании стойкой и конкурентноспособной радиоэлектронной техники;

– создании новых технологических направлений в биомедицине и сельском хозяйстве.

Следует отметить, что уровень исследований мощных импульсных СВЧ генераторов в ННЦ ХФТИ соответствует мировому уровню. Однако дальнейшее развитие требует широкой кооперации с разными организациями (гражданскими и военными), а также соответствующего финансирования.

### Список литературы

1. Диденко А.Н. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности / А.Н. Диденко, Ю.Г. Южков. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 250 с.
2. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники / С.Б. Блудов, Н.И. Гадецкий, И.И. Магда и др. // Физика плазмы. – 1994. – Т.20, №7 – 8. – С. 712-718.
3. Bekefi G. Giant microwave bursts emitted from a field-emission, relativistic electron beam magnetron / G. Bekefi // Phys. Rev. Lett. – 1976. – v.37, No. 6. – P. 379.
4. Исследование генерации мощных сверхвысокочастотных колебаний с помощью релятивистского магнетрона / А.Н. Диденко, А.С. Сулакишин, Г.П. Фоменко и др. // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4, Вып. 1. – С. 10-13.
5. Теория черенковских усилителей и генераторов на релятивистских пучках / В.А. Балакирев, Н.И. Карбушев, А.О. Островский, Ю.В. Ткач. – К.: Наукова думка, 1993. – 206 с.
6. Didenko A.N., et al. Generation of high power RF pulses in the magnetron and reflex triodes system / A.N. Didenko, et al. // Proc. 3rd Int. Top. Conf. on High-power Electron and Ion Beams. – Novosibirsk, 1979. – V.2. – P. 683-691.
7. High power relativistic magnetrons: experiments and simulation / A. Palevsky, G. Bekefi, A.T. Drobot et al. // Proc. 3rd Int. Top. Conf. on High Power Electron and Beams. – Novosibirsk, 1979. – V.2. – P. 759.
8. Burkhart S.C. A virtual cathode reflex triode for high power microwave generation / S.C. Burkhart, R.D. Scarpetty, R.L. Lundberg // J.Appl. – 1983, – V.58, No 1. – P. 28.
9. Burkhart S.C. Multigigawatt microwave generation by use of a virtual cathode oscillator driven by a 1-2 MV electron beam / S.C. Burkhart // J.Appl. Phys. – 1987. – V.62, No 1. – P. 75.
10. Генерация СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе / А.Н. Диденко, Я.Е. Красик, С.Ф. Перельгин, Г.П. Фоменко // Письма в ЖЭТФ. – 1979. – Т.5, Вып. 6. – С. 321.
11. Devis H.A. Gigawatt-level microwave bursts from a type of virtual-cathode oscillator / H.A. Devis, R.R. Bartsch, T.J. Kwan // Phys.Rev. Lett. – 1987. – V.59, No 3. – P. 288.
12. Efficient, multi-gigawatt, operation of the reditron oscillator / H.A. Devis, R.D. Fulton, E.G. Shterwood, et al. // Abstr. 7th Int.Conf.on High-Power Particle Beams. Karlsruhe. – P. 335.
13. A radially and axially extracted virtual cathode oscillator (vircator) / H. Sze, J. Benford, T. Young et al. // IEEE Trans. – 1985. – V.PS-13, No 6. – P. 592.
14. Didenko A.N. et al. Influence of External High Frequency Signal on Generation in the Virtual Cathode / A.N. Didenko et al. // Abstr. 7-th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. – Karlsruhe, 1988. – P. 338.
15. Sze H. Dynamic of a virtual cathode oscillator driv-

en by a pinched diode / H. Sze, J. Benford, B. Harteneck // *Phys.Fluids*. – 1986. – V. 29, No 21. – P. 3873.

16. Interaction of a vircator generator with an enclosing resonant cavity / J. Benford, D. Prise, H. Sze, D. Bromley // *J.Appl.Pfys.* – 1987. – V.61, No 5. – P. 2089.

17. Devis H.A. Gigawatt-levfel microwave bursts from a type of virtual-cathode oscillator / H.A. Devis, R.R. Bartsch, T.J. Kwan // *Phye.Rev. Lett.* – 1987. – V.59, No 3. – P. 288.

18. Мощный СВЧ-генератор с релятивистским пучком на основе комбинации виркатора и убитрона / В.В. Ермоленко, Ю.Ф. Лонин, Е.А. Прасол, И.Ф. Харченко // Труды 7-й Крымской конференции и выставки КрыМиКо-1997. – Севастополь, Вебер, 15-18 сентября 1997. – Т.2. – С. 447-449.

19. Лонин Ю.Ф. Сильноточные релятивистские ускорители ИПЭНМУ ННЦ ХФТИ и их применение / Ю.Ф. Лонин, И.И. Магда // *ВАНТ, Серия: Ядерно-физические исследования (50)*. – 2008 – № 5. – С. 85-90.

20. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи: пер. с англ. / Х.Ф. Хармут. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.

21. Wu T.T. Comments on "Focus wave modes in homogeneous Maxwell's equations; Transverse electric mode" / T.T. Wu, R.V. King // *J. Appl. Phys.* – 1984. – V.56, N. 3. – P. 2587-2588.

22. Borisov V.V. Some solutions of the wave and Maxwell's equations / V.V. Borisov, A.B. Utikin // *J. Math. Phys.* – 1994. – V. 35, N 7. – P. 3624-3630.

23. Wu T.T. Electromagnetic missiles / T.T. Wu // *J. Appl. Phys.* – 1985. – V. 57, N 7. – P. 2370-2373.

24. Содин Л.Г. Импульсное излучение антенны (электромагнитный снаряд) / Л.Г. Содин // *Радиотехника и электроника*. – 1991. – Т. 36, № 5. – С. 1014-1022.

25. Формирование интенсивных электромагнитных импульсов, излучаемых при прямом возбуждении изолированной штыревой антенны короткоимпульсным сильноточным РЭП / Н.И. Гапонко, А.М. Горбань, Д.В. Горожан

нин и др. // *Физика плазмы*. – 2000. – Т. 26, № 4. – С. 1-3.

26. Exsitement TEM-horn antenna by impulsive relativistic electron beam / V.A. Balakirev, N.I. Gaponenko, A.M. Gorban', et all. // *ВАНТ, Серия "Физика плазмы"*(5). – 200. – №3. – С. 118-119.

27. Генерация СШП сигнала при возбуждении спиральной антенны сильноточным РЭП / В.А. Балакирев, А.М. Горбань, А.М. Егоров и др. // *ВАНТ, Серия: "Ядерно-физические исследования"*. – 2 (46). – 2006. – №2. – С. 85-87.

28. Пучкові генератори імпульсного надширокопasmового електромагнітного випромінювання / А.М. Єгоров, Б.М. Гавриленко, М.В. Грушенко, В.В. Жук, та ін. // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХУПС, 2007. – Вип. 3(61). – С. 128-130.

29. Моделирование излучения электронно-пучковой антенны / Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, А.В. Столярчук и др. // *ВАНТ, Серия: "Плазменная электроника и новые методы ускорения"*,(7). – 2010. – № 4. – С. 8-11.

30. Неионизирующее электромагнитное излучение и экология / А.М. Егоров, Ю.Ф. Лонин, В.И. Чумаков и др. // *Радиофизика и электроника*. – 2009. – Том 14, №2. – С. 229-238.

31. Relativistic magnetron of 8 mm waveband / I. Magda, N.P. Gadetski, E.I. Kravtsova, e.a. // *ВАНТ, Серия: "Плазменная электроника и новые методы ускорения"* (6). – 2008. – №4. – С. 18-20.

32. Автоколебательная система на основе диэлектрического резонатора с модами "шепчущей галереи" / А.В. Дормидонтов, А.Я. Кириченко, Ю.Ф. Лонин и др. // *ПЖТФ*. – 2012, том 38, выпуск 2. – С. 65-74.

Поступила в редколлегию 11.05.2012

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. В.К. Иванов, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.

### АНАЛІЗ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ГЕНЕРАТОРІВ СВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

А.М. Горбань, О.Ю. Звягинцев, Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов

У роботі приведений аналіз наукової літератури про могутні імпульсні генератори СВЧ, які використовують енергію релятивістських електронів. Даються порівняльні характеристики генераторів з різними типами електродинамічних структур. Приведений аналіз рівнів потужності залежно від довжини хвилі для різних типів генераторів. Показаний рівень розвитку цього напрямку в Україні. Приведені окремі приклади використання таких пристроїв з військовою метою в зарубіжних країнах.

**Ключові слова:** релятивістські електрони, електродинамічні структури (ЕДС), магнетрон, виркатор, генератори надширокопasmових (СШП) імпульсів.

### ANALYSIS OF RELATIVISM GENERATORS OF SVCH OF RADIATION OF HIGH-POWERED

A.M. Gorban', A.Yu. Zvyagincev, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev

The analysis of scientific literature is in-process resulted about the powerful SVCH pulsers which utilize energy of relativism electrons. Comparative descriptions of generators are given with the different types of electrodynamic structures. The analysis of power-levels is resulted depending on a wave-length for the different types of generators. The level of development of this direction is rotined in Ukraine. Resulted separate examples of the use of such devices with a military purpose in foreign countries.

**Keywords:** relativism electrons, electrodynamic structures, magnetron, vircator, generators of overbroadband impulses.