DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.8
УДК: 621.385

Трансформация режимов излучения субтерагерцового многоволнового черенковского генератора от параметров пучка

В.И. Кошелев, А.А. Петкун, В.А. Чазов

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Россия, Томск,

Статья поступила в редакцию 19 октября 2026 г.

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования многоволнового черенковского генератора в диапазоне частот 264-269 ГГц с использованием 2.5D гибридного электромагнитного кода без учета омических потерь. Электродинамическая система генератора содержала две секции замедляющей структуры с внутренним диаметром 36 мм, разделенные трубой дрейфа, и дифракционный отражатель. Расстояния между отражателем и замедляющей структурой, а также длина трубы дрейфа были постоянными. В численных экспериментах варьировались: радиус пучка, энергия электронов, ток пучка и магнитное поле соответственно в пределах 17,4-17,75 мм, 280-650 кэВ, 3-8 кА и 1-7 Тл. Исследована трансформация режимов излучения. Переход от автомодуляционного к стабильному режиму с увеличением мощности после синхронизации продольных резонансов реализуется в узком диапазоне энергии электронов. Показано, что переход от стабильного к автомодуляционному режиму возможен при уменьшении магнитного поля и увеличении энергии электронов при отношении тока пучка к стартовому току примерно равным двум и обусловлен перестройкой резонансов.

Ключевые слова: многоволновой черенковский генератор, продольные электромагнитные резонансы, релятивистский электронный пучок, субтерагерцовое излучение.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2026-0011).

Автор для переписки: Кошелев Владимир Ильич, vi.koshelev@hcei.ru

Введение

Одной из важных задач релятивистской высокочастотной электроники является увеличение пиковой мощности излучения при высокой эффективности генерации. В рамках решения данной задачи был предложен и исследован многоволновой черенковский генератор (МВЧГ) в 3 см и 8 мм диапазонах длин волн [1-5]. Замедляющая структура МВЧГ содержала две секции сверхразмерного ($D/\lambda >> 1$, где D – диаметр, λ – длина волны излучения) периодического волновода, разделенные трубой дрейфа того же диаметра. Число диафрагм с одинаковыми периодами d в первой секции (N_1) было существенно больше, чем во второй (N_2). Для селекции частоты использовалось взаимодействие электронного пучка и электромагнитного поля вблизи высокочастотной границы полосы пропускания моды TM_{01} (π-вид колебаний). В первой секции осуществляется модуляция электронов по скоростям. В трубе дрейфа электроны группируются в сгустки, а во второй секции отдают энергию в электромагнитное поле.

Наличие трубы дрейфа в МВЧГ приводит к существенным различиям относительно взаимодействия пучка и поля в генераторе поверхностной волны (ГПВ) [6-9], в котором используется сверхразмерная односекционная замедляющая структура. Разделение функций в секционированной замедляющей структуре МВЧГ позволило существенно увеличить эффективность генерации излучения по сравнению с ГПВ. Труба дрейфа в МВЧГ является многофункциональной и существенно влияет на характеристики излучения [10-12].

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что важную роль в процессе взаимодействия пучка и поля в сверхразмерных замедляющих структурах вблизи верхней границы полосы пропускания моды TM_{01} играют продольные электромагнитные резонансы [9, 10, 13, 14]. Возбуждение продольных резонансов в сверхразмерной односекционной замедляющей структуре было исследовано теоретически и экспериментально [15].

Для повышения стабильности выходного излучения МВЧГ предложено использовать биериодические замедляющие структуры [16, 17]. Это позволило существенно расширить область стабильной генерации излучения относительно изменений параметров электронного пучка и магнитного поля. Возможное объяснение полученных результатов связано с синхронизацией продольных и поперечных резонансов поля [18]. В последующих исследованиях МВЧГ для уменьшения мощности излучения в сторону катода было предложено использовать дифракционный отражатель [17, 19], устанавливаемый между катодом и первой секцией замедляющей структуры.

Излучение на выходе МВЧГ является радиально поляризованным с минимумом мощности на оси. Важной задачей является получение линейно поляризованного излучения в МВЧГ с максимумом мощности на оси диаграммы направленности. Это достигалось при использовании азимутально-неоднородной замедляющей структуры [20, 21]. Теоретически и экспериментально показана возможность сканирования волновым пучком линейно поляризованного излучения в одной плоскости при смещении оси азимутально-неоднородного электронного пучка относительно оси азимутально-неоднородной замедляющей структуры [22].

Численное моделирование возбуждения моды TE_{11} в релятивистских черенковских генераторах с азимутально-неоднородными замедляющими структурами с целью получения линейно поляризованного излучения выполнены в работах [23, 24]. Отметим, что линейно поляризованное излучение можно получить также при инжекции эллиптического электронного пучка в сверхразмерную цилиндрическую замедляющую структуру [5]. Это обусловлено

преимуществом в возбуждении таким пучком несимметричной моды TE_{11} относительно моды TM_{01}.

В настоящее время большое внимание уделяется генерации мощного черенковского излучения в субтерагерцовом (100-300 ГГц) и терагерцовом (0,3-3 ТГц) диапазонах частот. В экспериментах [25-31] использовались односекционные замедляющие структуры с параметром сверхразмерности D/λ до 40. Наряду с цилиндрическими замедляющими структурами исследовались и плоские структуры с ленточным пучком [32]. В субтерагерцовом диапазоне полученная в экспериментах мощность излучения достигала десятки мегаватт. В релятивистской сильноточной электронике под мощным излучением понимается 100 МВт и более. Движение в этом направлении является предметом дальнейших исследований.

Ранее [33] нами были выполнены численные исследования в субтерагерцовом диапазоне частот (263-269 ГГц) трех вариантов МВЧГ с дифракционным отражателем и разным количеством диафрагм в секциях: N_1 = 16, 20, 24 и N_2 = 24, 20, 16. Полное число диафрагм в замедляющей структуре $N_1 + N_2$ было постоянным и равным 40. Длина трубы дрейфа в расчетах была постоянной и равной L_{dr} = 3,2 мм. Изменялось расстояние между отражателем и первой секцией в пределах L_r = 0,28-1,72 мм. Параметр сверхразмерности D/λ = 32.

Моделирование генераторов проводилось с использованием разработанного 2.5D компьютерного кода [34]. Численные эксперименты были выполнены для выбранных двух средних радиусов трубчатого пучка r_b = 17,45 и 17,65 мм и двух значений энергии электронов W_e = 300 и 400 кэВ при постоянном магнитном поле B = 3 Тл. Были выделены три режима взаимодействия пучка и поля: стабильный, автомодуляционный и переходной. Из расчетов следует, что при использовании дифракционного отражателя оптимальным по мощности излучения является МВЧГ с электродинамической системой, где число диафрагм в первой секции (N_1 = 16) меньше, чем во второй секции (N_2 = 24).

Целью данной работы является детальное исследование субтерагерцового МВЧГ с оптимальной электродинамической системой в широком диапазоне параметров пучка. Основной задачей было изучение влияния продольных электромагнитных резонансов на трансформацию режимов взаимодействия пучка и поля.

1. Электродинамическая система МВЧГ

Геометрия электродинамической системы МВЧГ показана на рис. 1. Электродинамическая система с внутренним диаметром D = 36 мм содержит дифракционный отражатель с 6 диафрагмами и две секции замедляющей структуры с числом диафрагм 16 и 24 соответственно. В дифракционном отражателе период и высота прямоугольных диафрагм равны соответственно d_r = 0,56 мм и h_r = 0,15 мм. Геометрия дифракционного отражателя была выбрана по результатам исследований [35]. В замедляющей структуре использовались прямоугольные диафрагмы, период и высота которых, равны соответственно d = 0,46 мм и h = 0,125 мм. Расстояние между дифракционным отражателем и первой секцией замедляющей структуры, а также длина трубы дрейфа между секциями были постоянными и равными соответственно L_r = 0,28 мм и L_{dr} = 3,2 мм. Частота верхней границы полосы пропускания моды TM_{01} бесконечного периодического волновода (d = 0,46 мм) равна 269,43 ГГц и соответствует энергии электронов W_e = 397,5 кэВ. В электродинамическую систему инжектировался трубчатый электронный пучок с толщиной 0,3 мм и временем нарастания тока (напряжения на диоде U_d) 0,5 нс.

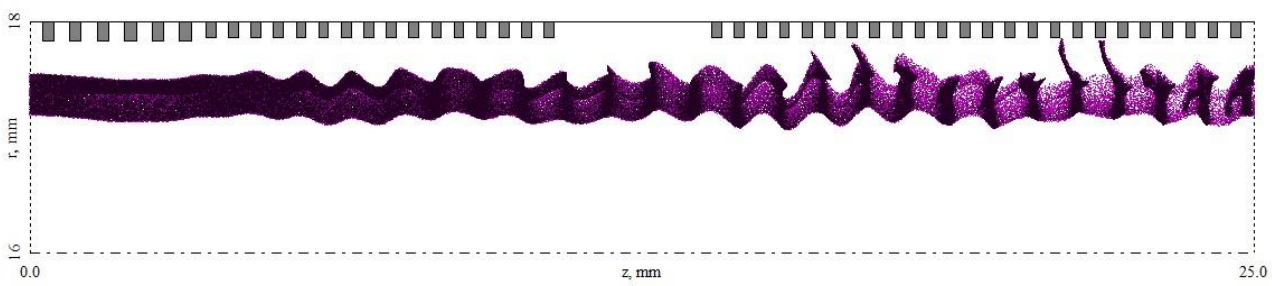


Рис. 1. Электродинамическая система МВЧГ с электронным пучком (r_b = 17,45 мм, I_b = 5 кА, W_e = 295 кэВ, B = 3 Тл, t = 6 нс).

Численное моделирование МВЧГ проводилось с использованием 2.5D компьютерного кода [34]. В расчетах использовались четыре продольных электромагнитных резонансов R_n (n = 1, 2, 3, 4), отсчитываемых от частоты верхней границы полосы пропускания моды TM_{01}. Предварительно были оценены параметры резонансов: частота F_n, добротность Q_n, норма N_e и структура поля. Параметры резонансов показаны в Таблице 1. Здесь же для резонансов приведено отношение мощности вперед к полной мощности в электродинамической системе без пучка. Структура продольной компоненты электрического поля E_z (r, z) для четырех резонансов показана на рис.2.

Таблица 1. Параметры продольных электромагнитных резонансов.

Резонанс	F, ГГц	Q	N_e, В^2 см	λ, мм	D/λ	P^+/P, %
R_1	268,361	1045,06	117,08	0,1117	32,225	91,84
R_2	267,219	1514,88	40,56	0,11219	32,088	83,602
R_3	265,1834	420,08	51,83	0,11305	31,844	83,587
R_4	262,315	317,01	21,418	0,11429	31,4996	68,479

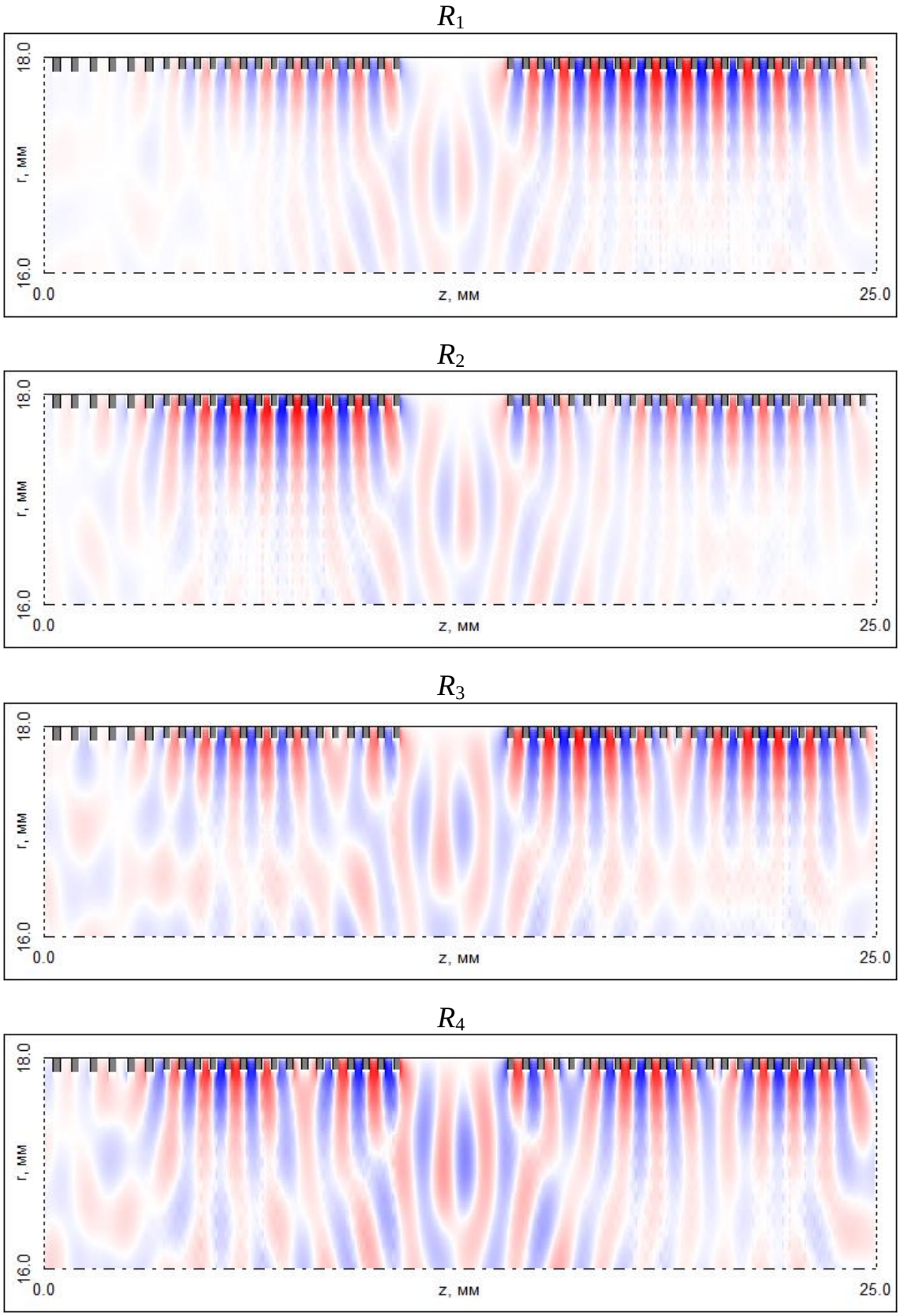


Рис. 2. Структура продольной компоненты электрического поля E_z резонансов $R_1 - R_4$.

В численных экспериментах варьировались значения r_b = 17,4-17,75 мм, W_e = 280-650 кэВ, I_b = 3-8 кА, B = 1-7 Тл. При этом оценивались амплитуды резонансов u_n, мгновенные частоты резонансов f_i, частота синхронизации резонансов f_s, а также спектр резонансов $S_n(f)$ и частота максимума спектра излучения f_0. Амплитуда резонансов u_n являются безразмерной величиной, и характеризует во сколько раз возрастает напряженность электромагнитного поля во время генерации излучения. Мощность излучения вперед P^+, назад P^-, а также полная мощность $P = P^+ + P^-$ оценивались с помощью методики [36].

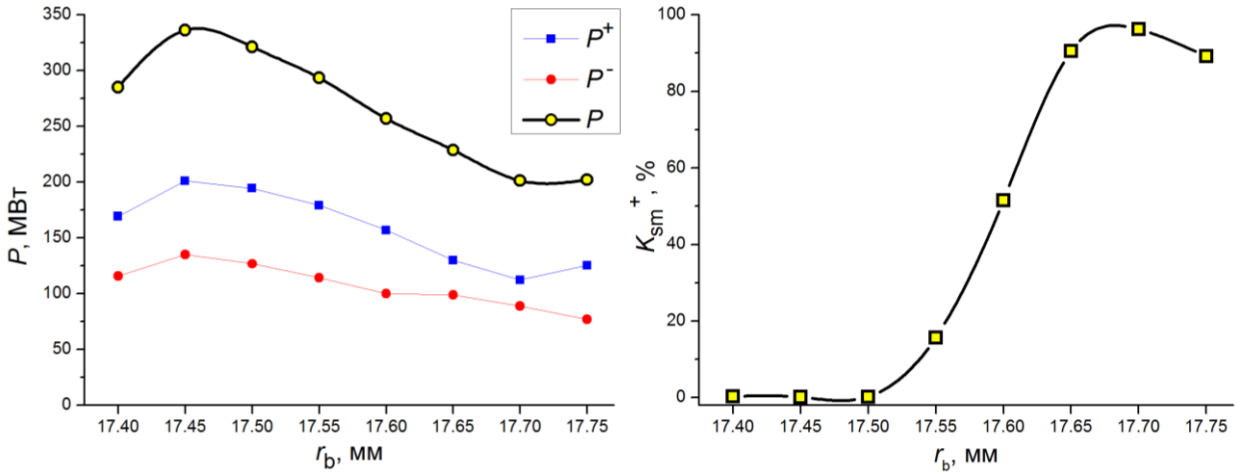
Мощность излучения в численных экспериментах оценивается как среднее значение $P = (P_{max} + P_{min})/2$ и указывается после выхода на стационарное значение. Коэффициент автомодуляции мощности излучения $K_{sm} = (P_{max} - P_{min})/P_{max}$. В стабильном режиме $P_{max} = P_{min} = P$. В автомодуляционном режиме при $P_{min} = 0$ получаем K_{sm} = 100 %, а среднее значение мощности излучения, приводимое на рисунках, $P = P_{max}/2$. Мощность выходного излучения распределялась по модам круглого волновода TM_{0m} (m = 1-32).

Для анализа режимов излучения оценивались стартовые токи генерации. За стартовый ток I_{st} принимался ток пучка, при котором полная мощность излучения достигала примерно 1 МВт к моменту времени t = 10 нс.

2. Влияние радиуса пучка на характеристики излучения

Первоначально рассмотрим результаты исследований влияния радиуса пучка на характеристики излучения при постоянных I_b = 5 кА, W_e = 300 кэВ, B = 3 Тл. Зависимости мощности излучения (P, P^+, P^-) и коэффициента автомодуляции мощности вперед от радиуса электронного пучка показаны на рис. 3а, б. Из полученных результатов следует, что стабильный режим наблюдается при r_b = 17,4-17,5 мм. При r_b = 17,55 мм возникает автомодуляция мощности излучения (рис. 3б). Стартовые токи генерации излучения при r_b = 17,45 и 17,55 мм равны соответственно 2,4 и 0,9 кА. Таким образом, увеличение среднего радиуса пучка на 0,1 мм при толщине пучка 0,3 мм приводит к увеличению отношения тока пучка к стартовому току I_b/I_{st} от 2,08 до 5,55.

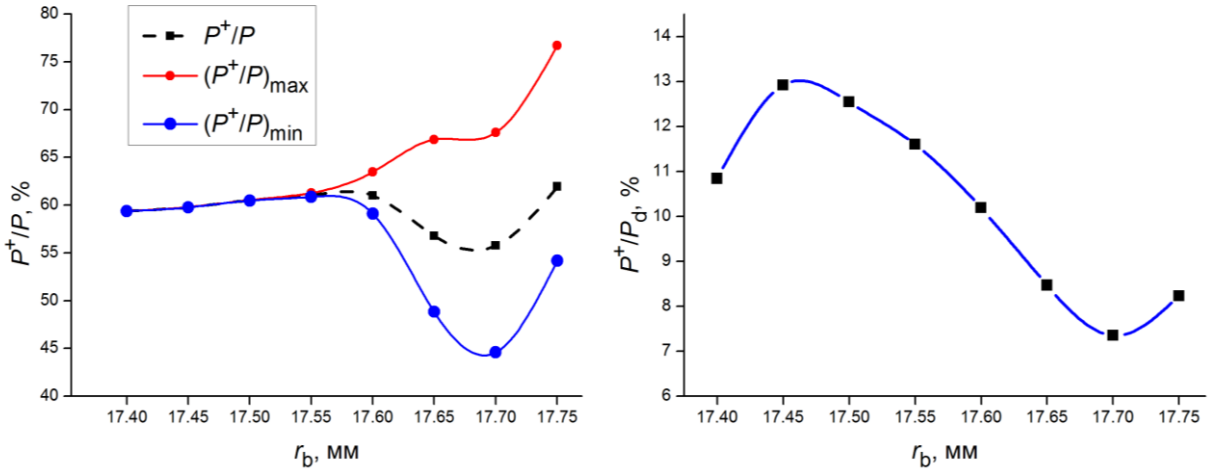
Отметим, что время задержки генерации излучения уменьшается от 12 до 0,7 нс при увеличении радиуса пучка от 17,4 до 17,7 мм.



(а) (б)

Рис. 3. Зависимости мощности излучения (а) и коэффициента автомодуляции мощности излучения вперед (б) от радиуса пучка.

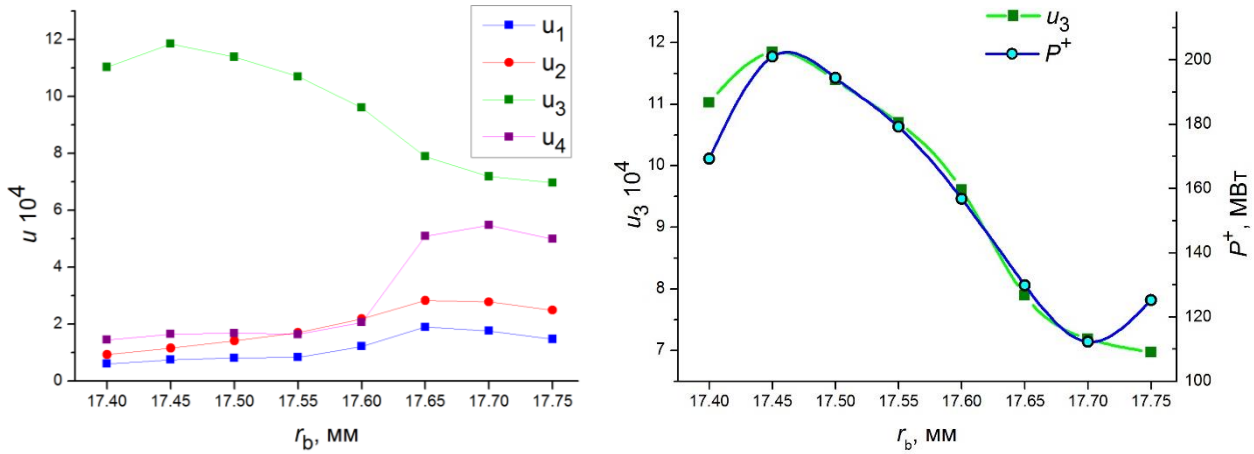
На рис. 4а, б показаны зависимости отношения мощности излучения вперед к полной мощности (P^+/P) и мощности пучка в диоде (P^+/P_d) от радиуса. Здесь $P_d = I_b U_d$, а напряжение на диоде U_d оценивалось с учетом провисания потенциала между пучком и внутренней поверхности электродинамической системы. Максимум эффективности генерации излучения вперед $P^+/P_d = 13$ % и достигается при $r_b = 17{,}45$ мм (рис. 4б).



(а) (б)

Рис. 4. Зависимости доли мощности излучения вперед (а) и эффективности генерации излучения вперед (б) от радиуса пучка.

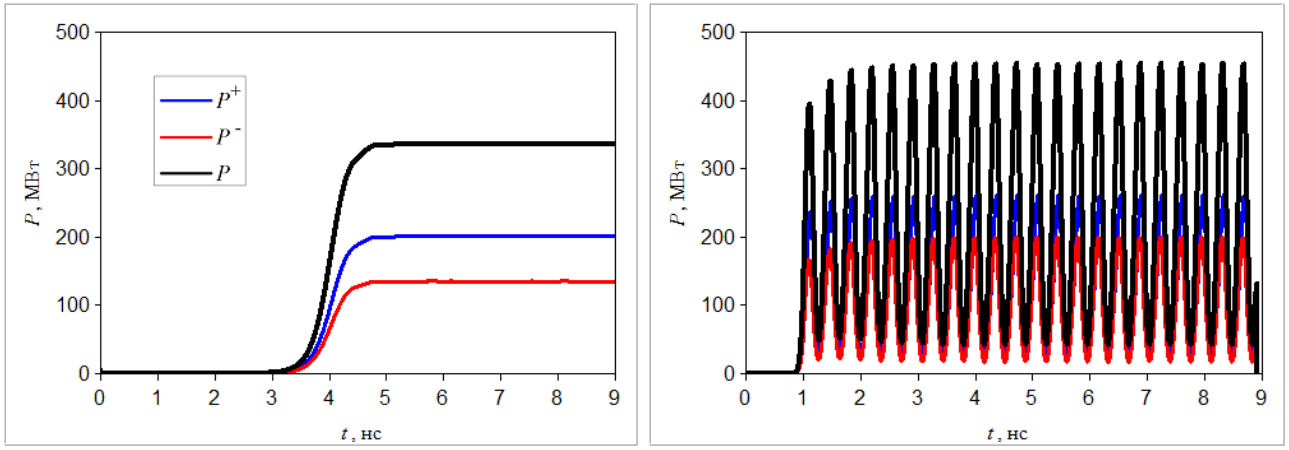
Для понимания роли продольных резонансов в режимах излучения на рис. 5а приведены зависимости амплитуд резонансов от радиуса пучка. Видно, что при стабильном режиме (r_b = 17,4-17,5 мм) амплитуда третьего резонанса R_3 превалирует. В автомодуляционном режиме (r_b = 17,55-17,75 мм) амплитуды резонансов сближаются по величине. На рис. 5б показаны зависимости амплитуды третьего резонанса u_3 и мощности вперед P^+ от радиуса пучка. Видна корреляция зависимостей (r_b = 17,45-17,7 мм), что указывает на определяющую роль резонанса R_3 в генерации излучения.



(а) (б)

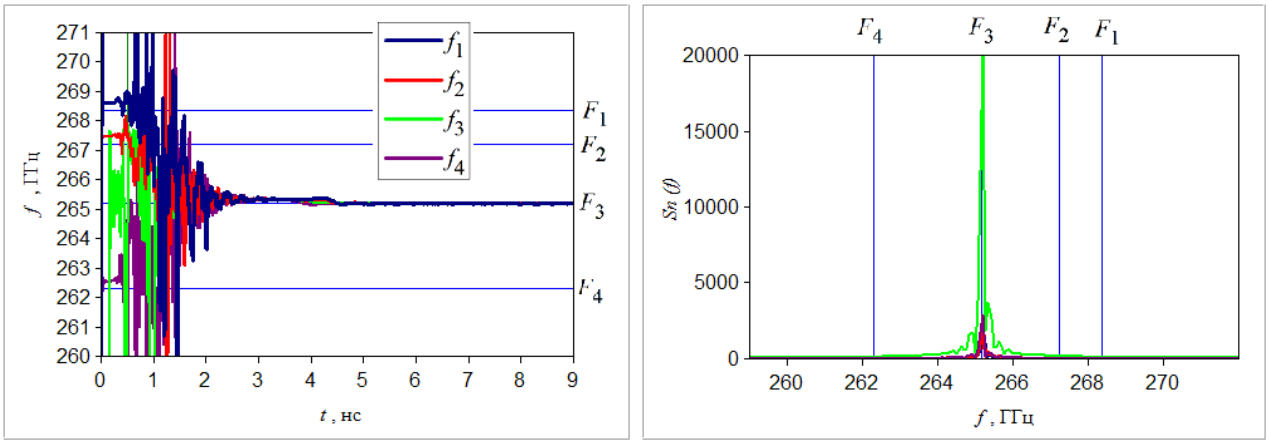
Рис. 5. Зависимости амплитуд резонансов (а), а также амплитуды третьего резонанса и мощности излучения вперед (б) от радиуса пучка.

Осциллограммы мощности излучения (P, P^+, P^-) для стабильного (r_b = 17,45 мм) и автомодуляционного (r_b = 17,65 мм) режимов излучения показаны на рис. 6а, б. На рис. 7а, б показаны зависимость мгновенных частот резонансов от времени и спектр резонансов для стабильного режима. Видно, что мгновенные частоты резонансов f_i синхронизуются на одной частоте f_s = 265 ГГц (рис. 7а). При этом спектр излучения $S_n(f)$ узкий (рис. 7б). Зависимость мгновенных частот резонансов от времени и спектр резонансов для автомодуляционного режима показаны на рис. 8а, б. Мгновенные частоты f_i осциллируют, спектр излучения $S_n(f)$ расширяется и появляются боковые лепестки.



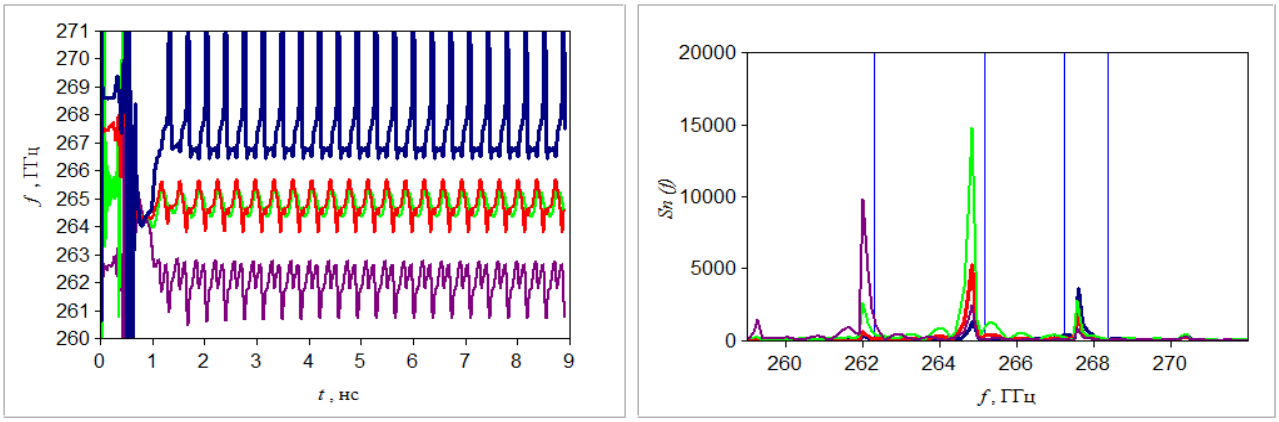
(а) (б)

Рис. 6. Осциллограммы мощности излучения для стабильного (r_b = 17,45 мм) (а) и автомодуляционного (r_b = 17,65 мм) (б) режимов излучения.



(а) (б)

Рис. 7. Зависимость мгновенных частот резонансов от времени (а) и спектр резонансов (б) для стабильного режима излучения (r_b = 17,45 мм).



(а) (б)

Рис. 8. Зависимость мгновенных частот резонансов от времени (а) и спектр резонансов (б) для автомодуляционного режима излучения (r_b = 17,65 мм).

3. Перестройка резонансов от энергии электронного пучка

По результатам исследований, представленных выше, мы выбрали радиус электронного пучка $r_b = 17{,}45$ мм и выполнили численные эксперименты при вариации энергии электронов. Расчеты проводились при постоянных значениях тока пучка $I_b = 5$ кА и магнитного поля $B = 3$ Тл. Зависимости мощности излучения (P, P^+, P^-) и доли мощности вперед (P^+/P) от энергии электронов пучка показаны на рис. 9а, б. На зависимостях мощности излучения от энергии электронов (рис. 9а) видны четыре максимума при $W_e = 295$, 395, 480 и 600 кэВ. Отношение P^+/P (W_e) достигает 77 % при энергии электронов 420 кэВ (Рис. 9б).

Для выделения режимов излучения были получены зависимости коэффициента автомодуляции мощности излучения вперед и назад от энергии электронов (рис. 10а). Здесь можно выделить области стабильного излучения ($K_{sm} = 0$), а также низкой ($K_{sm} < 20$ %) и глубокой ($K_{sm} > 50$ %) автомодуляции излучения. На рис. 10б показаны амплитуды резонансов для исследованного диапазона энергии электронов. Из сравнения приведенных на рис. 10а и 10б результатов следует, что в стабильном режиме превалирует один резонанс. При сближении амплитуд резонансов наблюдается автомодуляционный режим. Отметим, что изменение энергии электронов в пределах 280-390 кэВ приводит к увеличению частоты излучения в пределах 264,5-268.5 ГГц. Мгновенные частоты резонансов f_i синхронизуются, спектр $S_n(f)$ узкий и частота синхронизации f_s близка к частоте максимума спектра излучения f_0. В автомодуляционном режиме спектр излучения расширяется, появляются боковые лепестки аналогично рис. 8б.

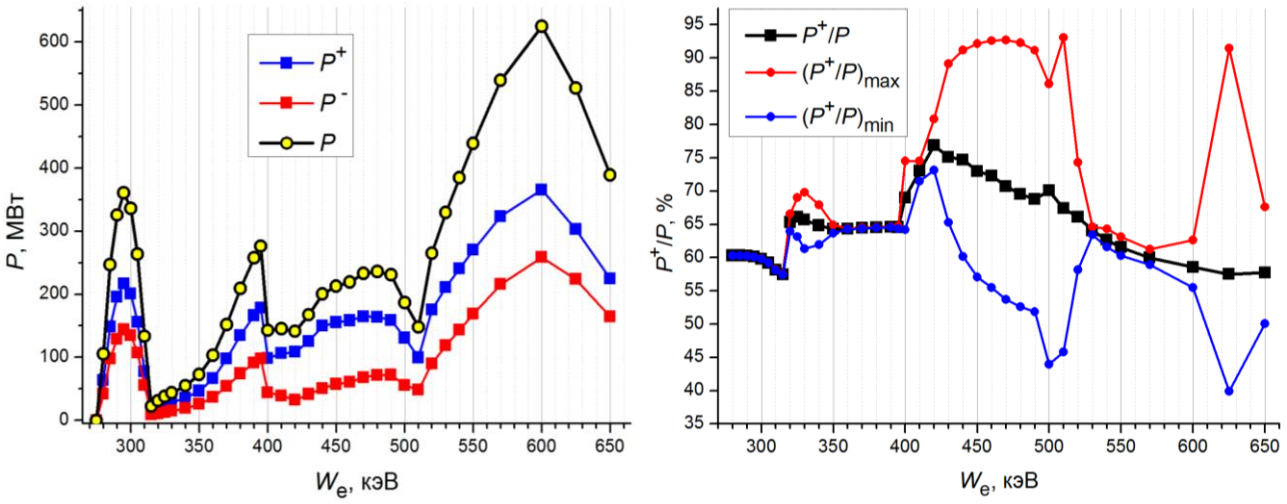
В детальных исследованиях ($W_e = 390$-400 кэВ) вблизи энергии электронов, соответствующей верхней границы полосы пропускания моды TM_{01} ($W_e = 397{,}5$ кэВ), был обнаружен переходной режим излучения от автомодуляционного к стабильному режиму с увеличением мощности после синхронизации резонансов при $W_e = 395$ кэВ (рис. 11а). При $W_e = 390$ кэВ режим излучения стабильный, осциллограммы мощности излучения аналогичны,

приведенным на рис. 6а. При увеличении энергии электронов от 395 кэВ до 400 кэВ реализуется режим с небольшой автомодуляцией мощности излучения (рис. 11б). Таким образом, переходной режим излучения существует в очень узком диапазоне энергии электронов и не представляет практического интереса.

При W_e = 510 кэВ получен автомодуляционный режим с K_{sm} = 100 %, соответствующие осциллограммы показаны на рис. 12а. Небольшое увеличение энергии электронов до W_e = 540 кэВ приводит к существенному уменьшению модуляции мощности излучения (рис. 12б).

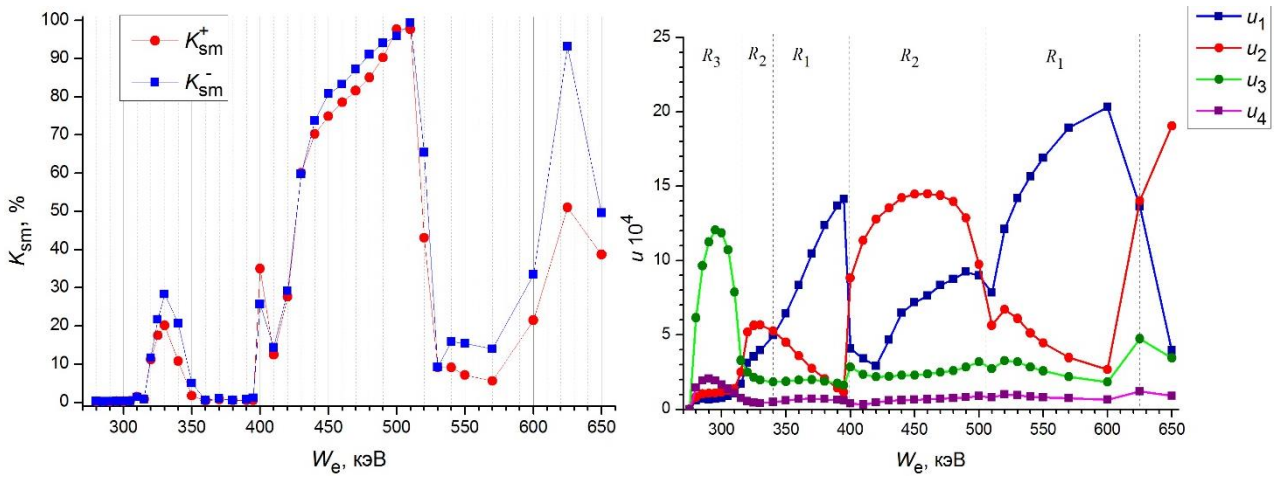
Представлялось интересным сравнить стартовые токи генерации в стабильном режиме и автомодуляционном режиме. В стабильном режиме (W_e = 300 кэВ, 3 Тл) величина I_{st} = 2,4 кА. В автомодуляционном режиме (W_e = 510 кэВ, 3 Тл) I_{st} = 2,6 кА. Таким образом, отношения тока пучка (5 кА) к стартовому току в обоих режимах близкие и составляют I_b/I_{st} = 2,08 и 1,92. Отсюда следует, что трансформация режимов излучения в МВЧГ при изменении энергии электронов обусловлена соотношением амплитуд резонансов, а не отношением тока пучка к стартовому току генерации.

На рис. 13 приведена зависимость эффективности генерации мощности излучения вперед (P^+/P_d) от энергии электронов. Максимум эффективности в стабильном режиме достигает 14 % при энергии электронов 295 кэВ.



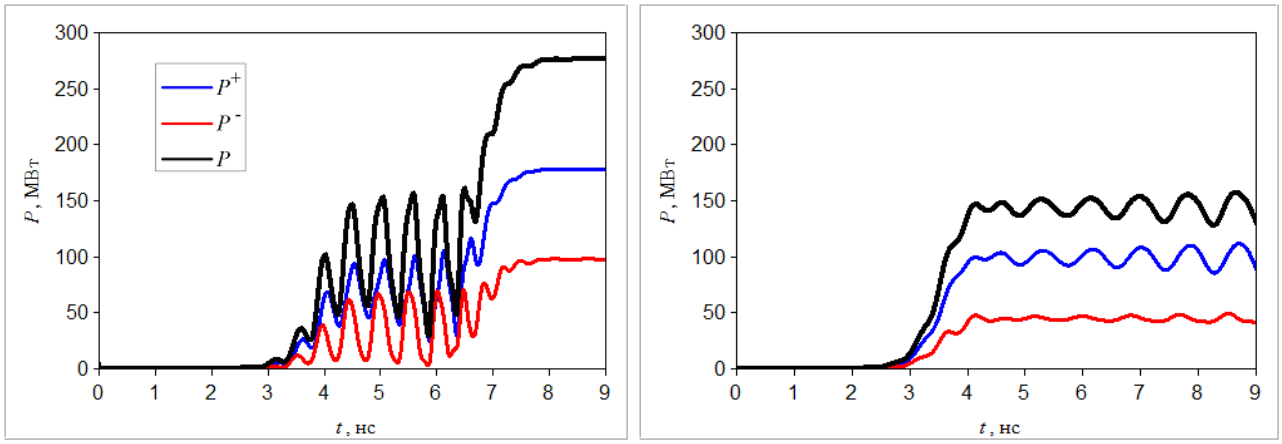
(а) (б)

Рис. 9. Зависимости мощности излучения (а) и доли мощности вперед (б) от энергии электронов пучка.



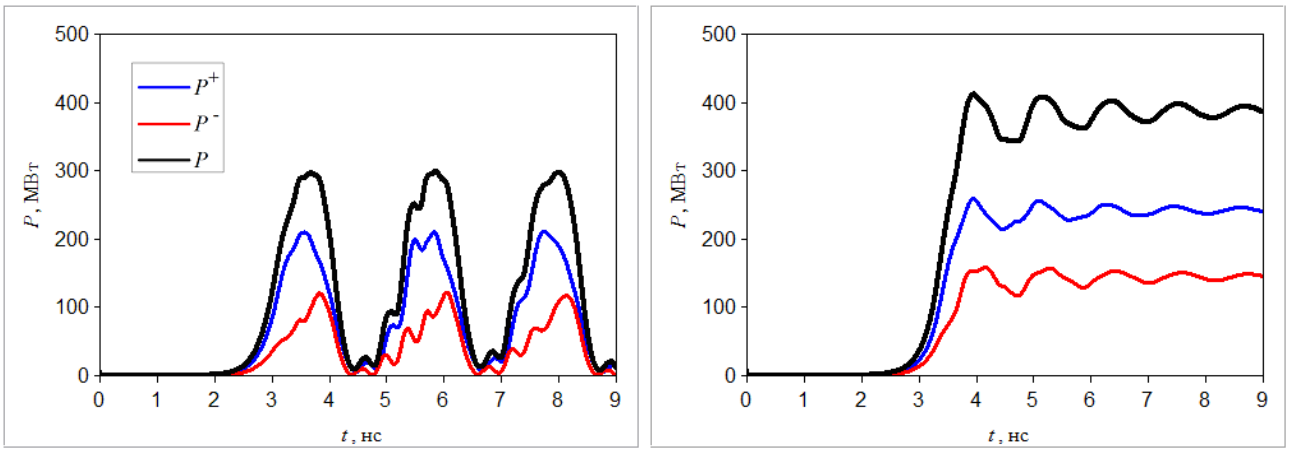
(а) (б)

Рис. 10. Зависимости коэффициента автомодуляции мощности излучения вперед и назад (а) и амплитуд резонансов (б) от энергии электронов пучка.



(а) (б)

Рис. 11. Осциллограммы мощности излучения при энергии электронов пучка 395 (а) и 400 кэВ (б).



(а) (б)

Рис. 12. Осциллограммы мощности излучения при энергии электронов пучка 510 (а) и 540 кэВ (б).

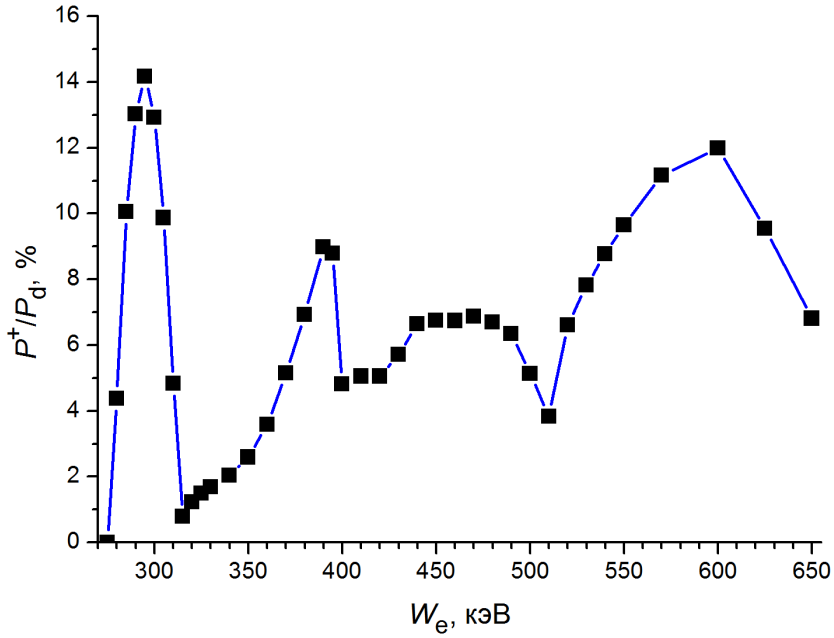


Рис. 13. Зависимость эффективности генерации мощности излучения вперед от энергии электронов пучка.

4. Влияние тока пучка и магнитного поля на режимы излучения

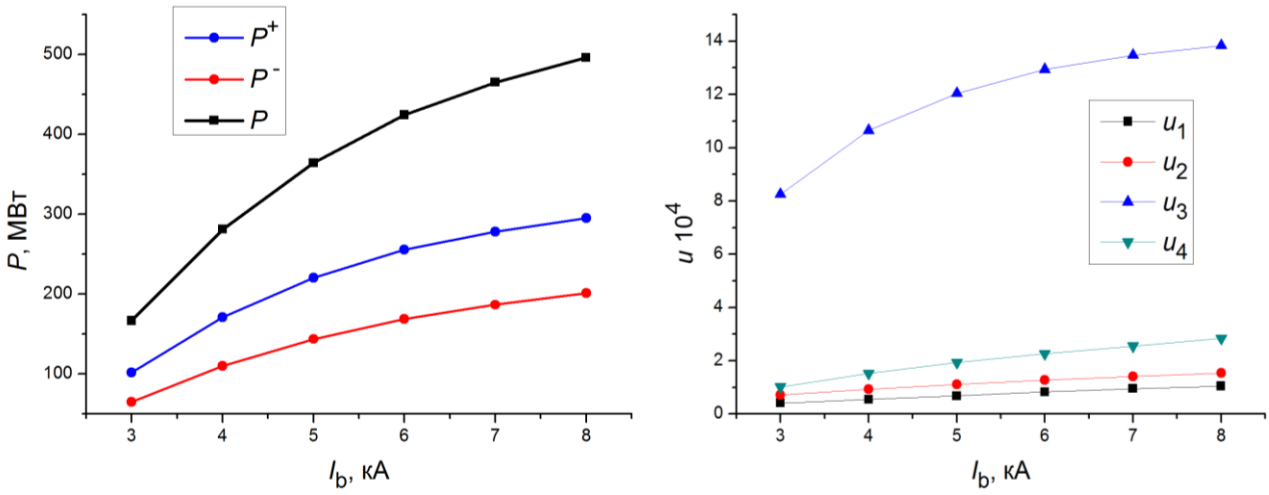
По результатам исследований, представленных выше, мы выбрали радиус электронного пучка r_b = 17,45 мм и энергию электронов W_e = 295 кэВ. Первоначально рассмотрим влияние тока пучка на режимы излучения при B = 3 Тл. На рис. 14а, б приведены зависимости мощности излучения (P, P^+, P^-) и амплитуд резонансов (R_1 – R_4) при изменении тока пучка в пределах I_b = 3-8 кА. Стартовый ток генерации I_{st} = 2,3 кА. Режим излучения стабильный, мгновенные частоты резонансов синхронизуются и f_s уменьшается с ростом тока пучка в пределах 265,16-264,92 ГГц Отношение I_b/I_{st} достигает 3,48. Амплитуда третьего резонанса R_3 существенно превышает амплитуды резонансов R_1, R_2 и R_4 (рис. 14б).

На рис. 15 показаны зависимости доли мощности (P^+/P) и эффективности генерации (P^+/P_d) излучения вперед от тока пучка. С ростом тока величина P^+/P падает незначительно и составляет (61,2-59,4) %. Максимум эффективности генерации излучения вперед P^+/P_d = 14,5 % достигается при токе пучка вблизи I_b = 4,5 кА. При этом отношение I_b/I_{st} равно примерно двум.

Исследования влияния магнитного поля (B = 1-7 Тл) на режимы излучения выполнены при постоянных r_b = 17,45 мм, W_e = 295 кэВ и I_b = 5 кА. Стабильный режим генерации излучения реализуется в диапазоне В = 1,5-7 Тл. При уменьшении магнитного поля до 1 Тл наблюдается автомодуляционный режим с коэффициентом K_{sm} = 81.4 %. Стартовый ток генерации при уменьшении магнитного поля от 3 до 1 Тл изменяется от 2,3 до 2 кА. Соответственно отношение I_b/I_{st} увеличивается незначительно от 2,17 до 2,5. Причина перехода от стабильного режима (рис. 1) к автомодуляционному обусловлена резким расширением сгустков электронного пучка до поверхности электродинамической системы при генерации мощного излучения в магнитном поле B = 1 Тл (рис. 16). Амплитуды резонансов R_3 и R_4 становятся близкими. Наблюдаются осцилляции амплитуд всех резонансов R_1 – R_4 во время генерации излучения.

Ниже приводятся результаты исследований стабильного режима излучения в диапазоне B = 1,5-7 Тл. На рис. 17а, б приведены зависимости мощности излучения (P, P^+, P^-) и доли мощности излучения вперед (P^+/P) от магнитного поля. Основной рост мощности наблюдается при увеличении магнитного поля от 2 до 3,5 Тл (рис. 17а). При B > 3,5 Тл величина P^+/P практически постоянна и достигает 65 % (рис. 17б).

На рис. 18а, б показаны зависимости эффективности генерации излучения вперед (P^+/P_d), частот синхронизации f_s и максимума спектра излучения f_0 от магнитного поля. Величина P^+/P_d возрастает с ростом магнитного поля и достигает 17 % при B = 3,5 Тл и 19 % при B = 7 Тл (рис. 18б). Частоты f_s и f_0 близки по величине и изменяются в пределах 264,8-265,4 ГГц. На кривых, приведенных на рис. 17а и рис. 18а, наблюдается провал вблизи B = 2 Тл. На кривых, приведенных на рис. 17б и рис. 18б, наблюдается провал вблизи B = 2,5 Тл. Причины этого неясны.



(а) (б)

Рис. 14. Зависимости мощности излучения (а) и амплитуд резонансов (б) от тока электронного пучка (W_e = 295 кэВ, B = 3 Тл).

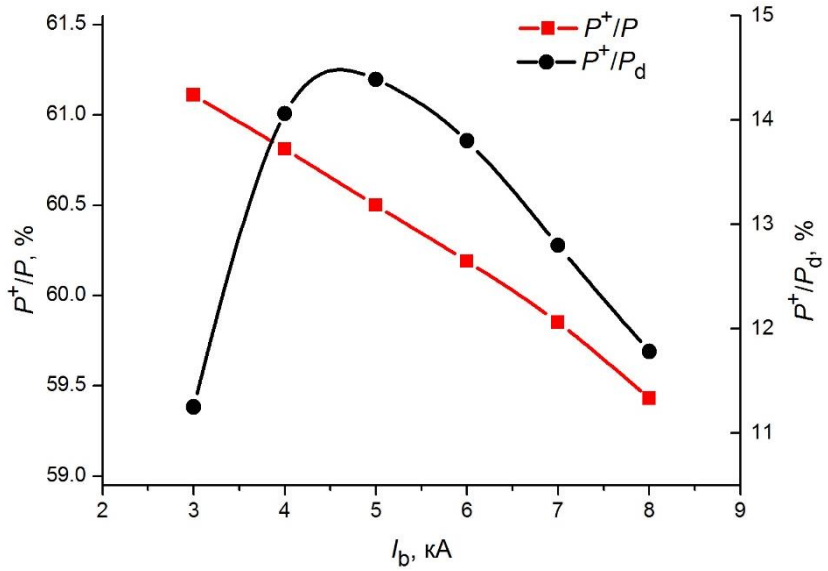


Рис. 15. Зависимости доли мощности и эффективности генерации излучения вперед от тока пучка (W_e = 295 кэВ, B = 3 Тл).

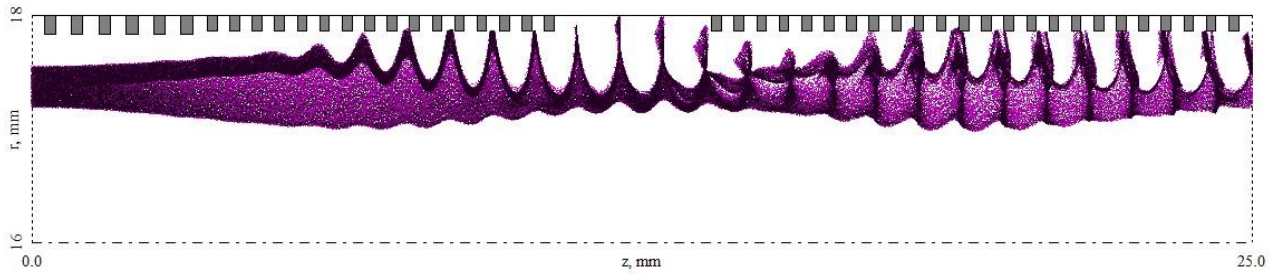
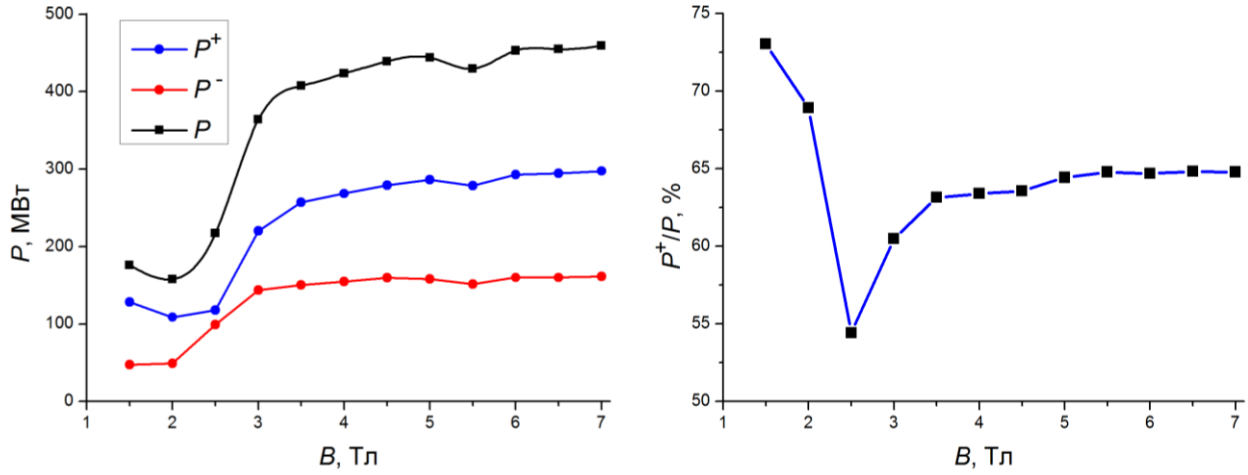
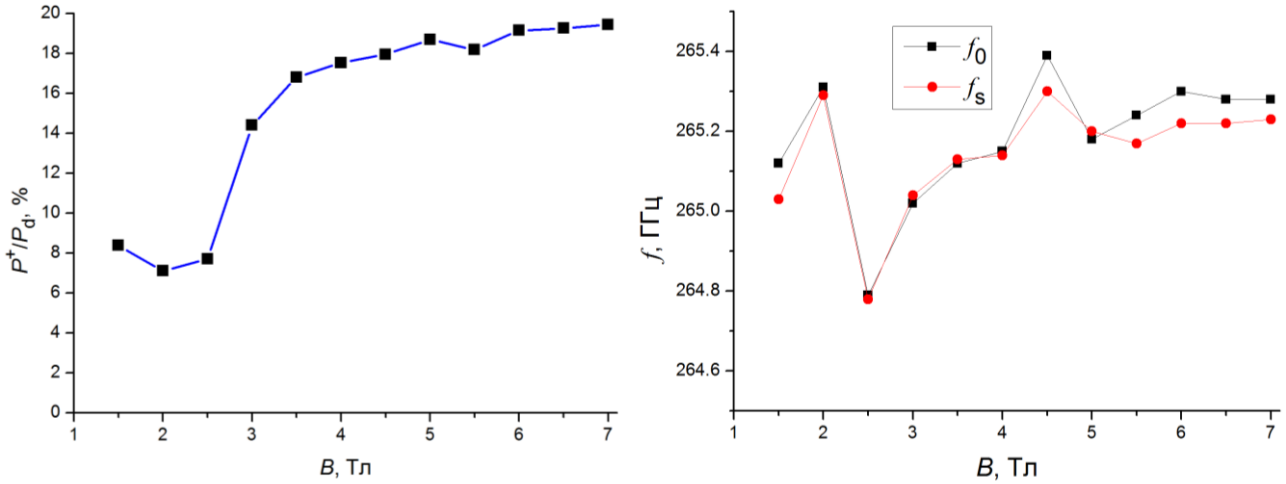


Рис. 16. Электродинамическая система МВЧГ с электронным пучком (r_b = 17,45 мм, I_b = 5 кА, W_e = 295 кэВ, B = 1 Тл, t = 8 нс).



(а) (б)

Рис. 17. Зависимости мощности излучения (а) и доли мощности излучения вперед (б) от магнитного поля (W_e = 295 кэВ, I_b = 5 кА).



(а) (б)

Рис. 18. Зависимости эффективности генерации излучения вперед (а), частот синхронизации f_s и максимума спектра излучения f_0 (б) от магнитного поля. (W_e = 295 кэВ, I_b = 5 кА).

Заключение

Численно исследованы режимы взаимодействия электронного пучка и электромагнитного поля в субтерагерцовом многоволновом черенковском генераторе с параметром сверхразмерности $D/\lambda = 32$. Показано, что в исследованном диапазоне параметров пучка и магнитного поля трансформация режимов генерации излучения в МВЧГ при постоянном радиусе пучка (r_b = 17,45 мм) обусловлена соотношением амплитуд резонансов при близких значениях

отношения тока пучка к стартовому. Увеличение радиуса пучка приводит к резкому увеличению отношения I_b/I_{st} и, как следствие, переходу стабильного к автомодуляционному режиму. Доля мощности излучения вперед и соответственно эффективность генератора может быть увеличена при уменьшении мощности излучения назад за счет применения комбинации дифракционного и плоского отражателя.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRM-2026-0011).

Литература

1. Бугаев С.П, Канавец В.И., Климов А.И. и др.. Релятивистский многоволновой черенковский генератор // Письма в журнал технической физики. – 1983. –Т. 9. – № 22. – С. 1385– 1389.
2. Bugaev S.P., Cherepenin V.A., Kanavets V.I., et al. Relativistic multiwave Cherenkov generators // IEEE Trans. Plasma Science. – 1990. – V. 18. – No. 3. – P. 525 – 536. https://doi.org/10.1109/27.55924
3. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. – Новосибирск: Наука, 1991.
4. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Пикунов В.М., Чернявский И.А. Взаимодействие релятивистского электронного пучка и электромагнитного поля в сверхразмерных секционированных замедляющих структурах вблизи высокочастотной границы полосы пропускания // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 41. – № 2. – С. 228–235.
5. Кошелев В.И., Попов В.А. Релятивистские многоволновые черенковские генераторы миллиметрового диапазона длин волн // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45. – № 9. – С. 1109–1113.

6. Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Плетюшкин В.А. Возбуждение поверхностных волн релятивистским электронным потоком в диафрагмированном волноводе // Журнал технической физики. – 1981. – Т. 51. – № 8. – С. 1727–1730.
7. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Пикунов В.М., Чернявский И.А. Взаимодействие релятивистского электронного пучка и электромагнитного поля в сверхразмерном периодическом волноводе вблизи высокочастотной границы полосы пропускания // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40. – № 9. – С. 1440–1449.
8. Vlasov A.N., Shkvarunets A.G., Rodgers J.G., et al. Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator // IEEE Trans. Plasma Science. – 2000. – V. 28. – No. 3. – P. 550 – 560. https://doi.org/10.1109/27.887671
9. Koshelev V.I., Deichuly M.P., Petkun A.A. Multimode interaction and multiwave radiation in Cerenkov generators with overmoded slow-wave structures // Proc. SPIE. – 2001. – V. 4371. – P. 166–176. https://doi.org/10.1117/12.436928
10. Deichuly M.P., Koshelev V.I., Chernyavsky I.A., Petkun A.A. Drift-tube influence on the MWCG operating regimes // Proc. SPIE. – 1997. – V. 3158. – P. 298–307. https://doi.org/10.1117/12.279439
11. Корниенко В.Н., Черепенин В.А. Влияние длины трубы дрейфа на структуру поля излучения в многоволновом черенковском генераторе // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 12/2. – С. 216–219.
12. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Чазов В.А. Селекция симметричных и несимметричных мод в сверхразмерной замедляющей структуре многоволнового черенковского генератора // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 7. – С. 105–110. https://doi.org/10.17223/00213411/62/7/105

13. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Чернявский И.А. Влияние резонансных свойств сверхразмерных замедляющих структур на самовозбуждение черенковских сверхвысокочастотных устройств вблизи высокочастотной границы полосы пропускания // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44. – № 6. – С. 736–742.
14. Koshelev V.I., Deichuly M.P., Petkun A.A. Interaction of longitudinal modes in MWCG // Proc. SPIE. – 1999. – V. 3702. – P. 128–133. https://doi.org/10.1117/12.351206
15. Заславский В.Ю., Проявин М.Д., Соболев Д.И. и др. Наблюдение возбуждения собственных мод в резонаторах поверхностной волны цилиндрической геометрии // Известия вузов. Радиофизика. – 2023. – Т. 66. – № 1. – С. 21–31. https://doi.org/10/52452/00213462_2023_66_01_21
16. Deichuly M.P., Koshelev V.I. MWCG with biperiodic output section // Proceedings of 12th International Conference on High-Power Particle Beams. – Haifa, Israel, 1998. – V. 2. – P. 768–771.
17. Koshelev V.I., Deichuly M.P. Optimization of electron beam – electromagnetic field interaction in multiwave Cerenkov generators // AIP Conference Proceedings. – 1999. – V. 474. – P. 347–359.
18. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Чазов В.А. Объемные резонансы симметричных гибридных волн в сверхразмерной биериодической замедляющей структуре // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 8. – С. 103–108.
19. Deichuly M.P., Koshelev V.I., Pikunov V.M., et al. Multiwave Cerenkov generator with nonuniform slow-wave structures // AIP Conference Proceedings. – 2002. – V. 650. – P. 287–290. https://doi.org/10.1063/1.1530855
20. Дейчули М.П., Кошелев В.И. Многоволновой черенковский генератор с линейно поляризованным излучением // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. – № 8. – С. 829–841.

21. Deichuly M.P. and Koshelev V.I. Multiwave Cherenkov generator with inhomogeneous slow-wave structure and electron beam // Russian Physics Journal. – 2023. – V. 66. – No. 6. – P. 677–782. https://doi.org/10.1007/s11182-023-02992-3
22. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Петкун А.А. Сканирование линейно поляризованного волнового пучка при двухмодовом взаимодействии в многоволновом черенковском генераторе // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2020. – Т. 63. – № 2. – С. 22–29. https://doi.org/10.17223/00213411/63/2/22
23. Xiao R., Zhang Y., Li J., et al. Direct excitation of TE11 mode in a relativistic backward wave oscillator // Physics of Plasmas. – 2016. – V. 23. – No. 2. – P. 023108. http://dx.doi.org/10.1063/1.4941971
24. Liu M., Zhang J., Jiang W., et al. A compact K-band slow-wave structure inspired by a slot-ring metamaterial for high power microwave source // AIP Advances. – 2026. – V. 16. – P. 065011. https://doi.org/10.1063/5.0321320
25. Yalandin M.I., Shpak V.G., Shunailov S.A., et al. Generation of powerfull subnanosecond microwave pulses in the range of 38–150 GHz // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2000. – V. 28. – No. 5. – P. 1615–1619. https://doi.org/10.1109/27.901243
26. Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S., et al. Generation of subterahertz superradience pulses based on excitation of a surface wave by relativistic electron bunches moving in oversized corrugated waveguides // Physical Review Letters. – 2016. – V. 117. – No. 20. – P. 204801. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.204801
27. San M.T., Ogura K., Kubota K., et al. Study of operation of oversized backward wave oscillator for broadband terahertz radiation // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – V. 46. – No. 3. – P. 530–538. https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2796559

28. Hu L., Song R., Ma G., et al. Experimental demonstration of a 0.34-THz backward-wave oscillator with a sinusoidally corrugated slow-wave structure // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2018. – V. 65. – No. 6. – P. 2149–2155. https://doi.org/10.1109/TED.2018.2805699
29. Wang J., Wang G., Wang D., et al. A megawatt-level surface wave oscillator in Y-band with large oversized structure driven by annular relativistic electron beam // Scientific Reports. – 2018. – V. 8. – P. 6978. https://doi.org/10.1038/s41598-018-25466-w
30. Li S., Wang G., and Wang D. Relativistic surface wave oscillator in Y-band with large oversized structures modulated by dual reflector // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – P. 336. https://doi.org/10.1038/s41598-019-55525-9
31. Peskov N.Yu., Zaslavsky V.Yu., Denisenko A.N., et al. Powerfull oversized surface-wave oscillators of sub-THz/THz band based on 2D slow-wave structures of cylindrical configuration // Proceedings 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). – Moscow, Russia, 2024. – P. 435–438. https://doi.org/10.1109/RMC62880.2024.10846821
32. Заславский В.Ю., Палицын А.В., Родин Ю.В. и др. Планарные релятивистские генераторы поверхностной волны субтерагерцового диапазона на основе двумерно-периодических замедляющих структур // Известия РАН. Серия физическая. – 2025. – Т. 89. – № 9. – С. 1443–1449. https://doi.org/10/7868/S30346460525090148
33. Koshelev V.I., Chazov V.A., Petkun A.A. Regimes of electron beam and electromagnetic field interaction in multiwave Cherenkov generators of G-band // Abstracts of 10th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2026). – Tomsk, Russia, 2026. – P.62.
34. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Петкун А.А., Чазов В.А. Синхронизация электромагнитных резонансов в терагерцовом черенковском генераторе // Известия вузов. Физика. – 2023. – Т. 66. – № 6. – С. 92–103. https://doi.org/10.17223/00213411/66/6/11

35. Chazov V.A., Koshelev V.I., Petkun A.A. A diffraction reflector influence on the radiation characteristics of multiwave Cherenkov generator in the G-band // Russian Physics Journal. – 2025. – V. 68. – No. 7. – P. 1030–1036. https://doi.org/10.1007/s11182-025-03525-w

36. Koshelev V.I., Chazov V.A., Petkun A.A. Terahertz radiation modes in Cherenkov generator with single-section slow-wave structure // Russian Physics Journal. – 2025. – V. 68. – No. 1. – P. 177–187. https://doi.org/10.1007/s11182-025-03417-z

Для цитирования:

Кошелев В.И., Петкун А.А., Чазов В.А. Трансформация режимов излучения субтерагерцового многоволнового черенковского генератора от параметров пучка // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 10. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.10.8