

УЧЕТ ТРЕХМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕНЕРАТОРАХ ТИПА «КЛИНОТРОН»

ЧАСТЬ 2. АНАЛИЗ РЕАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
Окончание. Начало, т. 1(15), № 3

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: astis@ire.kharkov.ua*

С помощью программы «Клиноотрон», описанной в первой части, исследуется движение электронов в нескольких реальных приборах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Анализируются результаты численного исследования. Обсуждаются перспективы использования этой программы при разработке новых клинотронов. Ил. 8. Библиогр. 4 назв.

Ключевые слова: электроника, клиноотрон, трехмерность, взаимодействие, численный счет.

В первой части работы [1] описана методика численного исследования движения электронов в генераторах типа «клиноотрон», учитывающая трехмерное движение электронов в конечном фокусирующем магнитном поле. Для описания сложного пространственно-временного распределения высокочастотного (ВЧ) поля в замедляющей системе типа «гребенка» использовано строгое электродинамическое решение, в котором учитываются особенности полей на острых краях металлических элементов [2]. Для таких исследований разработана программа «Клиноотрон», пример работы которой приведен в первой части.

Во второй части работы с помощью программы «Клиноотрон» проведено исследование движения электронов в нескольких реальных клинотронах, выпускаемых Опытным производством ИРЭ НАН Украины. Эти приборы имеют унифицированную конструкцию и отличаются диапазоном генерируемых частот и выходной мощностью. Проводится анализ результатов численного исследования и оцениваются перспективы использования программы «Клиноотрон» для оптимизации режимов приборов и для разработки новых генераторов типа «клиноотрон». В частности, обсуждается возможность использования режима синхронизма электронов с пространственными гармониками больших номеров, что может быть перспективным при освоении коротковолновой части субмиллиметрового (субмм) диапазона волн.

1. Связь расчетных безразмерных параметров с экспериментальными параметрами. Результаты расчетов показали, что характер движения электронов в клинотроне в значительной мере определяется амплитудой ВЧ-поля в установившемся режиме. В уравнениях движения

используется безразмерная амплитуда напряженности электрического поля A

$$A = \frac{e}{m} \frac{E_0}{V_0 \omega}.$$

Для сравнения расчетов с реальными генераторами необходимо, хотя бы приближенно, связать между собой расчетные и экспериментальные параметры. Определяющим параметром клинотрона выбираем его выходную мощность. В реальных клинотронах этот параметр изменяется от нескольких десятков ватт в 8-мм диапазоне волн до нескольких единиц милливатт в субмм диапазоне. Для грубых оценок будем предполагать, что примерно половина генерируемой мощности идет в нагрузку, а половина расходуется на поддержание амплитуды ВЧ-поля в щелевых резонаторах гребенки. Щелевые резонаторы будем считать четвертьволновыми, изготовленными из меди с увеличением потерь в металле за счет шероховатости поверхности стенок в 1,6 раза (из справочников). Приближенно примем, что потери энергии в каждом из щелевых резонаторов гребенки одинаковые. При этих предположениях можно получить следующую оценочную формулу:

$$(E_0)^2 \approx \frac{5P}{NB\sqrt{\lambda}} 10^{12}, \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда однородной составляющей E_x -поля на «фаскыве» щелевого резонатора, В/м; P – выходная мощность, Вт; B – ширина замедляющей системы, мм; N – число резонаторов в гребенке; λ – длина волны генерируемых колебаний, мм.

Предполагая, что скорость электронов V_0 примерно равна скорости -1 -й простран-

ственной гармоники, получим приближенную формулу для оценки параметра A

$$A \approx 1,6 \frac{E_0 \lambda}{\sqrt{U}} 10^{-7}, \quad (2)$$

где E_0 – В/м; λ – мм; U – рабочее напряжение, В.

Численные оценки по этим двум приближенным формулам показывают, что безразмерная амплитуда A для реальных клинотронов может изменяться от значения $A \approx 0,1$ для мощных генераторов миллиметрового (мм) диапазона с выходной мощностью порядка сотни ватт до $A \approx 10^{-5}$ для генераторов субмм диапазона с выходной мощностью в единицы милливатт.

2. Некоторые результаты численного исследования. Достаточно полный учет многих факторов, влияющих на процессы в электронном приборе и, в частности, в генераторе типа «клинотрон», очень сложен и, по-видимому, в принципе невозможен. Задача теоретического исследования – выделить некоторые наиболее важные, по мнению исследователя, факторы и оценить их влияние путем анализа физических моделей. На данном этапе исследования клинотрона мы учитываем сложное трехмерное движение электронов в неоднородном ВЧ-поле вблизи самой поверхности периодической структуры, чего не проводилось ранее. Численное исследование позволяет проанализировать движение электронов отдельных тонких слоев ленточного электронного потока во времени и пространстве и определить как происходит энергообмен электронов с ВЧ-полем замедляющей системы. Далее мы приводим результаты такого анализа для нескольких наиболее типичных конструкций клинотронов мм и субмм диапазонов волн. Анализируются клинотроны, выпускаемые малыми сериями в Опытном производстве ИРЭ НАН Украины. Обычно в этих клинотронах использовалась замедляющая системы типа «гребенка» длиной 15...17 мм. Гребенка помещалась в прямоугольный волновод шириной 7,2 мм.

Первым проанализируем клинотрон 4-мм диапазона с выходной мощностью 5 Вт. Рабочее напряжение 4 кВ, фокусирующее магнитное поле 0,4 Тл, ширина гребенки 2,5 мм, период гребенки 0,4 мм, ширина щелевых резонаторов 0,2 мм, гребенка содержит 40 щелевых резонаторов, рабочая длина волны 4,2 мм, фазовый сдвиг волны на период гребенки равен $0,5\pi$. Считаем, что амплитуда поля в начале замедляющей системы нарастает от нуля на длине в 5 периодов гребенки. Оценки по формулам (1) и (2) дают для этого случая значение безразмерной амплитуды ВЧ-поля $A \approx 0,003$, отношение генерируемой частоты к циклотронной частоте $\omega/\Omega \approx 7$. Анализируется

движение электронов тонкого слоя с «прицельным расстоянием» 0,1 периода гребенки. На графике рис. 1 показано, как изменяется средний КПД электронного слоя от начальной скорости электронов (отнесенной к скорости -1 -й пространственной гармоники поля). Угол наклона вектора однородного магнитного поля к поверхности гребенки удобно характеризовать «прицельной длиной» – номером резонатора, считая от начала гребенки, на который попадут электроны, если нет ВЧ-поля. Для данного графика этот угол фиксирован и соответствует «прицельной длине» в 40 периодов гребенки. На графике рис. 2 показано, как изменяется средний КПД этого же тонкого слоя при изменении угла наклона магнитного поля. Начальная скорость электронов задана оптимальной (из предыдущего графика). Оптимальный угол наклона магнитного поля соответствует «прицельной длине» в 33 периода гребенки. Оптимальная начальная скорость электронов для такой «прицельной длины» осталась прежней – $V_0 = 1,035 V_{-1}$.

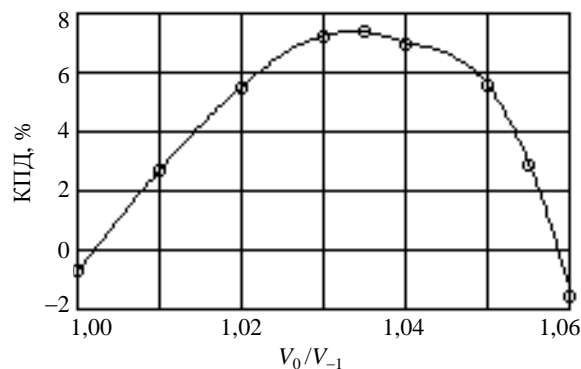


Рис. 1. Зависимость КПД тонкого электронного луча от начальной скорости электронов. «Прицельное расстояние» – 0,1 периода гребенки

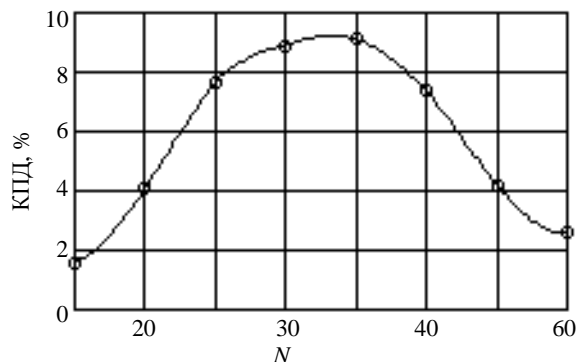


Рис. 2. Зависимость КПД тонкого электронного луча от «прицельной длины» (угла наклона магнитного поля). Прицельная длина – в периодах гребенки

Таким образом, по обоим этим параметрам (начальной скорости и углу наклона магнитного поля) имеются оптимальные значения, которые обеспечивают максимальный средний КПД.

Как движутся электроны анализируемого слоя в оптимизированном режиме, показано на рис. 3. Внизу – траектории 20 электронов с равномерным распределением по фазе влета в ВЧ-поле. Для наглядности масштаб по оси y сильно увеличен; начало траекторий на расстоянии $0,1$ периода гребенки. Вверху показано, как изменялся КПД каждого из этих электронов в процессе движения. Две метки справа показывают уровень КПД $\pm 5\%$. Средний КПД вычисленный при движении 100 электронов в слое, составляет $9,59\%$. Видно, что под влиянием поперечной составляющей электрического ВЧ-поля происходит движение электронов по существенно различным траекториям в зависимости от фазы влета электрона в ВЧ-поле. В прежних одномерных моде-

лях все электроны двигались по одной и той же траектории. Сравнение с одномерной моделью показывает, что и КПД отдельных электронов существенно различаются. Следует отметить, что оптимальная начальная скорость электронов мало отличается от скорости -1 -й пространственной гармоники поля. На рис. 4 и 5 показано, как движутся электроны этого же тонкого слоя при начальной скорости, отличной от оптимального значения. На рис. 4 начальная скорость меньше оптимальной и составляет $1,01$ скорости -1 -й пространственной гармоники; средний электронный КПД равен $2,7\%$. На рис. 5 начальная скорость больше оптимальной – $V_0 = 1,06 V_{-1}$. В этом случае средний КПД вообще отрицателен и равен $-1,54\%$.

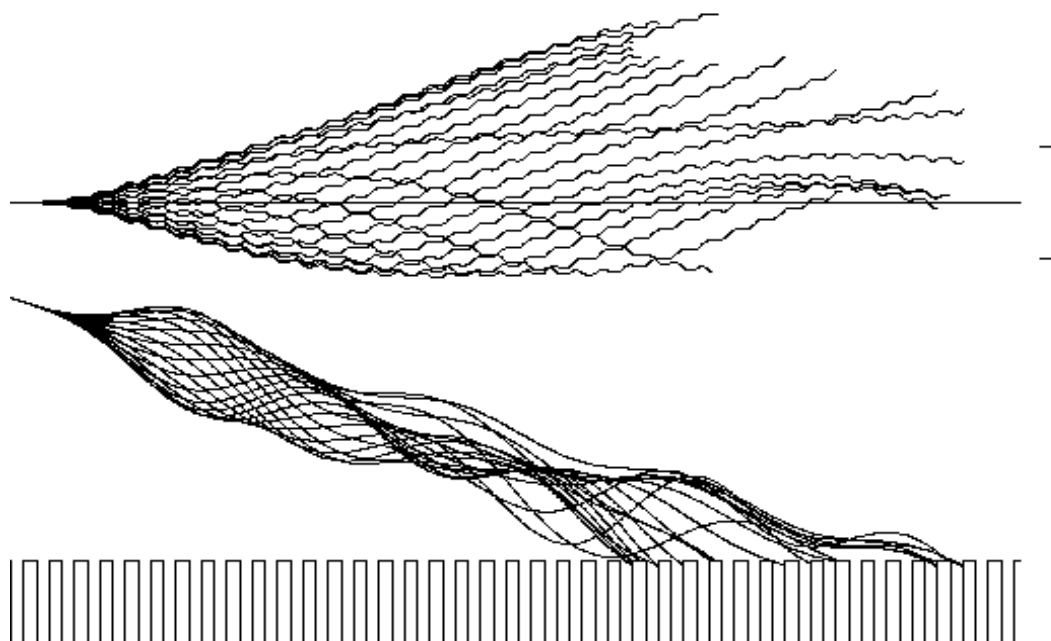


Рис. 3. Внизу – траектории 20 электронов тонкого луча в клинотроне 4-мм диапазона мощностью 5 Вт. Вверху – изменение КПД этих же электронов в процессе движения. Начальная скорость подобрана оптимальной

На рис. 6 показано, как изменяется средний электронный КПД для тонких слоев, которые проходят на разных расстояниях от поверхности гребенки, но под одинаковым углом к ней. Режим оптимизирован для слоя с прицельным расстоянием $0,1$ мм. Видно, что для пучка толщиной $0,15$ мм ($0,05 < y_0/L < 0,425$) средний КПД для всего пучка уменьшается примерно вдвое по сравнению с КПД для «прицельного» слоя и составляет примерно 5% .

Второй анализируемый прибор – мощный клинотрон 8-мм диапазона с выходной мощностью 40 Вт и рабочим напряжением 4,6 кВ. Гребенка содержит 20 щелевых резонаторов, ее ширина –

3,5 мм. Ширина щелевого резонатора – $0,5$ периода. Фокусирующее магнитное поле $0,3$ Тл. Фазовый сдвиг волны на период гребенки $0,6\pi$. Поле нарастает от нуля на протяжении 5 периодов гребенки. Оценка безразмерной амплитуды в этом случае дает значение $A \approx 0,02$. Отношение генерируемой частоты к циклотронной $\omega/\Omega \approx 4$. Вычисление показывает, что для тонкого электронного слоя с «прицельным расстоянием» в $0,1$ периода гребенки оптимальное значение начальной скорости отнесенное к скорости -1 -й пространственной гармоники равно $1,08$, а оптимальная «прицельная длина» – 19 периодов гребенки.

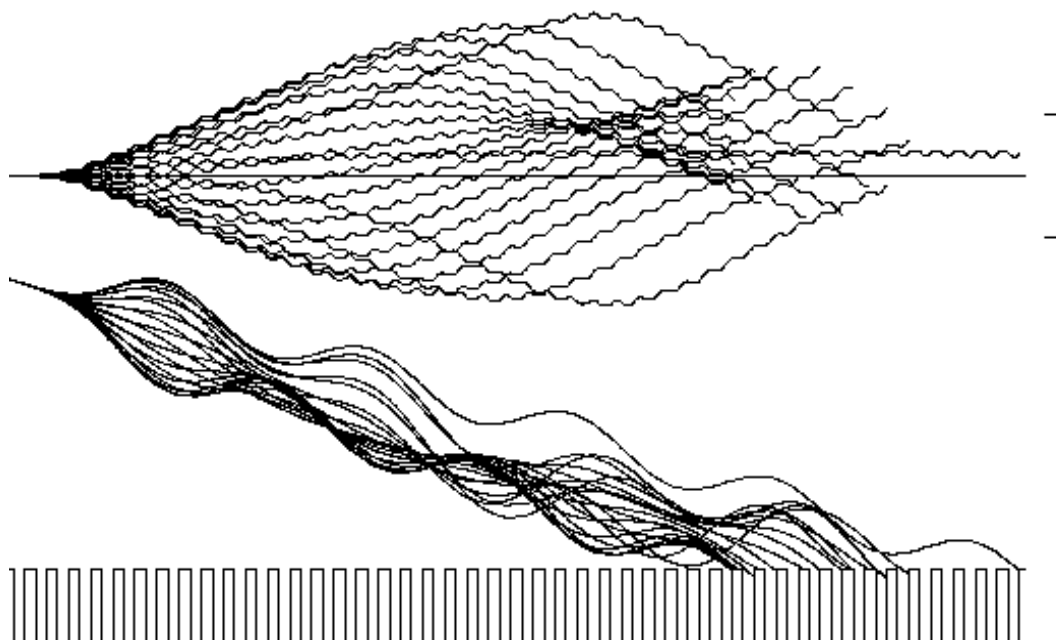


Рис. 4 . Внизу – траектории 20 электронов тонкого луча в клинотроне 4-мм диапазона мощностью 5 Вт. Вверху – изменение КПД этих же электронов в процессе движения. Начальная скорость меньше оптимальной

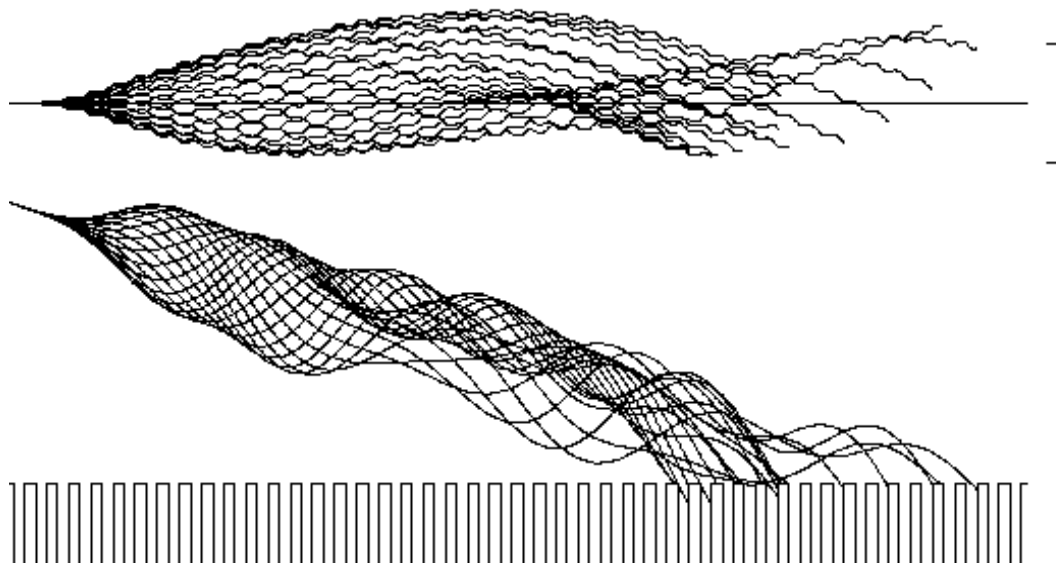


Рис. 5. Внизу – траектории 20 электронов тонкого луча в клинотроне 4-мм диапазона мощностью 5 Вт. Вверху – изменение КПД этих же электронов в процессе движения. Начальная скорость больше оптимальной

Движение электронов в этом режиме приведено в качестве примера работы программы «Клинотрон» в первой части работы на рис. 6, на котором показаны траектории 20 электронов тонкого слоя с «прицельным расстоянием» 0,1 периода гребенки. Режим оптимизирован по начальной скорости электронов и углу наклона магнитного поля. Вверху показано изменение КПД для этих электронов в процессе движения. Две метки справа показывают уровень $\text{КПД} = \pm 20\%$.

Средний КПД, вычисленный для 100 электронов в слое, составляет 21,23 %.

Интересно отметить, что в рассматриваемом случае электроны оседают на гребенку гораздо раньше, чем достигнут «прицельной длины». Более того, вычисления показывают, что все электроны слоя попадают на поверхность гребенки даже в том случае, если вектор магнитного поля будет параллелен поверхности гребенки.

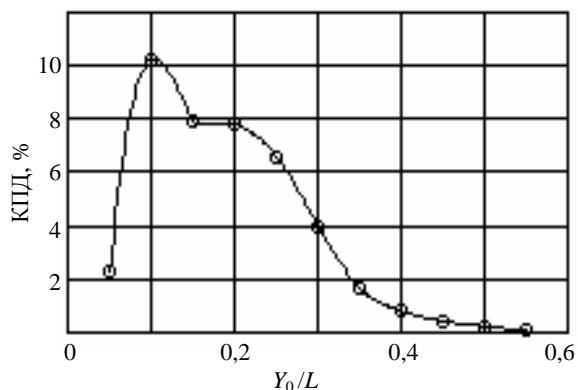


Рис. 6. Средний электронный КПД для лучей, которые идут на разном расстоянии от поверхности гребенки, но под одинаковым углом к ней. Режим оптимизирован, как на рис. 3

Следующий прибор – клинотрон субмм диапазона на длину волны 0,95 мм, с выходной мощностью 200 мВт и рабочим напряжением 5 кВ. Ширина гребенки 2,5 мм, она содержит 150 щелевых резонаторов. Фазовый сдвиг волны на период гребенки для клинотронов этого диапазона волн составляет $0,35\pi$. Фокусирующее магнитное поле имеет напряженность в 1 Тл. Оценка безразмерной амплитуды поля дает значение $A=0,0001$. Отношение генерируемой частоты к циклотронной $\frac{\omega}{\Omega} = 11$.

На рис. 7 внизу показаны траектории 20 электронов с «прицельным расстоянием» 0,1 периода гребенки. Сверху показано изменение КПД каждого электрона в процессе движения. Две метки справа соответствуют значениям КПД $\pm 3\%$. Режим оптимизирован по начальной скорости и углу наклона фокусирующего магнитного поля $V_0 = 1,007 V_{-1}$, «прицельная длина» – 150 резонаторов. Средний электронный КПД, вычисленный для 100 электронов в тонком слое, равен 1,77 %.

Отметим, что в таких маломощных приборах используется вся протяженная замедляющая система. ВЧ-поле очень слабое, и поэтому траектории электронов не сильно отличаются от одномерного движения. Электроны движутся почти синхронно с -1 -й пространственной гармоникой поля.

Программа «Клинотрон» позволяет исследовать и новые режимы, например, режим синхронизма электронов с пространственными гармониками больших номеров, который в перспективе мог бы использоваться при разработке генераторов в коротковолновой части субмм диапазона волн, так как позволяет увеличить период замедляющей системы в несколько раз. В качестве примера проведем анализ движения электронов в таком перспективном приборе, рассчитанном на работу в режиме синхронизма с -3 -й про-

странственной гармоникой поля гребенки. Выходную мощность прибора 2-мм диапазона примем равной 1 Вт, а рабочее напряжение 300 В (соответствующее напряжение для -1 гармоники было бы равно 4 кВ). Фазовый сдвиг волны на период гребенки $\varphi = 0,5\pi$. Ширина гребенки 2,5 мм, период 0,19 мм, гребенка содержит 24 щелевых резонатора. Амплитуда поля нарастет от нуля на протяжении трех периодов гребенки. Ширину щелевых резонаторов гребенки выбираем равной половине периода. Фокусирующее магнитное поле 0,4 Тл. Безразмерная амплитуда $A = 0,0012$. Отношение частот $\frac{\omega}{\Omega} = 13$. Для тонкого электронного слоя с «прицельным расстоянием» 0,1 периода гребенки получаются такие оптимальные параметры: начальная скорость $V_0 = 0,279 V_{-1}$, ($V_0 = 1,023 V_{-3}$), «прицельная длина» – 17 резонаторов. Средний электронный КПД, рассчитанный для 100 электронов, равен 7,78 %.

Траектории 20 электронов и изменение их КПД в процессе движения показаны соответственно внизу и сверху на рис. 8. Две метки справа показывают уровень КПД $\pm 5\%$. Следует отметить неожиданно большой электронный КПД при большом номере пространственной гармоники и большой ширине щелевых резонаторов; в экспериментах по исследованию подобных режимов обычно применялись гораздо более узкие щели для повышения уровня высшей гармоники [3]. На рисунке видно, что при медленном движении электронов они сильнее «чувствуют» структуру ВЧ-поля, чем при синхронизме с -1 -й гармоникой: изменение скорости электронов как бы повторяет распределение поля на периоде гребенки.

3. Анализ результатов численного исследования. Рассматривая на приведенных выше рисунках, как изменяется КПД каждого электрона в процессе движения вдоль замедляющей системы, можно понять, почему изменение угла наклона фокусирующего магнитного поля обеспечивает максимальное значение электронного КПД для рассматриваемого тонкого слоя электронов. При наклоне пучка подбирается оптимальный момент вывода электронов из взаимодействия с ВЧ-полем. На рис. 3 видно, что при этом распределение электронов по скоростям в момент попадания на гребенку максимально асимметрично – большинство электронов заторможено, а меньшая часть ускорена ВЧ-полем. При большем угле наклона электроны еще не успевают достаточно затормозиться ВЧ полем. При меньшем угле наклона некоторые из заторможенных электронов попадают на гребенку уже с большими скоростями и распределение электронов по скоростям становится более симметричным – средний КПД снижается.

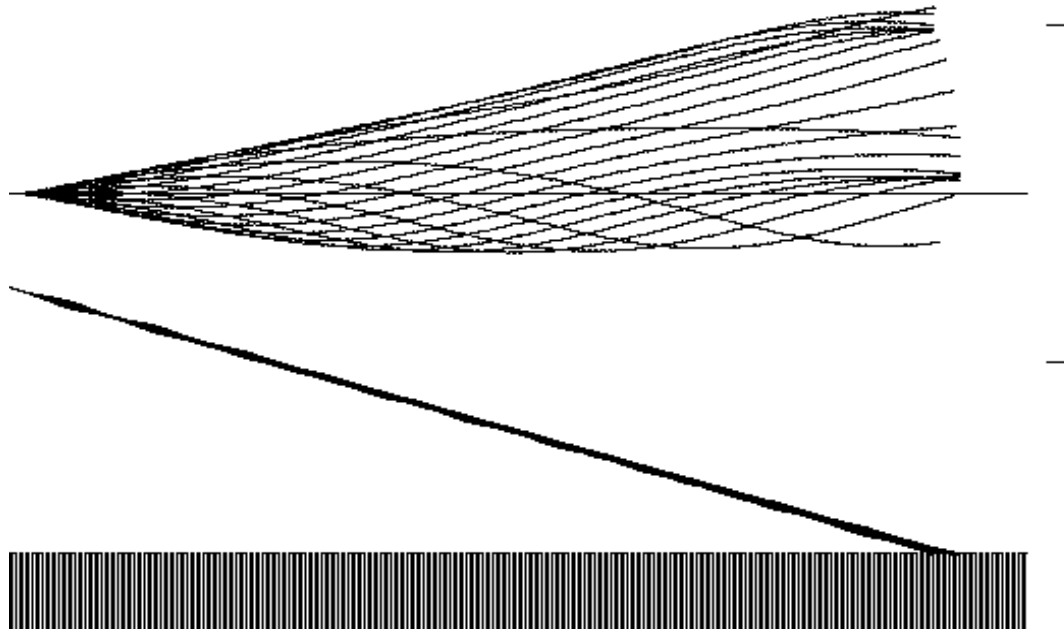


Рис. 7. Внизу – траектории 20 электронов тонкого луча в клинотроне субмм диапазона (0,95 мм) мощностью 200 мВт. Вверху – изменение КПД этих же электронов в процессе движения. Начальная скорость и угол наклона подобраны оптимальными

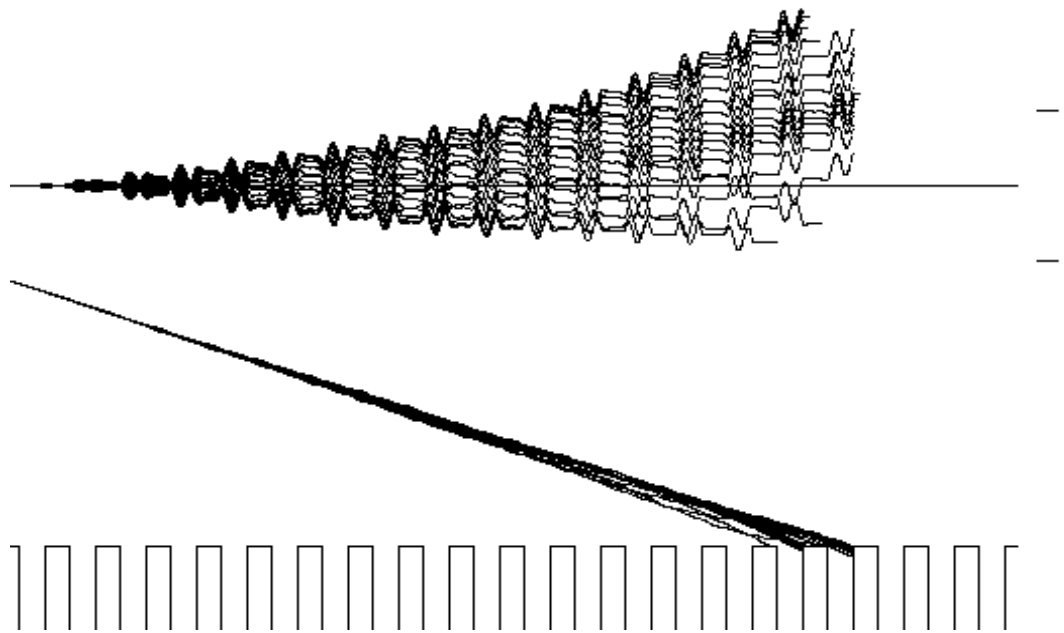


Рис. 8. Внизу – траектории 20 электронов тонкого луча в клинотроне, рассчитанном на работу в синхронизме с –3-й пространственной гармоникой поля (2 мм, 1 Вт). Вверху – изменение КПД этих же электронов в процессе движения. Параметры подобраны оптимальными

Хорошо прослеживается рост электронного КПД при увеличении амплитуды ВЧ-поля в замедляющей системе. К сожалению, рост амплитуды поля в рабочих режимах клинотронов мм и особенно субмм диапазонов волн ограничен плотностью тока, которую можно получить с катодов в реальных условиях. Следует учитывать,

что с ростом амплитуды поля возрастают потери энергии в металлических элементах замедляющей системы. Для компенсации этих потерь следует увеличивать удельную прикладываемую мощность, которая пропорциональна произведению плотности тока на рабочее напряжение. Толщина ленточного электронного пучка определяется той

областью над поверхностью гребенки, где еще существует заметное поле поверхностной волны, а эта область уменьшается пропорционально длине замедленной волны. Плотность тока в ограниченных по толщине ленточных пучках – естественный предел для увеличения удельной мощности, прикладываемой к прибору. Для компенсации уменьшения амплитуды ВЧ-поля следует увеличивать длину замедляющей системы. При этом слабые воздействия ВЧ-поля на электроны пучка постепенно вызывают сортировку электронов поперечным и продольным электрическим полем и их замедление (в среднем) продольным полем. Таким конструктивным решением удается получить хотя и малый, но положительный КПД.

Численное исследование показывает, что поперечное электрическое поле обычно вызывает постепенное приближение электронов к поверхности замедляющей системы. Как правило, под воздействием ВЧ-поля электроны оседают на поверхность гребенки намного раньше, чем без воздействия ВЧ-поля. Этот эффект тем заметнее, чем выше амплитуда поля. В субмм диапазоне волн, где амплитуда поля очень мала, электроны движутся почти как в одномерной модели. В мощных приборах мм диапазона электроны быстро оседают на гребенку, даже если фокусирующее магнитное поле параллельно поверхности замедляющей системы. Этот эффект, по-видимому, можно объяснить нарастанием амплитуды поля при приближении к поверхности гребенки. Двигаясь вдоль периодической структуры, электрон периодически попадает то в поле, которое отталкивает его от поверхности замедляющей системы, то в поле, которое его приближает (электроны движутся синхронно с -1 -й гармоникой, а не с основной). В среднем преобладает эффект притяжения к поверхности, так как поле нарастает при приближении к ней.

Анализируя результаты расчетов, отмечаем, что оптимальными являются режимы, при которых начальная скорость электронов лишь слегка превышает скорость рабочей пространственной гармоники. Чем меньше амплитуда ВЧ-поля, тем ближе оптимальная скорость к полному синхронизму с рабочей гармоникой. Здесь следует напомнить, что условие синхронизма с пространственной гармоникой физически означает лишь то, что электрон, двигаясь с такой скоростью будет проходить все периоды протяженной замедляющей системы при одной и той же фазе ВЧ-поля, что является необходимым условием группировки электронов и эффективного энергообмена с ВЧ-полем [4]. При этом сама гармоника может даже отсутствовать в математическом разложении сложного поля. Эффект близости к синхронному режиму может объясняться тем, что ам-

плитуды полей малы и заметное влияние поля на движение электронов проявляется лишь постепенно путем малых периодических воздействий. Для этого электроны должны длительное время двигаться в постоянной фазе ВЧ-поля.

Численные результаты расчета КПД показывают, что в клинотроне взаимодействие электронов с полем отличается от простой модели описания взаимодействия в приборах О-типа, в которой предполагалось, что поле представлено одной пространственной гармоникой и электроны двигаются, слегка обгоняя волну. Под воздействием продольного электрического поля электроны группируются в сгустки вблизи нулевой фазы поля и, поскольку их начальная скорость превышала скорость волны, они в среднем тормозятся полем. При этом электронный КПД ограничивается разностью начальной V_0 и синхронной с волной V скоростей электронов:

$$\text{КПД} = 1 - \left(\frac{V}{V_0} \right)^2. \quad (3)$$

Если электрон замедлится так, что его скорость станет меньше синхронной, он начнет ускоряться волной и отбирать энергию поля. Оценки оптимальных режимов клинотрона, полученные численным счетом, показывают, что электронный КПД, как правило, выше предельного значения, которое дает формула (3). Такой результат может объясняться тем, что в клинотроне подбирается оптимальный момент выхода электрона из взаимодействия с ВЧ-полем, когда электрон периодически то ускоряясь, то тормозясь ВЧ-полем, попадает на металл гребенки в тот момент, когда он максимально заторможен ВЧ-полем. При таком процессе электронный КПД может быть намного больше, чем при торможении в поле волны малой амплитуды.

Анализируя представленные результаты численного исследования, следует учитывать, что они описывают, по существу, максимально возможные значения электронного КПД. На практике трудно подвести достаточно плотный электронный пучок близко к поверхности гребенки из-за пульсаций границ пучка, вызванных пространственным зарядом электронов и особенностями электронно-оптической системы.

Выводы. Проведенное численное исследование взаимодействия электронного потока с ВЧ-полем в генераторе типа «клинотрон» показало заметные отличия результатов расчета при учете трехмерного движения электронов от более простых одномерных моделей (сравнение с одномерной моделью легко проводилось в используемой нами программе «Клинотрон» простым обращением в нуль поперечной составляющей электрического ВЧ-поля). Траектории электронов сильно различаются в зависимости от их фазы

влета в область ВЧ-поля. При средних значениях амплитуды ВЧ-поля электроны одного тонкого луча под влиянием поперечного электрического поля рассеиваются по значительной части поверхности протяженной замедляющей системы. Вычисленные значения среднего электронного КПД и оптимальные значения параметров, определяющие режим максимального КПД, заметно отличаются от значений, полученных в одномерной модели. Поэтому учет трехмерности движения электронов и реального сложного распределения полей в замедляющей системе – необходимое условие адекватного описания работы генератора типа «Клиноотрон», особенно мощных приборов.

Разработанная нами программа «Клиноотрон» позволяет учитывать многие параметры реальных приборов и по своим возможностям приближается к численному эксперименту. В данной работе мы ограничились лишь простейшими примерами анализа движения тонкого электронного слоя вблизи самой поверхности замедляющей системы. Анализируя движение электронов в нескольких тонких слоях сравнительно толстого ленточного пучка и вычисляя средний электронный КПД, с помощью этой же программы мы можем более полно описывать реальные приборы.

Перспективными для дальнейших исследований с помощью разработанной программы «Клиноотрон» следует назвать подробный и полный анализ влияния на работу этих генераторов широкого набора параметров, значения которых на начальном этапе исследования мы задавали такими, как в некоторых разработанных ранее приборах. К таким исследованиям можно отнести следующие:

- влияние моды колебаний – фазового сдвига волны на период гребенки;
- влияние геометрии периодической структуры – изменения отношения ширины щелевых резонаторов к периоду гребенки;
- анализ режимов синхронизма электронов с различными пространственными гармониками;
- учет особенностей электронно-оптической системы – наличия поперечной составляющей скорости электрона еще до входа в ВЧ-поле;
- анализ движения электронов при различных распределениях амплитуды ВЧ-поля по длине замедляющей системы.

Принципиально сложными для разработанной нами программы «Клиноотрон» являются учет пространственного заряда электронного пучка и анализ режима установления колебаний.

Несмотря на принятые упрощения физической модели, численные результаты проведенных нами исследований с учетом большого числа

тонких слоев в ленточном электронном пучке показывают достаточно хорошее совпадение расчетных значений электронного КПД и оптимальных значений параметров с экспериментальными данными. Поэтому программа «Клиноотрон» является полезным и эффективным инструментом как при оптимизации существующих генераторов, так и для исследования новых перспективных режимов в приборах мм и субмм диапазонов волн.

1. Мильчо М. В. Учет трехмерного движения электронов в генераторах типа «клиноотрон». Ч. 1. Методика численного исследования / М. В. Мильчо // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 3. – С. 83–91.
2. Мильчо М. В. Метод конформных отображений для расчета высокочастотных электромагнитных полей в замедляющих системах. Ч. 1. Случай больших замедлений / М. В. Мильчо // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 1. – С. 136–147.
3. Мясин Е. Н. Генерация электромагнитных колебаний в оротроне на второй пространственной гармонике / Е. Н. Мясин, А. Ю. Ильин, В. В. Евдокимов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – 12, № 4. – С. 41–44.
4. Особенности режимов работы генераторов типа клиноотрон / М. В. Мильчо, Б. П. Ефимов, В. В. Завертаный, В. В. Гончаров // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2005. – 10, № 3. – С. 435–440.

M. V. Mil'cho

3D MOTION OF ELECTRONS IN KLYNOTRON OSCILATOR CH. 2. REAL OSCILLATOR ANALYSES

The electron movements in some real oscillators of the mm and sub-mm bands are investigated using the “Klynotron” computer program. This program was described in chapter 1. The computerized calculation results are analyzed. The prospects for using this program in the development of new oscillators are discussed.

Key words: electronics, klynotron, 3 D, interaction, computerized calculation.

М. В. Мильчо

УРАХУВАННЯ ТРИВИМІРНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ У ГЕНЕРАТОРАХ ТИПУ «КЛИНОТРОН»

ЧАСТИНА 2. АНАЛІЗ РЕАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

За допомогою програми «Клиноотрон», яку описано в першій частині, досліджується рух електронів у кількох реальних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів хвиль. Аналізуються результати числового дослідження. Обговорюються перспективи використання цієї програми при розробці нових клиноотронів.

Ключові слова: електроніка, клиноотрон, тривимірність, взаємодія, чисельний розрахунок.

Рукопись поступила 02.04.10.