

УДК 621.385.015.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В РЕЗОНАТОРНЫХ СТРУКТУРАХ КЛИСТРОНА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МОЩНОСТЬЮ 100 КВТ

В.Е. Балакин*, С.В. Березовский, И.М. Карнаухов***, В.П. Олефир****, В.Е. Теряев*, В.П. Циова*******

*ИФВЭ, Протвино, Россия

**НТЦ ЭФО НАНУ, Харьков, Украина,

***ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина,

****ХНУ им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

*****НПО "Контакт", Саратов, Россия

Поступила в редакцию 20 мая 2008 г.

В работе проведено численное моделирование динамики электронного пучка в многорезонаторных системах мощного пролетного клистрона непрерывного действия мощностью 100 кВт. В этом клистроне используется электронный пучок с ускоряющим напряжением 30 кВ, током 7А и рабочей частотой 700 МГц. Сравнение параметров клистрона, полученных в результате численного моделирования, с экспериментальными данными показало их хорошее согласие.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, электронный пучок, резонатор, клистрон, электронный КПД, частотная характеристика.

Моделирование динамики электронных пучков является важной задачей при проектировании новых и оптимизации действующих приборов СВЧ электроники [1-7]. Особую сложность представляет моделирование мощных сильноточных приборов, в которых существенно влияние объемного заряда пучка и необходим учет нелинейных эффектов при взаимодействии пучка с электромагнитными полями волноводных или резонаторных структур. Целью данной работы является численное моделирование нелинейной динамики электронного пучка в электромагнитных полях многорезонаторной системы мощного пролетного клистрона непрерывного действия мощностью 100 кВт с учетом поля объемного заряда. Результаты моделирования и оптимизация параметров клистрона показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Разработанная методика и полученные результаты были использованы при проектировании пролетного клистрона мощностью 300 кВт [2].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ РЕЗОНАТОРНЫХ СТРУКТУР

Для моделирования динамики электронного пучка в полях резонаторов используется дисковая модель. Предполагается, что движение релятивистского электронного пучка одномерное. Описание взаимодействия пучка с полем резонатора, используемое в численном коде программы DISKLY близко к тому, которое описано в препринте [4], однако обладает рядом преимуществ, отмеченных в работе [2]. Электродинамические характеристики резонатора описываются относительным распределением электрического поля, характеристическим сопротивлением ρ и отстройкой частоты резонатора $\Delta F = F_{res} - F_0$ от рабочей частоты $F_0 = 700$ МГц, F_{res} - резонансная частота резонатора с пучком. Оптимизация параметров клистрона проводится с вычислением электронного коэффициента полезного действия (КПД) η_e или коэффициент группирования клистрона η_{gr} , который учитывает энергетический разброс частиц в пучке и определяется следующим выражением:

$$\eta_{gr} = I_1 \frac{E_{\min}}{2I_0 E_0}, \quad (1)$$

где I_1 - амплитуда первой гармоники тока, I_0 - средний ток пучка, E_{\min} и E_0 - минимальная и начальная энергия электронов после выхода из резонатора, соответственно.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИСТРОНА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МОЩНОСТЬЮ 100 КВТ

Рассматриваемый клистрон с рабочей частотой $F_0 = 699,3$ МГц состоит из 4 резонаторов, ускоряющее напряжение равно $U_0 = 30$ кВ, а ток электронного пучка равен $I_0 = 7$ А. Высокочастотная мощность, подаваемая на входной резонатор, изменяется в пределах (3-5) Вт. Диапазоны перестройки частоты

резонаторов группирователя ΔF_2 , ΔF_3 равны $(-5+30)$ МГц, частоты входного резонатора ΔF_1 - $(5 - 7)$ МГц и частоты выходного резонатора ΔF_4 - $(0 - 5)$ МГц, соответственно. В резонаторе используются пролетные трубы $D_1 = 162$ мм между первым и вторым, $D_2 = 162$ мм между вторым и третьим и $D_3 = 175$ мм между третьим и четвертым резонаторами, соответственно. Предполагалось, также, что отношение радиуса пучка к внутреннему радиусу резонатора равно 0,5.

В рассматриваемом клистроне используется четвертьволновой двухзольный резонатор, который имеет существенно трехмерную геометрию, что существенно усложняет моделирование динамики электронного пучка. Дополнительные расчеты пространственного распределения электромагнитного поля в резонаторе показали, что в области нахождения пучка электрическое поле является аксиально-симметричным. Это обстоятельство позволяет применять двухмерные программы расчета высокочастотного поля внутри резонатора на его оси. В данной работе расчет нормированного продольного электрического поля для резонатора группирователя был выполнен с помощью программы SUPERLANS [5]. При этом параметры взаимодействия с пучком можно считать независимыми от радиуса. Характеристическое сопротивление ρ и холодная добротность Q_c , необходимые для описания взаимодействия электронного пучка и резонатора, были взяты из измерений и равны $\rho = 300$ Ом, $Q_c = 1000$, соответственно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННОГО КПД

При численном моделировании клистрона тип резонаторов, отстройки входного ΔF_1 и выходного ΔF_4 резонаторов, длины пролетных труб, ускоряющее напряжение $U_0 = 30$ кВ и ток пучка $I_0 = 7$ А предполагались заданными. Во всех исследованиях, кроме определения зависимости η_e от мощности PC , подаваемой на входной резонатор, полагалось, что $PC = 3$ Вт.

Оптимизация параметров клистрона проводилась в соответствии со следующим планом. Сначала исследовалась зависимость электронного КПД η_e и частотной характеристики клистрона от отстроек ΔF_2 и ΔF_3 . Затем определялось влияние отстроек входного ΔF_1 и выходного резонаторов ΔF_4 а также длин пролетных труб. Далее определялась зависимость η_e от мощности, подаваемой на входной резонатор.

Для описания нелинейной динамики электронного пучка с помощью программы DISKLY были получены значения отстройки входного резонатора $\Delta F = 9,11$ МГц, нагруженной добротности входного резонатора $Q_h = 100$, коэффициента взаимодействия пучка с резонатором $M = 0,862$, относительной электронной активной проводимости резонатора $G_E / G_0 = 0,129$, относительной электронной реактивной проводимости резонатора $B_E / G_0 = 0,372$ (здесь $G_0 = U_0 / I_0$ - проводимость пучка). Полученные значения G_E / G_0 , B_E / G_0 и M использовались в расчетах по модели резонатора, как сосредоточенного элемента.

В табл. 1 указаны значения напряжений U_1 , U_2 , U_3 на резонаторах группирователя, амплитуда первой гармоники тока I_1 в третьем резонаторе, нормированная на амплитуду тока исходного пучка I_0 , значения КПД группировки η_{gr} и электронного КПД выходного резонатора η_e для соответствующих отстроек по частоте ΔF_2 .

Таблица 1. Характеристики клистрона для различных вариантов отстроек резонаторов группирователя

N	ΔF_1 МГц	ΔF_2 МГц	ΔF_3 МГц	ΔF_4 МГц	U_1 кВ	U_2 кВ	U_3 кВ	I_1 / I_0	η_{gr}	η_e
1	5,0	-3,3	7,9	4,8	0,4	1,5	15,5	0,09	0,386	0,395
2	5,0	-3,6	12,1	3,2	0,4	1,5	11,9	0,087	0,409	0,447
3	5,0	6,0	20,7	1,0	0,4	4,1	16,8	0,321	0,407	0,547
4	5,0	10,2	33,4	-0,3	0,4	5,3	11,7	0,455	0,481	0,620

Величина отстройки ΔF_2 выбрана в соответствии с двумя вариантами отстроек резонаторов группирователя: вверх или вниз относительно рабочей частоты. Второй вариант отстроек соответствует максимальному электронному КПД, полученному для данной схемы отстроек при отстройке третьего резонатора $\Delta F_3 = -3,6$ МГц. Четвертый вариант соответствует максимальному η_e , полученному в результате оптимизации для схемы с положительными отстройками ΔF_2 . Отметим, что дальнейшее увеличение отстройки второго резонатора ΔF_2 вплоть до величины 12 МГц не приводит к росту электронного КПД.

Схемы с отрицательными отстройками ΔF_2 характеризуются сравнительно низкими значениями

электронного КПД. По-видимому, это связано с недостаточной группировкой пучка, на что указывают малые значения КПД группировки η_{gr} и амплитуды тока I_1 . По мере увеличения отстройки ΔF_2 происходит рост значений амплитуды тока I_1 и существенное увеличение электронного КПД η_e .

Выбор отстройки ΔF_1 определяется из условия передачи достаточно большой СВЧ мощности электронному пучку в первом резонаторе. Результаты влияния ΔF_1 на КПД группировки η_{gr} для варианта 1 табл. 1. приведены в табл. 2. Приняты следующие обозначения: PC - мощность генератора, подаваемая на первый резонатор, PC_b - мощность потерь СВЧ мощности в первом резонаторе, Z_{gr} - значение координаты, при которой достигается указанное в предыдущей колонке значение КПД группирования η_{gr} . Увеличение отстройки ΔF_1 приводит к уменьшению КПД группирования η_{gr} и координаты Z_{gr} , при которой достигается это значение.

Таблица 2. Влияние отстройки резонаторов на КПД группировки η_{gr}

N	$PC, Вт$	$PC_b, Вт$	$\Delta F_1, МГц$	$\Delta F_2, МГц$	$\Delta F_3, МГц$	η_{gr}	$Z_{gr}, м$
1	3,0	1,12	0,0	-3,2	7,4	0,375	0,5579
2	3,0	2,23	5,0	-3,2	7,4	0,389	0,5363
3	3,0	3,00	9,0	-3,2	7,4	0,365	0,4957

Отстройка выходного резонатора ΔF_4 используется в основном для формирования частотной характеристики клистрона, а не для получения большого значения η_e . Отличие ΔF_4 от значения необходимой отстройки выходного резонатора (т.е. от величины $F_{res} - F_0$), приводит к некоторому уменьшению η_e .

Влияние значений длин пролетных труб на величину электронного КПД η_e проведено для варианта 2 табл. 2 и показано в табл. 3. Результаты моделирования показывают, что увеличение длины пролетных труб (в основном за счет увеличения длины последней пролетной трубы D_{z3}) приводит к незначительному росту η_e .

Таблица 3. Влияние значений длин пролетных труб на величину электронного КПД η_e .

N	$D_{z1}, м$	$D_{z2}, м$	$D_{z3}, м$	η_e
1	0,162	0,162	0,175	0,447
2	0,162	0,167	0,185	0,460
3	0,162	0,167	0,194	0,468
4	0,162	0,167	0,219	0,471

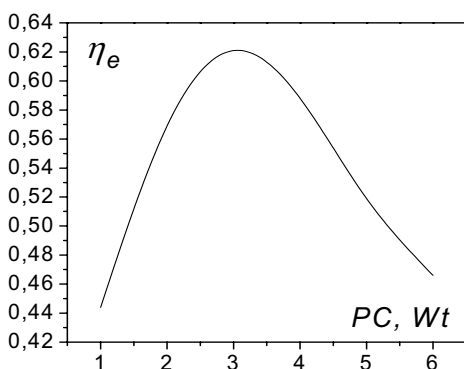


Рис.1. Зависимость электронного КПД от входной мощности

Важной характеристикой клистрона является также зависимость электронного КПД η_e от входной мощности PC , подаваемой на первый резонатор группирователя. Результаты численных расчетов электронного КПД для варианта 4 табл. 1 представлены на рис. 1. Они показывают, что электронный КПД η_e для этих параметров клистрона имеет максимум при значении входной мощности около $3 Вт$.

РАСЧЕТ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛИСТРОНА

На рис. 2 показаны частотные характеристики клистрона, рассчитанные для вариантов отстроек резонаторов клистрона. Кривая 4 соответствует частотной характеристике для следующего варианта: энергия пучка $U_0 = 28,6 кэВ$, ток пучка

$I_0 = 6,45 А$, входная мощность $PC = 3,8 Вт$, отстройки частот резонаторов клистрона: $\Delta F_1 = 7,0 МГц$, $\Delta F_2 = 11,6 МГц$, $\Delta F_3 = 25,5 МГц$, $\Delta F_4 = 1,5 МГц$. Выбор таких параметров обусловлен тем, что для этих параметров была экспериментально измерена частотная характеристика клистрона. Кривая 1 соответствует значениям отстроек резонаторов клистрона $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3, \Delta F_4$ - 5,0; -3,6; 12,1; 3,2; кривая 2 - 5,0; 6,0; 20,7; 1,0; кривая 3 - 5,0; -3,3; 7,9; 4,8; кривая 5 - 5,0; 10,2; 33,4; -0,3.

Характерной особенностью рассматриваемых частотных характеристик является наличие двух максимумов. Главный максимум находится в районе частоты F_0 , а положение второго максимума

определяется схемой отстроек резонаторов клистрона.

Для выяснения природы максимумов электронного КПД η_e проведем анализ частотных характеристик КПД группирования η_{gr} , рассчитанных для тех же вариантов отстроек резонаторов, что и частотные характеристики клистрона, представленные на рис. 3. Кривая 1 на рис. 3 соответствует значениям отстроек резонаторов клистрона $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$ - 5,0; -3,6; 12,1; кривая 2 - 5,0; 6,0; 20,7; кривая 3 - 5,0; -3,3; 7,9; кривая 4 - 5,0; 11,6; 25,5; (для $U_0 = 28,6 \text{ кВ}$ и тока пучка $I_0 = 6,45 \text{ А}$); кривая 5 - 5,0; 10,2; 33,4.

Анализ результатов, представленных на рис. 2 и 3 показывает, что второй максимум частотной характеристики электронного КПД η_e соответствует максимуму частотной характеристики КПД группирования клистрона η_{gr} . Положение второго максимума определяется в основном отстройкой второго резонатора ΔF_2 . Например, для варианта 1 $\Delta F_2 = -3,3 \text{ МГц}$. Учитывая необходимую отстройку резонатора с пучком, равную $\Delta F = 9,11 \text{ МГц}$, получим, что второй резонатор отстроен от частоты резонатора, нагруженного пучком, на -12 МГц , что примерно соответствует положению максимума на спектре КПД клистрона. При достаточно большой отстройке $\Delta F_2 > \Delta F = 9,11 \text{ МГц}$ второй максимум находится справа от рабочей частоты F_0 .

Расчеты показывают также, что увеличение отстройки входного резонатора ΔF_1 смещает второй максимум в сторону больших частот. Однако сравнительно небольшие пределы изменения ΔF_1 приводят к тому, что её влияние на положение второго максимума слабее, чем влияние отстройки второго резонатора ΔF_2 .

Поведение электронного КПД η_e и КПД группирования η_{gr} в области вблизи и больше рабочей частоты F_0 определяется также и значением отстройки частоты третьего резонатора ΔF_3 . В частности, увеличение ΔF_3 приводит к росту КПД в правой части частотной характеристики.

На спектральную характеристику клистрона оказывает влияние также и отстройка частоты выходного резонатора ΔF_4 . Численное моделирование показывает, что отклонение ΔF_4 от значения необходимой отстройки в сторону больших или меньших значений сдвигает частотную характеристику относительно рабочей частоты F_0 соответственно в сторону меньших или больших частот.

Наибольшее значение электронного КПД η_e достигается тогда, когда положение главного и второго максимума частотной характеристики совпадают (кривые 5 на рис.2 и рис.3). Величина η_e в этом случае больше КПД группирования η_{gr} примерно на 0,14. В случае, когда второй максимум сдвинут относительно главного максимума на 5-6 МГц влево или вправо, разность значений η_e и η_{gr} достигает 0,10 - 0,14. Если расстояние по частоте между максимумами таково, что второй максимум не попадает в полосу пропускания выходного резонатора, то различие между значениями η_e и η_{gr} возрастает.

СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Экспериментально измеренная частотная характеристика клистрона для тока пучка $I_0 = 6,45 \text{ А}$, ускоряющего напряжения $U_0 = 28,6 \text{ кВ}$ и входной СВЧ мощности $PC = 3,8 \text{ Вт}$ соответствует кривой 1 на рис. 4. Значение электронного КПД в этом случае $\eta_e = 0,542$. Частотная характеристика клистрона, рассчитанная с помощью программы DISKLY, соответствует кривой 2 на рис. 5. Вычисления выполнены для следующих отстроек резонаторов: $\Delta F_1 = 7,0 \text{ МГц}$, $\Delta F_2 = 11,6 \text{ МГц}$, $\Delta F_3 = 25,4 \text{ МГц}$, $\Delta F_4 = 1,6 \text{ МГц}$ и

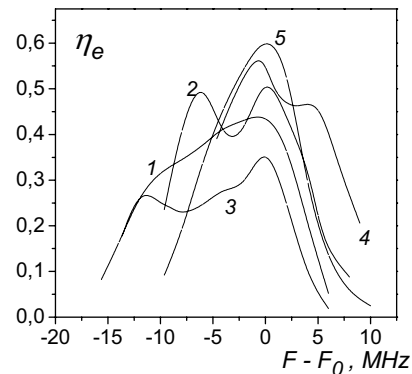


Рис.2. Частотная характеристика клистрона на 100 кВт при различных отстройках резонаторов клистрона

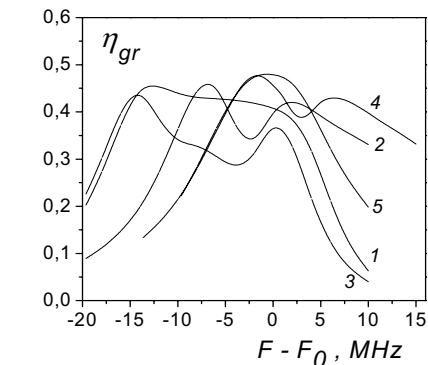


Рис. 3. Частотные характеристики группирования для клистрона на 100 кВт при различных отстройках резонаторов

значений длин пролетных труб клистрона, приведенных в разделе 2. Для этих параметров получено значение электронного КПД $\eta_e = 0,557$.

ВЫВОДЫ

В данной работе проведено моделирование нелинейной динамики электронного пучка в многорезонаторных системах мощного пролетного клистрона непрерывного действия мощностью 100 кВт . Численное моделирование клистрона, работающего на частоте 700 МГц , использующего электронный пучок с энергией 30 кэВ и током 7 А показало хорошее согласие с основными известными экспериментальными характеристиками.

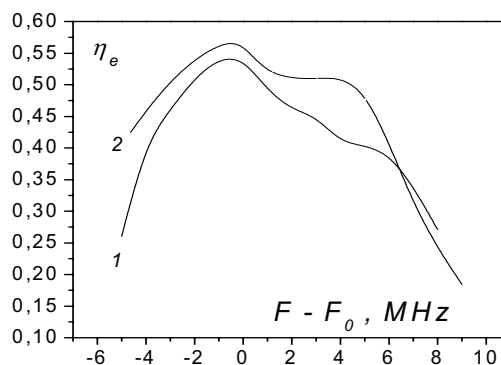


Рис.4. Частотная характеристика клистрона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кураев А.А., Байбурун В.Б., Ильин Е.М. Математические модели методы оптимального проектирования СВЧ - приборов. - Мн.: Наука і техника, 1990.
2. Балакин В.Е., Березовский С.В., Карнаухов И.М., Олефир В.П., Теряев В.Е., Циова В.П. Численное моделирование пролетного клистрона мощностью 300 кВт с использованием программы DISKLY // Радиотехника и электроника. - 1995. - Вып.10. - С.1561.
3. Akimov Yu.A., Azarenkov N.A., Olefir V.P. Influence of Azimuth Structure of Surface Waves on Efficiency of Their Excitation by Tubular Electron Beams // Contributions to Plasma Physics.- 2006.- Vol. 46. - P. 817-825.
4. Simon Yu. Particle - in - cell simulation of high power klystrons: Preprint / Slac/AP - 24. - Stanford: SLAC, 1984.
5. Карлинер М.М., Лысянский Т.Б., Фомель Б.М., Яковлев Б.П. LANS - программа для вычисления электромагнитных полей и собственных частот аксиально-симметричных резонаторов: Препринт / ИЯФ; №79-59. – Новосибирск: 1979.
6. Теряев В.Е. Развитие метода интегральных уравнений для расчета СВЧ-резонаторов: Препринт / ИФВЭ; 2002-28. – Протвино: 2002. – 26 с.

MODELLING OF ELECTRON BUNCH DYNAMICS IN RESONATOR STRUCTURES OF CONTINUOUS ACTION 100 KW POWER KLYSTRON

V.E. Balakin*, S.V. Berezovskiy**, I.M. Karnauhov***, V.P. Olefir****, V.E. Teryaev*, V.P. Tsiova*****

*BINP, Protvino, Russia,

** STC of Electrophysical Processing NASU, Kharkiv, Ukraine,

***NSC ХФТИ, Харьков, Украина,

**** V.N. Karazin National University, Kharkiv, Ukraine

*****NPO "Contact", Saratov, Russia

The article presents the results of numeral modeling of electronic bunch dynamics in the multiresonator systems of powerful flight continuous action klystron of 100 kW power. The electron bunch with accelerating voltage 30 kV , current 7 A and operating frequency 700 MHz is used in numerical calculations. The comparison of klystron parameters, obtained as a result of numeral modeling, with experimentally obtained results show their good accordance.

KEY WORDS: numerical modeling, electron bunch, resonator, klystron, efficiency, frequency characteristic.