

РАЗРАБОТКА СВЕРХМОЩНОГО КЛИСТРОНА X ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С ВЫХОДНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТЬЮ 3 МВт

Д.А. Комаров, Е.П. Якушкин, Ю.Н. Парамонов, С.В. Сурков, В.М. Саблин,

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты численного моделирования многолучевого клистрона X-диапазона длин волн. Даны результаты экспериментального исследования разработанного клистрона КИУ-283, с пиковой мощностью 3.0 МВт и КПД 57%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

МНОГОЛУЧЕВОЙ КЛИСТРОН, X-ДИАПАЗОН ДЛИН ВОЛН, ВЫСОКАЯ МОЩНОСТЬ, КПД

DEVELOPMENT OF HIGH-POWER X-BAND KLYSTRON WITH OUTPUT PULSE POWER 3 MW

D.A. Komarov, E.P. Yakushkin, Yu.N. Paramonov, S.V. Surkov V.M. Sablin

ABSTRACT

The paper presents the results of numerical simulation of X-band multibeam klystron. The results of an experimental study of the developed klystron KIU-283 with a peak power of 3.0 MW and an efficiency of 57% are given.

KEYWORDS

MULTIBEAM KLYSTRON, X-BAND, HIGH POWER, EFFICIENCY

ВВЕДЕНИЕ

В самое последнее время наметился большой интерес к вопросам повышения КПД сверхмощных клистронных усилителей гражданского применения. В ряде работ рассматриваются новые методы группировки электронного потока, использование резонаторов не только второй, но и третьей гармоники и т.д. (к примеру, [1]). Появление новых методов группирования пучка, безусловно, представляет интерес в СВЧ электронике, однако необходимо отметить, что предложенные способы не всегда могут быть использованы в принципе в многолучевых клистромах (МЛК) [2]. Действительно, радиальные размеры МЛК определены не столько электродинамическими свойствами резонатора, сколько необходимыми требованиями на катодный узел: плотность тока катода не должна превышать 20 А/см². Этот важный параметр сразу же определяет диаметр катода МЛК, а необходимость конструктивного запаса для конструкций с числом лучей более 18 накладывает жесткие ограничения на диаметр катодной обоймы, что накладывает наиболее жесткие требования при разработке сверхмощных клистронов в коротковолновом диапазоне. В подобных условиях конструктивно создать резонатор второй гармоники сложно, а третьей почти невозможно. Кроме того, используемые, как правило, кольцевые резонаторы не имеют сколь-нибудь эффективных методов настройки прибора в динамическом режиме, но имеют жесткие допусковые требования на значения частоты. Минимальные отклонения приводят,

фактически, к исключению данных резонаторов из пространства взаимодействия и резкому спаду КПД.

АО «НПП «Торий» в 2022 г. закончил ОКР «Батист» по разработке клистрона X-диапазона длин волн с выходной мощностью 3 МВт, в котором использован новый принцип построения пространства взаимодействия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Численный анализ пролетного клистрона осуществлен в программе KLYS-5.63 [3]. Программа KLYS-5.63 предназначена для расчета выходных характеристик одно- и многолучевых пролетных клистронов с одноззорными (ОЗР) и симметричными двухззорными (ДЗР) резонаторами. Конструкции рассчитываемых клистронов могут содержать 15 тороидальных и кольцевых резонаторов, собственные частоты которых могут располагаться в диапазонах первых трех гармоник входного сигнала, каждый резонатор может иметь многозвенную фильтровую систему.

Программа KLYS-5.63 реализует достаточно сложный и разветвленный алгоритм расчета. Используется одномерная дискретная трехпериодная модель электронного пучка с независимой переменной время t . Частицы электронного пучка представляют собой диски конечной толщины, на длине λ одного периода располагается N_{part} частиц (максимально $N_{\text{part}} = 200$). На каждом шаге λ/N_{stp} (максимально $N_{\text{stp}} = 250$) интегрирования релятивистского уравнения движения для каждой частицы рассчитываются внутреннее (кулоновское) $E_q(t_0, t)$ и внешнее $E_i(t_0, t)$ электрические поля. Кулоновское поле вычисляется из решения 2-мерного уравнения Пуассона методом быстрого преобразования Фурье для двух дисков, отстоящих друг от друга на длине $3 \cdot \lambda$ и, затем, суммируется (с учетом периодизации) по всем частицам, учитывая их взаимное расположение. По мере увеличения времени t , цуг частиц из 3-х периодов продвигается от первого резонатора к последнему, при этом последовательно в каждом i -м резонаторе ($1 \leq i \leq N_{\text{рез}}$) решается задача определения самосогласованных значений наведенных токов $I_{\text{нави}}$ и напряжений $U_{\text{нави}}$ на его зазорах. Если электродинамические характеристики резонаторной системы (резонатор с учетом наличия фильтра, внешней нагрузки и источника входного сигнала) моделировать с помощью схем с сосредоточенными элементами, то самосогласованная задача сводится к итеративному решению матричного уравнения. В наиболее простом случае (для возбуждения промежуточного резонатора) это уравнение имеет вид закона Ома:

$$U = Z \cdot I \quad (1)$$

Использование модели электронного пучка с независимой переменной время t позволяет рассматривать возвратные и колебательные движения частиц в выходном резонаторе. Это, с одной стороны, усложняет сходимость итерационного процесса, но, с другой стороны, повышает точность и достоверность расчета КПД клистрона при больших амплитудах в выходном резонаторе, что подтверждено многолетней положительной практикой использования KLYS-5.63 в разработках, осуществляемых АО «НПП «Торий».

В качестве модельного клистрона была выбрана 6-и резонаторная схема, позволяющая обеспечить коэффициент усиления более 60 дБ. Величина микропервеанса на луч была ограничена значением 0.3, что определялось необходимой предельной плотностью тока катода. В типичных конструкциях электронных пушек катоды располагаются аксиально-симметрично относительно продольной оси симметрии пушки и общее число катодов (при

«плотной упаковке») выбирается из следующего ряда: 6, 12, 18, 36, 60... Т. е. в каждом следующем ряду число катодов увеличивается на 6. При этом увеличение числа рядов свыше двух – трех нежелательно, так как это приводит к увеличению перепада характеристического сопротивления между рядами электронных лучей и снижению эффективности группирования в клистроне. Исходя из этих соображений, было выбрано для проектируемого клистрона двухрядное расположение катодов с их общим числом равным 25 (10 катодов в первом ряду и 15 во втором). Такое количество электронных лучей позволяет работать в интервале анодных напряжений (50...55) кВ с величиной плотности тока катода не более 16 А/см² и суммарным током катода 100 А.

Выбранные параметры электрического режима на данном этапе расчетов позволяют определить внутренние диаметры труб дрейфа и ширину ВЧ зазоров резонаторов.

Как правило, критерием максимально возможного электронного КПД выбирают достижение предельного значения амплитуды первой гармоники конвекционного тока, при минимальном разбросе скоростей электронов в ступке.

Задача оптимизации многорезонаторного клистрона по данному критерию не является тривиальной в связи с большой вариативностью параметров (пролетные длины, расстройки частот, нагруженная добротность входного и выходного резонатора и т.д.). Была осуществлена следующая методическая схема моделирования: последовательно рассчитывались двух резонаторный, трех резонаторный и т.д. до шести резонаторного, клистроны.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Был проведен анализ возможности разработки сверхмощного клистрона X-диапазона длин волн со следующими основными характеристиками:

- выходная импульсная мощность – не менее 2,5 МВт;
- напряжение катода, импульсное – не более 55 кВ;
- ток катода, импульсный – не более 100 А;

Анализ последних результатов разработок сверхмощных клистронов ведущей зарубежной фирмой СРІ показывает, что зарубежные клистроны в X-диапазоне частот имеют существенно большие значения напряжения катода, и сравнительно низкие величины электронного КПД (табл. 1).

Таблица 1
Характеристики прибора – аналога

Тип прибора	Напряжение катода, кВ	Ток катода, А	Выходная мощность, МВт	КПД, %	Скважность
VKX-8253A	110.0	71.0	3.2	41.0	1000

Представленный прибор в качестве фокусирующей системы имеют электромагнит и жидкостное охлаждение. Массогабаритные параметры прибора с электромагнитом превышают 250 кг.

Техническое задание показывает, что необходимо, по сравнению с приборами аналогами, снизить потребляемую мощность в 1.4 раза, что возможно только путем резкого увеличения электронного КПД.

При 25-и лучевом исполнении и X-диапазоне очевидным выбором к использованию в конструкции клистрона является коаксиальный резонатор на основной моде колебаний E₀₁₀. Преимущества данного вида резонатора заключаются, прежде всего, в возможности расположения рядов пролетных каналов по радиусу таким образом, чтобы минимизировать

перепад характеристического сопротивления. Кроме того, конструктивно удобно сохранить основные геометрические размеры резонатора (внешний радиус, диаметр вылета втулки с пролетными каналами) и осуществлять настройку только диаметром внутреннего проводника. При этом, исходя из требуемого коэффициента усиления и вычисленных значений характеристического сопротивления, была выбрана шести резонаторная схема прибора. Использование резонатора второй гармоники было исключено: коаксиальный резонатор невозможно перестраивать в динамическом режиме, а его значение частоты должно быть обеспечено с точностью 2 МГц, что практически не реализуемо. В этой связи была рассмотрена классическая схема клистрона, в котором амплитуда второй гармоники наращивается увеличением пролетного пространства между четвертым и пятым резонатором до необходимого уровня электронного КПД. Рабочим режимом питания был выбран режим 55 кВ при токе 100 А, что привело к величине микропервеанса на луч равной 0.31. На рис. 1. представлен эскиз парциальной электронной пушки и результаты моделирования транспортировки парциального электронного луча в канале клистрона в магнитной фокусирующей системе (МФС).

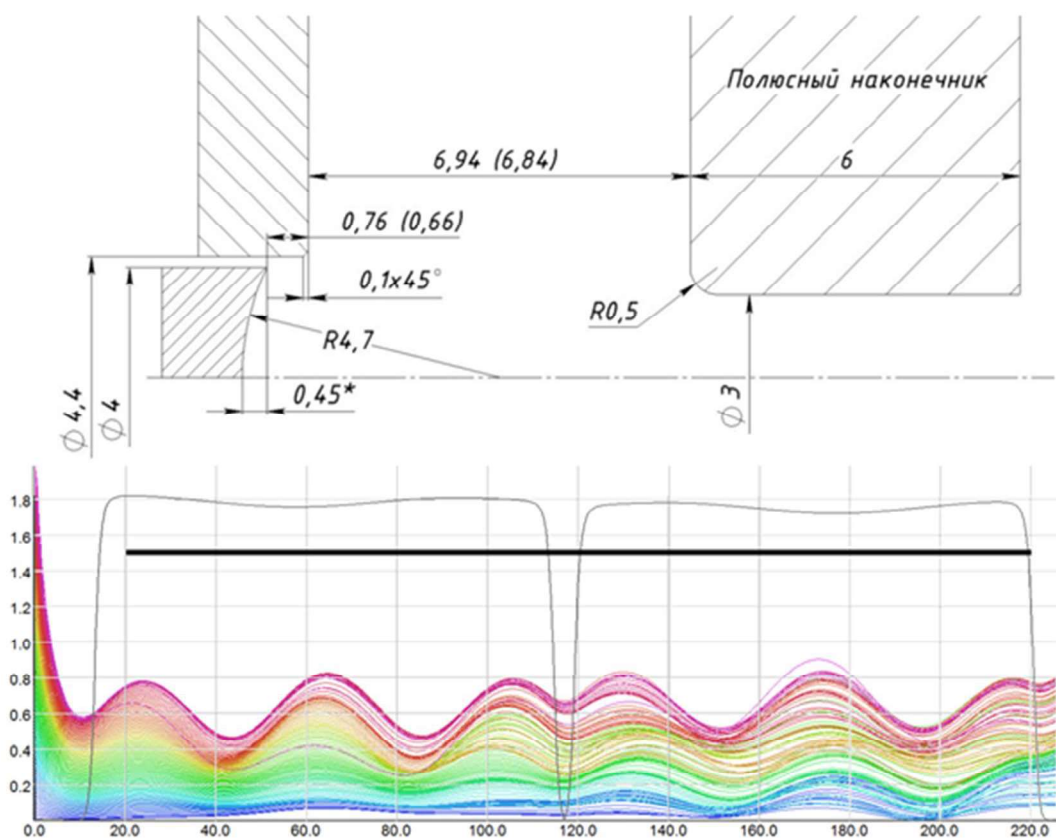


Рис.1. Эскиз парциальной пушки и результаты моделирования транспортировки парциального электронного луча в канале клистрона в магнитной фокусирующей системе

Результаты моделирования классической схемы клистрона привели к набору параметров так называемой упорядоченной группировки [2]: каждый, следующий за входным, резонатор настроен на более высокую частоту, предвыходной резонатор отстроен от центральной частоты вверх диапазона на максимальную величину, наибольшая длина пролета соответствует пролету между четвертым и пятым резонатором, что обеспечивает

необходимый рост второй гармоники конвекционного тока. Оптимальная добротность выходного каскада составила 90 единиц. В результате оптимизации были получены следующие результаты: КПД в режиме насыщения составил 65,3%, что хорошо соответствует известному предельному значению КПД клистронов при микропервансе на луч более 0.3. Моделирование производилось последовательно для 48, 64, 72 и 124 групп частиц с целью контроля точности результатов.

Следующим шагом для повышения КПД, предполагается использование резонаторов второй гармоники [1], что позволяет поднять расчетное значение КПД на 10 – 12%. Очевидно, однако, что в электронном потоке повышение амплитуд первой, второй и третьей гармоники возможно в пролетных пространствах, свободных от СВЧ полей. Анализ показал, что увеличение длины пролетной трубы между третьим и четвертым резонатором приводят к росту амплитуд трех гармоник конвекционного тока вплоть до оптимального значения, что позволило поднять КПД до 70.7%. Попытки дальнейшего улучшения электронного КПД не дали результата, при условии того, что модель сохраняет классическую структуру. Однако, величины амплитуд гармоник конвекционного тока уже являются предельно возможными [2], что позволяет говорить о достижении оптимальных параметров. Тем не менее, достижение оптимального гармонического состава не говорит о качестве сгустка, т.е. об энергетическом разбросе. В [2] предполагалось, что оптимум первой гармоники уже определяет минимальный разброс по энергии в сформированном сгустке. Численный анализ показал, что в данном случае вторая и третья гармоника конвекционного тока фактически вплоть до 4-го резонатора минимальна, и только последние пролеты поднимают амплитуду до значения 1,4...0,99. Для того чтобы обеспечить экспоненциальный рост уровня второй и третьей гармоники, четвертый резонатор был «отстроен» по частоте выше, чем предвыходной (инверсия частот). Кроме того, был использован «тейперинг» – по вычисленным значениям наведенного напряжения на зазорах были скорректированы значения угла пролета третьего, четвертого и пятого резонаторов, соответствующие торможению электронного потока. Результаты моделирования представлены на рис.2.

Прежде всего, обращает внимание то, что максимальные значения амплитуд гармоник тока для классического варианта настройки и предложенного «тейперинга» и инверсии резонаторов мало отличаются по абсолютному значению. Однако, вторая и третья гармоника существенно выше во всем пространстве взаимодействия. Это приводит к тому, что энергетический спектр пучка в зазоре выходного резонатора представляет собой, фактически, моноэнергетическое распределение, симметричное относительно некоторой средней скорости, в котором более 80% электронов имеют минимальный энергетический разброс, чего не наблюдается для классической схемы – спектр энергий не симметричен относительно центра сгустка. Расчет амплитудной характеристики показывает достижение КПД в нагрузку 74,5%.

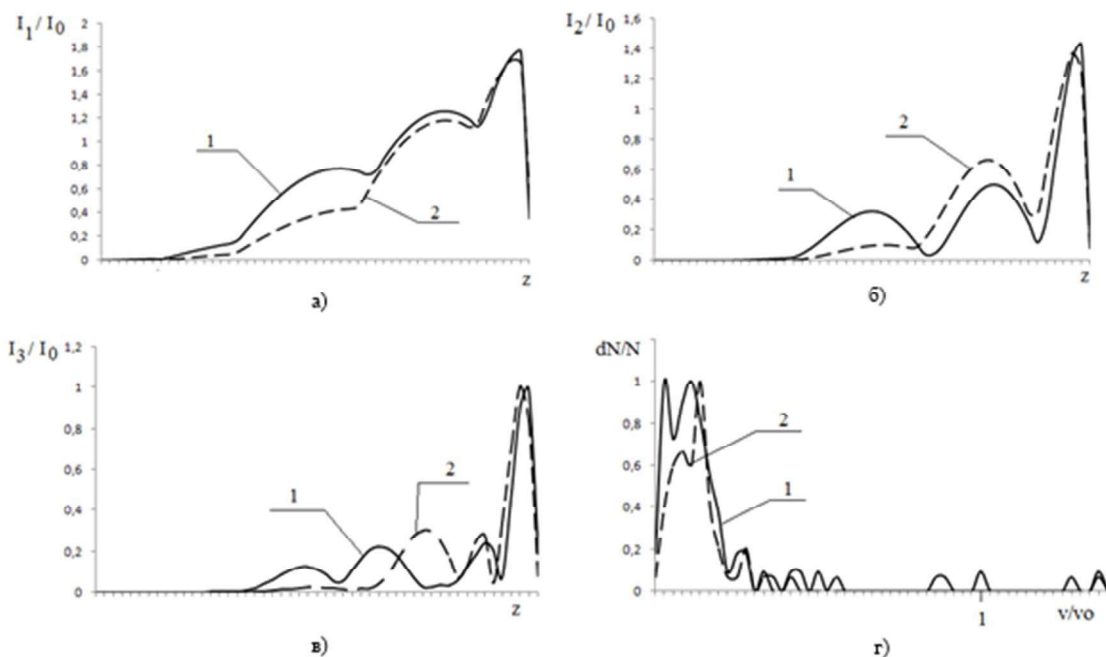


Рис.2. Результаты моделирования изменения формы первой а), второй б) и третьей в) гармоники конвекционного тока для классического (1) и инверсного (2) пространства взаимодействия. Энергетический спектр г) для классического (1) и инверсного (2) пространства взаимодействия.

Данный клистрон был изготовлен в АО «НПП «Торий» (КИУ-283) в рамках договора с КНР (рис.3).

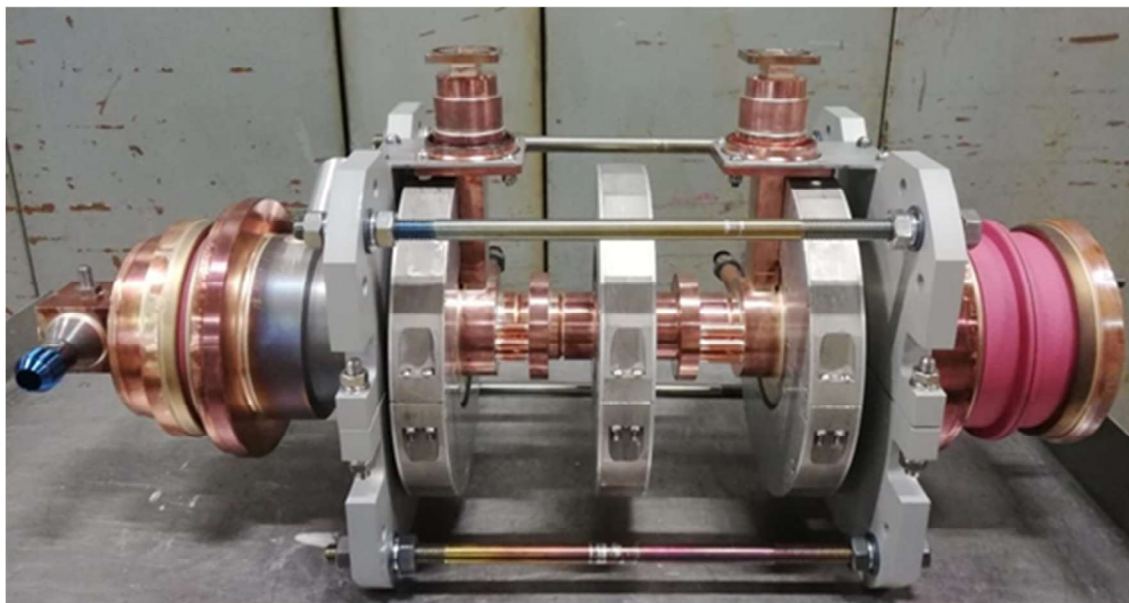


Рис.3. Внешний вид разработанного клистрона КИУ-283

На рис.4 представлены результаты сопоставления экспериментальных АХ и результатов моделирования на частоте 9300 МГц.

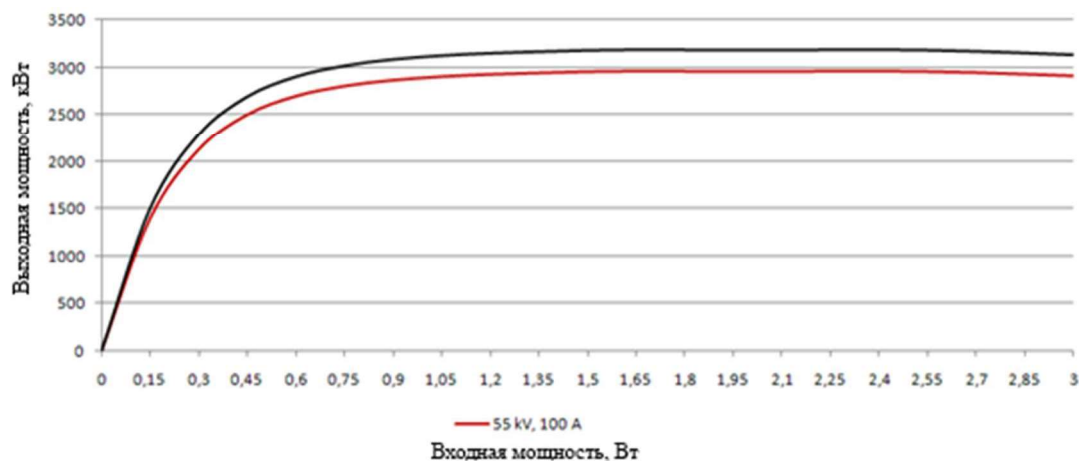


Рис.4. Амплитудная характеристика КИУ-283 на частоте 9.3 ГГц. Красная кривая – эксперимент, черная - моделирование

Экспериментальный КПД насыщения составил 57%, что удовлетворительно соответствует результату моделирования. На линейном и нелинейном участке АХ (до режима насыщения) относительная ошибка расчета не превосходит 3%. Увеличение погрешности моделирования в режиме насыщения до 12% связано с резким (до 50%) ухудшением динамического токопрохождения, т.е. с увеличением токооседания на резонаторный блок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные результаты повышения КПД МЛК, как правило, связанные с использованием резонаторов второй и третьей гармоники конструктивно не годятся для приборов в С- и Х-диапазонах. В работе показано, что использование классического построения пространства взаимодействия с резонаторами только основной частоты, но при учете изменения фазы пролета пучка по мере торможения в пространстве взаимодействия, инверсии резонаторов, при которой наибольшую отстройку по частоте имеет один из промежуточных резонаторов, а не предвыходной, увеличение длин дрейфовых участков после группирующей секции клистрона, позволяет получить минимальный разброс скоростей в электронном сгустке.

По результату работы был создан 25-ти лучевой клистрон КИУ-283, с фокусировкой постоянными магнитами, с предельным КПД электроники 57%, выходной импульсной мощностью 3.0 МВт на частоту 9300 МГц, превышающий все известные мировые аналоги по совокупности технических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marchesin R., Beunas A., Thouvenin P. et al. // Proc. Conf. IVEC 2017, London, UK, 24-26 April 2017. N.Y.: IEEE, 2017, P. 217.
2. Кочетова В.А., Кучугурный В.И., Лебединский С.В. и др. // Предельные КПД клистронов: некоторые вопросы теории и эксперимент. РЭ, 1981, Т. XXVI, № 1., С. 139.
3. Malykhin A.V., Yakushkin E.P., Kononov A.V // Validation of klystrons development code – KLYS 4.5/Pros. IEEE 2003, pp. 101-102

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Д.А. Комаров – доктор технических наук, заместитель генерального директора – директор по научной работе АО «НПП «Торий», г. Москва.

Е.П. Якушкин – кандидат технических наук, начальник отдела разработки клистронов АО «НПП «Торий», г. Москва.

Ю.Н. Парамонов – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе АО «НПП «Торий», г. Москва; e-mail: paramonov.yn@toriy.ru

С.В. Сурков – начальник лаборатории СВЧ измерений АО «НПП «Торий», г. Москва; e-mail: surkov.sv@toriy.ru

В.М. Саблин – начальник лаборатории приборов с распределенным взаимодействием АО «НПП «Торий», г. Москва; e-mail: sablin.vm@toriy.ru