

Влияние динамической расфокусировки на выходные параметры многолучевых клистронов с фокусировкой постоянными магнитами

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

АО «НПП «Торий»

Аннотация: в данной работе представлены результаты экспериментального исследования влияния динамического токооседания на выходные параметры сверхмощного многолучевого клистрона (МЛК) с фокусировкой постоянными магнитами.

Ключевые слова: многолучевой клистрон (МЛК), динамическое токооседание, КПД.

1. Введение

Хорошо известно [1], что для СВЧ усилителей О-типа, токооседание в динамическом режиме, т.е. в режиме работы с входным сигналом близким к насыщению, существенно влияет на величину выходной мощности. Однако, большинство исследований в этом направлении посвящены ЛБВ. Исследованию зависимости выходных параметров многолучевых сверхмощных клистронов от токооседания до настоящего времени не уделялось внимание по ряду причин. Прежде всего, только в самое последнее время разработчики аппаратуры стали предъявлять повышенные требования к электронному КПД клистронных усилителей, фактически находящихся в области теоретического предела электроники, где эффект динамической расфокусировки становится главным ограничивающим фактором получения оптимальных выходных параметров. Кроме того, анализ динамической расфокусировки требует двумерных программ расчета самосогласованного взаимодействия электронного потока с электромагнитными полями, а в случае многолучевых клистронов задача строго может быть решена только в трехмерной постановке. Отсутствие на данный момент подобных программ не позволяет дать даже качественного критерия влияния динамической расфокусировки на выходные параметры клистрона. Одна из немногих детальных экспериментальных работ по динамической расфокусировке электронного потока [2] проливает свет на изменение огибающей электронного потока в линейном режиме усиления и в режиме насыщения, но не дает представления о связи с выходными параметрами усилителя.

В данной работе дан экспериментальный анализ динамической оптики в условиях повышенного электронного КПД усилителя.

2. Экспериментальные исследования

Для экспериментального исследования был выбран клистрон КИУ-284 со следующими основными техническими параметрами:

1. Число лучей – 30;
2. Импульсное напряжение катода – 58 кВ;
3. Импульсный ток катода – 275 А;
4. Микропервеанс парциального луча – 0,67;
5. Рабочая частота – 2856 МГц;
6. Выходная мощность, импульсная – не менее 8 МВт;
7. Электронное КПД – не менее 50%.

Оптимизация пространства взаимодействия на этапе проектирования, потребовала обеспечения канала транспортировки диаметром 7.0 мм, что связано с возможностью обеспечения высокого КПД, и с компоновкой двух рядов катодов и их размещением по радиусу резонаторов.

В качестве фокусирующей системы была разработана система на постоянных магнитах, состоящая из четырех магнитных колец с радиальной намагниченностью. Электронная пушка экранирована от магнитного поля. Уровни амплитуд продольной составляющей магнитной индукции на оси каналов транспортировки составили не менее 1150 Гс, что обеспечивало транспортировку электронного пучка с заполнением канала не более 0.5 [3].

Первоначально, измерения ряда изделий проводились с «закороченным» коллектором, т.е. измерения тока коллектора в режиме с входным сигналом были недоступны. В процессе экспериментов было обнаружено, что приборы идентичные по режиму питания, по электродинамическим характеристикам, демонстрируют существенно различные уровни выходной мощности, при том, что величина насыщения по входному сигналу не отличалась в пределах погрешности измерений.

Были проведены измерения на одном из образцов прибора, показавшим наименьшую выходную мощность, с отделенным коллектором. На рисунке 1 представлена амплитудная характеристика клистрона на рабочей частоте (кривая 1), а на рисунке 2 показана зависимость токопрохождения в динамическом режиме. Обращает внимание тот факт, что резкое ухудшение токопрохождения (с 88% в статическом режиме до 40% в динамическом режиме) наблюдается на линейном участке амплитудной характеристики, а для нелинейного участка и в области насыщения практически нет изменений режима токопрохождения. Следует отметить, что этот результат соответствует результату работы [2].

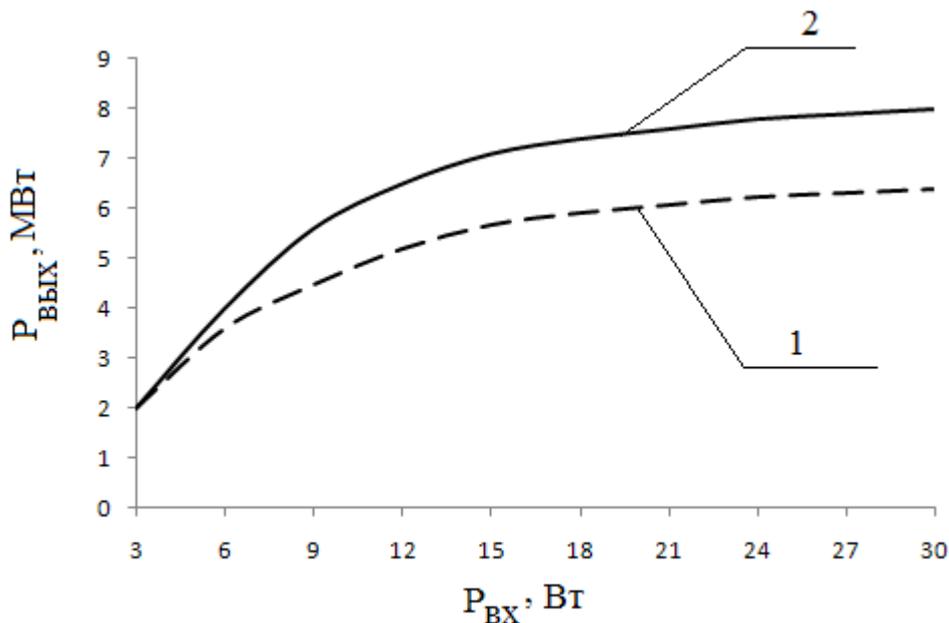


Рисунок 1. Амплитудная характеристика КИУ-284: 1 – исходная конструкция; 2 – с магнитомягким кольцом между вторым и третьем магнитом.

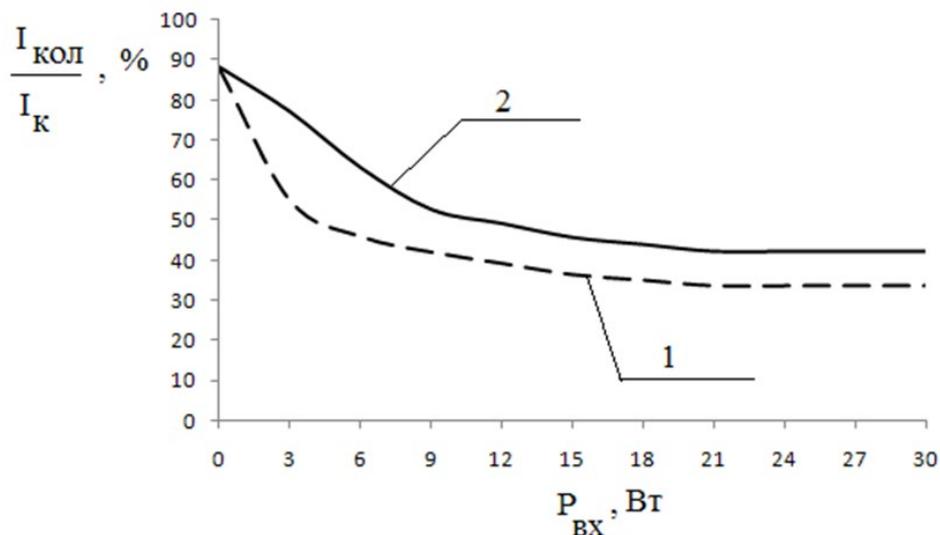


Рисунок 2. Зависимость динамического токооседания от входной мощности КИУ-284: 1 – исходная конструкция; 2 – с магнитомягким кольцом между вторым и третьем магнитом.

Были проведены измерения токопрохождения в статическом режиме работы клистрона с минимального значения напряжения катода (рисунок 3). Известно [4], что фокусировка постоянными магнитами характеризуется наличием области неустойчивости. Измерение показали, что зона неустойчивости лежит в области 40 – 45 кВ (токопрохождение меняется от 60% до 88%), что, казалось бы, дает необходимый запас для динамического режима. Однако, было принято решение сместить зону неустойчивости ниже по напряжению. Для этого, в области между вторым и третьем магнитом было расположено кольцо из магнитной стали, внутренний радиус которого равен внешнему радиусу резонаторного блока. Данное кольцо привело к резкому спаду продольной составляющей индукции магнитного поля. При этом, безусловно, выросла радиальная компонента индукции магнитного поля, но она имеет противоположные знаки в начале и конце реверса, значит в целом не меняет ситуации.

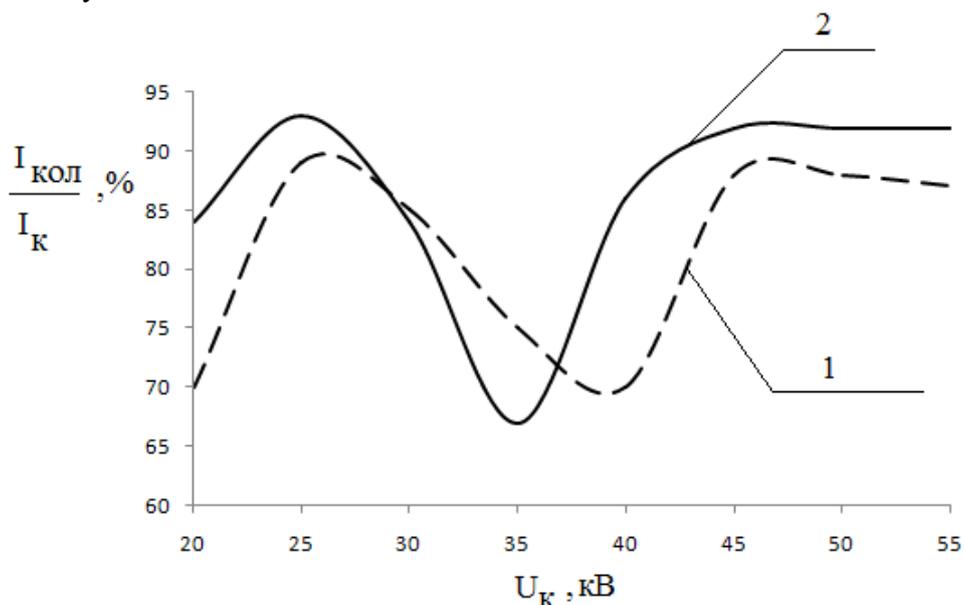


Рисунок 3. Зависимость статического токооседания от напряжения катода КИУ-284: 1 – исходная конструкция, 2 – с магнитомягким кольцом между вторым и третьем магнитом.

На рисунке 3 (кривая 2) представлена зависимость в статическом режиме работы токопрохождения для диапазона напряжений. Из эксперимента следует, что удалось существенно сместить зону неустойчивости (35 – 40 кВ). Измерения в динамическом режиме показали следующее (рисунок 1, рисунок 2): уровень насыщения по входному сигналу не изменился в пределах погрешности измерений, однако выходная мощность выросла с 6 до 8.2 МВт. При этом, динамическое токооседание получило более плавную зависимость от входного сигнала. Общий уровень токооседания в режиме насыщения оказался выше и составил 50%, однако диапазон входной мощности увеличился до 10 Вт и уменьшение тока коллектора приходится уже на начало перегиба амплитудной характеристики. Попытки юстировки прибора, т.е. увеличения магнитного поля в реверсах путем установки дополнительных перемыкателей, не привели к изменению режима работы прибора.

3. Заключение

Результаты предварительных экспериментов по влиянию динамической расфокусировки на выходные параметры МЛК с электронным КПД более 50% позволяют утверждать:

1. Для получения оптимальной выходной мощности необходимо обеспечивать положение зоны неустойчивости фокусировки в реверсном магнитном поле постоянных магнитов в статическом режиме работы клистрона не выше 60% от номинального напряжения катода при заполнении канала не более 0.5. С ростом величины заполнения электронным потоком канала транспортировки эта величина, очевидна, должна быть существенно ниже 60%;

2. В реверсной магнитной фокусирующей системе «развал» электронного потока происходит на линейном и слабо нелинейном участке амплитудной характеристики.

Последнее утверждение позволяет в принципе проводить теоретический анализ динамического токооседания используя методы линейной теории клистрона.

Список литературы

1. Тараненко В.Г., Шевченко В.И. Нелинейные уравнения ЛБВ с учетом динамической расфокусировки электронного потока и токооседания на замедляющую систему //Известия ВУЗов СССР, сер. «Радиоэлектроника». – 1969. – Т. XII. – № 9. – С. 1006 – 1017.
2. Боровков Ю.И., Калинин Ю.А. Анализ структуры электронного пучка ЛБВ в динамическом режиме методом диафрагмы с малым отверстием //Электронная техника, сер. «Электроника СВЧ» – 1971. – № 2. – С. 68 – 79.
3. Комаров Д.А. и др. Разработка сверхмощного многолучевого клистрона S-диапазона КИУ-278// Сборник докладов X Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и микроэлектроника СВЧ" – 2022. – С. 212 –214.
4. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. – М.: «Советское радио», 1966.