

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИБОРАХ М-ТИПА

ВАСЯНОВИЧ А.В., ГРИЦУНОВ А.В.,
ФРОЛОВА Т.И., ЧУРЮМОВ Г.И.

Описываются результаты численного моделирования переходных процессов в СВЧ-приборах М-типа с распределенным эмиттирующим катодом и замкнутым электронным потоком (магнетрон, амплитроны). Моделирование осуществляется методом макрочастиц. Приводится общее описание включения магнетронного прибора с выделением трех характерных этапов переходного процесса, а также подробное рассмотрение каждого из этих этапов.

1. Введение

Большинство опубликованных на сегодняшний день работ по теоретическому исследованию СВЧ-приборов со скрещенными полями содержат результаты моделирования стационарных режимов. Даже если в публикации приведены зависимости выходных параметров от номера временного шага (как, например, в работах [1,2]), это еще не означает, что они действительно отображают реальный переходной процесс. Дело в том, что использование так называемого времязависимого (transient) алгоритма моделирования — необходимое, но не достаточное условие нестационарности модели. Кроме него, обязательным является также корректный учет частотных зависимостей структуры электромагнитных полей и электродинамических параметров замедляющих систем (ЗС) в некоторой полосе частот. С этой точки зрения нестационарные модели СВЧ-приборов сближаются со спектральными моделями [3], с той разницей, что для первых необязательно наличие алгоритмов спектрального анализа и синтеза, а ширина полосы учитываемых частот определяется исключительно длительностью переходного процесса (обратно пропорциональна ей) и в большинстве случаев может быть достаточно малой.

Очевидно, что исследование переходных процессов в усилителях обязательно должно основываться на моделях, рассматривающих одновременно все пространство взаимодействия и дрейфа прибора — так называемых полноформатных (full-frame) моделях [4, 5]. Для автогенераторов типа магнетрона это условие с формальной точки зрения не обязательно. Однако все практически ин-

тересные нестационарные явления в этих приборах (конкуренция видов, шумы, колебания объемного заряда и т.п.) происходят из-за азимутальной неперидичности электронного потока, поэтому для их выявления необходимо также использовать полноформатную модель.

Настоящая работа содержит некоторые результаты численного моделирования переходных процессов в приборах М-типа с распределенным эмиттирующим катодом и замкнутым в азимутальном направлении электронным потоком, полученные с помощью полноформатных моделей за период с 1983 по 2000 гг. Соленоидальные составляющие полей рассчитываются методом комплексных амплитуд с помощью уравнения возбуждения, приведенного в работе [6]. Особенностью его является учет зависимости постоянной распространения волны в ЗС от частоты. Нелинейность дисперсионной характеристики, частотные зависимости затухания, волнового сопротивления и поперечной структуры поля ЗС в данных расчетах игнорируются.

2. Общая картина переходного процесса

На рис. 1 приведена временная зависимость амплитуды выходного сигнала при включении 12-сантиметрового магнетрона средней мощности, предназначенного для бытовых СВЧ-печей. Анодное напряжение U_a составляет 3,6 кВ при напряжении Хартри U_H для данного прибора, равном 3,55 кВ. Рис. 2 содержит аналогичную зависимость, полученную при включении 25-сантиметрового амплитрона средней мощности, используемого в аэродромных РЛС. Здесь $U_a = 9,5$ кВ, $U_H = 8,78$ кВ. Наконец, на рис. 3 изображена временная функция фазы выходного сигнала этого же амплитрона при том же анодном напряжении. Анализ подобных временных диаграмм позволяет сделать вывод о том, что процесс включения усилителей и автогенераторов со скрещенными полями можно условно разбить на три этапа. Первым является предгенерационный этап, во время которого спицы объемного заряда еще не образовались. Второй — этап линейного взаимодействия потока с волной, когда

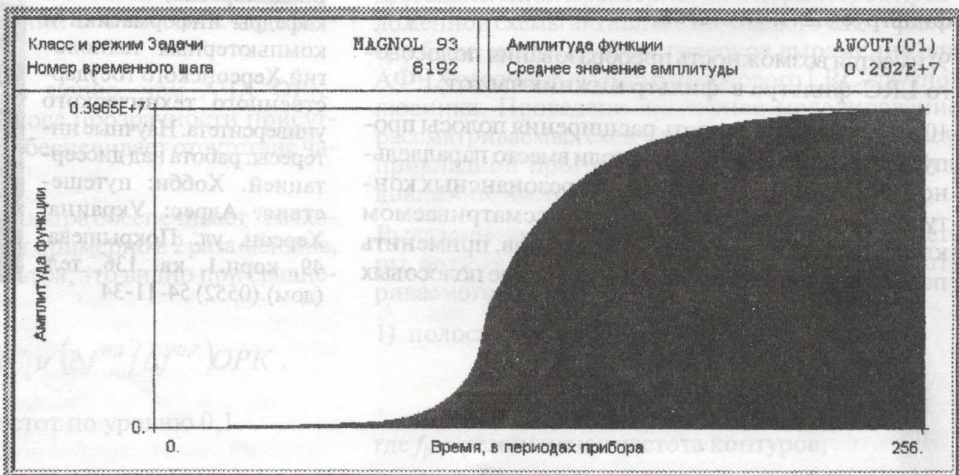


Рис. 1. Временная зависимость амплитуды выходного сигнала магнетрона

риборах
емного
й непе-
для их
полно-
тодро
ьтаты
цессов
ирую-
прав-
помо-
983 по
полей
туд с
ого в
виси-
С от
ери-
ово-
я СС
лоп
ожу
ли-
ти-
газ-
на-
ии
кВ.
ту-
п-
о-
но-
В.
я
и
их
о-
о-
-
г-
и



Рис. 2. Временная зависимость амплитуды выходного сигнала амплитрона

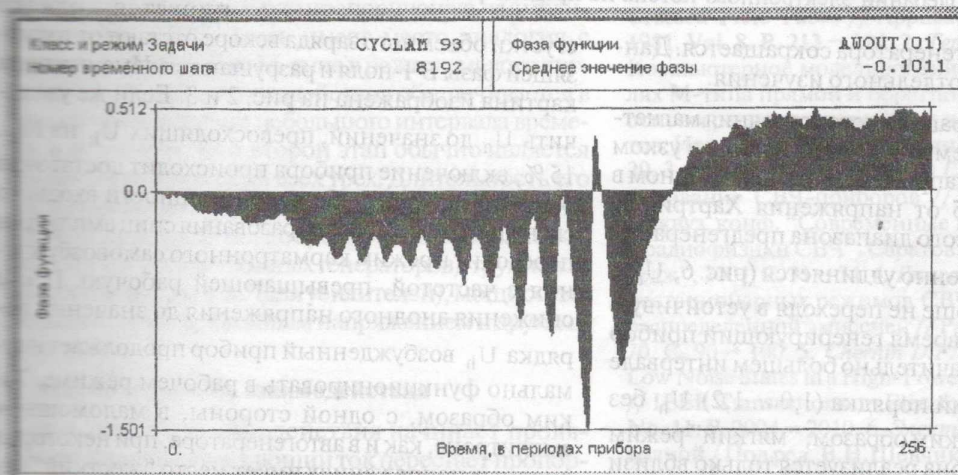


Рис. 3. Временная зависимость фазы выходного сигнала амплитрона

велинейными эффектами можно пренебречь. В это время происходит формирование спиц. Наконец, третий этап характеризуется нарастанием нелинейности процессов взаимодействия из-за достижения спицами анода и постепенным установлением стационарного режима. Рассмотрим более подробно каждый из этих этапов для различных классов приборов.

3. Предгенерационный этап

Включение прибора М-типа с распределенной эмиссией начинается с формирования электронной втулки. На начальный момент амплитуда ВЧ-поля в ЗС магнетронного автогенератора практически нулевая. Поэтому значительную часть времени объемный заряд магнетрона ведет себя так же, как электронное облако магнетронного диода. Напротив, в усилителе сформировавшийся поток сразу оказывается под воздействием ВЧ-поля от волны входного сигнала, распространившейся вдоль всей ЗС. Это справедливо также при использовании безмодуляторной схемы питания, поскольку длительность фронта входного импульса обычно существенно превышает время распространения энергии волны от входа к выходу прибора. Учитывая невысокий коэффициент усиления типовых ам-

плитронов (т.е. значительную мощность входного сигнала), следует ожидать существенного различия картины предгенерационного этапа у магнетронов и усилителей М-типа.

Расчеты подтверждают это предположение. На первом этапе переходного процесса в магнетронном автогенераторе происходит группировка объемного заряда, определяемая исключительно параметрами "электронно-волнового резонатора", которым является замкнутый электронный поток [7]. Спустя несколько десятков циклотронных периодов, внешняя граница втулки приобретает модулированный вид (рис. 4). Число волн, укладываемых вдоль периметра прибора, зависит от индукции внешнего

магнитного поля и анодного напряжения и не зависит от электродинамических параметров ЗС.

Спектр колебаний объемного заряда в предгенерационном режиме исследуемого магнетрона, полученный путем анализа наведенного тока зонда, расположенного на среднем радиусе между катодом и анодом, показан на рис. 5. Существует предположение, что при близости частоты гармоники собственного азимутального колебания замкнутого электронного потока с номером $N/2$ (N — число резонаторов ЗС) к частоте р-вида прибора длительность предгенераци-

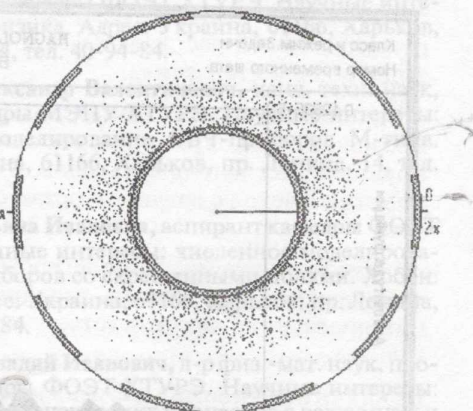


Рис. 4. Объемный заряд в магнетроне на предгенерационном этапе

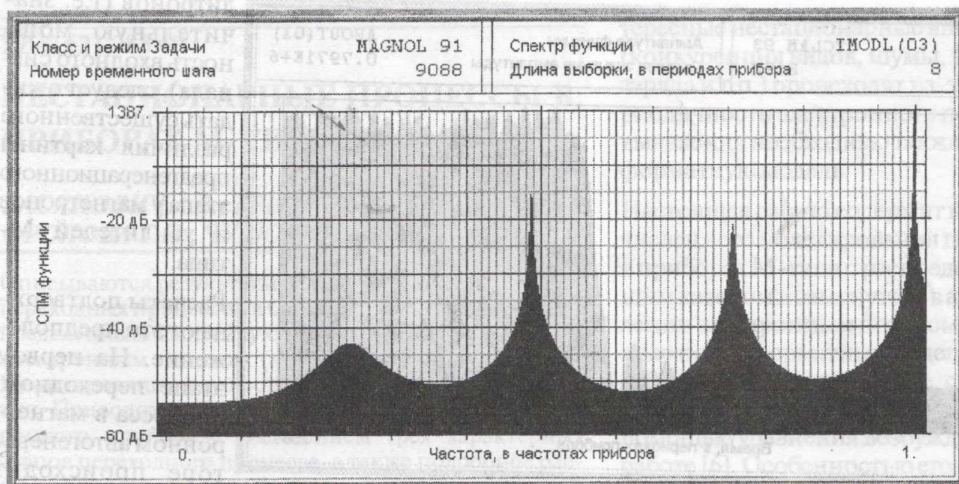


Рис. 5. Спектр колебаний электронного потока на предгенерационном этапе

онного режима автогенератора сокращается. Данный вопрос требует отдельного изучения.

Переход от предгенерационного состояния магнетрона к генерирующему происходит лишь в узком интервале анодных напряжений, расположенном в пределах 1,0 ... 1,05 от напряжения Хартри. За верхней границей этого диапазона предгенерационный этап существенно удлиняется (рис. 6, $U_a = 3,8$ кВ), часто вообще не переходя в устойчивую генерацию. В то же время генерирующий прибор функционирует в значительно большем интервале анодных напряжений порядка (1,0 ... 1,2) U_H без срыва колебаний. Таким образом, “мягкий” режим включения магнетрона реализуется только вблизи напряжения Хартри.

Ввиду отсутствия высокочастотной резонансной системы, длительность переходного процесса в усилителях М-типа обычно существенно меньше, чем в автогенераторах. При этом пропорционально сокращаются все три этапа. Однако в некоторых условиях предгенерационное состояние усилителя может, как и в магнетроне, значительно удлиняться, иногда растягиваясь на неопределенное время. Данное явление часто наблюдается в приборах



Рис. 6. Временная зависимость амплитуды сигнала негенерирующего магнетрона

малой и средней мощности, обладающих сравнительно высоким коэффициентом усиления. Оно состоит в том, что при малых входных мощностях и анодных напряжениях незначительно (на несколько процентов) превышающее напряжение Хартри возбуждение амплитрона оказывается затруднительным. Электронный поток периодически группируется, однако

сгустки объемного заряда вскоре отстают от тормозящей фазы ВЧ-поля и разрушаются. Именно такая картина изображена на рис. 2 и 3. Если же увеличить U_a до значений, превосходящих U_H на 10 ... 15 %, включение прибора происходит достаточно быстро даже при небольшой мощности входного сигнала, однако после образования спич амплитрон переходит в режим карматронного самовозбуждения с частотой, превышающей рабочую. После снижения анодного напряжения до значений порядка U_H возбужденный прибор продолжает нормально функционировать в рабочем режиме. Таким образом, с одной стороны, в маломощном амплитроне, как и в автогенераторе, при некоторых анодных напряжениях имеет место “жесткий” режим возбуждения. С другой стороны, области анодных напряжений, в которых имеет место “мягкий” режим, у этих приборов различны. Обсуждение причин такого явления — тема отдельной статьи. По-видимому, оно связано с воздействием поля объемного заряда, которое в маломощных приборах относительно велико по сравнению с ВЧ-полем ЗС.

4. Этап линейного взаимодействия

Главной особенностью данного этапа является экспоненциальное нарастание амплитуды сигнала на выходе прибора, согласующееся с результатами линейной теории [6]. Возбуждающий ток в линейном режиме определяется степенью группировки втулки, которую визуально можно оценить исходя из высоты волнообразных возмущений ее внешней границы (рис. 7).

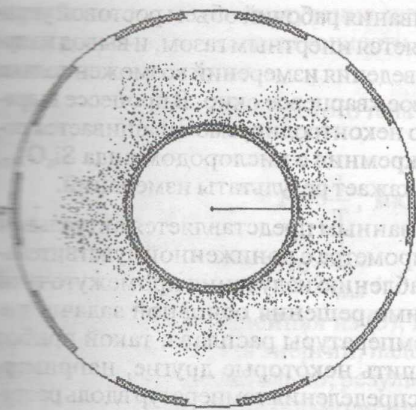


Рис. 7. Объемный заряд в магнетроне на этапе линейного взаимодействия

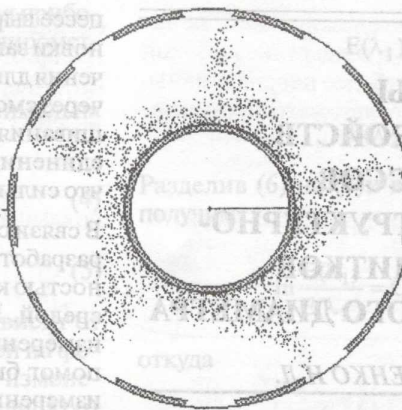


Рис. 8. Объемный заряд в магнетроне на этапе нелинейного взаимодействия

Очевидно, что пока группировка втулки относительно невелика, она примерно пропорциональна амплитуде волны в ЗС. Здесь имеет место аналогия с лучевыми приборами М-типа в режиме малого сигнала. Линейность взаимодействия обеспечивается в течение сравнительно небольшого интервала времени, в результате чего второй этап обычно является самым коротким среди всех трех. Длительность его зависит от скорости нарастания амплитуды ВЧ-поля, которая определяется добротностью резонансной системы (для магнетронных генераторов), групповой скоростью волны в ЗС (для усилителей), мощностью входного сигнала, анодным напряжением и другими факторами.

5. Этап нелинейного взаимодействия

Нелинейность взаимодействия начинает проявляться, когда возбуждающий ток перестает пропорционально зависеть от амплитуды ВЧ-поля ЗС. Это происходит несколько раньше, чем вершины спиц достигают анода, т.е. формируются каналы конвекционного тока (рис. 8). С этого момента экспоненциальное увеличение амплитуды выходного сигнала уступает место более медленному нарастанию, переходящему в асимптотическое приближение к стационарному значению. У магнетронов длительность данного этапа в основном определяется добротностью резонансной системы и почти не зависит от анодного напряжения. Для усилителей она практически не изменяется с изменением мощности входного сигнала, что легко объяснить, учитывая “насыщенный” режим работы этих приборов [8]. При работе усилителя на высоковольтном участке вольтамперной характеристики в конце третьего этапа часто наблюдается кратковременное превышение выходной мощностью и анодным током их стационарных значений, что связано, по-видимому, с особенностями фазовых соотношений в приборе. Подробнее данный вопрос предполагается обсудить в отдельной статье.

6. Выводы

В результате проведенных исследований установлена общая картина нестационарных явлений, имеющих место при включении усилителей и автогенераторов М-типа с распределенным катодом и замкнутым электронным потоком. Выделены три

этапа переходного процесса. Установлено, что первый из них (предгенерационный) наиболее подвержен воздействию различных факторов, приводящих к флуктуациям длительности включения и пропускам импульсов. Для обеспечения стабильного запуска прибора необходимо учитывать “жесткость” режима его возбуждения при некоторых значениях анодного напряжения.

Литература: 1. MacGregor D.M. Computer Modeling of Crossed-Field Tubes // Applications of Surface Science. 1981. Vol. 8. P. 213 – 224. 2. Терентьев А.А., Гурьев И.К. Компьютерное моделирование процессов в усилителях М-типа прямой и обратной волны // Физические основы радиоэлектроники и полупроводников. Саратов: Изд-во Саратовск. пед. ин-та, 2000. Вып. 5. С. 28 – 29. 3. Грицунов А.В., Чурюмов Г.И. Спектральное моделирование СВЧ-приборов // Материалы междунар. межвуз. конф. “Современные проблемы электроники и радиопизики СВЧ”. Саратов: Изд-во ГосУНЦ “Колледж”, 2001. С. 31 – 34. 4. Грицунов А.В. Моделирование нестационарных режимов СВЧ-усилителей типа М с распределенной эмиссией // Радиотехника. 1984. Вып. 70. С. 90 – 100. 5. Chernin D.P. Computer Simulation of Low Noise States in a High-Power Crossed-Field Amplifier // IEEE Transactions on Electron Devices. 1996. Vol. 43, No. 11. P. 2004 – 2010. 6. Электроника ламп с обратной волной / Под ред. В.Н.Шевчика, Д.И.Трубецкова. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1975. 195 с. 7. Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1962. 336 с. 8. Цейтлин М.Б., Фурсаев М.А., Бецкий О.В. Сверхвысокочастотные усилители со скрещенными полями / Под ред. М.Б.Цейтлина. М.: Сов. радио, 1978. 280 с.

Поступила в редколлегию 19.01.01

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Айзацкий Н.И.

Васянович Анатолий Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры ФЭТ ХТУРЭ. Научные интересы: радиофизика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-84.

Грицунов Александр Валентинович, канд. техн. наук, доцент кафедры МЭПУ ХТУРЭ. Научные интересы: численное моделирование СВЧ-приборов М-типа. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-62.

Фролова Татьяна Ивановна, аспирант кафедры ФЭТ ХТУРЭ. Научные интересы: численное моделирование СВЧ-приборов со скрещенными полями. Хобби: вязание. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-84.

Чурюмов Геннадий Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры ФЭТ ХТУРЭ. Научные интересы: моделирование физических процессов в вакуумных и твердотельных электронных приборах. Увлечение: спорт (футбол). Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-84.