

01;09

Численное моделирование магнетронных генераторов с учетом конкуренции видов колебаний

© В.Б. Байбурин, В.П. Еремин, А.В. Сысуев, А.А. Терентьев

Саратовский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 12 июля 1999 г.

Построена численная модель, позволившая проанализировать эффект "перескока" колебаний в магнетронных генераторах, и рассчитаны его количественные характеристики.

Одним из наиболее распространенных и опасных видов нарушения номинального рабочего режима генерации в магнетронных генераторах является так называемый "перескок" колебаний. Он заключается в том, что магнетрон в некоторых условиях, например при изменении напряжения питания, генерирует не основной рабочий вид колебаний, а другой, обычно называемый "паразитным". В процессе "перескока" имеет место конкуренция видов колебаний, заканчивающаяся доминированием одного из видов, как правило того, для которого выполняются условия синхронизма с электронным потоком.

Экспериментальное исследование описанного эффекта сопряжено со значительными трудностями, так как при "перескоке" на другой вид протекают большие токи и рассеивается большая мощность в анодной системе, что грозит выходом прибора из строя.

Хотя описанное явление известно давно, его теоретическое исследование численное моделирование с расчетом динамических параметров до сих пор оказывалось невозможным. Дело в том, что даже строгие математические модели, начиная с [1], использовали метод движущегося вместе с волной сектора пространства взаимодействия. И только с реализацией так называемого многопериодного подхода [2], позволяющего рассмотреть процесс во всем пространстве взаимодействия одновременно, появилась возможность достаточно детально рассмотреть возбуждение сразу нескольких видов колебаний и их конкуренцию.

В данной работе приведены основные результаты применения многопериодной многоволновой модели [3] для анализа эффекта "перескока" и расчета его количественных характеристик.

В качестве входных данных модели выбраны следующие параметры: геометрические размеры (радиусы катода и анода, высота анодного блока), эмиссионные характеристики катода (плотность тока термоэмиссии — j , максимальный коэффициент вторичной эмиссии — σ_m и др.), индукция магнитного поля и анодное напряжение U_a . Для каждого вида задаются "холодные" электродинамические параметры: частота — f_i , постоянная распространения — γ_i , волновое сопротивление — z_i , внесенная добротность — Q_i и собственная добротность — Q_{0i} на частоте f_i . Кроме того, в модели задаются служебные параметры: начальное (затравочное) число крупных частиц и начальные (затравочные) амплитуды видов колебаний. Начальные амплитуды всех видов колебаний задавались одинаковыми и на порядок меньшими, чем они ожидалось в номинальном режиме. Начальное число частиц, случайным образом распределенных в электронной втулке, соответствовало 5% стационарного (бриллюэновского) заряда. Как показано в [3], служебные параметры не влияют на конечный результат и определяют только время моделирования процесса установления режима устойчивой генерации.

При моделировании для каждого вида колебаний решаются уравнения возбуждения, а в уравнениях движения учитывается влияние ВЧ-полей всех видов колебаний.

Для исследования был выбран магнетрон см-диапазона. Анализировались возможности возбуждения двух видов: основного рабочего вида ($f_1 = 2450$ МГц, $\gamma_1 = 7$, $z_1 = 6.4 \Omega$, $Q_1 = 65$, $Q_{01} = 945$) и высоковольтного вида ($f_2 = 3430$ МГц, $\gamma_2 = 6$, $z_2 = 8.3 \Omega$, $Q_2 = 100$, $Q_{02} = 1000$), характеристики катода: $j = 2.3$ А/см², $\sigma_m = 2$.

На рис. 1 на вольт-амперной характеристике видно, что по мере роста анодного напряжения происходит срыв колебаний основного вида и "перескок" на высоковольтный вид колебаний (точки А–А — расчет, точки В–В — эксперимент). Анодное напряжение, при котором происходит срыв рабочего вида и перескок на высоковольтный вид (U), для данного магнетрона примерно равно 2.875 кВ.

На рис. 2 показано соответствующее скачкообразное изменение и других характеристик взаимодействия от анодного напряжения. Из рисунка видно, что и для основного (при $U_a < U$) и для высоковольтного вида (при $U_a > U$) характерны общие тенденции в зависимостях

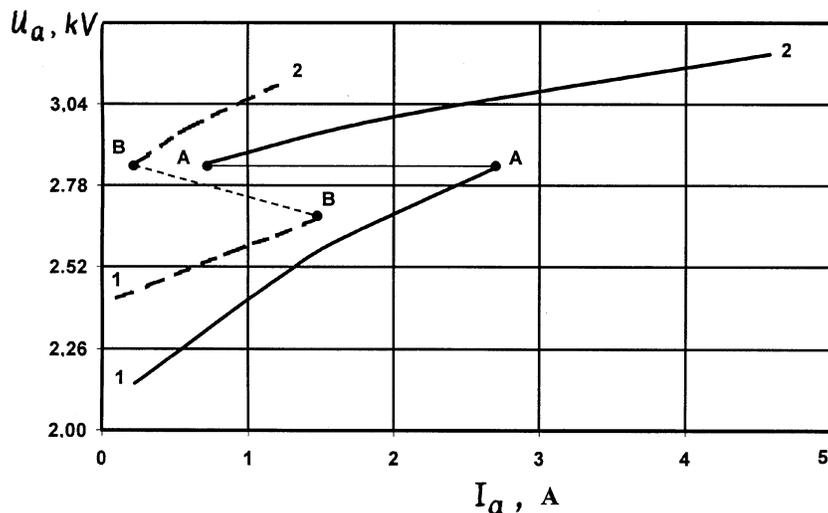


Рис. 1. Расчетная (—) и экспериментальная (---) вольт-амперные характеристики: 1 — основной вид, 2 — высоковольтный вид.

характеристик от режима питания. Расчеты показывают, что с ростом анодного напряжения наблюдается увеличение анодного тока, тока эмиссии, выходной мощности с одновременным уменьшением КПД, тока бомбардировки катода и пространственного заряда. При срыве (перескоке на другой вид) происходит скачкообразное изменение выходных характеристик.

Обращает на себя внимание следующее обстоятельство. Амплитуда и выходная мощность рабочего вида при наступлении срыва больше, чем амплитуда и выходная мощность возбуждающегося высоковольтного вида. Однако доминирующим видом при этих напряжениях оказывается высоковольтный вид. Это связано с тем, что в прикатодной области, в частности в области электронной втулки, где происходит формирование электронных спиц, условия синхронизма электронного потока с ВЧ-сигналом оказываются более благоприятными для высоковольтного вида. Поэтому высоковольтный вид оказывается более конкурентноспособным, чем основной (низковольтный), хотя не в состоянии сформиро-

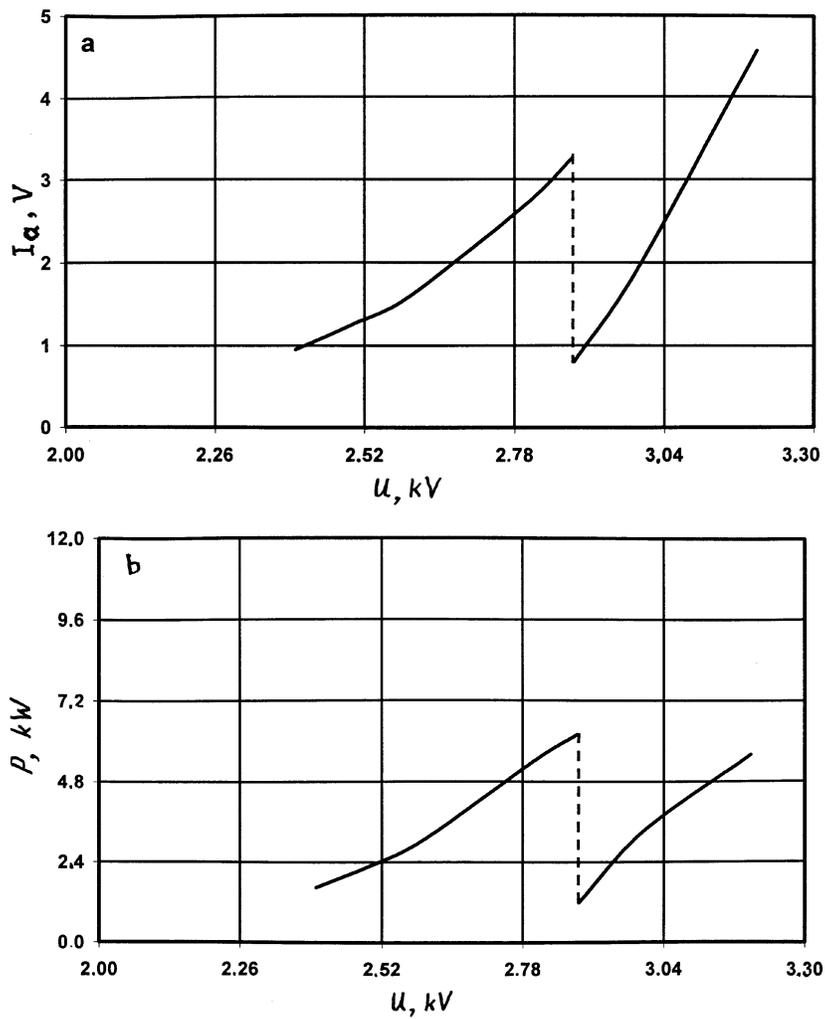


Рис. 2. Зависимости расчетных значений анодного тока (a), выходной мощности (b), отношения ВЧ-амплитуды к анодному напряжению (c), КПД ($d, 1$) и отношения пространственного заряда к бриллюэновскому заряду ($d, 2$) от анодного напряжения.

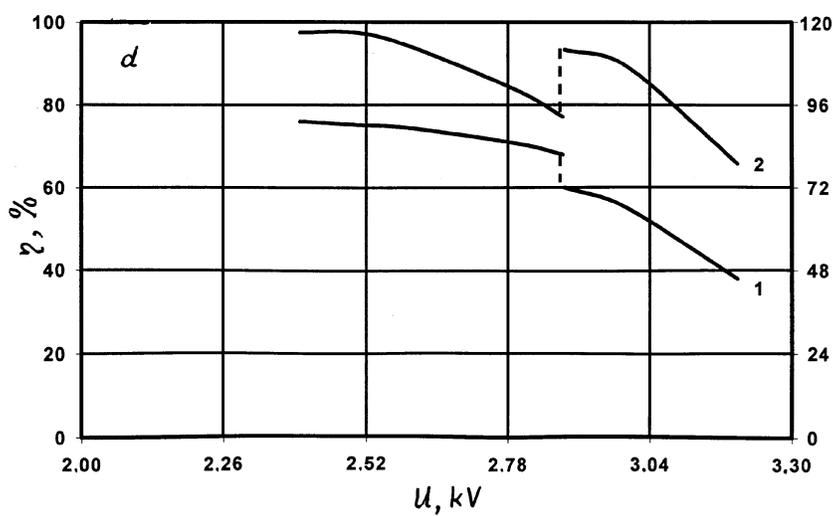
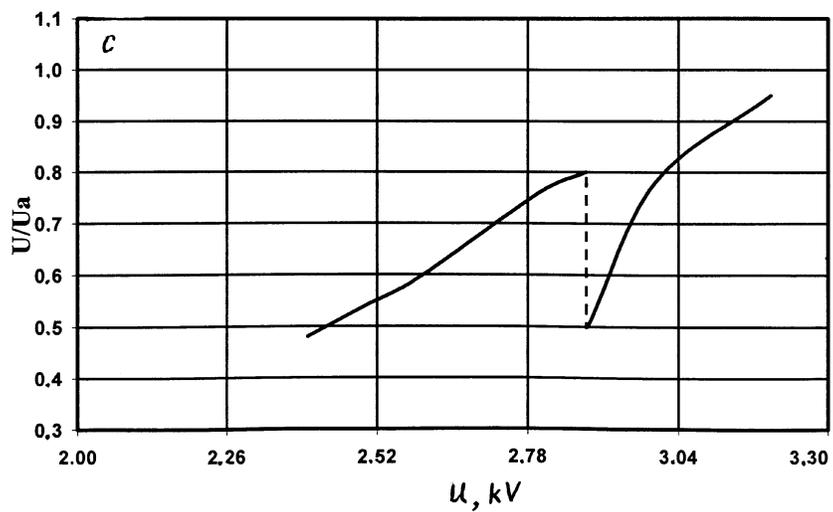


Рис. 2 (продолжение).

вать такие же мощные спицы, вследствие рассинхронизма в прианодной области.

Графики на рис. 3 отражают зависимость динамических параметров прибора в момент срыва от плотности тока термоэмиссии. Видно, в частности, что с уменьшением тока термоэмиссии анодное напряжение в точке срыва колебаний резко возрастает, а предельное значение анодного тока основного вида имеет максимум при определенном значении тока термоэмиссии.

При больших значениях плотности тока термоэмиссии анодное напряжение, при котором происходит срыв, а также ток анода и выходная мощность практически не зависят от эмиссии. Это связано с тем, что при плотности тока термоэмиссии, большей определенного значения, величина пространственного заряда остается постоянной и увеличение термоэмиссии не приводит к существенным изменениям процесса взаимодействия (увеличение тока термоэмиссии приводит только к увеличению тока бомбардировки катода).

Анализ зависимостей характеристик срыва от волновых сопротивлений на рабочем (z_1) и высоковольтном (z_2) видах колебаний показывает (рис. 4), что с ростом z_1 область генерации основного вида расширяется и основные характеристики (I_a , P — выходная мощность) достигают больших значений, чем в номинальном режиме. КПД и величина пространственного заряда при этом уменьшаются. Увеличение z_2 повышает эффективность взаимодействия на высоковольтном виде, что приводит к сужению области генерации основного вида и уменьшению величин I_a и U_a при срыве.

Похожие зависимости наблюдались и при варьировании нагруженных добротностей основного (Q_1) и высоковольтного (Q_2) вида.

Проведенные расчетные исследования конкретного магнетрона и решение тестовых задач показали, что предложенная многоволновая модель магнетронных генераторов дает возможность исследовать процессы конкуренции разных видов колебаний в магнетронах и позволяет предусмотреть возможные последствия в части конкуренции различных видов колебаний при оптимизации конструкции прибора по какому-либо параметру. Показано, что модель позволяет определять область генерации рабочего вида и характеристики при его срыве в качественном соответствии с экспериментальными результатами и известными физическими представлениями.

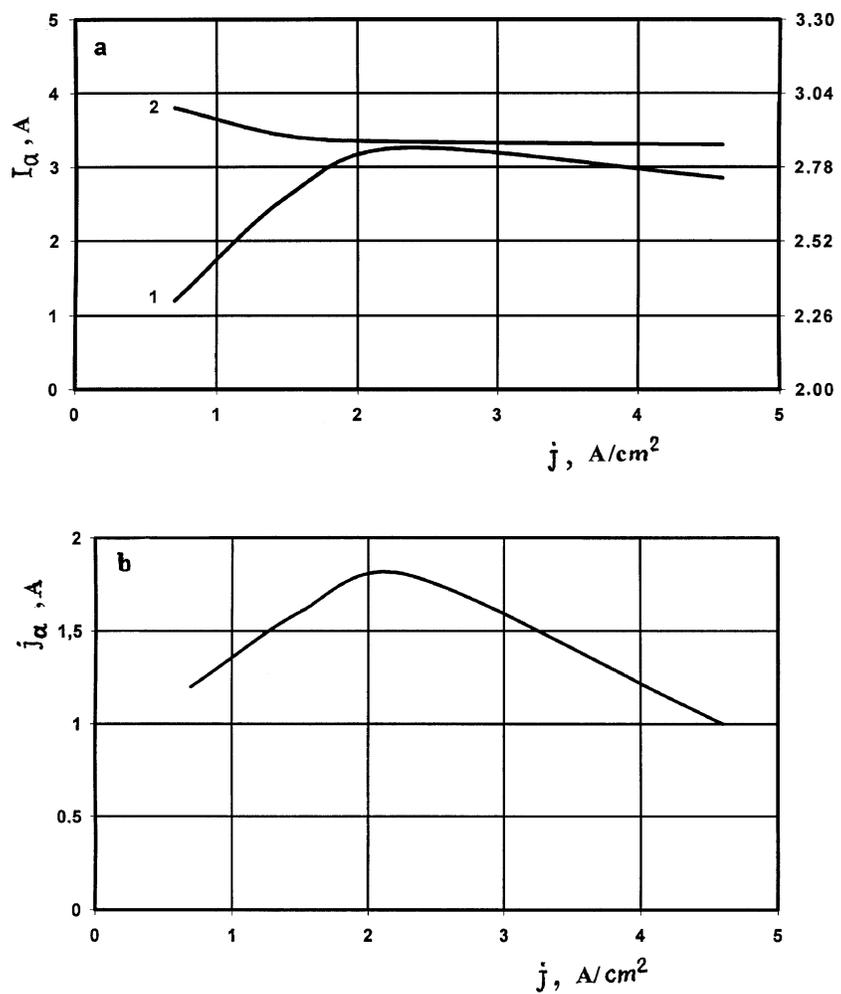


Рис. 3. Зависимости расчетных предельных значений анодного тока (*a, 1*), анодного напряжения (*a, 2*) и тока вторичной эмиссии катода (*b*) при срыве основного вида от плотности тока термоэмиссии.

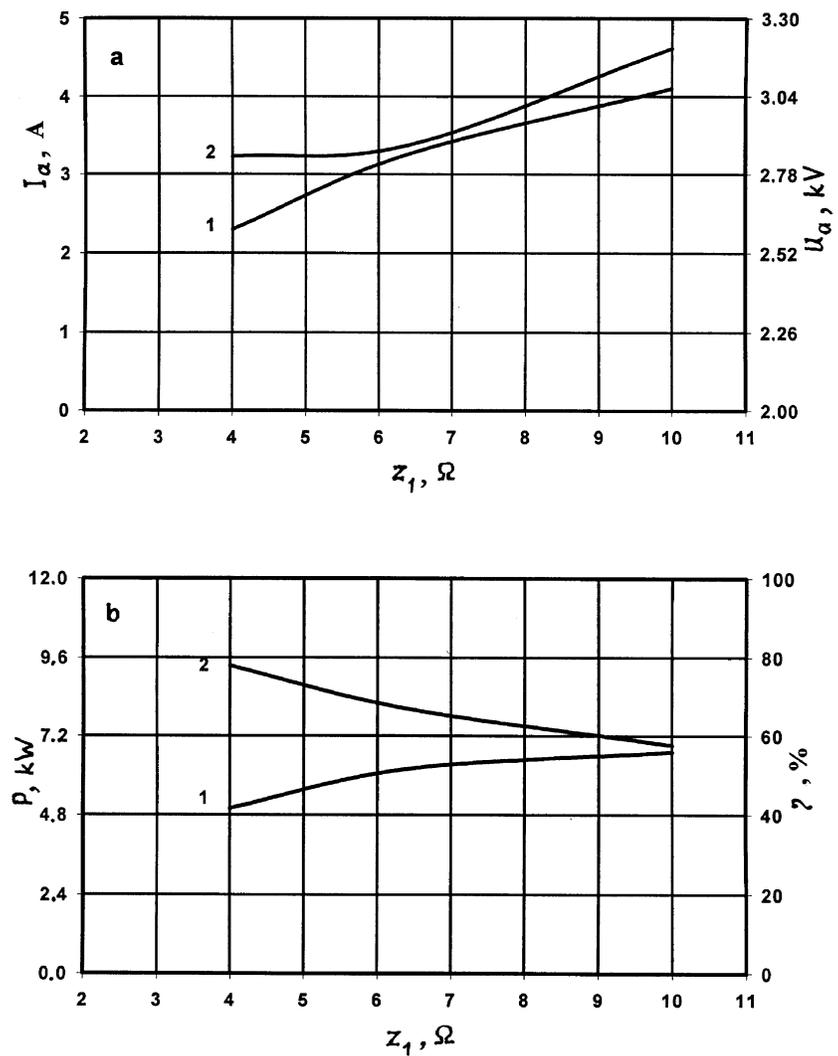


Рис. 4. Зависимости расчетных предельных значений анодного тока (а, 1), анодного напряжения (а, 2), выходной мощности (б, 1) и КПД (б, 2) при срыве основного вида от волнового сопротивления основного вида.

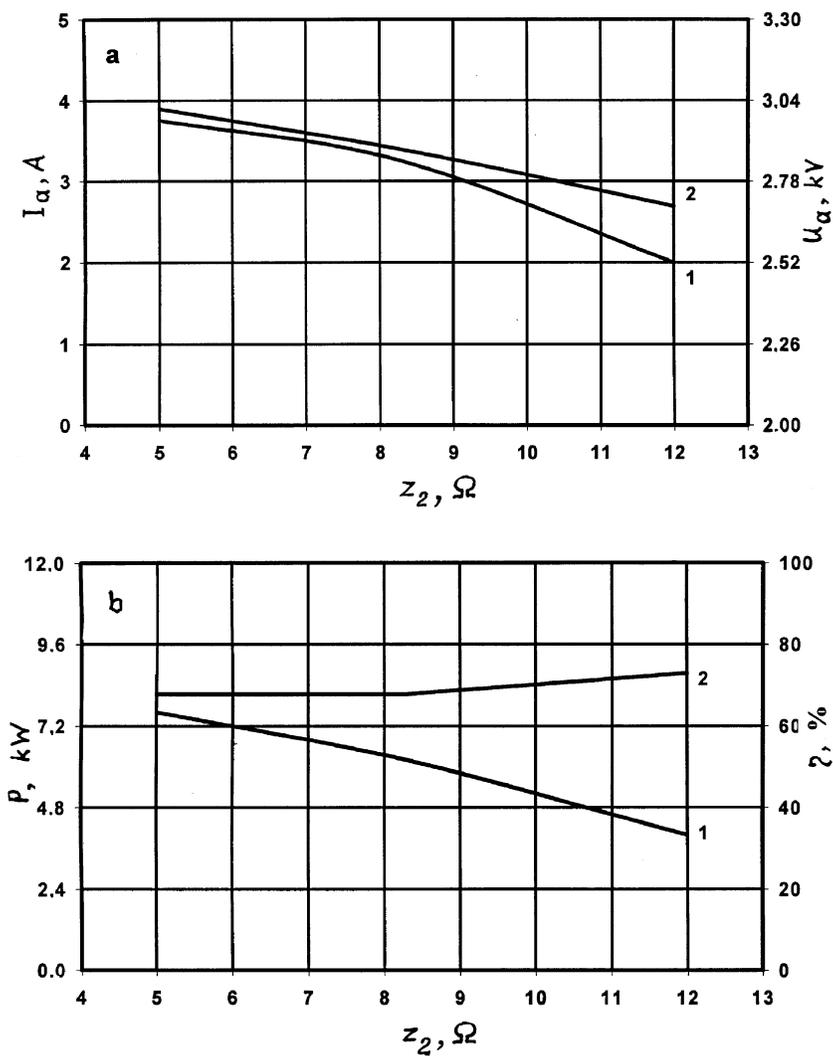


Рис. 5. Зависимости расчетных предельных значений анодного тока ($a, 1$), анодного напряжения ($a, 2$), выходной мощности ($b, 1$) и КПД ($b, 2$) при срыве основного вида от волнового сопротивления высоковольтного вида.

Модель может быть использована для всестороннего анализа физических процессов при срыве колебаний, а также, что важно с практической стороны, может проводить оптимизацию конструктивных параметров прибора с целью улучшения его выходных характеристик, разрабатывать не только качественные, но и количественные рекомендации.

Список литературы

- [1] *Yu S.P., Kooyers G.P., Vineman O.* // Journ. Appl. Phys. 1965. V. 36. N 8. P. 2550–2559.
- [2] *MacGregor D.M.* // Application surface. 1981. V. 8. N 1–2. P. 213–224.
- [3] *Байбурин В.Б., Терентьев А.А., Пластун С.Б.* // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 2. С. 236–240.