

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Артюхов И. И., Земцов А. И

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия, г. Саратов (410054, Саратов, ул. Политехническая, 77), e-mail: epp@sstu.ru

Магнетронные генераторы малой мощности широко применяются в бытовых печах СВЧ нагрева, а также в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии. Для работы магнетрона необходимо наличие двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи. Часто применяется схема, которая совмещает в себе обе эти функции. В этом случае при включении системы электропитания из-за инерционности процесса термоэмиссии катода анодный ток достигает рабочего значения спустя некоторое время после подачи напряжения на анод. Для расчета параметров источников питания магнетронного генератора нужна модель, которая позволяет описать магнетрон как нагрузку системы электропитания. В настоящее время известны простые модели, которые предназначены для расчета источников питания в установившемся режиме. В статье описывается модель магнетронного генератора в виде четырехполюсника с изменяемыми параметрами, которая позволяет исследовать статические и динамические характеристики в различных схемах источников питания.

Ключевые слова: магнетронный генератор, математическая модель, источник питания, динамические характеристики.

MODELLING OF THE MAGNETRON GENERATOR OF LOW POWER

Artyukhov I. I., Zemtsov A. I.

Saratov State Technical University named Gagarin Y.A., Russian Federation, Saratov (Polytechnicheskaya str., 77), e-mail: epp@sstu.ru

Magnetron generators of low power are widely applied in household furnaces of the microwave oven of heating, and also in the industrial electrotechnological equipments with the distributed supply of the microwave oven of energy. For magnetron work presence of two sources one of which carries out heat of the cathode is necessary, another serves for a food anode to a chain. The scheme which combines in itself both these functions is often applied. In this case at including of system of power supplies because of a lag effect of process of thermoemission of the cathode the anode current reaches working value after a while after strain giving on the anode. For calculation of parameters of power supplies магнетронного the generator the model which allows to describe a magnetron as a load of system of power supplies is necessary. Now simple models which are intended for calculation of power supplies in the established regimen are known. In article the model the magnetron generator in the form of the two-port network with changeable parameters which to investigate static and dynamic characteristics in various schemes of power supplies is described.

Keywords: Magnetron generator, mathematical model, power supply, dynamic characteristics.

Магнетронные генераторы малой мощности (до 1000 Вт) широко применяются в бытовых печах СВЧ нагрева, а также в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии [1].

Для работы магнетрона необходимо наличие двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи [4]. Часто применяется схема (рис. 1), которая совмещает в себе обе эти функции. Основой схемы является силовой

трансформатор Т с двумя вторичными обмотками. В этом случае при включении системы электропитания из-за инерционности процесса термоэмиссии катода анодный ток достигает рабочего значения спустя некоторое время после подачи напряжения на анод.

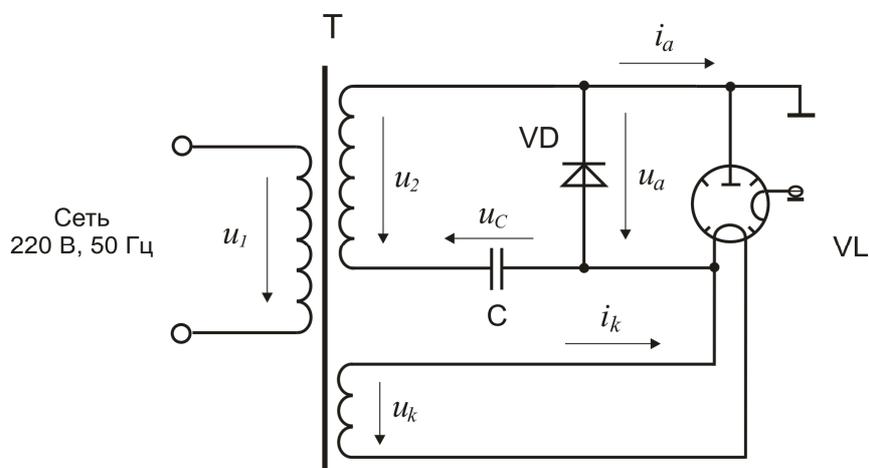


Рис. 1. Схема электропитания магнетрона малой мощности

Работа источника питания по схеме рис. 1 состоит из двух полупериодов. В первый из них происходит заряд конденсатора С от вторичной обмотки трансформатора Т через диод VD. При этом напряжение на аноде $u_a = 0$. Во второй полупериод напряжение u_2 на обмотке трансформатора суммируется с напряжением u_c на конденсаторе С. Как только анодное напряжение $u_a = u_2 + u_c$ становится больше порогового значения, через магнетрон начинает протекать ток i_a и возникает генерация СВЧ колебаний. Затем в течение всего интервала работы магнетрона анодное напряжение u_a и ток i_a магнетрона изменяются в соответствии с траекториями, которые определяются динамическим сопротивлением магнетрона и параметрами трансформатора.

На рис. 2 показаны осциллограммы, полученные при экспериментальном исследовании переходных процессов при пуске магнетрона М105 [2,3].

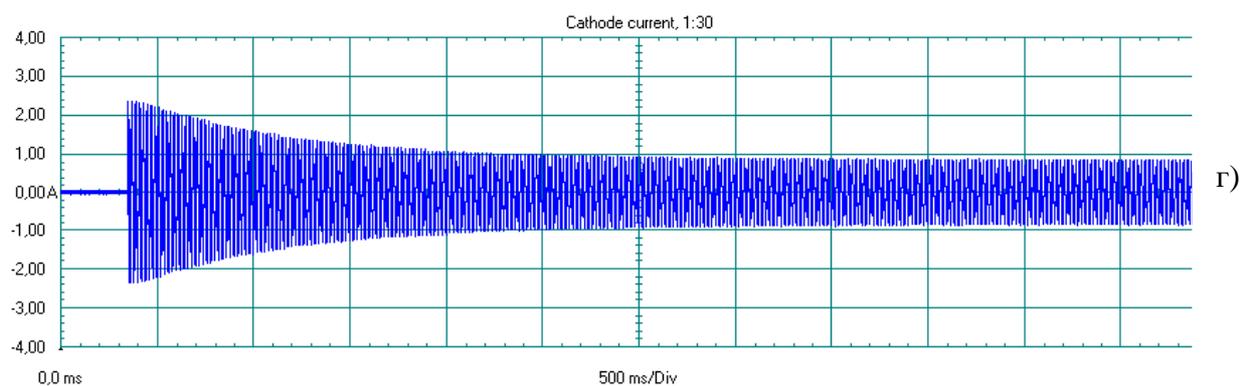
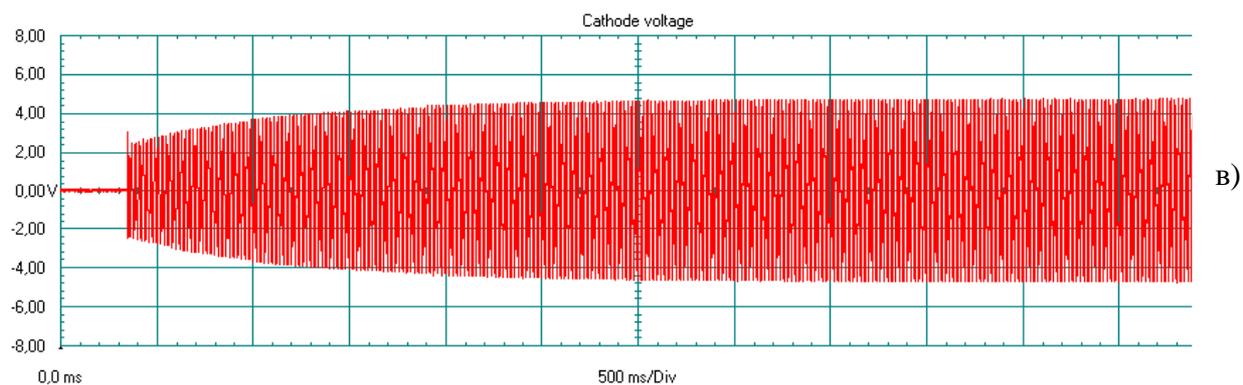
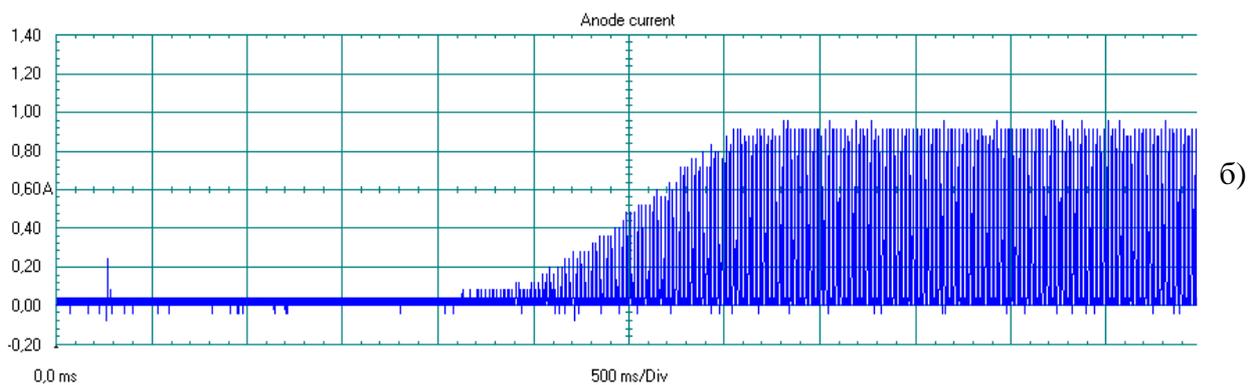
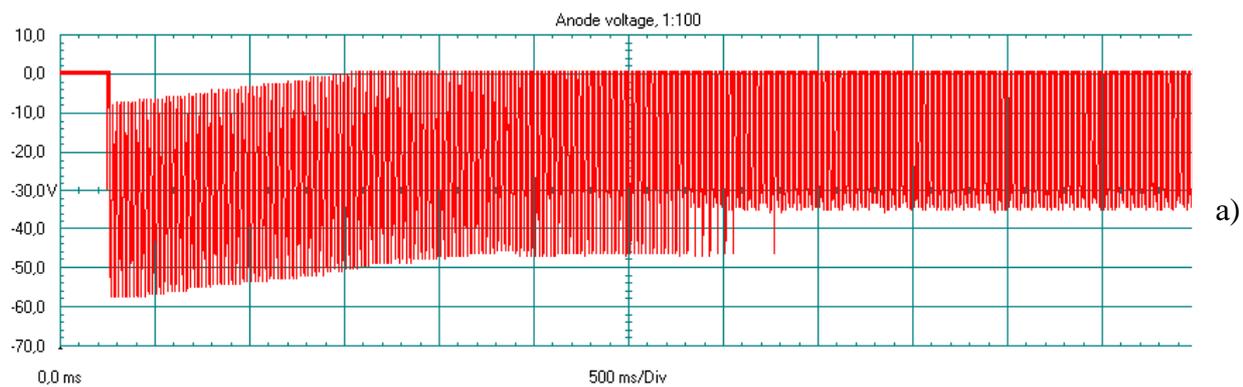


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов при включении источника питания магнетронного генератора: а – анодное напряжение; б – анодный ток; в – напряжение на катоде; г – ток катода

Запись осциллограмм напряжений и токов осуществлялась цифровым запоминающим осциллографом Fluke 196C, который имеет два гальванически изолированных входа. Через оптический порт интерфейса RS-232 результаты измерения сигналов и растровые изображения экранов передавались на персональный компьютер для последующей обработки с помощью программного обеспечения FlukeView для Windows.

Из осциллограмм видно, что пока ток катода не достигнет рабочего режима, источник анодного напряжения работает практически на холостом ходу. Вследствие этого анодное напряжение на первом этапе включения источника достигает удвоенного значения амплитуды напряжения на высоковольтной обмотке трансформатора. Затем по мере разогрева катода и увеличения тока его эмиссии происходит возрастание анодного тока и соответствующее снижение анодного напряжения.

Для расчета параметров схемы на рис. 1 и других схем электропитания магнетронного генератора необходимо иметь математическую модель, которая адекватно описывает электромагнитные процессы в динамических режимах.

При анализе статических режимов магнетронных генераторов обычно используют аппроксимированные вольт-амперные характеристики (ВАХ). Реальная ВАХ магнетрона имеет круто возрастающий начальный участок. Далее следуют излом и почти горизонтальный участок, который имеет небольшой наклон к оси абсцисс и характеризует работу магнетрона в генераторном режиме [4].

В области малых анодных напряжений, меньших порогового ($U_a < U_{II}$), условия синхронизма между электронами и ВЧ-полем не выполняются. Поэтому колебания не возникают и ток $I_a = 0$. Когда анодное напряжение достигнет пороговой величины, происходит самовозбуждение магнетрона и резкое нарастание анодного тока. После этого малое приращение анодного напряжения U_a ведет к тому, что величина тока I_a достигает максимальных значений, определяемых эмиссионной способностью катода [5].

В рамках теории, рассмотренной в работах [5,6], ВАХ магнетрона должны представлять собой семейство прямых, параллельных оси абсцисс. На практике увеличение тока I_a сопровождается ростом напряжения U_a . Экспериментальное значение порогового напряжения U_{II} определяется экстраполяцией пологой части характеристики до пересечения с осью ординат.

Для исследования статических и динамических режимов магнетронного генератора малой мощности авторами работы предлагается модель, схема которой показана на рис. 3. Модель магнетрона как нагрузка источника питания представляет собой четырехполюсник,

на одну пару выводов которого подается анодное напряжение u_a , на другую – напряжение накала катода u_k .

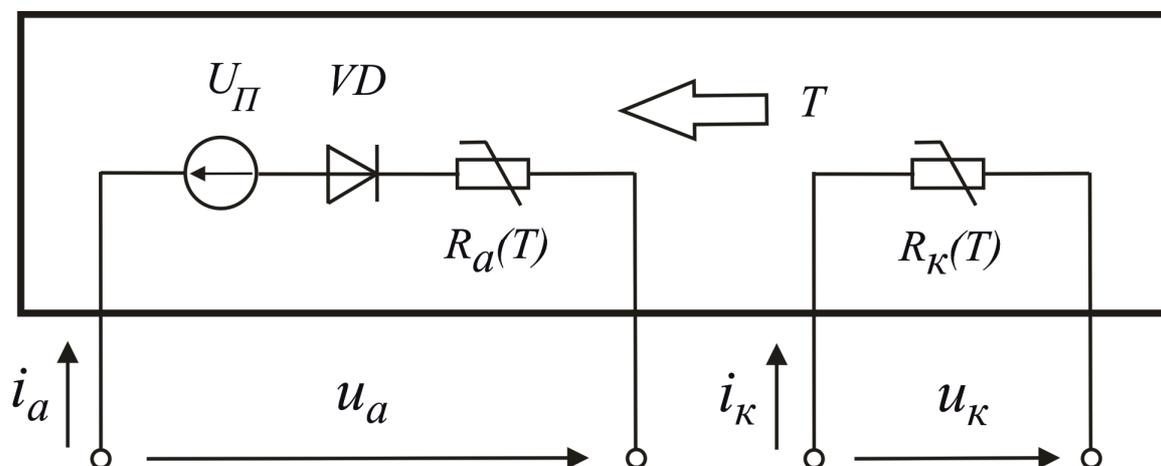


Рис. 3. Модель магнетронного генератора малой мощности

Для источника анодного питания магнетрон представлен схемой замещения, которая включает в себя последовательно соединенные источник противоЭДС, величина которой численно равна пороговому напряжению U_{Π} , диод VD , характеризующий одностороннюю проводимость магнетрона по анодной цепи, а также нелинейный резистор R_a , который моделирует динамическое сопротивление магнетрона. При этом выдвигается гипотеза о том, что величина резистора R_a зависит от температуры катода T . Поэтому в процессе пуска магнетронного генератора величина этого резистора изменяется от некоторой максимальной величины при холодном катоде до установившегося значения при рабочей температуре катода. Сказанное поясняет рис. 4, на котором показаны ВАХ магнетрона для различных значений температуры катода и ВАХ источника анодного питания. В процессе разогрева катода сопротивление R_a уменьшается, что приводит к уменьшению наклона ВАХ магнетрона, вследствие чего анодный ток увеличивается, а напряжение на аноде – уменьшается.

Для анодной цепи магнетрона по схеме рис. 3 можно записать следующее уравнение:

$$F \cdot i_a \cdot R_a(T) + U_{\Pi} = u_a, \quad (1)$$

где F – логическая функция, которая равна 1, если выполняются условия генерации магнетрона, и нулю – в противном случае.

Катод в модели на рис. 3 представлен нелинейным резистором, величина которого связана с температурой катода T зависимостью

$$R_k = R_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (2)$$

где R_0 – начальное сопротивление катода при температуре T_0 ; α – температурный коэффициент сопротивления.

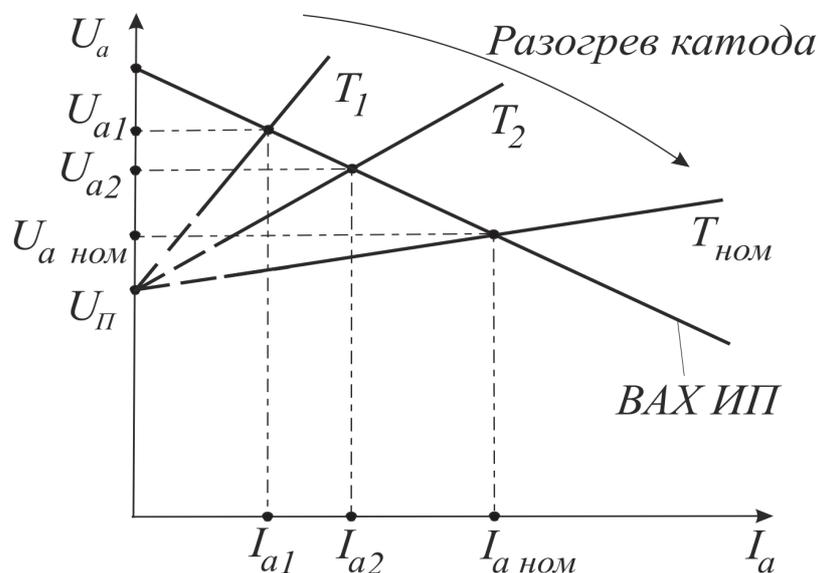


Рис. 4. Изменение ВАХ магнетрона в процессе разогрева катода ($T_1 < T_2 < T_{ном}$)

Уравнение для катодной цепи имеет вид

$$u_k = R_k \cdot i_k. \quad (3)$$

Для установления зависимости $R_a(T)$ воспользуемся формулой Ричардсона – Дэшмана для плотности тока термоэлектронной эмиссии

$$j = A \cdot T^2 \exp(-\phi / kT), \quad (4)$$

где A – постоянный множитель; T – температура катода по абсолютной шкале Кельвина; ϕ – работа выхода электронов; k – постоянная Больцмана.

Из осциллограмм на рис. 2 видно, что анодный ток магнетрона начинает интенсивно увеличиваться спустя некоторое время после подачи питающего напряжения. Это происходит после того, как температура катода достигнет определенного значения. Далее ток возрастает по кривой, выражение для которой можно получить из формулы (1) путем перехода к усредненным величинам тока I_a и напряжения U_a :

$$I_a = \frac{U_a - U_{П}}{R_a(T)}. \quad (5)$$

При достижении температуры катода значения $T = T_{ном}$ анодный ток становится равным номинальному значению $I_a = I_{a.ном}$. Этой точке переходного процесса соответствует номинальное значение сопротивления $R_a = R_{a.ном}$ по схеме замещения на рис. 3.

Найдем также величину анодного тока магнетрона для номинального режима с помощью формулы (4) и приравняем ее с величиной тока, рассчитанной по формуле (5). В результате после преобразований получим

$$U_a - U_{II} = R_{a.ном}(T_{ном}) \cdot S \cdot A \cdot T_{ном}^2 \exp(-\varphi / kT_{ном}). \quad (6)$$

где S – эффективная площадь катода.

Учитывая незначительное изменение анодного напряжения на участке интенсивного возрастания анодного тока, аналогичное выражение можно записать для любой точки этого участка

$$U_a - U_{II} = R_a(T) \cdot S \cdot A \cdot T^2 \exp(-\varphi / kT). \quad (7)$$

Далее на основании выражений (6) и (7) получим формулу для нахождения эквивалентного анодного сопротивления

$$R_a(T) = R_{a.ном} \left(\frac{T_{ном}}{T} \right)^2 \exp\left(\frac{\varphi \cdot (T_{ном} - T)}{k \cdot T_{ном} \cdot T} \right). \quad (8)$$

Температуру катода можно определить в результате решения дифференциального уравнения теплового баланса

$$cdT + (\alpha_k + \alpha_u)STdt = I_k^2 R \cdot dt. \quad (9)$$

где m – масса катода; c – удельная теплоемкость; α_k, α_u – соответственно коэффициенты удельных потерь катода и изоляции; I_k – действующее значение тока катода; R_k – сопротивление катода, рассчитываемое по формуле (2).

При расчете тока катода будем считать, что накал катода осуществляется от источника синусоидального напряжения \underline{U}_H , обладающего внутренним активно-индуктивным сопротивлением $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$. В этом случае комплекс тока катода определится по формуле

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_H}{R_H + R_k + jX_H}. \quad (10)$$

Переходя к действующим значениям величин, получим следующее выражение для тока катода

$$I_k = \frac{U_H}{\sqrt{(R_H + R_k)^2 + X_H^2}}. \quad (11)$$

Уравнения (1) – (3), (8), (9) и (11) образуют систему, которая позволяет описать магнетрон как нагрузку источника питания. Полученная таким образом модель магнетрона может быть реализована в среде MATLAB+Simulink и применена для исследования различных схем магнетронных генераторов.

Список литературы

1. Артюхов И. И., Земцов А. И. Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок // Вестник СГТУ. – 2011. – № 1(54). – Вып. 3. – С. 151–156.
2. Артюхов И. И., Земцов А. И. Экспериментальное исследование характеристик СВЧ-генератора магнетронного типа // Проблемы электроэнергетики: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2009. – С. 130 –137.
3. Артюхов И. И., Земцов А. И., Сошинов А. Г. Переходные процессы при включении источника питания магнетронного генератора // Вестник СГТУ. – 2010. – № 3 (47). – Вып 2. – С. 59 – 61.
4. Артюхов И. И., Фурсаев М. А. Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева: учеб. пособие. – Саратов: СГТУ, 2000. – 48 с.
5. Лебедев И. В. Техника и приборы сверхвысоких частот. – Т. II. – Электровакуумные приборы СВЧ / под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1972. – 376 с.
6. Милованов О. С., Собенин Н. П.. Техника сверхвысоких частот. – М.: Атомиздат, 1980. – 464 с.

Рецензенты:

Архангельский Ю.С., д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г. Саратов.

Фурсаев М. А., д.т.н., профессор кафедры «Электротехника и электроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., г. Саратов.