

Антоний Трифонов, Анастасия Кръстева, Мария Иванова  
Технически университет - София

*Abstract—This article introduces the modeling of the multielectrode evacuated electron tube. The purpose of the research is to create a mathematical model. An equivalent circuit consisted of two current dependant sources and set of parasitic elements is created. There are founded characteristic equations for anode current and grid current. Coefficients of these equations depend on anode voltage and grid voltage. The developed methodology is based on certain electronic element GU58B, but the method is capable of implementing other power elements which do not have modeled.*

Мощните генераторни триоди позволяват да се реализират промишлени генератори за индукционно нагряване за честоти 66 - 440kHz с мощности до 160 kW и за диелектрично нагряване за честоти 13.56 - 27.12MHz с мощности до 25kW. Проблемите, свързани с нелинейностите в характеристиките на тези прибори, търсено е на схемни решения за реализация на режим с висок коефициент на полезно действие и съгласуване с променливите параметри на товара са основание за търсене на адекватен машинен модел с възможностите на Design Center[1].

## Избор на подход за създаване на модела

В съвременните методи за моделиране съществуват най-общо два подхода за създаване модели на електронни елементи, известни като "физическо моделиране" и моделиране с "черна кутия" или формално моделиране [2].

Физическото моделиране се основава на физиката на процесите, протичащи в прибора. Въз основа, на това се извеждат математическите зависимости за характеристичните уравнения на модела. Литературното проучване [1-5] показва, че този подход за моделиране на електровакуумен триод е неефективен. Детайлното разглеждане е свързано с решаване на електродинамичните уравнения при съответните краеви условия за геометрията на електродите на лампата, което изключително много усложнява и модела и начина за определяне на моделните параметри. Ето защо в настоящата работа е избран подхода за моделиране с "черна кутия", още повече, че съвременните САПР позволяват да бъдат изследвани устройства и елементи, които нямат адекватни физически модели. За разлика от физическото моделиране, процесът по създаването на формален модел тип "черна кутия" не засяга структурата (конструкцията) на элемента. Задача, определена така, се свежда до моделиране характеристиките на триода с необходимата точност. Изходна информация са каталожните данни за

елемента и изискването за точността на модел, имащ следните компоненти:

- еквивалентна схема;
- набор от характеристични математически зависимости и параметри;
- условия и методи за анализ;

Програмната система Design Center позволява голяма гъвкавост при моделирането на електронни елементи. На потребителя се предлага голям набор от създадени и верифицирани вече модели. От изключителна важност е и съществуването на възможност за моделиране на поведенческо ниво. В този случай се изиска потребителя да създаде характеристичните зависимости и заместващата схема на нестандартния елемент.

Блоковете, с които се разполага за създаване на схеми, реализират дадена математическа функция. Например:

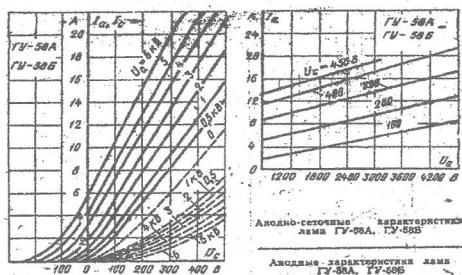
- SUM -Блокът представлява суматор на двата входни потенциала;
- LIMIT -Блокът представлява ограничител на входния потенциал в зададени граници;
- MUL -Блокът умножава два входни потенциала;
- EXP -Блокът реализира експоненциална функция;
- ABM -Блокът представлява реализация на математическа функция, при която изходът е функция на входните потенциали. Входовете могат да бъдат един, два или три;
- ABM/I -Блокът е аналогичен на горния, но изходът не е потенциал, а ток;
- TABLE -Блокът е аналог на таблично зададени стойности на вход и изход. Междинните стойности се апроксимират с права линия.

### Създаване на математически модел на триод ГУ58Б

Подходът по създаването на математически модел на мощн триод ще бъде описан чрез пример за моделиране на елемента ГУ58Б. На фиг. 1 са дадени каталожните характеристики на ГУ58Б.

Генераторният триод може да се разглежда като източник на ток, управляем по напрежение (ИТУН). В качеството на управляващо е напрежението на решетката, а управлявания ток е анодния.

В литературата [5] се дава предавателната характеристика  $I_a = f(U_g) | U_a = \text{const}$ . В заместващата схема  $I_a$  се моделира с генератор на ток, управляем с напреженията  $U_a$  и  $U_g$ . Токът на



фиг.1а

фиг.1б

решетката  $Ig$  трябва също да бъде моделиран. Целта е да му се намери съответстващата характеристична зависимост. Съдейки по характеристиките на фиг. 1a,  $Ig = f(Ug) | Ua = \text{const}$  се нарича решетъчна характеристика.

В заместващата схема  $Ig$  се моделира с генератор на ток, управляем с напреженията  $Ua$  и  $Ug$ .

Анодната характеристика (фиг. 1b),  $Ia = f(Ua) | Ug = \text{const}$  има специфичен участък, при  $Ua = 0 \div 600V$ .

На фиг.2 е представена еквивалентната схема на триода, в която има два генератора на ток  $ia$  и  $ig$ , моделиращи анодния и решетъчния ток. Те зависят от напреженията  $Uac$  и  $Ugc$ . Паразитните капацитети между изводите на вакуумния прибор са:  $Cga$ ,  $Cac$ ,  $Cgc$ . Данните за числените им стойности се дават в [3]. Съпротивлението между анода и катода  $Rout$  се приема с висока стойност [1].

### Модел на анодния ток

На фиг.1a са показани предавателните характеристики  $Ia = f(Ug) | Ua = \text{const}$ , които определят от зависимостта на анодния ток от напрежението на управляващата решетка.

На фиг.1b са показани статичните анодни характеристики  $Ia = f_1(Ua) | Ug = \text{const}$  за ГУ58Б.

Приемаме, че уравнението, удовлетворяващо двете характеристики, има следния вид:

$$Ia = k_0 (Ug + k_1 \cdot Ua)^m, \quad (1)$$

където:  $k_0$ -кофициент за изравняване на размерностите;

$k_1$ -кофициент, характеризиращ проницаемостта на триода;

$m$ -безразмерен коефициент;

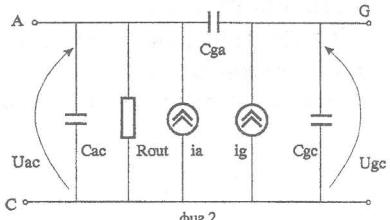
В най-общия случай  $m = f(Ua, Ug)$ . За ниски решетъчни напрежения ( $Ug < 100V$ ) е подходящо  $m$  да бъде  $3/2$ , за по-големи напрежения  $m$  трябва да променя своята стойност, т.е. не може да бъде константа.

Коефициентът  $k_1$  от уравнение (1) се изразява за  $Ia = 0$ :

$$k_1 = -\frac{Ug_0}{Ua}, \quad (2)$$

където  $Ug_0$ -запушващо напрежение на триода.

За да бъде постигната точност при моделирането и за да се моделират правилно фамилията криви, трябва коефициента  $k_1$  да зависи от анодното напрежение:  $k_1 = \Psi(Ua)$ .



фиг.2

Коефициентът  $k_0$  служи за изравняване размерностите от двете страни на уравнение (1). Неговата роля при моделирането на характеристиките е най-малка. Той може да се приеме за константа.

### Последователност на работа за моделиране на Ia

**I ЕТАП** Първият етап при моделирането на анодния ток е събиране на експериментални данни за триода. От каталожните характеристики на прибора са изчислени и представени в матричен вид:

$$Ua(V) = \begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{a2} \\ \dots \\ u_{an} \end{bmatrix}, \quad Ia(A) = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} & \dots & i_{1p} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} & \dots & i_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_{n1} & i_{n2} & i_{n3} & \dots & i_{np} \end{bmatrix}, \quad Ug(V) = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \dots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & \dots & u_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & u_{n3} & \dots & u_{np} \end{bmatrix}$$

Всеки ред от матрицата с решетъчните напрежения и анодните токове отговаря на измерване с  $Ua = \text{const}$  в съответната последователност представена в  $[Ua]$ , а също и  $Ia_{ij}$  е измерен за  $Ug_{ij}$ .

За точката, в която характеристиките  $Ia(Ug)$  пресичат абсцисата, може да се напише равенство (2). Намира се  $k_1$  за различните анодни напрежения от матрицата  $[Ua]$  и се изчислява средната стойност -  $k_1^{\wedge}$ . За ГУ58Б  $k_1^{\wedge} = 0.046$ .

Последният коефициент, който е неизвестен в уравнение (1) е  $k_0$ . Той се намира по формулата:

$$k_0(j,i) = \frac{Ia(j,i)}{[Ug(j,i) + k_1^{\wedge} \cdot Ua(j)]^{3/2}} \quad (3)$$

Матрицата  $[k_0]$  има същата размерност като  $[Ia]$  и  $[Ug]$ . Средната стойност на  $k_0^{\wedge} = 0.0015$ .

Предавателните характеристики, начертани с намерените в първо приближение коефициенти ( $k_0^{\wedge} = 0.0015$ ,  $k_1^{\wedge} = 0.046$ ,  $m = 1.5$ ) се различават съществено от каталожните характеристики.

**II ЕТАП** На следващият етап се търсят функции, апроксимиращи изчислените стойности за  $k_1$  и  $m$ .

За  $k_1$  функцията има вида:

$$k_1 = \Psi(Ua) = A \cdot \exp(-B \cdot Ua) + C, \quad (4)$$

където А, В и С - коефициенти.

Техните стойности зависят пряко от елемента, който се моделира. Ако приемем, че за  $Ua \rightarrow \infty$ , то коефициента С се намира:

$$C = \lim_{Ua \rightarrow \infty} \Psi(Ua).$$

Аналогично при  $Ua \rightarrow 0$  се намира коефициента А:

$$A = \lim_{Ua \rightarrow 0} \Psi(Ua) - C$$

Тогава е елементарно да се определи и коефициента В за всяко от анодните напрежения:

$$Bi = \lim_{Ua \rightarrow Uai} \left( \frac{1}{Ua} \cdot \ln \left[ \frac{\Psi(Ua) - C}{A} \right] \right), \text{ и да се намери средната}$$

$$\text{му стойност: } B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Bi$$

На този етап разполагаме с измерените стойности:  $[Ia]$ ,  $[Ug]$ ,  $[Ua]$  и изчислените стойности за  $k_1$ ,  $k_0$ . Коефициента  $m$  може да се изрази от уравнение (1):

$$m(j, i) = \frac{\ln[Ia(j, i) / k_0]}{\ln[Ug(j, i) + k_1(j) \cdot Ua(j)]}, \text{ където } k_1(j) \text{ е пресметнато}$$

за  $Ua(j)$ .

Матрицата  $m$  има същата размерност като матриците  $[Ia]$ ,  $[Ug]$ . Ако приемем, че  $j = \text{const}$ , т.е.  $Ua = \text{const}$ , то биха могли да се начертаят фамилията криви:  $m = f(Ug) | Ua = \text{const}$ . Всяка една от тези криви може да бъде апроксимирана с полином от втора степен:

$$m(j) = A_2(j) \cdot Ug^2 + A_1(j) \cdot Ug + A_0(j), \quad (5)$$

където:  $A_2(j)$ ,  $A_1(j)$ ,  $A_0(j)$  - са коефициентите на полинома, за  $Ua(j)$ ,  $j=1, \dots, n$ .

От своя страна  $A_2(j)$ ,  $A_1(j)$ ,  $A_0(j)$  могат да се представят като полиноми от втора степен, апроксимиращи намерените стойности спрямо  $Ua$ :

$$A_2 = \Phi_2(Ua) = a_{22}Ua^2 + a_{12}Ua + a_{02};$$

$$A_1 = \Phi_1(Ua) = a_{21}Ua^2 + a_{11}Ua + a_{01};$$

$$A_0 = \Phi_0(Ua) = a_{20}Ua^2 + a_{10}Ua + a_{00}.$$

Апроксимацията върху изчислените данни може да се извърши с математическа програма. Резултатът е числените стойности за  $a(i, j)$ . Окончателно за коефициентите на уравнение (1) се получава:

$$k_0 = 0.0015;$$

$$k_1 = \Psi(Ua) = A \cdot \exp(-B \cdot Ua) + C;$$

$$m = [ \left( a_{22} U_a^2 + a_{12} U_a + a_{02} \right) \cdot U_g^2 + \\ + \left( a_{21} U_a^2 + a_{11} U_a + a_{01} \right) \cdot U_g + \left( a_{20} U_a^2 + a_{10} U_a + a_{00} \right) ]$$

Токът на анода се реализира по начин, показан на фиг.3.

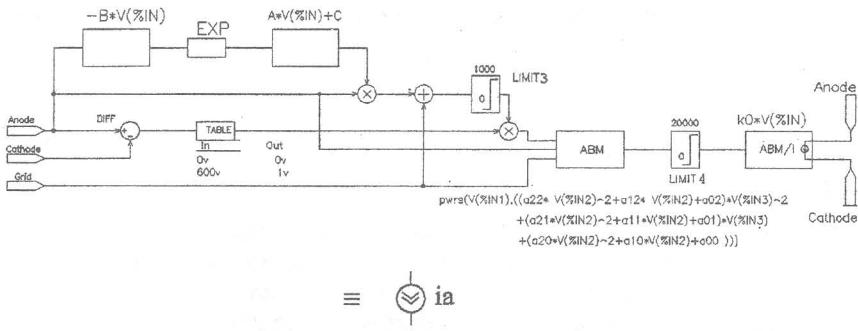
LIMIT3 - реализира:  $|U_g + k_1 U_a|$ ;

LIMIT4 - поставя се, за да се осигури сходимост на времевия анализ;

ABM2/I - блоковете представляват преобразуватели ток/напрежение;

TABLE - чрез този елемент се реализира пречупването на анодните характеристики. За  $U_a > 600V$  изходът от TABLE е 1.

Останалите елементи на схемата осигуряват верността на (1) и (6).



Предателната характеристика на триода ГУ58Б, намерена с изчислените по-горе коефициенти  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $m$  се доближават в голяма степен до оригиналните каталожни характеристики и може да се приеме, че моделирането на анодния ток е приключило.

### Модел на решетъчния ток

Решетъчната характеристика фиг.1а се изразява със зависимостта  $I_g = f(U_g) | U_a = \text{const}$ . Аналогично на анодния ток и при решетъчния търсим вида на функцията  $f(U_g, U_a)$ . Чрез нея се описва фамилията решетъчни характеристики.

Приемаме, че уравнението, описващо решетъчната характеристика има следния вид:

$$I_g = k U_g^s, \quad (6)$$

където:  $k$  - коефициент за изравняване на размерността  $[A/V^s]$ ,

$s$  - безразмерен коефициент.

Решетъчните характеристики за всяко  $U_a$  започват от нулата на координатната система. Това опростява работата до степен, в която не е

необходимо да се търси коефициент с аналог к1 при уравнение (1). В първо приближение, приемаме  $s=1.5$ . Това означава, че коефициентът k трябва да представлява функция, която зависи от  $Ua$  и  $Ug$ , така, че да опишем фамилията от криви  $Ig=f(Ug) | Ua=\text{const}$ .

Експерименталните данни за триода ГУ58Б подреждаме в матричен вид:

$$Ua(V) = \begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{a2} \\ \dots \\ u_{an} \end{bmatrix}, \quad Ig(A) = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} & \dots & i_{1p} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} & \dots & i_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_{n1} & i_{n2} & i_{n3} & \dots & i_{np} \end{bmatrix}, \quad Ug(V) = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \dots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & \dots & u_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & u_{n3} & \dots & u_{np} \end{bmatrix}$$

$Ig_{ij}$  отговаря на измерен ток от графиката при  $Ug_{ij}$ , а всеки ред от  $[Ig]$  и  $[Ug]$  е измерен за определено анодно напрежение  $Ua_i$ .

Ако се преобразува уравнение (6) се намира к:

$$k(j, i) = \frac{Ig(j, i)}{[Ug(j, i)]^{3/2}} \quad (7)$$

Матрицата  $[k]$  има същата размерност като  $[Ig]$  и  $[Ug]$ . Ако приемем, че  $j = \text{const}$ , т.е.  $Ua = \text{const}$ , то биха могли да се начертаят фамилията криви:  $k = f(Ug) | Ua = \text{const}$ . Всяка една от тези криви може да бъде апроксимирана с полином от втора степен:

$$k(j) = B_2(j) \cdot Ug^2 + B_1(j) \cdot Ug + B_0(j), \quad (8)$$

където:  $B_2(j)$ ,  $B_1(j)$ ,  $B_0(j)$  - са коефициентите на полинома, за  $Ua(j)$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

От своя страна  $B_2(j)$ ,  $B_1(j)$ ,  $B_0(j)$  могат да се представят като полиноми от втора степен, апроксимиращи намерените стойности спрямо  $Ua$ :

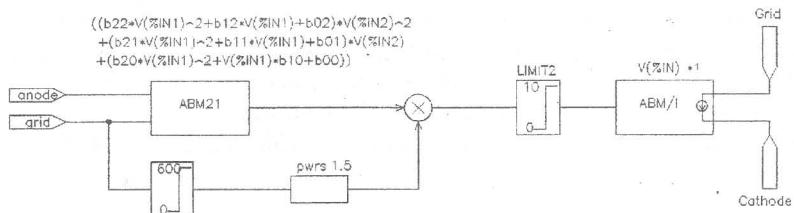
$$B_2 = \Phi_2(Ua) = b_{22}Ua^2 + b_{12}Ua + b_{02};$$

$$B_1 = \Phi_1(Ua) = b_{21}Ua^2 + b_{11}Ua + b_{01};$$

$$B_0 = \Phi_0(Ua) = b_{20}Ua^2 + b_{10}Ua + b_{00}.$$

В DESIGN CENTER токът на решетката се реализира по начин, показан на фиг.4.

LIMIT1 - ограничава  $Ug(0 \div 600V)$ . Реалният физически смисъл на  $ig$  е за  $Ug > 0V$ ;



Фиг.4

LIMIT2 - се поставя, за да се осигури сходимост на времевия анализ.

Решетъчните характеристики на триода ГУ58Б, намерени с изчислените коефициенти  $k$  и  $s$  се доближават до голяма степен до каталожните характеристики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделът е експериментиран чрез проведени числено и експериментално изследвания на схема на генератор за индукционно нагряване 440kHz с товар резонансен кръг при мощности от  $2.5 \div 10\text{ kW}$ . Получените преходни и установени процеси, формата на аноднотоковите импулси и на тока в решетката, както и числените стойности, показват адекватност на модела в целия диапазон на изменение на пасивните елементи в схемата за реални автогенераторни режими.

Създаденият модел дава възможност за проектиране и компютърен анализ на схемите на генераторите за индукционно и диелектрично нагряване. Въвеждането на каталожни данни за различни прибори и получаването на адекватен модел позволява да се оптимизират схемите и да се решават възникващите проблеми при съгласуване на товара при възможно високи енергийни показатели.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1.The Design Center Circuit Analysis User's Guide, MicroSim Corporation, July 1993.
- 2.Боянов Й.Д., Е.Д. Шойкова. Теория на електронните схеми. Техника, София, 1989.
- 3.Кацнелсон В.С., и др. „Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы“. Справочник, 1985.
- 4.Ямаков И.Я., Р.И. Дойчинова, М.Х. Христов. Електронни полупроводникови прибори и интегрални схеми. Техника, София, 1985.
- 5.Васильев А.С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева“. Машиностроение, 1979.