

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ МОЩНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО ВЧ-КАСКАДА

А.И. Кваша

ИЯИ РАН, Москва, Россия

E-mail: kvasha@inr.ru

В системе ВЧ-питания начальной части линейного ускорителя ИЯИ РАН проблема оптимизации режима лампы выходного ВЧ-каскада является одной из основных. Дело в том, что в ЗАО «СЕД-СПб» (г. С.-Петербург) производство ламп ГИ-54А и ГИ-51А, работающих в оконечном и предоконечном ВЧ-каскадах, уже давно прекращено и приходится всеми способами продлевать срок службы оставшихся ламп. Переход на другие, менее мощные, лампы ГИ-71А и ГИ-57А также требует более тщательной настройки режима работы ламп для поддержания требуемых уровней ВЧ-полей в резонаторах ускорителя. В первой части работы предложен способ оценки эквивалентного сопротивления анодной нагрузки лампы мощного ВЧ-каскада, без знания которого невозможно оптимизировать режим работы лампы. При этом используются результаты измерения нагруженной добротности и расчёта величины энергии, запасённой в анодно-сеточном контуре ВЧ-каскада. Во второй части приводится численная модель расчёта режима лампы, работающей с автосмещением, величина которого заметно влияет на эффективность работы лампы в составе ВЧ-каскада усиления.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы повышения эффективности работы мощных усилительных ВЧ-каскадов становятся особенно актуальными в системах ВЧ-питания ускорителей, разработанных и сооружённых 20-30 лет назад. К таким ускорителям относится и линейный ускоритель протонов ИЯИ РАН, недавно отметивший 20-летие со дня физического пуска.

Известно, что электронный КПД лампы ВЧ-каскада, работающей с углом отсечки, определяется из выражения [1]:

$$\eta_e = \frac{1}{2} \xi \gamma, \quad (1.1)$$

где $\xi = \frac{U_a}{E_0}$ – коэффициент использования анодного напряжения, U_a – амплитуда ВЧ-напряжения на аноде лампы, E_0 – анодное напряжение питания;

$$\gamma = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\sin \theta - \theta \cos \theta}, \quad (1.2)$$

где θ – угол отсечки анодного тока, который определяется характеристиками лампы, эквивалентным сопротивлением анодной нагрузки лампы R_{oe} и величиной напряжения автосмещения, которое, в свою очередь, является функцией угла отсечки. Таким образом, одним из основных параметров ВЧ-каскада является эквивалентное сопротивление R_{oe} , которое опосредствованно определяет величины как ξ , так и γ . Как реально оценивается величина эквивалентного сопротивления анодной нагрузки лампы ВЧ-каскада? Как правило, величина R_{oe} определяется не из параметров колебательной системы, а исходя из режима работы ВЧ-каскада. Например, предполагается, что угол отсечки $\theta = \frac{\pi}{2}$. В этом случае по измеренной величине постоянной составляющей анодного тока I_{ao} однозначно определяется величина на первой гармонике анодного тока $I_{a1} = \frac{\pi}{2} I_{ao}$, а по

измеренной ВЧ-мощности P_{RF} в нагрузке – величина эквивалентного анодного сопротивления

$$R_{oe} = \frac{2P_{RF}}{I_{a1}^2 \eta_k}, \quad \text{где } \eta_k = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_l}, \quad (1.3)$$

Q_0 – собственная добротность, Q_l – нагруженная добротность анодно-сеточного контура.

Ниже предлагается другой, более объективный подход, использующий величину измеренной нагруженной добротности и расчётную величину энергии электрического поля, запасённой в анодно-сеточном контуре ВЧ-каскада.

2. ЭКВИВАЛЕНТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ АНОДНОЙ НАГРУЗКИ ЛАМПЫ

Как известно [2], выражение для добротности колебательной системы (резонатора) имеет вид:

$$Q = \frac{\omega_0 W_e}{P_w}, \quad (2.1)$$

где $W_e = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V (\vec{E}_c)^2 dv$ – энергия, запасённая в колебательной системе; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ω_0 – резонансная частота; P_w – мощность потерь в резонаторе и в нагрузке колебательной системы – в зависимости от того, собственную или нагруженную добротность следует определить. Использование выражения (2.1) для параллельного колебательного контура с сосредоточенными параметрами L_k , C_k и R_k приводит к известному соотношению:

$$R_k = \rho_k Q_k. \quad (2.2)$$

Таким образом, по известной (измеренной) величине добротности и вычисленной величине характеристического сопротивления $\rho_k = (\omega_k C_k)^{-1}$, где $\omega_k = (L_k C_k)^{-1/2}$, легко определяется величина эквивалентного сопротивления, подключённого параллельно колебательному контуру.

Однако колебательная система ВЧ-каскада представляет собой систему с распределёнными пара-

метрами, частью которой является ёмкость анод-сетка лампы. В метровом диапазоне волн, на котором работает система ВЧ-питания резонаторов с трубками дрейфа, колебательная система каскада является коаксиальной структурой, в которую органически вписывается коаксиальная конструкция лампы. При этом условие резонанса в случае короткозамкнутой (к.з.) коаксиальной линии имеет вид:

$$l_{sc} = \frac{c}{\omega_o} \operatorname{arctg}(W\omega_o C_{ag})^{-1}. \quad (2.3)$$

Здесь l_{sc} – длина к.з. линии; W – волновое сопротивление коаксиальной линии; ω_o – резонансная частота; C_{ag} – ёмкость анод-сетка лампы; c – скорость света.

В мощных генераторных лампах, таких как ГИ-54А, ГИ-71А и ГИ-27А, величина ёмкости лампы приближается к 100 пФ и длина к.з. линии, например, на частоте 200 МГц составляет всего лишь несколько сантиметров. При этом практически вся энергия электрического поля сосредотачивается в ёмкости C_{ag} , и в этом случае для оценки величины R_{oe} действительно может быть использовано выражение (2.2), если известна величина добротности. Однако реально на такой длине невозможно установить узел вывода мощности, устройства подстройки частоты и ввода анодного напряжения в узле электрического поля. Поэтому приходится удлинять коаксиальную линию как минимум на длину, равную полуволне резонансной частоты.

На самом деле удлинение коаксиальной линии может и превышать полуволну, если в таких резонаторах в качестве подстроечного элемента используется регулируемая ёмкость C_b между днищем и внутренней трубкой коаксиальной линии. Аналогично с длиной l_{sc} (см. выражение (2.3)), длина дополнительного отрезка коаксиальной линии l_{ad} определяется из условия резонанса с короткозамкнутой линией, нагруженной с другого конца на ёмкость C_b :

$$l_{ad} = \frac{c}{\omega_o} \operatorname{arctg}(W\omega_o C_b)^{-1}. \quad (2.4)$$

Следовательно, в общем случае колебательная система мощного ВЧ-каскада может состоять из трёх резонансных отрезков коаксиальной линии. Причём, величину ёмкости C_b ограничивает с одной (большой) стороны электропрочность зазора между внутренней трубкой коаксиала и днищем, а с другой – условие резонанса (2.4).

Таким образом, для оценки величины энергии, накопленной в коаксиальной колебательной системе, последнюю условно можно разбить на три части длиной l_{sc} , $\lambda_o/2$ и l_{ad} каждая (Рис.1).

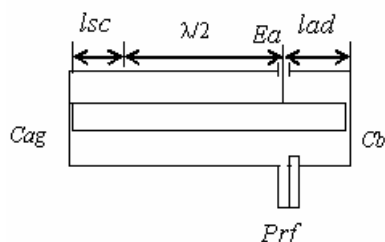


Рис.1. Упрощённое представление колебательного контура мощного усилительного ВЧ-каскада

Амплитуда ВЧ-напряжения $U_{C_{ag}}$ на ёмкости C_{ag} определяется режимом работы лампы. ВЧ-напряжение вдоль коаксиального резонатора убывает до нуля в конце первого участка, а в середине второго участка достигает своей максимальной величины:

$$U_m = U_{C_{ag}} \sqrt{1 + (\omega_o C_{ag} W)^2}, \quad (2.5)$$

и в конце третьего участка (на ёмкости C_b) с учётом (2.5):

$$U_{C_b} = U_{C_{ag}} \sqrt{\frac{1 + (\omega_o C_{ag} W)^2}{1 + (\omega_o C_b W)^2}}. \quad (2.6)$$

Энергия электрического ВЧ-поля в первом участке осесимметричной коаксиальной линии может быть представлена в виде:

$$W_{E1} = \frac{C_{ag} U_{C_{ag}}^2}{2} + \pi \epsilon_o \int_0^{l_{sc}/2} \int_{d/2}^{D/2} E^2 r dr dl = \frac{U_{C_{ag}}^2}{2} C_1, \quad (2.7)$$

где

$$E = \frac{U_m \sin 2\pi \frac{l}{\lambda}}{r \ln \frac{D}{d}}. \quad (2.8)$$

Подставляя выражение (2.8) в (2.7) получаем:

$$C_1 = C_{ag} + C_C \left(\frac{l_{sc}}{2} - \frac{\lambda}{8\pi} \sin \frac{4\pi}{\lambda} l_{sc} \right), \quad (2.9)$$

где

$$C_C = \frac{120\pi\epsilon_o}{W} (1 + (\omega_o C_{ag} W)^2). \quad (2.10)$$

В выражении (2.10) C_C – приведенная погонная ёмкость коаксиальной линии.

Энергия электрического поля во втором участке:

$$W_{E2} = C_2 \frac{U_{C_{ag}}^2}{2}, \quad \text{где } C_2 = \frac{\lambda}{4} C_C. \quad (2.11)$$

Наконец, на третьем участке $W_{E3} = C_3 \frac{U_{C_{ag}}^2}{2}$, где с учётом выражения (2.6) величина ёмкости C_3 определяется из выражения:

$$C_3 = \left(C_b \frac{1 + (\omega_o C_{ag} W)^2}{1 + (\omega_o C_b W)^2} + C_C \left(\frac{l_{ad}}{2} - \frac{\lambda}{8\pi} \sin \frac{4\pi}{\lambda} l_{ad} \right) \right). \quad (2.12)$$

Пренебрегая ВЧ-потерями в анодно-сеточном контуре по сравнению с мощностью, выводимой из контура в нагрузку, представляем выражение для нагруженной добротности Q_l в виде

$$Q_l = \frac{U_{C_{ag}}^2}{2} \omega_o \sum_{i=1}^3 C_i \frac{1}{U_{C_{ag}}^2 / 2R_{oe}},$$

откуда получаем искомое выражение для определения R_{oe} :

$$R_{oe} = Q_l \left(\omega_o \sum_{i=1}^3 C_i \right)^{-1}, \quad (2.13)$$

где величины ёмкостей C_i определяются из выражений (2.9), (2.11) и (2.12). Структурно выражение (2.13) совпадает с (2.2) и поэтому выражение (2.13) можно представить в виде

$$R_{oe} = Q_l \rho_{oe}, \quad \text{где } \rho_{oe} = \left(\omega_o \sum_{i=1}^3 C_i \right)^{-1}. \quad (2.14)$$

Практически нагруженная добротность определяется стандартными способами при подключении узла вывода ВЧ-мощности к согласованной нагрузке. Что касается определения емкостей $C_1 \dots C_3$, то их вычисление не вызывает трудностей, если известны размеры коаксиального контура и ёмкость лампы C_{ag} . Все приведенные выше рассуждения предполагают осесимметричную структуру ВЧ-поля в анодно-сеточном контуре ВЧ-каскада, хотя реально это условие не совсем соблюдается.

Измерения, выполненные на пяти выходных каскадах системы ВЧ-питания резонаторов с трубками дрейфа ускорителя ИЯИ РАН, показали, что нагруженная добротность анодно-сеточных контуров лежит в пределах $Q_l = 100 \dots 200$, а расчётная величина $\rho_{oe} \sim 1 \text{ Ом}$. Отсюда следует, что величина $R_{oe} \sim 100 \dots 200 \text{ Ом}$. При этом собственная добротность контуров (при отключённой нагрузке) составляет $3 \dots 4$ тыс.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

При построении модели расчёта режима мощного ВЧ-каскада, работающего с углом отсечки, использовались хорошо известные соотношения (см. Рис.2), сведенные в таблицу.

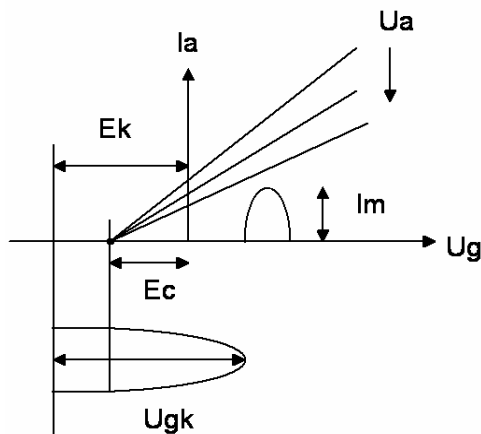


Рис.2. Аппроксимация анодно-сеточных характеристик лампы

В таблице введены следующие обозначения: R_k – сопротивление катодного автосмещения; I_{a0}, I_{g0} – постоянные составляющие анодного и катодного токов соответственно; I_{a1}, I_{g1} – первые гармоники анодного и сеточного тока соответственно; S_{a0} – крутизна анодно-сеточной характеристики лампы при $U_a=0$; S_{g0} – крутизна сеточно-сеточной характеристики при $U_a=0$; коэффициенты k_a и k_g учитывают (в линейном приближении) зависимость крутизны S_{a0} и S_{g0} от анодного напряжения U_a ; P_{rf} – мощность в нагрузке ВЧ-каскада; P_g – мощность, поступающая на вход ВЧ-каскада с общей сеткой; η – КПД ВЧ-каскада.

Как видно из выражений, приведенных в таблице, статические анодно-сеточные характеристики лампы аппроксимированы верными прямыми, исходящими из одной точки, наклон которых линейно зависит от величины анодного напряжения U_a .

Анодный ток	Сеточный ток
$U_a = E_a - I_{a1}R_{oe}$	$U_g = U_{gk} - E_k$
$I_{a1} = \alpha_1 I_{am}$	$I_{g1} = \alpha_1 I_{gm}$
$I_{am} = (U_{gk} - (E_k - E_c))S_a$	$I_{gm} = (U_{gk} - E_k)S_g$
$\alpha_1 = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)}$	
$E_k = (I_{a0} + I_{g0})R_k$	
$I_{a0} = \alpha_0 I_{am}$	$I_{g0} = \alpha_0 I_{gm}$
$\alpha_0 = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)}$	
$\theta = \arccos \frac{E_k - E_c}{U_{gk}}$	$\theta = \arccos \frac{E_k}{U_{gk}}$
$S_a = S_{a0} + k_a U_a$	$S_g = S_{g0} - k_g U_a$
$P_{rf} = \frac{1}{2} I_{a1}^2 R_{oe}$	$P_g = \frac{1}{2} U_{gk} (I_{a1} + I_{g1})^*$
$\eta = \frac{I_{a1} U_a}{2 I_{a0} E_a} = \frac{1}{2} \xi \gamma$	

Такая аппроксимация соответствует характеристикам лампы ГИ-71А, которая заменила лампу ГИ-54А в выходных каскадах системы ВЧ-питания линейного ускорителя ИЯИ РАН (Рис.3).

Определения режима работы лампы – $I_{a1}, I_{a0}, I_{g1}, I_{g0}, U_a, E_k$, и выходных параметров ВЧ-каскада – P_{rf}, P_g, η , как правило, сопровождаются некоторыми допущениями, упрощающими процесс решения приведенных в таблице алгебраических выражений, не разрешаемых аналитически относительно искомых параметров. В общем случае каждый набор входных параметров – U_{gk}, R_k, E_a, R_{oe} ,

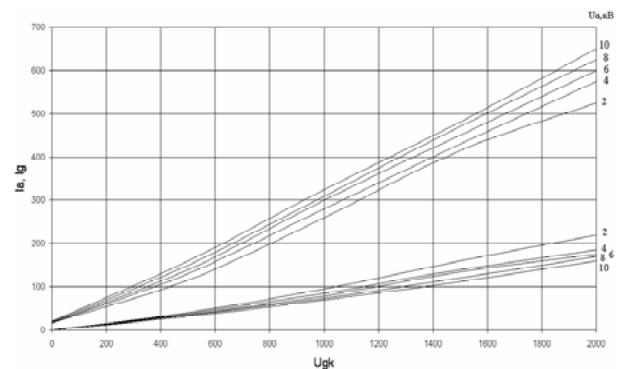


Рис.3. Анодно-сеточные характеристики лампы ГИ-71А

требует, строго говоря, решения трансцендентных уравнений для определения режимов лампы и параметров ВЧ-каскада. Приведенная ниже модель в рамках пакета программ Matlab Simulink позволяет оперативно находить режимы лампы и искомые характеристики ВЧ-каскада при любом наборе входных параметров.

*Для схемы с общей сеткой [3].

4. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

На Рис.4 представлена модель для численного расчёта режима лампы и выходных параметров ВЧ-каскада. В левой части Рис.4 представлены входные, заданные параметры, справа – выходные. В составе модели – два субблока: “Anode current” (анодный ток) и “Grid current” (сеточный ток). В первом из них происходит вычисление постоянной составляющей и первой гармоники анодного тока, во втором – сеточного тока.

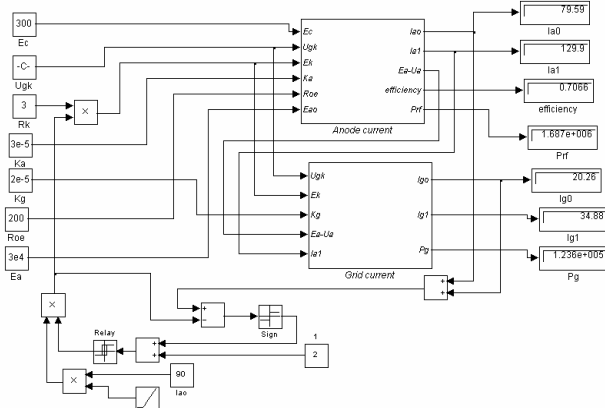


Рис.4. Модель для численного расчёта ВЧ-каскада

Принцип работы модели заключается в следующем. Через сопротивление автосмещения R_k протекает линейно нарастающий ток, формируемый с помощью стандартного генератора линейно нарастающего сигнала “Ramp” с регулируемой скоростью изменения тока. В модели скорость линейного нарастания тока составляет 0,002 В/с. Напряжение E_k с сопротивления R_k поступает в оба субблока и играет роль напряжения смещения на сетке лампы. С учётом этого напряжения и входных параметров в субблоках «Анодный ток» и «Сеточный ток» вычисляются углы отсечки, амплитуды импульсов анодного и сеточного токов и амплитуды постоянных составляющих анодного и сеточного токов. При этом учитывается связь между величинами первой гармоники анодного тока и величиной остаточного анодного напряжения $U_a = E_a - I_{a1}R_{oe}$. Текущие результаты вычислений постоянных составляющих анодного и сеточного токов суммируются и сравниваются с текущей величиной тока на выходе блока “Ramp”. Как только текущая сумма вычисленных постоянных составляющих анодного и сеточного токов превысит текущую величину тока, протекающего через сопротивление R_k , на выходе блока “Sign” вместо $+1$ появляется -1 . В свою очередь, на входе блока “Relay” сигнал уменьшается на 1 и переводит реле из состояния “on” в состояние “off”. При этом первое состояние соответствует 1 , а второе – 0 . Следовательно, блок “Relay” настроен таким образом, что после совпадения суммы величин анодного и сеточного токов с текущей величиной сигнала на выходе блока “Ramp” обрывается до нуля. В результате на выходе блока “Sign” снова появляется $+1$ и снова восстанавливается последнее значение тока на выходе блока “Ramp”. Программа определяет такую ситуацию как неустойчивую (algebraic loop) и останавливает симуляцию в искомой

точке, соответствующей самосогласованному решению. Под самосогласованным решением здесь понимается нахождение такого режима работы лампы, при котором сумма постоянных составляющих анодного и сеточного токов совпадает с величиной задающего тока I_0 . В принципе, по достижении этого равновесия можно отключать внешнее смещение и подключать сопротивление автосмещения R_k к лампе с сохранением достигнутого режима.

4.1. СУББЛОК «АНОДНЫЙ ТОК»

На Рис.5 приведена структурная схема модели, с помощью которой осуществляется вычисление анодного тока лампы. При построении модели были использованы выражения, приведенные в таблице.

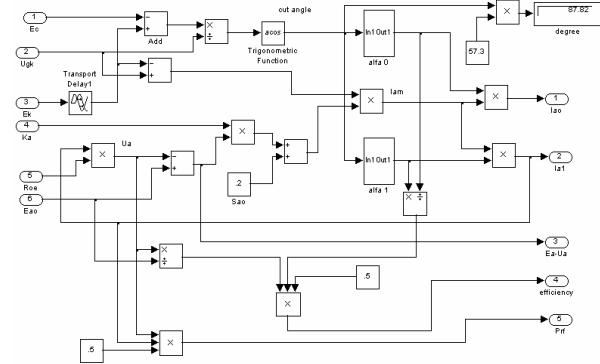


Рис.5. Субблок «Анодный ток»

В состав субблока «Анодный ток», в свою очередь, входят два арифметических субблока: “alfa 0” и “alfa 1”, в которых вычисляются первые два коэффициента (постоянная составляющая и первая гармоника) разложения в ряд Фурье косинусоидальных импульсов анодного тока.

В субблоке «Анодный ток» вычисляются: постоянная составляющая анодного тока – I_{a0} и его первая гармоника – I_{a1} ; мощность, выделяемая на эквивалентном сопротивлении – P_{rf} ; остаточное напряжение на аноде – U_a ; электронный КПД лампы – η . Здесь же задаётся исходная крутизна анодно-сеточного тока S_{a0} .

4.2. СУББЛОК «СЕТОЧНЫЙ ТОК»

На Рис.6 приведена структурная схема модели, позволяющая определить величины постоянной составляющей и первой гармоники сеточного тока.

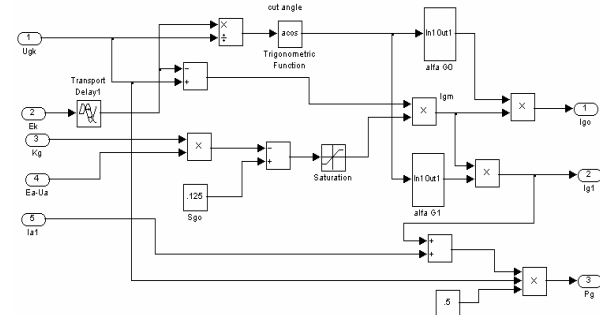


Рис.6. Субблок «Сеточный ток»

В составе субблока – два арифметических субблока “alfa G0” и “alfa G1”, в которых происходит вычисление коэффициентов разложения в ряд Фурье последовательности импульсов сеточного тока.

Кроме вычисления гармоник сеточного тока здесь также определяется мощность ВЧ-возбуждения P_g при заданной величине максимальной крутизны сеточного тока. S_{g0} .

В качестве примера ниже приведены результаты расчёта режима работы мощного ВЧ-каскада усиления на лампе ГИ-71А [4]. В качестве исходных параметров модели приняты следующие величины: $S_{a0} = 0,1$ А/В, $K_a \sim 1,25 \cdot 10^{-5}$, $S_{g0} = 0,12$ А/В, $K_g = 5 \cdot 10^{-6}$, $R_k = 2$ Ом, $E_a = 30$ кВ. На Рис.7 приведены нагрузочные характеристики ВЧ-каскада при трёх значениях амплитуды ВЧ-возбуждения U_{gk} : 1,5; 2 и 2,5 кВ. Из этих зависимостей следует, что оптимальная нагрузка (R_{oe}) зависит от величины ВЧ-возбуждения и находится в диапазоне 100...150 Ом при максимальной ВЧ-мощности в нагрузке, превышающей 1,5 МВт. Причём в максимуме мощности электронный КПД составляет $\sim 0,5$. Это хорошо известное соотношение подтверждает работоспособность представленной модели.

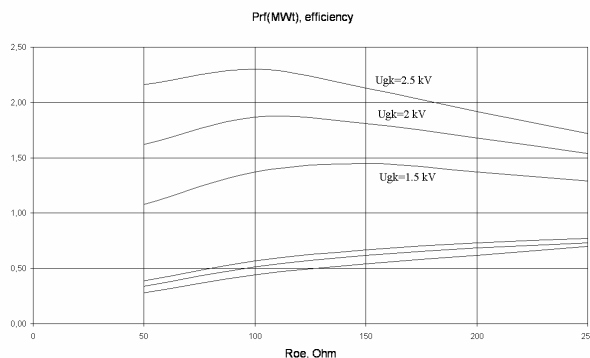


Рис.7. Нагрузочные зависимости ВЧ-каскада на лампе ГИ-71А

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе методика вычисления эквивалентного сопротивления нагрузки позволяет определять параметры коаксиального резонатора – анодно-сеточного контура лампы, ещё на этапе разработки ВЧ-каскада.

Приведенная модель позволяет оперативно оценивать режим лампы и выходные параметры ВЧ-каскада с автосмещением без предварительных допущений, связанных с заданием угла отсечки, коэффициента использования анодного напряжения и т.д.

Эффективность модели в значительной степени зависит от принятой линейной аппроксимации анодно-сеточных характеристик лампы, но возможности программы Matlab Simulink позволяют, в случае необходимости, изменять способы аппроксимации в зависимости от характеристик лампы.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, контракт № 16.518.11.7037

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.И. Евтянов. *Ламповые генераторы*. М.: «Связь», 1967.
2. М.Ф. Ворогушин, В.Н. Малышев. *Высокочастотное питание резонаторных ускорителей прикладного назначения*. М.: «Энергоатомиздат», 1989.
3. *Радиопередающие устройства* / Под редакцией Б.П. Терентьева. М.: «Связь», 1972.
4. А.И. Kvasha, et al. A new 200 MHz powerful pulse triode for the output power amplifier of DTL RF system // *Proc. of the PAC2001*, p.1222.

Статья поступила в редакцию 24.09.2011 г.

NUMERICAL CALCULATION OF VACUUM TUBE POWER AMPLIFIER MODE OF OPERATION

A.I. Kvasha

As result of INR RF system upgrade new vacuum tubes GI-71A and GI-57A were installed in the final and driver stages instead of GI-54A and GI-51A, manufacture of which had been stopped 20 years ago. New tubes are distinguished from former ones and a problem of optimization of the power amplifier mode of operation became the main one. This is connected not only with new type of the vacuum tubes, but also with the necessity of using, as much as possible, the former power amplifier basic hardware. The paper consists of two parts. In the first one a way of the PA vacuum tube load (equivalent resistance) calculation is considered. In the second one the model for determination of vacuum tube mode of operation is presented. By means of the model the vacuum tube specified in parameters, such as plate voltage, grid-cathode automatic bias, anode load etc, allow right now determining output parameters and efficiency of the power amplifier.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ПОТУЖНОГО ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО ВЧ-КАСКАДУ

A.I. Kvaisha

В системі ВЧ-живлення початкової частини лінійного прискорювача ІЯД РАН проблема оптимізації режиму лампи вихідного ВЧ-каскаду є однією з основних. Справа в тому, що в ЗАТ «СЕД-СПб» (м. С.-Петербург) виробництво ламп ГІ-54А і ГІ-51А, що працюють в кінцевому і передкінцевому ВЧ-каскадах, вже давно припинено, і доводиться всіма способами продовжувати термін служби решти ламп. Перехід на інші, менш потужні, лампи ГІ-71А і ГІ-57А також вимагає більш ретельної настройки режиму роботи ламп для підтримки необхідних рівнів ВЧ-полів у резонаторах прискорювача. У першій частині роботи запропоновано спосіб оцінки еквівалентного опору анодного навантаження лампи потужного ВЧ-каскаду, без знання якого неможливо оптимізувати режим роботи лампи. При цьому використовуються результати вимірювання навантаженої добротності і розрахунку величини енергії, запасеної в анодно-сітковому контурі ВЧ-каскаду. У другій частині наводиться чисельна модель розрахунку режиму лампи, що працює з автосмещенням, величина якого помітно впливає на ефективність роботи лампи в складі ВЧ-каскаду підсилення.