

МОЩНАЯ ОКОНЕЧНАЯ СТУПЕНЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА НА СОВРЕМЕННЫХ ЛАМПАХ

Н. А. ЛАШУК, В. И. ТОЛМАЧЕВ

(Представлена семинаром лаборатории высоких энергий НИИ ЯФЭА)

Для проведения ряда исследований на синхротроне «Сириус» возникла необходимость разработки высокочастотного (в.ч.) генератора мощностью $150 \div 200$ квт. Кроме того, в некоторых случаях необходимо повышать импульсную мощность до 350 квт. В связи с этим перед нами была поставлена задача спроектировать генератор с требуемой мощностью и исследовать возможность использования его в форсированном режиме. Разработка подобного генератора возможна лишь при использовании новых мощных, высокоэффективных радиоламп. В современных УКВ генераторах большое распространение получили тетроды с выходной мощностью до сотен киловатт при работе в непрерывном режиме [3]. Из сортамента мощных современных тетродов наиболее полно отвечает нашим требованиям тетрод типа ГУ-53 А с выходной мощностью 80 квт. Следовательно, требуемую мощность 150 квт мы можем получить от двух ламп. При работе ламп в форсированном режиме необходимым условием является обеспечение номинального срока их службы, гарантируемого заводом-изготовителем. Немаловажное значение имеет выбор схемы оконечной ступени, которая определяет в основном конструкцию, надежность и стоимость генератора в целом. Основным параметром, определяющим устойчивость работы ступени, является величина проходной емкости лампы. В табл. 1 приведены значения междуэлектродных емкостей ламп ГУ-53 А для двух схем включения.

Таблица 1

Схема с общей сеткой			Схема с общим катодом		
$C_{вх}$	$C_{вых}$	$C_{пр}$	$C_{вх}$	$C_{вых}$	$C_{пр}$
170	75	0,9	410	75	5

Как видно из таблицы, наименьшую величину проходная емкость имеет в схеме с общей сеткой. Кроме того, преимущество инверсной схемы заключается в более простом способе нейтринирования (иногда необходимость в нем отсутствует вообще), что позволяет эффективно применять мощные лампы. Исходя из этого, нами была выбрана двухтактная инверсная схема. Несмотря на то, что в инверсной схеме теряется основное преимущество тетродов — высокий коэффициент усиления

по мощности, — эта потеря возмещается высокой устойчивостью работы каскада.

В случае, когда от генератора необходимо получить максимальную мощность при хорошем к. п. д., используется критический режим, при этом коэффициент использования анодного напряжения приближается к единице, а минимальное остаточное напряжение на аноде составляет величину (5 ÷ 15%) от величины E_a . Для получения критического режима величина анодной нагрузки должна выбираться из следующих соображений [2]:

$$R_{акр} = \frac{U_{акр}}{I_a} < \frac{E_a - U_{\sim}}{i_{a0} \cdot h_i}, \quad (1)$$

где E_a — величина питающего напряжения,
 h_i — коэффициент использования анодного тока.

Если величина импульса анодного тока не ограничивается эмиссией, то выходная мощность при уменьшении сопротивления нагрузки не уменьшается, а при определенных условиях достигает максимума. У генераторных ламп, имеющих катод из торированного карбидированного вольфрама, ток эмиссии не ограничивается эффектом насыщения. Поэтому в расчетах можно предположить, что ток эмиссии ограничивается лишь допустимыми мощностями рассеивания на электродах. Считая, что пропорционально росту тока эмиссии увеличивается остаточное напряжение на аноде, максимальная мощность, отдаваемая генератором, в критическом режиме будет равна [2]

$$P_{\sim \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_a^2}{R_i^*} \cdot \frac{\frac{R_a}{R_i^*}}{\left[\frac{R_a}{R_i^*} + \frac{1}{\varphi(\theta)} \right]}, \quad (2)$$

а потребляемая мощность

$$P_0 = E_a \cdot i_m \cdot \psi(\theta) = \frac{E_a^2 \psi(\theta)}{R_i^* \varphi(\theta)} \left[\frac{1}{\frac{R_a}{R_i^*} + \frac{1}{\varphi(\theta)}} \right]. \quad (3)$$

Коэффициент полезного действия анодной цепи определяется выражением

$$\eta = \frac{\varphi(\theta)}{\psi(\theta)} \cdot \frac{\frac{R_a}{R_i^*}}{\left[\frac{R_a}{R_i^*} + \frac{1}{\varphi(\theta)} \right]}. \quad (4)$$

где R_a — сопротивление нагрузки;

$\psi(\theta) = \frac{I_{a_0}}{I_{am}}$; $\varphi(\theta) = \frac{I_{a_1}}{I_{am}}$ — коэффициент разложения импульсов анодного тока;

I_{am} , I_{a_1} и I_{a_0} — импульсы анодного тока, первая гармоника тока и постоянная составляющая;

θ — угол отсечки анодного тока.

Эквивалентная схема генератора, работающего в режиме макси-

мальной мощности, представлена на рис. 1. Э.д.с. генератора равна постоянному напряжению анодного питания E_a , а внутреннее сопротивление $\frac{R_i^*}{\varphi(\theta)}$. Из анализа эквивалентной схемы видно, что максимум выходной мощности $P_{\sim \text{опт}}$ достигается при величине нагрузки R_a , равной внутреннему сопротивлению источника. При этом

$$P_{\sim \text{max}} = \frac{1}{8} E_a^2 \frac{\varphi(\theta)}{R_i^*}. \quad (5)$$

В этом режиме к. п. д. генератора получается очень низким. Для достижения более высокого к. п. д. необходимо работать с повышенным сопротивлением нагрузки, т. е.

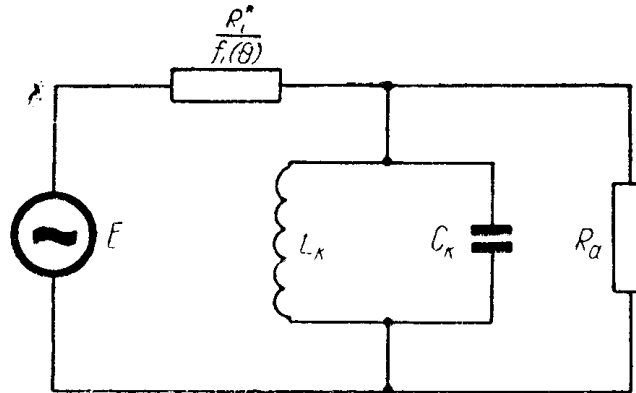


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора.

$$R_a > \frac{R_i^*}{\varphi(\theta)}. \quad (6)$$

Наибольшего значения к. п. д. генератора достигает при очень больших значениях R_a и малых углах отсечки. Обычно в критическом режиме принимают $R_a \simeq 20 R_{i \text{ экв}}^*$ и $\theta = 90^\circ$. (7)

Для ступени на лампах ГУ-53 А $R_i^* = 16 \text{ ом}$ и для $E_a = 12 \text{ кв}$.

$$P_{\sim \text{max}} = 560 \text{ квт},$$

$$P_{0 \text{ max}} = 1400 \text{ квт},$$

$$P_{a \text{ max}} = P_{0 \text{ max}} - P_{\sim \text{max}} = 840 \text{ квт}.$$

В нашем режиме $F_i = 4 \text{ гц}$, $\tau_u = 40 \text{ мсек}$ и минимальная скважность $q = \frac{T}{\tau_u} = 6,25$. При этом допустима мощность рассеивания на аноде P_a в импульсе до 300 квт.

Исходя из вышеизложенного, используя (7), нами был проведен расчет ступени на лампах ГУ-53А. Данные расчета для одной лампы приведены в табл. 2.

Таблица 2

E_a кв	U_a кв	E_{c2} кв	I_{a1} а	I_{a0} а	P_{\sim} квт	P_0 квт	P_a квт	γ	R_{oe} ом	$\frac{R_{oe}}{R_i^*}$	U_{c1} в	E_{c1} в	P_v квт
12,0	11,0	2,0	33	21	180	260	80	0,7	330	20	700	-350	12

Коэффициент усиления по мощности при этом составляет

$$A = \frac{P_{\sim}}{P_{\text{в}}} \approx 15.$$

Принципиальная схема ступени приведена на рис. 2.

Анодный контур выполнен из труб диаметром 220 мм, в виде короткозамкнутой линии, длина которой регулируется мостиком. Связь с нагрузкой кондуктивная, осуществляется с помощью переменных вакуумных конденсаторов типа КП1-4.5/100.

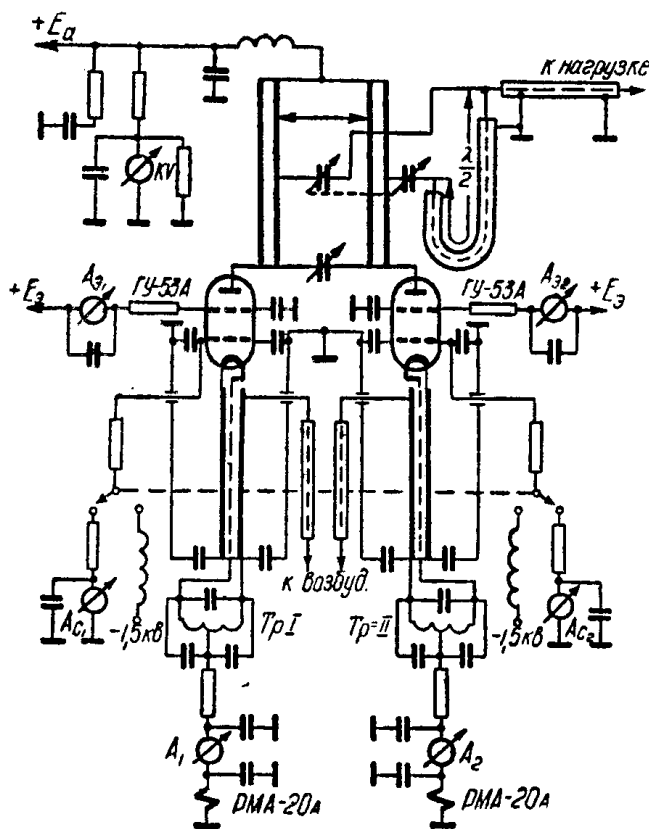


Рис. 2. Принципиальная схема ступени.

Мощность в нагрузку передается по коаксиальному фидеру с волновым сопротивлением 51 ом, выполненному из труб диаметром 140 и 60 мм. Для возможности измерения падающей и отраженной волны в фидере установлены рефлектометры. Согласование симметричного выхода генератора с несимметричным фидером осуществляется при помощи полуволнового U-колена. Катод каждой лампы изолирован по высокой частоте четвертьволновыми коаксиальными линиями. Вследствие низкого входного сопротивления лампы ($R_{\text{вх}} \approx 20$ ом) возбуждение на каждую лампу подается по трем параллельно включенным кабелям типа РКК-5/18. Цепи управляющих и экранирующих сеток тщательно заблокированы емкостями.

Ступень рассчитана на работу как в непрерывном, так и в импульсном режимах. В импульсном режиме модуляция осуществляется прямоугольными импульсами по аноду и второй сетке, а форма импульса регулируется модуляцией по первой сетке. Для настройки ступени изготовлен эквивалент нагрузки сопротивлением 51 ом и средней мощностью

50 квт. Конструкция обеспечивает полную экранировку от в. ч. излучения и хорошее согласование с фидером.

Настройка ступени производилась в непрерывном режиме на низком уровне мощности и не вызвала особых затруднений. Работа ступени была очень устойчивой, паразитных колебаний не наблюдалось. При настройке было замечено, что экстремумы сеточных и анодных токов не совпадают, т. е. ступень нуждается в нейтрализации проходной емкости.

Испытания на высоком уровне мощности производились в импульсном режиме, что объясняется недостаточной мощностью высоковольтного выпрямителя и эквивалента нагрузки. На рис. 3 и 4 приведены экспериментальные данные зависимости мощности генератора в нагрузке от анодного напряжения и напряжения возбуждения. Как видно из графиков, имеется большой запас по мощности возбуждения, так как даже при $E_a = 10$ кв ступень переходит в перенапряженный режим.

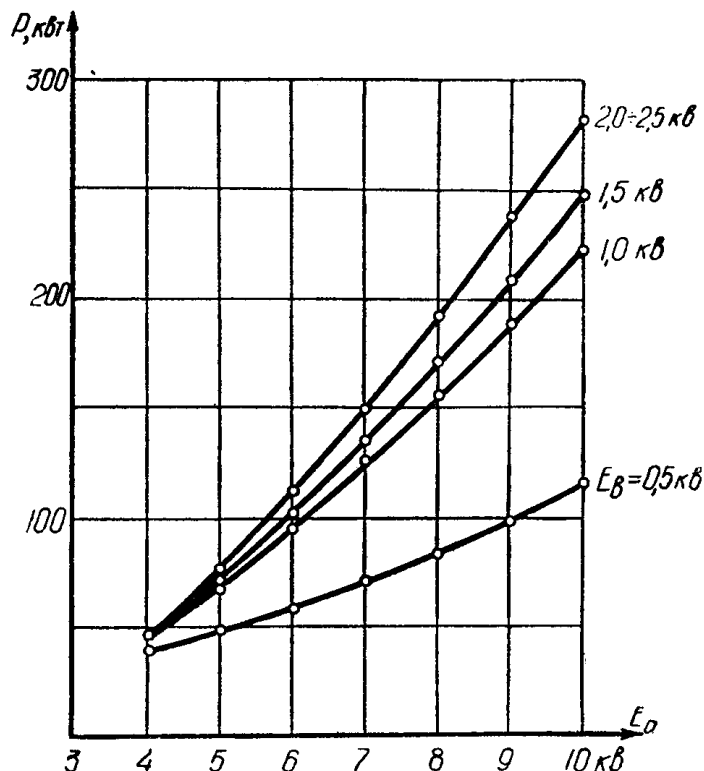


Рис. 3. Зависимость мощности генератора $P_{\sim} = f(E_a)$ при $E_b = \text{const}$.

Увеличением напряжения до 12 кв можно получить мощность в нагрузке до 360 квт, что хорошо согласуется с расчетными данными.

Измерение мощности производилось калориметрическим способом. Точность измерения этим способом определяется в основном точностью измерения расхода воды и составляет примерно (10÷15)%. Одновременно с измерением в. ч. мощности в непрерывном режиме производилась градуировка рефлектометров, с помощью которых затем измерялась в. ч. мощность в импульсном режиме.

Выражение для измерения мощности рефлектометрами имеет вид [1]:

$$P_{\sim} = \frac{U_{\Phi}^2}{2Z_{\text{н}}} (1 - \Gamma^2) = \frac{K^2 U_{\text{п}}^2}{2Z_{\text{н}}} (1 - \Gamma^2), \quad (8)$$

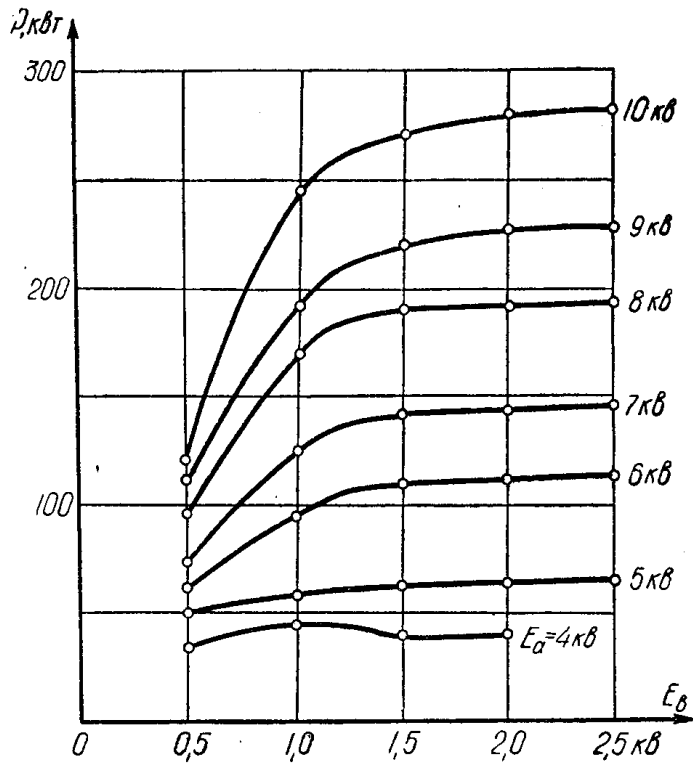


Рис. 4. Зависимость мощности генератора $P_{\sim} = f(E_{\alpha})$ при $E_{\alpha} = \text{const}$.

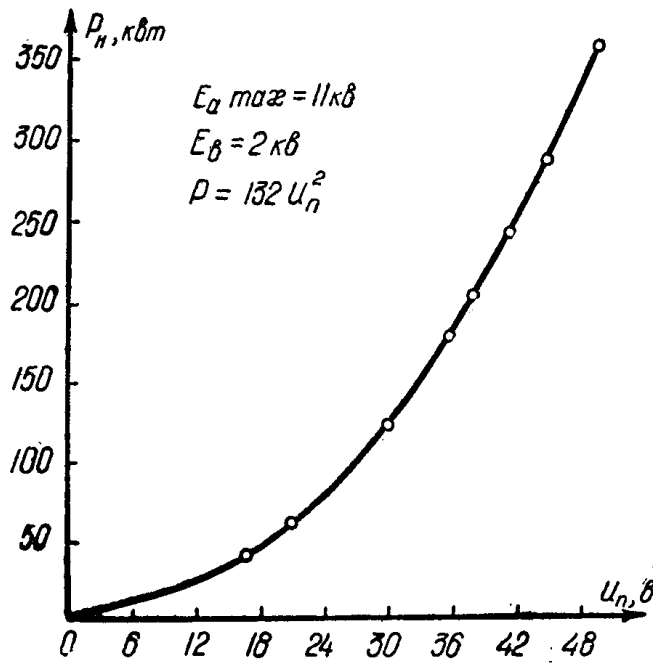


Рис. 5. Зависимость мощности в нагрузке от напряжения с рефлектометра.

где U_{ϕ} — амплитуда напряжения на фидере,

Z_{Π} — сопротивление нагрузки.

$\Gamma = \frac{U_o}{U_{\Pi}}$ — коэффициент отражения,

U_{Π} , U_o — амплитуды падающей и отраженной волн с рефлектометра,

$K = \frac{U_{\phi}}{U_{\Pi}}$ — коэффициент, учитывающий связь между напряжением на фидере и напряжением с рефлектометра.

Этот коэффициент был рассчитан теоретически, а затем проверен экспериментально. В нашем случае $Z_{\Pi} = W_{\phi} = 51 \text{ ом}$, $K = 116$ и $\Gamma = 0,15$. При этом

$$P_{\sim} = 132 U_{\Pi}^2. \quad (9)$$

На рис. 5 приведена зависимость мощности в нагрузке от напряжения с рефлектометра.

Работа ступени исследовалась в нескольких режимах: с автосмещением, с внешним смещением и в режиме усиления модулированных колебаний. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х. Мейнке и Ф. Гундлах. Радиотехнический справочник. М., Госэнергоиздат, 1962.
 2. Д. П. Линде. Радиопередающие устройства. М., «Энергия», 1969.
 3. Б. С. Агафонов. Расчет эксплуатационных режимов УКВ и ДЦВ генераторных ламп М.-Л., «Энергия», 1966.
-