Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXII, вып. 1, 1972 г.

К РАСЧЕТУ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Л. Б. Некрасов, Ю. М. Мисник, В. Ф. Корчаков

Система электродов и нагреваемая мерзлая порода образуют так называемый рабочий конденсатор, характеристиками которого являются электрическая емкость и tgδ (угол потерь). Зная эти характеристики, можно определить все элементы высокочастотной схемы, образующей энергетический источник технологического процесса. Если для выбранного процесса необходима мощность $P_н$ и известны сопротивления нагрузки

$$\dot{Z}_н = r_н - jx_н \tag{1}$$

или проводимость

$$\dot{Y}_н = \frac{1}{\dot{Z}_н} = g_н + jb_н, \tag{2}$$

то напряжение на нагрузке

$$U_н = \sqrt{\frac{P_н}{g_н}} \tag{3}$$

и ток в нагрузке

$$I_н = \sqrt{\frac{P_н}{r_н}}. \tag{4}$$

После определения напряжения по формуле (3) необходимо убедиться, что напряженность электрического поля в нагреваемом материале не превышает допустимых значений по условиям электрического пробоя. Если это условие не выполняется, то необходимо перейти к более высокой рабочей частоте [1].

Комплексная проводимость нагрузки для ленточных электродов, прилегающих непосредственно к поверхности нагреваемого материала, на единицу длины рассчитывается методом конформных отображений [1]

$$Y_н = j\omega\varepsilon_0 \frac{\varepsilon + 1}{2} A_1 \frac{b}{a}, \tag{5}$$

где $b = r_1 + r_2$ — расстояние между осями электродов;

$a = r_1 - r_2$ — ширина электрода.

Функция $A_1=\left(\frac{b}{a}\right)=\frac{k_1}{k}$ представляет собой отношение полных эллиптических интегралов первого рода с модулем

$$k=\frac{r_1}{r_2}.$$

Формула (5) не учитывает переходного сопротивления между электродами и нагреваемым материалом и емкости рассеяния, точный расчет которых очень сложен, поэтому для инженерных расчетов пользуются измеренными на выбранной частоте эквивалентными параметрами рабочего конденсатора: его емкостью $C'_{\text{н}}$ для выбранной системы электродов и углом потерь $\text{tg}\delta_{\text{н}}$.

Активное последовательное сопротивление нагрузки определяется как

$$r'_{\text{н}}=\frac{\text{tg}\,\delta}{\omega C'_{\text{н}}}. \tag{6}$$

Комплексное сопротивление нагрузки

$$\dot{Z}_{\text{н}}=r'_{\text{н}}-j\frac{1}{\omega C}. \tag{7}$$

В процессе высокочастотного нагрева мерзлых пород, вследствие изменения их электрических свойств, емкость рабочего органа (рабочего конденсатора) может значительно изменяться, поэтому параллельно ему предусмотрено подключение внешнего конденсатора. Теперь эквивалентные параметры рабочего органа

$$C_{\text{н}}\simeq C'_{\text{н}}+C_0 \tag{8}$$

и

$$r_{\text{н}}=r'_{\text{н}}\left(\frac{C'_{\text{н}}}{C_{\text{н}}}\right)^2. \tag{9}$$

Определение параметров нагрузки ($C_{\text{н}}$, $tg\delta$ и $\dot{Z}_{\text{н}}$ позволяет выбрать и рассчитать систему согласования нагрузки с генератором и определить основные параметры схемы самого генератора. Как правило, для диэлектрического нагрева применяются ламповые генераторы с самовозбуждением (автогенераторы). Специфическая особенность генератора, предназначенного для ВЧ-нагрева мерзлых пород, заключается в том, что его электрическая нагрузка меняется в широком пределе. Колебательная система такого автогенератора должна обеспечивать условия, при которых генератор работает устойчиво, отдает необходимую мощность при достаточно высоком к. п. д., а частота генерируемых колебаний находится в заданном диапазоне. Для этого необходимо, чтобы эквивалентное сопротивление колебательной системы $R_{э_0}$ было равно величине, полученной из расчета режима автогенератора, а схема цепи обратной связи обеспечивала нужную величину и знак коэффициента обратной связи. Кроме того, схема колебательной системы должна быть выбрана так, чтобы возникали колебания только с рабочей частотой, величина которой поддерживалась бы с заданной точностью, постоянной при любых изменениях параметров системы, вызываемых изменением свойств нагреваемой породы или регулированием режима генератора, или тем и другим вместе. Выбор типа схемы определяется величиной необходимой частоты автоколебаний и характером изменения параметров рабочего

конденсатора в процессе нагрева; вместе с тем необходимо иметь в виду что действующими общесоюзными нормами допускаемых индустриальных радиопомех для ультразвуковых и высокочастотных установок допускается использовать только определенные разрешенные частоты.

Для диэлектрического нагрева наиболее широко применяется диапазон от 13,56 до 40,68 *Мгц*, колебательные системы в котором осуществляются на элементах с сосредоточенными параметрами, а обратная связь — за счет междуэлектродных емкостей генераторной лампы.

Если с ростом температуры объекта нагрева растет емкость рабочего конденсатора, что связано с ростом tgδ, то в процессе нагрева уменьшается частота генерируемых колебаний. Примененная нами схема генератора с общим анодом обеспечивает более устойчивую работу генератора, благодаря некоторым особенностям частотной характеристики коэффициента обратной связи (рис. 1).

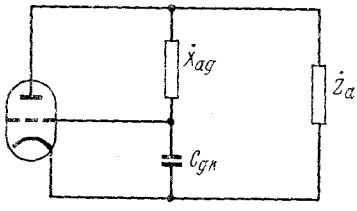


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора с общим анодом

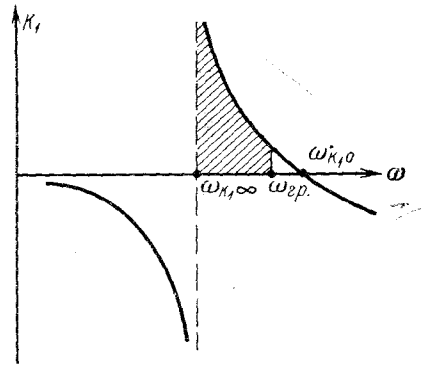


Рис. 2. Зависимость коэффициента обратной связи от частоты

Коэффициент обратной связи для такой схемы выражается формулой [3]

$$K_1 = \frac{1 - \omega^2 L_{ад} C_{ад}}{\omega^2 L_{ад} (C_{ад} + C_{дк}) - 1}, \tag{10}$$

где $L_{ад}$ — внешняя индуктивность и $C_{ад}$ — емкость анод—сетка генераторной лампы, образующие параллельный колебательный контур $X_{ад}$.

Колебания в схеме с общим анодом могут возникнуть только тогда (рис. 2), когда колебательная система генератора имеет резонансную частоту в области между

$$\omega_{K_1\infty} = \frac{1}{\sqrt{L_{ад} (C_{ад} + C_{кд})}} \tag{11}$$

и

$$\omega_{гр} = \frac{1}{\sqrt{L_{ад} C_{ад}}} \sqrt{\frac{1 + K_{1_{min}}}{1 + (p+1) K_{1_{min}}}}, \tag{12}$$

где

$$p = \frac{C_{ак}}{C_{ад}}; \tag{13}$$

из известного уравнения самовозбуждения

$$K_{1_{min}} = D + \frac{1}{S_{ср} R_{э_0}}, \tag{14}$$

где D — проницаемость лампы; $S_{ср}$ — средняя (приведенная) крутизна характеристики лампы.

Кривая $K=f(\omega)$ имеет отрицательный наклон, что увеличивает устойчивость генератора, так как при многочастотной колебательной системе легче возникают колебания с более низкой резонансной частотой, которая и выбирается в качестве рабочей.

Поскольку при эксплуатации необходима свободная манипуляция рабочего органа электротермомеханической установки, при энергетическом расчете высокочастотного генератора следует пользоваться уравнениями, учитывающими эффект распределенных параметров линии передачи. В общем случае параметры рабочего конденсатора с учетом малых потерь передающих линий пересчитываются на вход линии по формуле

$$\dot{Z}_{вх}=\frac{\dot{Z}_{вых}+jW\operatorname{tg}\alpha l}{1+j\frac{\dot{Z}_{вых}}{W}\operatorname{tg}\alpha l}. \tag{15}$$

Из выражения (15) следует, что для линии длиной $\frac{1}{2}\lambda n$ $(n=1, 2, 3...)$ $\dot{Z}_{в}=\dot{Z}_{вых}$, т. е. использование любого числа полуволновых линий не меняет величины входного сопротивления. Если выбрать длину линии $(l=\frac{1}{2}\lambda\cdot n+l\cdot 1)$ такой, что выполняется условие [2]

$$X_{вх}=W\frac{\left(\frac{X_н}{W}+\operatorname{tg}\alpha l_1\right)\left(1-\frac{X_н}{W}\operatorname{tg}\alpha l_1\right)-\frac{r_н^2}{W^2}\operatorname{tg}\alpha l_1}{\left(1+\frac{X_н}{W}\operatorname{tg}\alpha l_1\right)^2+\frac{r_н^2}{W^2}\operatorname{tg}^2\alpha l_1}=0, \tag{16}$$

то сопротивление нагрузки трансформируется на вход линии в чисто активное сопротивление

$$r_н'=r_н\frac{1+\operatorname{tg}^2\alpha l_1}{\left(1-\frac{X_н}{W}\operatorname{tg}\alpha l_1\right)^2+\frac{r_н^2}{W^2}\operatorname{tg}^2 l_1}. \tag{17}$$

Для случая $X_н\gg r_н$ выражения (16) и (17) существенно упрощаются [4]

$$X_{вх}=\frac{X_н+W\operatorname{tg}\alpha l_1}{\left(1-\frac{X_н}{W}\operatorname{tg}\alpha l_1\right)^2}=0; \tag{18}$$

$$-X_н=W\operatorname{tg}\alpha l_1; \tag{19}$$

$$\frac{1}{\omega C_н}=W\operatorname{tg}\alpha l_1; \tag{20}$$

$$l_1=\frac{1}{\alpha}\operatorname{arctg}\frac{1}{W\omega C_н}; \tag{21}$$

$$r_н'\approx r\frac{1+\operatorname{tg}^2\alpha l_1}{\left(1-\frac{X_н}{W}\operatorname{tg}\alpha l_1\right)^2} \tag{22}$$

при

$$X_н=\frac{1}{\omega C_н}.$$

Входной ток линии определяется как

$$I_{вх} = \sqrt{\frac{P_н}{r'_н}}.$$

Входное напряжение

$$U_{вх} = \sqrt{P_н r'_н}.$$

Потери энергии в линии передачи можно учесть при известном к. п. д. линии

$$\eta_ф = \frac{1}{1 + \frac{\beta_ф l}{r_н W}\left(r_н^2 + X_н^2 + W^2\right)}, \tag{23}$$

где $\beta_ф = \frac{r_ф}{2W}$ — коэффициент затухания; $r_ф$ — активное сопротивление линии на единицу длины.

Если

$$r_н^2 \ll X_н^2 + W^2,$$

то

$$\eta_ф = \frac{1}{1 + \beta_ф l\left(1 + \frac{X_н^2}{W^2}\right)}. \tag{24}$$

Приведение параметров нагрузки к чисто активному сопротивлению на входе линии передачи позволяет использовать широко известную П-образную схему коротковолнового автогенератора диэлектрического нагрева (рис. 3), обладающую широкими регулировочными возможно-

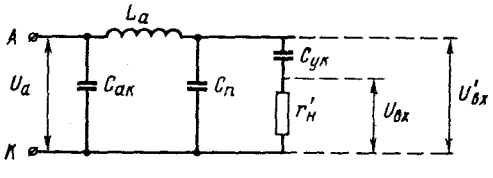


Рис. 3. П-образная схема

стями при относительно простом конструктивном исполнении основных узлов.

Частота колебаний

$$\omega = \sqrt{\frac{C_{дк} + C_п + C_л}{L_a C_л (C_п + C_{дк})}}, \tag{25}$$

где $C_л = C_{ак} - \kappa C_{дк}$, если $C_{ак}$ — емкость анод—катод генераторной лампы (с учетом емкости монтажа).

Эквивалентное сопротивление нагрузки

$$R_{э_0} = \frac{\eta_к}{r'_н}\left[\omega L_a\left(1 + \frac{C_п}{C_{дк}}\right) - \frac{1}{\omega C_{дк}}\right]^2, \tag{26}$$

где $\eta_к = 0{,}8 \div 0{,}9$ — коэффициент полезного действия контурной схемы.

Напряжение

$$U_{вх}' = U_{а}\frac{C_{л}}{C_{дк} + C_{п}}. \qquad (27)$$

Входное напряжение линии передачи

$$U_{вх} = U_{вх}'\frac{r_{н}'}{\sqrt{r_{н}'^{2} + \left(\frac{1}{\omega C_{дк}}\right)^{2}}}. \qquad (28)$$

Входной ток линии

$$I_{вх} = \frac{U_{вх}'}{\sqrt{r_{н}'^{2} + \left(\frac{1}{\omega C_{дк}}\right)^{2}}}. \qquad (29)$$

Из выражений (25) и (32) следует, что изменением $C_{дк}$ или $C_{п}$ можно регулировать параметры генератора. При одновременной регулировке $C_{дк}$ и $C_{п}$, выполненной таким образом, чтобы $C_{п} + C_{дк} \to \text{const}$, можно регулировать мощность без изменения рабочей частоты.

Индуктивность цепи обратной связи

$$L_{ад} = \frac{1}{\omega^{2}\left(C_{ад} + \frac{K_{1}}{1 + K_{1}} C_{дк}\right)}, \qquad (30)$$

где K_{1} — оптимальный коэффициент обратной связи, получаемый из расчета режима генераторной лампы [4].

Приведенная методика расчета, как показали испытания [5] электротермомеханической установки при проходке искусственно замороженных плывунов на строительстве ленинградского метро, полностью себя оправдала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нетушил А. В. и др. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Госэнергоиздат, 1959.
2. Фрумкин А. А. Высокочастотные установки для нагрева диэлектриков. Издание электротехнической промышленности, ОНТИ стандартизации и нормализации в электротехнике, 1966.
3. Мегла Г. Техника дециметровых волн. Сов. радио, 1958.
4. Хацкилевич В. А. Расчет режимов генераторов анодной модуляции на новых лампах. Госэнергоиздат, 1966.
5. Некрасов Л. Б. Устройство для разрушения мерзлых рыхлых горных пород высокочастотным электротермомеханическим. Колыма, 1968, № 12.