

Л. Е. ГРИГОРОВИЧ, И. И. МИНАКОВА

## СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Рассмотрен трехконтурный автогенератор для электротермических процессов. Теоретически обоснован выбор параметров колебательной системы, при котором осуществляется стабилизация амплитуды тока в индукторе. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие расчеты.

В настоящее время во многих технологических процессах термообработки металлов и полупроводников находят широкое применение ламповые и машинные генераторы. Стабилизация источников питания генераторов не обеспечивает поддержания заданного температурного режима, так как большое влияние оказывает изменение индуктивного

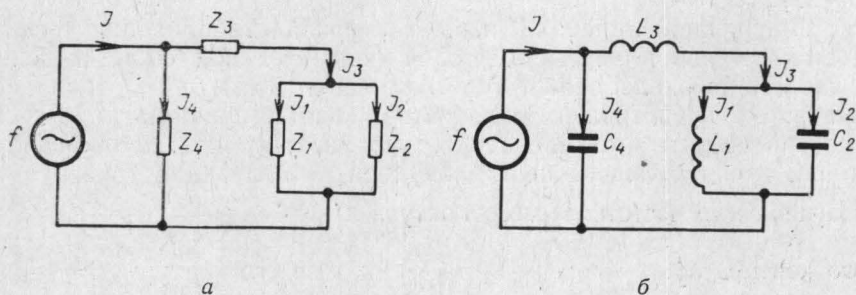


Рис. 1

сопротивления и затухания системы индуктор — изделие. При постоянном напряжении на контуре лампового или машинного генератора невозможно обеспечить постоянный температурный режим термообработки [1], поскольку индуктивность  $L_i$  зависит от степени загрузки индуктора, а также от расположения изделия в индукторе. Постоянство температурного режима может быть обеспечено, если ток, проходящий через индукционную систему, будет оставаться постоянным при изменении индуктивности и затухания индуктора.

Для исследования возможности стабилизации тока в индукторе при заданном токе в подводящей цепи рассмотрим линейную цепь,

изображенную на рис. 1, а. Условие постоянства тока  $I_1$ , при  $I = \text{const}$ , частоте  $f = \text{const}$  и изменении  $Z_1$  можно записать в виде

$$\frac{dI_1}{dZ_1} = \frac{IZ_4Z_3(Z_2 + Z_3 + Z_4)}{[Z_1Z_2 + (Z_3 + Z_4)(Z_1 + Z_2)]^2} = 0. \quad (1)$$

Откуда

$$Z_2 + Z_3 + Z_4 = 0. \quad (2)$$

Равенство (2) выполняется при

$$R = R_2 + R_3 + R_4 = 0 \quad (3)$$

и

$$x_2 + x_3 + x_4 = 0. \quad (4)$$

Точное выполнение равенства (3) практически не может быть осуществлено, но эта величина может быть сведена к минимуму. Если  $Z_1$  — полное сопротивление индуктора, то, чтобы получить максимальный ток в контуре  $Z_1$ ,  $Z_2$  и минимальное значение  $R$  нужно считать, что  $Z_2$  и  $Z_3$  — емкости, а  $Z_4$  — индуктивность.

Практическая схема контурной стабилизации тока с использованием источника тока  $I = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$  представлена в виде рис. 1, б. В этом случае условие (4) можно записать в виде

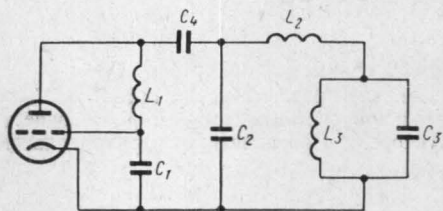


Рис. 2

$$\frac{1}{\omega C_2} - \omega L_3 + \frac{1}{\omega C_4} = 0, \quad \omega^2 = \frac{1}{L_3} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_4} \right), \quad (5)$$

где  $\omega = 2\pi f$ .

Рассмотренная линейная цепь контурной стабилизации тока может быть составной частью сложной колебательной системы генератора, частота автоколебаний которого равна  $\omega$  (5).

На рис. 2 представлена одна из возможных принципиальных схем по высокой частоте автогенератора, выполненного по схеме емкостной трехточки и содержащего цепь контурной стабилизации тока.

Парциальные частоты первого контура  $n_1^2 = \frac{1}{L_1} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_4} \right)$ , второго контура  $n_2^2 = \frac{1}{L_2} \left( \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$  и третьего контура  $n_3^2 = \frac{1}{L_3 C_3}$ .

Частотная кривая схемы рис. 2 имеет вид обычной частотной кривой генератора с трехконтурной колебательной системой с емкостной связью [2]. В координатах  $\eta$ ,  $\xi$  частотная кривая имеет асимптоту  $\eta = \xi_1$ , где

$$\eta = \frac{\omega^2 - n_3^2}{\omega^2}, \quad \xi_1 = \frac{n_1^2 - n_3^2}{\omega^2} \text{ и } n_3^2 = \text{const.}$$

В зависимости от расстройки между парциальными частотами второго и третьего контуров происходит перемещение точки пересечения кривой с осью абсцисс  $\xi$  (3).

При синхронизме парциальных частот второго и третьего контуров ( $\xi_2 = 0$ , где  $\xi_2 = (n_2^2 - n_3^2)/\omega^2$ ) точка пересечения частотной кривой

осью  $\xi_1$  расположена левее начала координат. Отличительной особенностью рассматриваемой системы является то, что ни при каких значениях связи частотная кривая не проходит через точку синхронизма.

Подбирая определенные параметры контуров и связи, можно рассмотреть случай, когда частота генерируемых колебаний совпадает с парциальной частотой второго контура соответственно условию (5), т. е. когда  $\eta = \xi_2$ .

Из уравнений движения для системы рис. 2 в гармоническом приближении амплитуда тока в первом контуре может быть получена в виде

$$A_1^2 = \frac{4}{\delta_{02}} \left[ \delta_{01} - \omega^2 \frac{\delta_1}{\alpha} - \frac{K_1^2}{\delta_2 \alpha} - \frac{K_2^2 [\eta (\eta - \xi) \delta_2 \omega^4 - \delta_3 K_1^2]}{\alpha \delta_2 [\eta^2 \delta_2 \omega^4 + \delta_3 (K_1^2 + \omega^2 \delta_2 \delta_3)]} \right], \quad (6)$$

где

$$K_1^2 = \frac{1}{L_1 L_2 C_2^2}, \quad K_2^2 = \frac{1}{L_2 L_3 C_3^2} \quad \text{и} \quad \alpha = \frac{C_2 + C_4}{L_1 C_2 C_4}.$$

При этом предполагалось, что характеристика лампы может быть записана:

$$I_a = S_0 u_g - \frac{1}{3} S_2 u_g^3 \quad \text{и} \quad \delta_{01} = \frac{S_0}{C_1}, \quad \delta_{02} = \frac{S_2}{C^3},$$

$\delta_i = \frac{R}{L_i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ), где  $R_i$  — сопротивление катушек индуктивности (сопротивление потерь).

Амплитуда тока в первом контуре  $A_1$  не зависит от затухания в третьем контуре  $\delta_3$  при условии  $dA/d\delta_3 = 0$ . Используя (6), это условие можно представить в виде

$$\xi_1 = \eta \left( 1 + \frac{K_1^2}{K_2^2} \right). \quad (7)$$

При равенстве частот автоколебаний парциальной частоте второго контура ( $\eta = \xi_2$ ) зависимость амплитуды тока в третьем контуре от параметров системы имеет вид

$$A_3^2 = A_1^2 \frac{K_a^2}{K_1^2} \left\{ \frac{M^2}{N^2} \left( 1 + \frac{\eta^2 \omega^2}{\delta_3^2} \right) + \frac{\omega^2}{\delta_3^2} (\eta - \xi)^2 - \frac{2\omega^2 \eta}{\delta_3^2} (\eta - \xi) \frac{M}{N} \right\}, \quad (8)$$

где

$$M = \omega^2 \delta_2 \eta (\eta - \xi_1) - K_1^2 \delta_3 \quad \text{и} \quad N = \omega^4 \delta_2 \eta^2 + \delta_3 (K_2^2 + \omega^2 \delta_2 \delta_3).$$

Условие независимости  $A_3$  от  $\delta_3$  можно записать в виде  $dA_3^2/d\delta_3 = 0$ . Откуда, используя выражение (8), получаем

$$\xi_1 = \eta \left( 1 + \frac{K_1^2}{K_2^2} \right) = \xi_2 \left( 1 + \frac{K_1^2}{K_2^2} \right). \quad (9)$$

Таким образом, условие стабилизации тока в первом (7) и третьем (9) контурах при изменении затухания третьего контура совпадают. Из (7) и (9) определяются парциальные частоты контуров и величины коэффициентов связи, при которых можно осуществить стабилизацию тока в первом и третьем контурах. Стабилизация тока в третьем кон-

туре невозможна при совпадении частоты генерации с его парциальной частотой. Физически это объясняется большим влиянием затухания на резонансную кривую вблизи резонансной частоты. При изменении полного сопротивления индуктивной ветви третьего контура должны изменяться как парциальная частота этого контура, так и частота генерации. Однако изменение частоты генерации в пределах полосы пропускания второго контура не приводит к изменению амплитуды  $A_3$ . Невозможность стабилизации на резонансной частоте третьего контура приводит к тому, что в стабильном режиме величина амплитуды тока в индукторе не максимальна. Параметры наиболее выгодного рабочего режима при стабилизации тока будут существенно зависеть от конкретных технико-экономических показателей установки. Кроме области

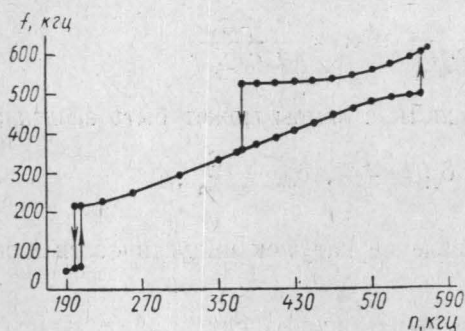


Рис. 3

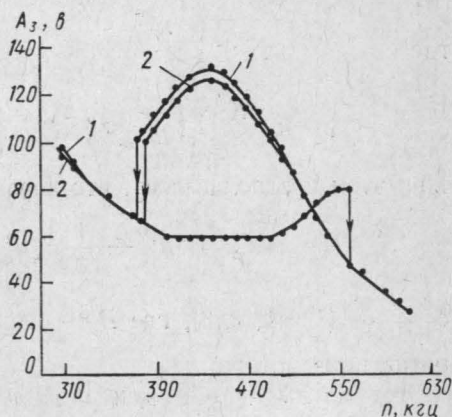


Рис. 4

стабилизации токов в первом и третьем контурах при изменении  $\delta_3$ , при совпадении частоты автоколебаний (при совпадении нормальной частоты с парциальной частотой второго контура  $\eta = \xi_2$ ) существует еще и область стабилизации амплитуды колебаний в третьем контуре при перестройке первого контура. Это существенно при изменении параметров первого контура вследствие замены электронной лампы и изменения температурного режима автогенератора. Действительно, из условия  $dA_3/d\xi_1 = 0$  получим

$$\xi_1 = \eta \left( 1 + \frac{2K_1^2}{\delta_2 \delta_3 \omega^2} \right) + \frac{\eta K_1^2 K_2^2 (\delta_2 \delta_3 \omega^2 - 2K_2^2)}{\omega^2 \delta_2 \delta_3 (\eta^2 \delta_2^2 \omega^6 + K_2^4)}. \quad (10)$$

Таким образом, при определенном выборе коэффициентов связи между контурами и парциальных частот контуров можно осуществить стабилизацию амплитуды колебаний в третьем контуре при изменении затухания в третьем контуре (9), при расстройке первого контура (10) и при изменении полного сопротивления индуктивной ветви третьего контура (5). Ширина области стабилизации зависит от добротности второго контура. Как видно из выражений (9) и (10), области стабилизации тока в третьем контуре при перестройке первого контура и при изменении затухания в третьем контуре будет совпадать, если параметры подобраны так, что  $\delta_2 \delta_3 \omega^2 \approx 2K_2^2$ .

Проводилась качественная экспериментальная проверка возможности стабилизации контурного тока в автоколебательной системе.

Парциальные частоты контуров  $\nu_3=245$  кГц,  $\nu_2=430$  кГц; парциальная частота первого контура менялась от 410 до 490 кГц. Добротность второго контура  $Q=35$ . Коэффициенты связи между контурами  $\omega^4 K_1^2 = 0,04$ ,  $\omega^4 K_2^2 = 0,25$ . Дополнительное затухание в третьем контуре вводилось последовательно с катушкой индуктивности этого контура ( $R=50$  Ом).

При указанном выборе параметров системы, области стабилизации при изменении затухания третьего контура или парциальной частоты первого контура, совпадали.

Результаты экспериментальной проверки возможности контурной стабилизации представлены на рис. 3 и 4. На частотной кривой (рис. 3) показано наличие двух областей затягивания вблизи синхронизма парциальной частоты первого контура с парциальной частотой второго или третьего контуров, имеющих сильно разнесенные частоты.

Кривая 1 рис. 4 показывает зависимость амплитуды напряжения на третьем контуре при изменении парциальной частоты первого контура в области расстроек, при которых возможна генерация частоты  $\omega=n_2$ . Кривая 2 аналогична кривой 1, но при введении дополнительного затухания. Кривая 1 показывает, что при выбранных параметрах существует область перестроек частоты первого контура (18%), где амплитуда напряжения в третьем контуре не зависит от перестройки. Изменения амплитуды колебаний в третьем контуре в диапазоне генерируемых частот от 390 до 260 кГц при введении дополнительного затухания обнаружено не было, в то время как в диапазоне генерируемых частот от 530 до 545 кГц (при тех же значениях парциальных частот первого контура) при введении дополнительного затухания напряжение на контуре заметно понижалось. Об изменениях тока достаточно хорошо можно судить по изменениям напряжения.

Таким образом, в работе теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность осуществления стабилизации контурного тока при изменении затухания в нагрузочном контуре и изменении парциальной частоты контура генератора.

Рассмотренный метод позволяет осуществить стабилизацию тока в индукторе нагрузочного контура и тем самым осуществить постоянство температурного режима при термообработке с применением индукционного нагрева.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. Н. Особенности применения индукционного нагрева в автоматических поточных линиях. В сб.: «Высокочастотные электротермические установки». М., Госэнергоиздат, 1961.
2. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., № 1, 1966.
3. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Изв. вузов», радиотехника, 11, № 1, 1968.
4. Махаринский О. В., Минакова И. И. «Изв. вузов», радиотехника, 13, № 7, 1970.

Поступила в редакцию  
6.9 1971 г.

Кафедра  
физики колебаний