

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

М. Е. ЖАБОТИНСКИЙ и Д. А. ЛИСИЧКИН

**КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ
СВЯЗЬЮ И ИНЕРЦИОННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

(Представлено академиком А. И. Бергом 12 II 1954)

Применение инерционной нелинейности для ограничения амплитуды колебаний и включение кварцевого резонатора в схему моста, в одно из плеч которого включалась инерционная нелинейность, позволило свести вариации частоты генератора к величинам порядка 10^{-8} ⁽¹⁾. Рассмотрение таких генераторов без учета фазовых сдвигов в усилителе ⁽²⁾ не дает возможности вскрыть принципиальные недочеты схемы и указать пути построения более совершенных схем. Как известно, основными причинами, вызывающими отклонение генерируемой частоты от резонансной, являются непосредственное воздействие схемы на кварцевый резонатор и влияние нелинейностей характеристик ламп (см., например, ^(3,4)), однако включение инерционной нелинейности практически исключает влияние нелинейности характеристик ламп. Как указано в работе ⁽⁵⁾, схема мостового генератора может трактоваться как схема обычного генератора с селективной положительной обратной связью, усилительная часть которого охвачена отрицательной обратной связью; авторы этой работы предложили также исключить из схемы мост за счет применения на входе усилителя дифференциального каскада; они не занимаются, однако, вопросом о стабильности частоты, ограничиваясь рассмотрением стабильности амплитуды.

Ниже будет кратко изложена теория действия кварцевого генератора с отрицательной обратной связью и инерционной нелинейностью и указаны пути дальнейшего повышения стабильности частоты кварцевых генераторов.

Рассмотрим усилитель с комплексным коэффициентом усиления $\bar{k} = G(\omega)e^{i\theta(\omega)}$, охваченный неселективной отрицательной обратной связью β и весьма селективной положительной обратной связью $\bar{\alpha} = M(\omega)e^{i\varphi(\omega)}$, селективность которой определяется кварцем.

Стационарное состояние описывается уравнением

$$(\bar{\alpha} - \beta) \bar{k} = 1, \quad (1)$$

которое вместе с характеристикой цепи с инерционной нелинейностью полностью определяет процессы в генераторе в рабочем режиме*.

Учитывая наличие отрицательной обратной связи, введем эквивалентный усилитель

$$\bar{k}_s = \frac{\bar{k}}{1 + \beta \bar{k}}. \quad (2)$$

* В случае мостовых генераторов величина $\bar{\alpha} - \beta = \bar{\mu}$ представляет коэффициент передачи моста.

При этом уравнение (1) переходит в

$$\overline{k_3} \overline{\alpha} = 1. \quad (3)$$

Точное решение уравнения (3) показывает, что для достижения высокой стабильности необходимо обеспечить малый сдвиг фаз в усилителе. При этом параметры эквивалентного усилителя с точностью до малых высшего порядка выражаются через параметры схемы следующими зависимостями:

$$|\overline{k_3}| = G_3 = \frac{G}{1 + \beta G}; \quad \theta_3 = \frac{\theta}{1 + \beta G}. \quad (4)$$

Равенства (4) выражают тот факт, что для уменьшения фазовой неустойчивости усилителя следует увеличивать βG . Вопрос о рациональном выборе схемы усилителя будет освещен ниже.

Уравнение (3) распадается на два уравнения:

$$\theta_3 + \psi = 0. \quad (5)$$

$$G_3 M = 1. \quad (6)$$

При вариации значений параметров схемы в ней установится новое стационарное состояние, при котором вновь будут выполнены условия баланса фаз (5) и баланса амплитуд (6). При этом для приращений фаз получается уравнение

$$d(\theta_3 + \psi) = 0, \quad (7)$$

а для приращений амплитуд с точностью до малых высшего порядка уравнение

$$d(G_3 M) = 0. \quad (8)$$

Учитывая, что θ_3 и ψ являются функциями частоты и параметров схемы: $\theta_3 = \theta_3(\omega, p_i)$; $\psi = \psi(\omega, q_i)$, и учитывая, что $\frac{\partial \theta_3}{\partial \omega} \ll \frac{\partial \psi}{\partial \omega}$ (фазовая характеристика усилителя гораздо положе фазовой характеристики кварца), получим из (7):

$$d\omega = \frac{\sum \frac{\partial \theta_3}{\partial p_i} dp_i}{\left. \frac{\partial \psi}{\partial \omega} \right|_{\omega_0}} + \frac{\sum \frac{\partial \psi}{\partial q_i} dq_i}{\left. \frac{\partial \psi}{\partial \omega} \right|_{\omega_0}}, \quad (9)$$

где в правой части первый член представляет влияние на генерируемую частоту фазы усилителя, а второй член — влияние фазы цепи положительной обратной связи.

Уменьшить влияние второго члена можно только, уменьшая его величину непосредственным поддержанием постоянства температуры и других внешних факторов. Так как нашей целью является уменьшение влияния на частоту параметров схемы, то в дальнейшем мы будем изучать только первый член (9), не обращая внимания на второй член.

Числитель первого члена можно получить, дифференцируя второе из равенств (4):

$$d\theta_3 = \frac{d\theta}{1 + \beta G} + \frac{\theta (G d\beta + \beta dG)}{(1 + \beta G)^2} \cong \frac{d\theta}{\beta G} + \frac{\theta}{\beta G} \left(\frac{d\beta}{\beta} + \frac{dG}{G} \right). \quad (10)$$

Знаменатель выражения (9) определяется цепью положительной обратной связи. Если эта цепь состоит из кварцевого резонатора и сеточной цепи дифференциального каскада, то в нашем приближении

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} = - \frac{2Q}{\omega_0 (1 + \gamma)}, \quad (11)$$

где Q — добротность кварцевого резонатора; $\gamma = R/r$; R — сопротивление утечки сетки; r — сопротивление потерь кварца. Заметим, что при этом $M = \frac{\gamma}{1+\gamma}$, а при больших значениях G , кроме того, $\beta \cong M$. Учитывая это, а также (10) и (11), получим из первого члена (9):

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = \frac{(1+\gamma)^2}{2\gamma QG} \left[-d\theta + \theta \left(\frac{dG}{G} + \frac{d\beta}{\beta} \right) \right]. \quad (12)$$

Для достижения наибольшей стабильности выражение $\frac{(1+\gamma)^2}{\gamma}$ должно иметь минимум, что достигается при $\gamma = 1$. В дальнейшем будем считать всюду $\gamma = 1$.

Выражение (12) является следствием условия баланса фаз (7). В стационарном состоянии величины, входящие в (7), а следовательно, и в (12), связаны, кроме того, условием баланса амплитуд (8), которое должно быть учтено для определения свойств схемы в стационарном состоянии.

Из (8) получаем

$$\frac{dG_9}{G_9} + \frac{dM}{M} = 0.$$

В нашем приближении

$$\begin{aligned} \frac{dG_9}{G_9} &= \frac{\frac{dG}{G} - \beta G \frac{d\beta}{\beta}}{1 + \beta G}, \\ \frac{dM}{M} &= \frac{\theta}{1 + \beta G} Q \frac{d\omega}{\omega_0}, \end{aligned}$$

и (8) дает

$$\frac{d\beta}{\beta} = \frac{1}{\beta G} \left(\frac{dG}{G} + \theta Q \frac{d\omega}{\omega_0} \right); \quad (13)$$

подставив это в (12), получим

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = -2 \frac{d\theta}{QG} + \frac{2\theta}{QG} \left(1 + \frac{1}{\beta G} \right) \frac{dG}{G}, \quad (14)$$

где в знаменателе мы пренебрегли членом $\frac{2\theta^2}{\beta G^2}$ по сравнению с единицей.

Уравнение (13) представляет в преобразованном виде условие баланса амплитуд, а уравнение (14) описывает поведение системы при одновременном выполнении условий баланса фаз и баланса амплитуд.

Уравнение (14) показывает, что если инерционная нелинейность, обеспечивающая баланс амплитуд, стоит в цепи отрицательной обратной связи, как это имеет место во всех схемах, описанных в литературе, то всякие изменения коэффициента усиления приводят к изменениям генерируемой частоты порядка

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = \frac{2\theta}{QG} \frac{dG}{G}. \quad (15)$$

Для устранения этих влияний следует исключить инерционную нелинейность из цепи отрицательной обратной связи и сделать эту цепь не зависящей от режима работы. При этом $d\beta = 0$, и из (12) и (13) получается

$$\frac{d\omega}{\omega_0} = -2 \frac{d\theta}{QG}, \quad (16)$$

т. е. изменения частоты в этом случае обусловлены только вариациями фазы усилителя.

Инерционная нелинейность, необходимая для поддержания баланса амплитуд, при этом должна быть включена в самом усилителе, кото-

рый при этом можно рассматривать как охваченный двумя независимыми трактами отрицательной обратной связи — обычной безинерционной обратной связью β , приводящей к стабилизации параметров усилителя (G , и θ), и инерционной отрицательной обратной связью, обеспечивающей выполнение баланса амплитуд в линейном участке характеристик усилительных ламп*.

Отметим, что величина (15) становится меньше величины (16) лишь при выполнении неравенства $\frac{dG}{G} < \frac{d\theta}{\theta}$, которое не может быть обеспечено в эксплуатационных условиях; поэтому предлагаемое нами перенесение инерционной нелинейности из моста в усилитель является радикальным и принципиально новым методом повышения стабильности частоты.

В заключение остановимся кратко на выборе схемы усилителя, обеспечивающей дополнительное повышение стабильности частоты благодаря действию отрицательной обратной связи.

Как указано выше, наибольшая стабильность достигается при $\gamma = 1$, т. е. при $\beta = 0,5$. Нашей задачей является выбор схемы, обеспечивающей наибольшую величину βG без нарушения устойчивости усилителя.

Применение многокаскадных усилителей, охваченных внутренними обратными связями β_1 , оказывается нерациональным, ибо при этом в случае n одинаковых каскадов общий фазовый сдвиг уменьшается в $\beta_1 G_1$ раз, а общий коэффициент усиления уменьшается в $(\beta_1 G_1)^n$ раз, что соответственно ухудшает действие основной обратной связи.

Анализ показывает, что в диапазоне средних частот (десятки килогерц) целесообразно применение трехкаскадных реостатных усилителей с цепями фазовой коррекции, что дает возможность получения устойчивого усиления порядка 10^5 . В области более высоких и более низких частот применение фазовой коррекции становится неэффективным, и приходится ограничиваться двухкаскадными усилителями. В области высоких частот целесообразно применение одного реостатного и одного резонансного каскада — достижимый устойчивый коэффициент усиления порядка 10^4 . (Два резонансных каскада при $\beta = 0,5$ возбуждаются вблизи резонансной частоты при G порядка нескольких сотен.) В области низких частот, повидимому, целесообразно применение двух реостатных каскадов с повышенными анодными нагрузками, при помощи которых можно получить общее усиление порядка 10^6 .

Изложенное открывает возможность дальнейшего повышения стабильности частоты кварцевых генераторов.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступило
10 I 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ L. A. Meacham, Proc. IRE, **26**, 1278 (1938). ² К. Ф. Теодорчик, Радиотехника, **2**, № 7, 3—7 (1947). ³ Б. К. Шембель, ЖТФ, **1**, 314 (1931).
⁴ Ю. Б. Кобзарев, Вестн. электротехники, № 10, 346 (1931); С. М. Рытов, А. М. Прохоров, М. Е. Жаботинский, ЖЭТФ, **15**, 557, 613 (1945).
⁵ E. J. Post, H. F. Pit, Proc. IRE, **39**, 169 (1951).

* Можно показать, что включение инерционной нелинейности в цепь положительной обратной связи (как это предлагалось в некоторых работах) приводит к такому же ухудшению стабильности частоты, как и включение ее в цепь отрицательной обратной связи.