

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ СТАБИЛИЗАЦИИ ФАЗЫ В УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДАХ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

И. А. ВЕСЕЛКОВ

(Представлено научным семинаром радиотехнического ф-та)

Для целей стабилизации фазы широкое применение находит противосвязь [2, 3, 4]. Оценка фазовой неустойчивости усилителя с противосвязью, как известно [5], может быть произведена на основании выражения

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{1 + \frac{K\beta}{\cos \varphi}} \quad (1)$$

При малых углах  $\varphi$  ( $\cos \varphi \approx 1$ ) неустойчивость фазы уменьшается в  $1 + K\beta$  раз.

Фазостабилизирующие свойства комплексной отрицательной обратной связи определяются как значением петлевого усиления  $K\beta$ , так и величиной фазового угла цепи обратной связи  $\varphi_\beta$ .

Представляет интерес оценка фазостабилизирующих свойств отрицательной обратной связи для различных значений  $\varphi_\beta$  и  $K\beta$ .

В статье производится такая оценка для следующих двух случаев:

- 1) фазовая неустойчивость является результатом неустойчивости нескольких параметров усилителя;
- 2) фазовая неустойчивость обусловлена только изменением во времени одного из реактивных элементов нагрузки.

### I. Случай неустойчивости нескольких параметров

Модуль коэффициента усиления усилителя с частотно-зависимой комплексной обратной связью и его фазовая характеристика представляется выражением и [1, 6]

$$K_{св} = \frac{K}{\sqrt{1 - 2K\beta \cdot \cos(\varphi + \varphi_\beta) + (K\beta)^2}}, \quad (2)$$

$$\varphi_{св} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\sin \varphi + K\beta \cdot \sin \varphi_\beta}{\cos \varphi - K\beta \cdot \cos \varphi_\beta} \quad (3)$$

Здесь  $\varphi$  — фазовый угол между выходным напряжением усилителя  $U_2$  и напряжением на его входе  $U$ .

Анализ выражения (3) показывает, что имеется принципиальная возможность стабилизации фазы при различных значениях  $\varphi_\beta$  и  $K\beta$ . При этом в каждом случае будет свой „нулевой“ уровень фазы, относительно которого осуществляется стабилизация.

Действительно из (3) при  $\varphi_\beta = 180^\circ$  получим выражение (1). Если  $\varphi_\beta = 90^\circ$  или  $270^\circ$ , то

$$\varphi_p = \arctg \frac{\sin \varphi \pm K\beta}{\cos \varphi}.$$

В этом случае „нулевой“ уровень фазы определяется величиной  $K\beta$  (при  $\varphi = 0$   $\varphi_{po} = \arctg \pm K\beta$ ).

При комплексной обратной связи  $\varphi_{ко}$  будет определяться величинами  $K\beta$  и  $\varphi_\beta$ .

В дальнейшем индексы „ $n$ “, „ $p$ “ и „ $к$ “ сохраним для обозначения соответственно противосвязи, реактивной и комплексной обратных связей.

Очевидно, что выбор того или иного вида связи для целей стабилизации фазы определяется тремя основными требованиями:

- 1) степенью стабилизации фазы,
- 2) коэффициентом усиления усилителя,
- 3) устойчивостью усилителя с обратной связью.

Рассмотрим эти три вида связи с точки зрения первых двух требований. Анализ устойчивости при использовании того или иного вида связи целесообразно проводить для конкретной схемы.

Из (3) следует, что при  $\varphi = 0$

$$\varphi_{ко} = \arctg \frac{K\beta \cdot \sin \varphi_\beta}{1 - K\beta \cdot \cos \varphi_\beta}. \quad (4)$$

Исследование выражения  $\varphi_k - \varphi_{ко}$  на экстремумы по переменной  $K\beta$  показывает, что эта разность стремится к нулю при  $K\beta \rightarrow \infty$ .

Таким образом, при любом из трех видов обратной связи высокую стабильность фазы можно обеспечить лишь при больших глубинах обратной связи. Однако для определенных глубин степень стабилизации фазы при использовании того или иного вида обратной связи не остается одинаковой.

Введем коэффициенты относительной стабилизации фазы

$$a_1 = \frac{|\varphi_n| - |\varphi_{no}|}{|\varphi_p| - |\varphi_{po}|}$$

$$a_2 = \frac{|\varphi_n| - |\varphi_{no}|}{|\varphi_k| - |\varphi_{ко}|},$$

и

характеризующие эффективность соответственно реактивной и комплексной обратных связей по сравнению с противосвязью.

На рис. 1 приведены расчетные графики  $a_2 = f_1(\varphi)$  (при  $\varphi_\beta = 80^\circ$  и  $\varphi_\beta = 100^\circ$ ) и  $a_1 = f_2(\varphi)$  для значений  $K\beta = 5$  и  $10$ .

Из графиков следует, что для выбранных  $\varphi$  и  $K\beta$  наибольшая стабильность фазы обеспечивается при  $\varphi_\beta = 80^\circ$ .

Для всех трех значений  $\varphi_\beta$  ( $90^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $100^\circ$ ) с увеличением  $K\beta$  эффективность комплексной и реактивной обратных связей по сравнению с противосвязью возрастает.

При использовании для целей стабилизации фазы комплексной и реактивной обратных связей можно заметить интересное явление, заключающееся в том, что для определенных  $K\beta$  и  $\varphi_\beta$  существует угол  $\varphi$ , при котором  $\varphi_{св} = \varphi_{сво}$ . Действительно на основании (3) и (4) условием отсутствия фазовых искажений при изменении  $\varphi$  является равенство

$$\frac{\sin \varphi + K\beta \cdot \sin \varphi_\beta}{\cos \varphi - K\beta \cdot \cos \varphi_\beta} = \frac{K\beta \cdot \sin \varphi_\beta}{1 - K\beta \cdot \cos \varphi_\beta} \quad (5)$$

Решая (5) относительно  $\varphi$ , получим

$$\varphi = - \operatorname{arctg} \sin \frac{2 K\beta \cdot \sin \varphi_\beta (1 - K\beta \cdot \cos \varphi_\beta)}{1 - 2 K\beta \cdot \cos \varphi_\beta + (K\beta)^2} \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет определить угол  $\varphi$ , при котором для выбранных значений  $K\beta$  и  $\varphi_\beta$  достигается наилучшая стабилизация.

На рис. 1 (кривые 5, 6) случаям  $\varphi_\beta = 80^\circ$  и  $K\beta = 5, 10$  соответствуют  $\varphi_1 = 3^\circ 4'$  и  $\varphi_2 = 8^\circ 33'$ .

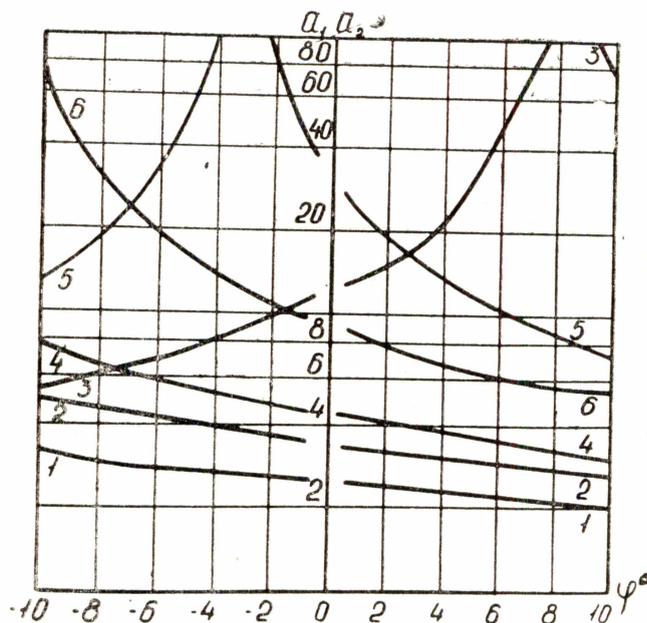


Рис. 1. 1 —  $\varphi_\beta = 100^\circ$ ,  $K\beta = 5$ ;

2 —  $\varphi_\beta = 100^\circ$ ,  $K\beta = 10$ ; 3 —  $\varphi_\beta = 80^\circ$ ,  $K\beta = 10$ ;

4 —  $\varphi_\beta = 90^\circ$ ,  $K\beta = 5$ ; 5 —  $\varphi_\beta = 80^\circ$ ,  $K\beta = 5$ ;

6 —  $\varphi_\beta = 90^\circ$ ,  $K\beta = 10$ .

Анализ выражения (2) показывает, что больший коэффициент усиления на частоте настройки соответствует комплексной обратной связи при  $\varphi_\beta < 90^\circ$  и  $\varphi_\beta > 270^\circ$ .

По сравнению с двумя другими видами обратной связи схема с противосвязью имеет меньший коэффициент усиления.

Основным недостатком способа стабилизации фазы с помощью комплексной обратной связи является зависимость стабильности „нулевого“ уровня фазы ( $\varphi_{сво}$ ) от стабильности петлевого усиления.

Однако такая зависимость характерна только для быстрых изменений  $K\beta$ , которые в основном являются результатом нестабильности питающих напряжений и могут быть исключены.

Медленные же изменения  $K\beta$ , причиной которых может быть „старение“ элементов усилителя, к значительной нестабильности нулевого уровня не приводят.

Действительно, как следует из графиков рис. 1, для случая  $\varphi_\beta = 80^\circ$  медленное изменение величины  $K\beta$  от 10 до 5 вызывает перемещение кривой 3 относительно оси абсцисс в сторону положения кривой 5. При этом значения  $a_2$  остаются достаточно высокими.

## II. Случай нестабильной во времени нагрузки

Анализ будем проводить, используя эквивалентную схему рис. 2. Считаем, что нестабильным во времени элементом является емкость  $C$ . Такой случай имеет место тогда, когда усилитель имеет нестабильную нагрузку емкостного характера.

Если снимать напряжение с емкости, то коэффициент передачи напряжения может быть представлен выражением

$$K = \frac{Kx^2}{1 + j\alpha}, \quad (7)$$

где 
$$K = \frac{1}{j\omega C_0 R}, \quad x^2 = \frac{\omega_k^2}{\omega_c^2},$$

$$\alpha = \frac{\omega_c \alpha}{R} (1 - x^2), \quad (8)$$

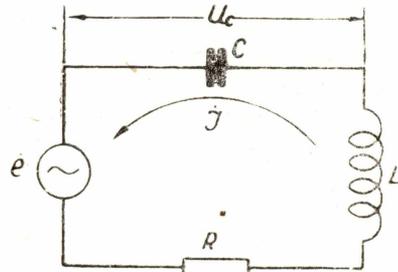


Рис. 2.

$C_0$  — емкость, соответствующая настройке контура на частоту сигнала;  
 $\omega_c$  — угловая частота сигнала;

$\omega_k$  — собственная угловая частота контура.

Коэффициент передачи напряжения системы с обратной связью может быть записан в виде

$$K_{св} = \frac{Kx^2}{(1 - K\beta x^2 \cdot \cos \varphi_\beta) + j(\alpha - K\beta x^2 \cdot \sin \varphi_\beta)}. \quad (9)$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \varphi_{св} = - \frac{\alpha - K\beta x^2 \cdot \sin \varphi_\beta}{1 - K\beta x^2 \cdot \cos \varphi_\beta}. \quad (10)$$

При  $\varphi_\beta = 90^\circ$  или  $270^\circ$

$$\operatorname{tg} \varphi_\beta = - (\alpha \pm K\beta x^2). \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что в случае реактивной обратной связи для целей стабилизации фазы может быть использован эффект изменения амплитуды  $U_\beta$ , являющийся результатом расстройки контура. В этом случае оптимальной с точки зрения фазостабилизирующих свойств будет обратная связь при  $\varphi_\beta = 270^\circ$  (знак плюс перед вторым членом в (11)).

Действительно при расстройке контура увеличению значения  $\alpha$  соответствует уменьшение собственной частоты контура  $f_k$ , но при этом уменьшается модуль второго члена выражения (11). Таким образом, изменение расстройки контура может быть скомпенсировано изменением фактора обратной связи. Оптимальное условие стабилизации фазы выполняется и в случае комплексной обратной связи при определенных значениях  $K\beta$  и  $\varphi_\beta$ .

При  $\varphi = 0$  выражение (10) преобразуется в (4). Как и ранее, условие отсутствия фазовых искажений при расстройке контура может быть записано в виде равенства

$$\frac{-\alpha + K\beta x^2 \sin \varphi_\beta}{1 - K\beta x^2 \cos \varphi_\beta} = \frac{K\beta \sin \varphi_\beta}{1 - K\beta \cos \varphi_\beta} \quad (12)$$

Решая (12) относительно  $K\beta$ , получим

$$(K\beta)_{opt} = \frac{Q}{Q \cos \varphi_\beta - \sin \varphi_\beta} \quad (13)$$

Здесь

$$Q = \frac{\omega_c L}{R}$$

Формула (13) позволяет определить величину петлевого усиления, при которой фазовая нестабильность при расстройке контура будет минимальной.

Из (9) и (13) следует, что  $\varphi_\beta = 0$  соответствует положительной обратной связи. При  $\varphi_\beta = 180^\circ$   $(K\beta)_{opt} = -1$ .

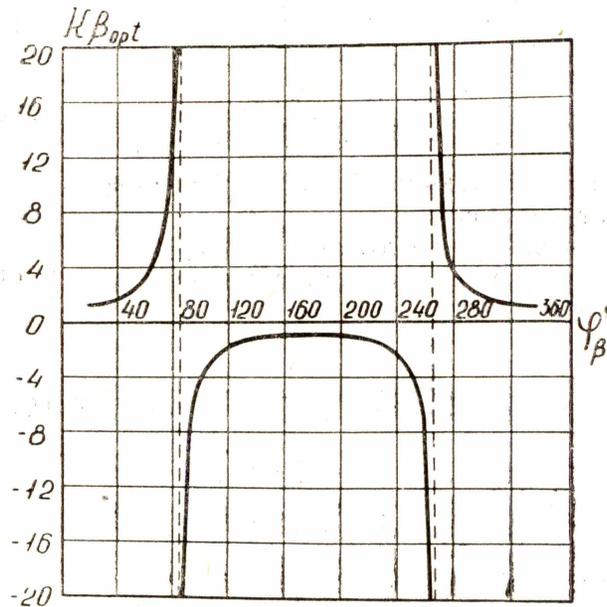


Рис. 3.

Таким образом, при отрицательной обратной связи условие оптимальной стабилизации, определяемое формулой (13), отсутствует, так как значение  $(K\beta)_{opt} = -1$  означает переход к положительной обратной связи.

Действительно, при  $\alpha = 0$  и  $\varphi_\beta = 180^\circ$  выражение (9) принимает вид

$$K_{сво} = \frac{K}{1 + K\beta} \quad (9')$$

Подстановка в (9')  $K\beta = -1$  приводит к  $K_{сво} \rightarrow \infty$ .

Зависимость  $(K\beta)_{opt} = f(\varphi_\beta)$  при  $Q = 10$  иллюстрируется графиком рис. 3. Величины  $(K\beta)_{opt}$  для больших значений  $Q$  незначительно отличаются от приведенных на графике.

На основании графика следует, что при значениях  $\varphi_\beta$ , определяемых по формуле  $\operatorname{tg} \varphi_\beta = Q$ ,  $(K_\beta)_{opt} \rightarrow \infty$ . Следовательно, эти значения  $\varphi_\beta$  не могут быть использованы. При определенных значениях  $\varphi_\beta$ , как видно из графика, оптимальные условия стабилизации могут быть обеспечены при небольших величинах  $(K_\beta)_{opt}$ . Выбор  $\varphi_\beta$ , очевидно, будет определяться также условием устойчивости системы.

Таким образом, в случае изменения во времени одного из реактивных элементов нагрузки, высокая стабильность фазы в схеме с реактивной обратной связью (если добротность контура невелика), а также в схеме с комплексной обратной связью может быть обеспечена при небольших оптимальных глубинах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Войшвилло Г. В. Усилители низкой частоты на электронных лампах. Связьиздат, М., 1959.
2. Модель З. И. и Персон С. В. Компенсация искажений в радиопередающих устройствах путем применения противосвязи. ИЭСТ, № 7, 1938.
3. Ризкин А. А. Усилители с отрицательной обратной связью. Электросвязь, № 2, 1938.
4. Суслев И. А. Стабилизация фазы тока в антенне с помощью противосвязи. Труды СФТИ, вып. 37, 1959.
5. Цыкин Г. С. Отрицательная обратная связь и ее применение. Связьиздат, М., 1940.
6. Цыкин Г. С. Электронные усилители. Связьиздат, М., 1960.