

УДК 531.391 + 621.372

О. В. МАХАРИНСКИЙ, И. И. МИНАКОВА

## ПОЛОСЫ СТАБИЛИЗАЦИИ В ГЕНЕРАТОРЕ С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

На плоскости коэффициентов связи определены кривые постоянных полос стабилизации (удержания и раскрыва), рассчитанные на ЭВМ при помощи условий устойчивости Раусса — Гурвица. Получено, что в некоторой области плоскости связей колебания на средней ветви невозможны. Сравнение с аналогичными кривыми, рассчитанными по условию «вертикальных касательных», показывает, что деформация семейства кривых постоянных полос стабилизации наблюдается в узкой области вблизи границы устойчивости. Даны рекомендации по расчету полос стабилизации и выбору параметров схемы.

Вопрос о расчете полос стабилизации (удержания  $\Phi$ - и раскрыва  $F$ ) в генераторах, стабилизированных двумя внешними резонаторами, является одним из наиболее сложных и трудоемких в теории систем с тремя степенями свободы. Основные физические закономерности, которым подчиняются эти величины, были получены в [1—3] путем анализа поведения частотных кривых и устойчивости колебаний при изменении связей, потерь и угла запаздывания. В [4] величины  $\Phi$  и  $F$  исследовались методом построения кривых  $\Phi = \text{const}$  и  $F = \text{const}$  на плоскости коэффициентов связи, что позволило получить количественные закономерности, необходимые для расчета этих величин. Однако в [4] для определения полос стабилизации было использовано лишь одно условие устойчивости — условие «вертикальных касательных», что ограничивает область применимости полученных результатов. Поэтому, как с точки зрения теории, так и для практических приложений, значительный интерес представляет такое построение кривых  $\Phi = \text{const}$  и  $F = \text{const}$  на плоскости коэффициентов связи, которое основывалось бы на более полном исследовании устойчивости системы.

### Полосы стабилизации

В настоящей работе приводятся результаты построения кривых постоянных полос стабилизации на плоскости коэффициентов связи для наиболее интересного для практики случая перестройки парциальной частоты первого (регенерированного) контура. Устойчивость системы рассчитывалась по условиям Раусса—Гурвица [5]. Все численные расчеты были выполнены на ЭВМ.

На рис. 1 в логарифмическом масштабе показана зависимость полос удержания  $\Phi_1$  и раскрыва  $F_1$  (пунктирные линии) от коэффициента связи между первым и вторым контуром для двух значений инкремента генератора. Введем обозначения:  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  — умноженные на собственную добротность третьего контура коэффициенты связи между первым и вторым и вторым и третьим контурами;  $\gamma = \frac{\delta_3}{\delta_2}$  и  $\chi = \frac{\delta_3}{\delta_1}$  — отношение декрементов (индекс 1 относится к регенерированному контуру);  $\chi' = \frac{\delta_3}{\delta_0}$  — отношение декремента третьего контура к инкременту. При расчете кривых рис. 1  $\gamma = 0,001$ ;  $\chi = 0,01$ ;  $\chi' = -0,001$  (кривая 1) и  $\chi' = -0,0001$  (кривая 2); расстройка между вторым и третьим контуром равна нулю, запаздывание оптимально. Для сравнения сплошными линиями на рис. 1 показаны аналогичные кривые, рассчитанные по условию «вертикальных касательных». Из рис. 1 видно, что в области малых связей  $\kappa_1$  полосы стабилизации определяются условием вертикальных касательных. При более сильных связях кривые расходятся: полоса удержания  $\Phi_1$  уменьшается, а полоса раскрыва  $F_1$  — увеличивается.

Рассмотрим сначала поведение системы при  $\chi' = -0,001$  (кривые 1 на рис. 1). При связях, соответствующих пересечению кривых  $\Phi_1$  и  $F_1$  и больших, в схеме наблюдается гашение колебаний вблизи нормальных частот второй парциальной системы. По мере увеличения  $\kappa_1$  области гашения расширяются и, наконец, перекрывают друг друга в районе синхронизма (при этом полоса  $\Phi_1$  становится равной нулю).

При выбранных для расчета параметрах схемы, которые близки к реальным в случае стабилизации отражательных клистронов, решающим условием, определяющим устойчивость схемы, являлось равенство нулю свободного члена характеристического уравнения (появление нулевого корня). При малых связях это условие сводится к условию вертикальных касательных, а при более сильных — к условию отсутствия гашения колебаний, которое может быть записано в следующем виде:

$$\kappa_1^2 \leq \frac{\left| \frac{1}{\chi'} \right| - \frac{1}{\chi}}{\frac{1}{\gamma} + \frac{\kappa_2^2}{\xi^2 + 1}} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\gamma} + \frac{\kappa_2^2}{\xi^2 + 1} \right)^2 + \xi^2 \left( 1 - \frac{\kappa_2^2}{\xi^2 + 1} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $\xi = \frac{\omega - \nu_3}{\delta_3}$  — обобщенная расстройка собственной частоты системы относительно парциальной частоты третьего контура, определяемая из уравнения частот.

На рис. 2 показано семейство кривых постоянных полос стабилизации, нанесенное на плоскость коэффициентов связи  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ . Пунктирные линии обозначают полосу удержания  $\Phi_1$ , штрих — пунктирные — полосу раскрыва  $F_1$ , сплошные — коэффициент стабилизации  $S_1$ . Заштрихована та часть плоскости, в которой средняя ветвь частотных кривых неустойчива. Граница этой области получается из (1) при  $\xi = 0$ :

$$\kappa_1^2 = \left( \frac{1}{\gamma} + \kappa_2^2 \right) \left( \left| \frac{1}{\chi'} \right| - \frac{1}{\chi} \right). \quad (2)$$

На границе коэффициент стабилизации  $S_1$  имеет максимальное значение

$$S_{1\max} = 1 + \frac{\kappa_2^2 - 1}{\kappa_2^2 + \frac{1}{\gamma}} \left( \left| \frac{1}{\chi'} \right| - \frac{1}{\chi} \right). \quad (3)$$

$S_{1 \max}$  монотонно увеличивается при увеличении  $\kappa_2$ , приближаясь к предельному значению

$$S_{1 \text{пред}} = 1 + \left| \frac{1}{\chi'} \right| - \frac{1}{\chi}, \quad (4)$$

что совпадает с формулой для предельно достижимого коэффициента стабилизации, приведенной в [3].

В силу того что уменьшение полосы удержания  $\Phi_1$  при увеличении связи между первым и вторым контуром происходит очень резко (см. кривую 1, рис. 1), кривые  $\Phi_1 = \text{const}$  могут быть рассчитаны по условию «вертикальных касательных» практически во всей устойчивой части плоскости  $\kappa_1, \kappa_2$ , исключая лишь узкую область, расположенную непосредственно перед границей устойчивости. Более существен-

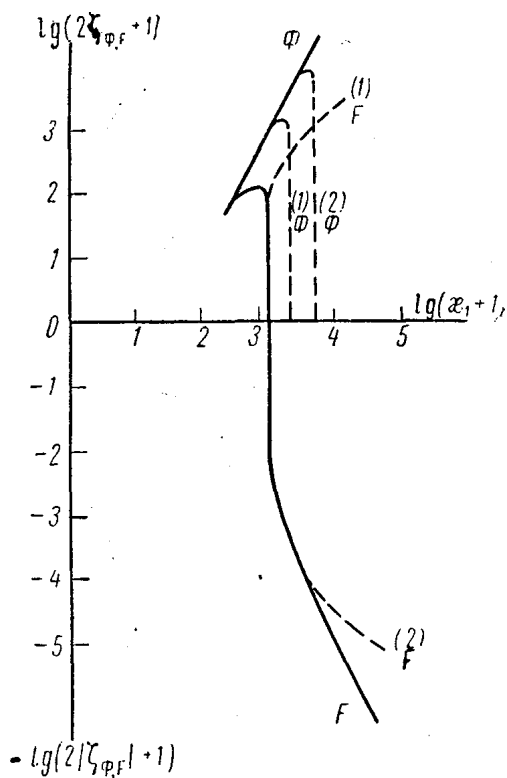


Рис. 1

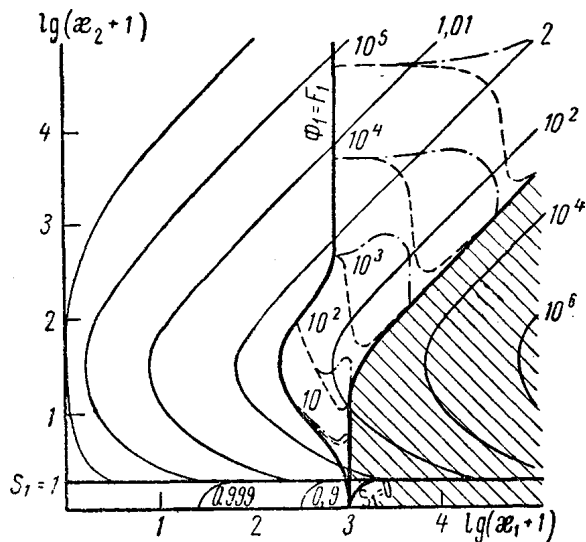


Рис. 2

ные изменения вносит полный анализ устойчивости в поведение полосы раскрытия  $F_1$ . В частности, в описываемом случае ( $\chi' = -0,001$ ) вообще отсутствуют отрицательные полосы раскрытия, т. е. участок средней ветви вблизи точки синхронизма оказывается раскрытым при любых связях, соответствующих устойчивой части плоскости  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ .

Из рис. 2 видно, что хотя коэффициент стабилизации  $S_1$  ограничен величиной (4), полосы стабилизации могут быть существенно увеличены за счет одновременного увеличения  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ . Из рис. 2 видно также, что полоса удержания очень критична к изменению связей вблизи границы устойчивости (2).

Увеличение инкремента генератора приводит к увеличению коэффициента связи  $\kappa_1$  между первым контуром и второй парциальной системой, при котором полосы стабилизации могут еще быть рассчитаны по условию «вертикальных касательных» (кривая 2, рис. 1). Значительно меньшие изменения претерпевает и полоса раскрытия  $F_1$ . Условие отсутствия гашения колебаний не нарушается, определяющими становятся более сложные амплитудно-частотные условия.

В заключение следует сделать следующие выводы.

В некоторой области плоскости  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  колебания на средней ветви невозможны. Граница этой области определяется либо условием гашения колебаний, либо (при больших инкрементах) более сложными амплитудно-частотными критериями. Деформация семейства кривых  $\Phi_1 = \text{const}$  и  $F_1 = \text{const}$  наблюдается в узкой области вблизи границы устойчивости. Эта область расширяется по мере увеличения связи между вторым и третьим контуром.

Для типичных при стабилизации отражательных клистронов параметров полосы стабилизации могут быть рассчитаны либо по условию вертикальных касательных (при слабых связях), либо по условию отсутствия гашения колебаний.

Анализ семейства кривых  $S_1 = \text{const}$ ,  $\Phi_1 = \text{const}$  и  $F_1 = \text{const}$  подтверждает сделанный в [3] вывод о необходимости подбирать коэффициенты связи между контурами таким образом, чтобы рабочая точка находилась несколько левее границы устойчивости (2). Это приводит к увеличению полос стабилизации, а коэффициент стабилизации имеет значение, близкое к предельному.

Авторы благодарят Г. О. Левенюк за программирование задачи и выполнение расчетов на ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 1, 1965.
2. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 4, 1966.
3. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Изв. вузов», радиоэлектроника, 11, № 1, 1968.
4. Махаринский О. В., Минакова И. И. «Изв. вузов», радиоэлектроника (в печати).
5. Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. М., «Наука», 1966.

Поступила в редакцию  
16.11 1968 г.

Кафедра  
физики колебаний