

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4 — 1966

УДК 621.396.22

О. А. КУРДЮМОВ, И. И. МИНАКОВА

О ВЛИЯНИИ СВЯЗЕЙ И ПОТЕРЬ НА АВТОКОЛЕБАНИЯ В ТРЕХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЕ

Рассматривается задача о стабилизации частоты в автоколебательной системе с тремя контурами. Проведен анализ зависимости частных кривых от связей между контурами и параметров контуров. Получено, что для увеличения коэффициентов стабилизации следует увеличивать связь между контуром генератора и промежуточным контуром, связь между промежуточным и стабилизирующим контуром оптимальна при определенном соотношении параметров. Также немонотонна зависимость коэффициента стабилизации от характеристического сопротивления второго контура. Определены условия «режима компенсации», при котором резко возрастает стабильность системы. Данные проведенного анализа могут быть применены для выбора режима стабилизации частоты генераторов СВЧ.

Введение

Описание характера поведения генераторов СВЧ со сложными трехрезонаторными системами в стационарном режиме может быть качественно проведено при помощи эквивалентной схемы автоколебательной системы с тремя последовательно связанными контурами. При этом, при оптимальном пролетном угле можно не учитывать запаздывания в обратной связи. Стационарные режимы автоколебательной системы без запаздывания, с тремя контурами, были в общем виде рассмотрены авторами в [1]. Однако для описания поведения реальных систем СВЧ при помощи полученных уравнений требуется более подробное исследование зависимости режимов работы системы от ряда параметров, в частности, от практически наиболее существенных связей между контурами и добротностями контуров. При изменении соотношений параметров характер поведения системы может очень существенно изменяться и рекомендации по подбору параметров различны в зависимости от поставленной задачи. Так для внешней механической перестройки частоты генератора СВЧ целесообразно использовать систему трех резонаторов, добротности которых одного порядка [2]. В системах стабилизации частоты добротным резонатором [3] в эквивалентной трехконтурной системе потери во втором (промежуточном) контуре должны быть много выше, чем в третьем (стабилизирующем)

$$\delta_2 \gg \delta_3. \quad (1)$$

В настоящей работе рассматривается стабилизация частоты в трехконтурной автоколебательной системе при выполнении условия (1). В этом

случае вопрос о влиянии потерь в третьем контуре на частотные и амплитудные кривые не требует специального рассмотрения. Анализ возможных режимов стабилизации частоты для практически осуществимых систем может быть проведен при исследовании зависимости частотных кривых от связей между контурами k_1^2 и k_2^2 сопротивления потерь R_2 и характеристического сопротивления ρ_2 второго контура. Общие уравнения амплитудных, частотных кривых и обозначения приведены в [1].

Частотные кривые при изменении связи k_1^2 и сопротивления R_2

В трехконтурной системе рабочей частью частотной кривой в режиме стабилизации частоты является средняя ветвь, проходящая через точку синхронизма. При анализе зависимости частотных кривых от параметров весьма существенна область расстроек парциальных частот, соответствующая средней ветви собственных частот системы. Эту величину назовем областью удержания, так как в ее пределах сохраняются колебания со стабильной частотой. Границы области удержания определяются в общем случае условиями устойчивости. Будем определять эти границы по следующим характерным точкам кривых: по точкам с вертикальными касательными частотных и амплитудных кривых первого типа, частотных кривых второго типа; по точкам с горизонтальными касательными амплитудных кривых второго типа. Для частотных кривых третьего типа может представиться два случая: а) имеются точки с вертикальными касательными, которые определяют границы области удержания, б) точек с вертикальными касательными нет — границы области удержания определяются по точкам с существенным изменением крутизны.

При таком определении области удержания из рассмотрения исключены участки частотной кривой, неустойчивые по признакам общим для всех автоколебательных систем. Более полный анализ устойчивости для трехконтурной системы проводится в настоящее время и может, очевидно, привести к некоторым дополнительным ограничениям области удержания.

В работе [1] приведены выражения для модулей коэффициентов распределения амплитуд в контурах (сокращенно МКР). В автоколебательной системе эти величины определяют по существу отношение энергии в контурах, т. е. энергетическое взаимодействие контуров. Поэтому величины МКР можно использовать при анализе частотных и амплитудных кривых. Так, исследуя зависимость МКР от k_1^2 и R_2 , можно установить, что закон изменения МКР от k_1^2 аналогичен закону изменения МКР от величины, обратной R_2 . Физически это связано с уменьшением критического значения связи k_1^2 , при уменьшении R_2 . В связи с вышесказанным можно рассмотреть характер зависимости частотных кривых только от параметров связи k_1^2 или сопротивления R_2 (рис. 1).

Частотные кривые: a — первого типа (изменение ν_1), b — второго типа (изменение ν_2), β — третьего типа (изменение $\nu_1 = \nu_2$). Величина связи k_1^2 возрастает с номером кривой k_2^2 (фиксированно). Кривые построены для реальных параметров системы СВЧ, однако эти параметры не приводятся, так как основная задача данной работы показать общие закономерности зависимостей частотных и амплитудных кривых от параметров. (Во всех трех рисунках обозначения те же: частотные кривые a соответствует 1-му типу, b — 2-му и β — 3-му).

Для удобства анализа частотных кривых автоколебательной системы с тремя контурами можно провести выделение первой парциальной двухконтурной автоколебательной системы, содержащей первый и второй контуры, или второй парциальной системы, содержащей второй и третий контуры. В обоих случаях рассмотрение поведения системы

ведется при стационарном режиме автоколебаний, когда происходит компенсация затухания системы за счет отрицательного сопротивления δ_0 . В связи с этим в дальнейшем будем пользоваться термином нормальная частота системы для собственных частот как полной, так и парциальных систем.

Рассмотрим кривые первого типа, выделим вторую парциальную систему, состоящую из двух связанных контуров с фиксированной связью $k_2^2 > k_{2\text{крит}}^2$. Ее нормальные частоты

$$\frac{\omega^2 - \nu_3^2}{\omega^2} = k^2 \delta_3^2 \text{ не зависят от } k_2^2 \text{ и } R_2.$$

При этом нормальные частоты второй парциальной системы не зависят от активного сопротивления второго контура, так как второй контур связан с первым контуром и во второй парциальной системе он как бы играет роль генераторного контура. В связи с этим

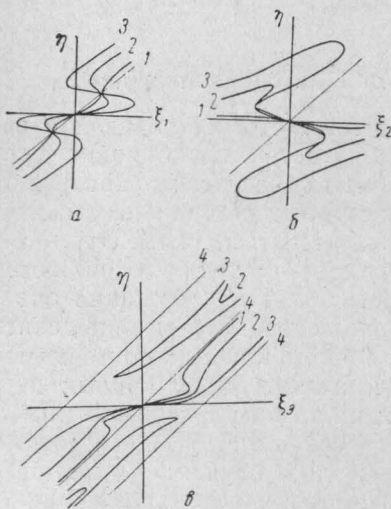


Рис. 1

все кривые имеют две общие точки — точки, в которых парциальная частота первого контура равна одной из нормальных частот второй парциальной системы. Коэффициент стабилизации частоты (для точки синхронизма на средней ветви) равен

$$S_1 = 1 + \frac{k_1^2 (k_2^2 - \delta_3^2)}{(k_2^2 + \delta_2 \delta_3)} = 1 + t_{13}^2 \frac{p_1}{p_3} - t_{12}^2 \frac{p_0}{p_3}. \quad (2)$$

Как видно из формулы (2) и рис. (1, а), при увеличении k_1^2 увеличиваются МКР t_{13} и t_{12} , что приводит к увеличению области удержания, степени затягивания на крайних ветвях нормальных частот и S_1 .

Кривые второго типа (рис. 1, б) удобно исследовать, рассматривая изменения МКР при изменении парциальной частоты второго контура. Вдали от синхронизма парциальных частот t_{12} и t_{13} малы, поэтому нормальная частота системы определяется парциальной частотой первого контура. При приближении к синхронизму t_{12} увеличивается, но t_{13} остается еще малым, поэтому затягивание определяется в основном вторым контуром. По мере дальнейшего приближения к синхронизму значительно возрастает t_{13} , основную роль играет теперь третий контур, и частота системы близка к его парциальной частоте. При увеличении k_1^2 одинаково увеличиваются МКР t_{12} и t_{13} , одинаково увеличивается затягивание и вторым контуром и третьим контуром, поэтому величина области удержания остается постоянной. Вместе с тем степень затягивания на крайних ветвях нормальных частот увеличивается с ростом k_1^2 , так как МКР t_{13} низок, и влияние третьего контура незначительно.

Коэффициент стабилизации для кривых второго типа определяется выражением

$$S_2 = \frac{(k_2^2 + \delta_2 \delta_3) + k_1^2 (k_2^2 - \delta_3^2)}{k_1^2 \delta_3^2} = \frac{1 + t_{13}^2 \frac{\rho_1}{\rho_3}}{t_{13}^2 \frac{\rho_1}{\rho_2}} - 1. \quad (3)$$

Как видно из (3) и рис. 1, б, S_2 практически не зависит от связи, или S_2 уменьшается при увеличении k_1^2 . Это объясняется тем, что при увеличении k_1^2 первый контур сильнее связывается с переставляемым вторым, однако одновременно увеличивается и влияние на первый контур стабилизирующего третьего контура.

Рассмотрим кривые третьего типа. Кривая 1 (рис. 1, в) имеет участки трехзначности, так как величина связи k_2^2 превышает критическое значение. При повышении k_1^2 повышается $k_{2кр}^2$, и участки трехзначности на средней ветви исчезают (кривые 2, 3 рис. 1, в).

Увеличение k_1^2 раздвигает нормальные частоты первой парциальной системы и соответственно увеличивает область удержания, определяемую точками с вертикальными касательными (кривая 1 рис. 1, в) или точками с резким изменением крутизны (кривая 2 рис. 1, в).

Коэффициент стабилизации частоты для кривых этого типа

$$S_3 = 1 + \frac{k_1^2 k_2^2}{(k_2^2 + \delta_2 \delta_3)^2 - k_1^2 \delta_3^2} = 1 + \frac{t_{13}^2 \frac{\rho_1}{\rho_3}}{1 - t_{12}^2 \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (4)$$

также увеличивается при увеличении k_1^2 , что объясняется увеличением МКР t_{13} . (Случай $t_{12} \frac{\rho_1}{\rho_2} \approx 1$ рассматривается ниже.)

Частотные кривые при изменении связи k_2^2

Частотные кривые, рассчитанные при фиксированной связи $k_1^2 > k_{1кр}^2$, приведены на рис. 2 (связь k_2^2 возрастает с номером кривой).

Для анализа кривых первого типа выделим вторую парциальную систему. При увеличении k_2^2 ее нормальные частоты раздвигаются, а эквивалентная добротность уменьшается. Это приводит к уменьшению полосы затягивания на каждой из нормальных частот и увеличению области удержания.

МКР t_{13} при увеличении k_2^2 изменяется немонотонно. При малых связях $k_2^2 t_{13}$ возрастает, при больших — уменьшается. Последнее объясняется падением нагруженной добротности третьего контура. Аналогично может измениться и коэффициент стабилизации частоты S_1 (рис. 2, а и формула (4)).

Крайние ветви нормальных частот кривых всех трех типов практически не зависят от k_2^2 , так как t_{12} для этих ветвей значительно больше t_{13} и не зависит от k_2^2 .

Область удержания кривых 2-го типа (рис. 2, б) увеличивается с ростом k_2^2 , что объясняется теми же причинами, что и для кривых 1-го типа. Для анализа зависимости коэффициента стабилизации ча-

стоты S_2 от k_2^2 рассмотрим формулу (3). При увеличении k_2^2 уменьшение взаимодействия первого контура с перестраиваемым вторым происходит быстрее, чем увеличение взаимодействия с третьим. Поэтому S_2 возрастает при увеличении k_2^2 .

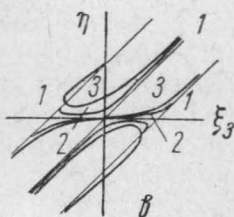
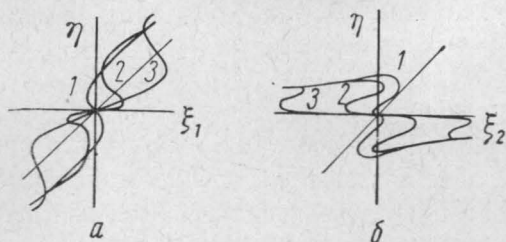


Рис. 2

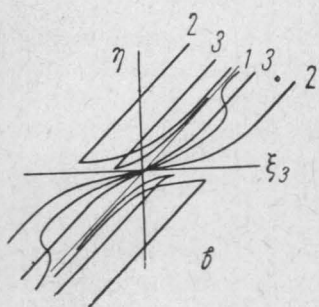
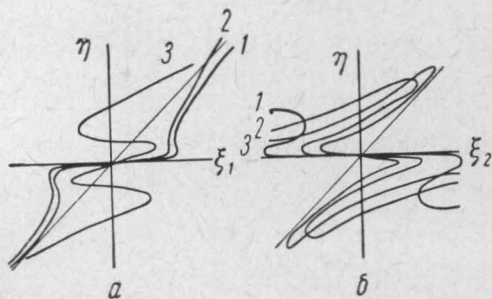


Рис. 3

видно, режим компенсации является одним из наиболее выгодных режимов стабилизации частоты, так как при достаточно большом значении $k_1^2 > k_{1кр}^2$ диапазон расстроек, при которых S_3 велико, может быть практически равен разности нормальных частот первой парциальной системы.

Область удержания кривых 3-го типа (рис. 2, б) определяется по существу интервалом между нормальными частотами первой парциальной системы, т. е. практически не зависит от k_2^2 .

Зависимость коэффициента стабилизации частоты S_3 от k_2^2 немонотонна. Это вызвано частично тем, что имеется заметное падение нагруженной добротности третьего контура при больших k_2^2 . Кроме того, при одновременной перестройке первого и второго контуров возможна компенсация изменения реактивного сопротивления первого контура изменением реактивного сопротивления, вносимого за счет влияния второго контура. При точной компенсации частота колебаний системы совпадает с парциальной частотой первого контура и частотная кривая пересекает ось абсцисс.

Точки точной компенсации определяются условием

$$\xi = \pm \sqrt{k_1^2 - \left(\delta_2 + \frac{k_2^2}{\delta_3} \right)^2}$$

или, что тоже самое, $t_{12}^2 \frac{\rho_1}{\rho_2} = 1$.

При $k_2^2 < \delta_3(k_1 - \delta_2)$ кривые имеют участок средней ветви, пересекающий ось абсцисс в трех точках (кривая 2, рис. 2, б). При обратном условии таких участков не имеется (кривая 3, рис. 2, в).

При выполнении условия $k_2^2 = \delta_3(k_1 - \delta_2)$ $S_3 = \infty$ и частотная кривая касается оси абсцисс в точке синхронизма. Оче-

Частотные кривые при изменении характеристического сопротивления ρ_2

Влияние второго контура на поведение всей системы при стабилизации добротным третьим контуром весьма велико. Влияние изменения R_2 на режимы работы схемы было рассмотрено выше. Величина добротности контура Q_2 одинаково зависит от R_2 и от $\frac{1}{\rho_2}$. Однако влияние активного сопротивления R_2 и характеристического сопротивления ρ_2 оказывает различное влияние на работу системы.

Изменение ρ_2 приводит к одновременному изменению величин δ_2 , k_1^2 , k_2^2 . С увеличением ρ_2 область удержания и коэффициент стабилизации S_1 кривых 1-го типа (рис. 3, а) уменьшаются, но не сильно (ρ_2 возрастает с номером кривой). В рассматриваемом случае, когда средняя ветвь нормальных частот имеет достаточно низкую крутизну, МКР t_{13} (не зависящей от ρ_2) значительно выше МКР t_{13} (зависящего от ρ_2), и последний мало влияет на среднюю ветвь.

Степень затягивания на крайних ветвях нормальных частот при увеличении ρ_2 для кривых всех трех типов естественно увеличивается, поскольку возрастает добротность второго контура, ее определяющая.

Следует подробно остановиться на случае $\rho_2=0$ (кривая 1, рис. 3, а), который соответствует вырождению степени свободы.

При $\rho_2=0$ необходимо положить $L_2=0$, $C_2=\infty$ и заменить реактивную связь между контурами на кондуктивную. Активное сопротивление связи является в этом случае «следом» вырожденного контура. Поведение такой двухконтурной системы вблизи синхронизма должно быть аналогично поведению трехконтурной системы, поскольку реактивное сопротивление, вносимое в первый контур, за счет третьего контура имеет в обеих системах одинаковый знак.

При этих условиях уравнение частот принимает вид

$$\xi_1 = \eta \left(1 + \frac{k^2}{\eta^2 + \delta_3^2} \right),$$

где $k^2 = \frac{R^2}{\rho_1 \rho_3}$, а R — активное сопротивление связи.

Таким образом, при синхронизме не может быть нескольких устойчивых нормальных частот и участков неоднозначности. Средняя ветвь «не закрыта» крайними, появляется «область раскрыва» средней ветви нормальных частот.

При

$$k^2 < 8\delta_3^2 \quad (5)$$

частотная кривая однозначна.

Сопоставляя эти результаты с результатами анализа зависимости частотных кривых трехконтурной системы от R_2 и ρ_2 , можно заключить, что величины R_2 и ρ_2 являются регуляторами области раскрыва. Увеличение ρ_2 или уменьшение R_2 приводит к уменьшению области раскрыва. При достаточно больших ρ_2 и малых R_2 она вообще отсутствует. Наоборот, при малых ρ_2 и больших R_2 она максимальна. При $\rho_2=0$ и выполнении равенства условия (5) область раскрыва равна области удержания.

Рассмотрим кривые 2-го типа (рис. 3, б). С увеличением ρ_2 (ρ_2 увеличивается с номером кривой) область удержания и коэффициент

стабилизации S_2 уменьшаются. Уменьшение последнего связано с увеличением МКР t_{12} (увеличение взаимодействия первого контура с перестраиваемым вторым). Уменьшение области удержания определяется увеличением эквивалентной добротности первой парциальной системы и сближением ее нормальных частот.

Область удержания кривых 3-го типа (рис. 3, в) (по точкам с резким изменением крутизны) изменяется немонотонно, так как немонотонно зависят от ρ_2 нормальные частоты первой парциальной системы.

Зависимость S_3 от ρ_2 также немонотонна, она определяется зависимостью от ρ_2 величины t^2/ρ_2 . Увеличение S_3 происходит за счет приближения к точке компенсации.

Выводы

Анализ зависимостей различных типов частотных кривых от параметров трехконтурной автоколебательной системы в стационарном режиме дает возможность выработать рекомендации по выбору оптимальных режимов стабилизации частоты. В частности, найдены условия «режима компенсации», позволяющие получить высокую стабильность частоты при одновременном уходе парциальных частот первого и второго контура. Показано, что при определенных величинах R_2 и ρ_2 можно получить область раскрыва, почти совпадающую по диапазону расстроек со средней ветвью частотной кривой, что дает возможность автоматического ввода системы в синхронный стабильный режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов О. А., Минакова И. И. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 1, 1966.
2. Карнаух А. И., Пителин А. П. «Вопросы радиоэлектроники», электроника, 5, 1959.
3. Курдюмов О. А. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № I, 1965.

Поступила в редакцию
6. 3 1965 г.

Кафедра
физики колебаний