

Г. Г. БЕРЕЗУЦКИЙ, канд. техн. наук,
А. Л. ЕРОХИН, П. И. ЧЕРЕДНИКОВ, канд. техн. наук

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕБАНИЙ В ИНДУКТИВНОМ ПАРАМЕТРОНЕ

В радиотехнике, автоматике, контрольно-измерительной технике находят широкое применение устройства для различных нелинейных преобразований сигналов. Одним из таких устройств является индуктивный параметрон (рис. 1), который используется

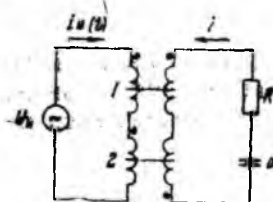


Рис. 1

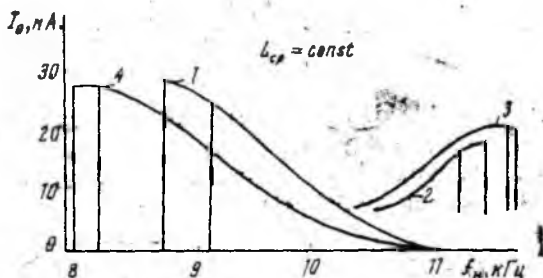


Рис. 2

в качестве маломушящего усилителя малых сигналов, преобразователя спектра сигнала, применяется в устройствах вычислительной техники и т. д. Одним из важнейших параметров индуктивного параметрона, определяющим его пригодность для использования в качестве усилителя малых сигналов, является устойчивость колебаний в его резонансном контуре. Многими авторами, например, в работе [1], рассматривается устойчивость колебаний в параметроне с учетом возможности генерации колебаний параметроном, но пока изучен такой важный вопрос, как влияние внутреннего сопротивления источника накачки на устойчивость колебаний в его резонансном контуре, т. е. влияние источника накачки на шумовые свойства параметрона.

Физические процессы, происходящие в индуктивном параметроне, описываются нелинейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами [2]

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\alpha(t, i) \frac{di}{dt} + \omega^2(t, i) i = 0, \quad (1)$$

где $\alpha(t, i) = \frac{L'(t, i)}{L(t, i)} + \frac{R}{2L(t, i)}$ — функция затухания резонансного контура параметрона;

$$\alpha^2(t, i) = \frac{L''(t, i)}{L(t, i)} + \frac{1}{CL(t, i)}$$
 — функция собственной

частоты резонансного контура параметрона; $L(t, i)$, $L'(t, i)$, $L''(t, i)$ — соответственно динамическая индуктивность и ее первая и вторая производные по времени; R — активное сопротивление потерь в резонансном контуре параметрона; C — емкость резонансного контура параметрона.

Решается это уравнение методом последовательных приближений, который заключается в следующем [2].

На первом этапе ищется решение линейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами в предположении, что в (1) ток $i=0$. Это решение имеет вид

$$i = I_0 e^{-\int_0^t \alpha(t) dt} \sin \left(\int_0^t F(t) dt + \varphi_0 \right) + E, \quad (2)$$

где I_0 — амплитуда начальных колебаний тока в резонансном контуре параметрона; φ_0 — начальная фаза колебаний резонансного контура; E — поправочная функция, в установившемся режиме равная нулю [2];

$$F(t) = \sqrt{\frac{1}{L(t)C} - \frac{RL'(t)}{2L^2(t)} - \frac{R^2}{4L^2(t)}} — \text{мгновенная частота}$$

колебаний в резонансном контуре параметрона.

На втором этапе найденное значение тока i подставляется в выражение для вычисления $L(t, i)$ и ее производных и находится уточненное значение тока i . Такой процесс вычислений продолжается до достижения заданной точности, которая равна

$$\epsilon = \left| \frac{i_{n-1} - i_n}{i_n} \cdot 100\% \right|$$

Запишем динамическую индуктивность резонансного контура параметрона, исходя из законов электромагнитной индукции:

$$L(t, i) = \frac{S\omega^2}{\beta \sqrt{\omega^2 (i_n(t) \pm i)^2 + \delta^2 l^2}}, \quad (3)$$

где S , l — площадь поперечного сечения и длина средней линии сердечников параметрона; ω — количество витков в обмотке

(для простоты математических выкладок положено, что число витков во всех обмотках одинаково); δ, β — аппроксимирующие коэффициенты кривой намагничивания сердечников (аппроксимация произведена при помощи гиперболического синуса [3]); $i_n(t)$ — ток в обмотках накачки параметрона.

Известно, что максимальное усиление колебаний в резонансном контуре параметрона имеет место, если фаза колебаний в нем в конце периода модуляции энергоемкого параметра равна или отлична на угол π от фазы колебаний в начале этого же периода. Из (2) очевидно, что максимальное значение ток i будет

иметь, если функции $e^{-\int_0^t \alpha(t) dt}$ и $\sin\left(\int_0^t F(t) dt + \varphi_0\right)$ будут принимать

максимальные значения по абсолютной величине. В то же время $F(t)$ является функцией динамической индуктивности, которая, в свою очередь, зависит от тока накачки $i_n(t)$. Но форма и амплитуда тока $i_n(t)$ находится в непосредственной зависимости от внутреннего сопротивления источника накачки, т. е. от того, является ли источник накачки генератором тока или генератором напряжения. Учитывая это, устойчивость колебаний в резонансном контуре параметрона удобно рассматривать, сравнивая два крайних случая: питание параметрона от генератора тока и от генератора напряжения.

Фаза колебаний тока в резонансном контуре индуктивного параметрона определяется функцией $\sin\left(\int_0^t F(t) dt + \varphi_0\right)$. Тогда

из (2) следует, что, независимо от того, является ли источник накачки генератором тока или генератором напряжения фазы колебаний тока i , в конце периода модуляции индуктивности будут равны при питании параметрона от любого источника накачки, если равны определенные интегралы от функций $L(\tilde{t}, i)$ в течение периода модуляции индуктивности резонансного контура параметрона (это вытекает из геометрического смысла определенного интеграла). Поэтому для сравнительной оценки устойчивости колебаний рассмотрим влияние собственного тока резонансного контура на кривую модуляции индуктивности $L(t, i)$.

Учитывая, что кривая модуляции индуктивности — функция тока накачки и тока резонансного контура параметрона, а обмотки накачки и резонансная на первом сердечнике включены согласно, на втором — встречно, в выражении (3) для первого сердечника имеем сумму токов, для второго — разность. Тогда получим суммарное значение динамической индуктивности резонансного контура $L(t, i) = L_1(t, i) + L_2(t, i)$, где $L_1(t, i), L_2(t, i)$ — динамические индуктивности первой и второй резонансных обмоток.

Ток накачки при питании параметрона от генератора тока имеет синусоидальную форму, а при питании от генератора на-

пряжения — пикообразную и описывается следующим выражением:

$$i_n(t) = \frac{\delta I}{\omega} \operatorname{sh} \left(\frac{\beta U}{2\omega\omega_n S} \sin \omega_n t \right),$$

где U — амплитудное значение напряжения накачки; ω_n — круговая частота тока накачки.

Очевидно, что если средние за полупериод значения токов накачки равны, то максимальное значение тока накачки индуктивного параметрона, питаемого от генератора напряжения (будет больше максимального значения тока накачки параметрона, питаемого от генератора тока. Следовательно, влияние тока резонансного контура параметрона на кривую модуляции индуктивности будет сильнее в случае, если индуктивный параметрон питать от генератора тока.

Фактически степень влияния тока резонансного контура на $L(t, i)$ характеризует внутреннюю отрицательную обратную связь между контуром накачки и резонансным контуром параметрона, так как изменение динамической индуктивности под воздействием тока накачки приводит к изменению тока резонансного контура который, в свою очередь, воздействуя на $L(t, i)$, приводит к обратному изменению $L(t, i)$ и, естественно, стабилизации колебаний в резонансном контуре параметрона. Величину внутренней обратной связи удобно охарактеризовать коэффициентом устойчивости колебаний в резонансном контуре параметрона

$$k_y = \frac{\Delta \alpha_n}{\Delta I_0}, \quad (4)$$

где $\Delta \alpha_n = e^{-\int_0^{T/2} \alpha_2(t, i) dt} - e^{-\int_0^{T/2} \alpha_1(t, i) dt}$ — приращение интегрального

коэффициента затухания под действием приращения амплитуды тока резонансного контура ΔI_0 ; $\alpha_1(t, i)$, $\alpha_2(t, i)$ — коэффициенты затухания в предыдущем и последующем периодах модуляции индуктивности.

Интегральный коэффициент затухания при определении коэффициента устойчивости целесообразно вычислять в течение первой половины периода модуляции $L(t, i)$, так как усиление колебаний в резонансном контуре происходит именно в течение этого времени (первая производная индуктивности $L(t, i)$ в этот момент времени меньше нуля).

Необходимость вычисления коэффициента устойчивости в виде (4) обусловлена тем, что α_n является функцией динамической индуктивности, которая, в свою очередь, зависит не только от тока накачки, но и от тока резонансного контура параметрона.

Теперь, исходя из того, что степень самостабилизации колебаний нелинейной реактивностью в нелинейном резонансном контуре определяется степенью влияния собственного тока этого

контура на его нелинейную реактивность, можно сделать вывод, что при питании индуктивного параметрона от генератора тока устойчивые колебания в нем будут наблюдаться на большем интервале изменения тока накачки при прочих равных условиях, чем при питании его от генератора напряжения. Но как было отмечено выше, ток накачки в случае питания параметрона от генератора напряжения имеет явно несинусоидальную форму. Поэтому целесообразно для наглядности сравнительной оценки рассматривать резонансные кривые параметрона как функцию от частоты тока накачки, т. е. в одной системе координат (рис. 2).

Границы устойчивости колебаний в резонансном контуре параметрона определяются его резонансной кривой, которая более протяженна вдоль оси изменения частоты тока накачки для случая питания параметрона от генератора тока (рис. 2).

Расчетные резонансные кривые параметронов, питаемых от генератора тока (рис. 2, кривая 1) и от генератора напряжения (кривая 2), подтверждают сделанные выводы. Расчет производился с использованием ЭВМ по методу последовательных приближений для решения нелинейного дифференциального уравнения (1). При этом средние за период модуляции значения динамических индуктивностей L_{cp} были взяты равными для обоих случаев питания параметрона. Для сравнения на рис. 2 приведены экспериментальные резонансные кривые (3—питание от генератора напряжения, 4 — питание от генератора тока). Значения L_{cp} при расчете и эксперименте также взяты равными.

Рассмотрим генерацию шумов параметронами при различных источниках накачки. Очевидно, что если резонансная кривая устойчива при больших изменениях частоты тока накачки, что свидетельствует об устойчивости и при больших изменениях L_{cp} , то любые возмущения $L(t, i)$, обусловленные флюктуациями тока накачки, внешними наводками, температурными воздействиями и т. д., приведут к быстрому затуханию переходного процесса, обусловленного этими возмущающими факторами. В то же время, если область устойчивых колебаний мала, то любое возмущение вызовет приближение рабочей точки параметрона к границе области устойчивости или даже выход за эту границу. При этом в резонансном контуре начнут наблюдаться флюктуации амплитуды колебаний с длительно затухающим переходным процессом (если рабочая точка находится вблизи границы устойчивости) или даже незатухающий процесс произвольных флюктуаций (если рабочая точка вышла за границы устойчивости колебаний). Эти флюктуации амплитуды колебаний и проявляются в виде шумов, генерируемых параметрическим усилителем, делая его непригодным для использования в качестве малозумящего усилителя малых сигналов.

Естественно, что когда возмущающие факторы достаточно малы, а рабочая точка параметрического усилителя имеет высокую стабильность, то и при питании параметрона от генератора

Напряжения можно обеспечить высокое соотношение сигнал-шум в узкой области изменения входного управляющего сигнала. Однако на практике обеспечить высокую стабильность рабочей точки параметрона, питаемого от генератора напряжения, затруднительно, поскольку на ее стабильность влияют не только внешние факторы (стабильность генератора накачки, температура окружающей среды, внешние электромагнитные наводки и т. д.), но и коэффициент внутренней отрицательной обратной связи параметрона, который у параметрона, питаемого от генератора тока, намного выше, чем у параметрона, питаемого от генератора напряжения.

Результаты вычислений коэффициента устойчивости, характеризующего величину внутренней отрицательной обратной связи параметрона, показывают, что для параметрона, работающего во 2-й зоне неустойчивости и питаемого от генератора напряжения $K_y=9,7$ а для параметрона, питаемого от генератора тока, $K_y=45,1$.

В реальных условиях получить идеальный генератор тока или генератор напряжения невозможно, поэтому устойчивость колебаний, а следовательно, и уровень собственных шумов параметрического усилителя в большой степени определяются близостью генератора накачки к генератору тока. Эту близость легко оценить при помощи коэффициента устойчивости K_y .

Сделанный вывод представляет большой практический интерес, так как позволяет дать рекомендации по выбору источника накачки индуктивного параметрона при использовании последнего в качестве малошумящего усилителя малых сигналов.

Для иллюстрации флюктуаций колебаний, возникающих в параметроне, на рис. 3 приведена осциллограмма напряжения на

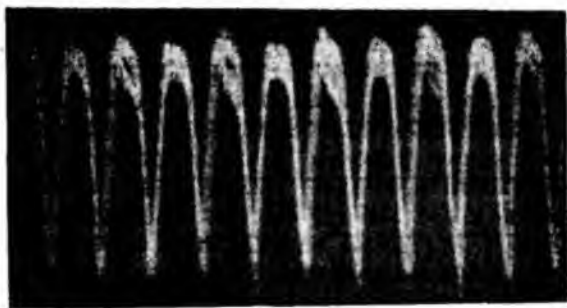


Рис. 3

резонансном контуре параметрона, питаемого от генератора напряжения и работающего вблизи границы устойчивости.

Кривые, приведенные на рисунках, соответствуют индуктивному параметрону, имеющему следующие конструктивные характеристики: число витков в обмотках накачки и резонансных — 30; емкость конденсатора $C=0,2$ мкФ; эквивалентное сопротив-

ление потерь в контуре $R=2$ Ом; сердечники параметрона из феррита марки 1500 НМ, типоразмер сердечников $K7 \times 4 \times 2$.

Показано, что устойчивость колебаний в резонансном контуре индуктивного параметрона наиболее высокая, если источником накачки параметрона является генератор тока. Сделан вывод, что при использовании индуктивного параметрона в качестве малошумящего усилителя его целесообразно питать от генератора тока.

Следует также отметить, что с учетом дуальности индуктивного и емкостного параметронов полученные результаты можно распространить и на емкостные параметроны. При этом, очевидно, что для получения максимальной устойчивости колебаний емкостной параметрон необходимо питать от генератора напряжения.

Список литературы: 1. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. М., 1968. 432 с. 2. Березуцкий Г. Г., Чередников П. И. Об устойчивости и стабильности параметрических колебаний. Х., 1984. 37 с. Деп. в УкрНИИТИ 17.04.84. № 696. 3. Бессонов Л. А. Нелинейные электрические цепи. М., 1977. 343 с.

Поступила в редколлегию 16.12.88