

ОБ ОДНОЙ СХЕМЕ СУММИРОВАНИЯ ЧАСТОТ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРИОДАХ

Л. П. ОЛОМУЦКИЙ, М. С. РОЙТМАН

(Представлено Томской городской научно-технической конференцией,
посвященной 90-летию со дня рождения В. И. Ленина)

Схему суммирования частот легко свести к схемам „чистого“ перемножения синусоидальных функций. В самом деле,

$$\begin{aligned} u &= A \sin(\omega_1 + \omega_2)t = u_1 + u_2 = \\ &= A \sin \omega_1 t \cos \omega_2 t + A \cos \omega_1 t \cdot \sin \omega_2 t. \end{aligned} \quad (1)$$

Создание схем, обеспечивающих чистое перемножение синусоидальных функций, сводится к вопросу создания управляемых сопротивлений, проводимость которых изменяется по синусоидальному закону.

На рис. 1 дана скелетная схема „чистого“ перемножения синусоидальных функций. Здесь R —управляемое сопротивление, проводимость которого изменяется по синусоидальному закону с частотой ω_2 , r —сопротивление нагрузки, $B(t)$ —управляющий фактор и $A \sin \omega_1 t$ —входное напряжение, в дальнейшем именуемое сигналом.

Рассмотрим условия, при которых возможно осуществление „чистого“ перемножения синусоидальных функций.

1. Проводимость управляющего элемента должна линейно зависеть от величины управляющего фактора $Y = cB(t)$, где $B(t)$ —управляющий фактор (напряжение, ток, напряженность электрического или магнитного поля). В этом случае изменение фактора по любому закону приведет к изменению проводимости по тому же закону.

Следует оговорить, что в общем случае, условие (1) для „чистого“ перемножения синусоидальных функций необязательно. Но при этом для изменения проводимости по синусоидальному закону управляющий фактор должен меняться по другому, более сложному закону, техническая реализация которого значительно сложнее.

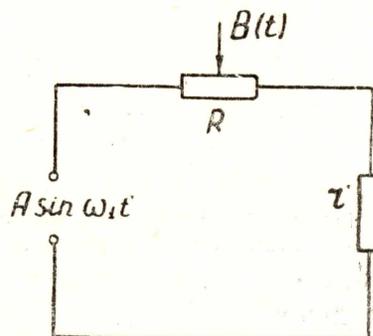


Рис. 1.

2. Величина управляемого сопротивления должна зависеть только от управляющего фактора, т. е. необходимо, чтобы сопротивление было линейным.

3. Управляющая цепь и цепь сигнала не должны быть гальванически связаны, или эта связь должна быть минимальной. Очевидно, что прямое прохождение управляющего тока в случае, когда имеется гальваническая связь, приведет к нарушению „чистого“ перемножения функций.

4. Проводимость цепи для сигнала должна быть симметричной. Наличие несимметрии приведет к появлению дополнительного спектра частот.

5. Отношение величины сопротивления нагрузки к величине управляемого сопротивления α должно быть меньше 1.

Напряжение на нагрузке при выполнении условий (1)–(4) равно

$$u = \frac{\alpha A \cos \omega_2 t \cdot \sin \omega_1 t}{1 + \alpha \cos \omega t_2}, \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{r}{R}, \quad R = \frac{1}{cB(t)}.$$

При $\alpha \ll 1$ получим

$$u = \alpha A \cos \omega_2 t \cdot \sin \omega_1 t,$$

т. е. имеем чистое перемножение синусоидальных функций.

В качестве управляемого сопротивления могут быть применены полупроводниковые триоды в обратном включении. Схема перемножения синусоидальных функций с использованием в качестве управляемого сопротивления полупроводниковых триодов изображена на рис. 2.

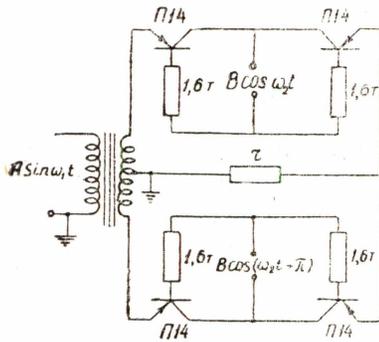


Рис. 2.

Рассмотрим выполнение условий „чистого“ перемножения синусоидальных функций применительно к данному управляемому сопротивлению.

На рис. 3 приведена зависимость проводимости управляемого элемента от управляющего тока. Из рисунка видно,

что зависимость проводимости от управляющего тока близка к линейной. Методом 5 ординат можно оценить нелинейные искажения из-за влияния нелинейности управляемого элемента. Из того же рис. 3 следует, что проводимость управляющего элемента от сигнального напряжения почти не зависит.

Для проверки третьего условия была снята зависимость напряжения на нагрузке от величины управляющего фактора при разных температурах окружающей среды (рис. 4). Графики показывают, что связь управляющей и сигнальной цепей достаточно мала.

Если проводимость цепи для напряжения сигнала симметрична, то в цепи должна отсутствовать постоянная составляющая тока и все четные гармоники. При этом интегрирующий прибор (например, прибор магнитоэлектрической системы) не должен давать показаний. На рис. 5 приведена зависимость $u_{гр} = f(u_c)$ для частот $f_1 = 30$ гц и $f_2 = 250$ гц, подтверждающая хорошую линейность цепи в рабочей области.

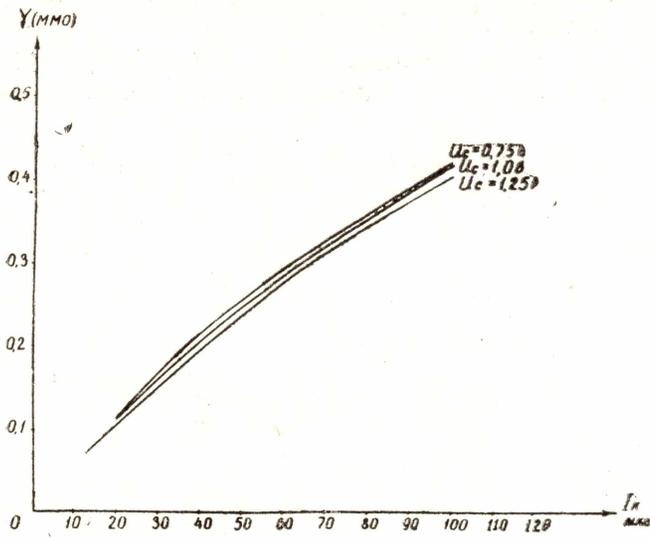


Рис. 3.

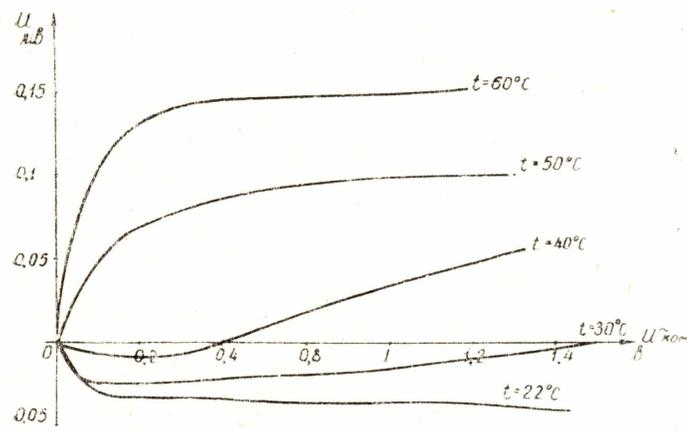


Рис. 4.

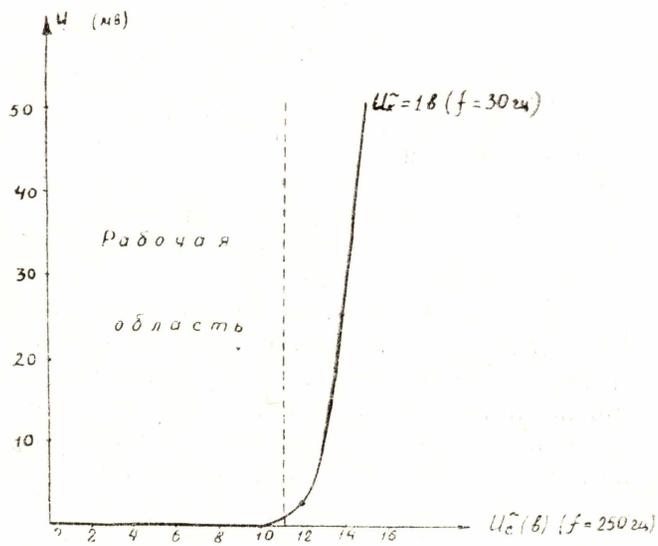


Рис. 5.

Выполнение пятого условия легко обеспечить, выбирая достаточно малое сопротивление нагрузки.

Скелетная схема для суммирования частот приведена на рис. 6. Напряжение на выходе суммирующего каскада, согласно (2), равно

$$u = \frac{\alpha A \cos \omega_2 t \cdot \sin \omega_1 t}{1 + \alpha \cos \omega_2 t} + \frac{\alpha A \sin \omega_2 t \cos \omega_1 t}{1 + \alpha \sin \omega_2 t} \quad (3)$$

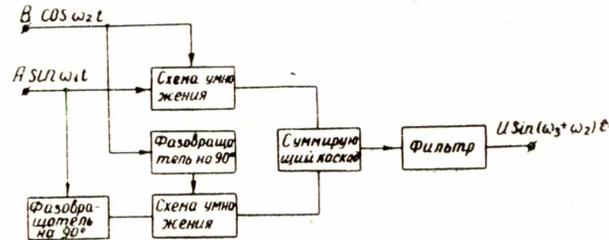


Рис. 6

Разлагая знаменатели (3) в ряд по формуле Ньютона и ограничиваясь двумя членами, имеем:

$$u = \alpha A \cos \omega_2 t \sin \omega_1 t (1 - \alpha \cos \omega_2 t) + \alpha A \sin \omega_2 t \cos \omega_1 t \cdot (1 - \alpha \sin \omega_2 t) = \alpha A \sin(\omega_1 + \omega_2)t + \frac{\alpha^2 A}{4} \left[\cos(2\omega_2 - \omega_1)t + \sin(2\omega_2 - \omega_1)t + \cos(2\omega_2 + \omega_1)t - \sin(2\omega_2 + \omega_1)t - 2 \cos \omega_1 t - 2 \sin \omega_1 t \right] \quad (4)$$

Из (4) следует, что необходимо выбирать частоту управляющей цепи намного выше частоты сигнального напряжения; при этом паразитные частоты на выходе будут разнесены с полезной частотой $\omega_1 + \omega_2$ и их легко отфильтровать. Для уменьшения амплитуд паразитных частот необходимо выбирать α достаточно малым.

Проведенные испытания схемы суммирования показали, что даже без применения фильтра напряжение полезной частоты на 30 дБ превышает напряжение паразитных частот. С использованием фильтра результаты резко улучшаются.

Следует подчеркнуть, что весьма большим достоинством описанной схемы является очень малое прохождение управляющего напряжения. Невыполнение условий 1, 2, 4 и 5 приводит к появлению спектра частот на нагрузке. Но даже в этом случае, при условии что частоты ω_1 и ω_2 значительно отличаются друг от друга (что почти всегда и бывает), комбинационные частоты значительно разнесены от полезного сигнала и сигнал легко выделить с помощью полосового фильтра.

В случае невыполнения условия 3 даже при идеальном выполнении условий 1, 2, 4 и 5 выделение полезного сигнала крайне затруднено, так как частота полезного сигнала весьма близка к частоте управляющего тока.