ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Выпуск I3 Серия общетехническая 1967

УДК 621.391.I45

В.К. Железняк

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В СИСТЕМЕ ЗАПИСЬ-ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ АМПЛИТУДНОЙ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЙ

Рассматривается прохождение сложного сигнала в системе запись-воспроизведение при учете нелинейности системы и наличия паразитных амплитудной модуляции (АМ) и частотной модуляции (ЧМ).

Получены выражения для спектров в общем виде и для частных случаев модуляции по амплитуде и частоте одним гармоническим сигналом.

Рассматриваются процессы при прохождении через систему записи-воспроизведения сигнала вида:

$$U=U_0+U_{m1}\sin\omega_1 t+U_{m2}\sin\omega_2 t \qquad (I)$$

с учетом воздействия на него паразитных АМ и ЧМ. Частотная характеристика тракта принимается равномерной, так как влияние на прохождение сигнала (I) можно представить при помощи коэффициента $k(\omega)$, учитывающего ее неравномерность. Однако для упрощения расчетов в данной работе это обстоятельство не принимается во внимание.

Причины возникновения паразитных АМ и ЧМ не рассматриваются, так как они общеизвестны.

В системе запись-воспроизведение сигналов возникают нелинейные искажения, которые можно оценить с помощью следующего полинома с нечетными степенями:

$$U_{вых}=a_1 U_{вх} - a_3 U_{вх}^3 + a_5 U_{вх}^5 , \qquad (2)$$

где $U_{вх}$, $U_{вых}$ - напряжения на входе и выходе системы;

a_1, a_3, a_5 - коэффициенты полинома.

Коэффициенты при четных членах полинома для упрощения расчетов принимаем равными нулю. Это допущение полностью оправдано для системы магнитной записи-воспроизведения сигнала.

В выражении (I) полагаем, что ω_1 и ω_3 - произвольные частоты; U_{m1}, U_{m2} - произвольные амплитуды; U_0 - некоторая постоянная величина. Пусть амплитуда каждой составляющей будет функцией времени $g(t)$. Тогда выражение (I) может быть представлено в виде:

$$U_{вх} = U_0 [1+mg(t)] + U_{m1} [1+m_1 g(t)] \sin \omega_1 t + U_{m2} [1+m_2 g(t)] \sin\omega_2 t, \qquad (3)$$

где m, m_1, m_2 - коэффициенты, характеризующие величину модуляции амплитуды.

Результаты, полученные из выражений (2) и (3), сведены в табл. I.

Рассмотрим случай, когда простейший гармонический сигнал вида

$$U=U_m \sin\omega t \qquad (4)$$

промодулирован по амплитуде управляющим гармоническим сигналом.

Амплитудно-модулированное колебание, представленное выражением

$$U=U_m(1+m\cos\Omega t)\sin\omega t, \qquad (5)$$

промодулируем по частоте Ω_1. Получим:

$$U=U_m [1+m\cos(\Omega t+\beta\cos\Omega_1 t)] \sin(\omega t+\beta\cos\Omega_1 t). \qquad (6)$$

Результат, полученный в табл. I, представим аналогично выражению (6).

В общем случае функция $g(t)$ имеет случайный характер. Полагаем, что функция $g(t)$, определяющая закон изменения огибающей при АМ, детерминирована равенством

$$g(t)=\cos(\Omega t+\varphi_0),^{*} \qquad (7)$$

где Ω - частота управляющего сигнала.

*Считаем, что начальная фаза $\varphi_0=0$.

Таблица 1

Выходной сигнал, промодулированный по амплитуде

Огибающая амплитудно-модулированных сигналов	Примечание
$a_1[1+mg(t)]U_0-a_3\{[1+3mg(t)+3m^2g^2(t)+m^3g^3(t)]U_0^3+$ $+\frac{3}{2}[1+(m+2m_1)g(t)+(2mm_1+m_1^2)g^2(t)+mm_1^2g^3(t)]U_0U_{m1}^2+$ $+\frac{3}{2}[1+(m+2m_2)g(t)+(2mm_2+m_2^2)g^2(t)+mm_2^2g^3(t)]U_0U_{m2}^2\}+$ $+a_5\{[1+5mg(t)+10m^2g^2(t)+10m^3g^3(t)+5m^4g^4(t)+$ $+m^5g^5(t)]U_0^5+5[1+(3m+2m_1)g(t)+(3m^2+6mm_1+m_1^2)g^2(t)+$ $+(6m^2m_1+m^3+3mm_1^2)g^3(t)]U_0^3U_{m1}^2+5[1+(3m+2m_2)g(t)+$ $+(3m^2+6mm_2+m_2^2)g^2(t)+(6m^2m_2+m^3+3mm_2^2)g^3(t)]U_0^3U_{m2}^2+$ $+\frac{15}{8}[1+(m+4m_1)g(t)+(4mm_1+6m_1^2)g^2(t)+(6mm_1^2+4m_1^3)g^3(t)+$ $+(4mm_1^3+m_1^4)g^4(t)+mm_1^4g^5(t)]U_0U_{m1}^4+\frac{15}{8}[1+(m+4m_2)g(t)+$ $+(4mm_2+6m_2^2)g^2(t)+(6mm_2^2+4m_2^3)g^3(t)+(4mm_2^3+m_2^4)g^4(t)+$ $+mm_2^4g^5(t)]U_0U_{m2}^4+\frac{15}{2}[1+(m+2m_1+2m_2)g(t)+$ $+(2mm_1+2mm_2+4m_1m_2+m_1^2+m_2^2)g^2(t)+(2m_1m_2^2+2m_1^2m_2+m_1^2m+$ $+m_2^2m+4mm_1m_2)g^3(t)+(m_1^2m_2^2+2mm_1m_2^2+2mm_1^2m_2)g^4(t)+$ $+mm_1^2m_2^2g^5(t)]U_0U_{m1}^2U_{m2}^2\}$	Постоянная составляющая
$a_1[1+m_1g(t)]U_{m1}-3a_3\{[1+(2m+m_1)g(t)+(m^2+2mm_1)g^2(t)+$ $+m^2m_1g^3(t)]U_{m1}U_0^2+\frac{1}{4}[1+3m_1g(t)+3m_1^2g^2(t)+m_1^3g^3(t)]U_{m1}^3+$ $+\frac{1}{2}[1+(2m_2+m_1)g(t)+(m_2^2+2m_2m_1)g^2(t)+m_2^2m_1g^3(t)]U_{m1}U_{m2}^2\}+$ $+5a_5\{[1+(4m+m_1)g(t)+(6m^2+4mm_1)g^2(t)+(4m^3+6m^2m_1)\times$ $\times g^3(t)+(m^4+4m^3m_1)g^4(t)+m^4m_1g^5(t)]U_{m1}U_0^4+$ $+\frac{3}{2}[1+(2m+3m_1)g(t)+(3m_1^2+6mm_1+m^2)g^2(t)+$ $+(6mm_1^2+m_1^3+3m^2m_1)g^3(t)+(2mm_1^3+3m^2m_1^2)g^4(t)+$	$\sin\omega_1 t$

Продолжение табл. 1

Огибающая амплитудно-модулированных сигналов	Примечание
$+m^2 m_1^3 g^5(t)]U_{m1}^3 U_0^2+\frac{1}{8}[1+5m_1 g(t)+10m_1^2 g^2(t)+10m_1^3 g^3(t)+$ $+5m_1^4 g^4(t)+m_1^5 g^5(t)]U_{m1}^5+3[1+(2m+m_1+2m_2)g(t)+$ $+(m^2+m_2^2+4mm_2+2mm_1+2m_1 m_2)g^2(t)+$ $+(2mm_2^2+2m^2 m_2+m_1 m_2^2+m^2 m_1+4mm_1 m_2)g^3(t)+$ $+(m^2 m_2^2+2mm_1 m_2^2+2m^2 m_1 m_2)g^4(t)+m^2 m_1 m_2^2 g^5(t)]U_{m1} U_0^2 U_{m2}^2+$ $+\frac{3}{4}[1+(3m_1+2m_2)g(t)+(3m_1^2+6m_1 m_2+m_2^2)g^2(t)+$ $+(6m_1^2 m_2+m_1^3+3m_1 m_2^2)g^3(t)+(2m_1^3 m_2+3m_1^2 m_2^2)g^4(t)+$ $+m_1^3 m_2^2 g^5(t)]U_{m1}^3 U_{m2}^2+\frac{3}{8}[1+(m_1+4m_2)g(t)+(4m_1 m_2+6m_2^2)g^2(t)+$ $+(6m_1 m_2^2+4m_2^3)g^3(t)+(4m_1 m_2^3+m_2^4)g^4(t)+m_1 m_2^4 g^5(t)]U_{m1} U_{m2}^4\}$	$\sin\omega_1 t$
$a_1 kU_{m2}-3a_3\{k_1 U_{m2} U_0^2+k_3 U_{m2}^3+k_4 U_{m1}^2 U_{m2}\}+5a_5\{k_5 U_{m2} U_0^4+k_6 U_{m2}^5+$ $+k_7 U_0^2 U_{m1}^2 U_{m2}+k_8 U_{m1}^2 U_{m2}^3+k_9 U_{m1}^4 U_{m2}\}$	$\sin\omega_2 t$
$\frac{3}{2}a_3[1+(2m_1+m)g(t)+(m_1^2+2m_1 m)g^2(t)+m_1^2 mg^3(t)]U_{m1}^2 U_0-$ $-5a_5\{[1+(2m_1+3m)g(t)+(3m^2+6mm_1+m_1^2)g^2(t)+$ $+(6m_1 m^2+m^3+3m_1^2 m)g^3(t)+(2m_1 m^3+3m^2 m_1^2)g^4(t)+$ $+m_1^2 m^3 g^5(t)]U_0^3 U_{m1}^2+\frac{1}{2}[1+(4m_1+m)g(t)+(6m_1^2+4m_1 m)g^2(t)+$ $+(4m_1^3+6m_1^2 m)g^3(t)+(m_1^4+4m_1^3 m)g^4(t)+m_1^4 mg^5(t)]U_0 U_{m1}^4+$ $+\frac{3}{2}[1+(2m_1+2m_2+m)g(t)+(m_1^2+m_2^2+4m_1 m_2+2m_1 m+2m_2 m)g^2(t)+$ $+(2m_1 m_2^2+2m_2^2 m_1+m_2^2 m+m_1^2 m+4mm_1 m_2)g^3(t)+$ $+(m_1^2 m_2^2+2m_1 m_2^2 m+2m_1^2 m_2 m)g^4(t)+m_1^2 m_2^2 mg^5(t)]U_0 U_{m1}^2 U_{m2}^2\}$	$\cos 2\omega_1 t$

Продолжение табл. 1

Огибающая амплитудно-модулированных сигналов	Примечание
$\frac{3}{2}a_3 k_{10}U_{m2}^2 U_0 - 5a_5 \left(k_{11}U_0^3 U_{m2}^2 + k_{12}U_0 U_{m2}^4 + k_{13}U_0 U_{m1}^2 U_{m2}^2\right)$	$\cos 2\omega_2 t$
$\frac{1}{4}a_3 [1+3m_1 g(t)+3m_1^2 g^2(t)+m_1^3 g^3(t)] U_{m1}^3 - 5a_5 \{\frac{1}{2}[1+(2m+3m_1)g(t)+$ $+(3m_1^2+6mm_1+m^2)g^2(t)+(6mm_1^2+m_1^3+3m^2 m_1)g^3(t)+$ $+(2mm_1^3+3m^2 m_1^2)g^4(t)+m^2 m_1^3 g^5(t)] U_0^2 U_{m1}^3 + \frac{1}{4}[1+(2m_2+3m_1)g(t)+$ $+(3m_1^2+6mm_1+m^2)g^2(t)+(6mm_1^2+m_1^3+3m^2 m_1)g^3(t)+$ $+(2mm_1^3+3m^2 m_1^2)g^4(t)+$ $+m^2 m_1^3 g^5(t)] U_{m1}^3 U_{m2}^2 + \frac{1}{16}[1+5m_1 g(t)+$ $+10m_1^2 g^2(t)+10m_1^3 g^3(t)+$ $+5m_1^4 g^4(t)+m_1^5 g^5(t)] U_{m1}^5\}$	$\sin 3\omega_1 t$
$\frac{1}{4}a_3 k_{14}U_{m2}^3 - 5a_5 [k_{15}U_0^2 U_{m2}^3 + k_{16}U_{m1}^2 U_{m2}^3 + k_{17}U_{m2}^5]$	$\sin 3\omega_2 t$
$\frac{5}{8}a_5 [1+(4m_1+m)g(t)+(6m_1^2+4m_1 m)g^2(t)+(4m_1^3+6m_1^2 m)g^3(t)+$ $+(m_2^4+4m_2^3 m)g^4(t)+m_2^4 m g^5(t)] U_0 U_{m1}^4$	$\cos 4\omega_1 t$

Продолжение табл. 1

Огибающая амплитудно-модулированных сигналов	Примечание
$\frac{5}{8}a_5 k_{18} U_0 U_{m2}^4$	$\cos 4\omega_2 t$
$\frac{1}{16} a_5 [1+5m_1 g(t)+10m_1^2 g^2(t)+10m_1^3 g^3(t)+$ $+5m_1^4 g^4(t)+m_1^5 g^5(t)] U_{m1}^5$	$\sin 5\omega_1 t$
$\frac{1}{16} a_5 k_{19} U_{m2}^5$	$\sin 5\omega_2 t$
$-3a_3 [1+(m+m_1 m_2)g(t)+(mm_1+mm_2+m_1 m_2)g^2(t)+$ $+mm_1 m_2 g^3(t)] U_0 U_{m1} U_{m2} +5a_5 \{2[1+(3m+m_1+m_2)g(t)+$ $+(3m^2+3mm_1+3mm_2+m_1 m_2)g^2(t)+(m^3+3m^2 m_1+3m^2 m_2+$ $+3mm_1 m_2)g^3(t)+(m^3 m_1+m^3 m_2+3m^2 m_1 m_2)g^4(t)+$ $+m^3 m_1 m_2 g^5(t)] U_0^3 U_{m1} U_{m2} +\frac{3}{2}[1+(m+2m_1+2m_2)g(t)+$ $+(m_1^2+4m_1 m_2+m_2^2+2mm_1+2mm_2)g^2(t)+(2m_1^2 m_2+2m_1 m_2^2+m_1^2 m+m_2^2 m+$ $+4mm_1 m_2)g^3(t)+(m_1^2 m_2^2+2m_1^2 m_2 m+2m_1 m_2^2 m)g^4(t)+$ $+m_1^2 m_2^2 mg^5(t)] U_0 U_{m1}^2 U_{m2}^2 \}$	$\cos(\omega_1-\omega_2)t-$ $-\cos(\omega_1+\omega_2)t$
$-\frac{3}{4}a_3 [1+(2m_1+m_2)g(t)+(m_1^2+2m_1 m_2)g^2(t)+m_1^2 m_2 g^3(t)] U_{m1}^2 U_{m2}+$ $+5a_5 \{\frac{3}{2}[1+(2m+2m_1+m_2)g(t)+(m^2+4mm_1+m_1^2+2mm_2+$ $+2m_1 m_2)g^2(t)+(2m^2 m_1+2mm_1^2+m^2 m_2+4mm_1 m_2+m_1 m^2)g^3(t)+$ $+(m^2 m_1^2+2m^2 m_1 m_2+2mm_1^2 m_2)g^4(t)+m^2 m_1^2 m_2 g^5(t)] U_0^2 U_{m1}^2 U_{m2}+$ $+\frac{1}{4}[1+(4m_1 m_2)g(t)+(6m_1^2+4m_1 m_2)g^2(t)+(4m_1^3+6m_1^2 m_2)g^3(t)+$	$\sin(\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+2\omega_1)t$

Продолжение табл. 1

Огибающая амплитудно-модулированных сигналов	Примечание
$+(m_1^4+4m_1^3m_2)g^4(t)+m_1^4m_2g^5(t)]U_{m1}^4U_{m2}+\frac{3}{8}[1+(2m_1+3m_2)g(t)+$ $+(3m_2^2+6m_1m_2+m_1^2)g^2(t)+(6m_1m_2^2+m_2^3+3m_1^2m_2)g^3(t)+$ $+(2m_1m_2^3+3m_1^2m_2^2)g^4(t)+m_1^2m_2^3g^5(t)]U_{m1}^2U_{m2}^3\}$	$\sin(\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+2\omega_1)t$
$-\frac{3}{4}a_3k_{20}U_{m2}^2U_{m1}+5a_5\{k_{21}U_0^2U_{m2}^2U_{m1}+k_{22}U_{m2}^4U_{m1}+k_{23}U_{m2}^2U_{m1}^3\}$	$\sin(\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\sin(\omega_1+2\omega_2)t$
$-\frac{15}{4}a_5[1+(m+2m_1+2m_2)g(t)+(m_1^2+4m_1m_2+m_2^2+2m_1m+2m_2m)g^2(t)+$ $+(2m_1^2m_2+2mm_2^2+m_1^2m+4mm_1m_2+m_2^2m)g^3(t)+(m_1^2m_2^2+2m_1^2m_2m+$ $+m_1m_2^2m)g^4(t)+m_1^2m_2^2mg^5(t)]U_0U_{m1}^2U_{m2}^2$	$\cos(2\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\cos(2\omega_1+2\omega_2)t$
$+\frac{5}{8}a_5[1+(2m_2+3m_1)g(t)+(3m_1^2+6m_1m_2+m_2^2)g^2(t)+(6m_1^2m+m_1^3+$ $+3m_1m_2^2)g^3(t)+(2m_1^3m_2+3m_1^2m_2^2)g^4(t)+m_1^3m_2^2g^5(t)]U_{m1}^3U_{m2}^2$	$\sin(3\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\sin(3\omega_1+2\omega_2)t$
$\frac{5}{16}a_5[1+(4m_1+m_2)g(t)+(6m_1^2+4m_1m_2)g^2(t)+$ $+(4m_1^3+6m_1^2m_2)g^3(t)+(m_1^4+4m_1^3m_2)g^4(t)+m_1^4m_2g^5(t)]U_{m1}^4U_{m2}$	$\sin(\omega_2-4\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+4\omega_1)t$
$-\frac{5}{2}a_5[1+(m+m_1+3m_2)g(t)+(3m_2^2+3mm_2+3m_2m_1+mm_1)g^2(t)+$ $+(m_2^3+3m_2^2m+3m_2^2m_1+3mm_1m_2)g^3(t)+(3m_2^3m+3m_2^3m_1+3m_2^2mm_1)g^4(t)+$ $+m_2^3mm_1g^5(t)]U_0U_{m1}U_{m2}^3$	$\cos(3\omega_2-\omega_1)t-$ $-\cos(3\omega_2+\omega_1)t$
$\frac{5}{8}a_5[1+(2m_1+3m_2)g(t)+(3m_2^2+6m_1m_2+m_1^2)g^2(t)+(6m_2^2m+m_2^3+$ $+3m_2m_1^2)g^3(t)+(2m_2^3m_1+3m_2^2m_1^2)g^4(t)+m_2^3m_1^2g^5(t)]U_{m1}^2U_{m2}^3$	$\sin(3\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+4\omega_1)t$
$\frac{5}{16}a_5[1+(4m_2+m_1)g(t)+(6m_2^2+4m_1m_2)g^2(t)+$ $(4m_2^3+6m_2^2m_1)g^3(t)+(m_2^4+4m_2^3m_1)g^4(t)+m_2^4m_1g^5(t)]U_{m1}U_{m2}^4$	$\sin(\omega_1-4\omega_2)t+$ $+\sin(\omega_1+4\omega_2)t$

В табл. I приняты следующие обозначения: через $k \div k_9$ соответственно выражения в скобках при U_{m1}, $U_{m1} U_0^2$ ... с соответствующей заменой индекса 1 на 2 при m; $k_{10} \div k_{13}$ – при $U_{m1}^2 U_0$, $U_0^3 U_{m1}^2$ ...; $k_{14} \div k_{17}$ – при U_{m1}^3, $U_0^2 U_{m2}^3$ ...; k_{18} – при $U_0 U_{m1}^4$; k_{19} – при U_{m1}^5; $k_{20} \div k_{23}$ – при $U_{m1}^2 U_{m2}$; $U_0^2 U_{m1}^2 U_{m2}$ ....

Для функции g(t), основных частот ω_1 и ω_2, их гармоник и комбинационных составляющих, модулированных частотой Ω_1, составим табл. 2 и 3.

Таблица 2

Функция g(t), модулированная частотой

$g(t)$	$\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(\beta)\cos[(\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1]$
$g^2(t)$	$\frac{1}{2}\left\{1 + \sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(2\beta)\cos[(2\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1]\right\}$
$g^3(t)$	$\frac{1}{4}\left\{\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(3\beta)\cos[(3\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1] + 3\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(\beta)\cos[(\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1]\right\}$
$g^4(t)$	$\left\{\frac{3}{4} + \frac{1}{2}\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(2\beta)\cos[(2\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1] + \frac{1}{8}\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(4\beta)\cos[(4\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1]\right\}$
$g^5(t)$	$\frac{1}{8}\left\{5\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(\beta)\cos[(\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1] + \frac{5}{2}\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(3\beta)\cos[(3\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1] + \frac{1}{2}\sum\limits_{r=-\infty}^{\infty} I_r(5\beta)\cos[(5\Omega + r\Omega_1)t + r\varphi_1]\right\}$

где r – независимые порядковые номера;

$I_{-r} = -I_r$ при нечетном r;

$I_{-r} = I_r$ при четном r;

$$\beta=\frac{\Omega U_m}{\Omega_1 U_0};\quad 2\beta=\frac{2\Omega\, U_m}{\Omega_1 U_0};\quad 3\beta=\frac{3\Omega\, U_m}{\Omega_1 U_0};\quad 4\beta=\frac{4\Omega\, U_m}{\Omega_1 U_0};\quad 5\beta=\frac{5\Omega\, U_m}{\Omega_1 U_0};\quad [4],$$

где β - индекс частотной модуляции;

$\frac{U_m}{U_0}$ - характеризует величину девиации;

Ω_1 - частота модуляции;

$\Omega\cdot\frac{U_m}{U_0}$ - величина девиации частоты.

Таблица 3

Сигналы основных частот ω_1, ω_2, их гармоник и комбинационных составляющих, модулированные частотой Ω_1.

Немодулированные сигналы	Модулированные сигналы
$\sin\omega_1 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(\beta)\sin[(\omega_1+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\sin\omega_2 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(\beta)\sin[(\omega_2+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\cos 2\omega_1 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(2\beta)\cos[(2\omega_1+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\cos 2\omega_2 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(2\beta)\cos[(2\omega_2+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\sin 3\omega_1 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(3\beta)\sin[(3\omega_1+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\sin 3\omega_2 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(3\beta)\sin[(3\omega_2+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\cos 4\omega_1 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(4\beta)\cos[(4\omega_1+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\cos 4\omega_2 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(4\beta)\cos[(4\omega_2+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\sin 5\omega_1 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(5\beta)\sin[(5\omega_1+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$\sin 5\omega_2 t$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} I_n(5\beta)\sin[(5\omega_1+n\Omega_1)t+n\varphi_1]$
$[\cos(\omega_1-\omega_2)t-$ $-\cos(\omega_1+\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(\beta)I_k(\beta)\{\cos[(\omega_1-\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]-\cos[(\omega_1+\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+(n+k)\varphi_1]\}$

Продолжение табл. 3

Немодулированные сигналы	Модулированные сигналы
$[\sin(\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+2\omega_1)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{+\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(2\beta)I_k(\beta)\{\sin[(\omega_2-2\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]+\sin[(\omega_2+2\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+(n+k)\varphi_1]\}$
$[\sin(\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\sin(\omega_1+2\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{+\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(\beta)I_k(2\beta)\{\sin[(\omega_1-2\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]+\sin[(\omega_1+2\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+(n+k)\varphi_1]\}$
$[\cos(2\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\cos(2\omega_1+2\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(2\beta)I_k(2\beta)\{\cos[(2\omega_1-2\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]+\cos[(2\omega_1+2\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+(n+k)\varphi_1]\}$
$[\sin(3\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\sin(3\omega_1+2\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(2\beta)I_k(3\beta)\{\sin[(3\omega_2-2\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]+\sin[(3\omega_2+2\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+(n+k)\varphi_1]\}$
$[\sin(\omega_2-4\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+4\omega_1)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(4\beta)I_k(\beta)\{\sin[(\omega_2-4\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]+\sin[(\omega_2+4\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+(n+k\ \varphi_1$
$[\cos(3\omega_2-\omega_1)t-$ $-\cos(3\omega_2+\omega_1)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(\beta)I_k(3\beta)\{\cos[(3\omega_2-\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]-\cos[(3\omega_2+\omega_1+(n+k)\Omega_1)t+(n+k)\varphi_1]\}$
$[\sin(\omega_1-4\omega_2)t+$ $+\sin(\omega_1+4\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty}\sum\limits_{k=-\infty}^{\infty} I_n(\beta)I_k(4\beta)\{\sin[(\omega_1-4\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+$ $+(n+k)\varphi_1]+\sin[(\omega_1+4\omega_2+(n+k)\Omega_1)t+(n+k)\varphi_1]\}$

где $I_{-n}=-I_n$ - при нечетном n;

$I_{-n}=I_n$ - при четном n;

$I_{-k}=-I_k$ - при нечетном k;

$I_{-k}=I_k$ - при четном k.

Рассмотрим случай, когда модуляция по амплитуде производится многочастотным сигналом вида (табл.4):

$$\sum_{i=1}^{M} U_1 \cos \Omega_i t, \tag{8}$$

а модуляция по частоте - суммой косинусоидальных составляющих, представляемых в общем виде выражением [I]:

$$a=A\sum_{n_1=-\infty}^{\infty}\sum_{n_2=-\infty}^{\infty}\dots\sum_{n_k=-\infty}^{\infty}[I_{n_1}(\beta_1)I_{n2}(\beta_2)\dots I_{nk}(\beta_k)]\cos[\omega_0 t+\alpha_0+ n(\Omega_1 t+\varphi_1)+m(\Omega_2 t+\varphi_2)+\dots+u(\Omega_k t+\varphi_k)]^{**}$$

Таблица 4

Выходной сигнал, промодулированный по амплитуде многочастотным сигналом

Огибающая амплитудно-модулированных сигналов	Примечание
$\begin{aligned} & a_1[1+\sum_{i=1}^{M} m_i g(t)]U_0 - a_3\{[1+3\sum_{i=1}^{M} m_i g(t)+ \\ & +3\sum_{i,j=1}^{M}\frac{1}{2} m_{i,j} g^2(t)+\sum_{i,j,q=1}^{M}\frac{1}{4} m_{i,j,q} g^3(t)]U_0^3+ \\ & +\frac{3}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+2m_{1i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(2m_i m_{1j}+m_{1i,j})g^2(t)+ \\ & +\sum_{i,j,q=1}^{M}\frac{1}{4} m_i m_{1j,q} g^3(t)]U_0U_{m1}^2+\frac{3}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+2m_{2i})g(t)+ \\ & +\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(2m_i m_{2i}+m_{2i,j})g^2(t)+\sum_{i,j,q=1}^{M}\frac{1}{4} m_i m_{2j,q} g^3(t)]U_0U_{m2}^2\}+ \\ & +a_5\{[1+5\sum_{i=1}^{M} m_i g(t)+10\sum_{i,j=1}^{M}\frac{1}{2} m_{i,j} g^2(t)+ \\ & +10\sum_{i,j,q=1}^{M}\frac{1}{4} m_{i,j,q} g^3(t)+\dots]U_0^5+5[1+\sum_{i=1}^{M}(3m_i+2m_{1i})g(t)+ \\ & +\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{i,j}+6m_i m_{1j}+m_{1i,j})g^2(t)+ \\ & +\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_{i,j}m_{1q}+m_{i,j,q}+3m_i m_{1j,q})g^3(t)+\dots]U_0^3U_{m1}^2+ \\ & +5[1+\sum_{i=1}^{M}(3m_i+2m_{2i})g(t)+ \\ & +\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{i,j}+6m_i m_{2j}+m_{2i,j})g^2(t)+ \\ & +\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_{i,j}m_{2q}+m_{i,j,q}+3m_i m_{2j,q})g^3(t)+\dots]U_0^3U_{m2}^2+ \\ & +\frac{15}{8}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+4m_{1i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(4m_i m_{1j}+6m_{1i,j})g^2(t)+ \\ & +\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_1 m_{1i,j}+4m_{1i,j,q})g^3(t)+\dots]U_0U_{m1}^4+ \\ & +\frac{15}{8}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_1+4m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(4m_i m_{2j}+6m_{2i,j})g^2(t)+ \\ & +\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_i m_{2j,q}+4m_{2i,j,q})g^3(t)+\dots]U_0U_{m2}^4]+ \\ & +\frac{15}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_1+2m_{1i}+2m_{2i})g(t)+ \\ & +\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(2m_i m_{1j}+2m_i m_{2j}+4m_{1i}m_{2j}+m_{1i,j}+m_{2i,j})g^2(t)+ \\ & +\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(2m_{1i}m_{2j,q}+2m_{1i,j}m_{2q}+m_{1i,j}m_q+m_{2i,j}m_q+ \\ & +4m_i m_{1j}m_{2q})g^3(t)+\dots]U_0U_{m1}^2U_{m2}^2\} \end{aligned}$	Постоянная составляющая

** Принимаем $\alpha_0=0$.

Продолжение табл. 4

Огибающая амплитудно-модулированных сигналов	Примечание
$a_1[1+\sum_{i=1}^{M} m_{1i}\, g(t)]U_{m1}-3a_3\{[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_i+m_{1i})g(t)+$ $+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{ij}+2m_i m_{1j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M} m_{ij}\, m_{1q}\, g^3(t)]U_0^2 U_{m1}+$ $+\frac{1}{4}[1+3\sum_{i=1}^{M} m_{1i}\, g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M} 3m_{1ij}\, g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M} m_{1ijq}\, g^3(t)]U_{m1}^3+\frac{1}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{2i}+m_{1i})g(t)+$ $+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{2ij}+2m_{2i}\, m_{1j})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M} m_{2ij}\, m_{1q}\, g^3(t)]U_{m1}U_{m2}^2\}+$ $+5a_5\{[1+\sum_{i=1}^{M}(4m_i+m_{1i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(6m_{ij}+$ $+4m_i m_{1j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(4m_{ijq}+6m_{ij}\, m_{1q})g^3(t)+\ldots]U_0^4 U_{m1}+$ $+\frac{3}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_i+3m_{1i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{1ij}+6m_i m_{1j}+$ $+m_{ij})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_i\, m_{1jq}+m_{1ijq}+$ $+3m_{ij}\, m_{1q})g^3(t)+\ldots]U_0^2 U_{m1}^3+\frac{1}{8}[1+5\sum_{i=1}^{M} m_{1i}\, g(t)+$ $+10\sum_{i,j=1}^{M}\frac{1}{2}m_{1ij}\, g^2(t)+10\sum_{i,j,q=1}^{M}\frac{1}{4}m_{1ijq}\, g^3(t)+\ldots]U_{m1}^5+$ $+3[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_i+m_{1i}+2m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{i=1}(m_{ij}+4m_i\, m_{2j}+$ $+2m_i\, m_{1j}+2m_{1i}\, m_{2j}+m_{2ij})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(2m_i\, m_{2jq}+$ $+2m_{ij}\, m_{2q}+m_{1i}\, m_{2jq}+m_{ij}\, m_{1q}+$ $+4m_{1i}\, m_j\, m_{2q})g^3(t)+\ldots]U_0^2 U_{m1}U_{m2}^2+\frac{3}{4}[1+\sum_{i=1}^{M}(3m_{1i}+$ $+2m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{1ij}+6m_{1i}\, m_{2j}+m_{2ij})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_{1ij}\, m_{2q}+m_{1ijq}+3m_{1i}\, m_{2jq})g^3(t)+\ldots]U_{m1}^3 U_{m2}^2+$ $+\frac{3}{8}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_{1i}+4m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(4m_{1i}\, m_{2j}+6m_{2ij})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_{1i}\, m_{2jq}+4m_{2ijq})g^3(t)+\ldots]U_{m1}U_{m2}^4\}$	$\sin\omega_1 t$
$a_1 kU_{m2}-3a_3\{k_1U_0^2U_{m2}+k_2U_{m2}^3+k_3U_{m1}^2U_{m2}\}+5a_5\{k_4U_0^4U_{m2}+$ $+k_5U_0^2U_{m2}^3+k_6U_{m2}^5+k_7U_0^2U_{m1}^2U_{m2}+k_8U_{m1}^2U_{m2}^3+k_9U_{m1}^4U_{m2}\}$	$\sin\omega_2 t$

Продолжение табл. 4

Огибающая амплитудно-модулированного сигнала	Примечание
$\frac{3}{2}a_3[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{1i}+m_i)g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{1ij}+2m_{1i}m_j)g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}m_{1ij}m_q g^3(t)]U_0U_{m1}^2-5a_5\{[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{1i}+3m_i)g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{ij}+6m_i m_{1j}+m_{1ij})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_{1ij}m_q+m_{ij,q}+3m_{1ij}m_q)g^3(t)+\dots]U_0^3U_{m1}^2+\frac{1}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(4m_{1i}+m_i)g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(6m_{1ij}+4m_{1i}m_j)g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(4m_{1ij,q}+6m_{1ij}m_q)g^3(t)+\dots]U_0U_{m1}^4+\frac{3}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{1i}+2m_{2i}+m_i)g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{1ij}+m_{2ij}+4m_{1i}m_{2j}+2m_{1i}m_j+2m_{21}m_j)g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(2m_{1i}m_{2j,q}+2m_{2ij}m_{1q}+m_{2ij}m_q+m_{1ij}m_q+4m_i m_{1j}m_{2q})g^3(t)+\dots]U_0U_{m1}^2U_{m2}^2\}$	$\cos 2\omega_1 t$
$\frac{3}{2}a_3k_{10}U_0U_{m2}^2-5a_5\{k_{11}U_0^3U_{m2}^2+k_{12}U_0U_{m2}^4+k_{13}U_0U_{m1}^2U_{m2}^2\}$	$\cos 2\omega_2 t$
$\frac{1}{4}a_3[1+3\sum_{i=1}^{M}m_{1i}g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}3m_{1ij}g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}m_{1ij,q}g^3(t)]U_{m1}^3-5a_5\{\frac{1}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_i+3m_{1i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{1ij}+6m_i m_{1j}+m_{ij})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_i m_{1ij}+m_{ij,q}+3m_{ij}m_{1q})g^3(t)+\dots]U_0^2U_{m1}^3+\frac{1}{4}[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{2i}+3m_{1i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{1ij}+6m_i m_{1j}+m_{ij})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_i m_{1j,q}+m_{1ij,q}+3m_{ij}m_{1q})g^3(t)+\dots]U_{m1}^3U_{m2}^2+\frac{1}{16}[1+5\sum_{i=1}^{M}m_{1i}g(t)+10\sum_{i,j=1}^{M}\frac{1}{2}m_{1ij,q}g^2(t)+10\sum_{i,j,q=1}^{M}\frac{1}{4}m_{1ij,q}g^3(t)+\dots]U_{m1}^5\}$	$\sin 3\omega_1 t$
$\frac{1}{4}a_3k_{14}U_{m2}^3-5a_5\{k_{15}U_0^2U_{m2}^3+k_{16}U_{m1}^2U_{m2}^3+k_{17}U_{m2}^5\}$	$\sin 3\omega_2 t$
$\frac{5}{8}a_5[1+\sum_{i=1}^{M}(4m_{1i}+m_i)g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(6m_{1ij}+4m_{1i}m_j)g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(4m_{1ij,q}+6m_{1ij}m_q)g^3(t)+\dots]U_0U_{m1}^4$	$\cos 4\omega_1 t$

Продолжение табл. 4

Огибающая амплитудно-модулированного сигнала	Примечание
$\frac{5}{8}a_5 k_{18} U_0 U_{m2}^4$	$\cos 4\omega_2 t$
$\frac{1}{16}a_5 [1+5\sum_{i=1}^{M} m_{1i}\, g(t)+10\sum_{i,j=1}^{M}\frac{1}{2}m_{1i,j}\, g^2(t)+$ $+10\sum_{i,j,q=1}^{M}\frac{1}{4}m_{1i,j,q}\, g^3(t)+\ldots]U_{m1}^5$	$\sin 5\omega_1 t$
$\frac{1}{16}a_5 k_{19} U_{m1}^5$	$\sin 5\omega_2 t$
$-3a_3 [1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+m_{1i}+m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_i m_{1j}+m_i m_{2j}+$ $+m_{1i} m_{2j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M} m_i m_{1j} m_{2q} g^3(t)] U_0 U_{m1} U_{m2}+$ $+5a_5\{2[1+\sum_{i=1}^{M}(3m_i+m_{1i}+m_{2i})g(t)+$ $+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{ij}+3m_i m_{1j}+3m_i m_{2j}+m_{1i} m_{2j})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(m_{ij,q}+3m_{ij} m_{1q}+3m_{ij} m_{2q}+$ $+3m_i m_{1j} m_{2q})g^3(t)+\ldots] U_0^3 U_{m1} U_{m2}+\frac{3}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+$ $+2m_{1i}+2m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{1ij}+4m_{1i} m_{2j}+m_{2ij}+2m_i m_{1j}+$ $+2m_i m_{2j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(2m_{1ij} m_{2q}+2m_{1i} m_{2j,q}+m_{1ij} m_q+$ $+m_{2ij} m_q+4m_i m_{1j} m_{2q})g^3(t)+\ldots] U_0 U_{m1}^2 U_{m2}^2\}$	$\cos(\omega_1-\omega_2)t-$ $-\cos(\omega_1+\omega_2)t$
$-\frac{3}{4}a_3 [1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{1i}+m_{2j})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{1ij}+2m_{1i} m_{2j})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M} m_{1ij} m_{2q}\, g^3(t)] U_{m1}^2 U_{m2}+5a_5\{\frac{3}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_i+2m_{1i}+$ $+m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{ij}+4m_i m_{1j}+m_{1ij}+2m_i m_{2j}+$ $+2m_{1i} m_{2j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(2m_{ij} m_{1q}+2m_i m_{1j,q}+m_{ij} m_{2q}+$ $+4m_i m_{1j} m_{2q}+m_{1i} m_{j,q})g^3(t)+\ldots] U_0^2 U_{m1}^2 U_{m2}+$ $+\frac{1}{4}[1+\sum_{i=1}^{M}(4m_{1i}+m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(6m_{1ij}+4m_{1i} m_{2j})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(4m_{1ij,q}+6m_{1ij} m_{2q})g^3(t)+\ldots] U_{m1}^4 U_{m2}+$ $+\frac{3}{8}[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{1i}+3m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{2ij}+6m_{1i} m_{2j}+$	$\sin(\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+2\omega_1)t$

Продолжение табл. 4

Огибающая амплитудно-модулированного сигнала	Примечание
$+m_{1i,j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_{1i}m_{2j,q}+m_{2i,j,q}+$ $+3m_{1i,j}m_{2q})g^3(t)+\ldots]U_{m1}^2U_{m2}^3$	$\sin(\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+2\omega_1)t$
$-\frac{3}{4}a_3k_{20}U_{m2}^2U_{m1}+5a_5\{k_{21}U_0^2U_{m2}^2U_{m1}+k_{22}U_{m2}^4U_{m1}+k_{23}U_{m2}^2U_{m1}^3\}$	$\sin(\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_1+2\omega_2)t$
$-\frac{15}{4}a_5[1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+2m_{1i}+2m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(m_{1i,j}+4m_{1i}m_{2j}+$ $+m_{2i,j}+2m_{1i}m_j+2m_{2i}m_j)g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(2m_{1i,j}m_{2q}+2m_im_{2j,q}+$ $+m_{1i,j}m_q+4m_im_{1j}m_{2q}+m_{2i,j}m_q)g^3(t)+\ldots]U_0U_{m1}^2U_{m2}^2$	$\cos(2\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\cos(2\omega_1+2\omega_2)t$
$\frac{5}{8}a_5[1+\sum_{i=1}^{M}(2m_{2i}+3m_{1i})g(t)+$ $+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{1i,j}+6m_{1i}m_{2j}+m_{2i,j})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(6m_{1i,j}m_q+m_{1i,j,q}+3m_{1i}m_{2j,q})g^3(t)+\ldots]U_{m1}^3U_{m2}^2$	$\sin(3\omega_1-2\omega_2)t+$ $+\sin(3\omega_1+2\omega_2)t$
$\frac{5}{16}[1+\sum_{i=1}^{M}(4m_{1i}+m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(6m_{1i,j}+4m_{1i}m_{2j})g^2(t)+$ $+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(4m_{1i,j,q}+6m_{1i,j}m_{2q})g^3(t)+\ldots]U_{m1}^4U_{m2}$	$\sin(\omega_2-4\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+4\omega_1)t$
$-\frac{5}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+m_{1i}+3m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{2i,j}+3m_im_{2j}+$ $+3m_{2i}m_{1j}+m_im_{1j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(m_{2i,j,q}+3m_{2i,j}m_q+$ $+3m_{2i,j}m_{1q}+3m_im_{1j}m_{2q})g^3(t)+\ldots]U_0U_{m1}U_{m2}^3$	$\cos(3\omega_2-\omega_1)t-$ $-\cos(3\omega_2+\omega_1)t$
$\frac{5}{8}a_5k_{24}U_{m1}^2U_{m2}^3$	$\sin(3\omega_2-2\omega_1)t+$ $+\sin(3\omega_2+2\omega_1)t$
$\frac{5}{16}a_5k_{25}U_{m1}U_{m2}^4$	$\sin(\omega_2-4\omega_1)t+$ $+\sin(\omega_2+4\omega_1)t$
$-\frac{5}{2}[1+\sum_{i=1}^{M}(m_i+m_{1i}+3m_{2i})g(t)+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{M}(3m_{2i,j}+3m_im_{2j}+$ $+3m_{2i}m_{1j}+m_im_{1j})g^2(t)+\frac{1}{4}\sum_{i,j,q=1}^{M}(m_{2i,j,q}+3m_{2i,j}m_q+$ $+3m_{2i,j}m_{1q}+3m_im_{1j}m_{2q})g^3(t)+\ldots]U_0U_{m1}U_{m2}^3$	$\cos(3\omega_2-\omega_1)t-$ $-\cos(3\omega_2+\omega_1)t$
$\frac{5}{16}a_5k_{26}U_{m1}U_{m2}^4$	$\sin(\omega_1-4\omega_2)t+$ $+\sin(\omega_1+4\omega_2)t$

В табл. 4 приняты следующие обозначения: $\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}$, $\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}\sum_{q=1}^{M}$ соответственно $\sum_{i,j=1}^{M}$ и $\sum_{i,j,q=1}^{M}$; $m_i m_j = m_{ij}$; $m_i m_j m_q = m_{ijq}$;... через $k \div k_q$ соответственно выражения в скобках при U_{m1}, U_{m1}, U_0^2 ... с соответствующей заменой индекса I на 2 при m; $k_{10} \div k_{13}$ - при $U_{m1}^2 U_0$, U_0^3 U_{m1}^2 ..; $k_{14} \div k_{17}$ - при U_{m1}^3, $U_0^2 U_{m2}^3$ ...; k_{18} - при $U_0 U_{m1}^4$; k_{19} - при U_{m1}^5; $k_{20} \div k_{23}$- при $U_{m1}^2 U_{m2}$, U_0^2 $U_{m1}^2 U_{m2}$ ...; k_{24} - при $U_{m1}^3 U_{m2}^2$; k_{25} - при $U_{m1}^4 U_{m2}$; k_{26}- при $U_{m1}^4 U_{m2}$.

Выражение (9) запишем:

$$a = A\sum_{n_m=-\infty}^{\infty} \prod_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\{\cos[(\omega_0 + \sum_{m=1}^{k} n_m \Omega_n)t + \sum_{m=1}^{k} n_m \varphi_m]\}, \qquad (10)$$

где β - индекс частотной модуляции;

ω_0 - основная (несущая) круговая частота;

Ω_m - частота модуляции;

k - номер составляющей;

m - независимый порядковый номер.

Закон изменения огибающей g(t) при АМ представляется с учетом выражения (8) равенством

$$g(t) = \sum_{i=1}^{M} \cos \Omega_i t. \qquad (11)$$

Для функции g(t), основных частот ω_1 и ω_2, их гармоник и комбинационных составляющих, модулированных по частоте суммой косинусоидальных составляющих (10), составим таблицы 5 и 6.

Таблица 5

Функция g(t), модулированная по частоте суммой косинусоидальных составляющих

g(t)	$\sum_{n_m=-\infty}^{\infty} \prod_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\{\cos[(\Omega_i + \sum_{m=1}^{k} n_m \Omega_m)t + \sum_{m=1}^{k} n_m \varphi_m]\}$
$g^2(t)$	$\frac{1}{2}\sum_{n_m=-\infty}^{\infty} \prod_{m=1}^{k} I_{n_m}(\beta_m) \sum_{p_m=-\infty}^{\infty} \prod_{m=1}^{k} I_{pm}(\beta_m)$ $\{\cos[(\Omega_i - \Omega_j + \sum_{m=1}^{k} n_m \Omega_m + \sum_{m=1}^{k} p_m \Omega_m)t + \sum_{m=1}^{k} n_m \varphi_m + \sum_{m=1}^{k} p_m \varphi_m] + \cos[(\Omega_i + \Omega_j + \sum_{m=1}^{k} n_m \Omega_m + \sum_{m=1}^{k} p_m \Omega_m)t + \sum_{m=1}^{k} n_m (\varphi_m + \sum_{m=1}^{k} p_m \varphi_m]\}$

Продолжение табл. 5

$g^3(t)$	$\frac{1}{4}\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\left[\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\right]\sum\limits_{p_m=-\infty}^{\infty}\left[\prod\limits_{m=1}^{k} I_{p_m}(\beta_m)\right]\sum\limits_{u_m=-\infty}^{\infty}\left[\prod\limits_{m=1}^{k} I_{um}(\beta_m)\right]\cdot\{\cos[(\Omega_i + \Omega_j - \Omega_q + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\varphi_m] + \cos[(\Omega_i - \Omega_j + \Omega_q + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\varphi_m] + \cos[(\Omega_i - \Omega_j - \Omega_q + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\varphi_m] + \cos[(\Omega_i + \Omega_j + \Omega_q + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} u_m\varphi_m]\}$

где $I_{-n} = -I_n$ при нечетном n; $I_{-n} = I_n$ при четном n.

Таблица 6

Сигналы основных частот ω_1, ω_2, их гармоник и комбинационных составляющих, промодулированные по частоте суммой косинусоидальных составляющих

Немодулированные сигналы	Модулированные сигналы
$\sin\omega_1 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\sin[(\omega_1 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\sin\omega_2 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\sin[(\omega_2 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\cos 2\omega_1 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(2\beta_m)\cos[(2\omega_1 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\cos 2\omega_2 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(2\beta_m)\cos[(2\omega_2 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\sin 3\omega_1 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(3\beta_m)\sin[(3\omega_1 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\sin 3\omega_2 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(3\beta_m)\sin[(3\omega_2 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\cos 4\omega_1 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(4\beta_m)\cos[(4\omega_1 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\cos 4\omega_2 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(4\beta_m)\cos[(4\omega_2 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$
$\sin 5\omega_1 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(5\beta_m)\sin[(5\omega_1 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m]$

Продолжение табл. 6

Немодулированные сигналы	Модулированные сигналы
$\sin 5\omega_2 t$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(5\beta_m)\sin[(5\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m]$
$[\cos(\omega_1-\omega_2)t-\cos(\omega_1+\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\{\cos[(\omega_1-\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]-\cos[\omega_1+\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]\}$
$[\sin(\omega_2-2\omega_1)t+\sin(\omega_2+2\omega_1)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{pm}(2\beta_m)\{\sin[(\omega_2-2\omega_1+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]+\sin[(\omega_2+2\omega_1+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]\}$
$[\sin(\omega_1-2\omega_2)t+\sin(\omega_1+2\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(2\beta_m)\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{pm}(\beta_m)\{\sin[(\omega_1-2\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]+\sin[(\omega_1+2\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]\}$
$[\cos(2\omega_1-2\omega_2)t-\cos(2\omega_1+2\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{mn}(2\beta_m)\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{pm}(2\beta_m)\{\cos[(2\omega_1-2\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]-\cos[(2\omega_1+2\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]\}$
$[\sin(3\omega_1-2\omega_2)t+\sin(3\omega_1+2\omega_2)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(3\beta_m)\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{pm}(2\beta)\{\sin[(3\omega_1-2\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]+\sin[(3\omega_1+2\omega_2+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]\}$
$[\sin(\omega_2-4\omega_1)t+\sin(\omega_2+4\omega_1)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m)\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{pm}(4\beta_m)\{\sin[(\omega_2-4\omega_1+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]+\sin[(\omega_2+4\omega_1+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\Omega_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\Omega_m)t+\sum\limits_{m=1}^{k}n_m\varphi_m+\sum\limits_{m=1}^{k}p_m\varphi_m]\}$

Продолжение табл. 6

Немодулированные сигналы	Модулированные сигналы
$[\cos(3\omega_2 - \omega_1)t -$ $-\cos(3\omega_2 + \omega_1)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(3\beta_m) \sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{pm}(\beta_m)\{\cos[(3\omega_2 - \omega_1 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m] + \cos[(3\omega_2 + \omega_1 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m]\}$
$[\sin(\omega_1 - 4\omega_2)t +$ $+\sin(\omega_1 + 4\omega_1)t]$	$\sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{nm}(\beta_m) \sum\limits_{n_m=-\infty}^{\infty}\prod\limits_{m=1}^{k} I_{pm}(4\beta_m)\{\sin[(\omega_1 - 4\omega_2 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m] + \sin[(\omega_1 + 4\omega_2 + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\Omega_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\Omega_m)t + \sum\limits_{m=1}^{k} n_m\varphi_m + \sum\limits_{m=1}^{k} p_m\varphi_m]\}$

При прохождении сигнала (I) через систему запись-воспроизведение на выходе появляются гармоники и комбинационные частоты. Амплитуды гармоник растут с увеличением амплитуды входного сигнала по квадратичному, кубическому и т.п. закону. Комбинационные частоты образованы из произведения частотных составляющих входного сигнала и их гармоник. Число гармоник получается меньше числа комбинационных составляющих. Амплитуды комбинационных составляющих значительно превышают амплитуды гармоник.

При увеличении входной амплитуды напряжения с частотой ω_1 на выходе возрастает амплитуда составляющей с частотой ω_2, и соответственно увеличение U_{m2} вызывает увеличение амплитуды составляющей с частотой ω_1.

Увеличение количества спектральных составляющих и изменение их амплитуд в выходном сигнале обусловлено амплитудной и частотной модуляциями.

Вследствие нелинейности системы огибающая модулированных по амплитуде колебаний не идентична модулирующему сигналу. В случае, когда модулирующий сигнал содержит одну частотную составляющую, огибающая модулированных колебаний содержит исходный модулирующий сигнал и его гармоники. В случае, когда модуляция по амплитуде производится многочастотным сигналом (8), огибающая модулированных колебаний содержит составляющие исходных частот модулирующего сигнала, их гармоники и произведения этих частотных составляющих, из которых образуются комбинационные составляющие.

В двойной сумме, входящей в табл.4, при $i=j$ будет m членов, представляющих вторые гармоники (с частотами $2\Omega_i$ и $2\Omega_j$). Число различных компонентов разностных и суммарных частот, полученные при $i \neq j$, составляет $\frac{m(m-1)}{2}$, так как каждый компонент повторяется дважды [2].

При равенстве исходных амплитуд напряжений $U_{m1i}=U_{m1j}$ амплитуда напряжения комбинационной частоты в 2 раза больше напряжения гармоники [2].

В тройной сумме содержится m^3 членов, в состав которых входят компоненты, представляющие третью гармонику (частоты $3\Omega_i$, $3\Omega_j$ и $3\Omega_q$), полученные при $i=j=q$, разностные и суммарные комбинационные частоты $\omega_q-2\omega_1$ и $\omega_q+2\omega_i$, образованные комбинациями из всех частот входного сигнала по две и комбинационных частот $\omega_1+\omega_j\pm\omega_q$, образованных комбинациями из всех частот входного сигнала по две, и комбинационных частот $\omega_i+\omega_j\pm\omega_q$, образованных комбинациями из всех частот входного сигнала по три.

Число третьих гармоник составляет m.

Число разностных частот вида $\omega_q-2\omega_1$, как и число суммарных частот вида $\omega_q+2\omega_i$, составляет $m(m-1)$, так как разностные и суммарные компоненты могут быть получены при $i=q\neq j$ и $j=q\neq i$, то каждый из них состоит из трех равных слагаемых и имеет амплитуду напряжения, в 3 раза превышающую значение, полученное в табл. 5. Общее число комбинационных частот вида $\omega_i+\omega_j-\omega_q$ (также $\omega_i-\omega_j+\omega_q$, $\omega_1-\omega_j-\omega_q$ и $\omega_i+\omega_j+\omega_q$) равно $C_m^3=m(m-1)(m-2)$ [2].

При $U_{m1}=U_{m2}$ можно считать:

$$U_{mi}\, U_{mj}\, U_{mq} = U_{mi}\, U_{mq}\, U_{mj} = U_{mj}\, U_{mi}\, U_{mq} = U_{mj}\, U_{mq} U_{mi} = U_{mq} U_{mi}\, U_{mj} = U_{mq} U_{mj} U_{mi}.$$

Тогда амплитуда этих частот будет в 6 раз больше, чем полученная в табл. 5.

Амплитуда напряжения комбинационных составляющих вида $\omega_q \pm 2\omega_i$ в 3 раза больше и вида $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_q$ в 6 раз больше амплитуды напряжения третьей гармоники.

В случае модуляции амплитудно-модулированного колебания основных частот ω_1 и ω_2, их гармоник и комбинационных составляющих по частоте гармоническим сигналом с частотой Ω_1 каждая спектральная составляющая становится несущей, и получается ряд дополнительных боковых полос такой же частоты как и в случае "чистой" ЧМ. Амплитуда колебаний несущей частоты уменьшается при ЧМ соответственно функции Бесселя I_0. Частоты боковых составляющих разнятся на величину Ω_1, а амплитуды определяются соответствующими функциями Бесселя, определяемыми по таблицам.

Практически ширину спектра боковых составляющих ограничивают частотами, амплитуды которых не менее некоторой величины [I].

При модуляции сигналом (IO) со многими частотными составляющими получается чрезвычайно сложный спектр. Помимо основных боковых частот, получаемых в результате действия каждого отдельного модулирующего напряжения, будут иметься всевозможные комбинационные частоты с амплитудами, пропорциональными произведениям функций Бесселя, порядок которых равен порядку комбинационных частот. В спектре появляются частотные составляющие от суммы и разности модулирующих частот и их гармоник, а также от суммы разности этих составляющих со всеми другими частотами модуляции и их гармониками.

Литература

1. Лауфер М.В. Спектральный состав частотно-модулированных колебаний при сложном периодическом законе модуляции."Сборник трудов Киевского института киноинженеров", 1954, вып, 2.

2. Фарбер Ю.Д. Расчет характеристик многоканальных систем связи с транзисторными усилителями. Связьиздат, 1963.

3. Картьяну Г. Частотная модуляция. Издательство "Меридиане", Бухарест, 1964.

4. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Физматгиз, 1962.

5. Телятников Л.И. Искажение амплитудно-модулированных колебаний вследствие паразитной модуляции частоты."Труды Московского авиационного института", 1958, вып. 98.

6. Железняк В.К. К вопросу об измерении нелинейных искажений в тракте АМЗ. Тезисы докладов ХУ1 Украинской республиканской научно-технической конференции,посвященной Дню радио. Киев, 1966.

Статья поступила 22 марта 1967 г.