

метричных волчков в [3-5] значения параметров α близки к -2 , а β — к -1 (общий характер этих зависимостей подчеркивается определением в [5, 7] средних для всех исследованных линий значений $\alpha = -1,95$ [5] и $\beta = -0,87$ [7]). Измеренные же в настоящей работе в субмиллиметровой области для аналогичных переходов $J=1 \leftarrow 0$ симметричных волчков значения параметров α и β оба близки к -1 .

Тенденция ослабления температурных зависимостей сдвигов с ростом частоты линий согласуется с оценками в рамках простой модели сдвигов, использовавшейся в [1]. Получая в дополнение к выражению для сдвигов низкочастотных переходов (формула (3) работы [1] для $\nu_0 \ll 1/\tau$, где ν_0 — частота линии, τ — длительность соударения, все обозначения соответствуют [1])

$$\Delta\nu_c = 4\pi\nu_0 \left| \mu_{01}^z \right|^2 \mu_{эфф}^2 / h^2 k T \nu^2 \rho_0, \quad (1)$$

выражение для предельного случая высокочастотных линий ($\nu_0 \gg 1/\tau$)

$$\Delta\nu_c = 4\pi \left| \mu_{01}^z \right|^2 \mu_{эфф}^2 / 3h^2 k T \nu_0 \rho_0^3 \quad (2)$$

в предположении, что радиус соударений ρ_0 от T не зависит, получаем (учитывая $\nu^2 \sim T$) для низкочастотных переходов $\Delta\nu_c \sim T^{-2}$, а для высокочастотных $\Delta\nu_c \sim T^{-1}$, т. е. тенденцию, согласующуюся с экспериментальными данными как [3-7], так и настоящей работы.

При определении же ρ_0 из параметра уширения, как это делалось в [10],

$$\rho_0 \simeq (2kT\Delta\nu_y/\nu)^{1/2}, \quad (3)$$

температурные зависимости усложняются, сохраняя тем не менее отмеченную выше тенденцию, как видно из подстановки экспериментальных данных о $\Delta\nu_y$ табл. 1 в (1) — (3). Более детальный анализ температурных зависимостей будет проведен нами в последующих работах.

В предыдущих работах [1, 2] была, в частности, обнаружена зависимость от частоты величины параметра сдвига. Результаты настоящей работы позволяют, по-видимому, сделать вывод о зависимости от частоты не только величины сдвига, но и показателя степени в температурных зависимостях сдвигов молекулярных спектральных линий давлением газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Belov S. P., Krupnov A. F. et al. — J. Molec. Spectr., 1983, 101, p. 258.
2. Belov S. P., Kazakov V. P. et al. — J. Molec. Spectr., 1982, 94, p. 264.
3. Wensink W. A., Noorman C., Dijkenman H. A. — J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., 1979, 12, p. 1687.
4. Wensink W. A., Noorman C., Dijkerman H. A. — J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., 1980, 13, p. 4007.
5. Wensink W. A., Noorman C., Dijkerman H. A. — J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., 1981, 14, p. 2813.
6. Luijendijk S. C. M. Thesis. — The Netherlands: Utrecht University, 1973.
7. Wensink W. A. Thesis. — The Netherlands: Utrecht University, 1979.
8. Helming P., Gordy W. — Phys. Rev., 1969, 188, p. 100.
9. Белов С. П., Крупнов А. Ф., Марков В. Н., Третьяков М. Ю. — Опт. и спектр., 1984, 56, с. 828.
10. Таунс Ч., Шавлов А. Радиоспектроскопия. — М.: ИЛ, 1959.

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
24 октября 1984 г.

УДК 621.373.42

ОБ ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО АНСАМБЛЯ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

А. А. Дворников, В. А. Прокофьев, Г. М. Уткин

Исследованию непрерывных режимов работы взаимосвязанных автогенераторов, в том числе и с внешней синхронизацией, посвящено достаточно много работ, например [1-5]. В то же время импульсный режим работы синхронизированного ансамбля автогенераторов практически не рассмотрен. Предлагаемая работа посвящена исследованию внешней синхронизации на основном тоне радиоимпульсов ансамбля и оди-

наковых одноконтурных автогенераторов, взаимосвязанных также на основном тоне одинаковым нерезонансным образом по типу «звезда», т. е. каждый с каждым. При этом непрерывные внешние синхросигналы на каждый из автогенераторов ансамбля подаются через идентичные нерезонансные каналы синхронизации. Для упрощения рассмотрения считаем, что импульсный режим обеспечивается одинаковым для всех автогенераторов ансамбля периодическим (с периодом T) подключением и последующим отключением активных элементов. Ударным возбуждением колебаний, вызванным импульсами питания, пренебрегаем. Кроме того, считаем, что к моменту формирования очередного радиопульса любого из автогенераторов ансамбля остаточные колебания в его резонансной системе, связанные с предыдущим радиопульсом, заглушают до уровня, существенно меньшего уровня внешнего синхросигнала. В работе анализируются переходные процессы в системе, а также спектры колебаний в стационарном радиопульсном режиме.

Будем вначале считать, что на автогенераторы ансамбля одинаковым образом подаются синхросигналы $u_{c1}, u_{c2}, \dots, u_{cn}$ с одной и той же частотой ω_c , но с разными начальными фазами и амплитудами. Тогда рассматриваемый ансамбль автогенераторов описывается системой укороченных уравнений [5]

$$2C \frac{dU_k}{dt} = [S_a(U_k) - G]U_k - \sum_{j \neq k}^n d_{12}U_j \cos(\varphi_{12} - \Delta_{kj}) - d_{1c}U_{ck} \cos(\varphi_{1c} - \Delta_{kc}),$$

$$2C \frac{d\psi_k}{dt} U_k = U_k S_p(U_k) - 2CU_k(\omega_c - \omega_p) -$$

$$- \sum_{j \neq k}^n d_{12}U_j \sin(\varphi_{12} - \Delta_{kj}) - d_{1c}U_{ck} \sin(\varphi_{1c} - \Delta_{kc}),$$

где U_k, ψ_k — медленно меняющиеся амплитуда и фаза напряжения колебаний k -го автогенератора ансамбля; f_{12}, f_{1c} — фазовый угол цепи связи между автогенераторами и фазовый угол цепи связи между автогенераторами и источником синхросигнала, $\Delta_{kj} = \psi_k - \psi_j$, $\Delta_{kc} = \psi_k - \psi_c$, C, ω_p — емкость и резонансная частота контуров автогенераторов, $S_a(p)$ — активная (реактивная) составляющая крутизны активного элемента автогенератора.

Так как синхросигналы считаем малыми, то на начальных участках формирования импульсов автоколебаний система линейна и для нее из (1) получаем

$$U_k = A_0 \exp\left(\frac{\alpha + j b - y_{11}^c}{2C}\right) t + A_l \exp\left(\frac{\alpha + j b - y_{11}^H}{2C}\right) t -$$

$$- \frac{y_{1c}}{[A + (n-1)B](A-B)} \left[\{A + (n-1)B\} U_{ck} - B \sum_{j=1}^n U_{cj} \right],$$

где

$$A = G - \alpha + j[b - 2C(\omega_c - \omega_p)], \quad B = y_{12},$$

$$\alpha = S_a(0), \quad b = S_p(0) - 2C(\omega_c - \omega_p),$$

G — проводимость потерь контура автогенератора, y_{12} — взаимная проводимость связи между автогенераторами ансамбля, $\sum_{i=1}^n A_i = 0$, y_{11}^c, y_{11}^H — проводимости потерь автогенератора для синфазных и несинфазных колебаний [5].

Считаем, что $U_k(0) = 0$, тогда

$$A_0 = \frac{y_{1c}}{n[A + (n-1)B]} \sum_{j=1}^n U_{cj}(0),$$

$$A_l = \frac{y_{1c}}{A-B} \left[U_{cl}(0) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{cj} \right]$$

и, следовательно,

$$U_k = \sum_{j=1}^n U_{cj} = \frac{y_{1c}}{A + (n-1)B} \left[\left\{ \sum_{j=1}^n U_{cj}(0) \right\} \times \right.$$

$$\left. \times \exp\left(\frac{\alpha + j b - y_{11}^c}{2C}\right) t - \sum_{j=1}^n U_{cj}(t) \right];$$

$$\Delta U_{kj} = U_k - U_j = \frac{y_{ic}}{A-B} \left\{ [U_{ck}(0) - U_{cj}(0)] \times \right. \\ \left. \times \exp \left(\frac{\alpha + jb - y_{ic}^H}{2C} \right) t - [U_{ck}(t) - U_{cj}(t)] \right\}. \quad (4)$$

С точки зрения практики интересен случай, когда $|\alpha - \operatorname{Re} y_{ic}^H| t \gg 2C$ или $|\alpha - \operatorname{Re} y_{ic}^H| t \gg 2C$. При этом последними слагаемыми с $U_{ck}(t)$, $U_{cj}(t)$ в (3), (4) можно пренебречь и сказать, что комплексная амплитуда U_{Σ} представляет собой комплексную амплитуду усиленного суммарного напряжения синхронизирующих сигналов в момент времени $t=0$, а ΔU_{kj} — комплексную амплитуду усиленного разностного напряжения синхронизирующих сигналов U_{ck} и U_{cj} в момент времени $t=0$.

Видно, что для усиления суммарного напряжения синхросигналов необходимо $\alpha > g_{ic}^c$, а разностного $\alpha > g_{ic}^H$.

Из (2) следует, что при подавлении синфазных типов колебаний, т. е. при $\alpha < g_{ic}^c$ (но $\alpha > g_{ic}^H$), ансамбль автогенераторов «сохраняет» разность фаз колебаний, которая ему была навязана синхросигналами в момент времени $t=0$.

При достаточном больших амплитудах колебаний ансамбля активные элементы автогенераторов начинают работать на нелинейных участках своих характеристик, для которых результаты (2)–(4) несправедливы. Однако для дальнейшего нас будет интересно то, что ансамбль работает в периодическом импульсном режиме с периодом повторения T , и в начальные моменты формирования радиоимпульсов внешний синхросигнал в соответствии с вышеизложенным фазирует каждый радиоимпульс каждого автогенератора ансамбля. Следовательно, как легко получить из (1), разность фаз колебаний автогенераторов ансамбля, а также их амплитуды будут меняться во времени периодически от импульса к импульсу с периодом T даже с учетом работы активных элементов автогенераторов в нелинейном режиме. Это дает возможность представить напряжение u_i радиоколебаний i -го автогенератора в виде

$$u_i = F_i \exp(j\omega_c t),$$

где F_i — периодическая с периодом T функция, отображающая периодическую амплитудную и фазовую модуляции радиоколебаний i -го автогенератора

Раскладывая F_i в ряд Фурье, получаем

$$U_i = \sum_{m=-\infty}^{\infty} U_{mi} \exp[j(\omega_0 + m\Omega)t], \quad (5)$$

где

$$U_{mi} = \frac{1}{T} \int_0^T U_i \exp(-jm\Omega t) dt, \quad \Omega = 2\pi/T.$$

Из (5) видно, что спектр колебаний каждого автогенератора ансамбля является линейчатым и эквидистантным. Причем частотный интервал спектра равен частоте повторения радиоимпульсов, а частота одной из частотных составляющих точно равна частоте синхросигнала.

Необходимо отметить что полоса частот, в пределах которой можно менять частоту синхросигнала с сохранением отмеченных выше особенностей, по порядку равна полосам пропускания контуров автогенераторов ансамбля. Необходимый же уровень синхросигнала определяется лишь уровнем собственных шумов системы [8]. С этой точки зрения синхронизацию колебаний, связанную с отмеченным выше процессом фазирования внешним сигналом импульсов радиоколебаний ансамбля на начальном участке их формирования, имеет смысл называть сверхсинхронизацией по аналогии с принятым термином «сверхрегенерация» [7].

Рассмотрим теперь случай, когда синхронизирующим сигналом для автогенераторов ансамбля в момент формирования i -го радиоимпульса является сумма задержанных на время T_3 ($i-1$)-х радиоимпульсов автогенераторов того же ансамбля. Причем считаем, что $T_3 < T$, а $T - T_3$ меньше длительности радиоимпульсов. Тогда существует частота ω_0 , равная

$$\omega_0 = \omega_1 (T - T_3) / T$$

(где ω_1 — средняя частота заполнения радиоимпульсов), относительно которой суммарное напряжение радиоимпульсов автогенераторов ансамбля можно записать как

$$u_{\Sigma} = N \exp(j\omega_0 t),$$

где N — периодическая с периодом T функция, отображающая периодическую амплитудную и фазовую модуляции суммы напряжений радиоимпульсов всех автогенераторов ансамбля.

Следовательно, представив N в виде ряда Фурье, получим

$$u_{\Sigma} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} U_{m\Sigma} \exp[j(\omega_0 + m\Omega)t],$$

где

$$U_{m\Sigma} = \frac{1}{T} \int N \exp(-jm\Omega t) dt.$$

Видно, что спектр суммы радиоимпульсов самосинхронизированного ансамбля эквидистантен с частотным интервалом, равным частоте повторения радиоимпульсов. Одна из частот спектра равна ω_0 . В то же время частота ω_0 линейно зависит от времени задержки T_a .

Основные результаты работы (кроме случая самосинхронизации через собственный задержанный сигнал) проверялись экспериментально на модели ансамбля из двух импульсных LC-автогенераторов (частота 25 МГц), на которые импульсы питания подавались синфазно с частотой около 40 кГц. Внешняя синхронизация ансамбля осуществлялась симметрично от общего источника. Даже исключительно малые уровни синхросигнала, соизмеримые с уровнем шума системы, обеспечивали существование линейчатого эквидистантного спектра колебаний ансамбля. При отсутствии синхросигнала спектр колебаний был сплошным шумовым с шириной полосы, равной по порядку полосе пропускания контуров автогенераторов. Величина и характер взаимной связи автогенераторов определяли лишь огибающую спектра колебаний системы.

Приведенный выше теоретический материал относился к случаю идентичных автогенераторов ансамбля. Учет разброса параметров автогенераторов вносит изменения в полученные результаты, но эти изменения тем меньше, чем меньше этот разброс. Как показал эксперимент, система не критична к малой неидентичности автогенераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рапопорт Г. Н. — Радиотехника, 1951, № 4, с. 53.
2. Хохлов Р. В. — Радиотехника и электроника, 1956, № 1, с. 88.
3. Малафеев В. М., Полякова Н. С., Романовский Ю. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1970, 13, № 6, с. 936.
4. Смольский С. М., Столетова О. Е. — Радиотехника и электроника, 1978, № 1, с. 102.
5. Дворников А. А., Уткин Г. М. Фазированные автогенераторы радиопередающих устройств. — М.: Энергия, 1980. — 176 с.
6. Григулевич В. И., Иммооров И. Я. Радиоимпульсное преобразование частоты. — М.: Сов. радио, 1966. — 335 с.
7. Сверхрегенераторы. /Под ред. М. К. Белкина. — М.: Радио и связь, 1983. — 248 с.

Московский энергетический институт

Поступила в редакцию
27 июля 1984 г.

УДК 621.391.822.4

ПРОБЛЕМА ОБОСНОВАНИЯ СПЕКТРА ВИДА $1/f$ В ТЕРМОАКТИВАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ ФЛИККЕРНОГО ШУМА

А. В. Якимов

1. Фликкерные шумы тонких проводящих пленок и точечных контактов обусловлены соответствующими флуктуациями их сопротивления. На достаточно низких частотах спектр относительных флуктуаций сопротивления образца имеет вид

$$\langle \delta R^2 \rangle_f = B/f^\gamma. \quad (1)$$

Причина возникновения флуктуаций, обладающих таким спектром, где $\gamma \sim 1$, до сих пор является предметом дискуссий.

Так, в [1] предложено считать, что фликкерные флуктуации параметров радиоэлектронных приборов возникают из-за диффузии в их рабочий объем (и редиффузии)