

В. К. КОРНЕВ

## ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ НА ХАРАКТЕР СТАЦИОНАРНЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ШИРОКОПОЛОСНОЙ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Одним из направлений развития теории автоколебательных систем (АКС) является исследование широкополосных АКС с запаздыванием. Нелинейная модель таких систем [1] в частном случае искусственной LC-линии задержки без потерь была проанализирована в работе [2]. В отличие от случая, рассмотренного в [2], процессы в АКС с реальным физическим запаздыванием характеризуются прежде всего отсутствием четко выраженной частоты среза и крайне малой дисперсией запаздывания.

В данной работе был исследован характер стационарных решений в рамках модели, предложенной [1, 2] для систем с реальным физическим запаздыванием, и выявлены факторы, определяющие вид этих решений. Кроме того, противоречивость известных к настоящему времени экспериментальных данных побудила провести детальное исследование частотных свойств естественной цепи запаздывания — коаксиального кабеля.

Обратимся к фазочастотной и амплитудно-частотной характеристикам (ФЧХ и АЧХ) кабеля [3]:

$$\varphi(\omega) = -\frac{\tau}{\sqrt{2}} \{[(\delta^2 - \beta^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2]^{1/2} - (\delta^2 - \beta^2 - \omega^2)\}^{1/2},$$

$$|K(\omega)| = \exp \left\{ -\frac{\tau}{\sqrt{2}} [(\delta^2 - \beta^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2]^{1/2} + (\delta^2 - \beta^2 - \omega^2)^{1/2} \right\},$$

где  $\tau = x/v$ ,  $x$  — длина отрезка кабеля,  $v$  — скорость распространения электромагнитной волны в кабеле,  $\delta = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right)$ ,  $\beta = \frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right)$ ;  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  — погонное сопротивление, индуктивность, проводимость диэлектрика и емкость кабеля.

Простейший расчет на основе технических данных промышленных кабелей показывает, что в то время как параметры  $L$ ,  $C$ ,  $G$  можно считать постоянными до очень высоких частот, из-за скин-эффекта с некоторой частоты  $\omega_c$   $R$  возрастает как  $\sqrt{\omega}$  [3, 4]. Анализ показывает, что скин-эффект незначительно уменьшает дисперсию ФЧХ (при  $\omega > \omega_c$ ) и сильно увеличивает дисперсию АЧХ кабеля. На рис. 1 и рис. 2 (кривая 1) изображены рассчитанные ФЧХ и АЧХ кабеля РК50-2-11<sup>1</sup> для  $x = 1$  км в предположении, что  $\beta \approx \delta$  (т. е.  $G \approx 0$ ) и погонные  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  постоянны для всех частот. Кривая 2 на рис. 2 показывает влияние скин-эффекта на АЧХ.

Стационарные колебания в системе с отрезком согласованного кабеля в цепи обратной связи будут описываться следующим нелинейным уравнением [1, 2]:

$$F[U(t)] = L[U(t)], \quad (1)$$

где  $F[\cdot]$  — «обратная» нелинейность усилителя, выражающая входной сигнал  $F[U]$  усилителя через выходной  $U$ ,  $L[\cdot]$  — линейное преобразование в цепи обратной связи.

В случае, когда дисперсия ФЧХ коаксиального кабеля мала и ею можно пренебречь, а усилитель слабонелинейный с коэффициентом усиления  $K_0 = \left| \frac{d}{du} F[U] \right|_{U=0}$ , причем общий коэффициент усиления разомкнутой цепи  $K_{0\sigma} = K_0 \cdot |K(\omega)|$  превышает 1 лишь для двух низших гармонических составляющих движения  $U(t)$ , расчет параметров стационарного движения  $U(t)$  можно выполнить достаточно просто методом гармонического баланса [2].

Рассмотрим случай антисимметричной нелинейности  $F[U] = kU - \gamma U^3$ , ( $0 < k < -1$ ,  $\gamma > 0$ ). Тогда, учитывая в  $U(t)$  только основной тон и его третью гармонику:

<sup>1</sup> Кабель РК50-2-11 имеет самую тонкую внутреннюю жилу диаметром 0,67 мм (и, следовательно, самую высокую  $\omega_c$ ) из всех промышленных кабелей.

<sup>2</sup> Будем называть усилитель слабонелинейным, если при подаче на его вход синусоидального сигнала амплитуды гармоник  $A_k$  выходного сигнала усилителя значительно меньше, чем амплитуда основного тона  $A_1$  ( $0 < A_k < 0,2A_1$ ).

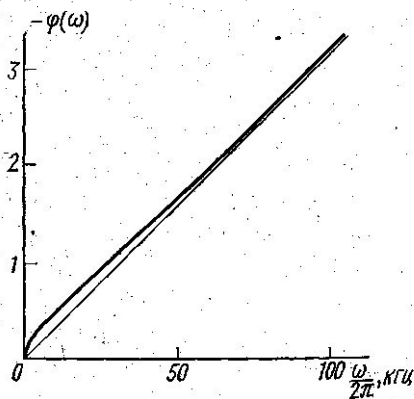


Рис. 1

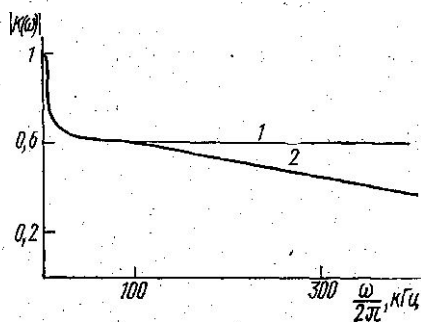


Рис. 2

$U(t) = a_1 \cos \omega t + a_3 \cos(3\omega t + \psi)$ , из уравнения (1) получим следующую систему четырех уравнений:

$$A_1^2 + 2A_3^2 + A_1 A_3 \cos \psi = -\eta_1 \cos[\varphi(\omega)] - k,$$

$$2A_1^2 + A_3^2 + (A_1^3/3A_3) \cos \psi = \eta_3 \cos[\varphi(3\omega)] - k,$$

$$-A_1 A_3 \sin \psi = -\eta_1 \sin[\varphi(\omega)], \quad (A_1^3/3A_3) \sin \psi = -\eta_3 \sin[\varphi(3\omega)], \quad (2)$$

где  $A_1 = \frac{\sqrt{3\gamma}}{12} a_1$ ,  $A_3 = \frac{\sqrt{3\gamma}}{2} a_3$ ;  $\eta_1$  и  $\eta_3$  — значения АЧХ кабеля на частотах  $\omega$  и  $3\omega$  с учетом дисперсии. В случае бездисперсной ФЧХ кабеля  $\omega = \pi/\tau$ ,  $\varphi(\omega) = -\pi$ ,  $\varphi(3\omega) = -3\pi$ . При этом система уравнений (2) в области

$$1 \leq D \equiv \left(1 - \frac{\eta_1}{k}\right) / \left(1 - \frac{\eta_3}{k}\right) \leq 2,05$$

имеет 4 решения: M1, M2, M3, M4, отличающиеся различным соотношением амплитуд спектральных составляющих  $A_1$  и  $A_3$ <sup>1</sup>. Для  $\eta_3 = \eta_1$  значения  $A_1/A_3$  следующие: 3,6 (M1); 0,66 (M2); 1,26 (M3); 0, т.е.  $A_1 = 0$ ,  $A_3 \neq 0$  (M4), причем для решений M1 и M2  $\psi = \pi$ , а для M3  $\psi = 0$ . При  $D > 2,05$  возможны лишь два режима колебаний: M4 и M1, для которого  $A_1/A_3 = 4,8$  при  $D = 2,1$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что количество возможных режимов стационарных колебаний зависит от дисперсии АЧХ цепи обратной связи, изменяющей соотношение  $\eta_1$  и  $\eta_3$ . В случае, когда  $\eta_1/k$  близко к 1, даже крайне малая дисперсия АЧХ цепи обратной связи может существенно уменьшить число возможных режимов генерации.

В заключение отметим, что при наличии дисперсии ФЧХ кабеля частоту  $\omega$  в системе уравнений (2) следует считать неизвестной величиной, а также  $\varphi(\omega) \neq -\pi$ ,  $\varphi(3\omega) \neq -3\pi$ . Анализ системы (2) в этом случае показывает, что она определяет решение, непрерывное и совпадающее с полученными выше, когда дисперсия ФЧХ стремится к нулю. Малая дисперсия ФЧХ кабеля, мерой которой может служить величина  $\xi = 3\pi - |\varphi(3\omega_\pi)|$  (где  $\omega_\pi$  — частота, для которой  $|\varphi(\omega_\pi)| = \pi$ ), дает поправку к полученному выше решению в отсутствие дисперсии ФЧХ порядка  $\xi^2$ , а частота колебаний в этом случае будет определяться условием  $3A_3^2/A_1^2 = -\eta_1 \sin \varphi(\omega)/\eta_3 \sin \varphi(3\omega)$  и отличаться от  $\pi/\tau$  на величину порядка  $\xi$ . Поэтому в случае малой дисперсии ФЧХ цепи обратной связи последнюю можно считать бездисперсной без потери информации о форме стационарного движения  $U(t)$ .

Автор благодарен проф. В. В. Мигулину, а также О. В. Снигиреву за внимание к работе.

<sup>1</sup> Устойчивость решений здесь не рассматривается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Азыян Ю. М., Мигулин В. В. «Радиотехника и электроника», 1956, 1, вып. 4, 418.
2. Азыян Ю. М., Снигирев О. В., Мрктумов А. С. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. III, физ., астроном.», 1972, 13, № 1, 99.
3. Кугушев А. М., Голубева Н. С. Основы радиоэлектроники. М., 1969, с. 643 и 630.
4. Яворский Б. М., Деллаф А. А. Справочник по физике. С., 1968. с. 460.

Поступила в редакцию  
26.1 1976 г.

Кафедра  
физики колебаний

УДК 535.324

Ф. А. КОРОЛЕВ, А. Ю. КЛЕМЕНТЬЕВА, С. И. САГИТОВ

### ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ $\text{Na}_3\text{AlFe}_6$ , $\text{PbF}_2$ , $\text{As}_2\text{S}_3$ , ПОЛУЧЕННЫХ В ВЫСОКОМ И СВЕРХВЫСОКОМ ВАКУУМЕ

В связи с широким применением тонкопленочных интерференционных систем в приборостроении в настоящее время большое внимание уделяется изучению зависимости свойств пленок (оптических, механических и других) от физических условий в процессе их осуществления.

Так, в ряде работ [1—5] изучалась зависимость показателя преломления, плотности, коэффициента упаковки различных пленок от величины вакуума, скорости испарения и состава остаточных газов. Наличие остаточных газов влияет на пленку двояко, внося загрязнения в покрытие и оказывая воздействие на структуру слоя; при этом пленка образуется тем более пористая и рыхлая, чем хуже вакуум [6]. Подобные исследования проводились в диапазоне от  $10^{-8}$  до  $10^{-6}$  мм рт. ст.

С развитием техники сверхвысокого вакуума появилась возможность получить пленки в наиболее «чистых условиях», когда остаточные газы играют несравнимо меньшую роль в процессах роста и образования структуры тонкой пленки, следовательно, в условиях, способствующих образованию наиболее плотных пленок, сильнее связанных с подложкой. Поскольку с этими явлениями связана более высокая стойкость и стабильность покрытий, то изучение свойств покрытий при переходе к сверхвысокому вакууму представляет определенный интерес. Такое исследование свойств было проведено для фтористого магния  $\text{MgF}_2$  [7].

В нашей работе определялись и сравнивались показатели преломления пленок криолита  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , фтористого свинца  $\text{PbF}_2$  и трехсернистого мышьяка  $\text{As}_2\text{S}_3$ , полученных в вакууме  $10^{-5}$  и  $10^{-8}$  мм рт. ст. Чтобы проследить влияние одного фактора — глубины вакуума, мы стремились сохранить равенство всех остальных параметров: скорости испарения, температуры подложек, состава испаряемых материалов, толщины наносимых слоев. Обычно на практике недооценивается влияние скорости нанесения покрытия, тогда как эта скорость коренным образом влияет на свойства слоев. Так, при высоких скоростях нанесения покрытий  $> 20$  А/с неизбежен перегрев источника испарения, в результате чего наблюдается частичный распад молекул вещества [4, 7], загрязнение пленки и ухудшение ее оптических свойств. Скорость нанесения веществ в нашей работе составляла 20 А/с при расстоянии от источника испарения  $\sim 250$  мм. Толщина слоев составляла  $7 \lambda/4$  вблизи  $\lambda = 9000$  А.

Для определения показателя преломления покрытия были использованы соотношения, связывающие коэффициенты пропускания однослойного покрытия в экстремуме с показателями преломления слоя и подложки, приведенные в [8]. Приводимая формула имеет место в участках спектра, где поглощением веществ можно пренебречь:

$$n = \sqrt{\frac{n_0}{T_0}} \cdot (1 + \sqrt{1 - T_0}),$$

$n_0$  — показатель преломления подложки, а  $T_0$  — значение коэффициента пропускания слоя в экстремуме. В расчете учитывались поправки, которые появляются из-за присутствия второй поверхности подложки, на которую нанесены слои, а также вследствие