весных систем – зеемановской, спин-спиновых взаимодействий и фононов, и полученные нелинейные интегро-дифференциальные уравнения были решены с помощью ЭВМ М-222.

Оказалось, что все качественные особенности возникновения и поведения фононной лавины находят полное объяснение в рамках предложенной модели при хорошем совпадении количественных результатов. В частности, при значениях параметров, соответствовавших эксперименту, эффективная температура в пике лавины оказалась равной $T_{\text{эфф}}=1{,}5\cdot10^6\,^\circ\text{K}$ при $H_1=1$ *э*. В спектральном распределении горячих фононов выявились интересные особенности: во-первых, ширина пика лавины при $H_1=1$ *э* оказалась равной 25 *Мгц* при значительном смещении на крыло линии ЭПР, во-вторых, на некотором участке спада лавины возник второй пик в частотном распределении горячих фононов, что привело к двухэкспоненциальному закону убывания общего числа фононов, который и был зарегистрирован экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. *С. А. Альтшулер, Р. М. Валишев, А. Х. Хасанов.* Наблюдение фононного «узкого горла» с помощью рассеяния света Мандельштама – Бриллюэна. Письма в ЖЭТФ, 1969, *10*, 4, 179–181.
2. *С. А. Альтшулер, Р. М. Валишев, Б. И. Кочелаев, А. Х. Хасанов.* Обнаружение фононной лавины методом мандельштам-бриллюэновского рассеяния света при импульсном насыщении парамагнитного резонанса. Письма в ЖЭТФ, 1971, *13*, 10, 535–538.
3. *С. А. Альтшулер, Р. М. Валишев, Б. И. Кочелаев, А. Х. Хасанов.* Исследование фононной системы по мандельштам-бриллюэновскому рассеянию света в условиях насыщения парамагнитного резонанса. ЖЭТФ, 1972, *62*, 2, 639–651.
4. *М. И. Родак.* О возможных следствиях изменения спин-спиновой температуры спиновой системы в твердом теле. Физ. тв. тела, 1964, *6*, 2, 521–528.
5. *В. А. Ацаркин.* Проверка концепции спин-спиновой температуры в опытах по насыщению электронного парамагнитного резонанса. ЖЭТФ, 1970, *58*, 6, 1884–1895.

Казанский государственный университет
им. В. И. Ульянова-Ленина

Поступила
9 марта 1976 г.

УДК 534.86

ИСКАЖЕНИЯ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УСИЛЕНИЯ

С. П. Андреев, М. Г. Гордон

Искажения звуковых сигналов в системах автоматического регулирования усиления (АРУ) исследовались неоднократно, однако до настоящего времени не рассматривались детально явления, связанные с запаздыванием сигнала управления в петле регулирования АРУ, что всегда имеет место в реальных системах. В частном случае при фиксированных значениях коэффициента регулирования и амплитуды сигнала влияние запаздывания рассматривалось в работе [1]. Ниже показано, что запаздывание принципиальным образом влияет на характер работы систем АРУ, причем могут возникать заметные на слух специфические искажения звуковых сигналов.

Рассмотрим систему АРУ с обратной регулировкой, линейной характеристикой регулирования и «линейным» детектором и положим, что запаздывание определяется инерционностью цепи управления электронным регулятором. Запаздывание будем учитывать включением в петлю регулирования элемента задержки на время τ.

Ограничивая область рассмотрения $\alpha=\omega_0T_{\text{д}}\gg1$; $\theta=\omega_0\tau\gg1$ ($T_{\text{д}}$, τ – соответственно постоянная времени фильтра детектора и время задержки, ω_0 – круговая частота) и используя результаты, полученные в работе [2], напишем усредненное уравнение системы АРУ относительно напряжения $u_{\text{р}}$ на нагрузке детектора:

$$\frac{du_{\text{р}}}{dt}=\frac{\psi}{T_{\text{д}}\pi}f\eta(f),\qquad f=\left[K_0u_0\left(1-\frac{\beta_1}{u_{\text{п}}}u_{\text{р}}(t-\tau)\right)-u_{\text{р}}-u_{\text{п}}\right],\tag{1}$$

где η – единичная функция Хевисайда, K_0u_0 – амплитуда напряжения сигнала на выходе АРУ в отсутствие регулирования, $u_{\text{п}}$ – напряжение противосмещения, β_1 – коэффициент регулирования, при действии на входе АРУ последовательности биполярных импульсов

$$u_{\text{вх}}=\begin{cases}u_0(-1)^{k+1}, & \pi(k-1)\leqslant x\leqslant\pi(k-1)+\psi\\ 0, & \pi(k-1)+\psi<x<\pi k\end{cases},\qquad x=\omega_0t,\qquad k=1,2,3,\ldots.$$

Введем обозначения $x'=x\psi/\alpha\pi$; $\theta'=\theta\psi/\alpha\pi$; $g(x)=u_р/u_п=(A-1)\varphi(x)$; $A=K_0u_0/u_п$. Интегрируя выражение (1), получим рекуррентное соотношение, связывающее функции φ_n и φ_{n-1} на n, $(n-1)\theta'\leqslant x\leqslant n\theta'$ и $n-1$ шагах:

$$\varphi_n=\exp\{-[x'-(n-1)\theta']\}\varphi_{n-1}[(n-1)\theta']+1-\exp\{-[x'-(n-1)\theta']\}-$$
$$-\gamma_1\exp\{-[x'-(n-1)\theta']\}\int\limits_0^{x'-(n-1)\theta'} dx\,\varphi_{n-1}[x+(n-2)\theta']\exp x. \tag{2}$$

Здесь $\gamma_1=A\beta_1$, $\varphi_0\equiv0$. Условие прекращения роста напряжения регулирования определяется обращением в нуль правой части уравнения (1). Находя последовательно из формулы (2) функции φ_n на 1, 2,..., n шагах и подставляя в правую часть уравнения (1), мы получим это условие в виде

$$\sum_{k=0}^{n-1}(-1)^k\frac{(\gamma_1\exp\theta')^k}{k!}(x'-k\theta')^k=0,\qquad (n-1)\theta'\leqslant x'\leqslant n\theta'. \tag{3}$$

Отсюда легко получить уравнение, определяющее условие прекращения роста напряжения $u_р$ точно на границе n и $n+1$ шагов ($x'=n\theta'$):

$$\sum_{k=0}^{n-1}(-1)^k\frac{z^k}{k!}(n-k)^k=0,\qquad z=A\beta_1\theta'\exp\theta'. \tag{4}$$

Уравнение (4) содержит одну переменную, и его корни могут быть найдены численным методом. Для каждого номера n нужно брать наименьший корень, причем с ростом n значения корней убывают, что соответствует физически понятному требованию уменьшения допустимого превышения A порога срабатывания АРУ, при котором рост напряжения $u_р$ продолжается до границы n-го шага. Значения превышения порога A_n при фиксированных параметрах β_1 и θ', соответствующие прекращению роста напряжения $u_р$ на границе n и $n+1$ шагов, определяются из уравнения

$$A_n=z_n\exp(-\theta')/\beta_1\theta',\ n\geqslant2, \tag{5}$$
$$z_2=1>z_3=0{,}586>z_4=0{,}482>z_5=0{,}439 \text{ и т. д.}$$

Таким образом, в системах АРУ с запаздыванием, как следует из формул (3)–(5), имеет место разрыв петли регулирования, в принципе отсутствующий в системах без запаздывания. Помимо разрыва петли регулирования в системах АРУ с запаздыванием имеет место эффект перерегулирования, определяемый тем, что после разрыва регулирование продолжается в течение времени θ' и только после этого коэффициент передачи АРУ выходит на постоянное значение. И, наконец, отметим, что в системах АРУ с запаздыванием возможно обращение в нуль коэффициента передачи, что также отсутствует в системах без запаздывания.

Для оценки эффектов, связанных с запаздыванием, в конкретной системе АРУ необходимо задать любые два из трех параметров A, β_1, θ'. Например, зададим практически интересные значения коэффициента регулирования $\beta_1=10$ и времени запаздывания $\theta'=0{,}01$. Определяя из формулы (5) значения A_n и подставляя их в формулы (2), (4), получим, что при $A>10$ коэффициент передачи падает до нуля, при $10>A>4{,}7$ имеет место перерегулирование, при $A<4{,}7$ перерегулирование отсутствует.

Отметим, что эти эффекты имеют длительный характер, так как в практических системах АРУ время восстановления коэффициента передачи обычно равно нескольким секундам.

Из изложенного следует: 1) системы АРУ с запаздыванием не отрабатывают выбросы сигнала, длительность которых порядка времени запаздывания, что приводит к появлению искажений из-за ограничения сигнала в последующих звеньях тракта; 2) в области значений параметров АРУ $A\beta_1\theta'\exp\theta'\geqslant1$ происходит перерегулирование, при этом возникают заметные на слух искажения, которые можно условно определить как «заикание»; в области $A\beta_1\theta'\exp\theta'\ll1$ эффектами, связанными с запаздыванием, можно пренебречь.

Уменьшение искажений, связанных с запаздыванием, практически ограничивает быстродействие систем АРУ, поэтому расчет динамических характеристик АРУ необходимо проводить с учетом запаздывания, для этого можно использовать полученные в настоящей работе уравнения (2)–(5).

ЛИТЕРАТУРА

1. *B. A. Blesser, A. R. Kent.* Analysis of a feedbackcontrolled limiter using a logarithmic measuring scale. IEEE Trans. on Audio Electroacoustics, 1968, *AU*-16, 4, 481–485.
2. *М. Г. Гордон.* К теории систем АРУ звуковых сигналов. Радиотехника, 1976, *31*, 4, 79–81.

Всесоюзный научно-исследовательский кинофотоинститут

Поступила 10 ноября 1975 г.