

УДК 621.396

В. И. ГОСТЕВ, д-р техн. наук, А. Ю. ЛЫСОВОЛИК

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АРУ

Системы АРУ относят к особому классу нелинейных параметрических систем автоматического регулирования, анализ которых сложен [1—7]. Для описания динамических свойств систем АРУ обычно определяют реакции систем на типовые сигналы. В качестве таких сигналов используют ступенчатое воздействие, сигналы с гармонической огибающей, с огибающими вида случайной функции и в виде импульсов различной формы. По реакциям систем на типовые воздействия находят некоторые характеристики систем АРУ. Так, при ступенчатом воздействии определяют время установления (время регулирования процессов в системе). При сигнала-

лах с гармонической огибающей находят частотные характеристики для коэффициентов модуляции.

Рассмотрим основные характеристики систем АРУ при входных сигналах с огибающими вида $u(t) = U(1 + m \sin \Omega t)$ (1) и изложим численный метод расчета таких характеристик. Анализируемая математическая модель по огибающей существенно нелинейной системы АРУ (рис. 1) содержит усилитель с регулируемым коэффициентом усиления (на рисунке представлен нелинейным элементом НЭ и характеризуется регулировочной характеристикой $K(U_p)$), линейную цепь обратной связи с весовой функцией $W(t)$ и нелинейность, обусловленную введением напряжения задержки E_3 . При наличии напряжения задержки выходное напряжение АРУ $z(t)$ и напряжение на входе фильтра АРУ $z_1(t)$ связаны зависимостью

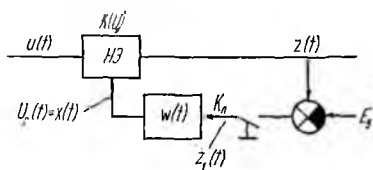


Рис. 1

$$z_1(t) = z(t) - E_3, z(t) \geq E_3; z_1(t) = 0, z(t) < E_3.$$

Для учета этой нелинейности в структурную схему системы введен ключ Кл, который замкнут при $z(t) \geq E_3$ и разомкнут при $z(t) < E_3$.

Регулирующее напряжение $U_p(t) = x(t)$ определим по формуле $x(t) = \int_0^t w(t - \lambda) z_1(\lambda) d\lambda$ (2), где $w(t)$ — весовая функция фильтра; $z_1(t)$ — напряжение на входе фильтра. Выходное напряжение системы $z(t) = K(U_p) u(t)$ (3).

Используя численное интегрирование по формуле трапеций с шагом интегрирования h , запишем расчетные формулы для вычисления выходного напряжения системы АРУ

$$x = h \left(\frac{1}{2} \omega_n z_{10} + \sum_{i=1}^{n-1} \omega_{n-i} z_{1i} + \frac{1}{2} \omega_0 z_{1n} \right);$$

$$z_{1n} = \begin{cases} z_n - E_3, & z_n > E_3; \\ 0, & z_n < E_3; \end{cases} \quad (4)$$

$$z_n = K(x_n) U(1 + m \sin \Omega nh);$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, x_n \equiv x(nh); z_n \equiv z(nh); z_{1n} \equiv z_1(nh).$$

При воздействии входного сигнала вида (1) установившийся выходной сигнал $z_{уст}(t)$ является периодической функцией. Его можно представить рядом Фурье

$$z_{уст}(t) = c_0 \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} m_k \sin(k\Omega t + \varphi_k) \right]. \quad (5)$$

Здесь

$$m_k = \frac{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}{c_0}; \quad \varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}; \quad (6)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T z_{\text{уст}}(\tau) \cos k\Omega\tau d\tau; \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T z_{\text{уст}}(\tau) \sin k\Omega\tau d\tau; \quad (7)$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T z_{\text{уст}}(\tau) d\tau; \quad T = 2\pi/\Omega.$$

Введем следующие основные характеристики систем АРУ.

1. Основной (по первой гармонике) комплексный коэффициент модуляции на выходе системы АРУ

$$M(j\Omega) = m_1(\Omega)e^{j\varphi_1(\Omega)}, \quad U = \text{const}, \quad m = \text{const}, \quad (8)$$

определяющий основную амплитудно-фазовую частотную характеристику АРУ.

2. Комплексные коэффициенты модуляции для высших гармоник на выходе систем АРУ $M_k = m_k e^{j\varphi_k}$ (9), посредством которых находим искажения выходного сигнала.

В частности, коэффициент искажений можно записать так:

$$K_{\text{иск}} = \frac{\sqrt{m_2^2 + m_3^2 + \dots + m_k^2}}{m_1} 100; \quad K_{\text{иск}} = K\Omega, \quad U = \text{const}, \quad m = \text{const};$$

$$K_{\text{иск}} = K_U, \quad \Omega = \text{const}, \quad m = \text{const}. \quad (10)$$

3. Быстродействие системы АРУ, определяемое временем регулирования t_p , которое измеряется временным отрезком от начала воздействия сигналом вида (1) до момента выполнения условия

$$z_{\text{макс } l+1} - z_{\text{макс } l} \leq \varepsilon, \quad (11)$$

где ε — наперед заданное малое число; $z_{\text{макс}}$ — максимальное значение выходного напряжения в периоде $T = 2\pi/\Omega$; l — номер периода. При этом t_p определяется целым числом периодов выходного напряжения $t_p \leq l_p T$.

4. Динамические диапазоны по входному и выходному сигналам

$$D_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{макс}}(1+m)}{U_{\text{мин}}(1-m)}; \quad D_{\text{вых}} = \frac{c_{0\text{макс}}(1+m_1)}{c_{0\text{мин}}(1-m_1)}, \quad (12)$$

вычисляемые при заданном коэффициенте модуляции входного сигнала m и максимально допустимых искажениях выходного сигнала, например, при максимально допустимом K_U .

Все перечисленные основные характеристики зависят от собственных параметров системы АРУ: регулировочной характеристики

усилителя $K(U_p)$, весовой функции линейного фильтра $\omega(t)$, напряжения задержки E_3 , а также, и это весьма существенно, от параметров входного сигнала U, m, Ω .

Вычисляя выходное напряжение системы АРУ при помощи формул (4) и определяя максимальные значения выходного напряжения в каждом периоде $T = 2\pi/\Omega$, в соответствии с выражением (11) находим время окончания переходного процесса в системе. После окончания переходного процесса по установившимся значениям $Z(t)$ в каждом периоде определяем коэффициенты функции Фурье $Z(t)$. Используя численное интегрирование по формуле трапеций с шагом интегрирования h , на основании выражений (7) запишем расчетные формулы для вычисления следующих коэффициентов:

$$a_k = \frac{2h}{T} \left(\frac{z_0}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} z_i \cos\left(\frac{2\pi}{T} kih\right) + \frac{z_n}{2} \right); \quad (13)$$

$$b_k = \frac{2h}{T} \sum_{i=1}^{n-1} z_i \sin\left(\frac{2\pi}{T} kih\right); \quad c_0 = \frac{h}{T} \left(\frac{z_0}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} z_i + \frac{z_n}{2} \right).$$

По значениям коэффициентов a_k, b_k, c_0 определяем значения m_k, φ_k из выражений (6) и рассчитываем основные характеристики по формулам (8) — (10), (12).

Итак, алгоритм расчета основных характеристик систем АРУ на входные воздействия вида (1) следующий.

Рассчитывается выходное напряжение системы АРУ по формулам (4) и одновременно в каждом периоде $T = 2\pi/\Omega$ определяется максимальное значение выходного напряжения $z_{\max l}$, где l — номер периода. Проверяется условие (11). По моменту выполнения этого условия определяется окончание переходного процесса и время регулирования t_p . В следующем периоде по значениям выходного напряжения по формулам (13) вычисляются коэффициенты ряда Фурье выходного установившегося напряжения и по этим коэффициентам в соответствии с формулами (6) рассчитываются характеристики по формулам (8), (10). Исходными данными при расчетах служат параметры фильтра АРУ, регулировочной характеристики усилителя АРУ, напряжение задержки E_3 , а также параметры входного напряжения U, m, Ω . Для определения динамического диапазона на выходе АРУ $D_{\text{вых}}$ необходимо иметь значение $U_{\text{мин}}$, по которому находится $C_{0\text{мин}}$. Динамические диапазоны рассчитываются по формулам (12) с использованием соотношений (4), (8) — (10).

Рассмотрим пример. Пусть

$$\omega(t) = 5 \left(\frac{5}{18} e^{-2t} - \frac{1}{2} e^{-10t} + \frac{2}{9} e^{-20t} \right);$$

$$k(U_p) = K_0 \exp(-\gamma U_p) = 50 \exp(-0,29 U_p), \quad \text{т. е.} \quad \omega_n = \omega(nh) =$$

$$= 5 \left(\frac{5}{18} e^{-2nh} - \frac{1}{2} e^{-10nh} + \frac{2}{9} e^{-20nh} \right);$$

$$K(x_n) = 50 \exp(-0,29 x_n), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Примем $E_3 = 10$ В.

При расчете выходного напряжения системы АРУ по формулам (4) при различных частотах входного сигнала (1) $\Omega = 2\pi/T$

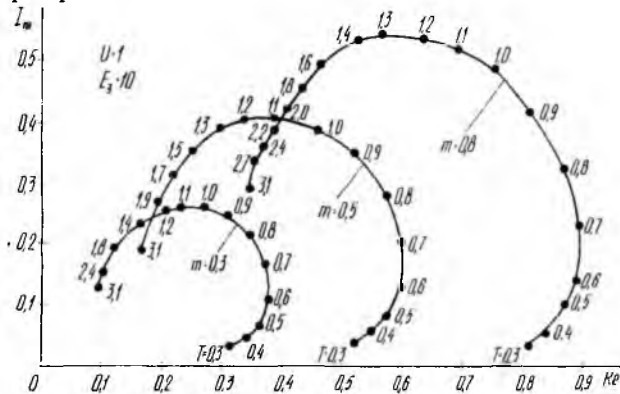


Рис. 2

удобно шаг интегрирования выбирать по формуле $h = T/L$, где L — определяемое количество отсчетных точек в одном периоде входного сигнала. При этом $\Omega nh = 2\pi nh/T = 2\pi n/L$, $n = 0, 1, 2, \dots$

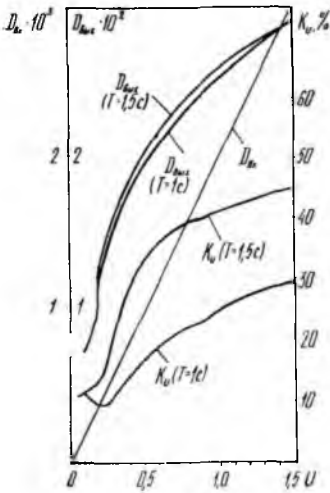


Рис. 3

На основании приведенных формул составлена программа для ЭВМ (дана в конце статьи) и рассчитаны основные характеристики системы АРУ для расчетного примера.

Основные амплитудно-фазовые частотные характеристики системы АРУ, определяемые основным комплексным коэффициентом модуляции $M(j\Omega)$, при $U = 1$ и различных коэффициентах модуляции входного сигнала изображены на рис. 2. Из анализа годографов следует, что изменение коэффициента модуляции m самым существенным образом влияет на комплексный коэффициент модуляции $M(j\Omega)$. В этом случае модуль коэффициента модуляции на выходе m_1 может значительно превышать коэффициент

модуляции входного сигнала в определенной области частот Ω (или $T = 2\pi/\Omega$). Изменения амплитуды входного сигнала влияют на годограф $M(j\Omega)$ значительно меньше, чем изменения m .

Как показывают расчеты, существенное значение в выходном напряжении рассматриваемой системы АРУ имеет, кроме первой, только вторая гармоника. Модуль комплексного коэффициента модуляции третьей гармоники m_3 на порядок меньше m_2 для всех указанных на рис. 2 частот модуляции Ω (периодов T).

В расчетном примере положим $U_{\min} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ В, $m = 0,5$.

Тогда $D_{\text{вх}} = 2 \cdot 10^3 U$, где $U = U_{\text{макс}}$. На рис. 3 изображена зависимость $D_{\text{вых}}, K_U$ от амплитуды $U = U_{\text{макс}}$ при двух значениях периода T входного сигнала. Из графиков следует, что при $T = 1$ с, $K_U \leq 20$ % динамические диапазоны по входу и выходу составляют

$$D_{\text{вх}} \approx 1,26 \cdot 10^3; D_{\text{вых}} \approx 2,14 \cdot 10^2; D_{\text{вх}} \approx 0,68 \cdot 10^3; D_{\text{вых}} \approx 1,67 \cdot 10^2,$$

$$T = 1,5 \text{ с}, K_U \leq 20 \text{ \%}.$$

Таким образом, изложенный численный метод расчета отличается простотой, дает возможность определять характеристики систем АРУ при различных весовых функциях фильтра, любых напряжениях задержки, любых нелинейных регулировочных характеристик усилителя.

Все характеристики системы АРУ рассчитываются на конечном интервале времени $t_p + T$, поэтому точность расчетов может быть весьма высокой. Полученные в результате расчетов основные характеристики в определенной области значений амплитуд коэффициента модуляции m и частот Ω дают возможность производить сравнительную оценку систем, что может служить основой для рекомендаций по проектированию систем АРУ.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АРУ

```

ARU:PROCEDURE OPTIONS (MAIN);
/*К:КОЭФФИЦИЕНТ;
Н:ШАГ ИНТЕГРАЛ.
U:НАПРЯЖЕНИЕ ВХОД. V:СУММЫ.
N:ЧИСЛО СУММЫ.*/
/*ОПИСАНИЕ ДАННЫХ*/
DCL(Q, PAZ)BIN FIXED;
DCL(I, K, N, K1, M1)BIN FIXED;
DCL(III, J1)BIN FIXED;
DCL(T, U, H, OM, EZ, V)FLOAT;
DCL(M, W, Z1, X, Z)(?:5?:?)FLOAT;
M=?: W=?: Z=?: X=?: Z1=?:
DCL MAX(1:2?)FLOAT;
DCL(EPS)FLOAT;
DCL(TREGU)FLOAT;
DCL(KOM, KMI(1:3))FLOAT;
DCL KOEF ENTRY(FLOAT, FLOAT, FLOAT, FLOAT);
/*ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА И ВЫВОДА КОЭФФИЦИЕНТОВ А, В, АВ, F1*/
КОЕF:PROCEDURE(LG, PG, МАХR, МАХТ);
/*LG:ЛЕВАЯ ГРАНИЦА, PG:ПРАВАЯ ГРАНИЦА,
МАХR:ПРЕДЫДУЩИЙ МАКСИМУМ, МАХТ:ТЕКУЩИЙ МАКСИМУМ*/
DCL(LG, PG, МАХR, МАХТ)FLOAT;
DCL AO FLOAT;

```

```

DCL MI FLOAT;
DCL(A, B, FI, S)FLOAT;
DCL I BIN FIXED;
MAXT=Z(LG);
PAZ=LG;
DO I=LG+1 TO PG;
IF MAXT<Z(I)THEN DO MAXT=Z(I); PAZ=I; END;
END;
IF ABS(MAXP-MAXT)>EPS THEN RETURN;
TREGU=PAZ *H;
AO=Ø;
DO I=LG TO(PG-1);
AO=AO+Z(I);
END;
AO=H/T*(Z(LG)/2+AO+Z(PG)/2);
A=Ø;
DOI=LG TO(PG-1);
A=A+Z(I)*cos(Ø.12566*I*K1);
END;
A=(2*H/T)*(Z(LG)/2+A+Z(PG)/2);
B=Ø; DO I=LG TO(PG-1);
B=B*Z(I)*SIN(Ø.12566*I*K1);
END;
B=2*H*B/T;
AB=SQRT(A**2+B**2);
MI=AB/AO;
IF U<Ø,1 THEN
SUM=AO*(1-MI);
IF U>=Ø,1 THEN
DID=AO*(1+MI)/SUM;
KMI(K1)=MI;
FI=57, 32*ATAN(A/B);
PUT DATA(K1, AO, MI, FI, TREGU, PAZ)SKIP;
PI=1
END КОЕФ; /*КОНЕЦ ПРОЦЕДУР*/
/*ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ*/
GET DATA(K, U, EZ, MI, T, EPS)COPY;
PUT EDIT('РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АРУ')(PAG, SKIP, A);
PUT EDIT('КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ K=', K)(SKIP, A, F(3));
T=1.5;
PUT EDIT('ПЕРИОД ФУНКЦИИ T=', T)(SKIP, A, F(6,3));
PUT EDIT('ОПОРНОЕ ЗНАЧЕНИЕ EZ=', EZ)(SKIP, A, F(3));
PUT EDIT('ЧИСЛО ГАРМОНИК M1=', M1)(SKIP, A, F(3));
PUT EDIT('РЕЗУЛЬТАТЫ')(SKIP(2), A);
PUT EDIT('ТОЧНОСТЬ СРАВНЕНИЯ МАКСИМУМОВ EPS=', EPS)(SKIP,
A, F(2, 3));
X(Ø)=Ø;
Z(Ø)=5Ø;
Z1(Ø)=4Ø;
DCL(SUM, DID)FLOAT;
SUM=Ø; DID=Ø;
DO U=1,5E-3,0.1 BY Ø.1 TO 1.5;
PUT EDIT('НАПРЯЖЕНИЕ ВХОДА U=', U)(SKIP, A, F(6, 4));
H=T/5Ø;
IK1=Ø;
DO K1=1 TO M1;
IF K1=1 THEN GO TO MET;
DO N=Ø TO 5ØØ;
M(N)=U*(1+Ø.5*SIN(Ø.12566*N));
W(Ø)=Ø;
IF N>Ø THEN

```

```

(NOUNDERFLOW);
W(N) = 5*(5/18*EXP(-2*N*H) - 1/2*EXP(-10*N*H) + 2/9*EXP(-20*N*H));
/*ВЫЧИСЛЕНИЕ СУММЫ*/
V = 0;
DO I=1 TO(N-1);
V = V + W(N-1)*Z1(I);
END;
X(N) = H*(0.5*W(N)*Z1(0) + V);
Z(N) = M(N)*K*EXP(-0.29*X(N));
IF Z(N) < EZ THEN Z1(N) = 0;
ELSE Z1(N) = Z(N) - EZ;
END;
MET:
MAX(1) = Z(1);
DO I=2 TO 50;
IF MAX(1) < Z(I) THEN MAX(1) = Z(I);
END;
III = 0;
DO I=1 TO 9;
CALL КОЕЕ(I*50, (I+1)*50, MAX(I), MAX(I+1));
IF III=1 THEN
DO; IKI=IKI+1;
IF IKI > 2.5 THEN
DO;
KOM = SQRT(KMI(2)**2 + KMI(3)**2)/KMI(1);
PUT EDIT('КОЭФФИЦИЕНТ МОДУЛЯЦИИ=', KOM) (SKIP, A, F(10,5));
PUT EDIT('ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН=', DID) (SKIP, A, F(10,5));
END;
GO TO MK1;
END;
END;
MK1:
END
END
END ARU:

```

Список литературы: 1. *Тартаковский Г. П.* Динамика систем автоматической регулировки усиления. — М.: Госэнергониздат, 1957. — 200 с. 2. *Кривицкий Б. Х.* Автоматические системы радиотехнических устройств. — М.: Госэнергониздат, 1962. — 220 с. 3. *Крохин В. В.* Элементы радиоприемных устройств. — М.: Сов. радио, 1964. — 180 с. 4. *Кривицкий Б. Х., Салтыков Е. Н.* Системы автоматической регулировки усиления. — М., Радио и связь, 1982. — 300 с. 5. *Гостев В. И., Алдаев А. А.* Численный анализ систем АРУ//Радиотехника. — 1984. — № 11. — С. 25—28. 6. *Гостев В. И., Фенев Д. В.* Частотный анализ систем АРУ//Радиотехника. — 1984. — № 2. — С. 10—12. 7. *Гостев В. И.* Расчет переходных процессов в системе АРУ с заданной регулировочной характеристикой//Радиотехника. — 1985. — № 11. — С. 30—33.

Поступила в редколлегия 08.04.86