

А. И. ХЯННИКЯЙНЕН, канд. техн. наук, А. В. ГОЛЕНКО,
В. М. КАТАЛЕВСКИЙ, канд. техн. наук

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СКАНИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА В СИСТЕМАХ ВИБРОИСПЫТАНИИ

Виброиспытания электронной аппаратуры (ЭА) — важный этап в обеспечении надежности специализированных устройств [1], позволяющий определить динамические параметры и проверить работоспособность изделий при действии вибрации. Виброиспытательные системы реализуют возбуждение механических колебаний в широком диапазоне частот, а также допускают регулирование амплитуды и частоты по необходимому закону [1; 2]. В современных системах развертка выходной частоты управляющего генератора производится по линейному и экспоненциальному законам, реже по логарифмическому, что отвечает требованиям ГОСТ 16962—71.

При развертке частоты генератора по линейному закону $\omega(t) = \omega_n + v_\omega t$. Здесь ω_n — нижняя граница диапазона развертки; v_ω — скорость сканирования частоты. Данный способ применяется при испытаниях на обнаружение резонансных частот (испытания 101) и на виброустойчивость (испытания 102) [2]. Скорость сканирования v_ω постоянна во всем диапазоне развертки $[\omega_n, \omega_b]$, где ω_b — верхняя граница диапазона:

$$v_\omega = \text{const при } \omega \in [\omega_n, \omega_b]. \quad (1)$$

Согласно указанному ГОСТу

$$v_\omega \leq \begin{cases} 1 \text{ окт/мин при испытаниях 101;} \\ 2 \text{ окт/мин при испытаниях 102.} \end{cases}$$

Время развертки частоты в заданном диапазоне за один цикл определяется выражением $t_p = (\omega_b - \omega_n) v_\omega$ (1а).

При развертке частоты генератора по экспоненциальному закону $\omega(t) = \omega_n \exp(\alpha_2 t)$. Здесь α_2 — постоянная нарастания выходной частоты управляющего генератора. Запишем скорость сканирования v_ω и время развертки t_p при испытаниях 103 на виброустойчивость:

$$v_\omega = v_\omega(t) = \alpha_2 \omega_n \exp(\alpha_2 t); \quad (2)$$

$$t_p = (1/\alpha_2) \ln(\omega_b/\omega_n). \quad (2а)$$

Значение α_2 можно определить из формулы (2а) при известных для каждой степени жесткости испытаний значениях t_p , ω_b , ω_n [2]. Для логарифмического закона можно записать аналогичные зависимости.

Развертка частоты управляющего генератора указанными способами не рациональна. Линейный и экспоненциальный законы обеспечивают для каждой частоты $\omega \in [\omega_n, \omega_b]$ одинаковое время пребывания испытуемого изделия или число циклов нагружения. Однако наиболее важными частотами вибронгруженных устройств ЭА являются частоты вибрации, совпадающие с собственными частотами изделия [1]. Для сокращения продолжительности виброиспытаний целесообразно производить развертку выходной частоты управляющего генератора таким образом, чтобы скорость сканирования уменьшалась при приближении к резонансной частоте и увеличивалась по мере удаления от последней. Такое управление можно осуществлять, если скорость сканирования изменять в зависимости от некоторых динамических характеристик изделия, получаемых непосредственно в процессе испытаний.

При управлении скоростью сканирования выходной частоты генератора по крутизне амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) объекта испытаний [3]

$$v_\omega = v_\omega(\omega) = |\alpha_3 dx(\omega)/d\omega| + v_0, \quad (3)$$

где α_3 — коэффициент влияния скорости нарастания АЧХ объекта испытаний на скорость сканирования частоты при развертке последней; $\kappa(\omega)$ — коэффициент динамического усиления объекта испытаний; v_0 — постоянная составляющая скорости сканирования, необходимая для устранения остановки процесса развертки частоты управляющего генератора на резонансных частотах изделия в диапазоне частот развертки. Время

$$t_p = \int_{\omega_n}^{\omega_b} \frac{d\omega}{\alpha_3 |dx(\omega)/d\omega| + v_0}. \quad (3a)$$

При известной функции $\kappa(\omega)$ его можно найти численными методами.

Для приближенного анализа зависимостей (3), (3a) допустим, что объект испытаний в диапазоне $[\omega_n, \omega_b]$ ведет себя как механическая система с одной степенью свободы. Подставив в формулу (3) известную зависимость коэффициента динамического усиления от частоты $\kappa(\omega)$ для системы с одной степенью свободы [4], получим

$$v_\omega = \frac{\alpha_3 v}{\omega_0} \frac{2|1 - v^2| + (\vartheta/\pi)^2}{\sqrt{[(1 - v^2)^2 + (\vartheta/\pi)^2 v^2]^3}}, \quad (4)$$

где ϑ — логарифмический декремент затухания; ω_0 — собственная частота объекта испытаний; v — коэффициент расстройки, или частное отношение, $v = \omega/\omega_0$. Обозначим $2\delta^2 = (\vartheta/\pi)^2 \omega_0^2$. Здесь δ — коэффициент затухания. Тогда из выражения (4) следует

$$v_\omega = v_0, \quad \omega \ll \omega_0; \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2, \quad \omega \gg \omega_0. \quad (5)$$

Скорость сканирования выходной частоты генератора при законе (3) одинакова в областях частот, близких к собственной частоте объекта и значительно удаленных от последней, что обуславливает необходимость в анализе производных более высоких порядков от функции $\kappa(\omega)$ по частоте ω .

Следующим недостатком использования закона (3) для управления скоростью сканирования выходной частоты генератора является зависимость вида получаемой при развертке частоты функции $\kappa(\omega)$ от скорости сканирования [4]. Степень зависимости определяется свойствами испытуемого изделия.

Определим значения коэффициента α_3 , при которых априори можно принять, что АЧХ объекта испытаний не зависит от скорости развертки. Согласно работе [2] поставим условие: в пределах полосы пропускания резонансного пика скорость развертки должна быть не более v^* (1—2 окт/мин):

$$v_{\omega} \Big|_{\omega=\omega_0-\Delta\omega} = \alpha_3 \left| \frac{d\kappa(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0-\Delta\omega} + v_0 \leq v^*.$$

Для упрощения вычислений положим, что испытуемый объект — высокодобротная механическая система. Тогда

$$\alpha_3 \leq \frac{\omega_0(4Q-1)^2}{16Q^3(2Q-1)}(v^* - v_0),$$

где Q — добротность системы. Для наихудшего случая примем $\omega_0 = \omega_B$,

$$\alpha_3 \cong \frac{\omega_B}{2Q^3}(v^* - v_0). \quad (6)$$

При этом оценка времени

$$t_p = \frac{Q}{\omega_0} \frac{1}{(v^* - v_0)} \int_{\omega_H}^{\omega_B} \left(v + \frac{1}{v} \right)^2 d\omega \quad (7)$$

может быть рассчитана при известных значениях входных величин.

В устройстве, описанном в работе [5], управление скоростью сканирования осуществляется по фазочастотной характеристике (ФЧХ) изделия, т. е. скорость сканирования принимается пропорциональной фазовому сдвигу между вынужденными и вынуждающими колебаниями:

$$v_{\omega} = v_{\omega}(\omega) = \alpha_4 \left[\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi(\omega) \right]. \quad (8)$$

Здесь $\Delta\varphi(\omega)$ — сдвиг фаз, $\Delta\varphi(\omega) = \text{arctg} \{ \delta v / \pi(1 - v^2) \}$; α_4 — коэффициент влияния сдвига фаз относительно $\pi/2$ на скорость

развертки частоты. Время t_p определяется с учетом времени затухания $t_{зат}$ переходных процессов на резонансных частотах:

$$t_p = \int_{\omega_n}^{\omega_b} \frac{d\omega}{\alpha_4 \left| \frac{\pi}{2} - \Delta\varphi(\omega) \right|} + t_{зат} \quad (8a)$$

Его значение можно найти численными методами.

Для приближенного вычисления согласно зависимостям (8), (8a) считаем объект испытаний высокодобротной механической системой с одной степенью свободы, имеющей ступенчатую ФЧХ. Скорость сканирования

$$v_\omega = \begin{cases} \alpha_4 \left\{ \frac{\pi}{2} \right\}, & \omega \neq \omega_0; \\ 0, & \omega = \omega_0. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда время развертки

$$t_p = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\alpha_4} (\omega_b - \omega_n) + t_{зат} \quad (10)$$

Для оценки $t_{зат}$ принимаем время, за которое амплитуда собственных колебаний механической системы уменьшится в e раз на резонансной частоте:

$$t_{зат} = \frac{2\pi}{\omega_0 \delta} = \frac{1}{\delta} = \frac{2Q}{\omega_0} \quad (11)$$

Значение параметра α_4 в формуле (9) выбирается из соотношения $\alpha_4 = 2v_{\max}/\pi$, где v_{\max} — максимально допустимая скорость развертки применяемой виброиспытательной системы.

Оценим затраты времени на проведение испытаний при различных перечисленных законах управления скоростью сканирования выходной частоты управляющего генератора. Положим, что испытуемое изделие имеет в диапазоне частот от $\omega_n = 2\pi \cdot 10$ 1/с до $\omega_b = 2\pi \times 200$ 1/с один резонансный пик $\omega_0 = 2\pi \cdot 100$ 1/с и $Q = 10$. Виброиспытательная система допускает скорость развертки до $v_{\max} = 40$ Гц/мин; при испытаниях 101 положим $v^* = 10$ Гц/мин, при испытаниях 102 — $v^* = 20$ Гц/мин. Сравнение результатов, приведенных в таблице, позволяет оценить затраты времени на испытания при различных способах развертки выходной частоты управляющего генератора. Здесь 1 — линейный закон изменения частоты, 2 — экспоненциальный. 3 — управление по АЧХ, 4 — по ФЧХ:

Закон развертки частоты	Продолжительность испытаний, мин		
	101	102	103
1	19	9,5	—
2	—	—	12
3	11,9	5,25	5,25
4	4,75	4,75	4,75

Список литературы: 1. Фролов В. А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры. К., 1979. 128 с. 2. ГОСТ 16962—71. Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия: Требования и методы испытаний. Введ. 01.01.78. 3. А. с. 862016 СССР. Вибростенд для испытания объектов на резонансных частотах/В. Ю. Гусев, С. С. Кораблев, А. П. Проскураков и др.//Бюл. изобрет. 1981. № 33. С. 224. 4. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти т. Т. 1. Колебания линейных систем/Под ред В. В. Болотина. М., 1978. 352 с. 5. А. с. 1097908 СССР. Устройство для виброиспытаний/А. В. Голенко, А. И. Хяникияйнен//Бюл. изобрет. 1984. № 22. С. 127.

Поступила в редколлегию 29.12.84.

УДК 621.312

Н. И. СЛИПЧЕНКО, Г. И. ЯЛОВЕГА

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ЧАСТОТНО-ГАРМОНИЧЕСКОГО МНОГОУСТОЙЧИВОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО КОНТУРА

Частотно-гармонический многоустойчивый элемент (ЧГМЭ) можно использовать в радиоимпульсных системах обмена информацией в качестве приемно-передающего устройства в схемах с многозначным кодированием информации, как пересчетное или запоминающее устройство, функциональный преобразователь [1, 2].

Схема ЧГМЭ (рис. 1) представляет собой последовательно-параллельный колебательный контур с нелинейной емкостью $p-n$ -перехода или МДП-структуры и с цепью внутренней обратной связи. Питание колебательного контура осуществляется прямоугольными импульсами $U_r(t)$ большой скважности $T/\tau_{\text{имп}} \gg 1$, где T — период следования; τ — длительность импульсов. Управление многоустойчивым элементом, т. е. перевод из одного устойчивого состояния в другое, осуществляется подачей управляющего импульса $U_{\text{упр}}$ в цепь автосмещения, что приводит к изменению напряжения смещения $E_{\text{см}}$, а следовательно, к перестройке резонансной частоты контура на другую гармоническую составляющую линейчатого спектра частот [3].

При создании элементов в интегральном исполнении получение индуктивностей и полупроводниковых емкостей с большими значениями добротностей связано со значительными трудностями технологического характера. Исходя из этого теорети-

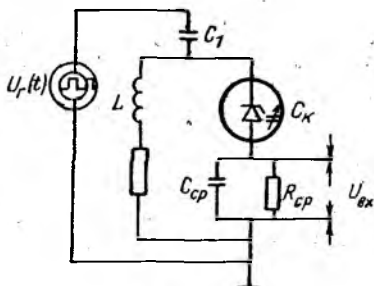


Рис. 1

ческий анализ ЧГМЭ необходимо проводить с учетом влияния на его результирующую амплитудно-частотную характеристику соседних гармонических составляющих спектра питающего напряжения, попадающих в полосу пропускания контура.

Математическая модель ЧГМЭ, созданная с учетом работы [4], при воздействии на систему $2n+1$ гармонических составляющих представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, одно из которых (второго порядка) описывает эквивалентный колебательный контур, а другое (первого порядка) — цепь обратной связи:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = - \left\{ \frac{\lambda}{\lambda+1} x \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{h}{\lambda+1} (1 + \lambda \xi + \lambda \xi x + \right. \\ \left. + \frac{\lambda dx}{h dt}) \frac{dx}{dt} + \frac{\omega^2 x^2}{2} \right\} + \left[\frac{\lambda}{\lambda+1} \frac{U_{\text{нмн}} \Omega_1}{\pi \varphi_k (b+1)} \sqrt{h^2 + k^2 \Omega^2} P_k(\Omega_1 t) \right]; \quad (1)$$

$$\sin(k\Omega_1 t + \beta_k); \quad \frac{db}{dt} = - \frac{b}{R_\Phi C_\Phi} + \frac{F(a)(1+b) - \left(b + \frac{\varphi_k}{\varphi_k}\right)}{R_1 C_\Phi} \alpha_0. \quad (2)$$

Здесь x — нормированный заряд на нелинейной емкости C_k ,

$$x = \frac{q}{2C_k \varphi_k (1+b)}; \quad \omega^2 = \frac{1 + \frac{R}{R_3}}{LC_k(1+\lambda)}; \quad \lambda = \frac{C_1}{C_k} \ll 1; \quad h = \frac{R}{L}; \\ \xi = 1 + \frac{1}{h\tau_3}; \quad b = \frac{E_{\text{см}}}{\varphi_k}; \quad F(a) = \left| -2a + \frac{2}{3}a^2 + \frac{a^3}{3} + \frac{a^4}{36} \right|;$$

$$P_k(\Omega_1 t) = \left\{ \left[\sum_{n=1}^m \sin(n\Omega_1 t - \alpha_{k-n}) \sin z_{k-n} - \sin(n\Omega_1 t + \alpha_{k+n}) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sin z_{k+n} - \sin \alpha_k \sin z_k \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^m \cos(n\Omega_1 t - \alpha_{k-n}) \sin z_{k-n} + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos(n\Omega_1 t + \alpha_{k+n}) \sin z_{k+n} + \cos \alpha_k \sin z_k \right]^2 \right\}^{1/2},$$

$$\tau_3 = C_1 R_3; \quad z_k = \frac{k\Omega_1 \tau}{2}; \quad z_{k+n} = \frac{(k+n)\Omega_1 \tau}{2};$$

$$z_{k-n} = \frac{(k-n)\Omega_1 \tau}{2}; \quad \alpha_k = -\varphi_k + \text{arctg} \left(-\frac{h}{k\Omega_1} \right);$$

$$\alpha_{k-n} = -\varphi_{k-n} + \text{arctg} \left[-\frac{h}{\Omega_1(k-n)} \right];$$

$$\alpha_{k+n} = -\psi_{k+n} + \text{arc tg} \left[-\frac{h}{\Omega_1(k+n)} \right];$$

$$\psi_k = \text{arc tg} \frac{1 - \cos k\Omega_1\tau}{\sin k\Omega_1\tau}; \quad R_s = \frac{\pi R_i}{\theta - \sin \theta \cos \theta},$$

$$R_i = \frac{\text{tg } \theta - \theta}{\pi}; \quad \alpha_\theta = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)};$$

$\beta_k =$

$$= \frac{\sum_{n=1}^m \cos(n\Omega_1 t - \alpha_{k-n}) \sin z_{k-n} + \cos(n\Omega_1 t + \alpha_{k+n}) \sin z_{k+n} + \cos \alpha_k \sin z_k}{\sum_{n=1}^m \sin(n\Omega_1 t - \alpha_{k-n}) \sin z_{k-n} - \sin(n\Omega_1 t + \alpha_{k+n}) \sin z_{k+n} - \sin \alpha_k \sin z_k};$$

$C_k = C_{k0}(1+b)^{-x}$; $0 < x \leq 1$; θ — угол отсечки;

φ_k — контактная разность потенциалов; $E_{см}$ — напряжение автоматического смещения; a — амплитуда первой гармоники заряда; k — номер гармоники, на которую настроен ЧГМЭ; Ω_1 — расстояние между спектральными составляющими; $L, R, C_1, R_\Phi, C_\Phi$ — параметры цепи; R_i — внутреннее сопротивление частично открытого $p-n$ -перехода; $U_{имп}$ — амплитуда импульсов питания; φ_k — коэффициент аппроксимации вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода.

При добротности контура $Q=30-50$ можно ограничиться учетом только трех гармонических составляющих, попадающих в полосу пропускания с номерами $k, k-1, k+1$. Для случая нелинейной емкости полупроводникового диода со ступенчатым распределением легирующих примесей $x = \frac{1}{2}$.

Если ЧГМЭ настроен на k -ю ($\omega \approx k\Omega_1$) гармоническую составляющую, то решение уравнения (1) во втором приближении имеет вид

$$x = a \cos(k\Omega_1 t + \vartheta) + \frac{a^2}{12} \left(1 + \frac{R}{R_s} \right) \cos 2(k\Omega_1 t + \vartheta) - \frac{a^2}{4} \left(1 + \frac{R}{R_s} \right) - \xi \frac{\lambda}{\lambda+1} \frac{n}{6} \frac{a^2}{k\Omega_1} \sin 2(k\Omega_1 t + \vartheta), \quad (3)$$

где амплитуда a и фаза ϑ определяются системой дифференциальных уравнений

$$\frac{da}{dt} = -\frac{1}{2} \left(ha + \frac{\lambda}{\lambda+1} \xi ha + \frac{\lambda}{\lambda+1} \xi \frac{ha}{3} \right) + \frac{[U_{имп} \Omega_1 P_k(\Omega t) \sqrt{k^2 \Omega_1^2 + h}] \cos(\beta_k - \vartheta)}{2\pi \varphi_k (1+b) \omega};$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega - k\Omega_1 - \frac{5}{48}\omega\alpha^2 + \frac{5}{48}\frac{\lambda}{\lambda+1}k\Omega_1\alpha^2 - \frac{1}{4}\frac{h^2}{\omega^2}\left(\frac{1+\lambda\xi}{\lambda+1}\right)^2 - \frac{[U_{\text{имп}}\Omega_1 P_k(\Omega_1 t) \sqrt{k^2\Omega_1^2 + h}] \sin(\beta_k - \vartheta)}{2\pi\varphi_k(1+b)a\omega} \quad (4)$$

Для стационарного режима работы $\frac{da}{dt} = \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{db}{dt} = 0$.

В процессе работы элемента, когда он точно настроен на соответствующую спектральную составляющую, заряд на конденсаторе фильтра практически не изменяется: $E_{\text{см}} = \text{const}$. При исследовании стационарного режима необходимо использовать условие

$$P_k(\Omega_1 t) = P_{k \text{ макс.}}$$

Тогда для интервала $0 < t \leq \tau$, в течение которого существует импульс и контур работает в режиме вынужденных колебаний, амплитудно-частотная характеристика

$$\left\{ \left(\frac{\lambda}{\lambda+1} \right)^2 \frac{U_{\text{имп}}^2 P_{k \text{ макс.}}^2}{\varphi_k (1+b) \pi k^2 a_m^2} \left(1 + \frac{1}{Q^2} \right) - \frac{1}{Q^2} \left[1 + \frac{\lambda}{\lambda+1} \xi \left(1 - \frac{a_m^2}{4} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{5}{24} a_m^2 \left(1 + \frac{\lambda}{\lambda+1} \right) - \frac{1}{2Q^2} \left(\frac{1+\lambda\xi}{1+\lambda} \right)^2 = 0. \quad (5)$$

Здесь a_m — максимальное значение амплитуды первой гармоники заряда; $Q = \frac{k\Omega_1 t}{R}$.

Из уравнения (2) с учетом $\frac{db}{dt} = 0$ находим зависимость

$$b = \frac{F(a_m) - \frac{\varphi_k}{\varphi_k}}{1 + \frac{R_i}{R\varphi_{\alpha_n}} - F(a_m)}, \quad (6)$$

соответствующую напряжению на потенциальном выходе ЧГМЭ для каждого устойчивого состояния. Последние определяются совместным решением уравнений (5), (6).

Фазочастотную характеристику получим из системы уравнений (4):

$$\vartheta = \beta_k - \text{arctg} \frac{\frac{5}{48} k\Omega_1 \left(1 + \frac{\lambda}{\lambda+1} \right) a_m^2 + \frac{1}{4} \frac{h^2}{k^2\Omega_1^2} \left(\frac{1+\lambda\xi}{1+\lambda} \right)^2}{\frac{1}{2} \left(h + \frac{\lambda}{\lambda+1} \xi h + \frac{\lambda}{\lambda+1} \xi \frac{h a_m^2}{4} \right)}. \quad (7)$$

Чтобы определить закон изменения амплитуды a и фазы ϕ высокочастотных колебаний в контуре, необходимо вычислить

$$a = a_m P_k(\Omega_1 t). \quad (8)$$

В интервале $\tau < t \leq T$ высокочастотные колебания затухают, так как импульс на контур не воздействует. В течение этого времени амплитуда первой гармоники заряда изменяется по закону

$$a(t) = a_\tau e^{-ht}, \quad (9)$$

где $0 \leq t \leq T - \tau$; a_τ — амплитуда в момент окончания действия импульса напряжения питания.

Форма напряжения на нелинейном контуре асимметрична [4]. Амплитуды положительной U_{m+} и отрицательной U_{m-} полуволн напряжения связаны с амплитудой первой гармоники заряда соотношениями

$$\begin{aligned} U_{m+} &= \varphi_k (1 + b) \left| -2a + \frac{2}{3} a^2 + \frac{a^3}{3} + \frac{a^4}{36} \right|; \\ U_{m-} &= \varphi_k (1 + b) \left| -2a + \frac{2}{3} a^2 - \frac{a^3}{3} + \frac{a^4}{36} \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

Используя инженерную методику расчета ЧГМЭ [5], можно получать параметры последовательности прямоугольных импульсов, при которых наблюдается наибольшее число устойчивых состояний для следующих параметров цепи:

$$C_\Phi = 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}; \quad C_1 = 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}; \quad C_{k_0} = 4,55 \cdot 10^{-10} \text{ Ф};$$

$$L = 2,38 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \quad \varphi_k = 0,8 \text{ В}; \quad \varphi'_k = 0,4 \text{ В};$$

$$R_l = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}; \quad R_\Phi = 5 \cdot 10^5 \text{ Ом}; \quad R = 49 \text{ Ом}.$$

Наибольшее число устойчивых состояний, равное пяти, наблюдается при таких значениях параметров последовательности импульсов: $\Omega_1 = 3,77 \cdot 10^4$ ГЦ; $T = 1,67 \cdot 10^{-4}$ с; $\tau = 1,38 \cdot 10^{-5}$ с; $U_{\text{имп}} = 34$ В. Значения k , характеризующие номера гармоник, на которые последовательно настраивается элемент, равны 26 — 30. Период

полного низкочастотного колебания в контуре $T_{\Omega_1} = \frac{2\pi}{\Omega_1}$,

а время действия импульса τ , причем $T_{\Omega_1} > \tau$. Поэтому в течение действия импульса в контуре происходит только какая-то часть данного колебания.

На рис. 2 показано изменение амплитуды отпирающей полуволны напряжения в контуре для $k=28$ ($E_{\text{см. теор}} = 1,106$ В; $E_{\text{см. эксп}} = 1,04$ В) в случае полного низкочастотного колебания. Данная форма колебаний имеет место, когда гармонические

составляющие воздействуют на элемент все время. С помощью соотношений (5), (6), (8)—(10) определяем форму напряжения на нелинейном контуре при воздействии последовательности прямоугольных импульсов (рис. 3).



Рис. 2

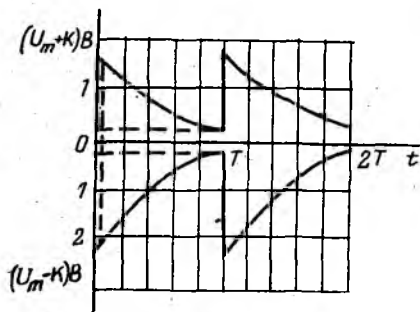


Рис. 3

Во время работы ЧГМЭ всегда выполняется условие $\tau_{\phi} \gg T_{\Omega_1}$ ($\tau_{\phi} = R_{\phi} C_{\phi}$), следовательно, за период $T = T_{\Omega_1}$ напряжение E_{cm} изменяется незначительно и этим изменением можно пренебречь.

Список литературы: 1. *Иваськин Ю. Л., Тузов В. М.* Цифровые устройства обработки сигналов на многозначных структурах. К., 1975. 168 с. 2. *Сигорский В. П., Ситников Л. С., Утаков Л. Л.* Многоустойчивые элементы дискретной техники. М., 1966. 310 с. 3. *Исследование спектрофона с внутренней обратной связью с применением ЭЦВМ/А. А. Молчанов, В. К. Дущенко, Ю. Х. Лоза, Г. И. Яловега//Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1973. 16. № 12. С. 14—22.* 4. *Проектирование многофункциональных и интегральных схем/А. А. Молчанов, В. П. Волкогон, Ю. Х. Лоза, Г. И. Яловега. К., 1984. 143 с.* 5. *Яловега Г. И., Карпухин А. В.* Оптимизация параметров частотно-гармонического многоустойчивого элемента//Радиотехника. 1979. Вып. 48: С. 75—78.

Поступила в редколлегию 13.08.85.

УДК 621.373

В. В. БУГАЕНКО, В. И. ЩЕРБАК, канд. техн. наук

МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ КОЛЕБАНИЙ МНОГОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Для формирования сверхмощных импульсных сигналов в системах локации или сверхдальней связи помимо традиционных устройств в фазированных антенных решетках возможно применение многочастотных генераторов. Однако в обычном виде использование их не представляется возможным, так как генерируемые колебания в общем случае некогерентны. Чтобы выполнялись определенные фазовые соотношения между колеба-