

М. А. ВАТУТИН

## НЕЛИНЕЙНОЕ ЗВЕНО С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ДЛЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Рассматривается способ реализации автоколебательного режима работы чувствительного элемента маятникового акселерометра с помощью нелинейного звена „идеальное релейное“ с запаздыванием. Приведены амплитудно-фазовая характеристика электромеханической части акселерометра и годограф нелинейного звена. Получено аналитическое выражение для условий возникновения режима автоколебаний чувствительного элемента. Приведена структурная схема маятникового акселерометра с нелинейным звеном с запаздыванием.

**Ключевые слова:** датчики, периодический режим, погрешность измерения ускорения, акселерометр, возмущение, автоколебания.

Одним из способов повышения чувствительности серийных маятниковых акселерометров является обеспечение работы его чувствительного элемента (ЧЭ) в режиме автоколебаний [1] путем введения в схему нелинейного звена (НЗ). Для надежного возникновения автоколебаний в системе второго порядка, которой в первом приближении является электромеханическая часть (ЭМЧ) акселерометра, необходимо использовать нелинейность типа „петля гистерезиса“ [2]. Структурная схема маятникового акселерометра, чувствительный элемент которого работает в автоколебательном режиме, приведена на рис. 1, где приняты следующие обозначения:  $a_{\text{вх}}$  — измеряемое ускорение,  $k_{a_{\text{вх}}}$  — коэффициент передачи ЧЭ по ускорению,  $M_{\text{н}}$  — момент, обусловленный измеряемым ускорением,  $M_{\text{о.с}}$  — момент обратной связи,  $\Delta M$  — разность моментов,  $k_{\text{л}}$  — коэффициент передачи ЭМЧ,  $T$  — постоянная времени ЭМЧ,  $\xi$  — коэффициент затухания,  $k_{\text{д.м}}$  — коэффициент передачи датчика момента,  $u_1$  — сигнал на выходе ЭМЧ,  $u$  — сигнал на выходе НЗ.

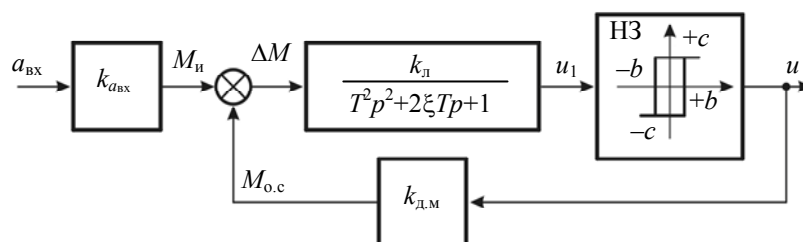


Рис. 1

Стабильность измерений, производимых акселерометром, определяется стабильностью параметров нелинейного звена [3]. К параметрам нелинейного звена относятся, в первую очередь, ширина петли гистерезиса  $b$  и амплитуда выходного сигнала  $c$ . Относительно простая схемотехника НЗ „петля гистерезиса“ не позволяет добиться высокой стабильности его параметров. Необходимость повышения стабильности параметров НЗ приводит, в свою очередь, к необходимости усложнения его схемотехники и применения прецизионных микросхем и источников опорного напряжения, что влечет за собой удорожание устройства.

Условия возникновения автоколебаний в системе иллюстрируются схемой, приведенной на рис. 2. Здесь показаны амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) электромеханической части  $W_{\text{д}}(j\omega)$  акселерометра (сплошная кривая линия), где  $\omega$  — круговая частота, и годограф НЗ (сплошная прямая) типа „петля гистерезиса“  $-Z_{\text{г}}(a)$ , где  $a$  — амплитуда колебаний ЧЭ. Автоколебания в данной системе возникнут, если годограф НЗ будет пересекать АФХ

электромеханической части, при этом амплитуда  $A_\Gamma$  и частота  $\Omega_\Gamma$  автоколебаний определяются в точке их пересечения.

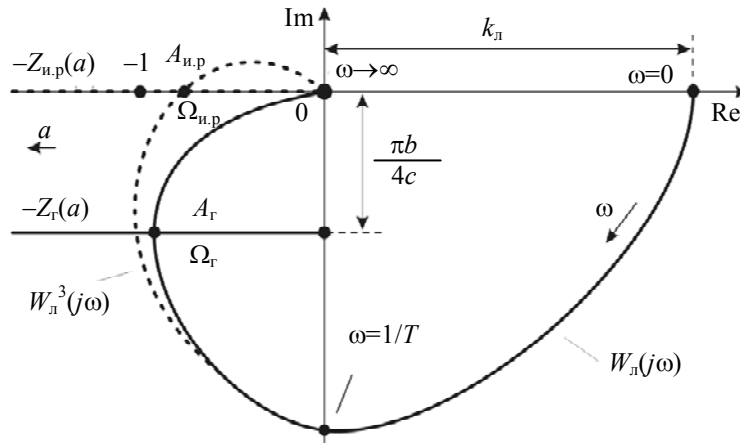


Рис. 2

Предлагается для реализации режима автоколебаний ЧЭ акселерометра вместо НЗ типа „петля гистерезиса“ использовать НЗ „идеальное релейное“ [2]. Годограф НЗ „идеальное релейное“  $-Z_{н.р}(a)$  совпадает с отрицательной частью вещественной оси (на рис. 2 показан пунктиром), при этом АФХ ЭМЧ пересекает вещественную ось. Это имеет место (для большинства конструктивных исполнений маятниковых акселерометров), если передаточная функция ЭМЧ имеет порядок выше второго или в систему вносится запаздывание  $\tau$ . Структурная схема маятникового акселерометра, автоколебательный режим работы которого обеспечивается элементом запаздывания, показана на рис. 3.

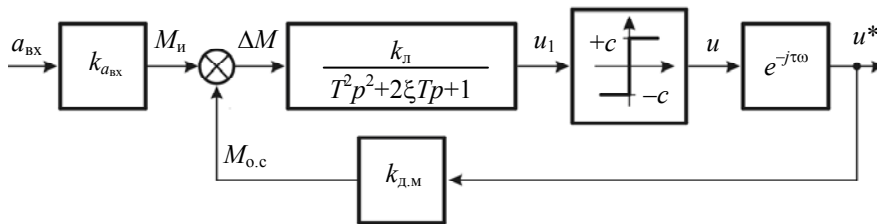


Рис. 3

При наличии запаздывания  $\tau$  на выходе устройства формируется напряжение  $u^*$ . Запаздывание вносит в динамику системы дополнительный фазовый сдвиг, и АФХ линейной ЭМЧ с запаздыванием  $W_\Gamma^3(j\omega)$  приобретает, в частном случае, вид, показанный штриховой линией на рис. 2. Это, при определенных условиях, позволяет системе функционировать в режиме автоколебаний с амплитудой  $A_{н.р}$  и частотой  $\Omega_{н.р}$  [2]. Необходимым условием устойчивости автоколебаний является пересечение АФХ вещественной оси правее точки  $(-1, 0)$  [2].

Смещение АФХ  $W_\Gamma^3(j\omega)$  объясняется фазовым сдвигом  $\tau\omega$ , который вносит элемент запаздывания:

$$W_\Gamma(p) = W(p)e^{-\tau p} ; W_\Gamma(j\omega) = A_0(\omega)e^{j(\psi(\omega) - \tau\omega)},$$

где  $A_0(\omega)$  и  $\psi(\omega)$  — модуль и фаза передаточной функции.

Для возникновения в системе автоколебаний необходимо выполнить условия

$$|W_\Gamma| \cdot |W_\Gamma| = 1, \quad \psi_\Gamma + \psi_\Gamma = \pi.$$

Для идеальной релейной характеристики  $\psi_\Gamma = 0$ .

Раскрывая значения передаточных функций, получаем

$$\frac{k_{\Pi}}{\sqrt{(1-T^2\omega^2)^2 + 4\xi^2 T^2\omega^2}} = \frac{\pi A_r}{4c}, \quad (1)$$

где  $k_{\Pi} = k_{\text{л}} k_{\text{н.з}} k_{\text{д.м}}$  — коэффициент передачи замкнутой системы ( $k_{\text{н.з}}$  — коэффициент передачи нелинейного звена);

$$\arctg\left(\frac{2\xi T\omega}{1-T^2\omega^2}\right) + \tau\omega = \pi. \quad (2)$$

Для автоколебательного акселерометра с параметрами  $c=12$  В;  $\omega=251$  с<sup>-1</sup>;  $T=2,97\cdot 10^{-4}$  с;  $\xi=0,1$ ;  $k_{\Pi}=0,1376$ ;  $A_r=2,8$  В искомое время задержки  $\tau$ , в соответствии с выражениями (1) и (2), равно 12 мс.

Величина запаздывания в НЗ „идеальное релейное“ является эквивалентом параметра  $\pm b$  в НЗ типа „петля гистерезиса“ [3] и, по сути, определяет стабильность порога срабатывания нелинейного звена.

При аппаратном исполнении элемента запаздывания сигнала  $u_{\text{д.у}}$  датчика угла акселерометра можно применить пассивную интегрирующую цепь задержки  $R_3 C_3$  и два компаратора  $DA_1$  и  $DA_2$  (рис. 4). Компараторы обеспечивают высокую стабильность порогов срабатывания  $\pm b$  и малое время переключения. На выходе компаратора  $DA_2$  формируется, в зависимости от его типа и схемы включения, или дискретный сигнал  $u_{\text{д}}$ , или цифровой сигнал  $u_{\text{ц}}$ .

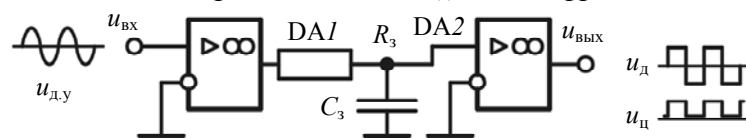


Рис. 4

Параметры компараторов регламентируются по уровню срабатывания логических элементов (логический „0“ и логическая „1“), а абсолютное значение выходного напряжения характеризуется невысокой стабильностью. Кроме того, значения  $R_3$  и, в особенности,  $C_3$  по разным причинам могут изменяться в процессе эксплуатации устройства. Температурный коэффициент емкости конденсаторов составляет десятки-сотни ppm, что соизмеримо с температурной стабильностью прецизионных стабилитронов, и, таким образом, применение схемы, представленной на рис. 4, не всегда может дать выигрыш по сравнению с нелинейностью типа „петля гистерезиса“.

Применение цифровых технологий позволяет повысить стабильность временного интервала  $\tau^*$ , характеризующего запаздывание  $\tau$ . Функциональная схема одного из вариантов реализации такого цифрового устройства показана на рис. 5.

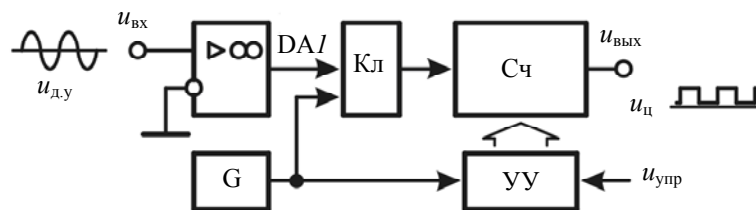


Рис. 5

При срабатывании компаратора  $DA_1$  через ключ Кл на счетчик Сч с переменным коэффициентом счета  $K_{\text{ПКС}}$  будут поступать тактовые импульсы генератора Г стабильной частоты. Временной интервал  $\tau^*$ , когда на выходе счетчика появится сигнал, определяется значением тактовой частоты и коэффициентом  $K_{\text{ПКС}}$ . Стабильность значения  $\tau^*$  будет определяться стабильностью генератора Г. Для оперативного изменения или корректировки временного интервала  $\tau^*$  код предварительной установки счетчика изменяется с помощью устройства управления УУ при воздействии сигнала  $u_{\text{упр}}$ .

Рассмотренный способ реализации нелинейного звена, при соответствующей доработке схемотехники, позволяет использовать в предложенном устройстве стандартное однополярное значение напряжения питания цифровых микросхем +5 В.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучко С. В., Ватутин М. А. Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 62.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
3. Лучко С. В., Балувев С. Ю., Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Ключников А. И., Ефимов В. П. Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 43—46.

#### *Сведения об авторе*

**Михаил Алексеевич Ватутин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов; Санкт-Петербург; E-mail: vatutinm@inbox.ru

Рекомендована кафедрой  
бортовых информационных  
и измерительных комплексов

Поступила в редакцию  
26.02.13 г.