

локальной скорости и разностным вектором ($\vec{k}_s - \vec{k}_i$); λ — длина волны излучения лазера.

Экспериментальные измерения проводились при линейной скорости исследуемой области диска 60 м/с. Средняя квадратическая погрешность проведенных измерений равна ± 5 м/с, относительная погрешность составляет 5%. С ростом измеряемой скорости относительная погрешность падает.

Погрешность измерений ограничивается разрешающей способностью интерферометра и стабильностью лазера. Повышение точности измерений и облегчение регистрации доплеровского частотного сдвига может быть достигнуто применением сканирующего конфокального интерферометра Фабри — Перо с большой остротой и разрешением.

Проведенные эксперименты подтверждают перспективность применения ЛДИС с интерферометром Фабри — Перо для бесконтактного измерения скорости движущихся объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. M. Jonson and T. Y. Burgess. Free Surface Velocity Measurement of an Impacted Projectile by Optical Doppler Shift.—Rev. Scient. Instr., 1968, v. 39, № 8.
2. Б. С. Ринкевичюс, А. В. Толкачев. Применение ОКГ с интерферометром Фабри — Перо для измерения скоростей частиц в двухфазных турбулентных потоках.—ЖПС, 1968, т. IX, вып. 5.
3. Ю. В. Троицкий, Н. Д. Голдина. О выделении одного типа колебаний в оптическом резонаторе.—Письма в ЖЭТФ, 1968, т. 7, вып. 2.
4. С. Толанский. Спектроскопия высокой разрешающей силы. М., Изд-во иностр. лит., 1955.

Поступило в редакцию
29 апреля 1971 г.

УДК 621.317+621.3.078

С. Г. РАБИНОВИЧ
(Ленинград)

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ УСПОКОЕНИЯ ГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКИХ АВТОКОМПЕНСАТОРОВ

Гальванометрические автокомпенсаторы (ГА) в настоящее время получили широкое распространение. Промышленность выпускает ряд измерительных приборов этого принципа действия, а также блоки, содержащие гальванометр, фотоэлементы и оптическую систему, на основе которых осуществляют всевозможные уникальные измерительные устройства и регуляторы. Естественно, что при этом вопросы расчета ГА привлекают внимание многих специалистов. Ниже приводится решение задачи о времени успокоения ГА, вычисление которого обычно сопряжено с известными трудностями.

Передаточная функция ГА с учетом инерционности схемы регулирования имеет третий порядок [1]. Рассмотрим для определенности ГА напряжения с фотоэлектрической схемой регулирования. Его передаточная функция имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{I(s)}{E_x(s)} = \frac{1}{R_k(Js^2 + Ps + W_m)(1 + \tau s) + W_{эл}} \quad (1)$$

где $E_x(s)$, $I(s)$ — изображения по Лапласу измеряемой э. д. с. и тока на выходе прибора; R_k — компенсационное сопротивление (сопротивление обратной связи); $W_{эл}$ — удельный электрический противодействующий момент; J, P, W_m — соответственно момент инерции, коэффициент успокоения и удельный механический противодействующий момент гальванометра; τ — постоянная времени схемы регулирования.

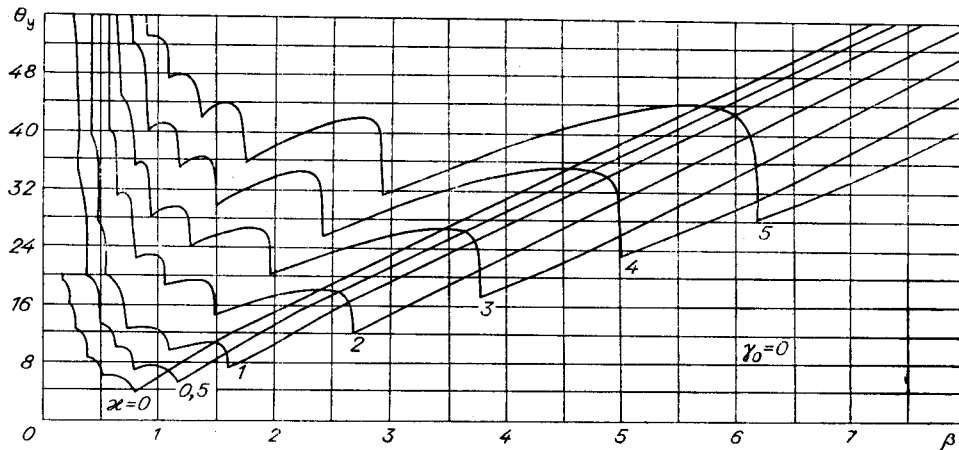


Рис. 1.

В случае безынерционной схемы регулирования характеристическое уравнение ГА приобретает вид

$$Js^2 + Ps + (W_m + W_{эл}) = 0.$$

Динамические свойства ГА при этом полностью определяются угловой частотой собственных колебаний системы ω_0 и степенью успокоения β , которые вычисляются по известным формулам:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{W_m + W_{эл}}{J}}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{P}{2\sqrt{J(W_m + W_{эл})}}. \quad (3)$$

Передаточная функция (1) выражена через конструктивные параметры прибора. Для общности анализа удобнее ее записать, используя эксплуатационные параметры прибора и время, выраженное в долях периода собственных колебаний идеализированного автокомпенсатора. Тогда получим

$$\Phi(p) = \frac{I(p)}{E_x(p)} = \frac{1}{R_k} \frac{1 - \gamma_0}{\kappa p^3 + (1 + 2\beta\kappa)p^2 + (2\beta + \kappa\gamma_0)p + 1}. \quad (4)$$

Пусть $\theta = \omega_0 t$, где t — время, измеряемое в секундах. Соответственно постоянная времени τ определяет параметр $\kappa = \omega_0 \tau$, а оператор преобразования Лапласа s — оператор $p = s/\omega_0$. Параметр γ_0 — статизм ГА, который определяется выражением $\gamma_0 =$

$$= \frac{W_m}{W_m + W_{эл}}.$$

Поскольку числитель формулы (4) от p не зависит, переходный процесс полностью описывается характеристическим уравнением

$$\kappa p^3 + (1 + 2\beta\kappa)p^2 + (2\beta + \kappa\gamma_0)p + 1 = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5), полученное для ГА напряжения, справедливо и для других видов ГА, обладающих жесткой обратной связью.

Временем успокоения измерительных приборов принято считать время с момента ступенчатого изменения сигнала до момента, начиная с которого показание прибора (в данном случае значение тока на выходе ГА) будет отличаться от установившегося значения не более чем на $\pm 2\%$. Для каждой комбинации значений β , κ , γ_0 , пользуясь (5), можно вычислить относительную продолжительность переходного процесса θ_y . Результаты вычислений представлены на рис. 1 и 2 для $\gamma_0 = 0$. На рис. 3 приведены те же графики, но при $\gamma_0 = 0,1^*$.

*Вычисления выполнены в вычислительном центре ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Составленная программа позволяет варьировать допустимым значением отклонения тока от установившегося.

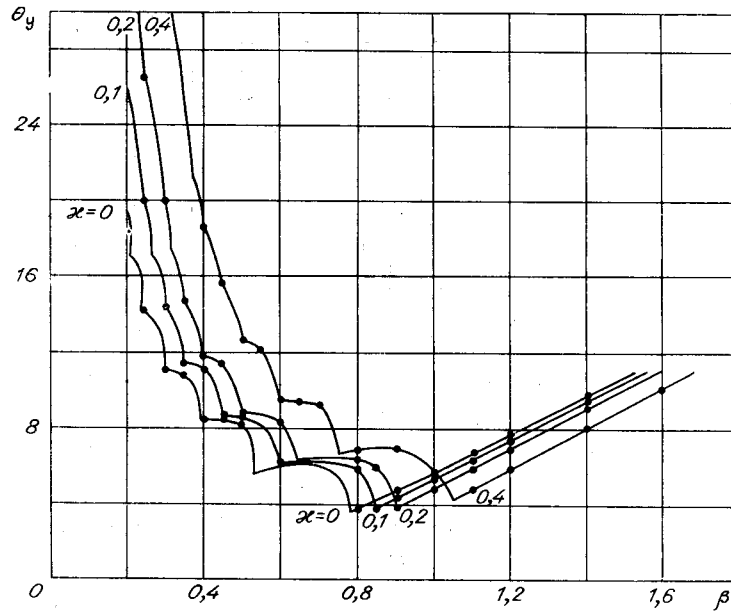


Рис. 2.

При наличии отработанной программы можно было бы построить аналогичное семейство кривых и для иных значений статизма. Однако время успокоения слабо зависит от статизма и поэтому необходимости в этом не было.

Построенные кривые позволяют находить время успокоения t_y ГА с инерционной схемой регулирования

$$t_y = \frac{\theta_y}{\omega_0}.$$

Значение $\theta_y = f(\beta, \kappa)$ снимается с графика; параметр ω_0 для каждого конкретного прибора вычисляется по формуле (2).

Построенные кривые позволяют выявить и некоторые общие свойства ГА:

1) инерционность схемы регулирования увеличивает время успокоения ГА при колебательном характере переходного процесса и несколько снижает его при апериодическом процессе;

2) при малых значениях инерционности схемы ($\kappa < 0,5$) время успокоения практически не зависит от статизма;

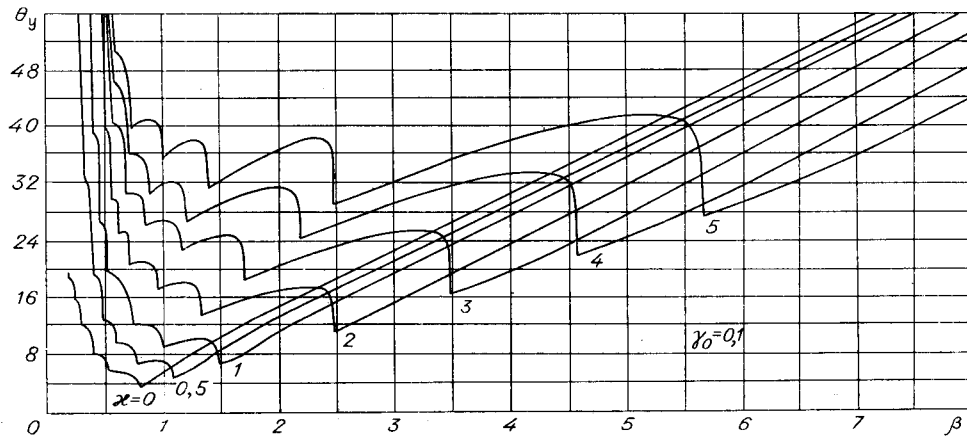


Рис. 3.

3) минимальные значения времени успокоения ГА лежат на прямой: $\theta_{y\min} = 4,7\beta$ при $\beta \geq 0,8$;

4) оптимальное соотношение между инерционностью схемы и степенью успокоения приближенно выражается соотношением $\kappa = \beta - 0,8$.

Графики, приведенные на рис. 2, т. е. при $\kappa \leq 0,4$, можно аппроксимировать следующими уравнениями ($\beta > 0,5\kappa$):

$$\theta_y = \frac{3,78}{\beta - 0,5\kappa}; \quad \beta \leq 1; \quad (6)$$

$$\theta_v = 9,4(\beta - 0,4 - 0,5\kappa); \quad \beta > 1. \quad (7)$$

Погрешность из-за применения этих формул максимальна в точке с $\beta = 1$ и $\kappa = 0,4$, где (6) дает +25%, (7) дает +35% по сравнению с кривой; при $\beta > 1,1$ формула (7) дает уже погрешность меньше 6%.

Если принять, что степень успокоения определяется и сохраняется с погрешностью $\pm 10\%$, то отсюда вытекает условие допустимости пренебрежения инерционностью схемы, хорошо согласующееся с экспериментальными данными [2, 3]: $\kappa_d \leq 0,2\beta$.

В связи с тем, что на графиках нельзя отразить сколь угодно большие значения κ , рассмотрим методику трансформации исходных уравнений, позволяющую обойти эту ограниченность выполненных построений и во многих случаях вообще перейти к уравнению второго порядка.

Как правило, гальванометр при разомкнутой цепи обратной связи в схеме ГА переупокоен. Тогда его характеристическое уравнение может быть выражено произведением двух простых аperiодических звеньев

$$Js^2 + Ps + W_M = W_M(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s),$$

причем

$$\tau_1 = \frac{J}{P} = \frac{1}{2\beta_n \omega_n}; \quad \tau_2 = \frac{P}{W_M} = \frac{2\beta_n^2}{\omega_n},$$

где β_n и ω_n — степень успокоения и угловая частота собственных колебаний гальванометра при разомкнутой цепи обратной связи. Выполненное преобразование может исказить коэффициент успокоения, но если $\beta_n \geq 1,6$, то искажение P не превышает 10%.

С учетом приведенного преобразования характеристическое уравнение передаточной функции (1) принимает вид

$$W_M(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)(1 + \tau s) + W_{эл} = 0.$$

Постоянные времени τ , τ_1 , τ_2 в уравнении формально равноправны. Поэтому, если $\tau_1 < \tau$, их можно поменять местами и характеристическое уравнение представить так:

$$(J_3 s^2 + P_3 s + W_M)(1 + \tau_1 s) + W_{эл} = 0,$$

где

$$J_3 = \tau \tau_2 W_M = \tau P; \quad P_3 = W_M(\tau + \tau_2) = \tau W_M + P.$$

Соответственно составляются выражения для эксплуатационных параметров ГА:

$$\omega_{03} = \sqrt{\frac{W_M + W_{эл}}{\tau P}}; \quad \beta_3 = \frac{\tau W_M + P}{2 \sqrt{\tau P (W_M + W_{эл})}}.$$

Теперь для относительной инерционности эквивалентной схемы имеем

$$\kappa_3 = \omega_{03} \tau_1.$$

Если $\kappa_3 \leq 0,2\beta_3$, то инерционностью κ_3 можно пренебречь и вместо уравнения третьего порядка рассматривать характеристическое уравнение второго порядка. Можно показать, что условие $\kappa_3 \leq 0,2\beta_3$ выполняется при удовлетворении неравенств $2\beta\kappa \geq 1$ и $\beta \geq 1,6$.

Для иллюстрации применения метода трансформации характеристического уравнения рассмотрим пример. Высокочувствительный фотогальванометрический нановольтметр НФК-1 при цене деления $4 \cdot 10^{-10}$ В, по расчетам и косвенным измерениям, имеет: $\omega_0 = 17$ рад/с; $\beta = 12$; $\kappa = 6$ ($\tau = 0,35$ с); $\gamma = 0,004$.

Таким образом, для вычисления времени успокоения прибора данных рис. 1 недостаточно. Но так как $\beta > 1,6$ и $2\beta\kappa > 1$, то трансформация характеристического уравнения позволяет не только понизить значение эквивалентной инертности схемы прибора, но и вообще перейти к уравнению второго порядка.

Параметры гальванометра НФК-1: $J = 2,5 \cdot 10^{-8}$ кг · м²; $W = 2,9 \cdot 10^{-8}$ нм/рад. При режиме короткого замыкания общее сопротивление цепи гальванометра $\Sigma R = 11$ Ом. При этом

$$W_{эл} = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ нм/рад}; P = 1 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

Следовательно,

$$\tau_1 = \frac{J}{P} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \tau_2 = \frac{P}{W_M} = 315 \text{ с}.$$

Постоянную времени τ_1 можно отбросить.

$$J_9 = 0,35 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad P_9 = 0,35 \cdot 2,9 \cdot 10^{-8} + 1 \cdot 10^{-5} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с};$$

$$\omega_{09} = \sqrt{\frac{7,2 \cdot 10^{-6}}{3,5 \cdot 10^{-6}}} = 1,4 \text{ рад/с};$$

$$\beta_9 = \frac{1 \cdot 10^{-5}}{2 \sqrt{3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}}} \approx 1.$$

По графику рис. 2 для $\kappa=0$ при $\beta=1$ находим $\theta_y = 5,6$. Следовательно,

$$t_y = \frac{\theta_y}{\omega_{09}} = \frac{5,6}{1,4} = 4 \text{ с}.$$

Экспериментальная оценка времени успокоения НФК-1 дала 5 с, что, учитывая ограниченную точность исходных данных и самого опыта, следует считать подтверждением правильности расчетов.

Таким образом, при расчете динамики ГА время их успокоения может быть оценено без специальных вычислений по графикам, приведенным на рис. 1, 2 или 3. В тех случаях, когда значения степени успокоения или относительной инерционности схемы выходят за пределы, предусмотренные этими графиками, решение может быть получено с помощью трансформации характеристического уравнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Ф. Куликовский, А. М. Мелик-Шахназаров, С. Г. Рабинович, Б. А. Селибер. Гальванометрические компенсаторы. М.—Л., «Энергия», 1964.
2. С. Г. Рабинович. Фотогальванометрические компенсационные приборы. М.—Л., «Энергия», 1964.
3. С. Г. Рабинович. Фотокомпенсационные стабилизаторы постоянного тока и напряжения. — Измерительная техника, 1957, № 1.

Поступило в редакцию
23 декабря 1968 г.

УДК 621.317.37

П. А. ЗУБЦОВ, В. В. МИХАЙЛЕНКО

(Челябинск)

КВАЗИОДНОКАНАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СДВИГА ФАЗ

Существенный недостаток известных цифровых фазометров — необходимость осуществлять периодическую подстройку пороговых уровней для обеспечения их равенства и производить уравнивание амплитуд входных сигналов перед их преобразованием. В данном сообщении рассматривается возможность устранения указанного недостатка применением такого преобразования сдвига фаз, названного одноканальным, при котором усиление сигналов осуществляется в общем тракте путем использования амплитудно-импульсной модуляции (АИМ) и временного разделения «каналов». При этом общий пороговый детектор фиксирует все выбросы усиленных АИМ сигналов над уровнем детектирования. Получаемая совокупность импульсов постоянной амплитуды путем син-