

динамики колебаний физического маятника с опорой качения // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 1. – С. – 42–48.

8. Юзefович А. П., Огородова Л. В. Гравиметрия. – М.: Недра, 1980. – 320 с.

9. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории колебаний. – М.: Наука, 1974. – 504 с.

10. Джилавдари И. З. Проблемы динамики физического маятника с опорой качения // Метрологическое обеспечение качества – 2000: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 нояб. 2000 г. – Мн., 2000. – С. 171–176.

УДК 681.513.4

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОШАГОВО-КОМПЕНСАЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Инж. ТУЗКОВ Ю. Ф.

Белорусский национальный технический университет

Подавляющее число промышленных лазерных интерферометров, используемых в настоящее время в машино- и приборостроении для прецизионных измерений линейных перемещений, построено на основе интерферометра Майкельсона [1].

Схема лазерного интерферометра содержит ряд противоречий. Главное из них заключается в том, что мера перемещения – длина волны лазерного излучения, используется не напрямую, а через сравнение фазовой задержки прохождения сигнала по эталонному и измеряемому путям.

Непосредственное сравнение измеряемого перемещения с длиной волны используемого излучения осуществляется в активном интерферометре на базе линейного лазера со связанными резонаторами (ЛСР). Однако в этом случае необходимо принципиально изменить метод выделения информации о перемещении.

В [2] был предложен пошагово-компенсационный метод измерения линейных перемещений и теоретически рассмотрена возможность его использования на примере активного интерферометра на базе ЛСР. Экспериментальные исследования [3] подтвердили его высокую эффективность при измерении линейных перемещений.

Точность и динамические характеристики такого измерителя линейных перемещений оп-

ределяются работой экстремальной системы автоматического управления (ЭСАУ) (рис. 1).

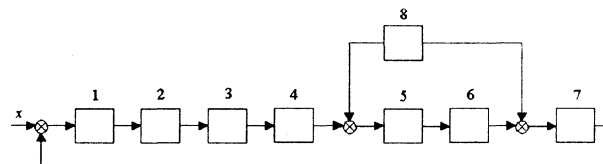


Рис. 1. Схема ЭСАУ: 1 – объект управления (ОУ); 2 – фотоприемник (ФП); 3 – усилитель (У); 4 – полосовой фильтр (Ф1); 5 – синхронный детектор (СД); 6 – фильтр низких частот (Ф2), 7 – пьезокорректор (ПК); 8 – генератор синусоидального напряжения (ГСН)

Входным сигналом объекта управления (ОУ), которым является ЛСР, служит периметр пассивной части ЛСР, выходным – мощность выходного излучения ЛСР, регистрируемая фотоприемником (ФП). Сигнал с ФП усиливается усилителем (У) и поступает на полосовой фильтр (Ф1), который в идеальном случае должен пропускать только составляющую сигнала с частотой поисковых колебаний. В синхронном детекторе (СД) происходит перемножение сигнала, поступающего с фильтра Ф1, и сигнала поисковых колебаний, поступающего с генератора синусоидального напряжения (ГСН). Фильтр низких частот (Ф2) должен пропускать только постоянную составляющую сигнала, приходящего от СД, которая подается на пьезокорректор (ПК), отрабатывающий изменение периметра пассивной части ЛСР.

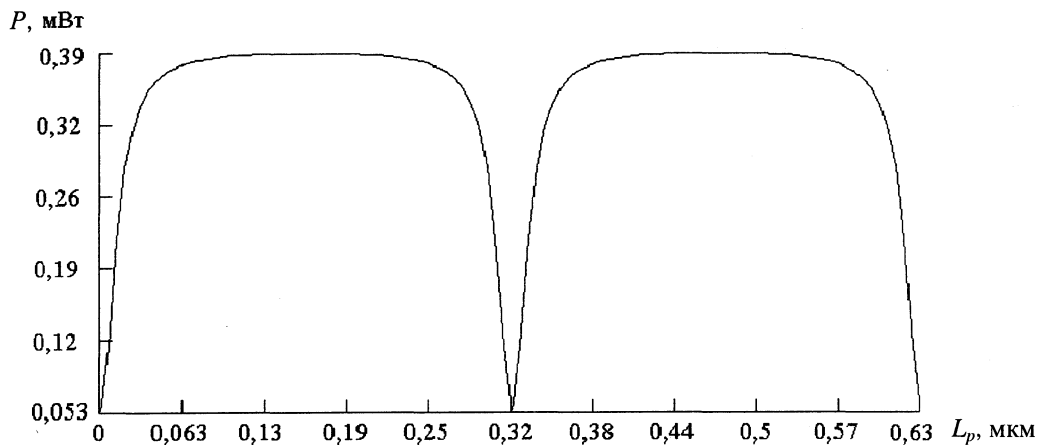


Рис. 2. Теоретическая зависимость мощности излучения ЛСП P от периметра пассивной части ЛСП L_p

Согласно [4], интенсивность излучения ЛСП определяется по формуле

$$I_1 = \frac{I_0 T_1}{2} \left[\left(\frac{g_0 L}{\ln(\rho_1 \rho') - \gamma L} \right)^2 - 1 \right],$$

где I_0 – параметр насыщения; T_1 – энергетический коэффициент пропускания выходного зеркала активной части ЛСП; g_0 – коэффициент усиления по интенсивности ненасыщенной среды; ρ' – амплитуда комплексного коэффициента отражения эффективного зеркала; ρ_1 – то же выходного зеркала активной части ЛСП; γ – средний коэффициент потерь, вызванных рассеянием и поглощением; L – периметр активной части.

Мощность излучения

$$P = S_n I_1,$$

где S_n – площадь поперечного сечения луча.

Зависимость мощности излучения P от периметра пассивной части ЛСП L_p при $L = 0,325$ м, длине волны излучения $\lambda = 0,63$ мкм, коэффициентах отражения выходного зеркала активной части, выходного зеркала пассивной части и зеркала связи, равных соответственно 99,2, 70 и 99,8%, представлена на рис. 2.

На уровне $0,84P$, что соответствует смещению от экстремума на $\pm 0,01\lambda$, зависимость мощности выходного излучения ЛСП от перестройки периметра пассивного резонатора с высокой точностью можно аппроксимировать параболой $P = 168 \cdot 10^{10} L_p^2$ (рис. 3).

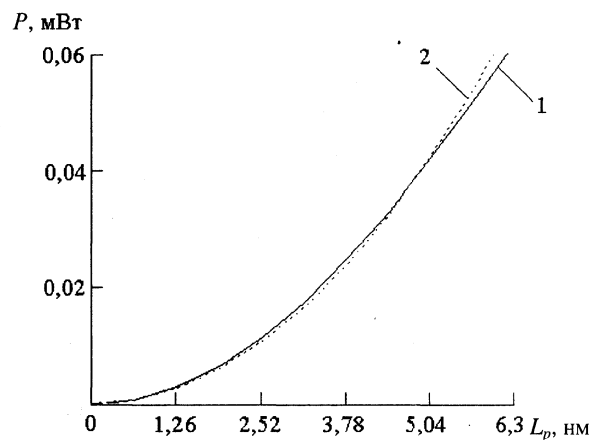


Рис. 3. Зависимость мощности излучения ЛСП P от периметра пассивной части ЛСП L_p : 1 – теоретическая; 2 – аппроксимирующая парабола

Для упрощения расчетов воспользуемся приемом, широко используемым в теории автоматического управления для исследования динамики систем экстремального регулирования [5, с. 57]. Если экстремальное звено имеет характеристику вида $y = Ax^2$, а пробный сигнал генератора – $x_{пр} = C \sin(\omega t)$, то последовательное соединение ОУ и СД можно представить в виде усилительного звена с передаточной функцией

$$W_{\text{ОУ СД}}(p) = K_{\text{ОУ СД}} = 2AC.$$

В этом случае система экстремального регулирования может быть преобразована в систему стабилизации (рис. 4). Входной величиной является значение x , периметра пассивной части ЛСП, соответствующее экстремуму выходной мощности лазера [6, с. 246].

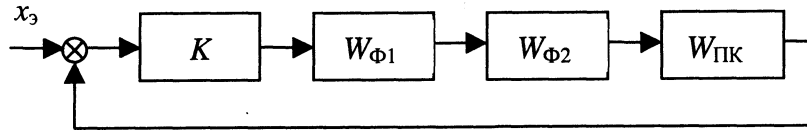


Рис. 4. Преобразованная структурная схема ЭСАУ

Передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\text{сис}}(p) = KW_{\Phi 1}W_{\Phi 2}W_{\text{ПК}},$$

где $K = K_{\text{ОУ СД}}K_{\text{ФП}}K_{\text{У}}$; $K_{\text{ФП}}$ – вольтовая чувствительность ФП; $K_{\text{У}}$ – коэффициент усиления У; $W_{\Phi 1}$ – передаточная функция Ф1; $W_{\Phi 2}$ – то же Ф2; $W_{\text{ПК}}$ – то же ПК.

Для дальнейших оценок зададимся реальными значениями параметров системы. При этом учтем, что частота поисковых колебаний $f = 1$ МГц, длина волны излучения лазера $\lambda = 0,63$ мкм.

Значение коэффициента $K_{\text{ОУ СД}}$, как указывалось ранее, определяется из выражения

$$K_{\text{ОУ СД}} = 2AC,$$

где $A = 168 \cdot 10^{10}$; C – амплитуда поискового сигнала, для которой должно выполняться условие $C \ll 0,5\lambda$, поэтому примем $C = 0,05 \lambda$; $K_{\text{ФП}}$ – вольтовая чувствительность ФП (для кремниевых фотодиодов обычно она составляет 1500...3500 В/Вт)

Примем $K = 2 \cdot 10^{10}$.

Передаточная функция полосового фильтра Ф1 [7, с. 299]

$$W_{\Phi 1}(p) = \frac{K_{\Phi 1}(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \quad \text{при } T_1 > T_2 > T_3.$$

$K_{\Phi 1} = 0,133$, ибо при этом значении сигнал с частотой 1 МГц проходит через Ф1 без изменений, а сигналы с частотами 10^4 Гц и 2 МГц ослабляются на 6,5 и 4,8 дБ соответственно. Учитывая, что частота поисковых колебаний $f = 1$ МГц, примем следующие значения постоянных времени $T_1 = 6 \cdot 10^{-5}$ с; $T_2 = 5 \cdot 10^{-6}$ с; $T_3 = 2 \cdot 10^{-7}$ с.

Фильтр Ф2 предназначен для выделения постоянной составляющей сигнала. Обычно в качестве фильтра низких частот в системах стабилизации периметра лазерного резонатора ис-

пользуется интегратор, поэтому передаточная функция фильтра Ф2 имеет вид [8, с. 56]

$$W_{\Phi 2}(p) = \frac{1}{T_4 p}.$$

Примем $T_4 = 1,6 \cdot 10^{-6}$ с, что соответствует частоте среза $f_{\text{ср}} = 10^5$ Гц.

ПК является консервативным звеном [9, с. 24] с передаточной функцией

$$W_{\text{ПК}}(p) = \frac{K_{\text{ПК}}}{T_5^2 p^2 + 1}.$$

Используя значения характеристик пьезоэлектрических материалов, приведенные в [9], для дальнейших расчетов примем $K_{\text{ПК}} = 2 \cdot 10^{-10}$; $T_5 = \sqrt{5} \cdot 10^{-9}$.

Анализ переходных процессов исследуемой системы проводился с применением программного комплекса MATLAB/Simulink.

Оптимальная переходная характеристика исследуемой системы, полученная в результате моделирования, приведена на рис. 5 (линия 2).

Для нее время установления при отклонении регулируемой величины на $\delta = 5\%$ (обычно в радиоэлектронных системах принимают $\delta = \pm 5\%$ [10, с. 46]) составляет $2 \cdot 10^{-6}$ с. При этом перерегулирование не превышает 7%, что является вполне удовлетворительным при полуширине пика интенсивности более 20% от 0,5λ.

Для сравнения на рис. 5 представлены переходные характеристики системы при постоянной времени T_4 фильтра Ф2, равной $0,8 \cdot 10^{-6}$ с (линия 1) и $3,2 \cdot 10^{-6}$ с (линия 3). Из них видно, что при уменьшении T_4 до $0,8 \cdot 10^{-6}$ с перерегулирование превышает 20% (т. е. имеет недопустимую величину). Увеличение же T_4 до $3,2 \cdot 10^{-6}$ с приводит к снижению быстродействия системы. Через $2 \cdot 10^{-6}$ с отклонение регулируемой величины составляет $\delta = -8\%$, что в 1,6

раза превышает величину, принятую в качестве предельной.

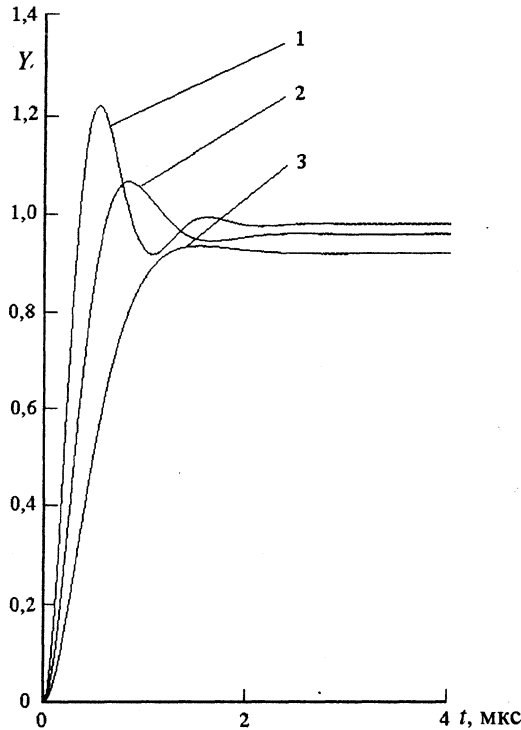


Рис. 5. Переходные характеристики ЭСАУ при различных значениях постоянной времени T_4 фильтра Ф2: 1 – $T_4 = 0,8 \cdot 10^{-6}$ с; 2 – $1,6 \cdot 10^{-6}$ с; 3 – $3,2 \cdot 10^{-6}$ с

Статическая погрешность рассматриваемой аstaticеской системы равна 0.

Основная погрешность измерения при применении пошагово-компенсационного метода измерения линейных перемещений будет возникать из-за подавленной переменной составляющей сигнала на выходе фильтра Ф2.

Рассмотрим прохождение сигнала через систему, структурная схема которой представлена на рис. 4, но при этом учтем неидеальность фильтров Ф1 и Ф2.

Сигнал на выходе ОУ имеет вид

$$Z_{OY} = A(x_3 + C \sin(\omega t))^2 = A x_3^2 + 2A x_3 C \sin(\omega t) + A(C \sin(\omega t))^2.$$

На выходе ФП сигнал определяется по формуле

$$Z_{\Phi\P} = K_{\Phi\P} A x_3^2 + 2K_{\Phi\P} A x_3 C \sin(\omega t) + K_{\Phi\P} A (C \sin(\omega t))^2.$$

На выходе У сигнал можно рассчитать по выражению

$$Z_y = K_{\Phi\P} K_y A x_3^2 + 2K_{\Phi\P} K_y A x_3 C \sin(\omega t) + K_{\Phi\P} K_y A (C \sin(\omega t))^2.$$

Для упрощения дальнейших расчетов введем постоянную $K = K_{\Phi\P} K_y A$.

Тогда

$$Z_y = K x_3^2 + 2K x_3 C \sin(\omega t) + K (C \sin(\omega t))^2.$$

Сигнал на выходе Ф1 имеет вид

$$Z_{\Phi1} = 2KK_{\Phi1} x_3 C \sin(\omega t) + K_{oc\Phi1n} K K_{\Phi1} x_3^2 + K_{oc\Phi1n} K K_{\Phi1} C^2 - 2K_{oc\Phi1(2\omega)} K K_{\Phi1} C^2 \cos(2\omega t),$$

где $K_{oc\Phi1n}$ – коэффициент ослабления сигнала с частотами $0 \dots 10^4$ Гц фильтром Ф1. Для исследуемой системы $K_{oc\Phi1n} = 1/2,11$, что соответствует ослаблению сигнала на 6,5 дБ; $K_{oc\Phi1(2\omega)}$ – коэффициент ослабления сигнала с частотой 2 МГц фильтром Ф1. Для исследуемой системы $K_{oc\Phi1(2\omega)} = 1/1,74$, что соответствует ослаблению сигнала на 4,8 дБ.

На входы СД поступают сигналы $Z_{\Phi1}$ и $U \sin(\omega t)$. Для упрощения расчетов примем $U = 1$. Тогда сигнал на выходе СД имеет вид

$$Z_{CD} = K K_{\Phi1} x_3 C - 2K K_{\Phi1} x_3 C \cos(2\omega t) + K_{oc\Phi1n} K K_{\Phi1} x_3^2 \sin(\omega t) + K_{oc\Phi1n} K K_{\Phi1} C^2 \sin(\omega t) - 2K_{oc\Phi1(2\omega)} K K_{\Phi1} C^2 \cos(2\omega t) \sin(\omega t).$$

Неподавленная составляющая на выходе Ф2 имеет вид

$$Z_{n\Phi2} = K_{oc\Phi2(\omega)} K K_{\Phi1} \sin(\omega t) (K_{oc\Phi1n} x_3^2 + K_{oc\Phi1n} C^2 - K_{oc\Phi1(2\omega)} C^2) - 2K_{oc\Phi2(2\omega)} K K_{\Phi1} x_3 C \cos(2\omega t) - K_{oc\Phi2(3\omega)} K_{oc\Phi1(2\omega)} K K_{\Phi1} C^2 \sin(3\omega t),$$

где $K_{\text{осФ2}(\omega)}$ – коэффициент ослабления сигнала с частотой 1 МГц фильтром Ф2. Для исследуемой системы $K_{\text{осФ2}(\omega)} = 1/10$, что соответствует ослаблению сигнала на 20 дБ; $K_{\text{осФ2}(2\omega)}$ – коэффициент ослабления сигнала с частотой 2 МГц фильтром Ф2. Для исследуемой системы $K_{\text{осФ2}(2\omega)} = 1/17,7$, что соответствует ослаблению сигнала на 25 дБ; $K_{\text{осФ2}(3\omega)}$ – коэффициент ослабления сигнала с частотой 3 МГц фильтром Ф2. Для исследуемой системы $K_{\text{осФ2}(3\omega)} = 1/31,6$, что соответствует ослаблению сигнала на 30 дБ.

Таким образом, неподавленная переменная составляющая имеет периодические компоненты с частотами ω , 2ω , 3ω :

$$z_{\omega} = K_{\text{осФ2}(\omega)} K K_{\text{Ф1}} \sin(\omega t) (K_{\text{осФ1п}} x_3^2 + K_{\text{осФ1п}} C^2 - K_{\text{осФ1}(2\omega)} C^2);$$

$$z_{2\omega} = 2K_{\text{осФ2}(2\omega)} K K_{\text{Ф1}} x_3 C \cos(2\omega t);$$

$$z_{3\omega} = K_{\text{осФ2}(3\omega)} K_{\text{осФ1}(2\omega)} K K_{\text{Ф1}} C^2 \sin(3\omega t).$$

Учитывая, что в нашем случае $x_3 = 0$, амплитуды компонент будут равны:

$$z_{\text{мах } \omega} = K_{\text{осФ2}(\omega)} K K_{\text{Ф1}} (K_{\text{осФ1п}} C^2 - (K_{\text{осФ1}(2\omega)} C^2);$$

$$z_{\text{мах } 2\omega} = 0;$$

$$z_{\text{мах } 3\omega} = K_{\text{осФ2}(3\omega)} K_{\text{осФ1}(2\omega)} K K_{\text{Ф1}} C^2.$$

Передаточная функция по возмущающему воздействию:

$$\begin{aligned} W_{\text{возм.возд}}(p) &= \frac{W_{\text{ПК}}(p)}{1 + W_{\text{сис}}(p)} = \\ &= \frac{K_{\text{ПК}}(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)T_4 p}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)T_4 p(T_5^2 p^2 + 1) + K(T_1 p + 1)}; \\ W_{\text{возм.возд}}(j\omega) &= \\ &= \frac{K_{\text{ПК}}(T_2 j\omega + 1)(T_3 j\omega + 1)T_4 j\omega}{(T_2 j\omega + 1)(T_3 j\omega + 1)T_4 j\omega(T_5^2(j\omega)^2 + 1) + K(T_1 j\omega + 1)}. \end{aligned}$$

Частота модулирующих колебаний $f = 1$ МГц, поэтому круговая частота, используемая в дальнейших расчетах, равна:

$$\omega = 2\pi f = 6,28 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1};$$

$$2\omega = 4\pi f = 12,56 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1};$$

$$3\omega = 6\pi f = 18,84 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}.$$

Амплитуды погрешностей для каждой из компонент:

$$\begin{aligned} x_{\text{мах } \omega} &= |W_{\text{возм.возд}}(j\omega)| z_{\text{мах } \omega} \approx 190 \cdot 10^{-12} \text{ м} \approx \\ &\approx 0,3 \cdot 10^{-3} \lambda \quad (\lambda = 0,63 \text{ мкм}); \end{aligned}$$

$$x_{\text{мах } 2\omega} = |W_{\text{возм.возд}}(j2\omega)| z_{\text{мах } 2\omega} = 0 \text{ м};$$

$$\begin{aligned} x_{\text{мах } 3\omega} &= |W_{\text{возм.возд}}(j3\omega)| z_{\text{мах } 3\omega} = 161,09 \cdot 10^{-12} \text{ м} \approx \\ &\approx 0,0026 \lambda \quad (\lambda = 0,63 \text{ мкм}). \end{aligned}$$

Из расчетов видно, что определяющей является погрешность, возникающая из-за неподавленной переменной составляющей сигнала на выходе фильтра Ф2 с частотой 3 МГц. Она составляет 0,52 % расстояния между экстремумами мощности излучения.

ВЫВОДЫ

При анализе ЭСАУ, входящей в состав активного интерферометра, при $\lambda = 0,63$ мкм, частоте модуляции 1 МГц и амплитуде модуляции $0,05 \lambda$ получены следующие значения динамических и точностных характеристик:

- время регулирования – $2 \cdot 10^{-6}$ с;
- перерегулирование – 7 %;
- статическая погрешность – 0;
- амплитуды составляющих погрешности, возникающей из-за неподавленной переменной составляющей сигнала на выходе фильтра Ф2, для частот 1, 2 и 3 МГц составляют соответственно $0,3 \cdot 10^{-3} \lambda$, 0 и $0,0026 \lambda$.

Необходимо отметить, что ЭСАУ включала в себя только функционально необходимые элементы. Введение в состав ЭСАУ корректирующих элементов позволит при необходимо-

сти улучшить динамические и точностные характеристики системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ведерников В. М., Кирьянов В. П. Лазерно-интерферометрические системы в промышленных измерениях // Автометрия. – 1998. – № 6. – С. 85–92.
2. Зуйков И. Е., Тузков Ю. Ф. Пошагово-компенсационный метод измерения линейных перемещений // Междунар. науч.-практ. конф. «Качество-99», 10.11–12.11.1999. – Мн., 1999. – С. 245–248.
3. Зуйков И. Е., Тузков Ю. Ф. Экспериментальное исследование пошагово-компенсационного метода измерения линейных перемещений // Метрологическое обеспечение качества – 2000: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 нояб. 2000 г. – Мн., 2000. – С. 184–187.
4. Сикора С. В., Симкин Г. С. Активный лазерный интерферометр // Труды Харьковского государственного научно-исследовательского института метрологии. – М., 1969. – С. 104–114.
5. Самонастраивающиеся системы: Справ. / Под общ. ред. П. И. Чинаева. – Киев: Наукова думка, 1969. – 528 с.
6. Олейников В. А., Зотов Н. С., Пришвин А. М. Основы оптимального и экстремального управления. – М.: Высш. шк., 1969. – 296 с.
7. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / В. Д. Громыко, В. В. Зубарь, В. В. Кругликов и др.; Под общ. ред. Е. А. Санковского. – Мн.: Выш. шк., 1973. – 584 с.
8. Топчеев Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
9. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
10. Справочник по радиоэлектронным системам: В 2 т. / В. Н. Захаров, Б. Х. Кривицкий, Н. С. Мамаев и др.; Под ред. Б. Х. Кривицкого. – М., Энергия, 1979. – Т. 1 – 352 с.