

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ О РАСЧЕТЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ОКГ ПО ПРОВАЛУ ЛЭМБА

А. Я. Лейкин, В. С. Соловьев, Н. В. Москиенко

Харьков

Частота излучения одночастотного ОКГ в первом приближении определяется длиной резонатора в соответствии с уравнением

$$f_{\text{ген}} = \frac{c}{2nL} N, \quad (1)$$

где $f_{\text{ген}}$ — частота излучения;

nL — оптическая длина резонатора;

c — скорость света в вакууме;

N — целое число.

Стабильность этой частоты существенно зависит от стабильности резонатора, т. е. от постоянства его длины. Для стабилизации длины резонатора ОКГ предлагались различные методы, часть которых основана на принципе экспериментальных систем регулирования с использованием поискового сигнала. Настройка осуществляется по «лэмбовскому провалу» либо по максимуму контура усиления [1].

Системы стабилизации частоты ОКГ, основанные на этом принципе, работают следующим образом: на одно из зеркал резонатора от генератора опорного напряжения непрерывно подается модулирующий сигнал с частотой ω_m , вызывающий изменение длины резонатора на величину $L_m \sin \omega_m t$. При этом в зависимости от положения рабочей точки (частоты генерации) относительно экстремума фаза переменной составляющей выходного сигнала изменяется на противоположную. В точке экстремума частота переменной составляющей удваивается. Переменная составляющая, пройдя через резонансный фильтр, настроенный на частоту ω_m , усиливается усилителем и подается на вход синхронного детектора. На его выходе получается сигнал, постоянная составляющая которого пропорциональна производной характеристики объекта регулирования по регулируемому воздействию. Знак этого сигнала меняется в зависимости от положения рабочей точки на характеристике относительно экстремума. В точке экстремума постоянная составляющая равна нулю. Подавив с помощью фильтра переменную составляющую, получают сигнал, поступающий на управляющий элемент, который подстраивает длину резонатора соответствующим способом.

Насколько известно, полный анализ такой системы АПЧ ОКГ не производился. В то же время ряд характеристик, в особенности переходной процесс и качество регулирования, является весьма важным при использовании стабилизированных ОКГ в реальных системах.

Рассматриваемую систему (рис. 1) можно классифицировать как одноконтурную комбинированную систему с параллельным включением управляющих элементов [2].

Оба управляющих элемента включены параллельно от общего дискриминатора (СД) и воздействуют на один объект (ОКГ).

Применение систем АПЧ с параллельной работой электронного и электромеханического управляющих элементов позволяет реализовать достаточно высокую точность работы и малую длительность переходного процесса.

При больших расстройках работает электромеханический элемент, компенсирующий их до величины полосы схватывания электронного элемента. Последний уменьшает их до величины, соответствующей точности системы. Наличие электромеханического управляющего элемента позволяет считать, что двигатель остановится в положении, когда расстройка равна нулю, так как комбинированная система является астатической. Для астатических же систем принципиальным является независимость остаточной расстройки от начальной.

Рассматриваемая система отличается от аналогичных, применявшихся ранее, наличием релейного преобразователя между ФНЧ₂ и УЭ в канале электромеханического управляющего элемента.

Для систем с непосредственным управлением двигателем характерно изменение скорости двигателя пропорционально приложенному напряжению. Величина остаточной расстройки связана с величиной напряжения трогания двигателя, т.е. на точность работы системы оказывают влияние характеристики управляющего элемента. При этом в зону остаточной расстройки система АПЧ входит со сниженной скоростью двигателя. Такие системы обладают существенным недостатком — инерционностью.

Поэтому, когда требуется повысить быстродействие системы, перед управляющим элементом в нее вводится релейный преобразователь. Быстродействие системы достигается за счет подачи на двигатель напряжения постоянной величины от постороннего источника. В этом случае величина остаточной расстройки определяется не напряжением трогания двигателя, а напряжением срабатывания реле.

Однако введение реле оказывает существенное влияние на устойчивость системы и характер переходных процессов в ней.

При проектировании лазерных систем наибольший интерес представляют следующие характеристики систем АПЧ: точность работы, устойчивость, характер переходного процесса.

Для определения качества регулирования необходимо проанализировать рассматриваемую систему, т.е. определить выходной сигнал при известном входном сигнале и заданных параметрах системы. Эта задача решается при помощи основного уравнения авторегулирования, которое получается из дифферен-

циальных и алгебраических уравнений, описывающих работу отдельных элементов (звеньев), входящих в систему.

Предварительно сделаем некоторые упрощения.

1. Объект регулирования обладает нелинейной характеристикой. При настройке по «лэмбовскому провалу» эта характеристика описывается лоренцевской кривой

$$I = I_0 \frac{\gamma^2}{(f - f_0)^2 + \gamma^2}. \quad (2)$$

При настройке на максимум кривой усиления характеристика имеет гауссовскую форму

$$I = I_0 e^{-\kappa \left(\frac{f - f_0}{f_0} \right)^2}. \quad (2a)$$

Анализ системы с использованием этих уравнений приводит к очень сложным, громоздким вычислениям.

Если рассматривать только малые расстройки, то (2) и (2a) можно аппроксимировать уравнением

$$I = I_0 \left(1 - k \frac{\Delta f^2}{f_0^2} \right), \quad (2б)$$

где k — постоянная, определяемая конструкцией ОКГ и пределами аппроксимации;

$\frac{\Delta f}{f_0}$ — относительная расстройка.

В результате представления ОР звеном с характеристикой (2б) его коэффициент передачи — K_{OP} ;

2. Фотоэлектронный умножитель является широкополосным приемником и в рассматриваемой системе представляется звеном с коэффициентом передачи $K_{ФЭУ}$.

3. Усилитель — практически безынерционное звено с коэффициентом передачи $K_{УС}$.

4. Синхронный детектор также безынерционное звено с коэффициентом передачи $K_{СР}$.

Поскольку все звенья работают на линейных участках своих характеристик и являются безынерционными, можно заменить их общим звеном с коэффициентом передачи K_1 . В результате схема рис. 1 упрощается и принимает вид (рис. 2).

В рассматриваемой системе имеется существенно нелинейный элемент — реле. Для анализа основного уравнения системы необходимо линеаризировать нелинейный элемент. Воспользуемся методом гармонической линеаризации. Ограничимся рассмотрением первой гармоники на выходе реле при синусоидальном напряжении

на его входе. Нелинейный оператор, описывающий действие реле, заменяется гармоническим коэффициентом усиления q_p :

$$q_p = \frac{4U_2}{\pi U_{\text{вх}}} \sqrt{1 - \frac{U_{\text{ср}}^2}{U_{\text{вх}}^2}} \quad \text{при } U_{\text{вх}} > U_{\text{ср}};$$

$$q_p = 0 \quad \text{при } U_{\text{вх}} \leq U_{\text{ср}}.$$

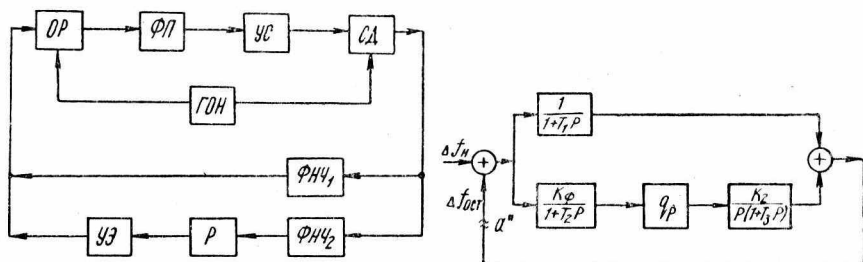


Рис. 1. Система автоподстройки частоты ОКГ:

ОР — объект регулирования (ОКГ); ФП — фотоприемник (ФЭУ); УС — резонансный усилитель, настроенный на частоту ω_m , и усилитель; ГОН — генератор опорного напряжения с частотой ω_m ; СД — синхронный детектор; ФНЧ₁ — фильтр нижних частот, электронный управляющий элемент (образован выходным сопротивлением синхронного детектора и емкостью пьезокерамики); ФНЧ₂ — фильтр нижних частот канала второго управляющего элемента; полоса пропускания этого фильтра значительно уже полосы пропускания фильтра электронного элемента; Р — релейный преобразователь; УЭ — второй управляющий элемент электромеханического типа: двигатель с редуктором и потенциометр.

Рис. 2. Структурная схема системы АПЧ:

$K_1 = K_{\text{ор}} K_{\text{фэу}} K_{\text{ус}} K_{\text{сд}}$ — коэффициент передачи линейной части системы, общей для обоих управляющих элементов; $\frac{1}{1+T_1 p}$ — передаточная функция фильтра нижних частот электронного управляющего элемента; $\frac{K_{\text{ф}}}{1+T_2 p}$ — передаточная функция фильтра нижних частот электромеханического управляющего элемента; $\frac{K_2}{p(1+T_3 p)}$ — передаточная функция электромеханического управляющего элемента; $K_2 = K_{\text{дв}} \frac{1}{i_p} \cdot S_{\text{уа}}$ — коэффициент усиления двигателя; i_p — передаточное число редуктора; $S_{\text{уа}}$ — коэффициент передачи потенциометра; q_p — коэффициент передачи релейного преобразователя.

С учетом коэффициента передачи звеньев передаточная функция системы, разомкнутой в точке a (рис. 2), имеет вид

$$W(p) = K_1 \left[\frac{1}{1+T_1 p} + \frac{K_{\text{ф}} q_p K_2}{p(1+T_2 p)(1+T_3 p)} \right]. \quad (3)$$

Для замкнутой системы

$$\frac{W(p)}{1+W(p)} = \frac{X_{\text{вх}}(p)}{X_{\text{вх}}(p)} = \frac{\Delta f_{\text{ост}}(p)}{\Delta f_{\text{н}}(p)} = \frac{A(p)}{H(p)}, \quad (4)$$

или

$$\frac{W(p)}{1 \mp W(p)} = \frac{b_0 p^3 \mp b_1 p^2 \mp b_2 p \mp b_3}{a_0 p^4 \mp a_1 p^3 \mp a_2 p^2 \mp a_3 p \mp a_4}, \quad (4a)$$

где

$$b_0 = K_1 T_2 T_3; \quad b_1 = K_1 T_2 + K_1 T_3; \quad b_2 = K_1 + K_1 K_{\Phi} q_p K_2 T_1;$$

$$b_3 = K_1 K_{\Phi} q_p K_2;$$

$$a_0 = T_1 T_2 T_3; \quad a = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3 + K_1 T_2 T_3;$$

$$a_2 = T_1 + T_2 + T_3 + K_1 T_2 + K_1 T_3; \quad a_3 = K_1 K_{\Phi} q_p K_2 T_1;$$

$$a_4 = K_1 K_{\Phi} q_p K_2.$$

Одним из главных критериев качества работы системы является ее устойчивость.

Поскольку рассматриваемая система АПЧ содержит нелинейное звено — реле, исследования на устойчивость удобнее всего провести методом Гольдфарба [3]. Сущность его состоит в том, что первоначальная система представляется в виде последовательно соединенных линейного и нелинейного звеньев. Основное уравнение решается графически после разделения передаточной функции системы на соответствующие части

$$W_n(p) = -\frac{1}{W_n}. \quad (5)$$

Левая часть уравнения (5) представляет на графике амплитудно-фазовую характеристику линейной части уравнения разомкнутой системы; правая часть (5) — характеристику нелинейного элемента. Если эти характеристики не пересекаются, то регулирование устойчиво, в противном случае — в системе возникают автоколебания.

После подстановки соответствующих коэффициентов в (5) и выделения линейной и нелинейной частей получаем

$$-\frac{1}{q_p} = \frac{c_0 p \mp c_1}{d_0 p^4 \mp d_1 p^3 \mp d_2 p^2 \mp d_3 p}; \quad (5a)$$

$$c_0 = K_1 K_{\Phi} K_2 T_1; \quad c_1 = K_1 K_{\Phi} K_2;$$

$$d_0 = T_1 T_2 T_3; \quad d_1 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3 + K_1 T_2 T_3;$$

$$d_2 = T_1 + T_2 + T_3 + K_1 T_2 + K_1 T_3; \quad d_3 = 1.$$

Для решения (5a) графоаналитическим путем необходимо подставить численные значения коэффициентов, которые в реальной системе имеют следующие значения:

$$T_1 = 10^{-3} \text{ сек}; \quad T_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек}; \quad T_3 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ сек};$$

$$K_1 = 2,75;$$

$$K_{\Phi} K_2 = 1,5;$$

$$q_p = 2,5 \text{ при } U_{\text{вх}} > U_{\text{ср}}; \quad q_p = 0 \text{ при } U_{\text{вх}} \leq U_{\text{ср}}.$$

Произведя замену $p = j\omega$ и выделив вещественную и мнимую части, получаем выражение для амплитудно-фазовой характеристики линейной части:

$$W_n(j\omega) = \operatorname{Re}(\omega) + j \operatorname{Im}(\omega) = \frac{12,375 \cdot 10^{-7} \omega^4 + 0,386 \omega^2}{10^{-14} \omega^8 + 14,1 \cdot 10^{-8} \omega^6 + 82 \cdot 10^{-4} \omega^4 + \omega^2} + j \frac{-4,125 \cdot 10^{-10} \omega^5 - 1,26 \cdot 10^{-3} \omega^3 + 4,125 \omega}{10^{-14} \omega^8 + 14,1 \cdot 10^{-8} \omega^6 + 82 \cdot 10^{-4} \omega^4 + \omega^2}. \quad (56)$$

Годограф, соответствующий (56), представлен на рис. 3.

Годограф амплитудно-фазовой характеристики нелинейной части совпадает с отрицательной вещественной осью в диапазоне от $-\frac{1}{q_p}$ до $-\infty$ (рис. 3).

Из приведенного на рис. 3 графика следует, что характеристики линейной и нелинейной частей не пересекаются, т. е. при имеющихся параметрах системы она устойчива.

В ряде случаев возможна вариация K_1 за счет изменения питающих напряжений, а также коэффициентов передачи ФЭУ, усилителя и изменения амплитуды поискового сигнала. Увеличение K_1 вызывает поворот характеристики линейной части по часовой стрелке (рис. 3). При этом годограф линейной части не пересекает характеристику нелинейной. Пересечение их при заданных параметрах системы и изменении K_1 может произойти только в случае изменения коэффициента передачи реле, повышения его чувствительности.

Основные требования, предъявляемые к системам АПЧ, — точность и быстродействие.

Точность работы системы характеризуется отклонением величины регулируемого параметра от номинального значения в установившемся режиме. Быстродействие системы оценивается по реакции на ступенчатое воздействие или скачок сигнала.

Наличие двух управляющих элементов в системе АПЧ, один из которых нелинеен, усложняет характер переходного процесса. Характер переходного процесса определяется решением дифференциального уравнения системы операторным методом при воздействии единичной функции (дельта-функции).

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид (4а)

$$\frac{W(p)}{1 + W(p)} = \frac{b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4}.$$

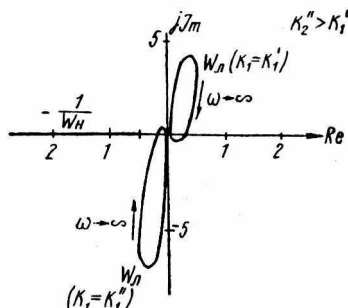


Рис. 3. Графическое определение условия устойчивости методом Л. С. Гольдфарба.

Ей соответствует характеристическое уравнение типа

$$1 + W(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0. \quad (6)$$

Для определения корней характеристического уравнения четвертого порядка можно воспользоваться методом деления многочленов [4], в результате чего характеристическое уравнение раскладывается на два квадратных:

$$(p^2 + C_1 p + C_2)(p^2 + B_1 p + B_2) = 0. \quad (7)$$

Операторное изображение выходной величины в соответствии с (4)

$$X_{\text{вых}}(p) = \frac{A(p)}{H(p)} \cdot \frac{1}{p}.$$

Для перехода от операторной функции $X_{\text{вых}}(p)$ к оригиналу $X_{\text{вых}}(t)$ воспользуемся второй теоремой разложения Хевисайда

$$x(t) = \frac{A(0)}{H(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{A(p_k)}{p_k H'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (8)$$

где

$$H'(p_k) = \left[\frac{dH(p)}{dp} \right]_{p=p_k},$$

p_k — корни характеристического уравнения (6) — находим путем решения каждого из сомножителей (7). При этом если первый из сомножителей имеет значительно большие по модулю корни, чем второй, то переходный процесс в системе определяется корнями второго сомножителя.

Для реальной системы с параметрами, указанными выше, изменение выходной величины при воздействии скачка на ее входе имеет вид

$$X_{\text{вых}}(t) = 1 + 2,08e^{-5,6t} \cos(9,1t - 1,7) + 0,11e^{-240t} - 0,73e^{-3750t}, \quad (9)$$

т.е. переходный процесс имеет затухающий колебательный характер.

Следует отметить, что при воздействии скачка сигнала на входе быстро срабатывает электронный элемент (два последних слагаемых в выражении для выходной величины). Но основное время переходного процесса связано с реле. Его характеристики определяют величину второго слагаемого в выражении (9).

Точность отработки, как видно из (9), в реальной системе составляет 0,002—0,003 начального возмущения.

При получении аperiodического характера переходного процесса в реальной системе нужно уменьшить чувствительность реле или коэффициент передачи общей части системы до значения $K_1 = 1, 2$.

Таким образом, в настоящей статье проведен полный анализ работы системы автоподстройки частоты оптических квантовых генераторов с релейным преобразователем в цепи инерционного управляющего элемента. Существенным достоинством такого варианта системы является ее быстроедействие, недостатком — некоторая потеря запаса устойчивости по сравнению с системой с непосредственным управлением двигателем.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Shimoda, A. Javan. J. Appl. Phys., v. 36, № 3, 1965.
2. В. И. Каганов. Системы автоматического регулирования в радиопередатчиках. Изд-во «Связь», 1969.
3. В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. Теория систем автоматического регулирования. Изд-во «Наука», 1966.
4. Е. П. Попов. Динамика систем автоматического регулирования. Гостехиздат, 1954.