

## К ВОПРОСУ О СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОБАЛАНСНОГО КАЛОРИМЕТРА

*Я. П. Цар, Л. А. Дидык*

Харьков

Простейшие схемы автобалансных калориметров (АБК) [1] имеют существенный недостаток. Статическая погрешность и эквивалентная постоянная времени системы авторегулирования, а с ней и время установления стационарного режима существенно зависят от управляющего воздействия — измеряемой величины (мощности СВЧ, температуры и т. п.): увеличиваются при малых уровнях измеряемой величины, если подобрать удовлетворительные параметры системы авторегулирования при максимальном уровне измеряемой величины. При подборе удовлетворительных параметров — статической погрешности и времени установления стационарного режима изменением петлевого усиления, при малых уровнях измеряемой величины измерение больших уровней связано со значительными перерегулированиями, что в некоторых случаях вызывает самовозбуждение на частотах, определяемых временем запаздывания системы, т. е. временем распространения фронта тепловой волны от нагревателя до термодатчика АБК [2]. Все это резко ухудшает динамические характеристики АБК. Устранение указанного недостатка до настоящего времени является актуальным, несмотря на то, что в этом направлении были проведены некоторые исследования [3].

Ниже показано решение поставленной задачи, в качестве примера представлена схема одного из вариантов АБК.

### Вывод основных соотношений

Структурная схема АБК, представленная на рис. 1., преобразовывает измеряемое напряжение  $U_x$  или мощность  $P_x$ , действующие на вход системы как управляющее воздействие, в выходное напряжение  $U_2$ . Последнее служит мерой управляющего воздействия и должно незначительно отличаться от напряжения  $U_x$ , что накладывает соответствующие ограничения на систему авторегулирования.

Основными элементами АБК являются идентичные в тепловом и электрическом отношении рабочая и компенсационная секции, объединенные общим термочувствительным дифференциальным датчиком — гипертермопарой. Секции содержат подогреватели, нагреваемые управляющим воздействием (рабочая секция) и выходным напряжением усилителя сигнала ошибки (компенсационная секция). Электрические параметры калориметрической секции во многом приближают ее к схеме, включающей два последовательных звена, одно из которых задерживает на время  $\tau_1$  подведенное воздействие, второе его интегрирует так, как это выполняло бы звено с постоянной времени  $\tau$ .

В стационарном режиме передача напряжения  $U_x$  и  $U_2$  от нагревателя секции до выхода термопары  $U_3$  и  $U_4$  представляется выражениями для рабочей и компенсационной секции соответственно:

$$\beta_{0p} = U_3 : U_x = a_p U_x = a_p \sqrt{P_x \rho} \quad (1)$$

и

$$\beta_{0k} = U_4 : U_2 = a_k U_2, \quad (2)$$

где  $a_p$ ,  $a_k$  — коэффициент передачи термопреобразователей на 1 в;  
 $P_x$  — измеряемая мощность;  
 $\rho$  — волновое сопротивление линии передачи.

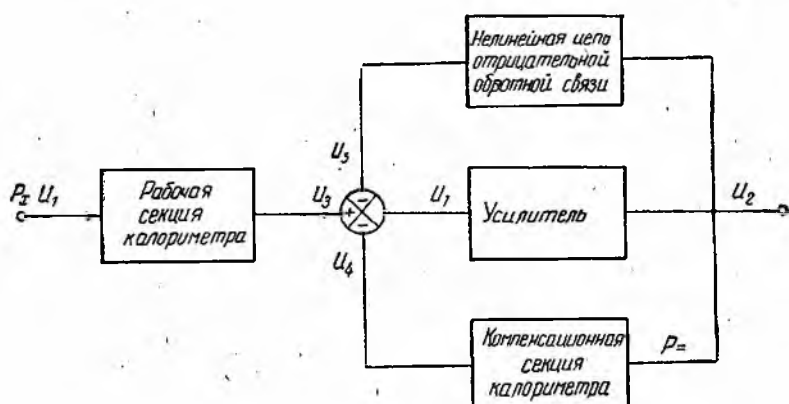


Рис. 1. Структурная схема автобалансного калориметра, преобразующего управляющее воздействие  $P_x$  или  $U_x$  в напряжение  $U_2$ .

Учитывая вышесказанное, коэффициенты передачи напряжений компенсационной и рабочей секции можно записать:

$$\beta_k(p) = U_4 : U_2 = \frac{\beta_{0k}}{1 + p\tau_k} e^{-p\tau_a} \quad (3)$$

и

$$\beta_p(p) = U_3 : U_x = \frac{\beta_{0p}}{1 + p\tau_p} e^{-p\tau_a}. \quad (4)$$

Усилитель АБК представляет собой звено, охваченное отрицательной обратной связью, величина которой меняется в зависимости от уровня усиливаемого сигнала ошибки, и состоит из собственно усилителя и цепи обратной связи (рис. 2) с коэффициентами передачи по напряжению соответственно:

$$k_y(p) = U_2 : U_1 = \frac{k}{1 + p\tau_y} \cong k, \quad (5)$$

так как  $\tau_y \ll \tau_p = \tau_k$

и

$$\beta_{oc}(p) = U_5 : U_2 \cong \beta_{oc} = \frac{R_d}{R_b + R_d} \cong \frac{R_d}{R_b}, \quad (6)$$

где  $\beta_{oc}$  — статический коэффициент передачи цепи обратной связи (предполагается, что постоянная времени цепи обратной связи незначительна по сравнению с постоянной времени калориметра);

$k$ ,  $\tau_y$  — статический коэффициент передачи и постоянная времени усилителя.

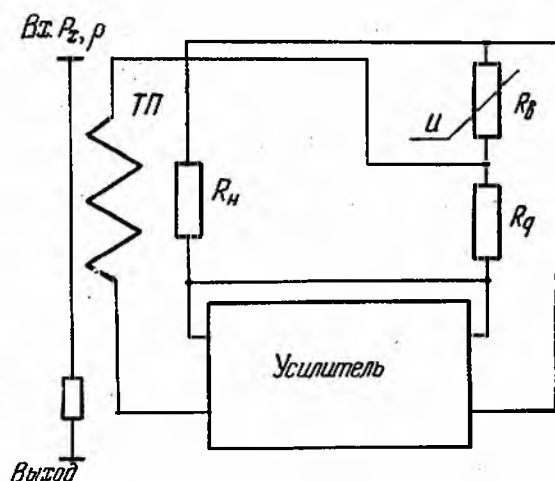


Рис. 2. Функциональная схема автобалансного калориметра с нелинейной обратной связью: ТП — гипертермомпара, измеритель разности температур рабочей и компенсационной секций;  $R_b$  — варистор обратной связи;  $R_n$  — сопротивление нагрузки подогревателя компенсационной секции.

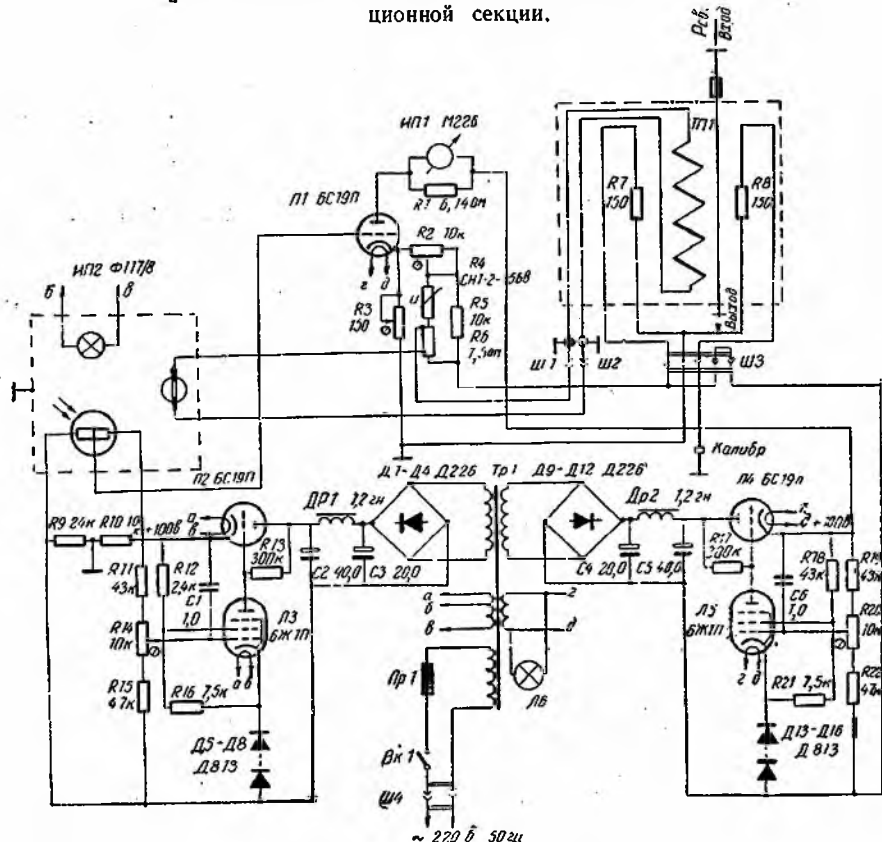


Рис. 3. Принципиальная схема автобалансного калориметра, в котором использована нелинейная обратная связь с применением варистора для стабилизации динамических характеристик.

Гипертермопара содержит большое число контактных термопар, включенных последовательно, и является вычитающим звеном, разностный сигнал которого подводится ко входу усилителя последовательно с напряжением обратной связи.

Чтобы найти коэффициент передачи всей системы от входа до выхода, определим коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью. При отключенной компенсационной секции получим:

$$k_{oc} = U_2 : U_3 = \frac{k_y(p)}{1 + \beta_{oc}(p) k_y(p)}, \quad (7)$$

$$U_4 = 0,$$

а при включении компенсационной секции коэффициент передачи от входа термопары до выхода системы составит соответственно

$$k_c = U_2 : U_3 = \frac{k_{oc}(p)}{1 + \beta(p) k_{oc}(p)} = \frac{k_y(p)}{1 + [\beta_{oc}(p) + \beta_k(p)] k_y(p)}. \quad (8)$$

На основании выражений (4), (8) общий коэффициент передачи системы от входа до выхода будет

$$W(p) = U_2 : U_x = \frac{\beta_p(p) k_y(p)}{1 + [\beta_{oc}(p) + \beta_k(p)] k_y(p)}. \quad (9)$$

Наиболее интересен для практики случай, когда петлевое усиление главной петли обратной связи значительно, т. е. когда имеет место неравенство

$$|[\beta_{oc}(p) + \beta_k(p)] k_y(p)| \gg 1.$$

При этом из (9) находим

$$W(p) \cong \frac{\beta_p(p)}{\beta_k(p)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\beta_{oc}(p)}{\beta_k(p)}}, \quad (10)$$

а если учесть тепловую и электрическую идентичность секций  $\beta_p(p) = \beta_k(p)$  и  $\beta_{op} = \beta_{ok} = \beta_0$ , то из (3), (6) окончательно получим

$$W(p) \cong \frac{1}{1 + \frac{\beta_{oc}}{\beta_0} e^{p\tau_3} (1 + p\tau)} \frac{1 - \delta_{ст}}{1 + p\tau_3}, \quad (11)$$

где

$$\tau_3 = (\tau + \tau_3) \beta_{oc} : \beta_0 \quad (12)$$

эквивалентная постоянная времени системы,

$$\delta_{ст} = \beta_{oc} : \beta_0 \quad (13)$$

статическая погрешность системы.

Для приведенной на рис. 2 схемы, во-первых, с высокой точностью имеем

$$R_b = \frac{b}{U_2}, \quad (14)$$

во-вторых, — из (2) следует, что

$$\beta_0 = a_k U_2, \quad (15)$$

где  $b$  — параметр варистора  $R_b$  обратной связи.

Таким образом, из (12)—(15) находим эквивалентную постоянную времени системы

$$\tau_3 = \frac{R_b}{a_k b} (\tau + \tau_3) \quad (16)$$

и статическую погрешность автобалансного калориметра

$$\delta_{ст} = \frac{R_b}{a_{kb}} \cdot \quad (17)$$

Рассмотренный способ коррекции динамических характеристик АБК нашел практическое применение в автобалансном измерителе мощности СВЧ, схема которого представлена на рис. 3, а его переходные характеристики — на рис. 4.

Из выражений (16), (17) видно, что как эквивалентная постоянная системы, так и статическая погрешность в первом приближении не зависят от величины управляющего воздействия.

Таким образом, система, в основу которой положено использование нелинейной отрицательной обратной связи усилителя сигнала ошибки, позволяет получить постоянные динамические характеристики, что подтверждается приведенными переходными характеристиками.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующий вывод: если систему автоматического регулирования со значительным петлевым усилением и с нелинейной схемой в цепи главной петли обратной связи охватить местной отрицательной обратной связью с коэффициентом передачи, отличающимся от коэффициента передачи главной петли обратной связи только постоянным множителем, то динамически

характеристики системы авторегулирования не зависят от уровня управляющего воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П. П. Орнатский. Автоматические измерительные приборы. Изд-во «Техника», Киев, 1965.
2. В. Д. Кукуш, И. К. Овчинников, Я. П. Цар. Анализ устойчивости автобалансного калориметра. Тезисы докладов конференции «Автоматический контроль и методы электрических измерений». Новосибирск, 1966.
3. Я. П. Цар. Стабилизация петлевого усиления автобалансных измерителей мощности. Всесоюзная научная сессия НТОРиЭ им. Попова А. С., секция радиоизмерений, 1966.

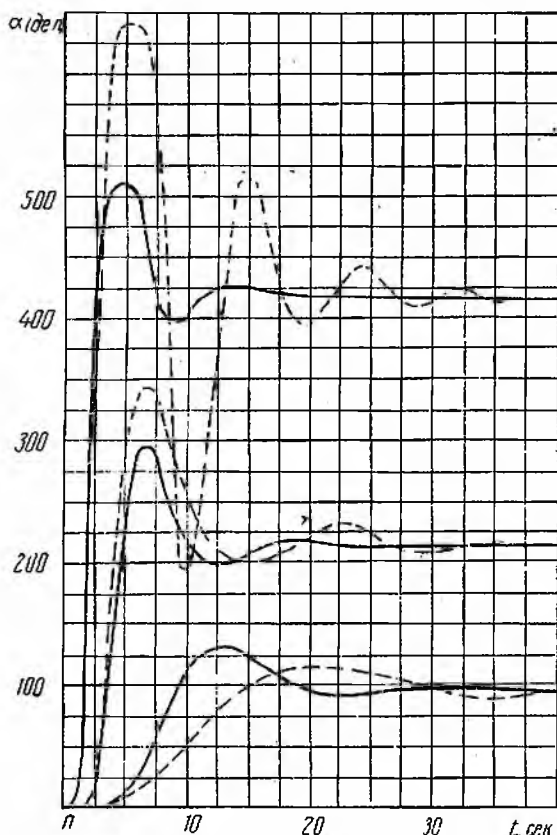


Рис. 4. Переходные характеристики автобалансного калориметра при разных уровнях управляющего воздействия: пунктир — переходные характеристики калориметра без нелинейной обратной связи, записанные с помощью двухкоординатного потенциометра.