

УДК 550.834

ГЕОФИЗИКА

А. Б. Немировский

**О динамическом режиме работы систем стабилизации  
 при скоростном непрерывном акустическом каротаже**

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 20/VII 1970)

В процессе преобразования импульсного информационного потока в аналоговую форму при СНАКАР с помощью схем типа измерителя скважности при изменении частоты повторения импульсов возникает неоднозначность результата измерения. Для ее устранения применяются системы стабилизации двух типов, работа которых в статическом режиме рассмотрена рядом авторов (1, 2). Однако при изучении реального геологического разреза аппаратура СНАКАР работает в большинстве случаев в динамическом режиме, к чему приводят перемещение зонда против пластов малой мощности, а также скачкообразные изменения частоты повторения импульсов. В настоящей работе исследуется влияние динамического режима на точность стабилизации при различных типах применяемых систем.

1. Система стабилизации первого типа (ССКЧ).

К ССКЧ будем относить любую систему устранения неоднозначности измерения при СНАКАР, основанную на применении схемы конденсаторного частотомера КЧ (3), независимо от его конкретного схемного решения.

Предполагаются выполненными следующие условия:

1. ССКЧ имеет обобщенную эквивалентную схему, представленную на рис. 1. Здесь  $K$  — ключ, замыкаемый с периодом  $T$  в течение длительности импульса  $t_n$  и размыкаемый на время  $T - t_n$ ;  $U$  — напряжение источника питания КЧ;  $\Phi$  — фильтр;  $H$  — инвертор;  $k_1, k_2$  — множители соответствующих коэффициентов;  $\Sigma$  — сумматор; СВПС — схема выделения постоянной составляющей.

2. Следуя (3), считаем, что напряжение, подаваемое на вход системы стабилизации с СВПС, имеет трапециoidalную форму.

Рассмотрим процессы, возникающие на выходе КЧ при скачкообразном изменении частоты повторения импульсов с  $f_1$  до  $f_2$ . При этом на вход СВПС поступает последовательность импульсов ампли-

тудой  $U_m$ , длительностью  $t_n$  с периодом повторения  $T_2$ . Согласно (4), при  $\alpha T \ll 1$ , напряжение на выходе СВПС меняется по закону:

$$U_{\text{СВПС}} = A^N (1 - ce^{-\alpha_1 T_2}), \quad (1)$$

где

$$c = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}; \quad A^N \cong U_m \frac{t_n}{T_2} = U_n \frac{T_1}{T_2}.$$

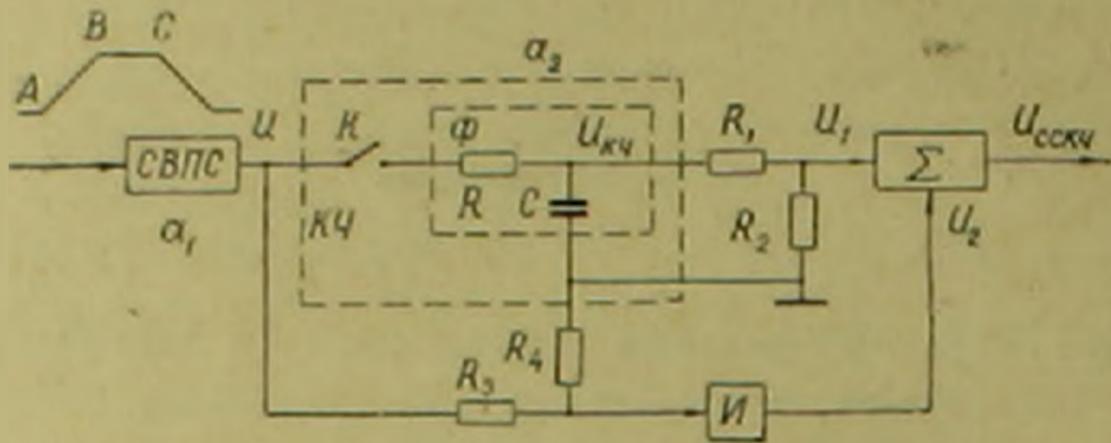


Рис. 1. Обобщенная эквивалентная схема системы стабилизации с использованием конденсаторного частотомера

Здесь  $c$  — относительная стабильность периода повторения,  $U_n$  — номинальное значение амплитуды напряжения на выходе СВПС при  $T = T_1$ .

Исследуем с помощью метода наложения переходные процессы, возникающие на выходе КЧ при изменении напряжения источника питания в соответствии с (1). Суммируя алгебраически реакции интегрирующей цепи на единичные скачки напряжения, сдвинутые соответствующим образом во времени с учетом амплитудной модуляции и начального напряжения на конденсаторе  $U_0$ , получаем:

$$U_{\text{КЧ}} = A^N \left\{ \sum_{n=1}^N (1 - ce^{-(n-1)\alpha_1 T_2}) (1 - e^{-\alpha_2(t - (n-1)T_2)}) - \sum_{n=1}^N (1 - ce^{-(n-1)\alpha_1 T_2}) (1 - e^{-\alpha_2(t - t_n - (n-1)T_2)}) \right\} + U_0 e^{-\alpha_2 t}. \quad (2)$$

Здесь

$$U_0 \cong A^N (1 - c)^2 \frac{t_n}{T_2}; \quad t = (n - 1) T_2 + t_n,$$

где  $n$  — число импульсов на входе СВПС.

Выполняя суммирование в (2), получаем после преобразований:

$$U_{\text{КЧ}} \cong A^N \frac{t_n}{T_2} \left\{ 1 - \left| 1 - (1 - c)^2 + c \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} (1 - e^{-(\alpha_1 - \alpha_2) T_2}) \right| e^{-\alpha_2 T_2} \right\} \quad (3)$$

Как следует из (3), в установившемся режиме, т. е. при  $n = \infty$ , напряжение на выходе делителя  $R_3 - R_4$  конденсаторного частотомера равно:

$$U_2 \cong A^N \frac{t_n}{T_2} \frac{R_3}{R_3 + R_4} = k_2 U_n \frac{f^2}{f_n}, \quad \text{где } k_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} t_n;$$

$$f_n = f_1; f = f_2$$

что совпадает с полученным в (1) результатом. Таким образом, теоретически ССКЧ переходит в установившийся режим через бесконечно большой промежуток времени с момента изменения частоты повторения импульсов.

Определим реальный интервал времени, необходимый для окончания переходных процессов с заданной точностью, которая должна соизмеряться с точностью работы ССКЧ. Из сказанного следует, что длительность работы системы в динамическом режиме определяется уравнениями (1), (3). Учитывая, что напряжения на выходе делителей  $R_1 - R_2$  и  $R_3 - R_4$  равны:

$$U_1 = U_{\text{свпс}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = k_1 U_n \frac{f}{f_n} (1 - ce^{-n\alpha_1 T_1});$$

$$U_2 = U_{\text{кч}} \frac{R_3}{R_3 + R_4} = k_2 \frac{U_n}{f_n} f^2 \left\{ 1 - \left[ 1 - (1 - c)^2 + c \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} (1 - e^{-(\alpha_1 - \alpha_2)nT_2}) \right] e^{-n\alpha_2 T_2} \right\}$$

получим

$$U_{\text{ССКЧ}}|_{t^*} = U_1 - U_2 = \frac{U_n}{f_n} [k_1 f (1 - \Delta_1(t^*)) - k_2 f^2 (1 - \Delta_2(t^*))] \quad (4)$$

где

$$k_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad \Delta_1(t^*) = ce^{-n\alpha_1 T_1};$$

$$\Delta_2(t^*) = \left[ 1 - (1 - c)^2 + c \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} (1 - e^{-(\alpha_1 - \alpha_2)nT_2}) \right] e^{-n\alpha_2 T_2}; \quad t^* = nT_2.$$

т. е. стабилизирующее действие ССКЧ меняется во времени. При  $t^* = \infty$  из (4) получаем известный (1) результат:

$$U_{\text{ССКЧ}}|_{t^* = \infty} = \frac{U_n}{f_n} (k_1 f - k_2 f^2).$$

Так как на практике в ряде случаев удобнее оперировать понятием относительной стабильности частоты повторения импульсов, заменим в (4) параметр  $c$  через  $1 - \frac{f_n}{f}$ . Принимая во внимание, что

при настройке ССКЧ коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  подбирают из условия выполнения для номинальной частоты работы системы соотношения

$$k_1 = 2k_2 f_n$$

получаем с учетом (4) следующее выражение для ошибки стабилизации  $\psi$  в установившемся режиме при скачкообразном изменении частоты  $\pm \Delta f$ :

$$b = 1 - \frac{U_{\text{ССКЧ}}(f_{\text{н}} \pm \Delta f)_{|f^* \rightarrow \infty}}{U_{\text{ССКЧ}}(f_{\text{н}})_{|f^* \rightarrow \infty}} = \left(\frac{\Delta f}{f_{\text{н}}}\right)^2. \quad (5)$$

Длительность работы ССКЧ в динамическом режиме определяем по степени заранее задаваемого ухудшения качества стабилизации  $S > 1$  по сравнению с  $\psi$ :

$$\frac{U_{\text{ССКЧ}}(f_{\text{н}})_{|f^* \rightarrow \infty} - U_{\text{ССКЧ}}(f_{\text{н}} \pm \Delta f)_{|f^*}}{\psi U_{\text{ССКЧ}}(f_{\text{н}})_{|f^* \rightarrow \infty}} = S. \quad (6)$$

Подставляя (4), (5) в (6) и учитывая характер изменения  $U_{\text{ССКЧ}}$  в течение переходного периода, получим следующие уравнения для определения длительности динамического режима  $t^*$ :

$$\text{при } b > 1 \quad \begin{cases} 1 < b < 2 + d; & d > 0; \\ 1 < b < \frac{2}{1 + |d|}; & d < 0; \end{cases} \quad \begin{cases} |\xi(b, d)|e^{-a_1 t^*} - |\eta(b, d)|e^{-b a_1 t^*} = (S + 1)|d| \end{cases}$$

$$|\xi(b, d)|e^{-a_1 t^*} + |\eta(b, d)|e^{-b a_1 t^*} = \begin{cases} (S + 1)d & \left\{ \begin{array}{l} 2 + d < b < \frac{2}{1 - d}; & d > 0; \\ \frac{2}{1 + |d|} < b < 2 - |d|; & d < 0; \end{array} \right. \end{cases} \quad (7)$$

$$|\xi(b, d)|e^{-a_1 t^*} - |\eta(b, d)|e^{-b a_1 t^*} = (S - 1)|d| \quad \begin{cases} b > \frac{2}{1 - d}; & d > 0; \\ b > 2 - |d|; & d < 0; \end{cases}$$

где

$$\xi(b, d) = \frac{2 - b \pm |d|b}{1 - b}, \quad \eta(b, d) = \frac{2 - b \pm |d|}{1 - b}; \quad b = \frac{a_2}{a_1}; \quad d = \pm \frac{\Delta f}{f_{\text{н}}}$$

при  $b < 1$

$$|\eta(b, d)|e^{-b a_1 t^*} - |\xi(b, d)|e^{-a_1 t^*} = (S + 1)|d|. \quad (8)$$

Рассмотрим влияние скорости перемещения акустического зонда в скважине на точность работы ССКЧ. При перемещении зонда против пласта малой мощности на вход  $\Phi$  поступает последовательность амплитудно-модулированных импульсов, огибающая которых имеет трапециoidalную форму. Суммируя импульсные реакции фильтра, получаем для напряжения  $U_{\text{КЧ}}^{(AB)}$  в области  $AB$  (рис. 1):

$$U_{\text{КЧ}}^{(AB)} = \sum_{n=1}^N [A + (n-1)\Delta A](1 - e^{-a_1(t - (n-1)T)}) - \sum_{n=1}^N [A + (n-1)\Delta A](1 - e^{-a_1(t - t_n - (n-1)T)}) + U_0^* e^{-a_1 t};$$

$$\Delta A = \frac{A_n - A}{N}; \quad U_0^* = A \frac{t_n}{T}, \quad (9)$$

где  $A$ ,  $A_n$ ,  $\Delta A$  — амплитуда импульсов на входе  $\Phi$  при перемещении зонда во вмещающей среде или пласте и приращение амплитуды на один импульс соответственно. Производя суммирование в (9), получаем после преобразований по формулам для геометрической и арифметико-геометрической прогрессий

$$U_{\text{КЧ}}^{(\text{AB})} = A_n \left\{ e^{-\alpha_1 t} (e^{\alpha_1 t_n} - 1) \sum_{n=1}^N \left[ 1 + (n-1) \frac{\Delta A}{A} \right] e^{\alpha_2 (n-1)T} + \frac{t_n}{T} e^{-\alpha_2 t} \right\} \cong \\ \cong \frac{t_n}{T} A_n \left[ 1 - \frac{\Delta A}{A_n} \frac{1 - e^{-N\alpha_2 T}}{\alpha_2 T} \right].$$

Напряжение  $U_{\text{КЧ}}^{(\text{BC})}$ , соответствующее воздействию на  $R C$  — цепь  $M$  немодулированных импульсов, находим по формуле, аналогичной полученной нами в работе (4).

$$U_{\text{КЧ}}^{(\text{BC})} = A_n (1 - e^{-M\alpha_2 T}) \frac{t_n}{T} + U_{\text{КЧ}}^{(\text{AB})} e^{-\alpha_2 (N-1)T + t_n} \cong \\ \cong A_n \frac{t_n}{T} \left[ 1 - \frac{\Delta A}{A} \frac{(1 - e^{-N\alpha_2 T})}{\alpha_2 T} e^{-M\alpha_2 T} \right]. \quad (10)$$

Учитывая, что установившееся значение амплитуды  $A$  ( $A_n$ ) обратно пропорционально скорости распространения упругих колебаний в соответствующей среде, полученное уравнение (10) можно записать в форме

$$U_{\text{КЧ}}^{(\text{BC})} \cong A_n \frac{t_n}{T} \left[ 1 - (1 - a) \frac{1 - e^{-N\alpha_2 T}}{N\alpha_2 T} e^{-M\alpha_2 T} \right], \quad \text{где } a = \frac{V_{\text{пл}}}{V_{\text{ср}}}.$$

Второе слагаемое, заключенное в квадратных скобках, представляет собой динамическую погрешность (ДП) установления напряжения на выходе КЧ:

$$\delta_{\text{КЧ}}^{(\text{BC})} = (1 - a) \frac{1 - e^{-N\alpha_2 T}}{N\alpha_2 T} e^{-M\alpha_2 T} = (1 - a) \rho (1 - e^{-\frac{1}{\rho}}) e^{-M\alpha_2 T}, \quad (11)$$

где  $\rho$  — обобщенный фактор динамической погрешности.

Уравнение (11) позволяет определить время, необходимое для начала работы ССКЧ в квазистатическом режиме при любом значении параметра  $\rho$ .

## II. Система стабилизации второго типа (СУРЦ).

Эквивалентная схема системы стабилизации с управляемой разрядной цепью представлена на рис. 2. Предполагается, что на ключ  $K_1$  подается информационный поток импульсов, длительность которых  $t^N$  равна измеряемому интервальному времени. Длительность коммутирующих импульсов, подаваемых на  $K_2$ , равна  $\tau_0$ . Ключи  $K_1$  и  $K_2$  замыкаются синфазно. Выделим три фазы работы СУРЦ:

1. Заряд интегрирующей цепи  $R - C$  от источника тока  $J_0$  в течение  $t^N$ .

2. Разряд конденсатора  $C$  через сопротивление  $R$  в течение  $\tau_0 - t^N$ .

3. Запоминание напряжения, накопленного на емкости  $C$ , в течение  $T - \tau_0$ .

Рассмотрим динамический режим работы СУРЦ. При перемещении зонда, соответствующего участку  $AB$  (рис. 2), на ключ  $K_1$  бу-

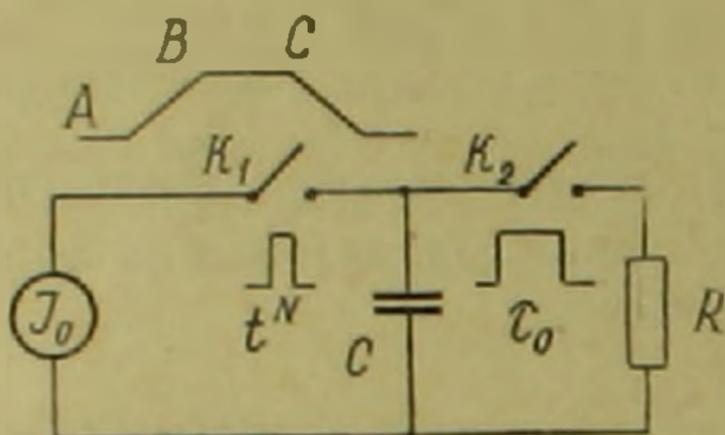


Рис. 2. Эквивалентная схема системы стабилизации с управляемой разрядной цепью интегратора

дут подаваться широтно-модулированные импульсы (\*). Для исследования динамического режима работы СУРЦ применим метод индукции. Учитывая, что импульсная реакция  $RC$ -цепи при  $J_0 R = 1$  с учетом начального напряжения на конденсаторе  $U_0^{(AB)}$  равна

$$h(t) = 1 - e^{-\alpha t} + U_0^{(AB)} e^{-\alpha t}, \quad \text{где } \alpha = \frac{1}{RC}$$

получаем в момент окончания первого импульса  $t_0$ :

$$U_p^{(1)} = 1 - e^{-\alpha t_0} + U_0^{(AB)} e^{-\alpha t_0}.$$

Напряжение в конце второй фазы:

$$U_p^{(2)} = U_p^{(1)} e^{-\alpha(\tau_0 - t_0)} = e^{-\alpha(\tau_0 - t_0)} - e^{-\alpha \tau_0} + U_0^{(AB)} e^{-\alpha \tau_0}.$$

Так как напряжение на емкости в течение третьей фазы не изменяется, то ее длительность при анализе не нужно учитывать.

Аналогичным образом, при воздействии второго импульса длительностью  $t_0 + \Delta t$  имеем:

$$U_p^{(2)} = 1 + e^{-\alpha(\tau_0 + \Delta t)} - e^{-\alpha(\tau_0 + \Delta t)} (1 + e^{-\alpha \tau_0}) + U_0^{(AB)} e^{-\alpha \tau_0} e^{-\alpha(t_0 + \Delta t)}$$

$$U_p^{(2)} = e^{-\alpha(\tau_0 - t_0 - \Delta t)} + e^{-\alpha(2\tau_0 - t_0)} - e^{-\alpha \tau_0} - e^{-2\alpha \tau_0} + U_0^{(AB)} e^{-2\alpha \tau_0}.$$

Продолжая указанные операции дальше, для  $n$ -ого импульса получаем:

$$U_p^{(n)} = \sum_{k=1}^n e^{-\alpha(n-k)(\tau_0 + \Delta t)} - e^{-\alpha(t_0 + (n-1)\Delta t)} \sum_{k=1}^n e^{-\alpha(n-k)\tau_0} + U_0^{(AB)} e^{-\alpha(n-1)\tau_0} e^{-\alpha t^N} \quad (12)$$

Здесь  $t^N = t_0 + (n - 1) \Delta t$ , где  $\Delta t$  — приращение длительности на один импульс при широтной модуляции.

Преобразуем уравнение (12) с учетом формул для геометрической прогрессии:

$$U_3^{(n)} = \frac{1 - e^{-a n (\tau_0 + \Delta t)}}{1 - e^{-a (\tau_0 + \Delta t)}} = \frac{1 - e^{-n a \tau_0}}{1 - e^{-a \tau_0}} e^{-a t^N} + U_0^{(AB)} e^{-a t^{**}}, \quad (13)$$

где

$$t^{**} = (n - 1) \tau_0 + t^N.$$

Сравнивая (13) с ранее полученным нами уравнением (4) для выходного напряжения  $U_{\text{СВПС}}$ , убеждаемся в их идентичности. В связи с этим величина ДП  $\delta_{\text{СУРЦ}}^{(BC)}$  имеет форму, аналогичную  $\delta_{\text{СВПС}}^{(BC)}$ :

$$\delta_{\text{СУРЦ}}^{(BC)} = (1 - a) \frac{1}{N a \tau_0} (1 - e^{-N a \tau_0}) e^{-M a \tau_0} = (1 - a) \rho_0 (1 - e^{-\frac{1}{\rho_0}}) e^{-M a \tau_0}$$

где  $\rho_0$  — обобщенный фактор динамической погрешности системы СУРЦ.

Из (13) следует, в частности, что при работе системы СУРЦ в установившемся режиме, когда  $n \rightarrow \infty$ , напряжение на выходе равно

$$U_3^{(\infty)} = \frac{1 - e^{-a t^N}}{1 - e^{-a \tau_0}}; \quad U_p^{(\infty)} = U_3^{(\infty)} e^{-a (\tau_0 - t^N)},$$

т. е. результат измерения интервального времени действительно не зависит от частоты повторения импульсов. Коэффициент пульсаций  $K_{n \text{ СУРЦ}}$  на выходе системы стабилизации находим по формуле:

$$K_{n \text{ СУРЦ}} = \frac{U_3^{(\infty)}}{U_p^{(\infty)}} = e^{a (\tau_0 - t^N)}. \quad (15)$$

Сравним величины ДП на выходе СУРЦ и СВПС, не имеющей системы стабилизации. Из (11) и (15) следует, что при прочих равных условиях величина ДП зависит лишь от сомножителей  $a \tau_0$  и  $a T$ . В свою очередь, выбор этих сомножителей при конструировании аппаратуры СНАКАР производится из соображений получения на выходе РС — цели заданного уровня пульсаций. Для обеспечения равенства  $K_{n \text{ СУРЦ}}$  и  $K_{n \text{ СВПС}}$  необходимо выдерживать соотношение

$$\frac{1}{\tau_{\text{СУРЦ}}} (\tau_0 - t^N) = \beta = \frac{1}{\tau_{\text{СВПС}}} (T - t^N) \cong \frac{T}{\tau_{\text{СВПС}}}. \quad (16)$$

где  $\tau_{\text{СУРЦ}}$  и  $\tau_{\text{СВПС}}$  — постоянные времени СУРЦ и СВПС соответственно. Из (16) следует, что точное равенство ДП сравниваемых систем при одинаковых  $K_n$  возможно лишь при  $T = \tau_0$ . Согласно принципу работы СУРЦ, для нормального функционирования системы стабилизации должно выдерживаться соотношение  $\tau_{0 \text{ min}} > t_{\text{max}}^N$ , причем необходим коэффициент запаса  $K_z$ , т. е.  $\tau_{0 \text{ min}} = K_z t_{\text{max}}^N$ .

В то же время из (15) следует, что наибольшие пульсации на выходе СУРЦ возникают, когда  $t^N = t_{\min}^N$ ; при этом

$$\frac{t_{\min}^N}{t_{\max}^N} = a.$$

С учетом сказанного получаем

$$\frac{\delta_{\text{СВПС}}^{(BC)}}{\delta_{\text{СУРЦ}}^{(BC)}} = \frac{1 - e^{-N\beta}}{1 - e^{-N\epsilon\beta}} \gamma e^{-3N\beta(1-\gamma)}, \quad (17)$$

где

$$\gamma = 1 - \frac{1}{K_3 A}; \quad \epsilon = \frac{1}{\gamma}.$$

Допуская для большей надежности работы системы СУРЦ  $K_3 = 1,1 - 1,3$  при  $a = 5$ , получаем  $\gamma = 0,82 - 0,85$ . При этих условиях, как следует из уравнения (17), динамические погрешности  $\delta_{\text{СУРЦ}}^{(BC)}$  и  $\delta_{\text{СВПС}}^{(BC)}$  практически одинаковы. Теоретически система стабилизации второго типа при работе в динамическом режиме имеет более высокую точность.

Из вышеизложенного следует, что с учетом динамических свойств и качества стабилизации при широком диапазоне изменения частоты повторения импульсов предпочтительнее применение системы стабилизации с управляемой разрядной цепью.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии  
Академии наук Армянской ССР

Ս. Ք. ՆԵՄԻՐՈՎՍԿԻ

Արագացող անընդմեջ ակուստիկական կարոտածի դեպքում կայունացման սխտեմներն աշխատանքի պինամիկական ուժիմի մասին

Ցույց է տրվում, որ դինամիկական ուժիմում կայունացման սխտեմը դեկավարվող պարպման շղթայով նույնական է հաստատուն բաղադրիչի առանձնացման սխտեմին ծակոտկենություն չափման սխեմայում:

Դուրս է բերվում հավասարումը, որը հնարավորություն է տալիս կոնդեստորային հաճախականության չափիչի սխեմայի օգտագործմամբ կայունացման սխտեմի համար որոշել դինամիկական ուժիմի տևողությունը կրկնման հաճախականության թուլերածե փոփոխման դեպքում:

#### ЛИТЕРАТУРА — ՎՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- 1 Г. Б. Горбовицкий, Диссертация, МГРИ, М., 1969.
- 2 А. А. Брагин, Р. Ф. Федоров, Аналоговые преобразователи импульсных потоков, Изд. «Атомиздат», М., 1969.
- 3 Л. А. Баранов, Г. С. Гершон, В. И. Дмитриев, А. Е. Княжинский, Конденсаторные преобразователи в автоматике и системах управления, Изд. «Энергия», М., 1969.
- 4 А. Б. Немировский, ДАН Арм. ССР, т. 48, № 1 (1969).