

В. М. МУТТЕР  
(Ленинград)

### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗНОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА, ВЫЗЫВАЕМЫХ НЕИДЕАЛЬНОСТЬЮ КЛЮЧЕЙ

Исследуется влияние остаточных параметров ключей на погрешность одного из видов звездообразных потенциометров. Показывается, что при проведении соответствующих регулировок погрешность звездообразных потенциометров может быть значительно снижена (до 0,01%).

В последнее время в цифровой измерительной технике нашли широкое применение звездообразные потенциометры, характеризующиеся отсутствием схемной погрешности [1]. Как известно, статическая погрешность таких потенциометров определяется следующими факторами: 1) нестабильностью напряжения опорного источника и его внутренним сопротивлением, 2) неточностью изготовления калиброванных сопротивлений потенциометра, 3) остаточными параметрами ключей. Влияние первых двух факторов подробно рассмотрено в [1, 2]. Анализ погрешности из-за остаточных параметров ключей для частных случаев

(их равенство, пренебрежение параметрами ключа в закрытом состоянии и т. п.) не вызывает особых затруднений. Так, в [3] дан расчет оптимальных режимов и точности работы транзисторных переключателей в случае пренебрежения остаточными параметрами закрытого транзистора.

В этой работе исследуется влияние всех остаточных параметров ключей на погрешность одного из видов

звездообразных потенциометров, схема которого приведена на рис. 1.

Пусть переключатель  $i$  характеризуется остаточным напряжением  $\epsilon_{ia}$  и сопротивлением  $\frac{1}{g_{ia}}$  ключа, связанного с шиной  $a$ , и аналогичными остаточными параметрами  $\epsilon_{ib}$ ,  $\frac{1}{g_{ib}}$  ключа, связанного с шиной  $b$ . Причем, если один из ключей замкнут, то другой разомкнут, и калиброванное сопротивление потенциометра оказывается подключенным к соответствующей шине.

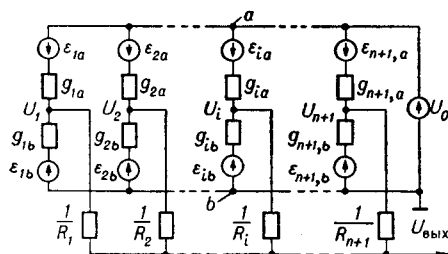


Рис. 1.

Выходное напряжение потенциометра  $U_{\text{вых}}$  зависит от того, какие калиброванные сопротивления и сколько их подключено к шине  $a$ , т. е. определяется комбинацией замкнутых и разомкнутых ключей. Каждую такую комбинацию будем называть коэффициентом включения.

По методу узловых напряжений можно составить уравнения: для напряжения  $U_i$

$$\dot{U}_i \left( g_{ia} + g_{ib} + \frac{1}{R_i} \right) - \dot{U}_0 g_{ia} - \dot{U}_{\text{вых}} \frac{1}{R_i} = \dot{\varepsilon}_{ia} g_{ia} + \dot{\varepsilon}_{ib} g_{ib}; \quad (1)$$

для напряжения  $U_{\text{вых}}$

$$- \dot{U}_1 \frac{1}{R_1} - \dot{U}_2 \frac{1}{R_2} - \dots - \dot{U}_{n+1} \frac{1}{R_{n+1}} + \dot{U}_{\text{вых}} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{n+1}} \right) = 0. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) внутреннее сопротивление опорного источника  $U_0$  принято равным нулю. При анализе предполагается, что схема потенциометра линейна. Точка над символом показывает, что необходимо учитывать полярность напряжения. Абсолютную величину напряжения будем обозначать символом без точки.

Перепишем (1) и (2) в виде

$$\dot{U}_i = \frac{\dot{\varepsilon}_{ia} g_{ia} + \dot{\varepsilon}_{ib} g_{ib} + \dot{U}_0 g_{ia} + \dot{U}_{\text{вых}} \frac{1}{R_i}}{g_{ia} + g_{ib} + \frac{1}{R_i}}; \quad \dot{U}_{\text{вых}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n+1} \dot{U}_i \frac{1}{R_i}}{\sum_{i=1}^{i=n+1} \frac{1}{R_i}}.$$

Подставим первое выражение во второе. После несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вых}} = & \frac{\sum_{i=1}^{i=n+1} \frac{\dot{\varepsilon}_{ia} g_{ia} + \dot{\varepsilon}_{ib} g_{ib}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}}{\sum_{i=1}^{i=n+1} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}} + \\ & + \dot{U}_0 \frac{\sum_{i=1}^{i=n+1} \frac{g_{ia}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}}{\sum_{i=1}^{i=n+1} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Обозначим первое слагаемое в (3) символом  $U_1$ , а второе —  $U_2$ . На выходе потенциометра обычно включается масштабное сопротив-

ление  $R_m$ . Считая, что  $R_{n+1}$  — масштабное сопротивление, следует принять:

$$\varepsilon_{n+1, a} = 0; g_{n+1, a} = 0; \varepsilon_{n+1, b} = 0; \frac{1}{g_{n+1, b}} = 0; \frac{1}{R_{n+1}} = \frac{1}{R_m}$$

метров  $\varepsilon_{ia}, g_{ia}, \varepsilon_{ib}, g_{ib}$ , а слагаемое  $U_2$  — только от остаточных сопротивлений  $\frac{1}{g_{ia}}, \frac{1}{g_{ib}}$ .

Проанализируем влияние остаточных параметров на погрешность потенциометра. Рассмотрим  $U_1$ . В зависимости от состояния переключателя  $i$  можно записать:

а) если ключ, связанный с шиной  $a$ , замкнут, то

$$\varepsilon_{ia} g_{ia} + \varepsilon_{ib} g_{ib} = \dot{\varepsilon}_{ia} g_{ia} + \dot{E}_{ib} G_{ib}; g_{ia} + g_{ib} = g_{ia} + C_{ib};$$

б) если этот ключ разомкнут, то

$$\varepsilon_{ia} g_{ia} + \varepsilon_{ib} g_{ib} = \dot{E}_{ia} G_{ia} + \dot{\varepsilon}_{ib} g_{ib}; g_{ia} + g_{ib} = G_{ia} + g_{ib},$$

где  $\varepsilon_i, g_i$  — параметры замкнутого ключа;

$\dot{E}_i, \dot{G}_i$  — параметры разомкнутого ключа.

Последние выражения позволяют сформулировать условие  $U_1 = \text{const}$  независимо от состояния переключателей:

$$\dot{\varepsilon}_{ia} = \dot{\varepsilon}_{ib} = \dot{\varepsilon}_i; \dot{E}_{ia} = \dot{E}_{ib} = \dot{E}_i; g_{ia} = g_{ib} = g_i; G_{ia} = G_{ib} = G_i. \quad (4)$$

Таким образом, составляющая выходного напряжения  $U_1$  будет постоянной, если остаточные параметры ключей в каждом отдельном переключателе равны, причем остаточные напряжения имеют один знак. В разных переключателях остаточные параметры могут быть и не равными. Более того, влияние остаточных параметров различных переключателей на  $U_{\text{вых}}$  не может быть одинаковым. Оно определяется значением  $R_i$ , что следует из (3): чем меньше  $R_i$ , тем сильнее влияние остаточных параметров на  $U_{\text{вых}}$ .

Рассмотрим теперь слагаемое  $U_2$ .

При выполнении условий (4) получим

$$U_2 = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ib} + \frac{1}{g_i + G_i}}}{\frac{1}{R_m} + \sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}} + \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{g_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ia} + \frac{1}{g_i + G_i}}}{\frac{1}{R_m} + \sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}},$$

где  $R_{ia}, R_{ib}$  — калиброванные сопротивления потенциометра, подключенные соответственно к шинам  $a$  и  $b$ .

В звездообразных потенциометрах выполняется условие

$$\begin{aligned} \sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ib} + \frac{1}{g_i + G_i}} + \sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ia} + \frac{1}{g_i + G_i}} = \\ = \sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}, \end{aligned}$$

поэтому

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}} + \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{g_i - G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ia} + \frac{1}{g_i + G_i}}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что первое слагаемое (обозначим его  $\dot{U}_2'$ ) — величина постоянная, а второе слагаемое ( $\dot{U}_2''$ ), определяемое  $R_{ia}$ , зависит от коэффициента включения.

Таким образом, в случае неидеальных ключей выходное напряжение представляется суммой трех составляющих:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2' + \dot{U}_2''.$$

Если остаточные параметры в каждом отдельном ключе одинаковы, то

$$\dot{U}_1 = \frac{\sum \frac{\dot{e}_i g_i + \dot{E}_i G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}};$$

$$\dot{U}_2' = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}};$$

$$\dot{U}_2'' = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{g_i - G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ia} + \frac{1}{g_i + G_i}}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}}.$$

В звездообразном потенциометре с идеальными ключами должно выполняться условие [1]

$$\dot{U}_{\text{вых. ид}} = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{1}{R_{ia}}}{\frac{1}{R_m} + \sum \frac{1}{R_i}}$$

Подставляя значения  $e_i = 0$ ,  $\frac{1}{g_i} = 0$ ,  $E_i = 0$ ,  $G_i = 0$  в выражения для  $U_1$ ,  $U_2'$  и  $U_2''$ , получим:

$$U_1 = 0; U_2' = 0; U_2'' = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{1}{R_{ia}}}{\frac{1}{R_m} + \sum \frac{1}{R_i}} = \dot{U}_{\text{вых. ид.}}$$

Следовательно,  $U_1$  и  $U_2'$  целиком входят в абсолютную погрешность потенциометра. Могут быть обеспечены условия, при которых эти слагаемые будут неизменными и скомпенсированными.

Рассмотрим дробь

$$\frac{1}{R_i + \frac{1}{g_i + G_i}}$$

Так как остаточные параметры ключей в  $i$ -м переключателе одинаковы, то эта дробь постоянна и не зависит от состояния переключателя. В этом случае ее отличие от  $\frac{1}{R_i}$  вносит постоянную погрешность, эквивалентную погрешности из-за неточности изготовления сопротивлений.

Включение регулируемого подгоночного сопротивления последовательно с калиброванным сопротивлением  $R$  позволяет устранить влияние остаточных сопротивлений с высокой точностью.

Таким образом, после введения подгоночных сопротивлений и компенсации  $U_1$  и  $U_2'$  выходное напряжение равно

$$\dot{U}_{\text{вых. ком}} = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{g_i - G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ia}}}{\frac{1}{R_m} + \sum \frac{1}{R_i}}$$

Для абсолютной погрешности справедливо соотношение

$$\Delta \dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_{\text{вых. ком}} - \dot{U}_{\text{вых. ид.}}$$

Подставляя значения  $U_{\text{вых. ком}}$  и  $U_{\text{вых. ид.}}$ , после преобразования получим

$$\Delta \dot{U}_{\text{вых. ком}} = \dot{U}_0 \frac{-2 \sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ia}}}{\frac{1}{R_m} + \sum \frac{1}{R_i}}$$

Выражение для относительной погрешности имеет вид

$$\beta = \frac{|\Delta \dot{U}_{\text{вых. ком}}|}{U_{\text{вых. ид}}} = 2 \frac{\sum \frac{G_i}{g_i + G_i} \frac{1}{R_{ia}}}{\sum \frac{1}{R_{ia}}} \quad (6)$$

Погрешность может быть существенно уменьшена, если подгоночное сопротивление отрегулировать так, чтобы

$$R_{i \text{ рег}} = R_i \frac{g_i - G_i}{g_i + G_i} - \frac{1}{g_i + G_i}.$$

Тогда

$$\dot{U}_2' = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{1}{R_{ia}}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{g_i + G_i}{g_i - G_i} \frac{1}{R_i}}.$$

Изменяя масштабное сопротивление, можно обеспечить равенство

$$\frac{1}{R_{\text{м. калиб}}} + \sum \frac{g_i + G_i}{g_i - G_i} \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i},$$

где  $R_{\text{м. калиб}}$  — измененное значение масштабного сопротивления. Окончательно получим:

$$\dot{U}_1 = \frac{\sum \frac{\dot{e}_i g_i + \dot{E}_i G_i}{g_i - G_i} \frac{1}{R_i}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i}} = \text{const};$$

$$\dot{U}_2' = \dot{U}_0 \frac{\sum \frac{G_i}{g_i - G_i} \frac{1}{R_i}}{\frac{1}{R_M} + \sum \frac{1}{R_i}} = \text{const}.$$

После компенсации  $U_1$  и  $U_2'$

$$\dot{U}_{\text{вых. ком}} = \dot{U}_2' = \dot{U}_{\text{вых. ид}}.$$

Таким образом, погрешность звездообразного потенциометра, обусловленная неидеальностью ключей, теоретически может быть получена (с помощью регулировки подгоночных сопротивлений, калибровки масштабного сопротивления и компенсации постоянной составляющей) сколь угодно малой.

Полученные выше зависимости могут быть применены для анализа схем, выполненных на различных ключах. Проанализируем наиболее важный случай — применение транзисторов в качестве ключей. Известно [4], что в открытом состоянии транзисторный ключ может быть представлен источником напряжения  $e$  с внутренним сопротивлением  $r = \frac{1}{g}$ , в закрытом — источником тока  $\frac{E}{R}$  с внутренней проводимостью  $G = \frac{1}{R}$ .

Заменим источник тока источником напряжения  $E$  с внутренним сопротивлением  $\frac{1}{G}$ . Это позволит воспользоваться полученными выше зависимостями.

Рассмотрим три вида переключателей: а) на однотипных транзисторах  $p-n-p$ , б) на однотипных транзисторах  $n-p-n$ , в) на разнотипных транзисторах  $p-n-p$  и  $n-p-n$ .

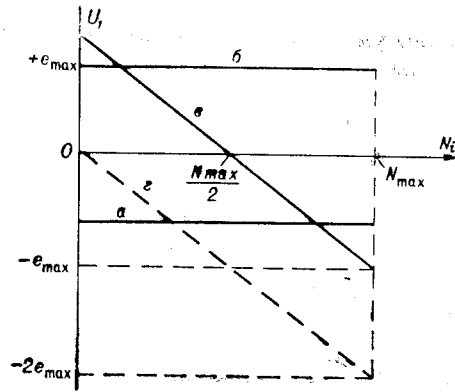


Рис. 2.

Если остаточные параметры транзисторов в каждом отдельном переключателе одинаковы, то: а)  $U_1 = \text{const} < 0$ , б)  $U_1 = \text{const} > 0$ , в)  $U_1 \neq \text{const}$ .

На рис. 2 построены графики зависимости  $U_1 = f(N_i)$ , где  $N_i$  — коэффициент включения.

Для случая в) принято, что  $e_1 = e_2 = \dots = e_n = e_{\text{max}}$ ,  $g_1 = g_2 = \dots = g_n = g_{\text{min}}$ ,  $E_1 = E_2 = \dots = E_n = E_{\text{max}}$ ,  $G_1 = G_2 = \dots = G_n = G_{\text{max}}$ .

Следовательно, составляющая  $U_1$  может быть постоянной только в переключателях одного типа проводимости. Компенсация невозможна для переключателей на разнотипных транзисторах. В последнем случае абсолютная величина  $U_1$  определяется коэффициентом включения. В середине шкалы  $U_1 = 0$ . На краях шкалы  $U_1$  принимает максимальные значения противоположных знаков.

Пунктиром на рис. 2 (в) показана зависимость  $U_1 = f(N_i)$  для случая разнотипных транзисторов при компенсации  $U_1$  в точке 0. Такая компенсация позволяет существенно уменьшить погрешность в начале шкалы.

Таким образом, компенсация  $U_1$  возможна только для однотипных транзисторов при равенстве остаточных параметров у каждой пары транзисторов в переключателе.

У низкочастотных транзисторов типа П13, П16 при токе управления 0,5–5 мА и запирающем напряжении 1–5 в остаточные параметры в схеме с общим коллектором равны [4, 5]:  $e = 0,5 \div 5$  мВ;  $\frac{1}{g} = 1 \div 10$  Ом;  $EG \approx 1$  мкА;  $\frac{1}{G} \geq 1$  Мом.

Поэтому можем считать, что  $e_i g_i + E_i G_i \approx e_i g_i$ ,  $g_i + G_i \approx g_i$ . С помощью регулируемого подгоночного сопротивления  $R_i$  уменьшим на величину  $\frac{1}{g_i}$  (заранее измеренную). Тогда в точке 0, т. е. при подключении всех сопротивлений к шине  $b$ , получим

$$U_{0 \text{ вых}} = \frac{\sum \left( e_i + U_0 \frac{G_i}{g_i} \right) \frac{1}{R_i}}{\frac{1}{R_m} + \sum \frac{1}{R_i}} = \text{const.}$$

В первом приближении  $U_{0 \text{ вых}} \approx e$ , что для среднего значения  $e = 1$  мВ дает на пределе 1 в приведенную погрешность  $\gamma \approx \frac{e}{U_0} 100\% = 0,1\%$ .

Следовательно, в прецизионных устройствах постоянная составляющая должна быть скомпенсированной.

Одна из возможных схем компенсации  $U_{0 \text{ вых}}$ , используемая в приборах фирмы «Solartrop», приведена на рис. 3. Компенсация осуществляется с помощью делителя напряжения. Компенсационное напряжение регулируется сопротивлением  $R_k$ .

После компенсации  $U_{0 \text{ вых}}$ , учитывая (6), получим

$$\beta = S \frac{U_{0 \text{ вых}}}{U_{\text{вых, ид}}} + 2 \frac{\sum \frac{G_i}{g_i} \frac{1}{R_{ia}}}{\sum \frac{1}{R_{ia}}}, \quad (7)$$

где  $S$  — степень компенсации постоянной составляющей.

Если остаточные сопротивления у всех транзисторов равны, то при высокой степени компенсации

$$\beta \approx 2 \frac{G}{g} = \text{const},$$

что при средних значениях  $\frac{1}{g} = 5 \text{ ом}$ ,  $\frac{1}{G} = 1 \text{ Мом}$  дает  $\beta = 0,001\%$ .

Следовательно, регулировка подгоночных сопротивлений и компенсация постоянной составляющей позволяет уменьшить относительную погрешность потенциометра из-за остаточных параметров транзисторов до нескольких тысячных процента.

Если остаточные параметры транзисторов неодинаковы, то погрешность потенциометра можно уменьшить: 1) подбором в пары транзисторов с ближайшими значениями остаточных параметров (объединение в одном переключателе) и 2) распределением транзисторов таким образом, чтобы меньшее калиброванное сопротивление переключалось транзисторами с меньшими остаточными параметрами.

В этом случае могут быть использованы и худшие транзисторы в данной партии. Влияние их остаточных параметров по сравнению со старшей декадой ослабевает в  $10^{m-k}$  раз, если эти транзисторы помещены в  $k$ -й декаду ( $m$  — число декад).

Из (7) следует, что погрешность определяется отношением  $\frac{G}{g} = \frac{r}{R}$ .

Это позволяет по-новому поставить вопрос о выборе схемы переключателя.

В настоящее время транзисторы в переключателях соединяют по схеме с общим коллектором [2, 4]. Это позволяет получить меньшее остаточное напряжение в открытом состоянии и меньший остаточный ток в закрытом состоянии по сравнению с включением по схеме с общим эмиттером, но приводит к проигрышу в значении динамического сопротивления открытого транзистора.

Действительно [4],

$$r_k : r_э = \alpha_э : \alpha_k,$$

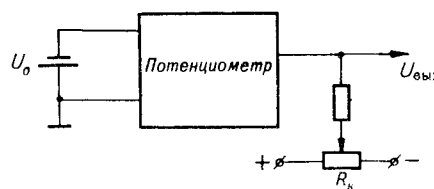


Рис. 3.



где  $\alpha_э$  и  $\alpha_к$  — коэффициенты передачи собственных токов эмиттера и коллектора;

$r_э$  и  $r_к$  — динамическое сопротивление открытого транзистора при включении по схеме с общим эмиттером и коллектором.

У несимметричных транзисторов [4]  $\alpha_э > \alpha_к$  ( $\alpha_э \approx 0,9$ ;  $\alpha_к = 0,2 \div 0,7$ ), поэтому  $r_к \approx (4,5 \div 1,3) r_э$ .

Таким образом, возможность применения переключателей по схеме с общим эмиттером определяется достижимой степенью компенсации  $S$  постоянной составляющей выходного напряжения.

## ВЫВОДЫ

Выходное напряжение звездообразного потенциометра с неидеальными ключами содержит две составляющие. Первая зависит от всех остаточных параметров ключей, вторая — только от остаточных сопротивлений.

Необходимое и достаточное условие постоянства первой составляющей — равенство остаточных параметров транзисторов в каждом отдельном переключателе (причем остаточные напряжения должны иметь одинаковую полярность). От переключателя к переключателю остаточные параметры могут изменяться.

Погрешность потенциометра зависит от отношения  $\frac{r}{R}$ , поэтому в ряде случаев может оказаться полезным включение транзисторов по схеме с общим эмиттером.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К. А. Нетребенко. Цифровые автоматические компенсаторы. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
2. В. Ю. Кончаловский. К вопросу о точности бесконтактного преобразователя код — напряжение.— Автоматика и телемеханика, 1962, т. XXIII, № 12.
3. Б. И. Борде. Расчет оптимальных режимов и точности работы транзисторных переключателей для цифро-аналоговых преобразователей.— Автоматический контроль и методы электрических измерений. (Труды IV конференции, 1962 г.). Новосибирск, РИО СО АН СССР, 1964.
4. В. И. Анисимов, А. П. Голубев. Транзисторные модуляторы. М., изд-во «Энергия», 1964.
5. В. Ю. Кончаловский и др. Параметры полупроводниковых триодов в ключевом режиме.— Измерительная техника, 1962, № 12.

*Поступила в редакцию  
29 июля 1965 г.,  
окончательный вариант —  
12 октября 1965 г.*