

В. М. МУТТЕР

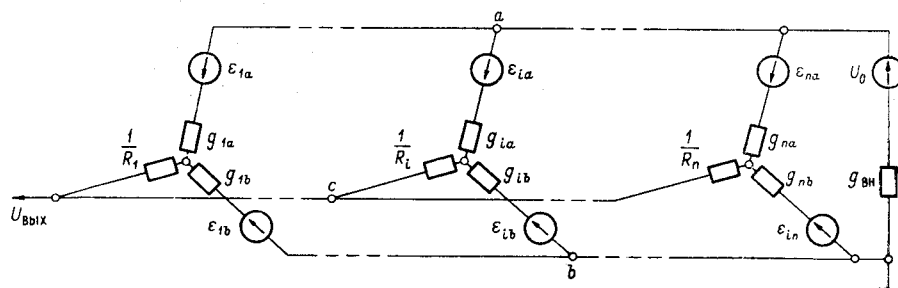
(Ленинград)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ТРАНЗИСТОРНОГО ЗВЕЗДООБРАЗНОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА С УЧЕТОМ ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОПОРНОГО ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

Исследуется влияние внутреннего сопротивления источника опорного напряжения на погрешность одного из частных видов звездообразных потенциометров с транзисторными ключами.

В [1] при анализе погрешности звездообразного потенциометра, вызываемой остаточными параметрами транзисторных ключей, источник опорного напряжения считается идеальным, т. е. с внутренним сопротивлением $r_{вн} = 0$.

В настоящей работе анализируется влияние $r_{вн}$ на погрешность транзисторного звездообразного потенциометра.



На рисунке калиброванное сопротивление R_i подключается к шинам a или b с помощью ключей, имеющих остаточные напряжения ϵ_{ia} , ϵ_{ib} и сопротивления $r_{ia} = \frac{1}{g_{ia}}$, $r_{ib} = \frac{1}{g_{ib}}$.

Между шинами a и b включен источник напряжения U_0 с внутренним сопротивлением $r_{вн} = \frac{1}{g_{вн}}$.

Падение напряжения на $r_{вн}$ от токов управления транзисторами, связанными с шиной a , на эквивалентной схеме можно не учитывать, так как известны способы коммутации транзисторных ключей, которые позволяют токам управления миновать источник опорного напряжения [2, 3].

Используя преобразование звезды в треугольник, можно показать, что напряжение на выходе потенциометра равно

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{\text{ВЫХ}}^* = & \frac{\sum^{**} \frac{\varepsilon_{ia} g_{ia} + \varepsilon_{ib} g_{ib}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} \times}{\sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} \times} \\
 & \times \left(1 + \sum \frac{r_{\text{ВН}}}{r_{ia} + r_{ib}} \frac{R_i}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} \right) + \\
 \rightarrow & \frac{\times \left(1 + \sum \frac{r_{\text{ВН}}}{r_{ia} + r_{ib}} \frac{R_i}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} \right) +}{+ \dot{U}_0 \sum \frac{g_{ia}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} \left(1 + \sum \frac{\varepsilon_{ib} - \varepsilon_{ia}}{\dot{U}_0} \frac{r_{\text{ВН}}}{r_{ia} + r_{ib}} \times \right.} \\
 \rightarrow & \frac{+ r_{\text{ВН}} \sum \frac{g_{ia}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} \times}{\times \frac{R_i}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} + \sum \frac{\varepsilon_{ib}}{\dot{U}_0} \frac{g_{ib}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{r_{\text{ВН}}}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}})} \quad (1) \\
 \rightarrow & \frac{\times \sum \frac{g_{ib}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}}{\times \sum \frac{g_{ib}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}}
 \end{aligned}$$

Выражение (1) можно упростить следующим образом. Выражение в первых скобках числителя в (1) обозначим А, а во вторых скобках — Б. Разделим числитель и знаменатель дроби на А и оценим величину отношения Б/А.

Типовые значения остаточных параметров низкочастотных германиевых транзисторов типа П13—П16 в схеме с общим коллектором при токе управления 0,5—5 мА и запирающем напряжении 1—5 В равны [4—6]:

$$e = 0,5 \div 5 \text{ мВ}; \quad \frac{1}{g} = 1 \div 10 \text{ Ом у замкнутого ключа};$$

$$EG \approx 1 \text{ мкА}; \quad \frac{1}{G} > 1 \text{ Мом у разомкнутого ключа}.$$

Если опорный источник $U_0 = 10 \text{ В}$ имеет внутреннее сопротивление $r_{\text{ВН}} < 0,1 \text{ Ом}$, а калиброванное сопротивление R_i больше 1 кОм, то независимо от состояния переключателя i

$$1 < \text{Б/А} < 1 + 10^{-7}.$$

* Точка над символом показывает, что необходимо учитывать полярность напряжения.

** Суммирование от $i=1$ до $i=n$.

Поэтому с точностью до $10^{-5}\%$ можно считать, что $B/A=1$ и

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вх}} \approx & \frac{\sum \frac{\varepsilon_{ia} g_{ia} + \varepsilon_{ib} g_{ib}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} + \dot{U}_0 \sum \frac{g_{ia}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}}{\sum \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} + r_{\text{вн}} \sum \frac{g_{ia}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}} + \sum \frac{g_{ib}}{g_{ia} + g_{ib}} \frac{1}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}} \\ & \frac{1 + r_{\text{вн}} \sum \frac{1}{r_{ia} + r_{ib}} \frac{R_i}{R_i + \frac{1}{g_{ia} + g_{ib}}}}{\quad} \end{aligned}$$

Для звездообразного потенциометра с идеальными ключами (т. е. при сопротивлении «замкнутых» и проводимости «разомкнутых» ключей, равных нулю и $\varepsilon_{ia} = 0$, $\varepsilon_{ib} = 0$) из (1) получим

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}_0 \sum \frac{1}{R_{ia}}}{\sum \frac{1}{R_i} + r_{\text{вн}} \sum \frac{1}{R_{ia}} \sum \frac{1}{R_{ib}}} = \frac{\dot{U}_0 \sum \frac{1}{R_{ia}}}{\sum \frac{1}{R_i} \left(1 + \frac{r_{\text{вн}}}{R_{\text{вх}}}\right)},$$

где

R_{ia} и R_{ib} — калиброванные сопротивления, подключенные соответственно к шинам a и b ;

$$R_{\text{вх}} = \sum \frac{1}{R_i} : \sum \frac{1}{R_{ia}} \sum \frac{1}{R_{ib}} \quad \text{— входное сопротивление звездообразного потенциометра.}$$

При $r_{\text{вн}} = 0$ имеем

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

Абсолютная погрешность равна

$$\Delta \dot{U} = \dot{U} - \dot{U}_{\text{ид}} = \dot{U}_{\text{ид}} \frac{r_{\text{вн}}}{R_{\text{вх}} + r_{\text{вн}}} \approx \dot{U}_{\text{ид}} \frac{r_{\text{вн}}}{R_{\text{вх}}},$$

а относительная — $\beta \approx \frac{r_{\text{вн}}}{R_{\text{вх}}}$.

Так как входное сопротивление $R_{вх} \neq \text{const}$, то погрешность звездообразного потенциометра, вызываемая неидеальностью внутреннего сопротивления опорного источника, изменяется от точки к точке и определяется коэффициентом включения.

Максимальное значение абсолютной погрешности получаем из условия

$$\frac{d(\Delta U)}{d\left(\sum \frac{1}{R_{ia}}\right)} = 0,$$

откуда

$$\sum \frac{1}{R_{ia}} = \frac{2}{3} \sum \frac{1}{R_i}; \quad (\Delta U)_{\max} = \frac{4}{27} U_0 r_{вн} \sum \frac{1}{R_i}.$$

Относительная погрешность будет максимальной при $\sum \frac{1}{R_{ia}} =$
 $= \sum \frac{1}{R_{ib}} = \frac{1}{2} \sum \frac{1}{R_i}$, т. е. в середине шкалы. Тогда

$$R_{вх. \min} = 4 \frac{1}{\sum \frac{1}{R_i}} \quad \text{и} \quad \beta_{\max} = \frac{1}{4} r_{вн} \sum \frac{1}{R_i}.$$

ВЫВОДЫ

Приведена оригинальная формула для расчета выходного напряжения транзисторного звездообразного потенциометра с учетом внутреннего сопротивления $r_{вн}$ источника опорного напряжения и остаточных параметров ключей.

Относительная погрешность потенциометра с идеальными ключами, обусловленная присутствием $r_{вн}$, равна $\beta \approx \frac{r_{вн}}{R_{вх}}$ и достигает максимума в середине шкалы. Абсолютная погрешность принимает максимальное значение при $\sum \frac{1}{R_{ia}} = \frac{2}{3} \sum \frac{1}{R_i}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Муттер. Анализ погрешностей звездообразного потенциометра, вызываемых неидеальностью ключей.— Автометрия, 1966, № 2.
2. Г. П. Шлыков. Цифровой вольтметр на бесконтактных элементах.— Электроизмерительная техника. Ученые записки Пенз. политехн. ин-та, вып. 2, 1964.
3. Г. П. Шлыков и др. Быстродействующий цифровой милливольтметр на транзисторах. М., ГОСИНТИ, 1965.
4. В. Ю. Кончаловский и др. Параметры полупроводниковых триодов в ключевом режиме.— Измерительная техника, 1962, № 12.
5. М. М. Ладыженский. Исследование и сравнительный анализ транзисторных ключей с различными принципами управления.— Автометрия, 1965, № 4.
6. М. М. Ладыженский. Транзисторные переключатели малых напряжений.— Приборы и элементы автоматики. ЛДНТП, 1965.

Поступила в редакцию
 1 ноября 1965 г.,
 окончательный вариант —
 25 декабря 1965 г.