

КОММУТАТОР С МАЛЫМ ПРОХОЖДЕНИЕМ

А. А. ШИБАЕВ, В. Я. СУПЬЯН

(Представлена научным семинаром кафедры теоретических основ радиотехники ТИРиЭТа)

Для построения «одноканальных» фазометров предлагается электромеханический коммутатор, имеющий малое паразитное прохождение в закрытом состоянии.

Даются расчетные формулы для оценки погрешности, вносимой описываемым коммутатором, приводятся принципиальные схемы нескольких вариантов коммутаторов.

Развитие техники фазовых измерений в последние годы идет по пути разработки «одноканальных» измерительных устройств, в связи с тем, что «одноканальные фазометры» обладают рядом преимуществ по сравнению с двухканальными. В частности, в одноканальных фазометрах в принципе отсутствуют погрешности, вызываемые нестабильностью частот входных сигналов и временными аппаратурными нестабильностями. Кроме того, при некоторых вариантах построения преобразователей частоты удается значительно расширить динамический диапазон входных сигналов фазометра без осуществления дополнительных регулировок.

Один из серийно выпускаемых фазометров Ф2-4 выполнен по частично одноканальной схеме, коммутация сигналов в нем осуществляется по промежуточной частоте, что не позволяет уменьшить погрешности, возникающие в двухканальной части схемы в динамическом диапазоне входных сигналов.

Применение коммутации непосредственно по высокой частоте на входе фазометрического устройства при рабочих частотах порядка 100 мегагерц и выше затруднено из-за паразитного прохождения сигнала через коммутатор в закрытом его состоянии. Величину погрешности при этом можно оценить по формуле

$$\Delta\varphi = m \operatorname{arc} \operatorname{tg} K, \quad (1)$$

где

K — коэффициент передачи по напряжению коммутатора в закрытом его состоянии,

m — отношение уровней сигналов на входах фазометра. Использование для коммутации каналов электронных ламповых ключей при лучших образцах ламп (с проходной емкостью порядка $0,05 \div 0,1$ пф) для соотношения уровней m порядка 100 не позволяет получить погрешность менее $2 \div 5$ град.

В [1] описан коммутатор, выполненный на полупроводниковых диодах на фиксированной частоте 70 Мгц, для перепада уровней

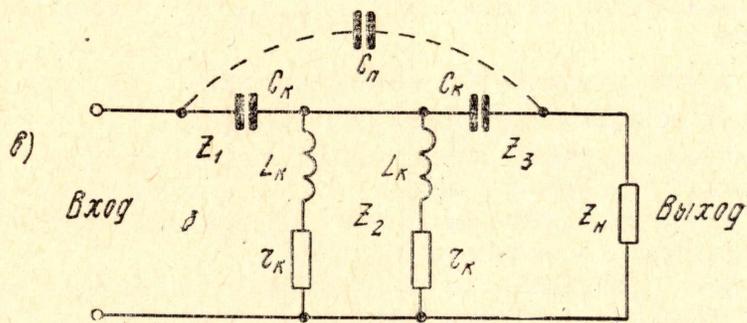
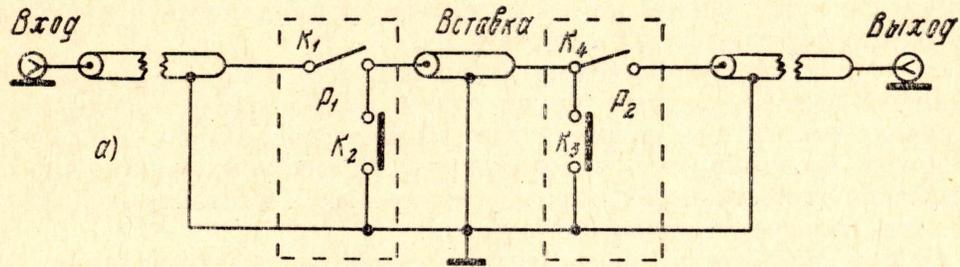


Рис. 1. Принципиальная и эквивалентная схемы звена коммутатора в закрытом состоянии

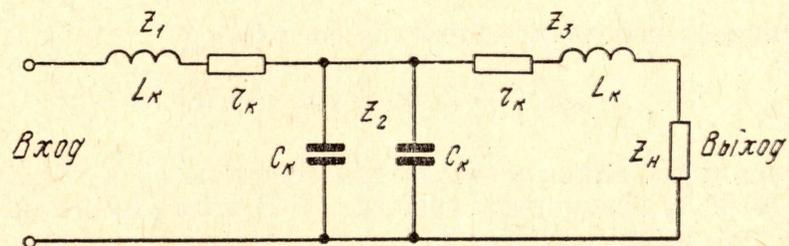
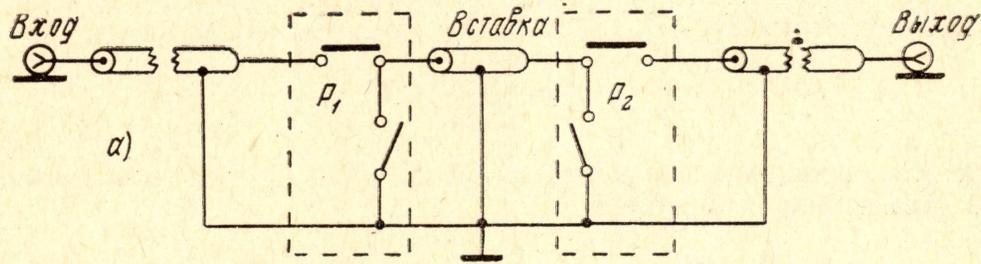


Рис. 2. Принципиальная и эквивалентная схемы звена коммутатора в открытом состоянии,

в 100 раз погрешность такого коммутатора около $0,6^\circ$. Кроме того, описываемые коммутаторы имеют собственные частотно-зависимые фазовые сдвиги, являются несимметричными, т. е. в разные полупериоды коммутации вносят разные фазовые сдвиги и в принципе обладают амплитудно-фазовыми погрешностями при работе в широком диапазоне входных сигналов. Описываемый ниже электромеханический коммутатор свободен от перечисленных недостатков.

Основным элементом коммутатора является звено из двух каскадно включенных контактных групп двух электрических реле, причем каждая из контактных групп состоит из последовательно соединенных замкнутых (разомкнутых) и разомкнутых (замкнутых) контактов. Для исключения емкостной связи между корпусами и контактами двух реле в звене используется кабельная вставка.

Принципиальные и эквивалентные схемы звена коммутатора в закрытом и открытом состояниях изображены на рис. 1 и 2 соответственно. В закрытом состоянии ключи K_1 и K_4 разомкнуты, ключи K_2 и K_3 замкнуты.

На эквивалентных схемах (рис. 1, *в* и 2, *в*) введены следующие обозначения:

C_k и C'_k — емкости разомкнутых контактов реле,

L_k и L'_k — собственные индуктивности контактов,

r_k и r'_k — активные сопротивления замкнутых контактов,

C_n — паразитная емкость между входом и выходом двух контактных групп. Практически при длине кабельной вставки 5—7 см емкостью C_n можно пренебречь.

Коэффициент передачи по напряжению Т-образного четырехполюсника, нагруженного на сопротивление Z_n , определяется выражением

$$\dot{K} = \frac{1}{a_{11} + \frac{a_{12}}{Z_n}} = \frac{Z_2 \cdot Z_n}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_n) + Z_1 Z_2}. \quad (2)$$

Для закрытого состояния коммутатора (рис. 1, *а*) в уравнении (2) можно положить $Z_1 \gg Z_2$, $Z_3 \gg Z_2$, $Z_3 \gg Z_n$. Тогда получим

$$\dot{K} = \frac{Z_2 Z_n}{Z_1 Z_3}. \quad (3)$$

Если для упрощения принять $C'_k = C_k$; $L'_k = L_k$; $r'_k = r_k$, из эквивалентной схемы (рис. 1, *б*) имеем

$$Z_1 = Z_3 = \frac{1}{j\omega C_k} \quad \text{и} \quad Z_2 = \frac{r_k + j\omega L_k}{2}.$$

Коэффициент передачи в этом случае равен

$$\dot{K}' = \frac{1}{2} Z_n (r_k + j\omega L_k) \omega^2 C_k^2. \quad (4)$$

В открытом состоянии коммутатора контакты K_1 и K_4 замкнуты, контакты K_2 и K_3 разомкнуты (рис. 2, *а*). В этом случае можно считать $Z_2 \gg Z_1$; $Z_2 \gg Z_3$; $Z_n \gg Z_3$.

Коэффициент передачи коммутатора в открытом состоянии из уравнения (2) равен

$$\dot{K}_0 = \frac{Z_2 \cdot Z_n}{Z_2 Z_n + Z_1 Z_2} \simeq 1. \quad (5)$$

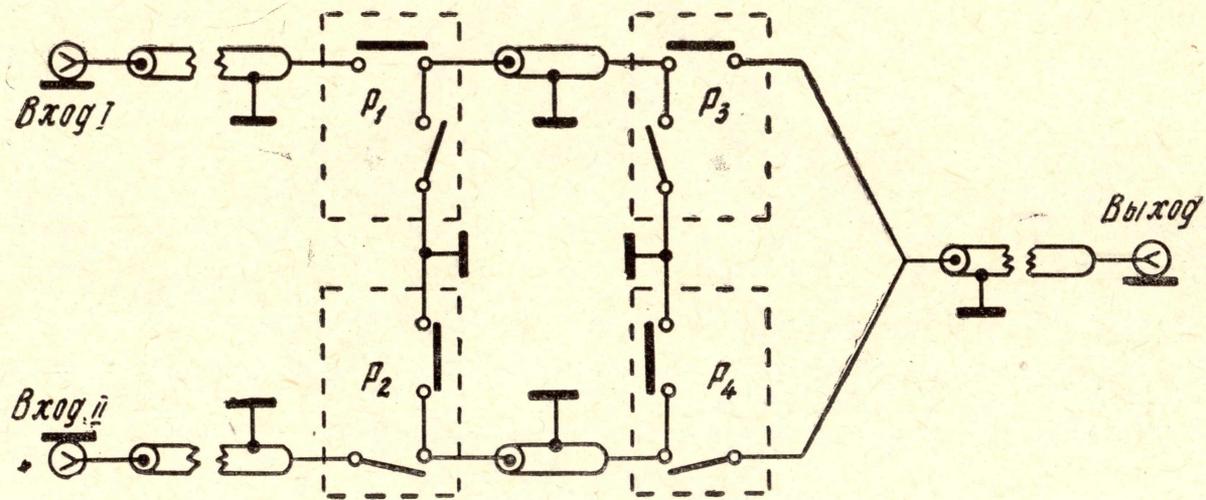


Рис. 3. Принципиальная схема коммутатора с переключением двух входов на общий канал

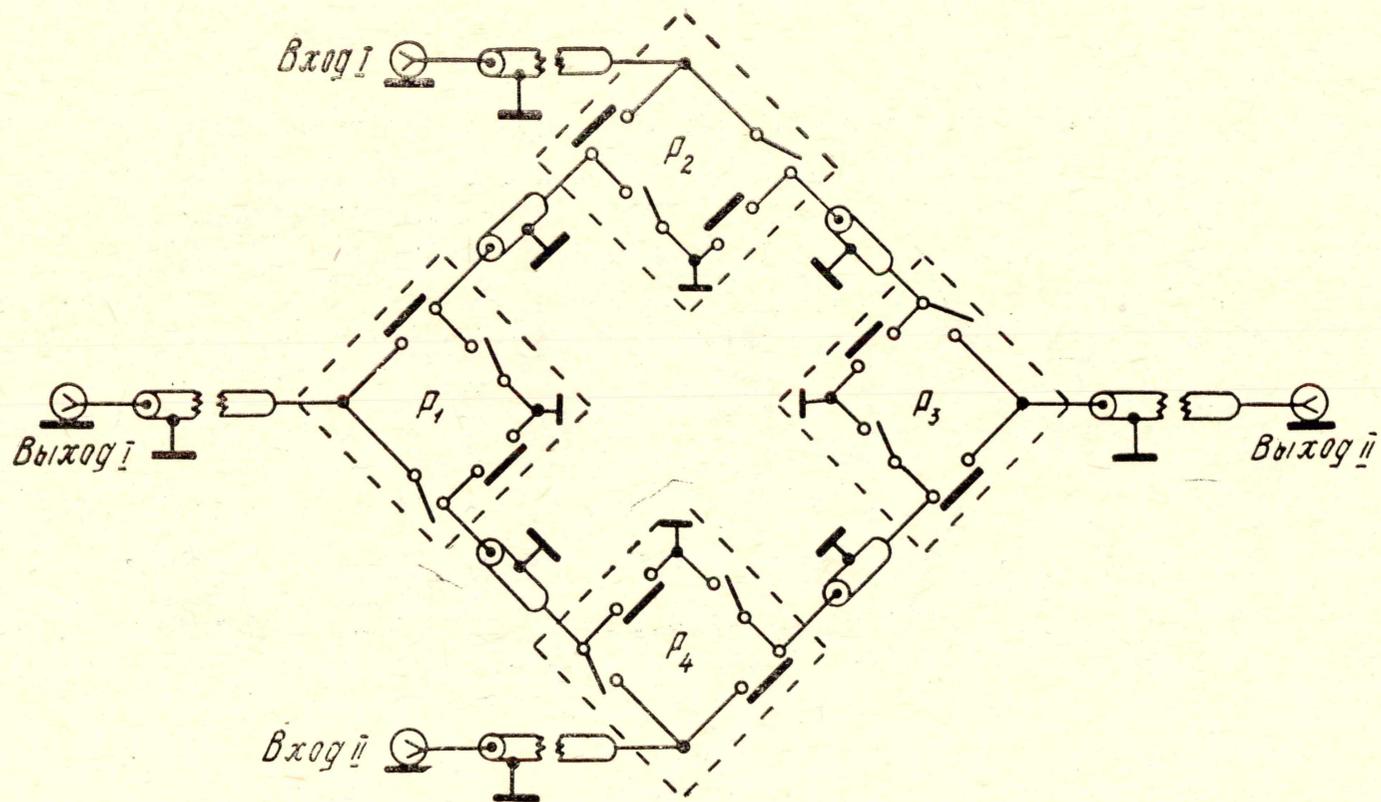


Рис. 4. Принципиальная схема коммутатора с перекрестным переключением каналов

Погрешность за счет паразитного прохождения через закрытый коммутатор можно определить по формуле

$$\Delta\varphi_{\text{макс}} = m \operatorname{arctg} \frac{K_3}{K_0} \simeq m \operatorname{arctg} K_3 = 0,5mR_n\omega^2C_k^2\sqrt{r_k^2 + \omega^2L_k^2}, \quad (6)$$

где R_n — сопротивление нагрузки, равное волновому сопротивлению кабеля, использованного при построении коммутатора.

Если считать, что на высших частотах $\omega L_k \gg r_k$, то

$$\Delta\varphi_{\text{макс}} = 0,5mR_n\omega^3C_k^2L_k. \quad (7)$$

Коэффициент передачи по напряжению при использовании одной контактной группы, например K_1 и K_2 , определится из выражений $K_3 = \omega^2C_kL_k$ и $K_0 \simeq 1$. В этом случае максимальная погрешность равна

$$\Delta\varphi_{\text{макс}} = m\omega^2C_kL_k,$$

т. е. в $\frac{1}{0,5\omega R_n C_k L_k}$ раз больше, чем при использовании двух контактных групп реле.

Для серийно выпускаемых реле типов РЭС-9 и РЭС-10 межконтактные емкости $C_k \simeq 0,2 \text{ нф}$; собственные индуктивности контактов $L_k \simeq 0,01 \text{ мкГн}$. При активном сопротивлении нагрузки $R_n = 75 \text{ ом}$ на частоте 100 МГц для одной контактной группы

$$K_3 = 8 \cdot 10^{-4}.$$

При $m = 1$ $\Delta\varphi_{\text{макс}} = 0,05^\circ$; при $m = 100$ $\Delta\varphi_{\text{макс}} = 50^\circ$. Как видно использование одной контактной группы при больших разностях уровней входных сигналов недопустимо ввиду большой погрешности за счет паразитного прохождения.

Для звена коммутатора (рис. 1, а)

$$K_3 = 0,18 \cdot 10^{-5}, \quad \Delta\varphi_{\text{макс}} = m \cdot 0,18 \cdot 10^{-5} \text{ рад.}$$

$$\text{При } m = 1 \quad \Delta\varphi_{\text{макс}} = 0,00012^\circ;$$

$$\text{при } m = 100 \quad \Delta\varphi_{\text{макс}} = 0,012^\circ.$$

Таким образом, рассмотренное звено коммутатора может быть использовано для построения «одноканального» фазометра с переключением входных сигналов непосредственно по высокой частоте в широком (до $60 \div 80 \text{ дБ}$) динамическом диапазоне и при произвольных соотношениях уровней. Следует подчеркнуть еще одно достоинство описываемого коммутатора — это в принципе линейная система, свободная от амплитудно-фазовых погрешностей, в то время как любые коммутаторы, выполняемые на нелинейных элементах (как полупроводниковых, так и электровакуумных) в динамическом диапазоне будут обладать существенными амплитудно-фазовыми погрешностями.

На рис. 3 и 4 приведены принципиальные схемы электромеханических коммутаторов с переключением в одном канале и с перекрестным переключением каналов соответственно. Коммутатор рис. 3 может быть выполнен на четырех реле типа РЭС-10, имеющих по одной контактной группе, коммутатор рис. 4 выполнен на четырех реле типа РЭС-9, имеющих по две контактные группы.

Экспериментальная проверка последнего коммутатора на частоте 30 МГц показала, что коэффициент передачи закрытого коммутатора лучше, чем $0,7 \cdot 10^{-5}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Р. Носов. Полупроводниковые импульсные диоды. «Советское радио», М., 1965.