

## К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ДИСКРЕТНОГО ФАЗОРЕГУЛЯТОРА

В настоящее время в полярно-координатных компенсаторах применяются в основном электромеханические фазорегуляторы, позволяющие определить фазу измеряемого напряжения с достаточной точностью лишь при наличии громоздких механических устройств для плавного поворота ротора и определения его положения [1, 2, 3].

Ниже рассматривается вариант предложенного в Уфимском нефтяном институте дискретного фазорегулятора, позволяющего получать на выходе постоянное по модулю напряжение, фаза которого регулируется в пределах от 0 до 360° через 1°. Фазорегулятор использует принцип суммирования специально формируемых долей двух ортогональных и равных по модулю векторов (рис. 1) в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = U \cos \varphi + jU \sin \varphi = Ue^{j\varphi} \quad (1)$$

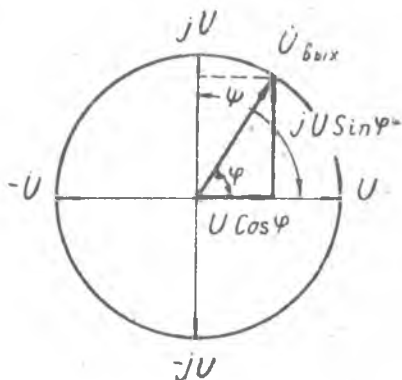


Рис. 1. К пояснению принципа работы дискретного фазорегулятора.

Блок-схема фазорегулятора приведена на рис. 2. С выхода квадратурного фазорасщепителя  $\Phi$  снимаются четыре равных по модулю и сдвинутых относительно друг друга на 90° напряжения, которые через переключатель квадрантов КП и развязывающие усилители подаются на входы двух декадных переключателей ДП, с выходов последних снимаются составляющие  $\pm U \cos \varphi$  и  $\pm jU \sin \varphi$  в зависимости от положения переключателя квадрантов. С по-

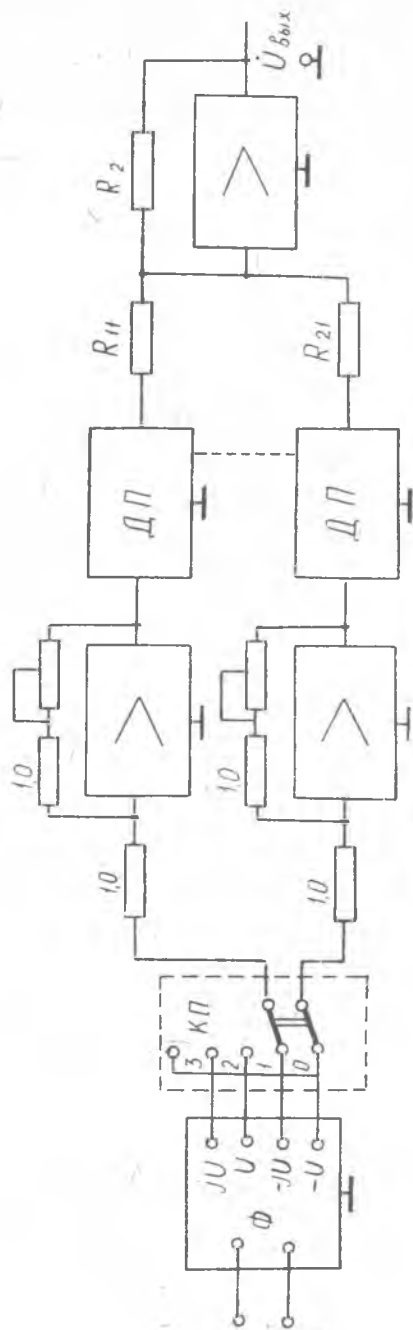


Рис. 2. Блок-схема дискретного фазорегулятора.

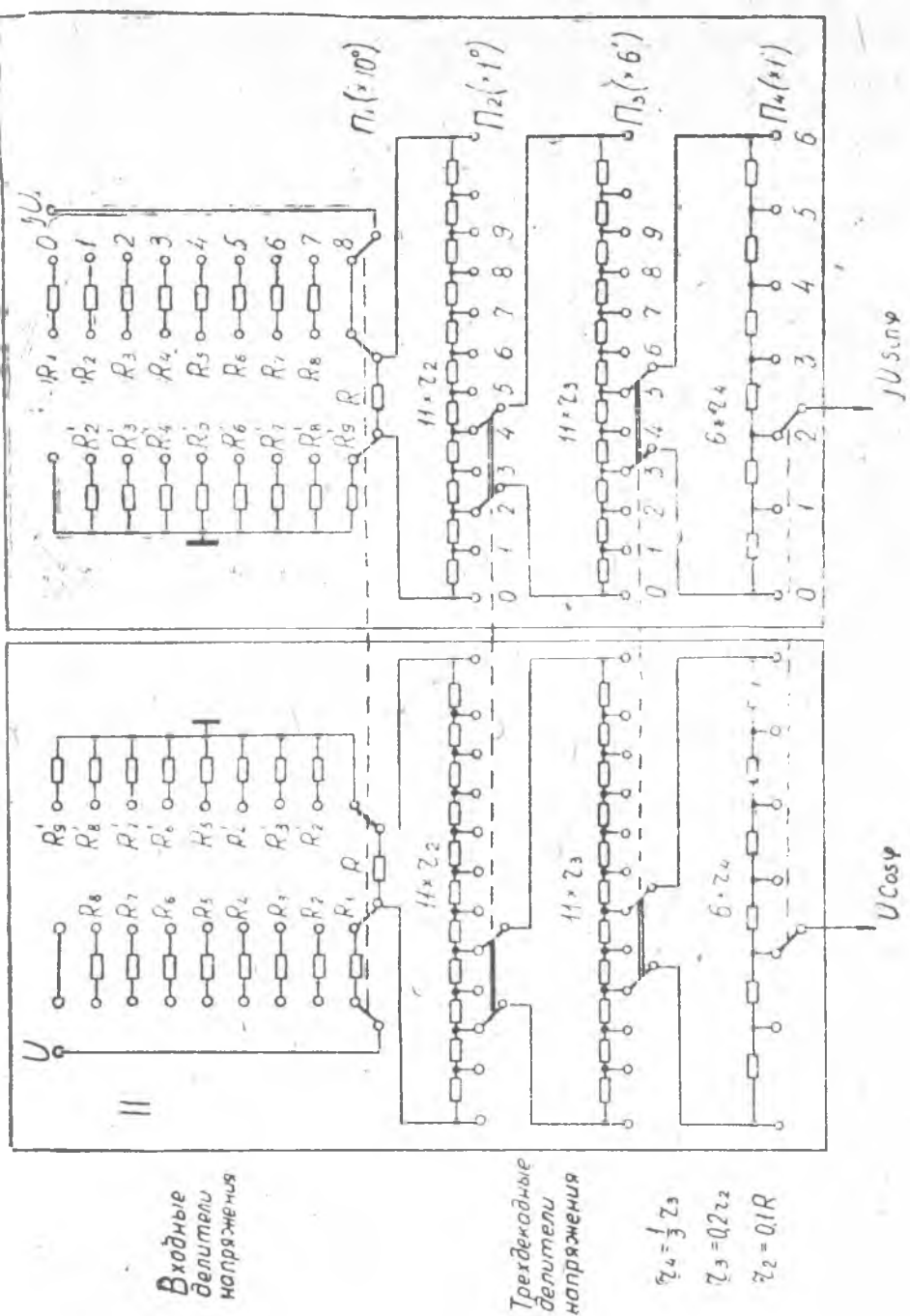


Рис. 3. Декадные переключатели дискретного фазорегулятора:

I — декадный переключатель, реализующий функцию  $\sin \varphi$ , II — декадный переключатель, реализующий функцию  $\cos \varphi$

мощью суммирующего усилителя осуществляется сложение двух составляющих вектора выходного напряжения  $\dot{U}_{\text{вых}}$ .

Функции  $\text{Cos}\varphi$  и  $\text{Sin}\varphi$  аппроксимируются девятью отрезками прямых через  $10^\circ$ . Получаемая погрешность в определении напряжения  $\dot{U}_{\text{вых}}$  от аппроксимации функций  $\text{Cos}\varphi$  и  $\text{Sin}\varphi$  указанным образом составляет около  $1'$  по фазе и  $0,2\%$  по амплитуде. Эта погрешность может быть скорректирована соответствующим подбором коэффициента передачи суммирующего устройства при регулировке фазы. Однако при этом усложняется фазорегулятор, так как появляется дополнительная регулировка в цепи обратной связи суммирующего усилителя.

На рис. 3 приведена принципиальная схема двух декадных переключателей I и II, реализующих соответственно функции  $\text{Sin}\varphi$  и  $\text{Cos}\varphi$ . Каждый декадный переключатель состоит из коммутируемых переключателем  $\Pi_1$  входных делителей напряжения, с общего элемента  $R$  которых оно подается на трехдекадные делители напряжения. Число делителей напряжения определяется интервалом аппроксимации; трехдекадные делители используются для подекадной регулировки фазы внутри интервала аппроксимации.

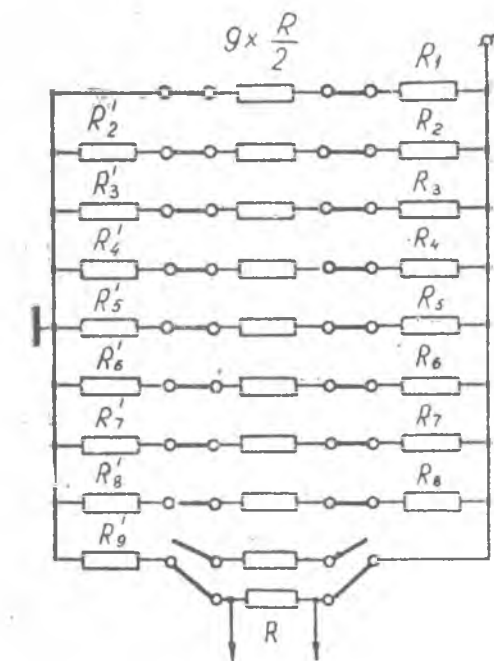


Рис. 4. Принципиальная схема входных делителей напряжения с постоянным входным и выходным сопротивлениями.

Отсчет фазы производится суммированием показаний, определяемых положением переключателя  $\Pi_1$ — $\Pi_4$  и переключателя квадрантов КП. Поскольку  $\text{Sin}\varphi = \text{Cos}(90^\circ - \varphi)$ , то входные делители напряжения для декадных переключателей I и II попарно идентичны. При соответствующей конструкции переключателя  $\Pi_1$  общее число входных делителей напряжения может быть благодаря этому сокращено.

Принципиальная схема входных делителей напряжения декадного переключателя, обеспечивающего постоянство входного и выходного сопротивлений при всех положениях переключателя  $\Pi_1$ , приведена на рис. 4. В данном случае все входные цепи соединены

параллельно, а вместо сопротивления  $R$  и трехдекадного делителя напряжения подключается их эквивалент — сопротивление  $0,5 R$ . Эти входные делители напряжения сложнее, но они в ряде случаев благодаря постоянству входного сопротивления позволяют обойтись без развязывающих усилителей.

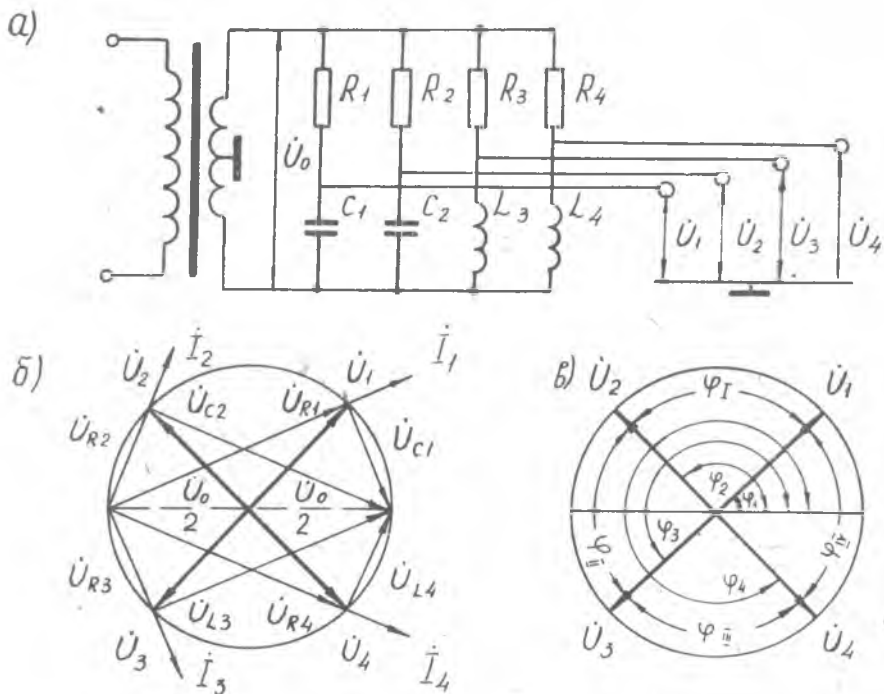


Рис. 5. Квадратурный фазорасщепитель с  $RC$ — и  $RL$ — цепями и его векторные диаграммы.

Точность работы дискретного фазорегулятора в значительной степени зависит от постоянства параметров  $U$  и  $\Psi$  (рис. 1) напряжений на выходе квадратурного фазорасщепителя при изменении частоты и температуры. На рис. 5, а приведена принципиальная схема квадратурного фазорасщепителя, состоящего из двух  $RC$ — и двух  $RL$ — цепочек, каждая из которых включена по мостовой схеме, а на фиг. 5, б и 5, в приведены его векторные диаграммы. Питание цепочек переменным током заданной частоты осуществляется через понижающий трансформатор с отводом от средней точки.

Углы векторов напряжений каждой из цепей фазорасщепителя определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} &= \frac{1}{\omega C_1 R_1}; & \operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2} &= \frac{1}{\omega C_2 R_2}; \\ \operatorname{tg} \frac{\varphi_3}{2} &= -\frac{\omega L_3}{R_3}; & \operatorname{tg} \frac{\varphi_4}{2} &= -\frac{\omega L_4}{R_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

Сдвиги фаз между векторами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_{II}$ ,  $\varphi_{III}$  и  $\varphi_{IV}$  соответственно равны:

$$\begin{aligned} \varphi_I &= \varphi_2 - \varphi_1; & \varphi_{II} &= \varphi_3 - \varphi_2; \\ \varphi_{III} &= \varphi_3 - \varphi_2; & \varphi_{IV} &= 360^\circ + \varphi_1 - \varphi_4. \end{aligned} \quad (3)$$

Подбором величин сопротивлений, емкостей и индуктивностей можно добиться ортогональности векторов  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_2$ ,  $\dot{U}_3$ ,  $\dot{U}_4$ .

Фазорасщепитель, содержащий две  $RC$  — цепочки, описан в [4], однако это устройство позволяет получить только два напряжения, ортогональность которых практически не нарушается при изменении в некоторых пределах частоты  $\omega$  питающего напряжения.

Распространяя на рассматриваемую схему полученные в [4] результаты, можно обеспечить фазовую ошибку  $\delta$ , не превосходящую по абсолютной величине  $0,285 \cdot 10^{-2}$  град. при изменении  $\Delta$  частоты  $\omega$  на 1%. При увеличении частоты все векторы (рис. 5,  $\theta$ ) перемещаются (но с различной «скоростью») по часовой стрелке, в связи с чем фазовая ошибка  $\delta > 0$  для углов  $\varphi_I$  и  $\varphi_{III}$  и  $\delta < 0$  для углов  $\varphi_{II}$  и  $\varphi_{IV}$ ; абсолютная величина ошибки при этом одинакова.

Для обеспечения указанной минимальной фазовой ошибки необходимо параметры фазорасщепителя выбирать так, чтобы выполнялись соотношения

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} &= 0,414; & \operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2} &= 2,414; \\ \operatorname{tg} \frac{\varphi_3}{2} &= -2,414; & \operatorname{tg} \frac{\varphi_4}{2} &= -0,414. \end{aligned}$$

Изменение указанных соотношений может происходить не только при отклонении  $\Delta$  частоты, но и за счет изменения величин емкости, индуктивности или сопротивления при изменении температуры. Величина фазовой погрешности фазорасщепителя при этом может быть подсчитана по формуле, приводимой в [4]. Отметим, что эта погрешность оказывается настолько малой, что можно не предъявлять особых требований к температурной стабильности величин сопротивлений, емкостей и индуктивностей фазорасщепителя.

Если не имеется возможности сделать квадратурный фазорасщепитель достаточно мощным, представляет интерес зависимость модуля и фазы напряжения на выходе квадратурного фазорасщепителя от величины сопротивления  $R_n$  нагрузки (рис. 6). В этом

случае модуль и аргумент напряжения  $\dot{U}_{R_n}$  на нагрузке выражается в следующем виде:

$$U_{R_n} = \frac{U}{2} \cdot \frac{\sqrt{[(\omega C R R_n)^2 - R_n(R + R_n)]^2 + (\omega C R R_n)^2 (R + R_n)^2}}{(R + R_n)^2 + (\omega C R R_n)^2}, \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega C R R_n \cdot (R + 2R_n)}{(\omega C R R_n) - R_n(R + R_n)}$$

Поскольку напряжение на каждом выходе квадратурного фазорасщепителя (рис. 5) зависит от сопротивления  $R_n$ , декадные переключатели следует подключать через развязывающие усилители, которые представляют собой усилители переменного тока с большим коэффициентом усиления и глубокой параллельной отрицательной обратной связью по напряжению.

Если квадратурный фазорасщепитель достаточно мощный и применяются входные делители напряжения с постоянным входным сопротивлением (рис. 4), то отпадает надобность в развязывающих усилителях. Если далее обе составляющие компенсирующего напряжения вводить в рабочую цепь компенсатора отдельно, подобно тому, как это делается в прямоугольно-координатных компенсаторах, то отпадает надобность в суммирующем усилителе и схема фазорегулятора значительно упрощается.

Следует отметить, что дискретный фазорегулятор может работать с любыми квадратурными фазорасщепителями. От типа последнего будет зависеть частотная и температурная погрешности компенсатора.

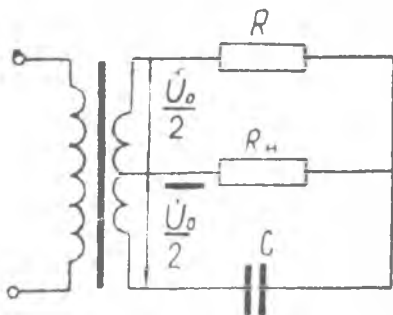


Рис. 6. Нагруженный фазорасщепитель с  $RC$  — цепочкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Г. Шрамков (ред.). Электрические и магнитные измерения, ОНТИ, 1937.
2. Б. П. Асеев. Фазовые соотношения в радиотехнике. М., Связьиздат, 1954.
3. А. А. Кольцов. Повышение точности отсчета аргумента в полярно-координатных компенсаторах. Сборник научных трудов Куйбышевского индустриального института, Электротехника, вып. VII, 1958.
4. В. Н. Шадрин. Фазорасщепители фазовых систем программного управления. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. № 11, 1964.