

## ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.316.761.2—52

И. И. ВОЛКОВ, Л. Ф. КУЛИКОВСКИЙ

(Куйбышев)

### ПРЯМОУГОЛЬНО-КООРДИНАТНЫЙ АВТОКОМПЕНСАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ДАТЧИКАХ ХОЛЛА И ФОТОГАЛЬВАНОМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЯХ

Описывается статический прямоугольно-координатный автокомпенсатор, особенностью которого является использование фазочувствительных детекторов на датчиках Холла совместно с фотогальванометрическими усилителями типа Ф-117. Приводится анализ статического и динамического режимов работы компенсатора; рассматривается влияние различных факторов на точность определения модуля и фазы измеряемого напряжения. Даются технические данные прибора и указываются области его применения.

В настоящее время для измерения комплексных величин токов и напряжений широкое применение нашли автокомпенсационные устройства [1]. Дальнейшее усовершенствование этих устройств, упрощение их схемы и настройки, а также повышение точности является актуальной задачей.

Разработанный автоматический прямоугольно-координатный компенсатор переменного тока работает по принципу статической следящей системы. Особенностью данного компенсатора является использование в нем фазочувствительных детекторов на датчиках Холла совместно с фотогальванометрическими усилителями. Так как фазочувствительные детекторы на датчиках Холла имеют линейную характеристику, низкий уровень шумов ( $10^{-6}$ — $10^{-8}$  в) и не имеют дрейфа нуля [2], то это позволяет сделать компенсатор высокочувствительным с высокими метрологическими данными.

Принципиальная схема компенсатора показана на рис. 1, а векторная диаграмма токов и напряжений, действующих в его цепи, на рис. 2.

Основными элементами компенсатора являются: 1 и 2 — датчики Холла; 5 и 6 — фотогальванометрические усилители типа Ф-117; 7 и 8 — приборы для измерения выходных токов компенсатора, в качестве которых применены магнитоэлектрические приборы типа М-266 с предварительным фазочувствительным детектированием;  $R$ ,  $C$  — фазосдвигающая цепочка;  $R_k$  — компенсационное сопротивление. Датчик Холла 1 помещен в воздушный зазор трансформатора 3, а датчик Холла 2 в воздушный зазор трансформатора 4.

Принцип действия прибора состоит в следующем. Благодаря наличию в первичной цепи трансформатора 4 фазосдвигающей цепочки  $R$ ,  $C$ , в воздушных зазорах трансформаторов создаются магнитные поля с

индукциями  $\dot{B}_x$  и  $\dot{B}_y$ , сдвинутыми по фазе относительно друг друга на  $90^\circ$ . При этом э. д. с.  $\dot{U}_{\phi x}$  и  $\dot{U}_{\phi y}$ , возникающие во вторичных обмотках трансформаторов 3 и 4 и питающие фотоблоки (фотосопроствления) фотогальванометрических усилителей 5 и 6, также сдвинуты между собой по фазе на  $90^\circ$ . Практически из-за неточной настройки фазосдвигающего устройства фазовый сдвиг не равен точно  $90^\circ$ , а имеет расхождение на угол  $\delta$ . Выходные токи  $\dot{I}_{kx}$  и  $\dot{I}_{ky}$  фотогальванометрических усилителей, протекая через сопротивления  $R_k$ , создают на них компенсирующие напряжения  $\dot{U}_{kx}$  и  $\dot{U}_{ky}$ , находящиеся в квадратуре. За счет влияния индуктивностей вторичных обмоток трансформаторов токи  $\dot{I}_{kx}$  и  $\dot{I}_{ky}$  сдвинуты по фазе на угол  $\alpha$  соответственно от э. д. с.  $\dot{U}_{\phi x}$  и  $\dot{U}_{\phi y}$ .

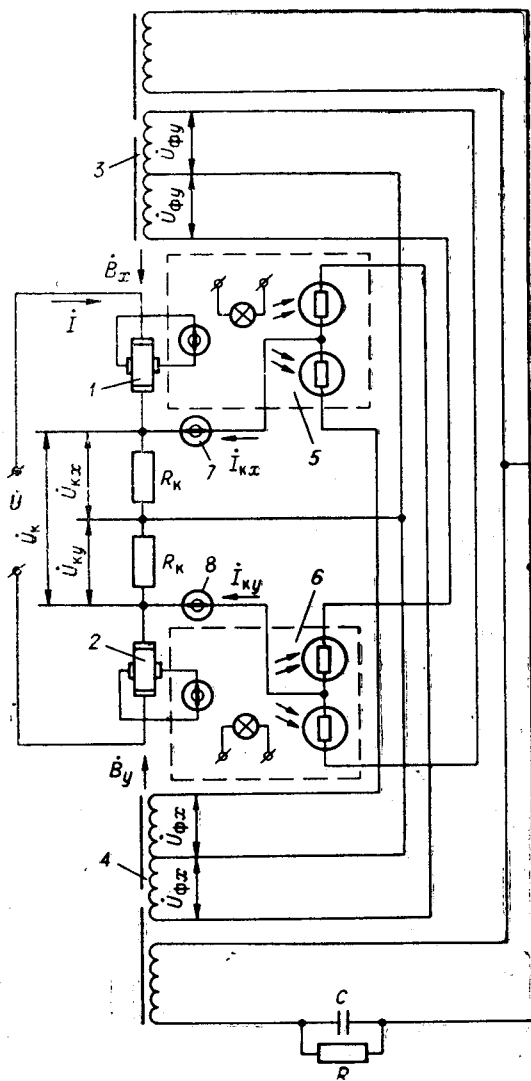


Рис. 1.

ставляющую тока  $I$ , синфазную с индукцией  $\dot{B}_y$ . Постоянные составляющие выходных токов датчиков Холла будут соответственно равны:

$$I_{гx} = K_x I \cos \theta; \quad (2)$$

$$I_{гy} = K_x I \sin (\delta + \theta), \quad (3)$$

где  $K_x$  — коэффициент преобразования фазочувствительного детектора на датчике Холла.

При подключении к прибору измеряемого напряжения  $\dot{U}$  во входной цепи под действием разности напряжений  $\Delta \dot{U} = \dot{U} - \dot{U}_{kx} - \dot{U}_{ky}$  протекает ток

$$I = K_{вх} \Delta U \cos \varphi_{вх}, \quad (1)$$

где  $K_{вх}$  — коэффициент преобразования входной цепи;

$\varphi_{вх}$  — сдвиг по фазе тока  $I$  от напряжения  $\Delta \dot{U}$ , вызванный реактивной составляющей внутреннего сопротивления источника измеряемого напряжения.

Датчик Холла 1 реагирует на составляющую тока  $I$ , синфазную с индукцией  $\dot{B}_x$ , а датчик Холла 2 реагирует на составляющую

Кроме того, из векторной диаграммы следует, что проекции напряжения  $\Delta \dot{U}$  на оси  $\dot{U}_{kx}$  и  $\dot{U}_{ky}$  соответственно равны:

$$\Delta U \cos(\varphi_{вх} + \delta + \alpha + \theta) = U \cos \varphi - U_{kx} + U_{ky} \sin \delta; \quad (4)$$

$$\Delta U \sin(\varphi_{вх} + \alpha + \theta) = U \sin(\varphi - \delta) - U_{ky} + U_{kx} \sin \delta. \quad (5)$$

Учитывая, что

$$U_{kx} = I_{kx} R_k; \quad U_{ky} = I_{ky} R_k; \quad I_{kx} = K_r I_{rx}; \quad I_{ky} = K_r I_{ry},$$

где  $K_r$  — коэффициент преобразования фотогальванометрического усилителя, из выражений (1)–(5) определяем выходные токи компенсатора:

$$I_{kx} = \frac{K}{R_k} \frac{\cos(\varphi - \delta) + \sin(\varphi - \delta - \alpha) \operatorname{tg} \varphi_{вх} + K \cos \delta \cos(\varphi - \delta)}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{вх} + 2K \cos \delta (\cos \alpha - \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_{вх}) + K^2 \cos^2 \delta} U; \quad (6)$$

$$I_{ky} = \frac{K}{R_k} \frac{\sin(\varphi - \alpha) - \cos(\varphi - \alpha) \operatorname{tg} \varphi_{вх} + K \cos \delta \sin \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{вх} + 2K \cos \delta (\cos \alpha - \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_{вх}) + K^2 \cos^2 \delta} U. \quad (7)$$

Здесь  $K = K_{вх} K_x K_r R_k$  — коэффициент усиления разомкнутой системы по напряжению.

Из выражений (6) и (7) следует, что токи  $I_{kx}$  и  $I_{ky}$  зависят не только от модуля  $U$  и от фазы  $\varphi$  измеряемого напряжения, но также и от фазовых сдвигов  $\varphi_{вх}$ ,  $\delta$  и  $\alpha$ .

В идеальном случае, когда  $\varphi_{вх} = \delta = \alpha = 0$ , выходные токи компенсатора определяются выражениями:

$$I_{kx} = \frac{K}{R_k(1+K)} U \cos \varphi; \quad (8)$$

$$I_{ky} = \frac{K}{R_k(1+K)} U \sin \varphi, \quad (9)$$

т. е. они пропорциональны ортогональным составляющим  $U \cos \varphi$  и  $U \sin \varphi$  измеряемого напряжения. Зная эти токи, определяем модуль и фазу измеряемого напряжения:

$$U = \frac{R_k(1+K)}{K} \sqrt{I_{kx}^2 + I_{ky}^2}; \quad (10)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{I_{ky}}{I_{kx}}. \quad (11)$$

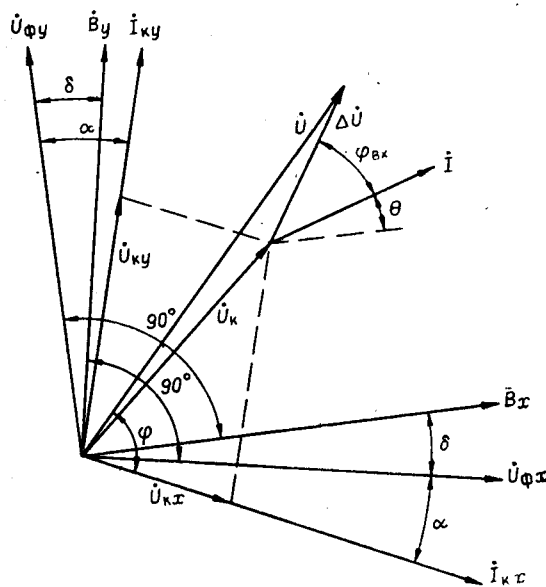


Рис. 2.

Так как в действительности  $\varphi_{вх} \neq 0$ ,  $\alpha \neq 0$  и  $\delta \neq 0$ , то по приведенным формулам модуль и фаза измеряемого напряжения будут определяться с погрешностями. Анализ показал, что при достаточно большом коэффициенте усиления ( $K \rightarrow \infty$ ) относительная погрешность определения модуля измеряемого напряжения и абсолютная погрешность опре-

деления фазы измеряемого напряжения будут равны:  $\gamma = 0,5 \delta$ ;  $\Delta\varphi = \delta$ .

Таким образом, на точность работы автокомпенсатора влияет лишь неортогональность индукций магнитных полей  $B_x$  и  $B_y$ . Поэтому к фазосдвигающему устройству должны быть предъявлены высокие требования в отношении точности настройки.

Несинусоидальность форм кривых измеряемого напряжения  $U$ , индукций  $B_x$  и  $B_y$  и э. д. с.  $U_{\phi x}$  и  $U_{\phi y}$  тоже будет вызывать погрешности в определении модуля и фазы первой гармоники измеряемого напряжения. Исследования показали, что эти погрешности могут быть сведены к минимуму, если обеспечить форму кривых магнитных индукций  $B_x$  и  $B_y$ , близкую к синусоидальной.

В динамическом режиме работы компенсатора характеристическое уравнение замкнутой системы с учетом того, что степень успокоения гальванометра равна  $\beta > 30$ , записывается так:

$$A^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{вх}}) + 2KA \cos \delta (\cos \alpha - \sin \alpha \operatorname{tg} \varphi_{\text{вх}}) + K^2 \cos^2 \delta = 0, \quad (12)$$

где

$$A = T_1(2\beta T_2 + T_1)p^2 + (2\beta T_1 + T_2)p + 1;$$

$T_1$ ,  $\beta$  — соответственно постоянная времени и степень успокоения гальванометра;

$T_2$  — постоянная времени фотоблока.

Так как фотосопротивления по величине на несколько порядков больше индуктивных сопротивлений вторичных обмоток трансформаторов, то можно считать, что фазовый сдвиг  $\alpha$  между токами  $I_{Kx}$  и  $I_{Ky}$  и э. д. с.  $U_{\phi x}$  и  $U_{\phi y}$  равен нулю. Тогда условия устойчивой работы системы будут следующими:

$$-\frac{\pi}{2} < \delta < \frac{\pi}{2};$$

$$\frac{4\beta^2 T_1}{2\beta T_2 + T_1} \left(1 + \frac{K^2 \cos^2 \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{вх}}}\right) > \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{вх}} + (1 + K \cos \delta)^2.$$

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при использовании фотогальванометрических усилителей типа Ф-117 эти условия выполняются и система работает устойчиво.

При  $\varphi_{\text{вх}} = 0$  и  $\alpha = 0$  характеристическое уравнение замкнутой системы принимает вид

$$T_1(2\beta T_2 + T_1)p^2 + (2\beta T_1 + T_2)p + 1 + K \cos \delta = 0.$$

Полученное уравнение имеет второй порядок. Зная коэффициенты этого уравнения, по приведенным ниже формулам определяются такие характеристики компенсатора, как степень успокоения  $\beta_0$ , частота собственных колебаний  $\omega_0$  и полоса пропускания частот  $f_n$ :

$$\beta_0 = \frac{2\beta T_1 + T_2}{2\sqrt{T_1(2\beta T_2 + T_1)(1 + K \cos \delta)}};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1 + K \cos \delta}{T_1(2\beta T_2 + T_1)}};$$

$$f_n = \frac{\omega_0}{2\pi} \sqrt{1 - 2\beta_0^2 + \sqrt{2(1 - 2\beta_0^2 + 2\beta_0^4)}}.$$

Отсюда видно, что  $\beta_0$ ,  $\omega_0$  и  $f_n$  зависят от величины коэффициента усиления  $K$ . На основании анализа качества переходного процесса было установлено, что оптимальное значение коэффициента усиления лежит в пределах 400—500. В этом случае время переходного процесса составляет 0,2—0,3 сек; перерегулирование не более 0,2%, а полоса пропускания не превышает 3 гц.

Разработанный и изготовленный компенсатор имеет следующие технические данные: пределы измерения 0—100, 0—500, 0—1000 мв; приведенная погрешность определения модуля 0,5%; погрешность определения фазы 30 мин; входное сопротивление при пределе 1000 мв—880 ком; напряжение питания 220 в; рабочая частота 50 гц.

Достоинствами рассмотренного автокомпенсатора являются: простота схемы и ее настройки; совмещение функций фильтра, усилителя и модулятора в одном усилителе типа Ф-117; хорошие метрологические данные.

Прямоугольно-координатный автокомпенсатор переменного тока на датчиках Холла и фотогальванометрических усилителях может быть использован: в лабораторных установках для исследования электрических и магнитных цепей переменного тока; в производственных лабораториях для проверки измерительных приборов и для испытания электрических машин и аппаратов переменного тока; для целей автоматического контроля производственных процессов при использовании в качестве первичных преобразователей датчиков переменного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Ф. Куликовский, А. М. Мелик-Шахназаров. Компенсаторы переменного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
2. В. Н. Богомолов, В. А. Мясников. Применение датчика э. д. с. Холла в качестве фазочувствительного выпрямителя.—Автоматика и телемеханика, 1959, т. XX, № 6.

*Поступила в редакцию  
26 апреля 1966 г.,  
окончательный вариант —  
1 августа 1966 г.*

---

**I. I. Volkov, L. F. Kulikovskiy**  
**A.-C. RECTANGULAR COORDINATES AUTOCOMPENSATOR**  
**WITH HALL ELEMENTS**  
**AND WITH PHOTOGALVANOMETRIC AMPLIFIERS**

Autocompensator feature is application of Hall phase-sensitive detectors with photogalvanometric amplifiers of the type Ф-117. Static and dynamic operating conditions are analysed. Various factors influence upon accuracy of measuring the voltage. Performance characteristics of instrument are given and field of application is stated.

---