

Б. К. Григоровский

К АНАЛИЗУ ФОТОКОМПЕНСАЦИОННОЙ СХЕМЫ

Фотокомпенсационная схема в последнее время находит применение для электрометрических измерений [1], а также для измерения комплексных величин [2].

Принцип действия такой схемы поясняется рис. 1. При нулевом положении подвижной части электрометра Э световой поток

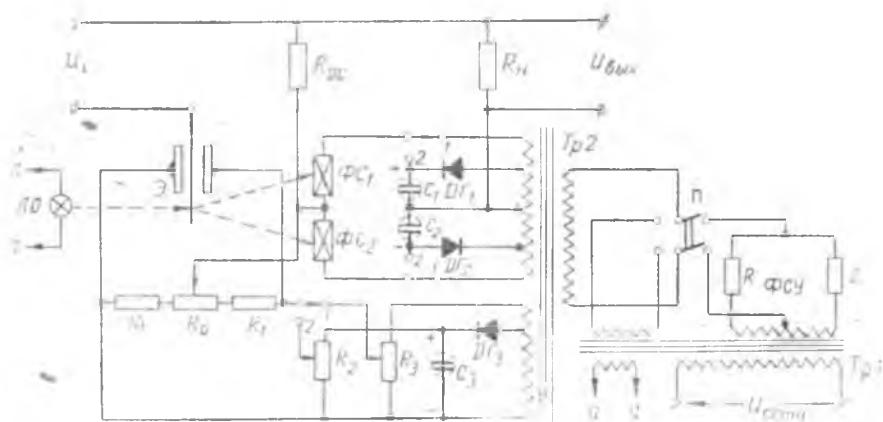


Рис. 1. Фотокомпенсационная схема для измерения переменного напряжения.

осветительной лампочки $ЛО$ одинаково освещает фотосопротивления FC_1 и FC_2 . При подаче на вход прибора измеряемого напряжения U_1 подвижная часть электрометра начнет поворачиваться, распределение светового потока между фотосопротивлениями нарушится и через сопротивление R будет протекать ток I . Отклонение подвижной части электрометра прекратится,

когда синфазная составляющая вектора измеряемого напряжения будет скомпенсирована падением напряжения от тока I на сопротивлении обратной связи R_{oc} (рис. 2).

$$U_{ix} = I_1 R_{oc}; \quad I_1 = \frac{1}{R_{oc}} U_{ix};$$

$$U_{вых 1} = \frac{R_{II}}{R_{oc}} U_{ix} = k U_{ix} \quad (1)$$

Здесь $U_{ix} = U_i \cos \varphi$ — синфазная составляющая вектора напряжения U_i ;

$U_v = U_y - U_0$ — напряжение возбуждения электрометра;

φ — фазовый угол сдвига напряжений U_i и U_0 ;

$k = \frac{R_{II}}{R_{oc}}$ — статический коэффициент усиления.

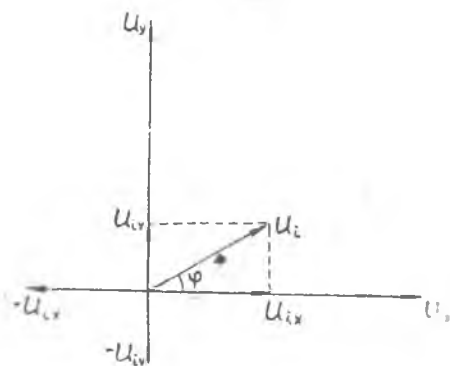


Рис. 2. Векторная диаграмма.

Напряжение U_i рассматривается в осях комплексной плоскости, образованной фазосдвигающим устройством ФСУ. Изменяя фазу напряжения возбуждения на 90° , получим второе значение выходного напряжения для квадратурной составляющей измеряемого напряжения:

$$U_{вых 2} = k U_{iy} \quad (2)$$

Модуль и фаза измеряемого напряжения определяются из соотношений

$$U_i = k_0 \sqrt{U_{вых 1}^2 + U_{вых 2}^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_{вых 2}}{U_{вых 1}} \quad (3)$$

Здесь $k_0 = \frac{1}{k}$ — постоянная.

Измерение постоянного напряжения отличается только системой питания.

Из рассмотренного принципа действия следует, что прибор, выполненный по приведенной схеме, представляет собой автоматический компенсатор напряжения. Его структурная схема приведена на рис. 3. K_1, K_2, K_3, K_4 — передаточные коэффициенты отдельных элементов прибора.

Уравнение моментов электрометра I может быть представлено в виде [1, 2].

$$B U_0 U_p \cos \varphi + m U_0^2 \alpha = W \alpha \quad (4)$$

Здесь B и m — постоянные;

W — удельный противодействующий момент растяжек.

Левая часть выражения (4) представляет собой вращающий момент, действующий на подвижную часть электрометра, правая часть — противодействующий момент от действия растяжек. Вращающий момент электрометра состоит из момента $D = BU_0 U_p \cos \varphi$,

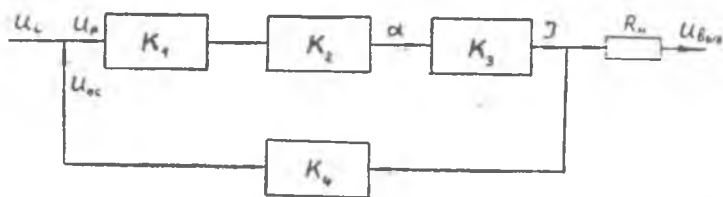


Рис. 3. Структурная схема.

обусловленного напряжением U_p , действующим в цепи электрометра и электростатического момента $D_{эл} = mU_0^2 \alpha$, обусловленного напряжением возбуждения электрометра. Момент D вызывает угловое перемещение подвижной части электрометра. Коэффициент преобразования электрометра

$$k_1 = \frac{D}{U_p} = BU_0 \cos \varphi. \quad (5)$$

Электростатический момент осуществляет компенсацию механического противодействующего момента растяжек. Соответствующий коэффициент преобразования

$$k_2 = \frac{\alpha}{D_{эл}} = \frac{1}{W - mU_0^2}. \quad (6)$$

Поворот подвижной части электрометра вызывает перераспределение световых потоков, падающих на фотосопротивления и появление в диагонали дифференциальной схемы тока I пропорционального углу α . Коэффициент преобразования

$$k_3 = \frac{I}{\alpha} \quad (7)$$

зависит от чувствительности фотосопротивлений, типа оптической и фотоэлектрической схемы и величины нагрузки R_n .

Коэффициент преобразования звена обратной связи равен

$$k_4 = \frac{U_{ос}}{I} = R_{ос}. \quad (8)$$

Напряжение обратной связи действует навстречу измеряемому напряжению, так что к электрометру прикладывается результирующее напряжение

$$U_p = U_i - U_{ос}. \quad (9)$$

Напряжение обратной связи может быть определено по формуле

$$U_{oc} = U_p k_1 k_2 k_3 k_i = U_p k_p, \quad (10)$$

Здесь $k_p = k_1 k_2 k_3 k_i$ — коэффициент преобразования разомкнутой системы.

Подставляя (10) в (9) будем иметь:

$$U_p = \frac{U_i}{1 + k_p}, \quad (11)$$

т. е., результирующее напряжение, прикладываемое к электрометру в $(1 + k_p)$ меньше измеряемого напряжения U_i . Заменяя в последнем выражении $U_p = \frac{W - mU_0^2}{BU_0} \alpha$, получим:

$$\alpha = \frac{BU_0 U_i \cos \varphi}{(W - mU_0^2)(1 + k_p)} = \frac{BU_0 U_i}{W_0} \cos \varphi \quad (12)$$

или

$$\alpha = \frac{D}{W_0} \quad (13)$$

Таким образом, введение отрицательной обратной связи способствует увеличению противодействующего момента растяжек от значения $W - mU_0^2$ до значения $W_0 = (W - mU_0^2)(1 + k_p)$.

Входное сопротивление схемы определится как отношение измеряемого напряжения на входе прибора к току, потребляемому входной цепью

$$z_{вх} = \frac{U_{ix}}{i}. \quad (14)$$

Ток во входной цепи определится из следующего соотношения:

$$i = \frac{U_{ix} - IR_{oc}}{z}, \quad (15)$$

где $z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ — эквивалентное сопротивление электрометра.

Подстановка (15) в (14) дает следующее выражение для входного сопротивления схемы к измеряемой составляющей вектора напряжения U_i :

$$z_{вх} = \frac{z}{1 - k_u R_{oc}}. \quad (16)$$

Здесь $k_u = \frac{I}{U_{ix}}$ — коэффициент усиления по выходному току.

Из теории усилителей с отрицательной обратной связью известно, что передаточный коэффициент системы с отрицательной об-

ратной связью определяется через передаточные коэффициенты прямой K_I и обратной K_{II} связи:

$$k_u = \frac{k_I}{1 + k_I k_{II}} \quad (17)$$

Здесь $k_I = k_1 k_2 k_3$; $k_{II} = k_4$.

Используя (17) и (16), получим:

$$z_{вх} = z(1 + k_I k_{II}). \quad (18)$$

Таким образом, входное сопротивление фотокомпенсационной схемы возрастает в $(1 + K_I K_{II})$ раз по сравнению с сопротивлением входной цепи.

Перейдем к рассмотрению погрешностей измерения. Погрешности измерения складываются из погрешности схемы и погрешности измерительного прибора. Погрешности схемы будем искать при помощи соотношений:

$$U_i = \sqrt{U_{ix}^2 + U_{iy}^2} \quad (19)$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_{iy}}{U_{ix}} \quad (20)$$

На основании правила применения дифференциала к оценке погрешности формул, будем иметь:

$$\gamma_{u_i} = \left(\frac{U_{ix}}{U_i}\right)^2 \gamma_{u_{ix}} + \left(\frac{U_{iy}}{U_i}\right)^2 \gamma_{u_{iy}} \quad (21)$$

$$\Delta\varphi = \frac{U_{iy}}{U_{ix}} \cos^2 \varphi (\gamma_{u_{iy}} - \gamma_{u_{ix}}) \quad (22)$$

Здесь γ_{u_i} — относительная погрешность измерения модуля вектора U_i ;

$\Delta\varphi$ — абсолютная погрешность определения аргумента вектора U_i ;

$\gamma_{u_{ix}}$, $\gamma_{u_{iy}}$ — относительные погрешности измерения синфазной и квадратурной составляющей вектора U_i .

Таким образом, точность определения вектора измеряемого напряжения в основном определяется точностью измерения его составляющих. Рассмотрим погрешности измерения составляющих U_{ix} и U_{iy} . Для фотокомпенсационной схемы, согласно (9) и (11) может быть записано соотношение:

$$IR_{oc} = (U_{ix} - IR_{oc}) k_p. \quad (23)$$

При работе схемы могут иметь место два случая:

1. Механический противодействующий момент растяжек скомпенсирован электростатическим моментом при $\alpha = 0$. В этом случае с учетом нелинейности характеристик электрометра происходит

дерекомпенсация измеряемого напряжения напряжением обратной связи $IR_{oc} > U_i$, что и обеспечивает статическую устойчивость схемы.

2. Механический противодействующий момент растяжек не равен нулю. В этом случае для поддержания подвижной части электрометра в отклоненном состоянии измеряемое напряжение оказывается больше напряжения обратной связи $U_i > IR_{oc}$.

Оба эти случая служат источниками основной погрешности схемы. Измеренная величина тока из (23) определится как:

$$I = \frac{U_{ix}}{R_{oc}} \frac{k_o}{1 + k_p}. \quad (24)$$

Условию отсутствия статических погрешностей соответствует равенство:

$$I = \frac{U_{ix}}{R_{oc}}. \quad (25)$$

Имея в виду (24), получим:

$$\Delta I = \frac{U_{ix}}{R_{oc}} \frac{1}{1 + k_p}. \quad (26)$$

Обычно $k_p \gg 1$, поэтому

$$\Delta I = \frac{U_{ix}}{R_{oc}} \frac{1}{k_p}. \quad (27)$$

Относительная погрешность измерения будет равна:

$$\gamma_1 = \frac{1}{k_p}. \quad (28)$$

Выражение для статической погрешности усилителя может быть представлено в несколько ином виде. Действительно, согласно (23) имеем:

$$\gamma_1 = \frac{U_{ix} - IR_{oc}}{IR_{oc}}. \quad (29)$$

Последнее соотношение можно представить в виде:

$$\gamma_1 = \frac{i}{I} - 1, \quad (30)$$

где $i = \frac{U_{ix}}{R_{oc}}$ — коэффициент, имеющий размерность тока.

Выражения (28), (30) показывают, что при $U_{ix} = IR_{oc}$ или, что то же самое, при $i = I$ статистические погрешности схемы равны нулю.

Существенное влияние на точность измерения оказывает смещение подвижной части электрометра от нулевого положения, что приводит к появлению в нагрузке R_n дополнительного тока I_{g1} . Если при измерении U_{ix} имело место смещение нулевого

положения электрометра, то для приведения системы в равновесие электрометр повернется на угол

$$\alpha_{\text{п}} = \alpha + \alpha_{\text{др}}. \quad (31)$$

Здесь α — угол отклонения подвижной части электрометра под действием измеряемого напряжения U_{ix} ;

$\alpha_{\text{др}}$ — угол смещения нулевого положения подвижной части электрометра под влиянием паразитных факторов.

Напряжение на сопротивлении обратной связи будет равно:

$$U_{\text{ос}} = (I + I_{g1})R_{\text{ос}} \quad (32)$$

Погрешность измерения в этом случае будет определяться выражением:

$$\gamma_1' = \frac{I}{I + I_{g1}} - 1. \quad (33)$$

Из сравнения последнего соотношения с (30) следует, что

$$\gamma_1' > \gamma_1. \quad (34)$$

Таким образом, дрейф нуля электрометра приводит к увеличению погрешности измерения составляющих вектора напряжения U_i .

Смещение нулевого положения может произойти и вследствие изменения параметров усилительной схемы, так как они влияют не только на коэффициент преобразования, но и могут изменять то положение электрометра, при котором ток на выходе схемы равен нулю. Дрейф усилительной схемы вызывается в основном нестабильностью характеристик фотосопротивлений, проявляющихся особенно сильно при колебаниях температуры. В результате изменения характеристик фотосопротивлений ток, протекающий через нагрузку R_n , изменяется нерегулярным образом при отсутствии измеряемого напряжения, что приводит к погрешности измерения U_{ix} .

Изменение тока можно рассматривать не как следствие дрейфа усилительной схемы, а как следствие эквивалентного изменения напряжения на входе прибора, т. е.

$$\Delta U_{ix} = \frac{I_{g2}}{k_1 k_2 k_3}. \quad (35)$$

Погрешность, вызванная смещением нулевого положения, равна:

$$\gamma_2 = \frac{\Delta U_{ix}}{U_{ix}} = \frac{I_{g2}}{U_{ix}} \frac{1}{k_1 k_2 k_3}. \quad (36)$$

Соотношение (36) показывает, что погрешность, вызванная нестабильностью характеристик фотосопротивлений, зависит от предела измерения и коэффициентов преобразования электрометра и фотоэлектрической части схемы.

Суммарная погрешность измерения синфазной составляющей определится как

$$\gamma_{u_{ix}} = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{1}{k_p} + \frac{I_g}{U_{ix}} \frac{1}{k_1 k_2 k_3} \quad (37)$$

Здесь $I_g = I_{g1} + I_{g2}$ — ток, вызванный смещением нулевого положения электрометра и схемы.

Погрешность в определении квадратурной составляющей измеряемого вектора увеличится за счет неточной регулировки фазового сдвига в фазосдвигающем устройстве. Неточность в установке фазового сдвига на угол δ приводит к тому, что компенсация осуществляется в косоугольной координатной системе (рис. 4). При этом в определении квадратурной составляющей вектора измеряемого напряжения допускается погрешность:

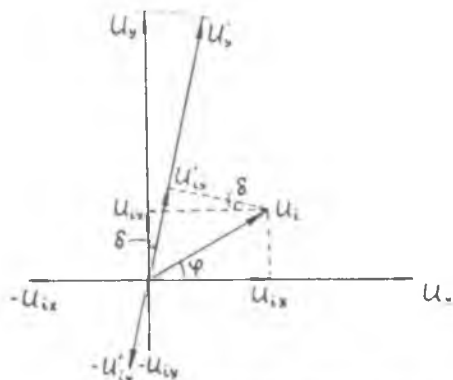


Рис. 4. Векторная диаграмма.

$$\begin{aligned} \gamma_3 &= \frac{U'_{iy} - U_{iy}}{U_{iy}} = \\ &= \frac{\sin(\varphi + \delta)}{\sin \varphi} - 1. \end{aligned} \quad (38)$$

При измерении переменного напряжения имеет место погрешность от несинусоидальности форм кривых измеряемого

и компенсирующего напряжений.

При исследовании этой погрешности следует иметь в виду свойство избирательности электрометра, состоящее в том, что отклонение его подвижной части происходит в результате взаимодействия гармоник одинаковой частоты и то, что электрометр реагирует на действующее значение напряжения. Действующее значение несинусоидального измеряемого напряжения определяется выражением:

$$\begin{aligned} U_{ix} &= \sqrt{U_{ix_1}^2 + U_{ix_2}^2 + U_{ix_3}^2 + \dots + U_{ix_n}^2} = \\ &= U_{ix_1} \sqrt{1 + \left(\frac{U_{ix_2}}{U_{ix_1}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ix_3}}{U_{ix_1}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_{ix_n}}{U_{ix_1}}\right)^2}. \end{aligned} \quad (39)$$

Здесь U_{ix_n} — n -я гармоника измеряемого напряжения U_{ix} .

При синусоидальном напряжении возбуждения электрометра компенсация U_{ix} осуществляется по первой гармонике. Поэтому условие равновесия запишется в виде:

$$U_{ix1} = U_{k1} \quad (40)$$

Здесь U_{k_1} — первая гармоника компенсирующего напряжения. Имея в виду (40) получим:

$$U_{ix} = nU_{k_1} \quad (41)$$

Здесь

$$n = \sqrt{1 + \left(\frac{U_{ix_2}}{U_{ix_1}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ix_3}}{U_{ix_1}}\right)^2 + \dots}$$

Погрешность определения действующего значения измеряемого напряжения будет равна:

$$\gamma_{ix} = \frac{U_{ix} - U_k}{U_k} = n - 1. \quad (42)$$

Анализируя составляющие погрешности фотокомпенсационной схемы, отметим, что точность измерения синфазной составляющей вектора измеряемого напряжения выше точности измерения квадратурной составляющей. Основным путем уменьшения погрешностей измерения является увеличение коэффициента преобразования разомкнутой системы. Из (6) следует, что при напряжении возбуждения электрометра, равного $U_0 = \sqrt{\frac{W}{m}}$ коэффициент преобразования $k_p = \infty$ и статические погрешности схемы отсутствуют. Уменьшение погрешностей схемы путем увеличения коэффициента преобразования фотоэлектрической части схемы нецелесообразно, так как при этом могут возникнуть автоколебания [1].

В заключение можно отметить, что фотокомпенсационная схема с использованием электрометра обладает рядом положительных качеств, а именно: возможностью измерения постоянных и переменных напряжений, высокой чувствительностью, высоким входным сопротивлением, так что, по-видимому, в измерительной технике она получит широкое распространение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Видманов, Исследование фотоэлектронического усилителя на полупроводниковых приборах, диссертация. Куйбышев, 1963.
2. Б. К. Григоровский, Фотоэлектрический вектормер, решение о выдании авторского свидетельства от 22. I. 1963 г. по заявке № 753747/24—7.
3. В. Н. Мильштейн, Энергетические соотношения в электронизмерительных приборах, Госэнергониздат, 1960.
4. А. Д. Нестеренко, Основы расчета электронизмерительных схем уравновешивания, Киев, 1960.