

## РЕГИСТРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПРИБОРОВ, ИЗМЕРЯЮЩИХ УГЛЫ УПРАВЛЕНИЯ, ПРОВОДИМОСТИ И КОММУТАЦИИ В ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

*О. П. Котляров, А. В. Федоров*

Харьков

Углы управления  $\alpha$ , проводимости  $\lambda$  и коммутации  $\gamma$  характеризуют режимы работы управляемых вентильных преобразователей УВП и определяют их технико-экономические показатели. От точности измерения этих углов зависит точность косвенных измерений многих величин, характеризующих УВП. Прямое и косвенное измерение этих величин дает возможность установить степень погрешностей, вносимых рядом допущений, которые, как правило, делаются при теоретических исследованиях УВП. Для измерения углов  $\alpha$ ,  $\lambda$  и  $\gamma$  используют осциллографический метод либо специальные приборы [1, 2]. Применение приборов позволяет ускорить исследование и наладку УВП, осуществить непрерывный контроль за их работой и в большинстве случаев точнее измерить углы. Измерение углов приборами сводится к измерению временных интервалов между импульсами, получаемыми различными способами [2] и возникающими в моменты прохождения фазного либо линейного анодного напряжения через нуль, который принимается за начало отсчета углов  $\alpha$ , и в моменты включения и выключения соответствующих вентилей исследуемого преобразователя. Интервалы времени можно измерять стрелочными приборами магнитоэлектрической системы МЭС или приборами с цифровым отсчетом ЦО. Показания прибора МЭС будут пропорциональны интервалам времени только в том случае, если прибор включен на напряжение  $u_0$ , имеющее форму прямоугольных импульсов продолжительностью, равной измеряемым интервалам времени  $\theta$ , а его параметры соответствуют величинам, при которых он будет обладать интегрирующими свойствами:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{пр}}}{T} \int_0^{\theta} \frac{u_0}{R_{\text{пр}}} dt = \frac{S_{\text{пр}} I_0}{360} \theta = K_{\text{пр}} \theta, \quad (1)$$

где  $S_{\text{пр}}$  — чувствительность прибора.

Прибор обладает импульсным интегрированием при степени успокоения  $\beta_{\text{пр}}$ . Величину  $\beta_{\text{пр}}$  можно определить, исходя из того, что в переспокоенном режиме с достаточной точностью движение рамки прибора описывается законом [3]

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{пр}}}} \right), \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{пр}} = \frac{2\beta_{\text{пр}}}{\omega_0}$  — постоянная времени прибора.

Считая электрической моделью прибора интегрирующую цепь  $R$ — $C$  с постоянной времени  $\tau = RC = \tau_{\text{пр}}$ , можно найти необходимую величину

$\beta_{пр}$ , при которой стрелка прибора будет вибрировать с амплитудой  $\Delta\alpha_{пр(k)}$ , соответствующей заданной приведенной погрешности измерения  $\delta_{п(k)}$

$$\beta_{пр} = \frac{\omega_0 T \sqrt{4 \sin^2 K \pi \frac{\theta}{T} - \delta_{п(k)}^2 \left( K \pi \frac{\theta}{T} \right)^2}}{2 \omega_K K \pi \theta \delta_{п(k)}}; \quad (3)$$

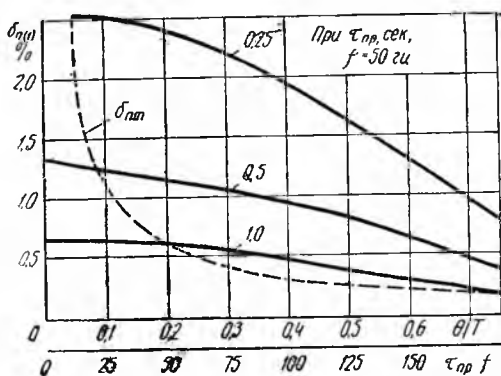


Рис. 1.

$$\beta_{пр} \Big|_{\theta \rightarrow 0} = \frac{1}{\frac{\omega_K}{\omega_0} \delta_{п(k)}} = \frac{1}{K \delta_{п(k)}}.$$

На рис. 1 приведены кривые, построенные на основании уравнения (3) при  $K = 1$ .

При измерении малых углов, что соответствует малым интервалам времени, через регистрирующий прибор протекает ток большой скажности. Отношение действующего значения этого тока к его средней величине равно

$$\frac{I_{\sim}}{I_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{\pi T}{\theta}} \approx 19 \sqrt{\frac{\pi}{\theta}}, \quad (4)$$

где  $n = 1, 2, 4 \dots (m_2 \pm 1)$  — фактор управления УВП.

Исследования показали, что существующее мнение о нереагировании приборов МЭС на переменную составляющую тока при  $\beta_{пр} > 1$  не соответствует действительности. Когда по рамке прибора протекает переменная составляющая тока, в ней возникает вращающий момент, величина и направление которого зависит от положения рамки в воздушном зазоре и асимметрии магнитопровода прибора. При равномерном зазоре магнитной системы прибора его дополнительная погрешность  $\delta_{мн} = \frac{\Delta\alpha_{пр \sim}}{\Delta\alpha_{пр. н}}$  в средней части шкалы равна нулю, а в начальной и конечной частях — наибольшая. Опытные данные показали следующее.

Величина дополнительного электромагнитного момента для частот до 1500 гц (приборы типа М-24 и М-94) практически не зависит от частоты и в дальнейшем из-за поверхностного эффекта уменьшается. Величина электромагнитного момента пропорциональна квадрату эффективного значения переменной составляющей тока. Кривые, построенные на основании опыта и вычисленные по (4), приведены на рис. 2, 3, 4.

Для уменьшения погрешностей  $\delta_{п(k)}$  и  $\delta_{мн}$  регистрирующий прибор МЭС можно шунтировать достаточной по величине емкостью. Однако при этом может возникнуть дополнительная погрешность  $\delta_{\epsilon}$ , что объясняется различными постоянными заряда  $\tau_1$  и разряда  $\tau_2$  шунтирующей емкости при питании прибора посредством электронных переключающих реле. Эта же погрешность возникает из-за конечной величины индуктивности рамки прибора и паразитных емкостей переключающих устройств. Величину указанной погрешности можно определить:

$$\delta_{\epsilon} = \epsilon_1 \left[ e^{-\frac{1}{\tau_2}} + e^{-\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)} - e^{-\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2}\right)} - e^{-\frac{1}{\tau_2}} \right] - \epsilon_1 \left( 1 - e^{-\frac{1}{\tau_1}} \right), \quad (5)$$

где

$$\varepsilon_1 = \frac{\tau_1}{\theta}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\tau_2}{\theta}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\tau_3}{T}.$$

На рис. 5 построены кривые, вычисленные по (5). Выше было установлено, что при измерении малых углов действующее значение тока прибора превышает номинальное в несколько раз. В результате может возникнуть термическая перегрузка прибора, которая приведет к дополнительной погрешности и даже к выходу прибора из строя. В рассматриваемых условиях измерений тепловая перегрузка неизбежна, в силу чего представляет интерес установить, какую величину термической перегрузки способны выдерживать приборы МЭС и как эта перегрузка влияет на их погрешность. Исследования показали, что перегрузочная способность приборов МЭС зависит от номинальной потребляемой мощности и от условий охлаждения, т. е. от поверхности рамки, величины воздушного зазора, массы постоянного магнита и сердечника, материала и габарита корпуса. Опытным установлено, что решающее влияние на перегрузочную способность оказывает поверхность рамки  $S_p$ , и при перегрузках, соответствующих перегреву прибора на  $60-70^\circ\text{C}$ , удельная мощность рамки не должна превышать в среднем  $0,2 \text{ ватт/см}^2$ . Исходя из этого, величину предельно допустимого тока прибора можно определить так:

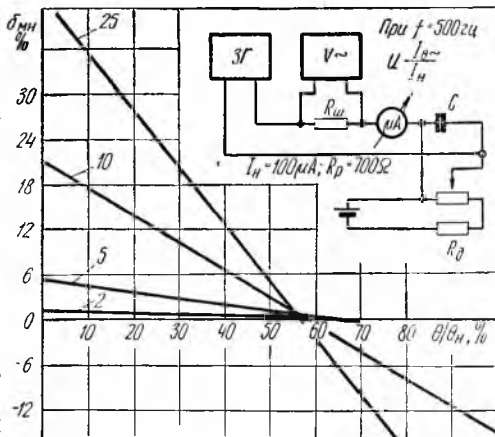


Рис. 2.

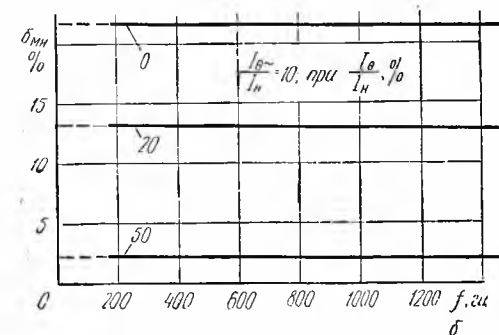


Рис. 3.

$$I = (350 \div 450) \sqrt{\frac{S_p, \text{ см}^2}{R_{пр}, \text{ ом}}} \text{ мА.} \quad (6)$$

Коэффициент 350 следует применять для приборов нормальных размеров, 450 — для малогабаритных.

Номинальная мощность чувствительных приборов МЭС — порядка микроватт, а допустимая по условию перегрева —  $1 \div 3 \text{ вт}$ . Из сопоставления этих цифр видно, что указанные

приборы обладают необычайно большой перегрузочной способностью, растущей по мере увеличения чувствительности. Кривые роста температуры при различной степени перегрузки представлены на рис. 6. Приборы МЭС благодаря своим интегрирующим свойствам измеряют среднее значение углов на протяжении интервала времени

$$\theta_{ср} = \frac{S_{пр}}{NT} \left[ \int_0^{\theta + \Delta\theta_1} I_\theta dt + \int_{2\pi}^{\theta + \Delta\theta_2} I_\theta dt + \dots + \int_{2\pi N}^{\theta + \Delta\theta_k} I_\theta dt \right] = K_\theta \left[ \theta + \frac{\sum_{k=1}^N \Delta\theta_k}{N} \right], \quad (7)$$

где  $N$  — число периодов анодного напряжения УВП, на протяжении которых еще проявляются интегрирующие свойства прибора.

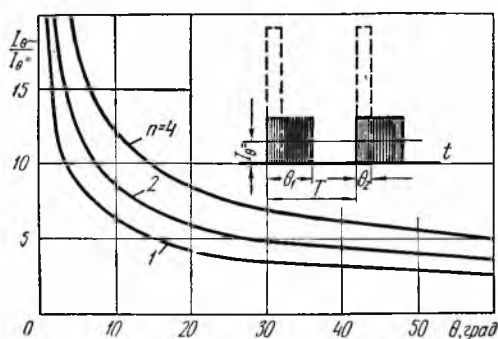


Рис. 4.

Интегрирующее свойство прибора особенно ценно при измерениях углов в УВП, если его анодное напряжение постоянно колеблется из-за периодического включения и отключения других нагрузок в питающей сети. При снятии регулировочных характеристик УВП в этих условиях будет соблюдена известная зависимость между средним значением выпрямленного напряжения и углами  $\alpha$  и  $\gamma$ , измеренными с помощью приборов.

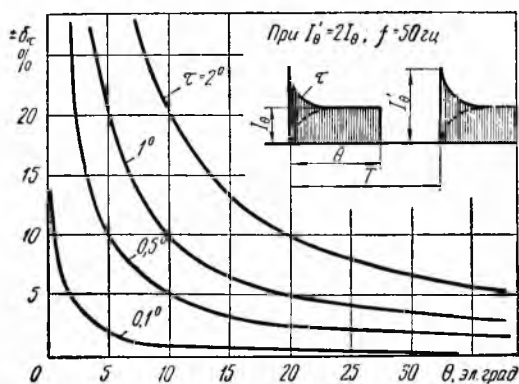


Рис. 5.

Так, среднее выпрямленное напряжение одной фазы  $m_2$  — фазного УВП, измеренное вольтметром МЭС при различных мгновенных значениях углов  $\alpha$  и  $\gamma$ , из-за колебаний сети равно

$$U'_{da} = \frac{U_{2m} \sin \frac{\pi}{m_2}}{2\pi} \left[ \cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma) - \frac{\sum_{k=1}^N \sin \Delta \alpha_k}{N} \sin \alpha - \sin (\alpha + \gamma) \frac{\sum_{k=1}^N \sin (\Delta \alpha_k + \Delta \gamma_k)}{N} \right], \quad (8)$$

где  $\Delta\alpha_k$  и  $\Delta\gamma_k$  — отклонения в мгновенных значениях углов. Определяя это же напряжение при подстановке углов, измеренных прибором, согласно (7) получим

$$U'_{da} = \frac{U_{2m} \sin \frac{\pi}{m_2}}{2\pi} \left[ \cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma) - \sin \alpha \sin \frac{\sum_{k=1}^N \Delta\alpha_k}{N} - \sin (\alpha + \gamma) \sin \frac{\sum_{k=1}^N (\Delta\alpha_k + \Delta\gamma_k)}{N} \right]. \quad (9)$$

Из сопоставления выражений (8) и (9) видно, что они отличаются вторыми и третьими членами, в которые входят суммарные погрешности. При суммарных погрешностях не более  $\pm 14$  эл. град. с точностью до 1% можно записать

$$\begin{aligned} \sin \frac{\sum_{k=1}^N \Delta\alpha_k}{N} &= \frac{\sum_{k=1}^N \sin \Delta\alpha_k}{N}; \\ \sin \frac{\sum_{k=1}^N (\Delta\alpha_k + \Delta\gamma_k)}{N} &= \\ &= \frac{\sum_{k=1}^N \sin (\Delta\alpha_k + \Delta\gamma_k)}{N}. \end{aligned}$$

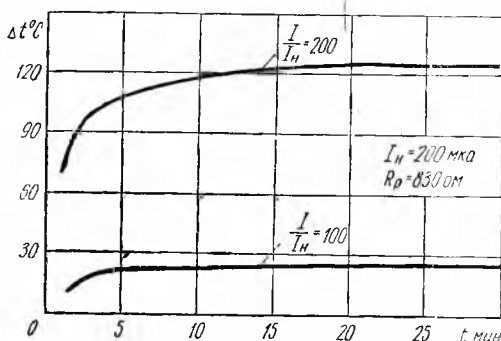


Рис. 6.

Таким образом, средние значения выпрямленного напряжения фазы, определенные прямым и косвенным методами, совпадают, чего не могло произойти при измерении мгновенных значений углов.

При одинаковых фазных напряжениях УВП суммарное среднее значение выпрямленного напряжения равно

$$U_{da} = m_2 n_1 U'_{da}$$

при асимметрии анодных напряжений преобразователя

$$U_{da} = K_{m_2} n_1 [\cos \alpha_{cp} + \cos (\alpha_{cp} + \gamma_{cp})] \sum_{k=1}^{m_2} U_{2(k)},$$

где

$$K_{m_2} = \sqrt{2} \frac{m_2}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m_2}; \quad \alpha_{cp} = \frac{\sum_{k=1}^{m_2} \alpha_{cp(k)}}{m_2}; \quad \gamma_{cp} = \frac{\sum_{k=1}^{m_2} \gamma_{cp(k)}}{m_2};$$

$\alpha_{cp(k)}$ ;  $\gamma_{cp(k)}$  — среднее значение углов фазы, измеренное приборами «α» и «γ»;

$n_1$  — тактность преобразователя.

Часто суммарная погрешность стрелочных регистрирующих приборов МЭС является доминирующей по сравнению с погрешностью метода измерения, и поэтому применение регистрирующих приборов с цифровым отсчетом в ряде случаев можно считать оправданным благодаря их преимуществам, к которым можно отнести высокую точность измерений; отсутствие субъективной погрешности отсчета; простоту и удобство реги-

страции результатов измерения. В приборах с ЦО устраняются ограничения, налагаемые конечными размерами шкал в обычных стрелочных приборах. Так, для определения размеров отсчетного устройства прибора можно воспользоваться выражением

$$l_T = l_{\text{ц}} N_1 = l_{\text{ц}} \frac{\log_a \frac{100}{\delta}}{\log_a a}, \quad (10)$$

где  $l_{\text{ц}}$  — ширина цифры;

$N_1$  — количество разрядов;

$\delta$  — относительная приведенная погрешность;

$a$  — основание в системе счисления.

Сравнивая (10) с выражением для определения линейных размеров шкалы стрелочного прибора

$$l_{\text{ш}} = 100 \frac{l_{\text{зр}}}{\delta},$$

где  $l_{\text{зр}}$  — разрешающая способность зрения ( $\sim 0,1$  мм), видим, что с повышением точности измерений выигрыш в линейных размерах на стороне приборов с ЦО. Измерение интервалов времени электронными способами описано в [4, 5] и в основном производится тремя методами: аналоговым, счетным и методом совпадений.

Для рассматриваемого случая наиболее приемлем счетный метод, при котором интервал времени обычно ограничивается двумя импульсами: старт-импульсом в начале отсчета и стоп-импульсом в конце, что характерно для существующих приборов «а», «γ» и «λ». Старт-импульс открывает электронный ключ, пропускающий квантовые импульсы к счетчику, а стоп-импульс через время  $\theta$  его закрывает. При квантовании временного промежутка возникает погрешность от дискретности, величина которой зависит от временного сдвига между старт- и стоп-импульсами и квантуемыми импульсами. Среднеквадратичная погрешность при периодическом генераторе квантовых импульсов

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{T_{\text{к}}} \int_0^{T_{\text{к}}} \left(1 - \frac{\Delta\theta_{\text{к}}}{T_{\text{к}}}\right) \Delta\theta_{\text{к}}^2 d\Delta\theta_{\text{к}}} = \frac{T_{\text{к}}}{\sqrt{6}}, \quad (11)$$

а при генераторе ударного возбуждения

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{к}}} \int_0^{T_{\text{к}}} \Delta\theta_2^2 d\Delta\theta_2} = \frac{T_{\text{к}}}{\sqrt{3}}, \quad (12)$$

где  $\Delta\theta_{\text{к}} = \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2$  — погрешность в показании счетчика, вызванная сдвигом между старт-импульсом и первым квантуемым импульсом  $\Delta\theta_1$  и стоп-импульсом и последним квантуемым импульсом  $\Delta\theta_2$  в случае пренебрежения погрешностью, вносимой ключом;  $T_{\text{к}}$  — период повторения квантовых импульсов. Изменение частоты квантовых импульсов и частоты анодного напряжения УВП приводит к относительной погрешности в измерении углов

$$\delta_{\theta} = \frac{(N_1 \pm 1)(1 + \delta_{fc})}{N_1(1 + \delta_{fk})} - 1 \quad (13)$$

или абсолютной погрешности

$$\Delta\theta = 360 N_1 \frac{f_c}{f_k} \left[ \frac{1 + \delta_{fc}}{1 + \delta_{fk}} \left( 1 \pm \frac{1}{N_1} \right) - 1 \right], \quad (14)$$

где  $\delta_{fc}$  и  $\delta_{fk}$  — относительное отклонение частоты сети от стандартной 50 гц и относительная погрешность генератора квантующих импульсов.

## ВЫВОДЫ

1. Стрелочные регистрирующие приборы МЭС вносят существенные дополнительные погрешности  $\delta_{\Pi} + \delta_{\tau} + \delta_{\text{мн}} + \delta_{i*}$ , которые при неправильном подборе прибора и схемы переключающего устройства могут значительно превышать погрешности метода измерения.

2. Стрелочные регистрирующие приборы МЭС измеряют средние значения углов, что дает возможность производить измерения при отклонениях их от своих средних значений, а это важно для косвенных измерений.

3. Показания стрелочных регистрирующих приборов МЭС не зависят от частоты анодного напряжения УВП.

4. Показания приборов с ЦО зависят от частоты анодного напряжения УВП.

5. Применение приборов с ЦО целесообразно при контроле за работой инверторов, где мгновенное значение угла опережения  $\beta$  не должно быть меньше определенной величины  $\beta \geq \gamma + \delta_d$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. О. П. Котляров, О. А. Маевский. Прибор для измерения углов управления, проводимости и коммутации клапанов преобразовательных установок. «Известия вузов, Приборостроение», т. VIII, § 5, 1965.
2. А. Л. Гофлин. Измерение углов зажигания и погасания управляемых клапанов. Изв. АН СССР, ОТН, № 4, 1948.
3. Р. Р. Харченко. Динамика магнитоэлектрических приборов в режиме сильного успокоения. «Электричество», 1955, № 11.
4. В. Зима, Б. Кубин. Электрические методы измерения малых интервалов времени (перевод с чешского). Изд-во «Энергия», 1965.
5. Ламповые схемы для измерения времени. Перевод с английского под ред. А. Я. Брайтбарта, ч. 1 и 2. Изд-во «Советское радио», 1951.