

С. Т. ВАСЬКОВ
(Новосибирск)

О ПОГРЕШНОСТЯХ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УСТРОЙСТВАМИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Дана методика вычисления погрешностей измерения периодических напряжений по действующему значению для двух типов цифровых приборов с устройствами формирования опорного напряжения (ФОН). Аналитически получены зависимости погрешностей от фазовых и амплитудных искажений в канале ФОН для напряжений, форма которых может быть представлена кривой с центральной симметрией. Приведены графические зависимости погрешностей измерения от частоты для реальных схем ФОН.

В публикуемой в этом номере журнала статье «Цифровой милливольтметр переменного тока» рассматривается принцип действия цифрового прибора переменного тока с использованием устройства формирования опорного напряжения (ФОН).

Прибор основан на компенсационном принципе измерения. В качестве опорного напряжения, из которого формируется компенсационное u_k , используется стабилизированное и калиброванное по действующему значению измеряемое напряжение. При этом форма опорного напряжения сохраняется возможно более близкой к форме измеряемого u_x . Разность компенсационного и измеряемого напряжений $u_k - u_x$ подается на вход устройства сравнения, функция которого заключается в установлении момента равенства действующих значений указанных напряжений. Поскольку из-за искажений в канале ФОН формы напряжений совпадают неполностью, разность $u_k - u_x$ не может быть сведена к нулю при любой величине u_k .

Для такого рода цифровых измерительных приборов в [1] показана принципиальная возможность использования в качестве устройства сравнения простых умножающих схем, в частности устройств типа синхронных детекторов. При этом в силу неполного совпадения форм измеряемого и компенсационного напряжений использование указанных устройств приводит к появлению методических погрешностей при измерении действующих значений.

Оценим величины этих погрешностей в зависимости от различного вида искажений, которым подвергается сигнал при прохождении через канал формирования опорного напряжения.

Предварительно необходимо сделать следующее замечание. При оценке искажений в канале ФОН, по-видимому, наилучшим вариантом анализа было бы установление связи между допустимой погрешностью

измерения и соответствующей ей амплитудно-фазовой характеристикой устройства ФОН при заданном принципе действия устройства сравнения. Однако определение такой однозначной связи едва ли возможно, поскольку численная величина погрешности не содержит информации о временной функции, описывающей опорное напряжение. Поэтому приходится принять следующую методику определения погрешностей. На основе известного принципа действия устройства сравнения устанавливается зависимость погрешности от отдельных видов искажений (амплитудно-, фазочастотных и нелинейных). Затем, зная амплитудно-фазовые и амплитудные характеристики реальных устройств ФОН, можно определить количественное значение погрешности в зависимости от вида измеряемых напряжений.

Обозначим $u_x(t)$ и $u_k(t)$ соответственно измеряемое и компенсационное напряжения. На вход устройства сравнения подается $\alpha(t) = u_x(t) - u_k(t)$. Если устройство сравнения работает как синхронный детектор, то в момент равновесия схемы справедливо следующее равенство [1]:

$$\frac{1}{T} \left[\sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \int_{\psi_{k-1}}^{\psi_k} \alpha(t) dt \right] = 0. \quad (1)$$

Здесь T — период измеряемого напряжения;

ψ_k — моменты перехода напряжения u_k через 0.

Решая уравнение (1), можно найти соотношение действующих значений U_k и U_x , которое позволяет определить методическую погрешность измерения.

Основная трудность при решении (1) состоит в определении моментов времени ψ_k , которые принципиально могут быть найдены из уравнения

$$u_k = f(a_1, \dots, a_k, \dots, a_n; \varphi_1, \dots, \varphi_k, \dots, \varphi_n; t) = 0, \quad (2)$$

где $a_k = \frac{U_{mk}}{U_{m1}}$ — отношение амплитуд k -й и первой гармоник разложения в ряд Фурье напряжения u_k ;

φ_k — начальная фаза k -й гармоники.

Известно, что уравнение (2) может быть решено аналитически точно только в некоторых частных случаях, когда u_k представляет собой сумму первой и второй гармоник при любом φ_2 , сумму первой и третьей или первой и четвертой гармоник при φ_3 и φ_4 , равных 0 или 180° .

Попытаемся поэтому найти приближенное решение уравнения (2) для частных видов компенсационных напряжений u_k , определяемых спецификой рассматриваемого способа измерения.

Будем считать, что измеряемое напряжение равно

$$u_x(t) = U_{x1} \sum_{k=1}^n a_k \sin k \omega t, \quad (3)$$

т. е. измеряемое напряжение имеет форму кривой с центральной симметрией. Кроме того, рассмотрим такие кривые, которые имеют только два перехода через 0 в течение периода. Найдем выражение для погрешностей в случае только фазовых искажений в канале ФОН.

Тогда

$$u_x(t) = U_{k_1} \sum_{k=1}^n a_k \sin(k \omega t + \varphi_k). \quad (4)$$

Учтем, что фазовые сдвиги отдельных составляющих φ_k малы, так как устройство ФОН не должно вносить значительных искажений. Это позволяет для определения момента перехода напряжения u_x через ось ωt в области $\omega t=0$ записать следующее уравнение:

$$U_{k_1} \sum_{k=1}^n a_k (k \varphi_0 + \varphi_k) = 0, \quad (5)$$

где φ_0 — расстояние по оси ωt от начала координат до точки пересечения кривой напряжения u_x с этой осью в рад.

Аналогично можно выразить соотношения для нахождения расстояния от точки π до момента перехода функцией u_x через ось ωt :

$$U_{k_1} \sum_{k=1}^n a_k [(-1)^k (k \varphi_\pi + \varphi_k)] = 0. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) следуют выражения для искоемых пределов интегрирования в (1):

$$\varphi_0 = - \frac{\sum_{k=1}^n a_k \varphi_k}{\sum_{k=1}^n k a_k}; \quad \varphi_\pi = - \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k a_k \varphi_k}{\sum_{k=1}^n (-1)^k k a_k}. \quad (7)$$

Устройство сравнения выполняет операции, которые на основании (1) можно представить следующим образом:

$$\int_{\varphi_0}^{\pi + \varphi_\pi} (u_x - u_k) d(\omega t) - \int_{\pi + \varphi_\pi}^{2\pi + \varphi_0} (u_x - u_k) d(\omega t) = 0. \quad (8)$$

Используя выражения (3) и (4) для $u_x(t)$ и $u_k(t)$, получим зависимость погрешности измерения δ_φ от фазовых искажений

$$\delta_\varphi = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k} [\cos(k \varphi_0 + \varphi_k) + (-1)^{k+1} \cos(k \varphi_\pi + \varphi_k)]}{\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k} [\cos k \varphi_0 + (-1)^{k+1} \cos k \varphi_\pi]} \quad (9)$$

Если измеряемое напряжение чисто синусоидальное, то выражение для δ_φ приобретет очень простой вид:

$$\delta_\varphi \cong - \frac{\varphi^2}{2}.$$

Рассмотрим теперь влияние амплитудных искажений на точность измерения. При этом измеряемое напряжение по-прежнему запишем в виде (3), а компенсационное напряжение как

$$u_k(t) = U_{k_1} \sum_{k=1}^n b_k \sin k \omega t. \quad (10)$$

Точки перехода напряжения u_k через ось ωt будут соответствовать $\omega t=0$ и $\omega t=\pi$, так как фазовые искажения отсутствуют, а исходная кривая обладает центральной симметрией. Результаты вычислений по формуле (1) дают следующее отношение действующих значений:

$$\frac{U_x}{U_k} = \frac{U_{x_1}}{U_{k_1}} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n a_k^2}{\sum_{k=1}^n b_k^2}}. \quad (11)$$

Используя связь между U_x и U_k , найдем выражение для погрешности δ_a , определяемой амплитудными искажениями:

$$\delta_a = 1 - \frac{\sum_{m=1}^n \frac{b_m}{m}}{\sum_{m=1}^n \frac{a_m}{m}} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n a_k^2}{\sum_{k=1}^n b_k^2}}, \quad (12)$$

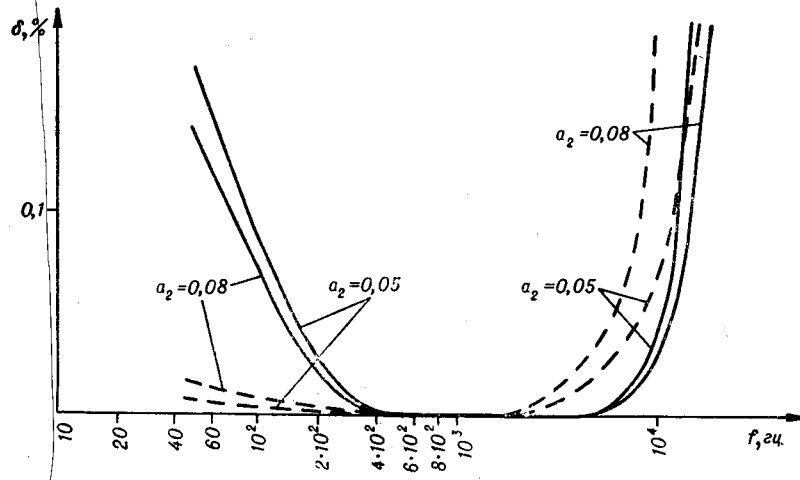
где m — целые нечетные числа 1, 3, 5, . . .

Полученные выражения (9) и (12) позволяют, как говорилось выше, найти численные значения погрешностей для заданных амплитудно-фазовых характеристик каналов ФОН.

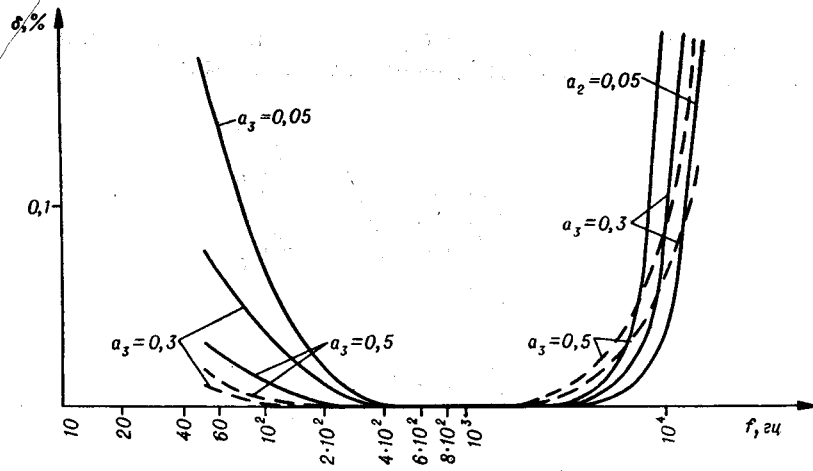
На рис. 1, 2, 3 приведены графические зависимости погрешностей измерения от частоты первой гармонической составляющей измеряемого напряжения для одного из реальных устройств ФОН, использованного в цифровом приборе. Усилитель упомянутого устройства имел равномерную амплитудную и фазовую характеристики в диапазоне 50 гц — 20 кгц. Сдвиг по фазе на частотах 50 гц и 20 кгц соответствовал +4,5 и —4°. Отклонение коэффициента усиления на указанных частотах от его значения на средних частотах составляло 1—2%.

На рис. 1 и 2 сплошными линиями изображены зависимости $\delta_\varphi = \varphi(f)$, подсчитанные по выражению (9) и характеризующие влияние фазовых искажений на погрешность измерения. Рис. 1 соответствует случаю, когда измеряемое напряжение состоит из первой и второй гармоник, рис. 2 соответствует случаю, когда измеряемое напряжение состоит из первой и третьей гармоник.

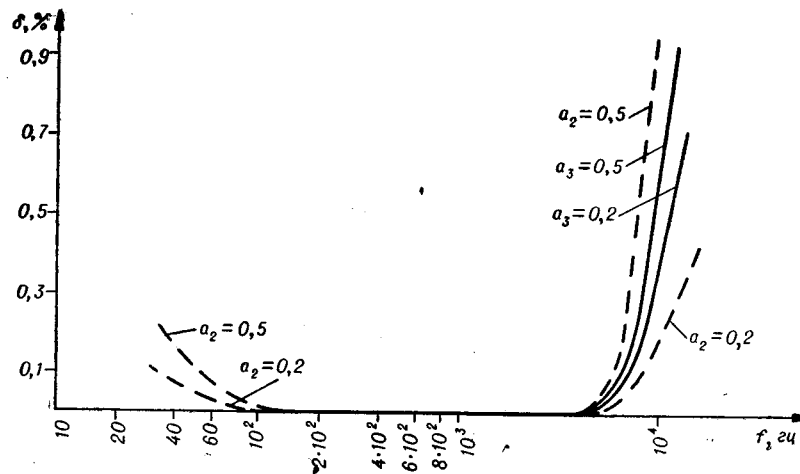
На рис. 3 приведены зависимости $\delta_a = \varphi(f)$, подсчитанные по выражению (12) и характеризующие влияние амплитудных искажений на погрешность измерения. При этом сплошные линии соответствуют случаю, когда измеряемое напряжение состоит из первой и третьей гармоник, пунктирные линии — измеряемое напряжение состоит из первой и второй гармоник.



Puc. 1.



Puc. 2.



Puc. 3.

При оценке влияния нелинейных искажений в канале ФОН на погрешность измерения мало знать коэффициент нелинейных искажений, определяемый обычно для усилителей низкой частоты, так как в зависимости от формы измеряемого напряжения погрешность может быть разной. Полные сведения о нелинейных искажениях могут быть получены только на основе знания амплитудной характеристики, которую имеет усилитель ФОН. Для большинства усилительных элементов (лампа, транзистор) функция $u_{\text{вых}} = f(u_{\text{вх}})$ может быть с высокой степенью точности аппроксимирована полиномом второй степени:

$$u_{\text{вых}} = \gamma_1 u_{\text{вх}} + \gamma_2 u_{\text{вх}}^2. \quad (13)$$

Если выходной каскад устройства выполнен двухтактным, то $u_{\text{вых}} = f(u_{\text{вх}})$ можно выразить в виде полинома третьей степени:

$$u_{\text{вых}} = \gamma_1 u_{\text{вх}} + \gamma_3 u_{\text{вх}}^3. \quad (14)$$

Подставляя в приведенные равенства заданное выражение входного напряжения, можно определить компенсационное напряжение $u_{\text{к}}$ и точки перехода этого напряжения через ось ωt , необходимые для нахождения пределов интегрирования в уравнении (1).

Как показывает анализ, в реальных схемах ФОН, в которых может быть получен коэффициент нелинейных искажений порядка 0,5% и меньше, влияние нелинейных искажений на погрешность измерения напряжения по действующему значению рассматриваемым прибором весьма мало. Так, при синусоидальном входном напряжении и амплитудной характеристике, выражаемой равенством (13), погрешность равна

$$\delta = \frac{U_x - U_{\text{к}}}{U_x} \cong \frac{\gamma_2^2}{8},$$

где γ_2 — коэффициент при квадратичном члене аппроксимации при условии, что $\gamma_1 = 1$.

Если $\gamma_2 = 0,005$, то $\delta = 0,0003\%$.

Таким образом, наибольшие погрешности в реальных схемах вызываются фазовыми искажениями, в несколько меньшей степени — амплитудными и в еще меньшей степени — нелинейными.

Устройство ФОН может быть использовано в качестве калибратора действующих значений для цифрового измерительного прибора, на входе которого включен преобразователь переменного напряжения в постоянное по среднему значению [2].

При этом измеряемое напряжение предварительно подается на вход ФОН. Точно известное по действующему значению выходное напряжение (назовем это напряжение опорным $U_{\text{оп}}$) измеряется по среднему значению цифровым измерительным прибором. Показание прибора с помощью плавно или дискретно регулируемого делителя на входе устанавливается точно равным величине действующего значения $U_{\text{оп}}$. Если теперь, не меняя положения делителя, подать на вход прибора измеряемое напряжение, то при условии нелинейности шкалы отсчет будет получен по действующему значению. Делитель на входе прибора может быть проградуирован в величинах коэффициента формы кривой периодического напряжения.

Поскольку применение устройств ФОН в качестве калибраторов возможно не только в сочетании с цифровыми, но и с другими прибора-

ми среднего значения, рассмотрим погрешность измерения, возникающую в этом случае из-за искажений в канале ФОН. В общем виде выражение для погрешности может быть записано следующим образом:

$$\delta = 1 - \frac{U_{\text{ср оп}}}{U_{\text{ср x}}}, \quad (15)$$

где $U_{\text{ср оп}}$ и $U_{\text{ср x}}$ — средние значения выпрямленных напряжений $u_{\text{оп}}$ и u_x при равенстве их действующих значений.

Определение средних значений выпрямленных напряжений встречает такие же затруднения, о которых говорилось выше. Будем поэтому предполагать, что измеряемое напряжение u_x задано по-прежнему в виде (1), а фазовые искажения в канале ФОН малы. Тогда точки перехода опорного напряжения $u_{\text{оп}}$ через ось ωt можно определить в виде

$$\varphi_0 = - \frac{\sum_{k=1}^n a_k \varphi_k}{\sum_{k=2}^n k a_k}; \quad \varphi_\pi = - \frac{\sum_{k=1}^n (-1)^k a_k \varphi_k}{\sum_{k=2}^n (-1)^k k a_k}. \quad (16)$$

Подстановка найденных пределов интегрирования в выражение для среднего значения выпрямленного опорного напряжения и последующее преобразование равенства (15) приводят к такому результату:

$$\delta_\varphi = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k} [\cos(k\varphi_0 + \varphi_k) + (-1)^{k+1} \cos(k\varphi_\pi + \varphi_k)]}{2 \sum_{m=1}^n \frac{a_m}{m}}, \quad (17)$$

где δ_φ — погрешность измерения, обусловленная фазовыми искажениями; m — ряд целых нечетных чисел 1, 3, 5, . . .

Погрешность, обусловленная амплитудными искажениями в канале ФОН, выражается точно так же, как в равенстве (12).

На рис. 1 и 2 пунктирными линиями изображены зависимости, характеризующие связь погрешности измерения переменного напряжения по действующему значению с фазовыми искажениями в канале ФОН для случая использования устройств ФОН в качестве калибраторов к приборам среднего значения. Подсчет значений δ сделан по выражению (17). Фазовые сдвиги взяты для реальной схемы, параметры амплитудно-фазовой характеристики которой приведены выше.

Рис. 1 соответствует случаю, когда измеряемое напряжение состоит из первой и второй гармоник при разных уровнях второй гармоники, а рис. 2 — случаю, когда измеряемое напряжение состоит из первой и третьей гармоник при разных уровнях третьей гармоники.

Графические зависимости, характеризующие влияние амплитудных искажений на погрешность измерения, совпадают с приведенными на рис. 3.

В заключение следует отметить, что полученные результаты пригодны для оценки погрешностей измерения напряжений не всех возмож-

ных форм. Графические зависимости также не дают исчерпывающих ответов о точности измерения напряжений по действующему значению рассмотренными приборами. Однако методика расчета и графические зависимости позволяют оценить порядок методических погрешностей и дать рекомендации по построению устройств ФОН в зависимости от допустимой погрешности и частотного диапазона измеряемых напряжений.

В частности, в данной работе показано, что, используя устройства формирования опорного напряжения, параметры которых приведены, и простые устройства сравнения, выполненные в виде синхронных детекторов, можно создавать цифровые приборы для измерения переменных напряжений по действующему значению с методической погрешностью не более 0,1—0,2% в звуковом диапазоне частот. При этом указанный вывод сделан для довольно широкого класса практически встречающихся форм напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Т. Васьков. Об одном способе измерения переменных напряжений по действующему значению.— Изв. Сиб. отд. АН СССР, серия техн. наук, 1963, вып. 1, № 2.
2. Л. И. Волгин. Способ линейного преобразования переменного напряжения произвольной формы кривой в постоянное напряжение. Авторское свидетельство № 162222. Бюллетень изобретений, 1964, № 9.

*Поступила в редакцию
24 ноября 1965 г.*