

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.312

М. И. ЛЕВИН, Ю. И. СЕМКО
(Москва)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ

Излагаются общие свойства метода определения параметров периодических напряжений и токов путем измерения мгновенных значений. Метод позволяет производить измерение параметров кривой в течение одного периода.

Дается анализ погрешностей определения параметров периодических сигналов; приводятся возможные блок-схемы измерительных устройств, использующих данный метод.

При исследовании периодических токов и напряжений обычно измеряются их определенные параметры — действующее, амплитудное, или среднее значения, сдвиг фаз по отношению к опорному напряжению, параметры гармоник и т. п. Как правило, эти параметры измеряются с помощью приборов, основанных на усреднении некоторых величин без непосредственного измерения мгновенных значений переменных напряжений и токов, функциями которых являются эти величины.

Возможности современной техники позволяют производить непосредственные измерения мгновенных значений переменных токов и напряжений с последующим вычислением всех интересующих параметров исследуемой кривой. Так, например, при времени измерения порядка 1 мсек может быть получено 20 мгновенных значений напряжения, частота которого 50 гц. Нужно учесть, что указанное быстродействие — далеко не предел для современных средств измерения и кодирования аналоговых величин, которые в ряде случаев обладают наносекундной разрешающей способностью [1].

Метод измерения мгновенных значений может существенно облегчить решение ряда важных измерительных проблем, в частности, в области инфранизкочастотной техники, в которой необходимость измерения периодических напряжений и токов на основе усреднения определенных величин ведет к созданию довольно громоздких устройств, а сам процесс измерения отнимает много времени, так как для получения усредненных значений следует производить измерения в течение ряда периодов.

В последние годы появились отечественные и зарубежные исследования, свидетельствующие о том, что к методу измерения мгновенных значений напряжений и токов пробуждается определенный интерес [1—6]. Объясняется это рядом положительных свойств метода, возможностями современной техники и заманчивыми перспективами, кото-

рые открывает метод при решении весьма важного круга проблем измерительной техники, техники автоматического регулирования и т. п. Упомянутые работы представляют большой интерес, но они затрагивают, по существу, лишь техническую сторону вопроса, так как посвящаются в основном описанию разработанных авторами схем, предназначенных для измерения мгновенных значений периодических напряжений и токов, без анализа общих свойств метода.

В настоящее время назрела необходимость проанализировать некоторые общие свойства и возможности метода измерения мгновенных значений периодических напряжений и токов (метода внутриволновых измерений) и условия, необходимые для обеспечения достаточной точности определения параметров исследуемых кривых.

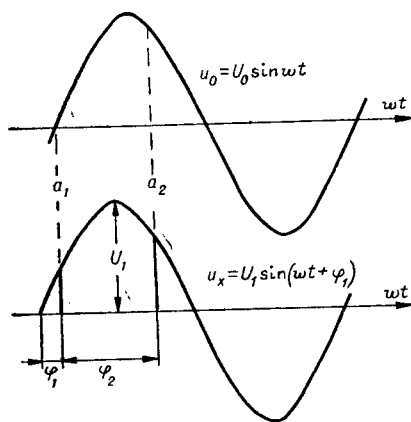


Рис. 1.

В исследуемом периодическом напряжении (токе). Другими словами, на основе измерения мгновенных значений периодического сигнала можно получить спектр амплитуд U_k и спектр фаз φ_k периодической функции

$$u(t) = \sum_{k=1}^n U_k \sin(k\omega t + \varphi_k).$$

В простейшем случае измеряемое напряжение (ток) $u(t) = u_x = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ определяется двумя параметрами U_1 и φ_1 . При этом период $T = \frac{2\pi}{\omega}$ считается известным. На рис. 1 изображено опорное напряжение $u_0 = U_0 \sin \omega t$ и сдвинутое относительно него на угол φ_1 напряжение u_x . Если измерить мгновенное значение a_1 напряжения u_x в момент $u_0 = 0$, а мгновенное значение a_2 со сдвигом на известный угол φ_2 — относительно a_1 , то можно легко рассчитать параметры u_x :

$$U_1 = \frac{1}{\sin \varphi_2} \sqrt{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cos \varphi_2}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{a_1 \sin \varphi_2}{a_2 - a_1 \cos \varphi_2}. \quad (2)$$

Возникает вопрос о выборе оптимальных значений угла φ_2 , обеспечивающих наименьшие погрешности определения U_1 и φ_1 при возможных погрешностях измерений a_1 и a_2 .

Относительная погрешность определения U_1 : $\gamma_U = \frac{U_1 - U_1}{U_1}$;

$$\gamma_U = \sqrt{1 - 2\gamma_{a_1} \frac{\cos(\varphi_1 + \varphi_2)}{\sin \varphi_2} + 2\gamma_{a_2} \frac{\cos \varphi_1}{\sin \varphi_2} + \frac{\gamma_{a_1}^2}{\sin^2 \varphi_2} + \frac{\gamma_{a_2}^2}{\sin^2 \varphi_2} - 2\gamma_{a_1} \gamma_{a_2} \frac{\cos \varphi_2}{\sin^2 \varphi_2}} - 1. \quad (3)$$

Абсолютная погрешность определения фазы ($\Delta\varphi = \varphi_1' - \varphi_1$):

$$\Delta\varphi = \text{arctg} \frac{\gamma_{a_1} \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \gamma_{a_2} \sin \varphi_1}{\sin \varphi_2 - \gamma_{a_1} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \gamma_{a_2} \cos \varphi_1}, \quad (4)$$

где $\gamma_{a_1} = \frac{\Delta a_1}{U_1}$, $\gamma_{a_2} = \frac{\Delta a_2}{U_1}$ — относительные погрешности измерений a_1 и a_2 .

Анализ выражений (1) — (4) позволяет сделать следующие выводы (рис. 2). При φ_2 , равном 0 или π , формулы (1) и (2) приводят к неопределенности вида $\frac{0}{0}$, а погрешности принимают значения: $\gamma_{U \max} \rightarrow \infty$; $\Delta\varphi_{\max} = \pi - \varphi_1$.

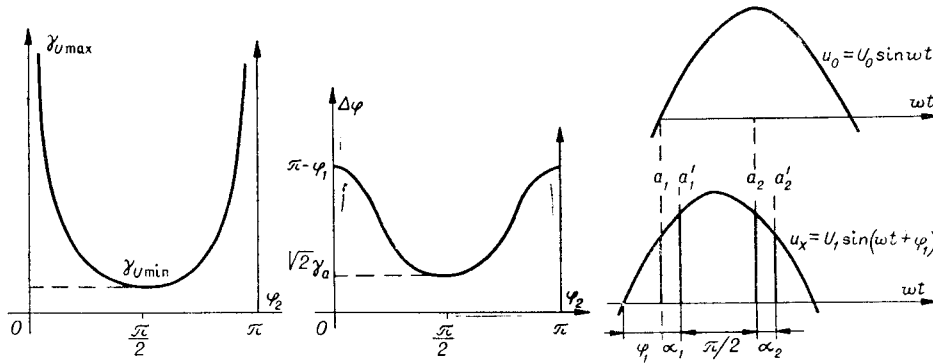


Рис. 2.

Рис. 3.

Этот результат свидетельствует о том, что при $\varphi_2 = 0, \pi, 2\pi, \dots$ через точки отсчета можно провести бесконечное число функций вида $u_x = U \sin(\omega t + \varphi)$.

Наименьшие значения γ_U и $\Delta\varphi$ принимают при $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$. В этом случае $\gamma_U \approx \pm \sqrt{2} \gamma_a$, $\Delta\varphi \approx \pm \sqrt{2} \gamma_a \text{ рад}$; при $|\gamma_a| = |\gamma_{a_1}| = |\gamma_{a_2}|$ $\varphi_1 = \frac{\pi}{4}$.

Таким образом, для обеспечения минимальных погрешностей γ_U и $\Delta\varphi$ интервал времени Δt между двумя отсчетами должен составлять одну четверть периода функции u_x . При этом выражения (1) и (2) принимают наиболее простой вид:

$$U = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}; \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \text{arctg} \frac{a_1}{a_2}. \quad (6)$$

Величины $a_1 = U_1 \sin \varphi_1$ и $a_2 = U_1 \cos \varphi_1$ в данном случае являются квадратурной и фазной составляющими напряжения u_x .

Полученный вывод может быть распространен и на периодическую функцию $u(t)$, содержащую гармоники: отсчеты мгновенных значений должны производиться через четверть периода высшей гармоники. Параметры U_1, \dots, U_n и $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ функции $u(t)$ определяются по измеренным значениям a_1, \dots, a_{2n} с помощью аналитических выражений, аналогичных (5) и (6).

В связи с конечным временем измерения составляющих a_1 и a_2 переменного напряжения (тока), определяемым предельной скоростью

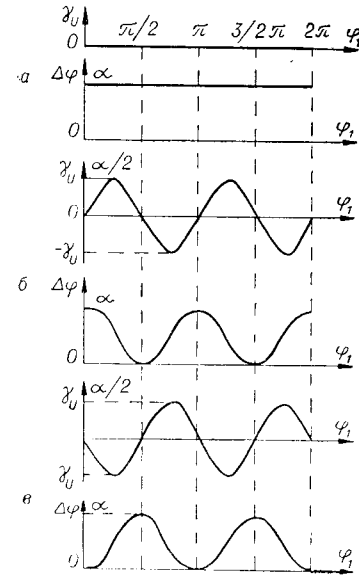


Рис. 4.

работы измерительного устройства, возникает погрешность из-за неопределенности момента отсчета значений a_1 и a_2 во времени. Действительно (рис. 3), при конечном времени работы измерительного устройства ($\frac{\alpha_1}{2\pi} T$ и $\frac{\alpha_2}{2\pi} T$) измерение может завершиться в любой точке указанных временных интервалов. Полученные в этом случае значения a'_1 и a'_2 при расчете по ним величин U_1 и φ_1 внесут погрешности, так как значения a'_1 и a'_2 из-за неопределенности момента измерения должны быть приписаны каким-либо мгновениям, например, соответствующим $u_0 = 0$ и $u_0 = u_{0 \max}$.

Возможны следующие крайние случаи.

1. $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Погрешности определения U_1 и φ_1 равны: $\gamma_U = 0$; $\Delta\varphi = \varphi'_1 - \varphi_1 = \alpha$ (рис. 4, а).

2. $\alpha_1 = \alpha$; $\alpha_2 = 0$. Погрешности определения U_1 и φ_1 равны: $\gamma_U \approx \frac{\alpha}{2} \sin 2\varphi_1$;

$\Delta\varphi = \arctg(\operatorname{tg} \varphi_1 + \alpha) - \varphi_1$ (см. рис. 4, б).

3. $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = \alpha$. Погрешности определения U_1 и φ_1 равны: $\gamma_U \approx -\frac{\alpha}{2} \sin 2\varphi_1$; $\Delta\varphi = \arctg \frac{\sin \varphi_1}{\cos(\varphi_1 + \alpha)} - \varphi_1$ (см. рис. 4, в).

Таким образом, максимальное значение относительной амплитудной погрешности равно

$$\gamma_{U \max} \approx \pm \frac{\alpha}{2}; \quad [\alpha] = \text{рад}, \quad (7)$$

а максимальное значение абсолютной фазовой погрешности —

$$\Delta\varphi_{\max} = \alpha. \quad (8)$$

По допустимым значениям этих погрешностей можно определить необходимое быстродействие измерительного устройства (максимально допустимое время измерения каждой составляющей a_1 и a_2).

Подставив в выражение $\Delta t = \frac{\alpha}{2\pi} T$ значения α , найденные из (7) и (8), получим формулы, связывающие погрешности $\gamma_{U \max}$, $\Delta\varphi_{\max}$, период измеряемого напряжения T и допустимое время Δt измерения отдельных составляющих a_1 и a_2 :

$$\Delta t = \frac{\gamma_{U \max}}{\pi} T; \quad (9)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi_{\max}}{2\pi} T. \quad (10)$$

В таблице даны расчетные значения допустимого времени измерения мгновенных значений a_1 и a_2 при частотах f_x , равных 50 и 0,5 гц, в зависимости от величины погрешностей $\gamma_{U \max}$ и $\Delta \varphi_{\max}$.

Из таблицы видно, что снижение частоты значительно облегчает требования к быстродействию измерительного устройства.

Применение метода внутривыскального измерения мгновенных значений позволяет создать ряд быстродействующих автоматических приборов переменного тока и прежде всего цифровых приборов переменного тока, использующих компенсационный принцип измерения.

На рис. 5, а представлена блок-схема устройства, предназначенного для определения фазной и квадратурной составляющих напряжения $u_x = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ относительно некоторого опорного напряжения $u_0 = U_0 \sin \omega t$ методом измерения мгновенных значений напряжения u_x в моменты времени t_1 и t_2 , соответствующие прохождению через нуль напряжений $u_0 = U_0 \sin \omega t$ и $u'_0 = U_0 \cos \omega t$ (см. рис. 5, б).

$\gamma_{u \max}, \%$	$\Delta \varphi_{\max}$	$f_x = 50 \text{ гц}$	$f_x = 0,5 \text{ гц}$
		$\Delta t, \text{ мксек}$	$\Delta t, \text{ мсек}$
0,1	0°07	6,4	0,64
0,5	0°34	32,0	3,20
1,0	1°09	64,0	6,40
2,0	2°18	128,0	12,80

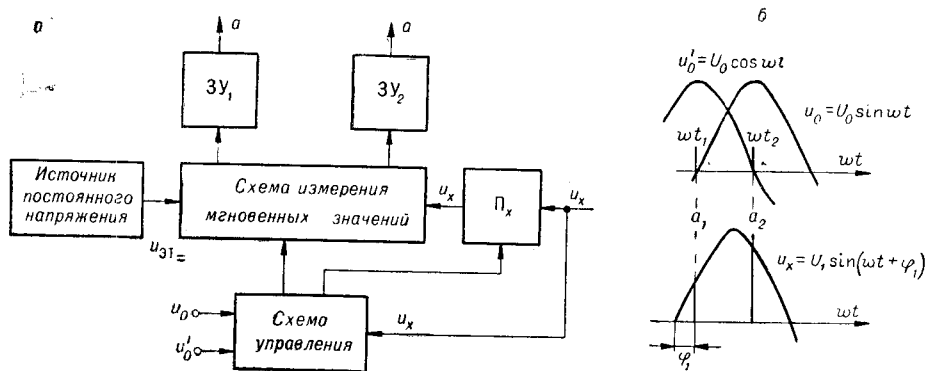


Рис. 5.

Напряжения u_x , u_0 и u'_0 (последнее может быть получено из u_0 с помощью фазовращающего устройства) поступают на схему управления, которая в зависимости от величины угла φ_1 производит необходимое изменение фазы напряжения u_x на 180° и посылает команды в моменты времени t_1 и t_2 в схему измерения мгновенных значений. Эта схема в указанные моменты времени производит тем или иным способом измерение мгновенных величин a_1 и a_2 и переносит эти значения (после измерения каждой из них) в запоминающие устройства $ЗУ_1$ и $ЗУ_2$.

Мгновенные значения a_1 и a_2 можно измерять различными способами, однако наиболее перспективным является применение быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (или цифровых вольтметров) напряжения постоянного тока, питание которых производится

от стабилизированных источников постоянного напряжения. Это позволяет измерять переменные напряжения и токи методом непосредственной компенсации постоянным напряжением с использованием в качестве эталона опорного стабилизированного напряжения постоянного тока.

При сложной форме кривой $u_x = \sum U_k \sin(k \omega t + \varphi_k)$ схема устройства должна производить измерения мгновенных значений a_1, \dots, a_n в соответствии с номером высшей гармоники. В этом случае данные измерений целесообразно направлять в вычислительное устройство, в котором производится расчет параметров $U_1, \varphi_1, \dots, U_n, \varphi_n$ напряжения u_x .

Путем обработки результатов измерений мгновенных величин могут быть получены и другие параметры, характеризующие исследуемое напряжение, в частности, действующее и среднее значения.

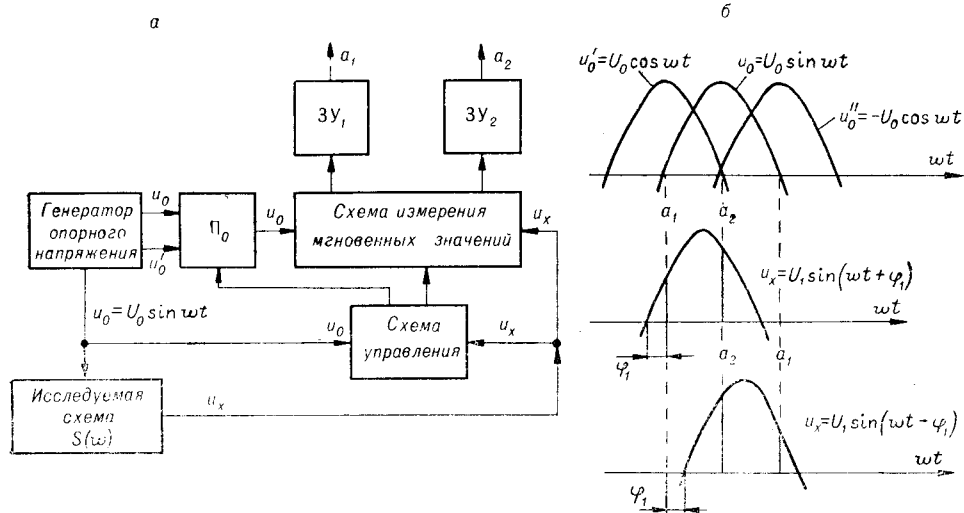


Рис. 6.

На основе блок-схемы рис. 5, а могут быть созданы быстродействующие автоматические цифровые потенциометры переменного тока, анализаторы гармоник и другие приборы.

Блок-схема, приведенная на рис. 6, а, во многом напоминает предыдущую схему. Однако важным отличием ее является питание измерительной части схемы от специального генератора опорного синусоидального напряжения. То же опорное напряжение $u_0 = U_0 \sin \omega t$ питает исследуемую схему, выходное напряжение которой u_x поступает на вход схемы измерения мгновенных значений и на схему управления. Последняя в зависимости от фазового сдвига u_x относительно u_0 с помощью переключателя Π_0 осуществляет питание измерительной схемы одним из опорных напряжений (см. рис. 6, б). Подобное усложнение схемы позволяет существенно снизить ошибки измерения составляющих a_1 и a_2 , так как их измерение производится в те мгновения, когда опорные напряжения $u_0, u'_0, u''_0 = -u_0$, питающие измерительную схему, достигают максимума и изменяются с наименьшей скоростью. Кроме того, создается возможность измерения напряжений u_x , амплитудные значения которых лежат в пределах $0 \leq U_1 \leq U_0$.

На основе блок-схемы рис. 6, а могут быть созданы быстродействующие автоматические цифровые мосты переменного тока. При этом исключается целый ряд трудностей при использовании метода внутри-

периодного измерения (кодирования) мгновенных значений, так как питание измерительной схемы и исследуемой схемы (элемента) может быть осуществлено хорошо отфильтрованным, чисто синусоидальным напряжением $u_0 = U_0 \sin \omega t$ от специального местного генератора, создающего также напряжение $u'_0 = U_0 \cos \omega t$. В случае линейности исследуемой схемы напряжение не будет содержать высших гармоник.

Сделав частоту генератора опорного напряжения регулируемой ($\omega = \text{var}$), можно снимать зависимости $U_1 = f(\omega)$ и $\varphi_1 = f(\omega)$ и по ним рассчитывать АЧХ и ФЧХ исследуемой схемы.

Необходимо заметить, что такие устройства (см. рис. 5, а и рис. 6, а), как генератор гармонических колебаний с частотой, регулируемой в широких пределах (до 10^{-4} гц) и с двумя сдвинутыми на 90° выходными напряжениями, фазосдвигающие устройства, быстродействующие аналого-цифровые преобразователи, стабилизаторы напряжения, электронные переключатели и т. п., в настоящее время достаточно хорошо отработаны и применение в указанных схемах не может вызвать принципиальных трудностей.

При сложном спектре u_x частоту измерения мгновенных значений нужно выбирать в соответствии с номером высшей гармоники. Это можно сделать благодаря введению ряда фазосдвигающих элементов. Величины a_1, \dots, a_{2n} целесообразно обрабатывать в вычислительном устройстве, в котором рассчитываются параметры $U_1, \varphi_1, \dots, U_n, \varphi_n$ напряжения u_x или же сразу параметры исследуемой цепи.

Спектральный состав функции (количество высших гармоник n и вытекающее из этого количество измерений мгновенных значений $2n$) может быть либо задан, либо предварительно определен каким-либо грубым способом (резонансные анализаторы и т. п.), либо получен путем сравнения величин $U_1, \varphi_1, \dots, U_n, \varphi_n$, найденных при измерении сначала $2n$, а затем $2(n+1)$ мгновенных значений. Если окажется, что расхождение между двумя рядами результатов лежит в пределах допустимых погрешностей, измерение может быть закончено. В противном случае число отсчетов мгновенных значений нужно увеличить.

Если нет необходимости измерять высшие гармоники, а в u_x присутствуют нежелательные искажения и помехи, то для их устранения могут быть применены некоторые способы, предложенные, например, в [7].

Выводы

Путем измерения ряда мгновенных значений периодических напряжений (токов) можно определять параметры периодических сигналов: амплитудные величины, фазовые сдвиги, действующие и средние значения как основной, так и высших гармоник, содержащихся в исследуемом напряжении. Для получения необходимых данных достаточно провести измерения в течение одного периода исследуемого сигнала, что резко сокращает время измерения.

Возможности современной техники позволяют применять данный метод с довольно высокой степенью точности (погрешность 0,1—0,5%) при измерении сигналов в диапазоне частот от нуля герц до единиц килогерц. Характерной особенностью метода является повышение точности результатов измерения (при прочих равных условиях) с уменьшением частоты исследуемых сигналов.

На основе рассмотренного метода может быть создан ряд измерительных приборов, в частности, быстродействующие цифровые приборы

и преобразователи переменного тока, а именно: автоматические цифровые потенциометры и мосты переменного тока, устройства для снятия АЧХ и ФЧХ, анализаторы спектра периодических колебаний и т. п.

Метод определения параметров периодических сигналов путем измерения их мгновенных значений создает возможность производить измерение периодических напряжений компенсационным способом, используя в качестве эталона стабильные источники постоянного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. A. Fleischer, E. Johnson. An Analog to Digital Converter Capable of Nanosecond Resolution.—IEEE Trans. on Nuclear Science, 1963, v. NS—10, N 1.
2. В. А. Кадкин. О возможности измерения амплитуды переменной э. д. с. методом компенсации постоянным током.—ИВУЗ, Приборостроение, 1960, т. 3, № 1.
3. Л. Б. Канцельсон, Ф. И. Коган, Е. Л. Шорин. Прибор для измерения напряжений в заданной точке кривой периодического процесса.—Приборы и техника эксперимента, 1962, № 5.
4. W. Rump. Verfahren zur Prüfung von Scheitelwert-Meßgeräten.—Electric, 1960, v. 16, N 4, S. 129—132.
5. A. Knott, H. Lucius. Zwei Geräten in Einschubtechnik für die niederfrequente Vielfachoszillografie.—Elektronik, 1962, Bd. 11, N 11, S. 331—334.
6. Now a Large Screen Scope with wide Frequency Range.—Radio-Electronics, 1962, v. XXXIII, N 11, p. 32, 33.
7. В. А. Лукас, И. П. Петров. О возможности расширения области применения комплекта инфранизкочастотных приборов.—Приборостроение, 1962, № 12.

*Поступила в редакцию
18 сентября 1965 г.*