



УДК 621.382.374.21.3

© 2008

Член-корреспондент НАН України А. Е. Божко, В. И. Белых,
О. Ф. Полищук, С. Г. Попов

К теории аналого-дискретного счетчика электроэнергии

A theory of the construction an analog-digital meter of electroenergy is given.

В последние годы все больше внедряются в систему контроля электроэнергии полупроводниковые устройства измерения мощности [1, 2]. Авторы данной работы разработали цифровой измеритель мощности переменного тока [3]. Однако известно [4], что электроэнергия W и мощность P связаны между собой формулой

$$W(t) = \int_0^t P(t) dt, \quad (1)$$

где t — время, и поэтому модифицировали этот измеритель мощности для цепей измерения электроэнергии.

Для цепи переменного тока

$$P = U_g I_g \cos \varphi, \quad (2)$$

где U_g , I_g — действующие значения напряжения и тока соответственно; φ — угол сдвига между мгновенными значениями напряжения $u = U_a \sin \omega t$ и тока $i = I_a \sin(\omega t - \varphi)$ (U_a , I_a — амплитуда напряжения и тока соответственно; ω — круговая частота; $\omega = 2\pi f$, f — частота, Гц).

Введем в рассмотрение зависимости

$$U_g = \frac{U_a}{\sqrt{2}}; \quad I_g = \frac{I_a}{\sqrt{2}}; \quad U_{\text{ср}} = \frac{2U_a}{\pi}; \quad I_{\text{ср}} = \frac{2I_a}{\pi} \quad (3)$$

при двухполупериодном выпрямлении переменного напряжения и тока.

Из (3) получаем связь действующих и средних значений напряжения и тока в виде

$$U_g = \frac{\pi U_{\text{ср}}}{2\sqrt{2}}; \quad I_g = \frac{\pi I_{\text{ср}}}{2\sqrt{2}}. \quad (4)$$

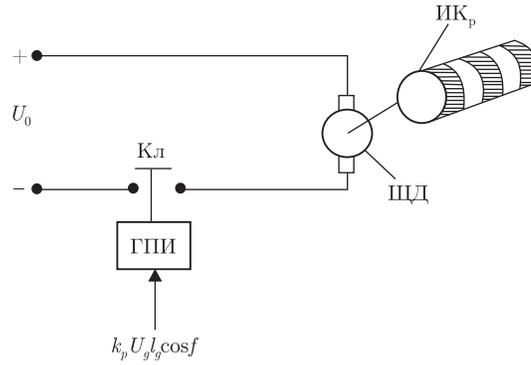


Рис. 1

Подставляя (4) в (2), получим

$$P = U_g I_g \cos \varphi = \frac{\pi^2}{8} U_{\text{ср}} I_{\text{ср}} \cos \varphi. \quad (5)$$

Если же (2) выразить относительно U_a , I_a , то

$$P = \frac{U_a I_a}{2} \cos \varphi. \quad (6)$$

Далее представим, что сигнал, соответствующий выражениям (5) или (6), подается на интегратор, выходной сигнал которого

$$Y_{\text{вых}} = \int_0^{t_u} P dt = \int_0^{t_u} \left(\frac{U_a I_a}{2} \cos \varphi \right) dt = \left(\frac{U_a I_a}{2} \cos \varphi \right) t \Big|_0^{t_u} = \frac{U_a I_a \cos \varphi}{2} t_u, \quad (7)$$

где t_u — длительность полупериода генератора прямоугольных импульсов, частота которых прямопропорциональна току I_g . В этом случае $t_u + t_{\text{п}} = T$ — период следования импульсов ($t_{\text{п}}$ — длительность паузы) и $f = 1/T$. Формула (7) обуславливает следующую схемную реализацию (см. рис. 1), где Кл — ключ; ГПИ — генератор прямоугольных импульсов; ШД — шаговый двигатель; ИК_р — индикаторная каретка; U_0 — постоянное напряжение.

Данная схема функционирует следующим образом. Напряжение U_0 по величине выбирается таким, чтобы вращался ШД совместно с ИК_р. Ключ Кл замыкается (это может быть транзисторная схема, работающая в режиме отсечка — насыщение) под действием генератора ГПИ. Период выходного сигнала этого ГПИ $T = t_u + t_{\text{п}}$. При этом $t_{\text{п}}$ обратно пропорциональна $U_g I_g \cos \varphi$ и

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_u + t_{\text{п}}} = \frac{1}{t_u + \frac{k}{U_g I_g \cos \varphi}} = \frac{U_g I_g \cos \varphi}{U_g I_g \cos \varphi t_u + k} = \frac{P}{P t_u + k}, \quad (8)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

График, объясняющий работу приведенной схемы (см. рис. 1), в соответствии с (8) представлен на рис. 2, где f_k , $k = \overline{1, 3}$, — частота замыкания ключа Кл, $f_1 < f_2 < f_3$. Как видно из этого графика, чем больше f , тем чаще проходят через ключ Кл к шаговому двигателю импульсы (t_u) напряжение U_0 . Под действием импульсного U_0 ШД шагово

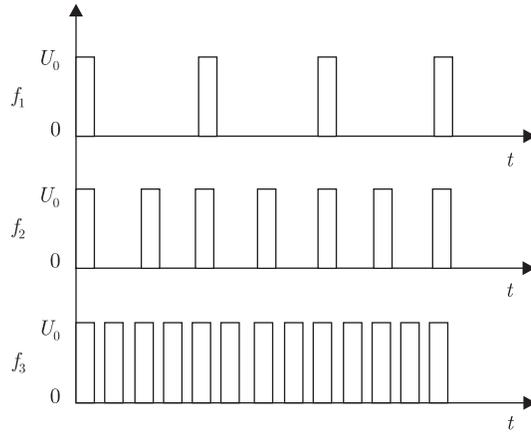


Рис. 2

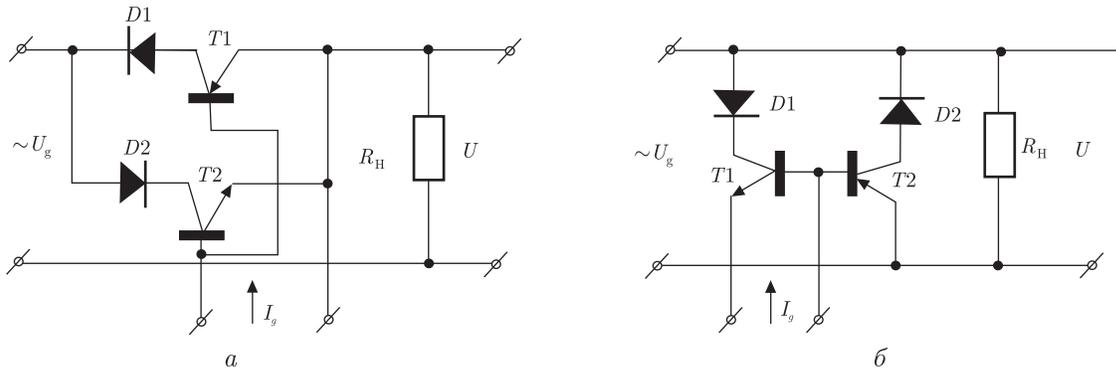


Рис. 3

вращается, передвигая соответствующий диск с цифрами индикаторной каретки. В выражении (8) $Pt_u \ll k$. Поэтому $f \approx P/k$. Исходя из схемы, изображенной на рис. 1, необходимо исследовать вопросы: а) получения $U_g I_g \cos \varphi$; б) создания ГПИ, выходной сигнал которого изменяется с частотой f , описываемой (8).

Величину $U_g I_g \cos \varphi$ будем представлять в виде (4). А это значит, что следует определить U_{cp} , I_{cp} и их произведение с $\cos \varphi$. Для этого воспользуемся некоторыми результатами исследований, приведенными в работе [5]. В качестве схемы формирования $U_g \cos \varphi = (\pi/(2\sqrt{2}))U_{cp} \cos \varphi$ возьмем такую, какая изображена на рис. 3, где D_1, D_2 — диоды; T_1, T_2 — транзисторы; R_H — сопротивление; U — выходное напряжение.

При $U_g = U_{ag} \sin \omega t$, $I_g = I_{ag} \sin(\omega t - \varphi)$ среднее значение выходного напряжения схемы а представим таким образом:

$$U_{Hcp1} = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\pi} U_{ga}(\sin \omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} U_{ga}(1 + \cos \varphi), \quad (9)$$

а схемы б —

$$U_{Hcp2} = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi}^{\pi} U_{ga}(\sin \omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} U_{ga}(1 - \cos \varphi). \quad (10)$$

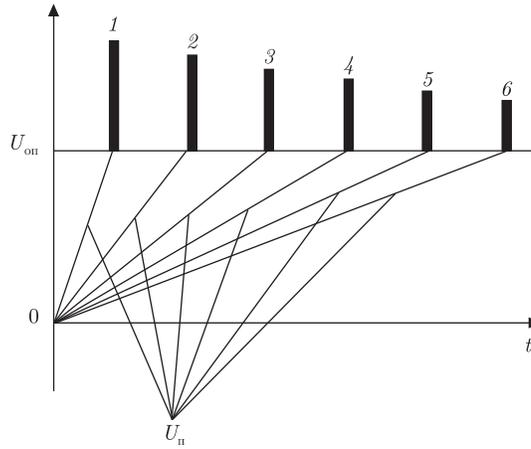


Рис. 4

Если вычесть выражение (10) из (9), получим

$$U_{Hcp1} - U_{Hcp2} = \frac{2}{\pi} U_{ga} \cos \varphi = \frac{2U_a}{\pi\sqrt{2}} \cos \varphi. \quad (11)$$

Умножая (11) на I_{cp} , получим

$$(U_{Hcp1} - U_{Hcp2}) I_{cp} = \frac{4U_a I_a}{\pi^2 \sqrt{2}} \cos \varphi. \quad (12)$$

На основании (3) выражение (12) имеет вид

$$(U_{Hcp1} - U_{Hcp2}) I_{cp} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} U_g I_g \cos \varphi = K_p P, \quad (13)$$

где $K_p = 4\sqrt{2}/\pi^2 \approx 0,6$.

Таким образом, из разности выходных сигналов схем, изображенных на рис. 3, умноженных на I_{cp} , получаем выходное напряжение, пропорциональное измеряемой мощности P . В соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 1, этот разностный сигнал, описываемый (12), необходимо подать на вход управляемого генератора прямоугольных импульсов ГПИ. Как было отмечено, выходной сигнал ГПИ имеет постоянную длительность импульса t_u и переменную, обратно пропорциональную $K_p P$ паузу $t_{п}$ между импульсами, что обуславливает увеличение частоты f замыкания ключа Кл и соответственно срабатывания шагового двигателя ШД. Срабатывание ГПИ происходит при сравнении пилообразного напряжения $U_{п}$ с заданным опорным напряжением. График такого сравнения изображен на рис. 4, где $U_{он}$ — опорное напряжение; $U_{п}$ — пилообразное напряжение; t — время; 1–6 — выходные импульсы ГПИ.

Пилообразные напряжения $U_{п}$ формируются с помощью заряда электрической емкости от напряжения, равного $K_p U_g I_g \cos \varphi$. Наиболее линейно эта емкость заряжается, если она включена в схему интегрирования (см. (7)). В качестве интегратора можно использовать полупроводниковый интегратор, приведенный в работе [6]. Элементом срабатывания в ГПИ могут быть ждущие блокинг-генераторы, приведенные в [7].

Заметим, что в литературе система формирования $K_p U_g I_g \cos \varphi$ представлена впервые.

Для получения сигнала $I_{\text{ср}}$, идущего на вход блока умножения с $(U_{\text{Нср1}} - U_{\text{Нср2}})$, необходимо в токовую цепь включить небольшое по величине активное сопротивление либо трансформатор тока и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, их двухполупериодно выпрямить и сгладить с помощью сглаживающей емкости. В этом случае $I_{\text{ср}} = U_{\text{вых}}/K_I$, где K_I — коэффициент пропорциональности, и на вход ГПИ будет подаваться сигнал $KK_I K_p U_g U_{\text{вых}} \cos \varphi$, где $K = \pi/(2\sqrt{2})$, $K_I = K_Y/R_\delta$ либо $K_Y = K_T$, K_Y — коэффициент усиления усилителя, подключенного к балластному активному сопротивлению R_δ ; K_T — коэффициент трансформации трансформатора тока.

Таким образом, в данной работе приведена теория построения полупроводникового аналого-дискретного счетчика электрической энергии на основании выражения (1), преобразованного в сумму импульсов, идущих на шаговый двигатель.

1. *Кашицин Ю. И., Борисов Л. Ф.* Устройство для измерения мощности. А.с. СССР № 1239616. — МКИ С 01 Р 21/06. Бюл. № 1. — 1986.
2. *Гутников В. С., Курманов А.* Цифровой измеритель мощности. А.с. СССР № 1492304. — МКИ С 01 Р 21/06. Бюл. № 25. — 1989.
3. *Божко А. Є., Поліщук О. Ф., Белих В. І., Попов С. Г.* Цифровий вимірювач потужності змінного струму. — Пат. України № 1719. — А G 01 Р 21/06. Бюл. № 5. — 1997.
4. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. — Москва: Высш. шк., 1978. — 528 с.
5. *Божко А. Е.* Полупроводниковые устройства систем воспроизведения вибраций. — Киев: Наук. думка, 1977. — 144 с.
6. *Божко А. Е., Савченко В. И.* Полупроводниковый интегратор. А.с. СССР № 437215. — Бюл. № 27. — 1974.
7. *Божко А. Е., Личкатый Е. А.* Ждущий блокинг-генератор. — Пат. Украины № 18580. — Зарег. 15.11.2006. — Бюл. № 5. — 2007.

*Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

Поступило в редакцию 08.06.2007