

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. Д. ЭНТИН, Н. Н. ЭНТИНА

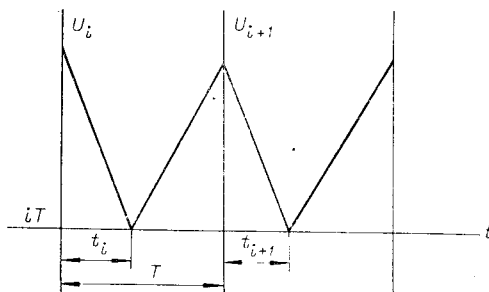
(Ленинград)

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С МНОГОТАКТНЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ

Методам многотактного интегрирования в аналого-цифровых преобразователях (АЦП) последнее время уделяется значительное внимание [1—3]. Появление этих разновидностей интегрирующего метода преобразования вызвано стремлением снизить погрешность нелинейности функции преобразования, присущую реальным интеграторам.

Поскольку основное достоинство интегрирующих методов состоит в эффективном подавлении помехи, то для АЦП с многотактным интегрированием, при котором практически устраняется влияние неидеальности интегратора на результат преобразования, важнейшей характеристикой следует считать эффективность подавления помехи. Ниже приводится анализ помехоустойчивости АЦП с многотактным интегрированием, работающего по методу, изложенному в работе [1]. Выбор именно этого метода в качестве объекта анализа обоснован следующим. Общим для методов двойного и многотактного интегрирования является необходимость обеспечения постоянства напряжений на интеграторе в начале и в конце измерения. Однако если при двойном интегрировании время измерения меняется в зависимости от величины измеряемого напряжения, то при многотактном интегрировании оно должно оставаться постоянным, поскольку входной сигнал интегрируется в течение всего измерительного интервала. Эта сложная задача наиболее полно и оригинально решена в работе [1].

На рисунке изображено изменение напряжения на интеграторе при работе АЦП. Упрощенно суть метода заключается в следующем. В моменты iT компаратор устанавливает знак напряжения на интеграторе и в зависимости от него включает на вход интегратора соответствующего знака компенсирующий ток I_k . В промежутках t_i АЦП интегрирует разность двух токов: I_c , соответствующего напряжению входного сигнала, и компенсирующего тока I_k ($I_{\text{инт}} = I_c - I_k$). После того как напряжение на интеграторе достигнет нулевого уровня, компаратор отключает I_k и в течение времени $(T - t_i)$ интегрируется ток I_c .



вующего знака компенсирующий ток I_k . В промежутках t_i АЦП интегрирует разность двух токов: I_c , соответствующего напряжению входного сигнала, и компенсирующего тока I_k ($I_{\text{инт}} = I_c - I_k$). После того как напряжение на интеграторе достигнет нулевого уровня, компаратор отключает I_k и в течение времени $(T - t_i)$ интегрируется ток I_c .

Выходной код $N_{\text{вых}}$ определяется числом импульсов опорного генератора (частота f_0), поступивших на счетчик в течение времени

$$T_{\text{сч}} = \sum_{i=n}^{n+N-1} t_{i+1}, \quad (1)$$

где время nT соответствует подготовке к измерению, а само измерение осуществляется в течение $T_n = NT$. Из рисунка следует

$$\int_{iT+t_i}^{(i+1)T} I_c dt + \int_{(i+1)T}^{(i+1)T+t_{i+1}} (I_c - I_k) dt = 0. \quad (2)$$

Отсюда, выражая t_{i+1} через t_i и используя (1), определим выходной код

$$N_{\text{вых}} = f_0 T_n I_c / I_k + f_0 (T / (1+q) - t_1) (-q)^n [1 - (-q)^T] / (1+q), \quad (3)$$

где

$$q = I_c / (I_k - I_c). \quad (4)$$

Параметры схемы выбираются таким образом, что $I_c \leq I_k / 3$, т. е. $q \leq 0,5$. Исходя из этого, оценим необходимое количество предшествующих измерению тактов n , чтобы нелинейность преобразователя, представленная в формуле (3) вторым слагаемым, не превышала половины дискрета. Принимая $t_1 = 0$, получим

$$n \geq 3,33 \lg (9N_m / N), \quad (5)$$

где N_m — максимальное значение выходного кода. Так, при $N_m = 10^4$ и $N = 20$ имеем $n \geq 13$, поэтому для удобства реализации схемы можно принимать $n = N$.

Рассмотрим теперь работу АЦП при наличии на входе гармонической помехи $I = I_n \sin(\omega t + \psi)$. Подставляя в (2) вместо сигнала I_c сумму $(I_c + I)$, находим

$$(I_k - I_c) t_{i+1} + I_c (-T + t_i) = (I_n / \omega) \{ \cos[\omega(i+1)T + \alpha t_{i+1} + \psi] - \cos[\omega iT + \omega t_i + \psi] \}. \quad (6)$$

Умножим обе части равенства (6) на f_0 и просуммируем его по i от n до $(n+N-1)$, а затем заменим в полученном выражении разность косинусов на произведение синусов:

$$N_{\text{вых}} = f_0 \frac{I_c}{I_k} T_n + f_0 \frac{I_c}{I_k} (t_n - t_{n+N}) + 2 \frac{f_0 I_n}{\omega I_k} \sin \left[\frac{\omega}{2} (NT + t_{n+N} - t_n) \right] \sin \left[\omega \frac{(2n+N)T + t_n + t_{n+N}}{2} + \psi \right]. \quad (7)$$

Второе и третье слагаемые правой части представляют собой погрешность показаний АЦП ΔN , вызванную наличием помехи, если пренебречь нелинейностью передаточной характеристики. Для определения этой погрешности следует оценить разность $(t_n - t_{n+N})$. Для этого выразим t_{i+1} через t_i из формулы (6), считая

$$\omega T \leq \pi / 10, \quad (8)$$

$$\alpha_m = I_n / (I_k - I_c) \ll 1$$

(что, как правило, всегда выполняется) и пренебрегая членами второго порядка малости:

$$t_{i+1} \approx (T - t_i) [q + (1+q)\alpha_i] = (T - t_i) q_i; \quad (9)$$

$$\alpha_i = \alpha_m \sin(\omega i T + \psi).$$

Раскрывая рекуррентную формулу (9) с учетом быстроты сходимости рядов, содержащих q^n , получим

$$t_{i+1} \approx T \left[\frac{q}{(1+q)} + \sum_{s=0}^{\infty} (-q)^s \alpha_{i-s} \right]. \quad (10)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} t_n - t_{n+N} &= 2\alpha_m T \sin \frac{\omega NT}{2} \sum_{s=0}^{\infty} (-q)^s \cos \left[\omega T \frac{2(n-1-s) + N}{2} + \psi \right] \leq \\ &\leq \frac{2\alpha_m T}{(1+q)} \sin \frac{\omega NT}{2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Если несинхронность частоты задающего генератора АЦП приводит к уходу времени измерения на величину ΔT_{Π} от синхронного значения, то разность (11) имеет значение

$$t_n - t_{n+N} \approx \frac{2\pi\alpha_m T \Delta T_{\Pi}}{(1+q) T_{\Pi}}. \quad (12)$$

С помощью (12) и (7) несложно определить погрешность выходного кода АЦП, вызванную наличием помехи:

$$\Delta N_{\text{вых}} \leq 2\pi \frac{I_c I_{\Pi}}{I_{\text{K}}^2} \frac{T}{T_0} \frac{\Delta T_{\Pi}}{T_{\Pi}} + \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{K}}} \frac{\Delta T_{\Pi}}{T_0} \approx \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{K}}} \Delta T_{\Pi} f_0. \quad (13)$$

Определяя эффективность подавления помехи как частное отношения сигнал/помеха на выходе к отношению сигнал/помеха на входе АЦП, получим

$$\mathcal{E} \approx T_{\Pi} / \Delta T_{\Pi}. \quad (14)$$

Выражение (14) свидетельствует о том, что метод многотактного интегрирования в отношении подавления сетевой помехи практически эквивалентен методу двойного интегрирования. При проектировании АЦП с многотактным интегрированием формула (14) позволяет заранее рассчитать допустимый уровень помех на входе АЦП либо при заданном уровне помех сформулировать требования, предъявляемые к схеме автоподстройки частоты тактового генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analog-digital converter utilizing multiple-ramp integrating techniques.— "United States Patent", № 3. 765.012, 1973.
2. Hochgenaues Digitalvoltmeter nach dem Mehrfach-Rampen.— "Integrationsverfahren", Elektronik-Markt, 1974, № 10, S. A30.
3. "Charge balancing" — ein neues A/D.— "Integrationsverfahren", Elektronik-Messtechnik, 1974, № 12, S. 469.

Поступила в редакцию 12 июля 1976 г.;
окончательный вариант — 29 октября 1976 г.