

УДК 681.317.39

Ю. В. Шабатура, д. т. н., доц.; И. Н. Штельмах; М. Ю. Шабатура

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ПРИНЦИПОВ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

В статье рассмотрены процессы формирования измерительной информации о значении измерительных величин разной физической природы. Предложены новые принципы проведения измерительных преобразований, их математическое обеспечение, а также структуры соответствующих измерительных каналов.

Ключевые слова: измерительный канал, импульсный сигнал, длительность импульса, длина огибающей импульсного сигнала.

Введение

Интенсивное развитие научных исследований, создание технических систем и использование новых технологий требуют соответствующего роста показателей метрологических и эксплуатационных характеристик информационно-измерительных систем (ИВС), предназначенных для решения задач измерения и контроля значений большого количества физических величин. Бурное развитие в последние годы компьютерных и микропроцессорных технологий привело к созданию необходимой базы для проведения радикальных изменений в концепциях построения ИВС в целом и в проведении процедур получения, обработки, сохранения и отображения измерительной информации в частности. Итогом этого процесса стала практически полная трансформация технических решений в отрасли измерительных технологий: от разнообразных разрозненных и несовместимых измерительных приборов до высокоинтегрированных, многоканальных автоматизированных измерительных систем, способных работать с использованием глобальных компьютерных сетей.

Анализ последних исследований и публикаций

На основании проведенного анализа известных публикаций [1, 2, 3] нужно отметить, что вместе с общим ростом возможностей ИВС в последнее время начали проявляться и определенные неувязки в этом процессе. Среди других, основной причиной стало заметное отставание технологий формирования измерительной информации о значениях физических величин от возможностей технологий обработки, сохранения, отображения и передачи измерительной информации. Таким образом, задачи разработки новых принципов, на которых будут базироваться технологии получения измерительной информации, сегодня являются актуальными в научном отношении и полезными в практических использованиях.

Постановка задачи исследования

Выполнить исследование измерительных каналов, которые работают на основе представления измерительной информации в форме значений длительности импульсных сигналов, либо длины их огибающей. Разработать математическое и метрологическое обеспечение для процесса преобразования формы представления измерительной информации, который выполняется путем переноса значений измеряемых физических величин, выраженных сигналами соответствующей природы, в изменение значений длительности, либо длины огибающей импульсных электрических сигналов, которые являются носителями измерительной информации в современных ИВС.

Измерительные каналы на основе использования новых форм представления измерительной информации

Сегодня практически общепринятым стандартом является использование в качестве основного носителя информации в современных ИВС электрических сигналов. Причем, в структуре измерительных каналов ИВС, на участке от первичных измерительных преобразователей и до аналого-цифровых преобразователей, именно электрический сигнал обеспечивает перенос измерительной информации, сосредоточенной в значениях его параметров. Традиционно наибольшее распространение получила передача измерительной информации через изменение амплитуды напряжения или тока. В этом случае измерительный канал имеет структуру, показанную на рисунке 1.

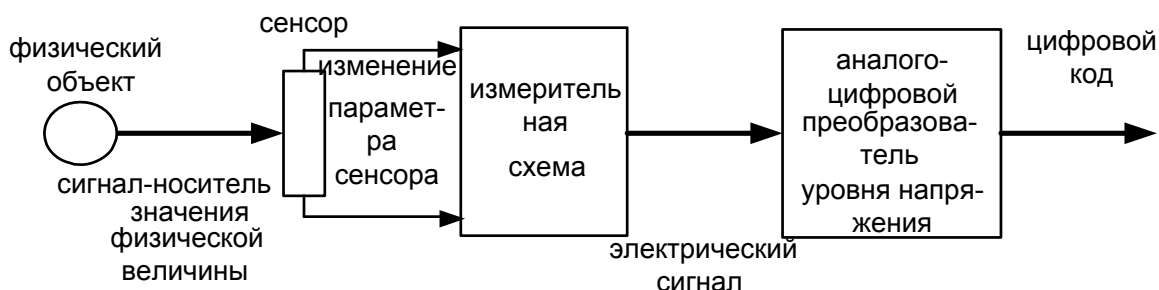


Рис. 1. Структура измерительного канала, в котором используется процесс переноса значений измеряемых физических величин в изменение амплитуды электрического сигнала

Основным преимуществом такого измерительного канала является наличие тщательно отработанного технического и метрологического обеспечения. Вместе с тем он имеет и немало недостатков. К основным из которых следует отнести ограниченную точность измерений, чувствительность к действию помех и значительное энергопотребление.

Известны и другие структуры измерительных каналов [1, 2, 3], в которых информация о значении измеряемых физических величин представляется через изменение других параметров электрических сигналов, таких как фаза и частота. Они тоже не лишены недостатков. Так, измерение фазы требует высокостабильного опорного сигнала, а использование частоты требует использования сложного технического оборудования и сопровождается повышенным энергопотреблением.

Существенное уменьшение энергопотребления достигается в ИВС, работающих в импульсном режиме. При этом нужно отметить, что использование известных методов формирования измерительной информации в таком режиме оказывается малоэффективным. Поэтому предложенные в работах [4, 5] новые методы преобразования измерительной информации в объединении с импульсным режимом работы измерительных каналов позволяют получить существенное улучшение как метрологических, так и эксплуатационных характеристик ИВС.

Суть предложенных принципов состоит в идеях использования представления измерительной информации в форме изменения длительности импульсных сигналов специальной формы, которая определяется на заданном уровне, а также в форме изменения длины огибающей импульсных сигналов. Переход от необходимости измерения амплитуды к измерению часовых интервалов позволяет радикально увеличить разрешающую способность измерений (использование серийно выпускаемых время-цифровых преобразователей (TDC) фирмы Acam mess electronic GmbH обеспечивает измерение длительности импульсов с точностью до 14 пикосекунд, что в диапазоне измерений соответствует разрешающей возможности в 30 бит), а использование измерения длины огибающей, несмотря на определенную сложность технической реализации, позволяет

учитывать комплексный характер значительного количества физических величин и потенциально способно линеаризовать квадратический характер взаимодействия физического влияния измеряемых величин на изменение параметров сенсоров.

Обобщенная структура, отображающая предложенные принципы проведения измерительных преобразований показана на рисунке 2.

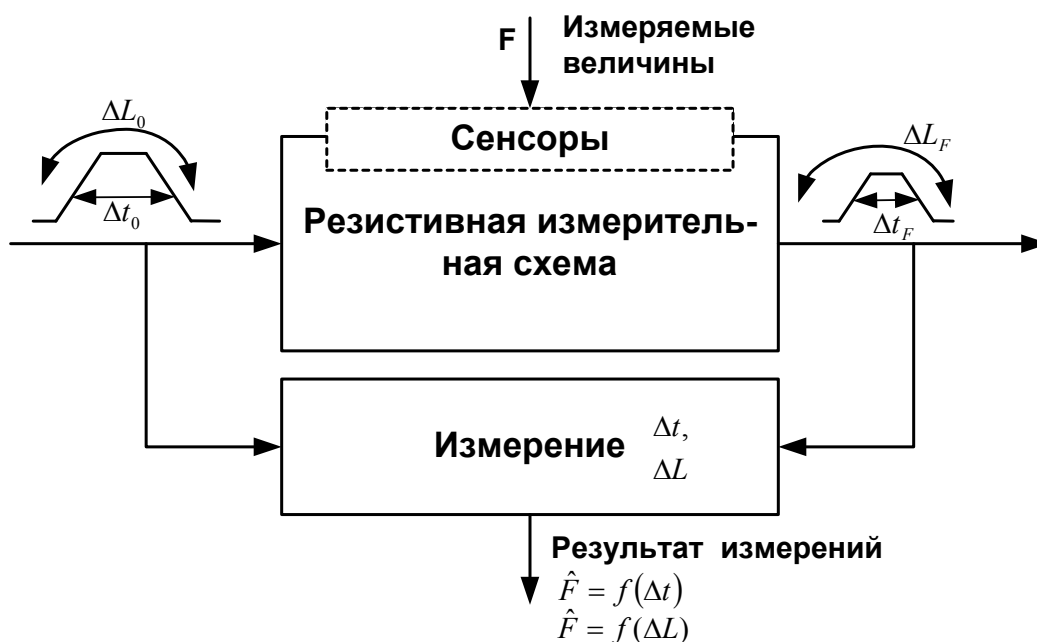


Рис. 2. Структурная схема проведения измерений по предложенным принципам

В соответствии с предложенной структурой роль своеобразного модулятора длительности или длины огибающей импульсного сигнала специальной формы, выполняет резистивная измерительная схема. Это связано с тем, что при прохождении импульсного сигнала через такую схему не происходит нелинейных искажений формы данного сигнала. Поэтому в математическом отношении задача моделирования является корректной и позволяет получать аналитические решения для всех форм сигналов, которые описываются аналитическими и дифференцируемыми в области их существования функциями. Возможные виды математических моделей описания разработанных измерительных преобразований показаны в классификационной таблице 1.

Таблица 1

Классификационная таблица моделей

Вербальная форма модели измерительного преобразователя $S / \Delta T$ и $S / \Delta L$	Математическая форма модели функционального преобразования $\Delta T(t) = M[S(t)]$, $\Delta L(t) = W[S(t)]$
Линейный, однопараметрический, стационарный	$T(t) = kS(t)$, $L(t) = kS(t)$ $k - \text{const}$
Линейный, однопараметрический, нестационарный	$T(t) = kS(t)$, $L(t) = kS(t)$ $k - \text{var}$
Линейный, однопараметрический, с задержкой	$T(t) = k(t - \tau)S(\tau)d\tau$, $L(t) = k(t - \tau)S(\tau)d\tau$
Нелинейный, однопараметрический	$T(t) = f[S(\tau)]$, $L(t) = f[S(\tau)]$
Нелинейный, однопараметрический, с задержкой	$T(t) = k(t, \tau, S(\tau))S(\tau)$, $L(t) = k(t, \tau, S(\tau))S(\tau)$
Линейный, многопараметрический	$T(t) = KS(t)$, $L(t) = KS(t)$ $K - \text{вектор-ст. } (n \times 1)$
Линейный, многопараметрический, с задержкой	$T(t) = K(t - \tau)S(\tau)d\tau$, $L(t) = K(t - \tau)S(\tau)d\tau$

Нелинейный, многопараметрический	$T(t) = F[S(t)], L(t) = F[S(t)]$
Нелинейный, многопараметрический, с задержкой	$T(t) = K[t, \tau, S(\tau)]S(\tau)d\tau,$ $L(t) = K[t, \tau, S(\tau)]S(\tau)d\tau$

В результате проведенных исследований были установлены математические модели импульсных сигналов (ИС) и виды функциональной зависимости их длительности от изменений амплитуды, которые они получают в измерительной схеме, а также вид функций чувствительности полученных зависимостей. Данные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Математические модели импульсных сигналов, измерительных преобразований и функций чувствительности

№ п/п	Вид формы ИС	Математическая модель ИС	Функция зависимости Δt от амплитуды ИС	Функция чувствительности полученной зависимости
1	Пилообразная	$\begin{cases} U(t) = U_{\max} \frac{t}{t_i}; \forall t \in [0, t_i] \\ U(t) = 0; 0 > t > t_i \end{cases}$	$\Delta t = t_i \left(1 - \frac{L}{U_m}\right)$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{t_i L}{U_m^2}$
2	Треугольная (симметричная)	$U(t) = \frac{U_m}{t_i} (t - 2(t - t_0)) \cdot \mathbf{1}(t - t_0) + (t - t_i) \cdot \mathbf{1}(t - t_i)$	$\Delta t = 2\Delta t_{\max} = 2t_0 \left(1 - \frac{L}{U_m}\right)$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = 2 \frac{t_0 L}{U_m^2}$
3	Трапециевидная	$U(t) = k \cdot t - k \cdot (t - t_{f1}) \cdot \mathbf{1}(t - t_{f1}) - c \cdot (t - t_{f2}) \cdot \mathbf{1}(t - t_{f2}) + c \cdot (t - t_i) \cdot \mathbf{1}(t - t_i)$ (общая)	$\Delta t = (t_{f1} + t_{f2}) \left(1 - \frac{L}{U_m}\right) + t_{f2} - t_{f1}$ (симметричная)	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{L}{U_m^2} (t_{f1} + t_{f2})$
4	Колоколообразная	$U(t) = U_m e^{\frac{-(t-t_0)^2}{2a^2}}$	$\Delta t = 2a \sqrt{2 \ln\left(\frac{U_m}{L}\right)}$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{a\sqrt{2}}{U_m \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{L}\right)}}$
5	Экспоненциальная форма фронтов	$U(t) = U_m e^{-g t_0-t }$	$\Delta t = \frac{2}{g} \ln\left(\frac{U_m}{L}\right)$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{2}{gU_m}$
6	Гиперболическая форма фронтов	$\begin{cases} U(t) = U_m \frac{b}{ t - t_0 } \\ U(t) \leq U_{\max} \forall t \in [0; +\infty] \end{cases}$	$\Delta t = \frac{2bU_m}{L}$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{2b}{L} = const$

Подобные исследования были проведены для выяснения зависимостей изменения длины огибающей импульсных сигналов, а также для определения чувствительности таких изменений. Результаты проведенных исследований отражены в таблице 3.

Удобство практического использования предложенных принципов проведения измерительных преобразований состоит еще и в том, что они могут выполняться на базе

давно известных потенциметрических и мостовых измерительных схем. Это позволяет без особых затрат модернизировать любые измерительные системы, что приведет к существенному улучшению их метрологических и эксплуатационных характеристик.

Примеры возможных вариантов функциональных схем разработанных измерительных каналов на основе использования представления измерительной информации в форме изменения длительности импульсных сигналов специальной формы при использовании потенциметрической и мостовой резистивных измерительных схем показаны на рисунке 3.

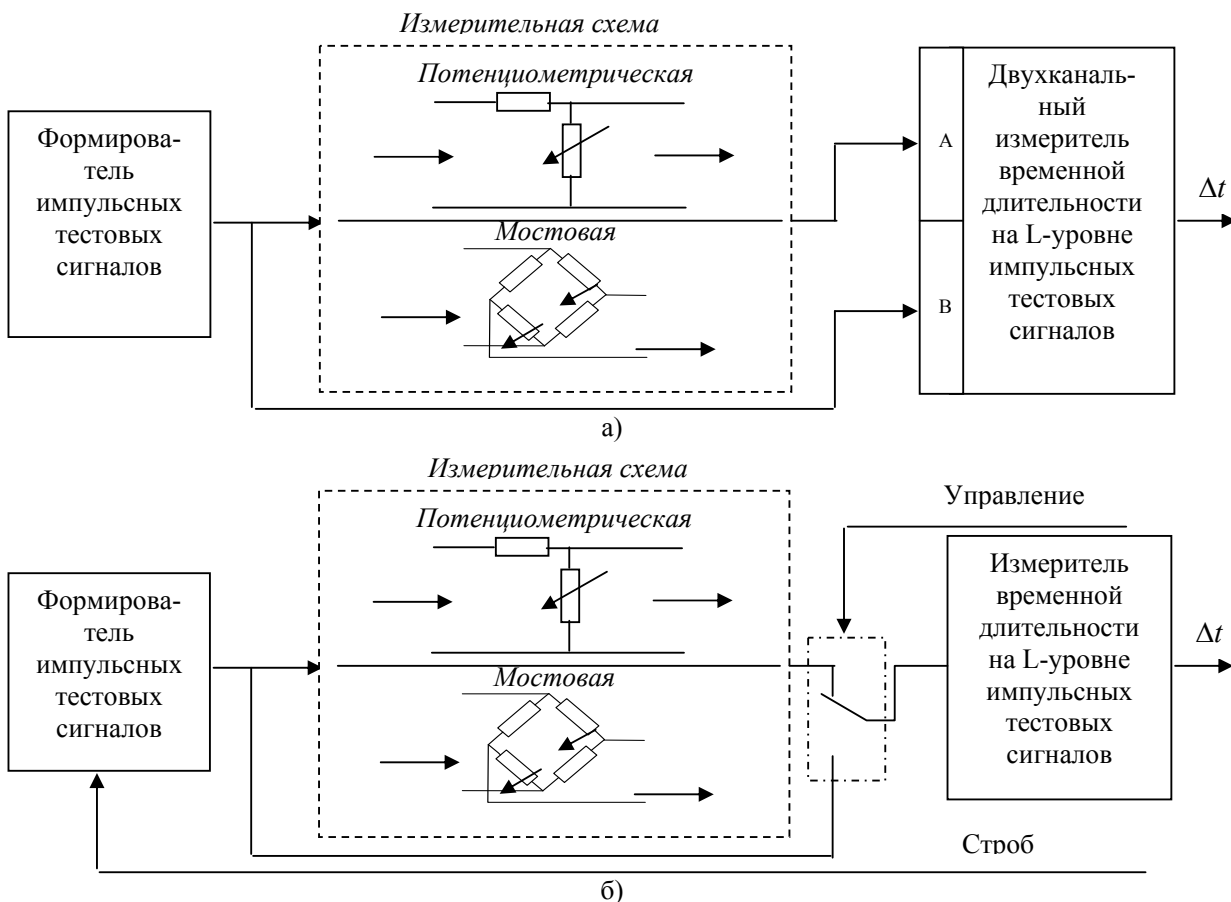
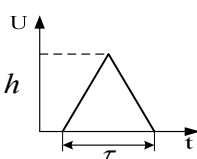
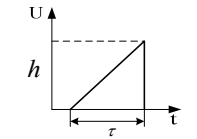
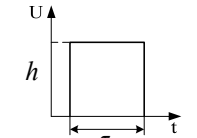
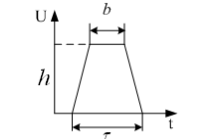
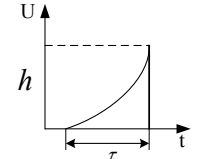


Рис. 3. Функциональная схема измерительного канала с а) однопulseм; б) двухpulseм режимами измерений

Идеализированные формы импульсных сигналов, модели измерительных преобразований, функции чувствительности

Форма сигнала	$L = f(h, \tau)$	$s = \partial L / \partial h$
	$L = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\tau}{2}\right)^2 + h^2}$	$s = \frac{4h}{\sqrt{\tau^2 + 4h^2}}$
	$L = h + \sqrt{h^2 + \tau^2}$	$s = 1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 + \tau^2}}$
	$L = 2 \cdot h + \tau$	$s = 2$
	$L = 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{\tau - b}{2}\right)^2} + b$	$s = 4 \frac{h}{\sqrt{4h^2 + \tau^2 - 2tb + b^2}}$
	$L = 0,3662684 + 1,9999117h$ модель приближенной аппроксимации	$s = 0,3662684$

В отличие от известных и широкоиспользуемых технологий получения измерительной информации, которые базируются на измерениях амплитуды, фазы или частоты, предложенные принципы преобразования измерительной информации позволяют при их использовании в измерительных каналах получить ряд существенных преимуществ. В частности: значительно увеличивается точность измерений, повышается помехоустойчивость, вследствие того, что работа измерительных каналов осуществляется в импульсном режиме, а сам процесс измерения длится на протяжении времени, которое соответствует длительности измерительного импульса. Кроме этого, за счет перехода в импульсный режим работы, который может быть доведен до измерения в режиме одиночного импульса, значительно уменьшается энергопотребление.

Формально рассмотренный принцип преобразования значений измеряемых физических величин в длительность определенного импульсного сигнала отражает осуществление дискретного представления аналогового сигнала $s(t) \in S(t)$ в пределах интервала изменения текущего времени $t \in T$ в виде последовательности координат временной оси $\{\Delta T_i, i = 0, 1, 2, \dots, N_k\}$, по значениям которых можно получить оценку $s^*(t) \in S^*(t)$ начального значения измеряемой физической величины. Такое представление и обратное к нему восстановление можно записать в виде:

$$(\Delta T_0, \Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_{N_k}) = \mathfrak{Z}(s(t)); t \in T,$$

$$s(t) = \mathfrak{R}(\Delta T_0^*, \Delta T_1^*, \Delta T_2^*, \dots, \Delta T_{N_k}^*); t \in T,$$

где \mathfrak{Z} – оператор представления, \mathfrak{R} – оператор восстановления, ΔT_i^* – результаты измерений временных интервалов, по которым выполняется восстановление значений измеряемой физической величины. Потенциально такая технология получения измерительной информации способна обеспечить точность измерения значений физических величин, приближающуюся к точности измерения времени.

Выводы

В данной работе разработаны новые принципы преобразования измерительной информации.

Предложенный принцип преобразования измерительной информации на основе использования метода модуляции временной длительности импульсных сигналов позволяет по сравнению с другими известными подходами существенно увеличить точность измерений, уменьшить энергопотребление измерительных каналов и увеличить срок эксплуатации измерительных средств.

В измерительных каналах, которые используют принцип преобразования измерительной информации на основе модуляции длины огибающей импульсного сигнала, имеется возможность учитывать комплексный характер измеряемых физических величин, а также использовать в качестве сенсоров первичных измерительных преобразователей с реактивными параметрами и линеаризовывать квадратичный характер взаимодействия физических воздействий измеряемых величин на изменение параметров сенсоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов О. Н. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. Н. Новоселов, А. Ф. Фомин. – М. : Машиностроение, 2-е изд., 1991. – 336 с.
2. Асадов Х. Г. Синтез одного подкласса ИИС по принципу уменьшения размерности / Х. Г. Асадов // Измерительная техника. – 2001. – № 3. – С. 14 – 16.
3. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / [Вуйцік В., Голяка Р., Каліта В. та ін.]; за ред. З. Готри. – Львів: Видавн. „Львівська політехніка”, 1999. – 364 с.
4. Шабатура Ю. В. Основы теории і практики інтервальних вимірювань / Шабатура Ю. В. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2003. – 167 с.
5. Шабатура Ю. В. Структурно-математичні основи синтезу інформаційно-вимірювальних систем з часовим поданням інформації / Ю. В. Шабатура // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2006. – № 66. – С. 164–173.

Шабатура Юрій Васильевич – д. т. н., профессор кафедры метрологии и промышленной автоматизации, тел.: 80977672270.

Штельмах Игорь Николаевич – аспирант кафедры метрологии и промышленной автоматизации, тел.: 80936305650.

Шабатура Максим Юрьевич – студент, тел.: 80977535830
Винницкий национальный технический университет.