

УДК 543.58

К. П. Л а т ы ш е н к о

ИМПУЛЬСНЫЕ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Приведен принцип действия импульсного измерительного преобразователя. Получены математические модели преобразователей, построенных по различным схемам и использующих разные виды импульсных сигналов. Рассмотрено устройство импульсного кондуктометра, имеющего улучшенные метрологические характеристики.

Известно, что импульсный сигнал при прохождении через электрическую цепь подвергается искажению, вследствие чего меняет свою первоначальную форму, амплитуду, длительность и т.п. (рис. 1, 2).

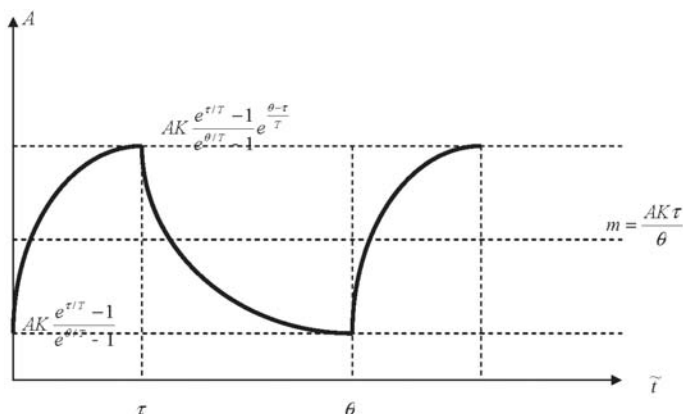


Рис. 1. Выходной сигнал аperiodического звена первого порядка при прямоугольном входном сигнале

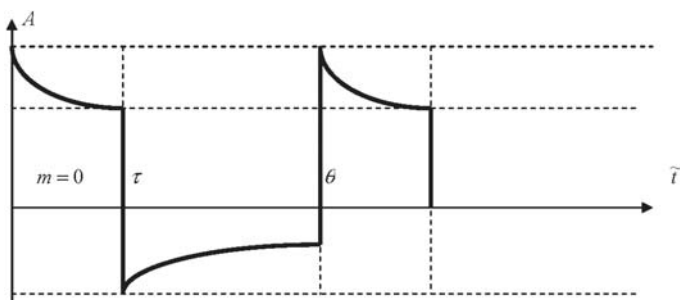


Рис. 2. Выходной сигнал дифференцирующего звена с астатизмом при прямоугольном входном сигнале

Характер этих искажений и их величина связана как с параметрами исходного импульсного сигнала, так и с параметрами электрической цепи. Следовательно, при фиксированной форме и величине импульсного сигнала его искажения будут связаны только с параметрами электрической цепи. Отсюда вполне естественная мысль: создать такую цепь в виде импульсного измерительного преобразователя (ИИП), включенного в измерительную цепь, чтобы величина и характер искажений исходного импульсного сигнала были бы связаны с каким-либо информативным параметром [1, 2].

При этом в качестве первичного измерительного преобразователя (ПИП) используется измерительная ячейка (ИЯ), которую включают вместо элемента звена ИИП (для измерения проводимости ИЯ включают вместо сопротивления R , а для измерения емкости C — вместо конденсатора типового звена ИИП).

В качестве базовых схем измерительных преобразователей предложено использовать типовые звенья, давно и эффективно применяемые в автоматическом регулировании.

Пусть импульсный сигнал прямоугольной формы проходит через апериодическое звено первого порядка, тогда его длительность определяется как

$$\tau_{\text{вых}} = \tilde{t}_2 + \tilde{t}_1 = \theta + T \ln \left(\frac{\theta - \tau}{\tau} \frac{e^{\tau/T} - 1}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}} \right), \quad (1)$$

где \tilde{t}_1 и \tilde{t}_2 — время нарастания и спада импульса; τ — длительность импульса; θ — период сигнала; T — постоянная времени звена.

График зависимости $\tau_{\text{вых}}$ от параметра звена T для апериодического звена первого порядка при входном импульсном прямоугольном сигнале изображен на рис. 1.

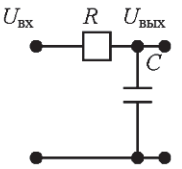
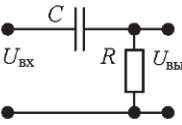
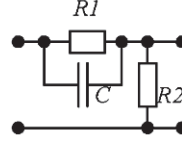
Из формулы (1), а также на основе математического моделирования (таблица) следует, что:

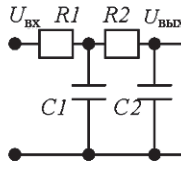
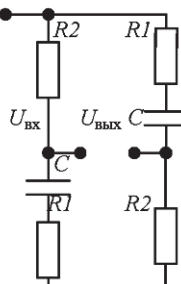
— при фиксированном периоде (θ) и длительности (τ) сигнала, а также при $\theta \neq 2\tau$ длительность выходного сигнала $\tau_{\text{вых}}$ является функцией только постоянной времени звена и, следовательно, определяется только элементами, составляющими это звено;

— длительность выходного импульса $\tau_{\text{вых}}$ не зависит от амплитуды входного импульса и коэффициента передачи апериодического звена, что свидетельствует о нечувствительности к этим параметрам и амплитудным помехам;

— длительность сигнала $\tau_{\text{вых}}$ увеличивается при уменьшении длительности входного сигнала τ , а также при увеличении параметра T для апериодического звена первого порядка при прохождении через него импульсного сигнала прямоугольной формы фиксированной частоты, длительности и амплитуды.

Математические модели статической характеристики (СХ) и погрешностей ИИП

Звено	Структурная схема ИИП	Математическая модель СХ ИИП $\tau_{\text{ВЫХ}} = F(\tau, \theta, T)$	Модель погрешности ИИП (СКО) $\sigma_s = \sqrt{(S_\tau \cdot \sigma_\tau)^2 + (S_\theta \sigma_\theta)^2 + (S_T \sigma_T)^2}$
Аперiodическое 1-го порядка	 $W(p) = \frac{1}{1+Tp},$ $T = RC$	$\tau_{\text{ВЫХ}} = \theta + T \ln\left(\frac{\theta - \tau}{\tau} \frac{e^{\tau/T} - 1}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}\right)$	$S_\tau = \frac{T}{\tau} \frac{\theta}{\theta - \tau} + \frac{e^{\tau/T} (\theta^{1/T} - 1)}{(e^{\tau/T} - 1) (e^{\theta/T} - e^{\tau/T})}$ $S_\theta = \frac{T}{\theta - \tau} \frac{e^{\tau/T}}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}$ $S_T = \ln\left[\frac{\theta - \tau}{\tau} \frac{e^{\tau/T} - 1}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}\right] + \frac{\tau e^{\theta/T} (\theta - \tau e^{\tau/T})}{T(\theta - \tau)(e^{\theta/T} - 1)(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})}$
Дифференциальное с астатизмом	 $W(p) = \frac{Tp}{1+Tp},$ $T = RC$	$\tau_{\text{ВЫХ}} = \tau - T \ln\left[\frac{T \cdot (e^{\tau/T} - 1)}{\tau}\right]$	$S_\tau = \frac{T + \tau}{T} - \frac{e^{\tau/T}}{T(e^{\tau/T} - 1)}$ $S_T = -1 - \frac{\tau \cdot e^{\tau/T}}{T(e^{\tau/T} - 1)}$
Дифференциальное со статизмом	 $W(p) = \frac{K(1+T_0 p)}{1+Tp}$	$\tau_{\text{ВЫХ}} = T \ln\left(\frac{\theta}{\theta - \tau} \frac{T - T_0}{T} \frac{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}{e^{\theta/T} - 1}\right)$ $T_0 = R_2 C,$ $T = T_0 R_2 / (R_1 + R_2)$	$S_\tau = \frac{T}{(\theta - \tau)^2} - \frac{e^{\tau/T}}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}$ $S_\theta = \frac{T\tau}{\theta(\theta - \tau)} + \frac{e^{\theta/T} (e^{\tau/T} - 1)}{(e^{\theta/T} - e^{\tau/T}) (e^{\theta/T} - 1)}$ $S_T = \ln\left[\frac{\theta(T - T_0)}{T(\theta - \tau)}\right] + \frac{T^2}{T - T_0} + \frac{\theta e^{\theta/T} + \tau e^{\tau/T}}{T(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})} + \frac{\theta e^{\theta/T}}{T(e^{\theta/T} - 1)}$

<p>Аперидическое 2-го порядка</p>	 <p> $\tau_{\text{вых}} = \tilde{t}_2 - \tilde{t}_1$ $\tilde{t}_1 = -\frac{1}{\sigma_1} \ln \left[\frac{B}{e^{\sigma_1 \theta} - e^{\sigma_1 \tau}} \left(\frac{\tau - \theta}{\theta} \frac{e^{\sigma_1 \theta} - e^{\sigma_1 \tau}}{C e^{\sigma_1^2 \tau}} \right) \right]$ $\tilde{t}_2 = -\frac{1}{\sigma_1} \ln \left[\frac{B}{e^{\sigma_1 \theta} (1 - e^{\sigma_1 \tau})} \left(\frac{\tau}{\theta} \frac{e^{\sigma_1 \theta} (1 - e^{\sigma_1 \tau})}{C e^{\sigma_1^2 \tau}} \right) \right]$ $B = (2\sigma_1^2 T_1^2 - \sigma_1 T_2) \cdot (e^{\sigma_1 \theta} - 1)$ $C = (2\sigma_2^2 T_1^2 - \sigma_2 T_2) \cdot (e^{\sigma_2 \theta} - 1)$ $W(p) = \frac{K}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}$ $T_1 = R_1 R_2 C_1 C_2$ $T_2 = R_1 (C_1 + C_2) + R_2 C$ </p>	<p>Необходимо численное решение уравнений</p>
<p>Неминимально-фазовое звено</p>	 <p> $\tau_{\text{вых}} = T_2 \ln \left(\frac{\theta - \tau}{\tau} \frac{e^{\theta/T_2} (e^{\tau/T_2} - 1)}{e^{\theta/T_2} - e^{\tau/T_2}} \right)$ $S_\tau = \frac{T_2 \cdot \theta}{(\tau - \theta) \tau} + \frac{e^{\tau/T_2} (e^{\theta/T_2} - 1)}{(e^{\tau/T_2} - 1) (e^{\theta/T_2} - e^{\tau/T_2})}$ $S_\theta = \frac{T_2}{\theta - \tau} - \frac{e^{\tau/T_2}}{e^{\theta/T_2} - e^{\tau/T_2}}$ $S_{T_2} = \ln \left[\frac{\theta - \tau}{\tau} \frac{e^{\theta/T_2} (e^{\tau/T_2} - 1)}{e^{\theta/T_2} - e^{\tau/T_2}} \right] + \frac{\tau e^{\tau/T_2} (\theta e^{\tau/T_2} - 1) - \tau (1 - e^{\tau/T_2})}{\tau (\theta - \tau) (e^{\tau/T_2} - 1) (e^{\theta/T_2} - e^{\tau/T_2})}$ $W(p) = \frac{K(1 - T_1 p)}{1 + T_2 p}$ $T_1 = (R_2 - R_4)C$ $T_2 = (R_1 + R_2)C$ $R_2 > R_4; T_2 > T_1$ </p>	<p>Необходимо численное решение уравнений</p>

По аналогии с приведенным импульсным сигналом прямоугольной формы для импульсного сигнала пилообразной формы запишем

$$\tilde{t}_1 = \frac{\tau T}{2\theta} - \left(T - (T - \tau) e^{\tau/T} \right) \frac{e^{-\tilde{t}_1/T}}{e^{\theta/T} - 1} - T(e^{-\tilde{t}_1/T} - 1), \quad (2)$$

$$\tilde{t}_2 = T \ln \left[\frac{2\theta T}{\tau^2} \left(1 - \frac{T - \tau}{T} e^{\tau/T} \right) \frac{e^{\theta/T}}{e^{\theta/T} - 1} \right]. \quad (3)$$

Из уравнения (2) следует, что оно неразрешимо относительно параметра \tilde{t} , поэтому выразить в явном виде $\tau_{\text{вых}}$ невозможно. Величину $\tau_{\text{вых}}$ можно найти только численным методом.

Для сигнала треугольной формы запишем

$$\tilde{t}_1 = \frac{T(1 - e^{-\tau/2T})^2}{e^{\theta/T} - 1} e^{-\tilde{t}_1/T} + T(e^{-\tilde{t}_1} + 1) - \frac{\tau}{2\theta}; \quad (4)$$

$$\tilde{t}_2 = T \left\{ \frac{(1 - e^{-\tau/2T})^2}{e^{\theta/T} - 1} e^{-\tilde{t}_2/T} + (1 - 2e^{\tau/2T}) e^{-\tilde{t}_2/T} \right\} + T + \tau \left(1 - \frac{1}{2\theta} \right). \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) видно, что они также неразрешимы относительно параметра \tilde{t} , поэтому система этих уравнений может быть решена только численным методом.

Были рассмотрены следующие типовые звенья измерительных преобразователей: апериодическое первого порядка, дифференцирующее с астатизмом и без статизма, интегрирующее, дифференцирующее со статизмом, апериодическое второго порядка, неминимально-фазовое. Для этих звеньев получены математические модели измерительных преобразователей, реализующих описанный способ и использующих различные импульсные сигналы, и исследованы метрологические характеристики этих преобразователей.

При анализе этих звеньев на предмет зависимости длительности сигнала прямоугольной, треугольной и пилообразной форм от постоянного времени звена было выявлено, что не все звенья могут быть использованы в качестве ИИП. Сопоставление импульсных сигналов различной формы по их эффективности показало, что лучше всего использовать импульсный сигнал прямоугольной формы.

Сравнение типовых звеньев ИИП дало возможность сделать вывод, что целесообразнее всего в качестве первичного измерительного преобразователя использовать апериодическое звено первого порядка. При выборе оптимального звена руководствовались максимумом диапазона линейной части статической характеристики и максимумом чувствительности.

Таким образом, доказана возможность построения измерительно-го преобразователя, питаемого прямоугольным импульсным сигналом, входным параметром которого будет сопротивление R (кондуктометрический ИП) или емкость C (диэлектрический ИП) первичного измерительного преобразователя, включенного в апериодическое звено первого порядка, а выходным — длительность импульса, прошедшего через это звено.

Экспериментальная проверка подтвердила возможность использования апериодического звена первого порядка и прямоугольного импульсного напряжения питания для измерения удельной электрической проводимости (УЭП) растворов.

График зависимости значений длительности выходного сигнала от постоянной времени апериодического звена первого порядка при про-

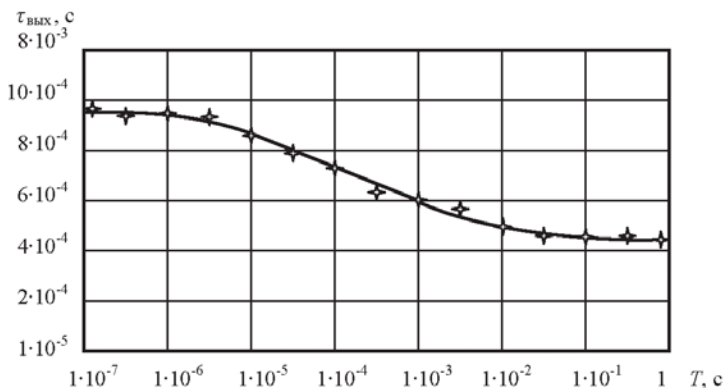


Рис. 3. График зависимости длительности выходного сигнала $\tau_{\text{вых}}$ от постоянной времени T апериодического звена первого порядка на частоте 1 кГц при длительности прямоугольного входного сигнала $1 \cdot 10^{-3}$ с

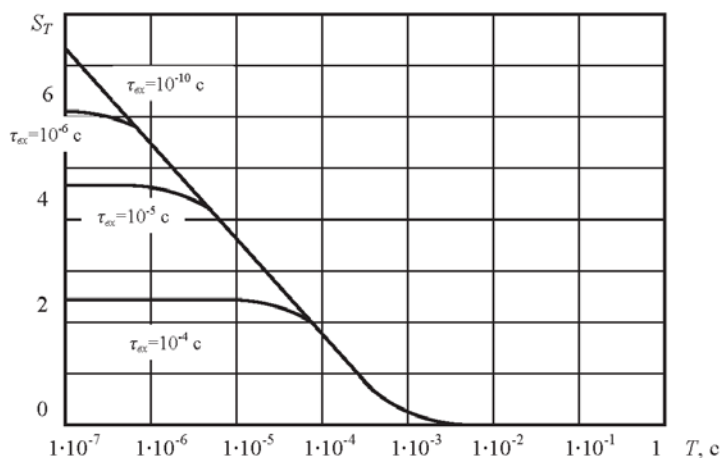


Рис. 4. Зависимость чувствительности ИИП $S_T = f(T)$ на частоте 1 кГц

хождении через него импульсного сигнала прямоугольной формы с частотой 1 кГц и длительностью $1 \cdot 10^{-3}$ с изображен на рис. 3.

Зависимость чувствительности S_T ИИП от постоянной времени звена T в диапазоне от $1 \cdot 10^{-7}$ до 1 с для апериодического звена первого порядка на частоте 1 кГц при входном импульсном сигнале длительностью $\tau_{\text{вх}} = 1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-4}$ с приведена на рис. 4.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований был построен импульсный кондуктометр [3], структурная схема которого приведена на рис. 5.

На вход ИИП поступает импульсный сигнал прямоугольной формы фиксированных длительности, скважности, амплитуды и частоты от генератора прямоугольных импульсов.

Пройдя через ИИП, сигнал искажается, т.е. изменяется его форма, а как следствие, — амплитуда и длительность импульса.



Рис. 5. Функциональная схема импульсного кондуктометра

Далее сигнал поступает на компаратор напряжения, где восстанавливается его первоначальная форма таким образом, что сигнал, прошедший через компаратор, отличается от первоначального импульсного сигнала только своей скважностью. Таким образом, мы имеем сигнал, в котором все изменения формы связаны с длительностью.

Восстановленный сигнал поступает на управляемый генератор прямоугольных импульсов, где из него формируются пачки импульсов, пропорциональные информативной составляющей импульсного сигнала, т.е. его длительности.

Далее пачки импульсов поступают на устройство управления циклом измерения и согласования с блоком цифровой индикации, который управляет процессом запуска цикла измерения и цифровой индикацией контактного кондуктометра.

После чего сигнал измерительной информации поступает на счетчик импульсов блока цифровой индикации.

На рис. 6 приведена статическая характеристика кондуктометра.

Импульсный кондуктометр предназначен для измерения проводимости водных и неводных растворов кислот, щелочей, солей в диа-

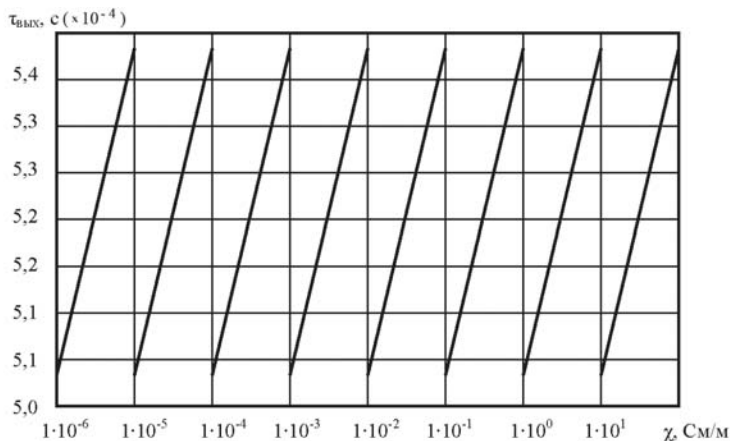


Рис. 6. Статическая характеристика импульсного кондуктометра

пазоне УЭП $10 \cdot 10^{-6} \dots 100$ См/м, предел допускаемой основной приведенной погрешности не превышает 1%, индикация показаний — цифровая, напряжение питания 10 В, масса не более 2 кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2121149. Способ определения параметров датчиков / Бугров А.В., Левин А.В., Латышенко К.П.
2. Л а т ы ш е н к о К.П. Совершенствование низкочастотной контактной кондуктометрии // Тр. МГАХМ / Состояние и перспективы развития научных работ в химическом машиностроении. – М.: МГАХМ, Вып. 1. – 1997. – С. 170–171.
3. Г о л о в и н В.В., Л а т ы ш е н к о К.П. Импульсный контактный кондуктометр // Тр. МГУИЭ. – М.: МГУИЭ, 2001. – С. 13–20.

Статья поступила в редакцию 14.03.2006

Константин Павлович Латышенко родился в 1947 г., окончил Московский автомобильно-дорожный институт в 1971 г. и Московский авиационный институт в 1976 г. Д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой мониторинга и автоматических систем контроля (МАСК) МГУ инженерной экологии. Автор более 120 печатных работ, в том числе 12 монографий в области аналитического приборостроения.

K.P. Latyshenko (b. 1947) graduated from the Moscow Institute for Automobiles and Roads in 1971 and the Moscow Aviation Institute in 1976. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Monitoring and Automatic Check Systems” department of the Moscow State University for Engineering Ecology. Author of more than 120 publications in the field of analytical instrument engineering.



**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
в 2006 г. вышла в свет книга**

Козинцев В.И.

Основы импульсной лазерной локации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.

Изложены физические основы импульсной лазерной локации. Приведены сведения об оптических свойствах земной атмосферы, отражающих свойствах земной и морской поверхностей и объектов локации. Описаны эффекты, возникающие при распространении лазерных пучков в атмосфере. Рассмотрены методы расчета лазерных сигналов на трассе с отражением от неровной земной и взволнованной морской поверхностей, от светоотражателей и от объектов сложной формы. Описаны помехи в системах лазерной локации. Изложены теоретические основы приема лазерных сигналов. Приведены примеры лазерных локационных систем различного назначения и описаны их основные элементы. Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который читают авторы в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, обучающихся по направлению “Оптехника”, а также для научных работников и инженеров приборостроительного профиля.

По вопросам приобретения обращаться по тел. 263-60-45;
e-mail: press@bmstu.ru