

**Перспективный помехозащищённый контактный кондуктометр  
с импульсным измерительным преобразователем**

к.т.н. Головин В.В., д.т.н. проф. Латышенко К.П.  
Университет Машиностроения  
8 (499) 267-0746  
dealmark2009@yahoo.com

*Аннотация.* Описан перспективный метод измерения удельной электрической проводимости. Показана возможность исключения влияния амплитудной помехи на информативную составляющую выходного сигнала. Выбраны оптимальная структура и параметры импульсного измерительного преобразователя. Создан макет контактного кондуктометра.

*Ключевые слова:* импульсный, кондуктометр, преобразователь

Контактные кондуктометры благодаря простоте конструкции, надёжности, точности и удобству в использовании нашли широкое применение для анализа свойств жидкостей в химической, электронной, микробиологической, машиностроительной и других отраслях промышленности.

Импульсный сигнал при прохождении через электрическую цепь искажается (см. рисунок 1), вследствие чего меняет свою первоначальную форму, амплитуду, длительность и т.п. Характер этих искажений и их величина связана как с параметрами исходного импульсного сигнала, так и электрической цепи. Следовательно, при фиксированной форме и величине импульсного сигнала его искажения связаны только с параметрами электрической цепи, а конкретнее – с удельной электрической проводимостью (УЭП). Длительность прямоугольного импульса, прошедшего через апериодическое звено первого порядка, описывается выражением [1]

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

где  $\tilde{t}_1$  и  $\tilde{t}_2$  – время нарастания и спада импульса соответственно;  $\tau$  – длительность входного импульсного сигнала;  $\theta$  – период сигнала;  $T = RC$  – постоянная времени апериодического звена первого порядка.

Из формулы (1) следует, что длительность сигнала, прошедшего через импульсный измерительный преобразователь (ИИП), есть функция постоянной времени апериодического звена первого порядка, таким образом можно записать:

$$\tau_{\text{ВЫХ}} = F(T) |_{\tau, \theta = \text{const}}. \quad (2)$$

Сопротивление раствора между электродами измерительной ячейки равно:

$$R = \frac{A}{\chi_0}, \quad (3)$$

где  $A$  – постоянная измерительной ячейки;  $\chi_0$  – УЭП раствора.

С учетом (3) получим зависимость длительности выходного сигнала от УЭП:

$$\tau_{\text{ВЫХ}} = F \left( \frac{A \cdot C}{\chi_0} \right). \quad (4)$$

При условии постоянства электрической ёмкости ИИП и постоянной электрохимической ячейки имеем:

$$\tau_{\text{ВЫХ}} = F_1(\chi_0) |_{A, C = \text{const}}. \quad (5)$$

Таким образом, длительность импульсного сигнала прямоугольной формы, прошедшего через апериодическое звено первого порядка, есть функция УЭП раствора электролита.

Тогда выражение (1) можно переписать в виде [2]:

$$\tau_{\text{вых}} = \theta + \frac{AC}{\chi_0} \ln \left[ \frac{\theta - \tau}{\tau} \frac{e^{\tau\chi_0/(AC)} - 1}{e^{\theta\chi_0/(AC)} - e^{\tau\chi_0/(AC)}} \right]. \quad (6)$$

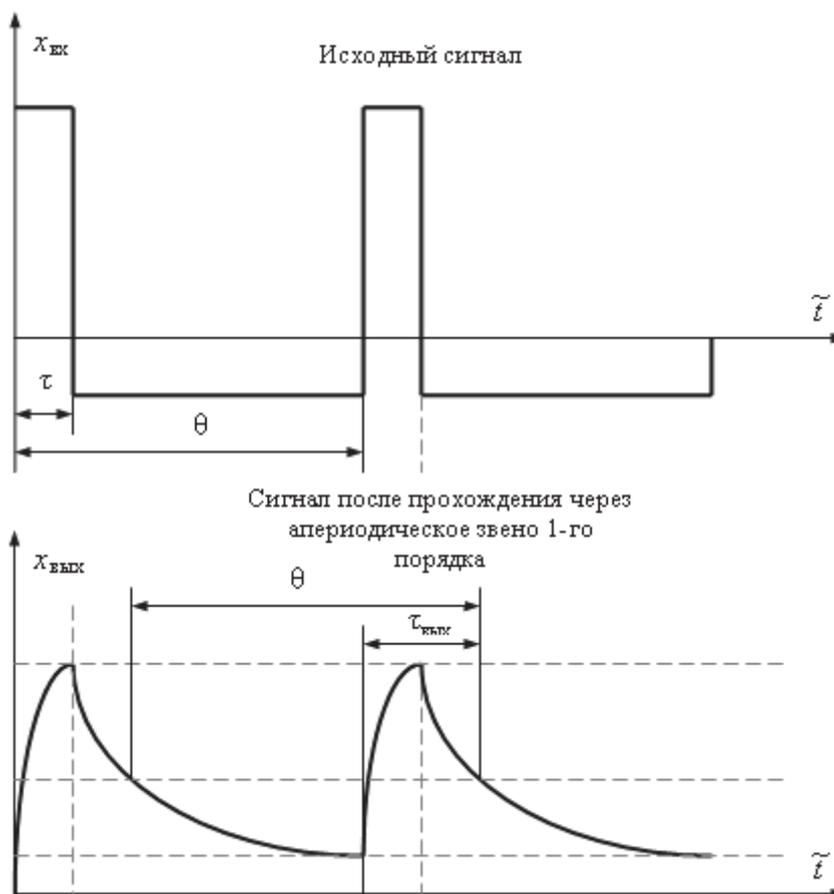


Рисунок 1. Искажение импульсного сигнала типа «меандр»

Чувствительность ИИП к УЭП равна [3]:

$$S_{\chi_0} = -\frac{AC}{\chi_0^2} \ln \left[ \frac{\theta - \tau}{\tau} \frac{e^{\frac{\tau\chi_0}{CA}} - 1}{e^{\frac{\theta\chi_0}{CA}} - e^{\frac{\tau\chi_0}{CA}}} \right] + \frac{\tau}{\chi_0} \frac{\frac{\tau\chi_0}{CA}}{e^{\frac{\tau\chi_0}{CA}} - 1} - \frac{1}{\chi_0} \frac{\theta e^{\frac{\theta\chi_0}{CA}} - \tau e^{\frac{\tau\chi_0}{CA}}}{e^{\frac{\theta\chi_0}{CA}} - e^{\frac{\tau\chi_0}{CA}}}. \quad (7)$$

ИИП могут быть реализованы на различных типовых звеньях: апериодических 1-го порядка, дифференциальных со статизмом и с астатизмом, неминимально-фазовом и т.д. Были получены математические модели статических характеристик и погрешностей ИИП (таблица 1), реализующих описанный выше способ, построенные по различным схемам и использующие различные импульсные сигналы.

Сравнение линейных участков диапазонов измерений УЭП типовых звеньев ИИП показало, что целесообразно в качестве модели ИИП использовать апериодическое звено первого порядка. Его особенностью является то, что на частоте, например, 1 кГц при длительности входного сигнала  $\tau_{\text{вх}} = 1 \cdot 10^{-3}$  с оно имеет максимальную чувствительность к УЭП.

Из формулы (1) следует, что:

– при фиксированных  $\theta$  и  $\tau$ , а также  $\theta \neq 2\tau$  длительность выходного сигнала  $\tau_{\text{вых}}$  является функцией только постоянной времени звена и, следовательно, определяется только элементами, составляющими это звено;

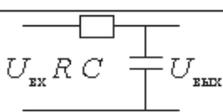
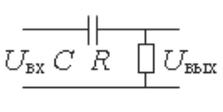
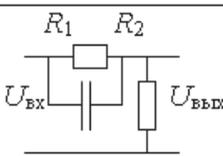
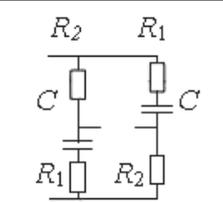
– длительность выходного импульса  $\tau_{\text{вых}}$  не зависит от амплитуды входного импульса и

коэффициента усиления апериодического звена, что свидетельствует о нечувствительности к этим параметрам и амплитудным помехам;

– можно построить ИИП, питаемый прямоугольным импульсным сигналом с  $\theta \neq 2\tau$ , входным параметром которого будет сопротивление  $R$  (кондуктометрический ИП) или ёмкость  $C$  (диэлькометрический ИП) ПИП, включённые в апериодическое звено первого порядка, а выходным – длительность импульса, прошедшего через это звено.

Таблица 1

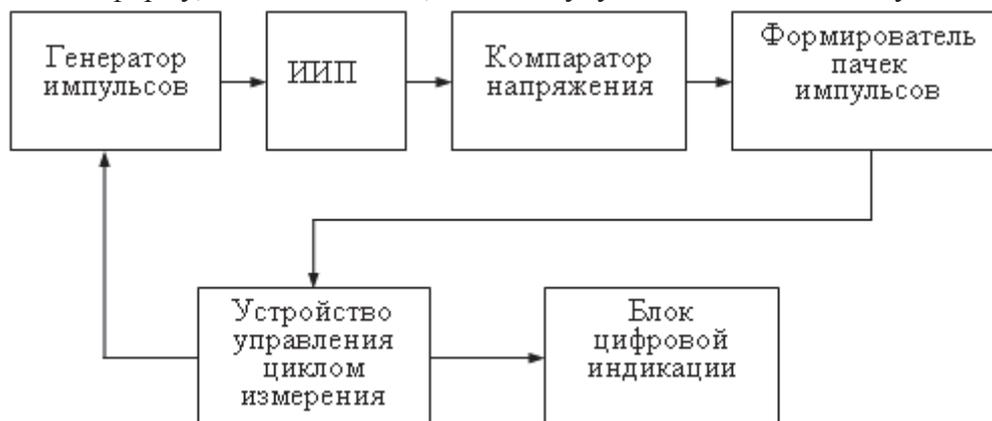
Математические модели СХ и модели погрешности ИИП

Звено	Структурная схема ИИП	Математическая модель СХ $\tau_{\text{ВЫХ}} = F(\tau, \tau_{\text{ВЫХ}}, \theta, T)$	Модель погрешности (СКО) $\sigma = \sqrt{(S_\tau \cdot \sigma_\tau)^2 + (S_\theta \cdot \sigma_\theta)^2 + (S_T \cdot \sigma_T)^2 + \sigma_\xi^2}$
Апер. 1-го порядка	 $W(p) = \frac{K}{1+Tp}$	$\tau_{\text{ВЫХ}} = \theta + T \ln\left(\frac{\theta - \tau}{\tau}\right) \cdot \frac{e^{\tau/T} - 1}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}$	$S_\tau = \frac{T\theta}{(\tau - \theta)\tau} + \frac{e^{\tau/T}(e^{\theta/T} - 1)}{(e^{\tau/T} - 1)(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})}$ $S_\theta = \frac{T}{\theta - \tau} - \frac{e^{\tau/T}}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}$ $S_T = \ln\left[\frac{\theta - \tau}{\tau} \cdot \frac{e^{\tau/T} - 1}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}\right] + \frac{\tau e^{\theta/T}(\theta - \tau e^{\tau/T})}{T(\theta - \tau)(e^{\tau/T} - 1)(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})}$
Дифф. с астатизмом	 $W(p) = \frac{Tp}{1+Tp}$	$\tau_{\text{ВЫХ}} = \tau - T \ln\left[\frac{\tau}{T(e^{\tau/T} - 1)}\right]$	$S_\tau = \frac{T + \tau}{T} - \frac{e^{\tau/T}}{T(e^{\tau/T} - 1)}$ $S_T = -1 - \frac{\tau e^{\tau/T}}{T(e^{\tau/T} - 1)}$ $S_\theta = 0$
Дифф. со статизмом	 $W(p) = \frac{K(1+T_0p)}{1+Tp}$	$\tau_{\text{ВЫХ}} = T \ln\left(\frac{\theta}{\theta - \tau} \cdot \frac{T - T_0}{T}\right) \cdot \frac{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}{e^{\theta/T} - 1}$ $T_0 = R_2 C,$ $T = T_0 R_2 / (R_1 + R_2)$	$S_\tau = \frac{T}{(\theta - \tau)^2} - \frac{e^{\tau/T}}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}$ $S_\theta = -\frac{T\tau}{\theta(\theta - \tau)} + \frac{e^{\theta/T}(e^{\tau/T} - 1)}{(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})(e^{\theta/T} - 1)}$ $S_T = \ln\left[\frac{\theta(T - T_0)}{T(\theta - \tau)}\right] + \frac{T^2}{T - T_0} + \frac{\theta e^{\theta/T} + \tau e^{\tau/T}}{T(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})} + \frac{\theta e^{\theta/T}}{T(e^{\theta/T} - 1)}$
Неминимально-фазовое	 $W(p) = \frac{K(1-T_1p)}{1+T_2p}$	$\tau_{\text{ВЫХ}} = T_2 \ln\left(\frac{\theta - \tau}{\tau}\right) \cdot \frac{e^{\theta/T}(e^{\tau/T} - 1)}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}$ $T_1 = (R_2 - R_1)C$ $T_2 = (R_1 + R_2)C;$ $R_2 > R_1; T_2 > T_1$	$S_\tau = \frac{T_2\theta}{(\tau - \theta)\tau} + \frac{e^{\tau/T}(e^{\theta/T} - 1)}{(e^{\tau/T} - 1)(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})}$ $S_\theta = \frac{T_2}{\theta - \tau} - \frac{e^{\tau/T}}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}$ $S_T = \ln\left[\frac{\theta - \tau}{\tau} \cdot \frac{e^{\theta/T}(e^{\tau/T} - 1)}{e^{\theta/T} - e^{\tau/T}}\right] + \frac{\tau e^{\tau/T}(\theta(e^{\tau/T} - 1) - \tau(1 - e^{\tau/T}))}{T(\theta - \tau)(e^{\tau/T} - 1)(e^{\theta/T} - e^{\tau/T})}$

На основании проведённых исследований был сконструирован ИИП, включающий в себя измерительную ячейку, таким образом, чтобы он мог быть сведён к стандартному апе-

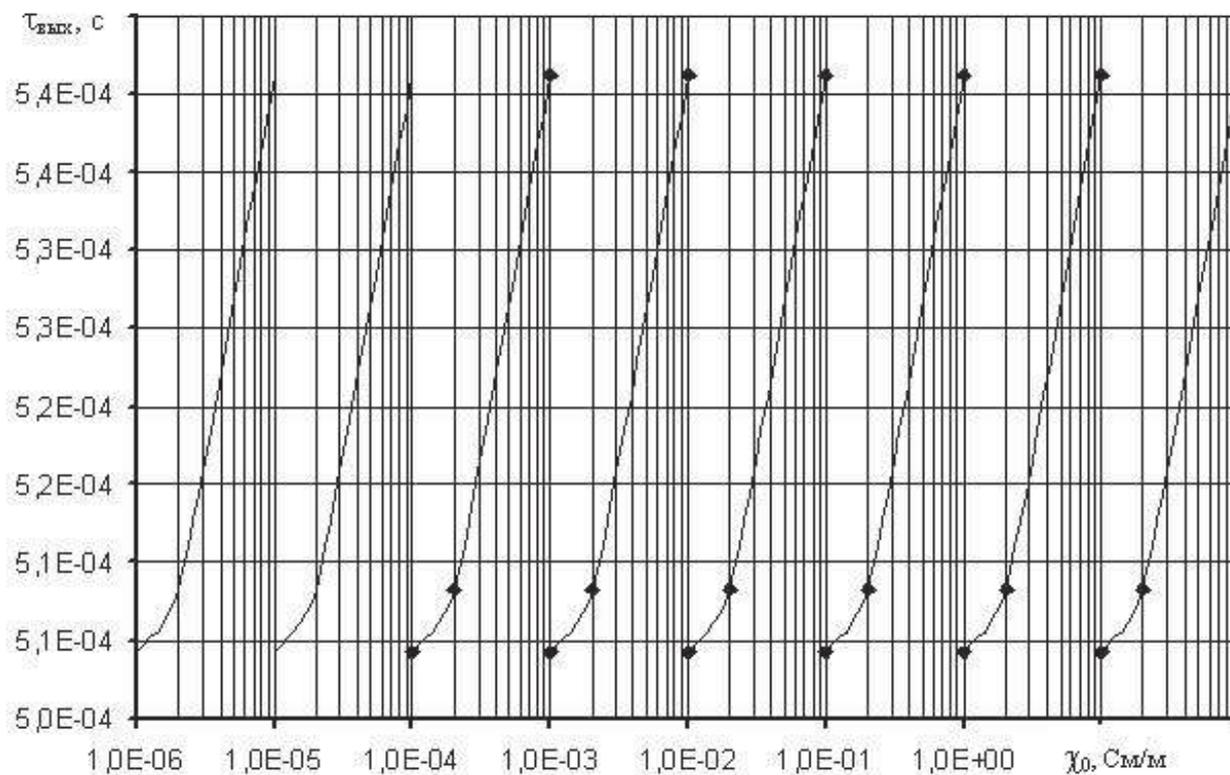
риодическому звену с постоянной времени  $T = 10^{-7} \dots 1$  с.

Прибор работает следующим образом (см. рисунок 2): на вход ИИП поступает импульсный сигнал прямоугольной формы, фиксированной длительности, скважности, амплитуды и частоты от генератора прямоугольных импульсов. Пройдя через ИИП, сигнал искажается, т.е. изменяет свою форму, а как следствие, – амплитуду и длительность импульса.



**Рисунок 2. Функциональная схема контактного кондуктометра с использованием ИИП**

Далее сигнал идет на компаратор напряжения, где восстанавливается первоначальная форма сигнала таким образом, что сигнал, прошедший через компаратор, отличается от первоначального импульсного сигнала только своей скважностью. Таким образом, мы имеем сигнал, в котором искажение его формы связано с информативным параметром, т.е. длительностью.



**Рисунок 3. График СХ контактного кондуктометра**

Восстановленный сигнал поступает на управляемый генератор прямоугольных импульсов, где из него формируются пачки импульсов. Далее пачки импульсов идут на устройство

управления циклом измерения и согласования с блоком цифровой индикации, который управляет процессом запуска цикла измерения и цифровой индикацией контактного кондуктометра.

На рисунке 3 изображён график СХ контактного кондуктометра на частоте 1 кГц.

Таким образом, был реализован метод использования изменения длительности импульсного сигнала в качестве информативного параметра при его прохождении через RC-цепь с датчиком УЭП.

В результате структурной и параметрической оптимизации была получена структура ИИП в виде апериодического звена первого порядка с диапазоном измерений постоянной времени звена  $T = 10^{-3} \dots 10^{-2}$  с и импульсный сигнал типа «меандр» частотой 1 кГц и длительностью  $10^{-3}$  с.

На основе схемы был разработан макет контактного кондуктометра, который обеспечивает возможность измерения УЭП в диапазоне  $1 \cdot 10^{-6} \dots 100$  См/м с пределом допускаемой основной погрешности, не превышающим 1%.

### Выводы

1. Реализован метод измерения длительности импульсного сигнала в качестве информативного параметра при прохождении через RC-цепь с датчиком УЭП.

2. Показано, что за счёт использования импульсного сигнала формы «меандр» возможно исключение влияния амплитудной помехи на информативную составляющую выходного сигнала.

3. Основные измерительные схемы ИИП для измерения УЭП, реализующие частотный метод измерения, могут быть сведены к апериодическому звену 1-го порядка, дифференцирующим звеньям со статизмом и с астатизмом, неминимально-фазовому звену и др.

4. На основе критерия линейности статической характеристики ИИП с максимальной чувствительностью, выбрана оптимальная структура, а начало диапазона решено выбирать путём изменения параметров ( $R$ ,  $C$ ) структуры ИИП.

5. Для сигналов питания ИИП различных типов («меандр», треугольной и пилообразной формы) определён характер изменения их параметров при прохождении через ИИП. С помощью критерия было найдено оптимальное сочетание структуры ИИП, параметров и формы импульсного сигнала:

– апериодическое звено 1-го порядка с постоянной времени  $T = 1 \cdot 10^{-7} \dots 1$  с.

– импульсный сигнал типа «меандр» с частотой 1 кГц и длительностью  $\tau_{\text{вх}} = 1 \cdot 10^{-10} \dots 1 \cdot 10^{-3}$  с.

6. В результате структурной и параметрической оптимизации была получена структура ИИП в виде апериодического звена первого порядка с диапазоном измерений постоянной времени звена  $T = 1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$  с и импульсный сигнал типа «меандр» с частотой 1 кГц и длительностью  $1 \cdot 10^{-3}$  с. Кроме того, подбором параметра звена  $C$  была осуществлена разбивка диапазона измерений УЭП на 7 поддиапазонов.

7. Создан макет контактного кондуктометра, который обеспечивает возможность измерения УЭП с пределом допускаемой основной погрешности не более 1% в диапазоне  $1 \cdot 10^{-6} \div 100$  См/м.

### Литература

1. Патент РФ № 2121149. Импульсный измерительный преобразователь // Бугров А.В., Латышенко К.П., Левин А.В., Б.И. № 30, 1998.
2. Павлюченко И.А., Головин В.В. Емкостные датчики типа материалов // Научная конференция студентов и молодых учёных МГУИЭ. – М.: МГУИЭ, 2011. – С.137 – 138.
3. Головин В.В. Использование широтно-импульсной модуляции для борьбы с амплитудными помехами на примере контактного кондуктометра // Известия МГТУ «МАМИ». – М., МГТУ «МАМИ», № 2 (14), 2012. Т. 4. С. 79 – 81.