

**В.К. ГУСЕЛЬНИКОВ**, канд. техн. наук, **Е.А. БОРИСЕНКО**, аспирант,  
**С.А. ЛИТВИНЕНКО**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ПЬЕЗОИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ЕГО ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ**

Знайдено передаточну функцію п'єзовипромінювача і показано, що при наявності в напрузі живлення імпульсів з експонентними фронтами у вихідному сигналі пристрій також з'являється експонентна складова.

The transmission function of piezo-oscillator is found and it is rotined that at presence of in tension of feed of impulses with exponential fronts in the initial signal of device an exponential constituent appears also.

**Постановка проблеми.** Задача точного и достоверного измерения временных интервалов была и остается достаточно актуальной. В частности такая задача становится при измерении расходных характеристик (объем, расход, уровень) жидких и сыпучих веществ. По сути дела, информативной величиной в задачах такого рода является временной интервал, в течение которого ультразвуковой сигнал передается от излучателя к приемнику. Поэтому наибольшая составляющая погрешности определяется точностью фиксации момента времени, в который сигнал поступит на приемник.

**Анализ литературы** [1, 2, 3] показывает, что основное внимание уделяется таким вопросам: построение измерительной системы в целом; выбор первичного измерительного преобразователя. Наиболее близко к затрагиваемой теме подошел автор статьи [3], в которой изучается модель пьезоэлектрического излучателя, однако вопрос о влиянии формы сигнала на выходной сигнал излучателя также не рассматривается.

**Цель статьи** – исследовать влияние формы напряжения питания пьезоизлучателя, в частности, когда передний и задний фронты импульсов этого напряжения изменяются по экспоненте, на выходной сигнал пьезоизлучателя.

В качестве примера рассмотрим пьезоизлучатель с рабочей частотой 40 кГц и синусоидальным выходным сигналом  $Y(t)$ . Напряжение питания  $X(t)$  при этом представляет собой последовательность прямоугольных импульсов длительностью  $t_n$  и скважностью, равной двум. Временные диаграммы показаны на рис. 1.

Передаточная функция пьезоизлучателя:

$$K(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}, \quad (1)$$

где  $Y(p)$  - операторное изображение выходной величины;  $X(p)$  – операторное

изображение входной величины.

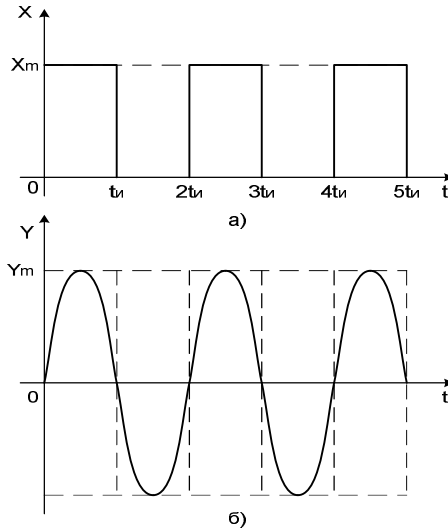


Рис. 1. Временные диаграммы: а – напряжения питания пьезоизлучателя; б – выходного сигнала пьезоизлучателя.

Входную величину во временной области представим следующим образом

$$x(t) = X_m \cdot 1(t) - X_m \cdot 1(t - t_n), \quad (2)$$

где  $1(t)$  – единичная ступенчатая функция;  $1(t - t_n)$  – запаздывающая на отрезок времени  $t_n$  единичная ступенчатая функция.

Согласно свойству линейности [4,5] найдем операторное изображение входного сигнала следующим образом

$$L[x(t)] = L[X_m \cdot 1(t)] - L[X_m \cdot 1(t - t_n)]. \quad (3)$$

Первое слагаемое в (3) запишем в виде

$$L[X_m \cdot 1(t)] = \frac{X_m}{p},$$

а второе – с учетом теоремы запаздывания [4,5], в виде

$$L[X_m \cdot 1(t - t_n)] = \frac{X_m}{p} \cdot e^{-pt_n},$$

где  $p$  – оператор Лапласа.

В соответствии с выражением (3) получим:

$$X(p) = L[x(t)] = \frac{X_m}{p} (1 - e^{-pt_n}). \quad (4)$$

Операторное изображение синусоидальной функции времени [4,5],

записывается следующим образом:

$$Y(p) = Y_m \cdot \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (5)$$

После подстановки выражений (4) и (5) в формулу (1) получим:

$$K(p) = \frac{Y_m \cdot \omega \cdot p}{(p^2 + \omega^2) \cdot X_m \cdot (1 - e^{-pt_e})}, \quad (6)$$

где  $\omega$  – круговая частота синусоидального сигнала на выходе пьезоизлучателя.

В общем случае

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (7)$$

где  $T$  – период, а в данном случае

$$\omega = \frac{2\pi}{2t_e} = \frac{\pi}{t_e}.$$

С учетом выражения (7) передаточную функцию (6) запишем следующим образом

$$K(p) = \frac{K \cdot T \cdot p \cdot Y_m}{(K^2 T^2 p^2 + 1) \cdot (1 - e^{-pt_e}) \cdot X_m}, \quad (8)$$

где  $K = \frac{1}{2\pi}$ .

Определим выходной сигнал пьезоизлучателя с полученной передаточной функцией, считая, что на его вход подается последовательность импульсов с экспоненциальными фронтами, что весьма часто бывает на практике. Временная диаграмма входного сигнала показана на рис. 2.

Сигнал на переднем фронте импульса можно описать уравнением

$$x_n(t) = X_m(1 - e^{-t/\tau}), \quad 0 < t < t_e,$$

а штриховую «падающую» экспоненту уравнением

$$x_c(t) = -X_m(1 - e^{-\frac{t-t_e}{\tau}}), \quad t_e < t < 2t_e$$

Следовательно, в течение периода  $T$  входной сигнал  $x(t)$  излучателя изменяется следующим образом

$$x(t) = x_n(t) + x_c(t) = X_m \left[ e^{-\frac{t-t_e}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right]. \quad (9)$$

Найдем изображение входного сигнала (9) с учетом свойства линейности операторного изображения [4,5]

$$X(p) = L[X_m e^{-\frac{-(t-t_e)}{\tau}}] - L[X_m e^{-\frac{t}{\tau}}] = \frac{X_m \alpha}{p(p + \alpha)} (e^{-pt_e} - 1), \quad (10)$$

где  $\alpha = \frac{1}{\tau}$ .

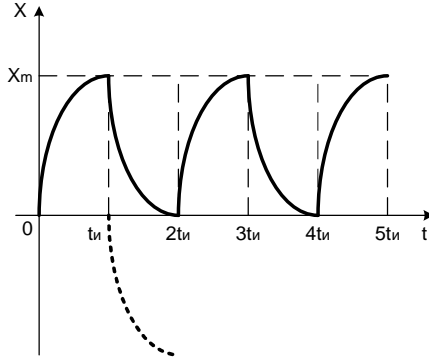


Рис. 2. Временная диаграмма входной последовательности импульсов с экспоненциальным фронтом

Далее определим изображение выходной величины, используя (8) и (10)

$$Y(p) = K(p) \cdot X(p) = -\frac{Y_m \alpha K T}{(p + \alpha)(K^2 T^2 p^2 + 1)} \quad (11)$$

Выходной сигнал  $y(t)$  пьезоизлучателя найдем по теореме разложения [4,5]

$$y(t) \doteq Y(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}, \quad (12)$$

где  $F_1(p) = -Y_m \alpha K T$  - полином числителя;  $F_2(p) = (p + \alpha)(K^2 T^2 p^2 + 1)$  - полином знаменателя.

Найдем корни полинома  $F_2(p)$ , приравняв его нулю  $(p + \alpha)(K^2 T^2 p^2 + 1) = 0$ , откуда  $p_1 = -\alpha$ ;  $p_2 = j \frac{1}{K T}$ ;  $p_3 = -j \frac{1}{K T}$ , где  $j = \sqrt{-1}$  - мнимая единица.

Поскольку среди корней полинома  $F_2(p)$  имеются комплексно-сопряженные корни, то используем следующую версию теоремы разложения [4,5]

$$y(t) = \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + 2 \left[ j \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t} \right]_{jm}. \quad (12)$$

Найдем производную знаменателя

$$F_2'(p) = \frac{dF_2(p)}{dp} = 3K^2T^2p^2 + 2pK^2T^2\alpha + 1;$$

$$F_2'(p_1) = 3K^2T^2\alpha^2 - 2\alpha^2K^2T^2 + 1 = K^2T^2\alpha^2 + 1;;$$

$$F_2'(p_2) = j2KT\alpha - 2 = 2(jKT\alpha - 1).$$

Подставляя соответствующие значения полинома и производных в формулу (12), получим

$$y(t) = -\frac{Y_m\alpha KT}{K^2T^2\alpha^2 + 1}e^{-\alpha t} + 2 \left[ j \frac{-Y_m\alpha KT}{2(jKT\alpha - 1)} e^{j\frac{1}{KT}t} \right]_{jm} = \quad (13)$$

$$= -\frac{Y_m\alpha KT}{K^2T^2\alpha^2 + 1}e^{-\alpha t} + \frac{Y_m\alpha KT}{\sqrt{1 + K^2T^2\alpha^2}} \sin\left(\frac{t}{KT} - \arctg KT\alpha + 90^\circ\right).$$

Учитывая, что  $K = \frac{1}{2\pi}$  и  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  получим  $KT = \frac{1}{\omega}$ .

Тогда выражение (13) удобно записать так:

$$y(t) = \frac{Y_m\alpha KT}{\sqrt{1 + K^2T^2\alpha^2}} \left[ \sin(\omega t - \arctg KT\alpha + 90^\circ) - \frac{e^{-\alpha t}}{\sqrt{1 + K^2T^2\alpha^2}} \right].$$

Следовательно, при питании пьезоизлучателя импульсным напряжением с экспоненциальными фронтами в выходном сигнале излучателя также появляется экспоненциальная составляющая, которая может повлиять на точность преобразования информации негативно.

**Выводы.** Для приближения выходного сигнала пьезоизлучателя к синусоиде, импульсы питающего напряжения устройства следует приблизить к прямоугольной форме.

В дальнейшем представляется целесообразным исследовать влияние формы питающего напряжения пьезоизлучателя на точность измерителя уровня, в состав которого входят рассмотренные выше источник питания и пьезоизлучатель.

**Список литературы:** 1. *Ермолов И.Н.* Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля. - М.: Машиностроение, 1986.-277 с. 2. *Кажис Р.И.* Ультразвуковые информационно-измерительные системы. Вильнюс: Моклас, 1986.-216 с. 3. *Хамидуллин В.К.* Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы Науч. ред. В.М.Кушуй. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.-245 с. 4. *Эйдерман В.Я.* Основы теории функций комплексного переменного и операционного исчисления. М.: Физматлит 2002 256 с. 5. *Прудников А.П.* Операционное исчисление совершенных операторов. – М.: ВЦ РАН, 1992, 98с.

Поступила в редколлегию 30.05.08