

# УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне, Е.В. Ильченко**

*Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова", Бийск*

Статья посвящена созданию системы контроля температуры пьезоэлектрических преобразователей, составляющих основу ультразвуковых колебательных систем технологических аппаратов. Основной особенностью разработанной системы контроля температуры является использование в качестве чувствительного элемента самого пьезоэлектрического преобразователя. Такой подход к решению проблемы позволил реализовать систему контроля без внесения конструктивных изменений в существующие ультразвуковые аппараты.

*Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, ультразвуковой аппарат, контроль температуры.*

## ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковой технологический аппарат состоит из двух основных узлов: электронного генератора ультразвуковой частоты и ультразвуковой колебательной системы (УЗКС). Электронный генератор, предназначен для преобразования электрической энергии промышленной или бытовой сети в электрические колебания ультразвуковой частоты, установления и поддержания требуемых параметров амплитуды выходного сигнала, поиск и удержание в процессе работы резонансной частоты колебательной системы, обнаружение нерегламентных режимов работы ультразвукового аппарата и принятие решения о приостановке работы. Ультразвуковая колебательная система предназначена для преобразования энергии электрических колебаний в механические колебания ультразвуковой частоты. Ультразвуковая колебательная система состоит из электромеханического преобразователя, волноводной конструкции и рабочего инструмента, предназначенного для введения ультразвуковых колебаний требуемой интенсивности в обрабатываемую технологическую среду. В качестве электромеханического преобразователя, как правило, применяют преобразователи магнитострикционного или пьезоэлектрического типов. Наибольшее распространение, в настоящее время, получили пьезоэлектрические преобразователи.

Современные пьезоэлектрические преобразователи строятся на основе кольцевых элементов из пьезокерамики. Пьезокерамика получила широкое распространение благодаря относительно низкой стоимости, легкости изготовления из нее излучателей различной формы. Одним из ограничений, накладываемых на ультразвуковые колебательные системы, на основе пьезоэлектрических преобразователей, являются тре-

бования к температурному режиму работы. Это ограничение связано с физическими свойствами пьезокерамических материалов: при повышении температуры пьезокерамики вплоть до температуры Кюри, преобразовательные свойства и КПД пьезокерамики уменьшаются, а при достижении температуры Кюри – полностью исчезают, в виду необратимых процессов происходящих в пьезоэлектрическом материале [1].

В связи с этим, для обеспечения оптимальных режимов работы и исключения перегрева, возникает необходимость контроля температуры пьезопреобразователей при настройке и эксплуатации аппаратов.

## ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К НАГРЕВУ УЗКС

К перегреву пьезокерамического преобразователя может приводить целый ряд факторов, а именно:

- выделение тепла, связанное с внутренним механическим трением в материале пьезокерамики;
- нагрев пьезокерамики, вызванный протеканием через нее переменного тока;
- нагрев пьезокерамики, связанный с передачей тепла от материала пассивного звена преобразователя и рабочего инструмента;
- нагрев обрабатываемой технологической среды.

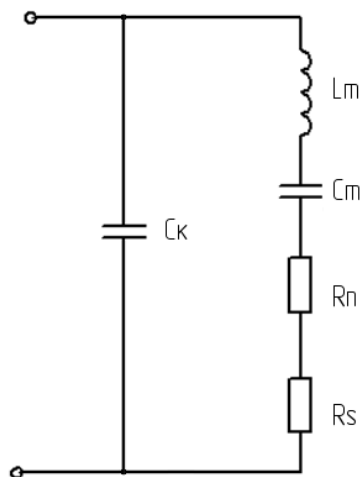
## ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

В разработанном устройстве контроля температуры ультразвуковых пьезопреобразователей, в качестве узла выделения информационного сигнала используются токовые датчики, один из которых включен последовательно в цепь питания пьезопреобразователя, а второй последовательно в цепь опорной емкости, подключенной параллельно пьезопреобразователю, величина опорной емкости равна электрической емкости неработающего преобразователя, выходы токо-

вых датчиков соединены с прямым и инверсным входами дифференциального усилителя, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный изменению температуры преобразователя.

В качестве термочувствительного элемента используется сам пьезокерамический элемент, а именно зависимость его электрической емкости от температуры. На работу предлагаемого узла выделения информационного сигнала не влияют свойства технологических сред и их изменения в процессе УЗ воздействия, например, жидких сред по мере развития в них кавитационных явлений, изменения, связанные с износом элементов колебательной системы.

УЗКС с преобразователем пьезоэлектрического типа в соответствии с системой электромеханических аналогий [2] можно представить в виде эквивалентной электрической схемы замещения, представленной на рис. 1.



**Рис. 1.** Физическая эквивалентная схема ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя.

В представленной схеме выделяют две ветви: электрическую и механическую. Электрическая ветвь представляет собой статическую емкость пьезокерамического преобразователя  $C_k$ .

Механическая ветвь содержит последовательно соединенные индуктивные, емкостные и активные элементы, определяемые свойствами обрабатываемой среды. Согласно существующим представлениям [2] индуктивность  $L_m$  эквивалентна колеблющейся массе преобразователя, емкость  $C_m$  – гибкости, активное сопротивление включает два слагаемых:  $R_n$  – соответствующее сопротивлению механических потерь;  $R_s$  – соответствующее сопротивлению излучения.

При работе УЗКС на резонансной частоте ток, потребляемый ультразвуковой колебательной системой, складывается из тока механической ветви и тока электрической ветви.

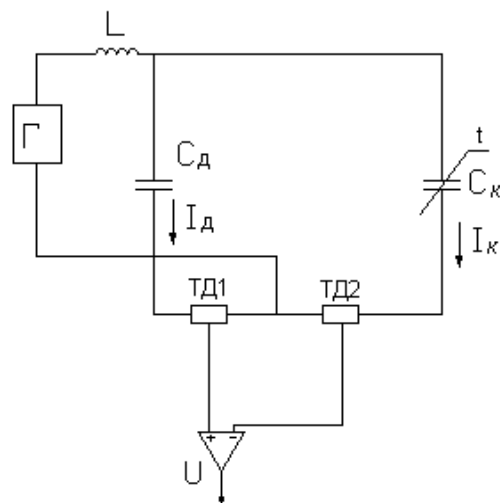
В случае работы УЗКС на нерезонансной частоте весь ток, потребляемый УЗКС, протекает только через электрическую ветвь, при этом характер сопротивления является чисто емкостным, а величина этой емко-

сти определяется собственной электрической емкостью пьезокерамических элементов.

Известно, что существует зависимость между диэлектрической проницаемостью материала и его температурой. Следовательно, измеряя емкость пьезоэлектрического преобразователя, можно получить сведения о его температуре.

Наличие зависимости электрического тока (при постоянной частоте и напряжении на емкости), протекающего по емкостному элементу, от его электрической емкости, фактически, позволяет по величине изменения емкостного тока, протекающего через УЗКС (при ее работе на нерезонансной частоте) контролировать емкость и, следовательно, температуру ее пьезокерамических элементов.

Предлагаемая схема узла выделения информационного сигнала, пропорционального температуре пьезокерамических элементов, представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема узла выделения информационного сигнала

Представленная схема состоит из токовых датчиков ТД1 и ТД2, дополнительной электрической емкости  $C_d$ , дифференциального усилителя  $U$ . Элемент  $C_k$  обусловлен статической емкостью пьезоэлектрического преобразователя УЗКС. Элементы  $G$  и  $L$  не относятся к схеме предлагаемого узла измерения и представляют собой генератор электрических колебаний УЗ частоты и согласующий элемент соответственно. Величина емкости элемента  $C_d$  выбирается равной величине емкости  $C_k$ , которая измерена при нормальных условиях. Токовые датчики ТД1 и ТД2 включены последовательно элементам  $C_d$  и  $C_k$  соответственно, и предназначены для выделения сигналов, пропорциональных токам, протекающим по элементам  $C_d$  и  $C_k$ .

В процессе работы ультразвукового генератора  $G$  на частоте отличной от резонансной частоты УЗКС, по элементам  $C_d$  и  $C_k$  начинают протекать электрические токи  $I_d$  и  $I_k$  соответственно, при этом сигналы, формируемые на выходах токовых датчиков ТД1 и ТД2, поступают на прямой и инверсный входы диф-

ференциального усилителя  $U$ . При изменении электрической емкости  $C_K$  (вследствие повышения температуры ультразвуковой колебательной системы) по элементам  $C_K$  и  $C_D$  начинают протекать токи разной величины, что приводит к появлению напряжения на выходе дифференциального усилителя  $U$ . Амплитуда сигнала на выходе дифференциального усилителя равна:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K(U_1 - U_2), \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент усиления дифференциально-го усилителя.

$U_1, U_2$  – амплитуды напряжений, снимаемые с соответствующих токовых датчиков, которые в свою очередь зависят от величины токов, протекающих по емкостным элементам  $C_K$  и  $C_D$ .

Сопротивление емкостных элементов  $C_K$  и  $C_D$  определяется как:

$$Z_K = \frac{1}{\omega C_K}, \quad (2)$$

$$Z_D = \frac{1}{\omega C_D}, \quad (3)$$

где  $\omega$  – циклическая частота сигнала.

Амплитуда электрического тока, протекающего по элементу  $C_K$ , определяется как:

$$I_K = U_{\Pi} / Z_K, \quad (4)$$

а ток, протекающий по элементу  $C_D$ , определяется как:

$$I_D = U_{\Pi} / Z_D, \quad (5)$$

где  $U_{\Pi}$  – амплитуда напряжения на элементах  $C_K$  и  $C_D$

Напряжения  $U_1, U_2$  с выхода токовых датчиков ТД1 и ТД2 определяются как:

$$U_1 = K_1 I_D = K_1 \frac{U_{\Pi}}{Z_D}, \quad (6)$$

$$U_2 = K_2 I_K = K_2 \frac{U_{\Pi}}{Z_K}, \quad (7)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты передачи токовых датчиков ТД1 и ТД2. Отсюда сигнал на выходе дифференциального усилителя равен:

$$U_{\text{ВЫХ}} = KU_{\Pi} \left( \frac{K_1}{Z_D} - \frac{K_2}{Z_K} \right), \quad (8)$$

Коэффициенты передачи токовых датчиков  $K_1$  и  $K_2$  выбираются такими, что при нерезонансном режиме в случае равенства реактивных сопротивлений  $Z_D$  и  $Z_K$  (пьезоэлементы имеют температуру соответствующую нормальным условиям) напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}=0$ . В случае изменения значения реактивного элемента  $Z_K$  (разогрев пьезокерамических элементов УЗКС) напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  начинает увеличиваться.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое техническое решение было реализовано и апробировано в составе ультразвукового аппарата «Нежность» [3], предназначенного для проведения лечебных и косметических процедур, в котором сигнал с выхода дифференциального усилителя  $U$  используется системой управления мощностью генератора для ограничения его мощности в случае критического нагрева ультразвуковой колебательной системы.

Технический результат предлагаемого узла контроля выражается в улучшении узла контроля температуры пьезоэлектрического преобразователя ультразвукового технологического аппарата за счет использования более информативного параметра.

Отличительной особенностью работы ультразвуковых аппаратов с предложенным узлом контроля является необходимость периодического перевода УЗКС в нерезонансный режим работы (для проведения измерений), что занимает около 0,1 сек и для большинства технологий не является критическим.

Предлагаемый узел контроля не предполагает высокой точности измерений температуры, что не снижает ее ценности, поскольку в большинстве случаев необходима информация о приближении к некой (заданной разработчиком) критической температуре, а не точное значение температуры УЗКС в любой момент времени.

Практическая реализация узла контроля в составе технологического аппарата требует минимум материальных затрат, не требует модернизации конструкции УЗКС и реализуется в составе любых УЗ технологических аппаратов с преобразователями пьезоэлектрического типа.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хмелев, В.Н. Система контроля температуры пьезопреобразователей ультразвуковых технологических аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.С. Абраменко, Д.В. Генне, Е.В. Ильченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий №6/3(60). – 2012. – С. 4–7.
2. Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки [Текст] / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 208с, ил.
3. Ультразвуковой массажер серии «Нежность» [Электронный ресурс] Режим доступа [http://www.u-sonic.com/catalog/apparaty\\_meditinskogo\\_naznacheniya/ultrazvukovo\\_y\\_massazher\\_serii\\_nezhnost\\_02/?sphrase\\_id=529](http://www.u-sonic.com/catalog/apparaty_meditinskogo_naznacheniya/ultrazvukovo_y_massazher_serii_nezhnost_02/?sphrase_id=529)

*Хмелев Владимир Николаевич – д.т.н., профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел.(3854)432580, e-mail: vnh@bti.secna.ru*

*Барсуков Роман Владиславович – к.т.н., доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел.(3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru*

*Генне Дмитрий Владимирович – старший преподаватель кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский*

*технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ,  
тел.(3854)432570, e-mail: gdy@bti.secna.ru*

*Ильченко Евгений Владимирович – аспирант кафедры методов  
и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический  
институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел.(3854)432570, e-  
mail: iev@bti.secna.ru*