

Рис. 5

тической оси. На обратном пути свет еще теряет свою интенсивность и в результате на приемный элемент датчика поступает сигнал, ослабленный на  $\geq 75\%$ . Подобная оптическая схема позволяет определять наличие ПЭТ бутылки независимо от того, насколько тонкие и гладкие ее стенки, то есть порог срабатывания датчика значительно отличается от исходного уровня интенсивности излучения (рис. 5).

Если же датчику ЕЗМ-В придется работать в условиях высокой влажности, частой смены температур и загрязненности, то и в этом случае он обеспечит на-

*Скабаро Владимир Юрьевич – менеджер по продукту "Датчики" корпорация "ОМРОН Электроникс".*

*Контактный телефон (495) 648-94-50.*

*Http://www.industrial.omron.ru Email: Vladimir\_Skabaro@eu.omron.com*

## Пассивные устройства ПАВ для дистанционного измерения температуры

Ю.А. Гальперин (ОАО НПП "Эталон")

*Рассмотрены возможности применения пассивных устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в качестве датчиков для дистанционного измерения температуры. Приведены результаты разработки конструктивного макета термочувствительного элемента. Рассмотрены методы технической реализации и произведены расчеты важнейших характеристик системы дистанционного измерения температуры.*

*Ключевые слова: поверхностные акустические волны, датчики, беспроводные измерения температуры, зондирующий радиопульс, термочувствительный элемент.*

Исследованиям в области акустоэлектроники и разработке микроэлектронных устройств ПАВ посвящено множество научных работ. Традиционно устройства ПАВ (полосовые фильтры, линии задержки (ЛЗ), корреляторы) используются в радиосвязи, радиолокации, телевидении.

Возможность применения устройств ПАВ в качестве датчиков физических величин (температура, давление, влажность и др.) также хорошо исследована. Известны датчики на основе ПАВ резонаторов и ПАВ ЛЗ. ПАВ датчики активного типа с частотным и фазовым выходами [1] предполагают наличие активных радиотехнических устройств (автогенератора, смесителя, фазового детектора) и проводного канала связи (коаксиального кабеля, кабеля электропитания). Это обстоятельство ограничивает области их применения узким диапазоном рабочих температур радиотехнического устройства, малой длиной канала связи.

Гораздо больший интерес вызывают системы беспроводного (дистанционного) измерения пассивными ПАВ датчиками физических величин, прежде всего, температуры [2, 3]. Такие системы могут быть применены там, где использование средств контак-

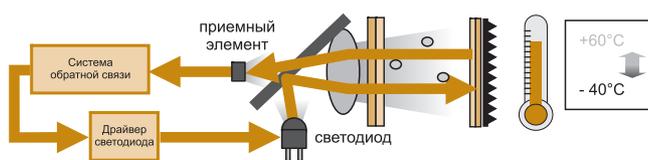


Рис. 6

дную работу благодаря системе автоматической компенсации уровня излучения (рис. 6). Система обратной связи дает сигнал драйверу светодиода на увеличение мощности при недостаточном уровне интенсивности на приемном элементе или же на уменьшение мощности при превышении необходимого уровня.

Обучить этот датчик для работы с любыми ПЭТ бутылками необходимо всего лишь один раз – при установке рефлектора нажатием одной кнопки.

Все представленные технологии реализованы в компактном корпусе формата ЕЗЗ из нержавеющей стали, что делает датчики ЕЗМ просто незаменимыми для применений, где обычные не справятся, а цена простоя оборудования может оказаться слишком высокой.

*Скабаро Владимир Юрьевич – менеджер по продукту "Датчики" корпорация "ОМРОН Электроникс".*

*Контактный телефон (495) 648-94-50.*

*Http://www.industrial.omron.ru Email: Vladimir\_Skabaro@eu.omron.com*

ной или радиационной термометрии затруднительно либо невозможно. Объектами дистанционных температурных измерений могут быть, например, разрядные устройства высоковольтных линий электропередач, тормозные колодки электропоездов, подшипники роторов электродвигателей. Комбинированные пассивные ПАВ датчики резонаторного типа используются для измерения температуры и давления в автомобильных шинах (технология TPMS) [4].

Несмотря на то, что иностранные разработки в области дистанционных ПАВ датчиков и измерительных систем на их основе известны с 90-х годов XX века [3], в научно-технических печатных изданиях РФ данная тематика практически не отражена. Работа [5], содержащая результаты теоретических и экспериментальных исследований пассивных ПАВ датчиков, является, вероятно, первой русскоязычной публикацией по данной тематике. В связи с этим исследование и разработки в области дистанционных измерений с применением ПАВ датчиков представляются актуальной задачей.

Технология дистанционного измерения физических величин с использованием пассивных (т.е. не тре-

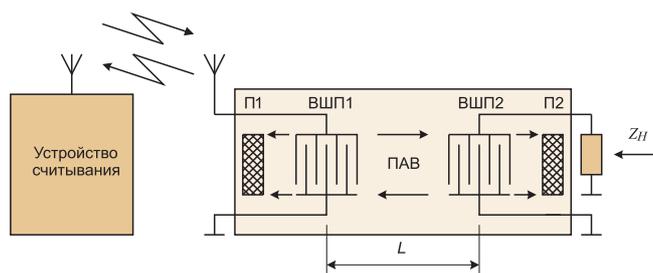


Рис. 1. Обобщенная схема ПАВ ЛЗ датчика физической величины

бующих источника электропитания) ПАВ датчиков предполагает наличие приемопередающего устройства (устройства считывания), радиоканала, датчика ПАВ. Принцип работы датчика основан на известных с конца XIX века физических явлениях пьезоэффекта и ПАВ. Данный принцип иллюстрирует обобщенная схема датчика физической величины на основе ПАВ ЛЗ, приведенная на рис. 1.

Устройство считывания излучает зондирующий радиоимпульс (ЗРИ). Энергия высокочастотного электромагнитного колебания, принимаемого приемопередающей антенной датчика, поступает на электроды входного встречно-штыревого преобразователя ВШП1, вызывая механическое гармоническое колебание в пьезоэлектрической подложке датчика за счет явления обратного пьезоэффекта. Механические колебания порождают ПАВ, которая распространяется как в направлении выходного ВШП2, так и в направлении входного поглотителя П1, вызывая нежелательные потери 3 дБ. Механические колебания приводят к изменению разности потенциалов между электродами ВШП2 (явление прямого пьезоэффекта), что вызывает появление высокочастотного тока, протекающего через цепь нагрузки  $Z_H$ . ПАВ, с одной стороны, отраженная от ВШП2 в сторону выходного поглотителя П2 и вызывающая нежелательные потери 3 дБ, с другой – в сторону ВШП1, ослабленная по амплитуде за счет вносимых звукопроводом ЛЗ потерь, приводит к изменению разности потенциалов между электродами ВШП1, вызывая в нагрузке (приемопередающей антенне) высокочастотный ток. Антенна излучает ответный радиоимпульс. За счет переотражений ПАВ между ВШП в ответ на единичный

ЗРИ датчик излучает серию затухающих ответных радиоимпульсов.

Для рассматриваемой обобщенной схемы возможны два варианта построения чувствительного элемента.

Во-первых, рассматриваемая схема предусматривает изменение коэффициента отражения от ВШП2 за счет изменения импеданса нагрузки  $Z_H$  под влиянием измеряемой физической величины. При этом предполагается, что задержка распространения в ЛЗ постоянна, то есть сама ЛЗ не является чувствительным элементом. Задачей устройства считывания является измерение в частотной области коэффициента отражения от ВШП1 [5].

Во-вторых, сама ПАВ ЛЗ может являться чувствительным элементом. Скорость ПАВ  $v$  имеет величину порядка 4000 м/с. ПАВ распространяется между ВШП1 и ВШП2, разнесенными на расстояние  $L$ , за время  $\Delta t$ . Временная задержка распространения зависи-

т от воздействия измеряемой физической величины (температуры)  $\Delta \tau = L/v$ . При условии подключения к ВШП2 согласованной нагрузки  $Z_H$ , импеданс которой не зависит от внешнего воздействия, информативным параметром чувствительного элемента является зависимость временной задержки между зондирующим и ответным радиоимпульсами от измеряемой физической величины. Задачей устройства считывания является измерение временной задержки.

С правовых позиций, частотный ресурс на территории РФ контролируется государством. Разработка, производство и эксплуатация радиотехнических устройств и систем различного назначения требуют лицензирования необходи-

мой полосы частот. Тем не менее для устройств малого радиуса действия SRD (Short Range Devices) любого назначения доступны безлицензионные диапазоны частот ISM (Industrial, Scientific, Medical), в частности, диапазон 433 МГц.

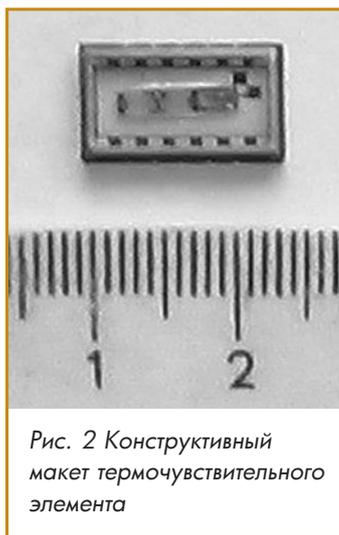


Рис. 2 Конструктивный макет термочувствительного элемента

#### Технические характеристики макет термочувствительного элемента

Тип элемента	ПАВ ЛЗ
Материал пьезоэлектрической подложки	ниобат лития $\text{LiNiO}_3$ , срез XY 128°
Центральная частота, МГц	433,92
Измеренная величина:	
задержки при 20 °С, мкс	10,5
вносимых потерь, дБ	27,8

#### Технические характеристики макета устройства считывания

Число датчиков температуры, ед.	1
Диапазон измеряемых температур, °С	-40 ... 100
Разрешающая способность по температуре, °С	0,1
Центральная частота излучения, МГц	433,92
Полоса излучаемых частот, кГц	400 ... 600
Класс излучения	P0N
Длительность ЗРИ, мкс	4...5
Период повторения ЗРИ, мкс	100...1000
Мощность, генерируемая радиопередающим устройством (РПДУ), дБмВт	≤ 10
Расчетная чувствительность радиоприемного устройства (РПУ) при соотношении сигнал/шум (С/Ш) 10 дБ, дБмВт	...105
Расчетная дальность радиолинии, м	7...10
Диапазон рабочих температур устройства, °С	10 ... 40

Учитывая все вышесказанное, специалистами НПП "Эталон" разработан конструктивный макет термочувствительного элемента (рис. 2).

Элемент размещен в корпусе микросборки DLCC-14/10. На рис. 3 (а) приведен результат измерения задержки в элементе, на рис. 3 (б) – результат измерения вносимых потерь в элементе. Измерения производились с использованием анализатора цепей HP8714ES.

С целью дальнейшего исследования технологии дистанционного измерения температуры специалистами НПП "Эталон" производится разработка конструктивного макета устройства считывания.

К важнейшим характеристикам радиотехнической системы дистанционного измерения температуры можно отнести: дальность радиолинии; диапазон измеряемых температур; разрешающую способность по температуре.

Под дальностью радиолинии подразумевается максимальное расстояние между устройством считывания и датчиком, при котором обеспечивается прием ответного радиоимпульса с заданным соотношением С/Ш. Известное расчетное соотношение, называемое в зарубежных публикациях [3, 4] уравнением радара (Radar Equation), имеет вид:

$$D = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot 4 \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t^2 \cdot G_r^2}{k \cdot T_0 \cdot B \cdot NF \cdot SN \cdot IL}} \quad (1)$$

Использование данного термина представляется не совсем корректным, более уместно говорить об уравнении радиолинии с активным ответом [6], поскольку ПАВ датчик не отражает энергию ЗРИ, а излучает энергию ответного радиоимпульса.

Дальность радиолинии  $D$  в уравнении (1) зависит от: длины волны  $\lambda$ , мощности РПДУ  $P_t$ ; коэффициентов усиления антенн устройства считывания  $G_t$  и датчика  $G_r$ ; мощности теплового шума на входе РПУ, определяемой температурой  $T_0$  и полосой частот  $B$  с учетом постоянной Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К; коэффициента шума РПУ  $NF$ , определяемого пре-

имущественно входным малошумящим усилителем (МШУ) на входе РПУ  $SN$ , а также от вносимых ПАВ датчиком потерь  $IL$ . Расчет дальности по формуле (1) при:  $P_t = 10$  дБмВт;  $G_t = G_r = 0$  дБ с применением идеальных четвертьволновых штыревых антенн вертикальной поляризации;  $T_0 = 20$  °С;  $B = 600$  кГц;  $NF = 1$  дБ;  $SN = 10$  дБ и  $IL = 27$  дБ на частоте 433,92 МГц ( $\lambda = 0,691$  м) дает величину  $D = 8,8$  м. Наиболее существенными факторами, ограничивающими дальность, являются вносимые потери в ПАВ датчике. На рис. 4 приведена зависимость дальности радиолинии от величины вносимых потерь, рассчитанная при указанных выше параметрах.

Рассмотрение других факторов, ограничивающих дальность радиолинии, к каковым можно причислить потери рассогласования в высокочастотных цепях, уменьшение коэффициентов усиления при использовании малогабаритных антенн относительно 0 дБ, выходит за рамки данной статьи.

Диапазон измеряемых температур определен исходя из следующих соображений. Во-первых, пьезоэлектрические свойства ниобата лития по верхней температурной границе ограничены точкой Кюри (550 °С). Для измерения более высоких температур требуются иные пьезоэлектрики, например, лангсит. Кроме того, при высоких температурах актуальным становится поведение других материалов термочувствительного элемента, например, испарение металла напыленного ВШП (алюминия), происходящее при температуре 600 °С.

Во-вторых, эксплуатационные характеристики других элементов датчика температуры ограничены относительно узким температурным диапазоном. Так, для большинства современных радиоэлектронных компонентов (РЭК), к которым можно отнести элементы пассивных высокочастотных согласующих цепей датчика (индуктивности, емкости), производителями гарантируется работа в промышленном диапазоне -40...85 °С. Для коаксиального кабеля с полиэтиленовым наполнителем верхняя граница рабочей температуры ограничена величиной 100 °С.

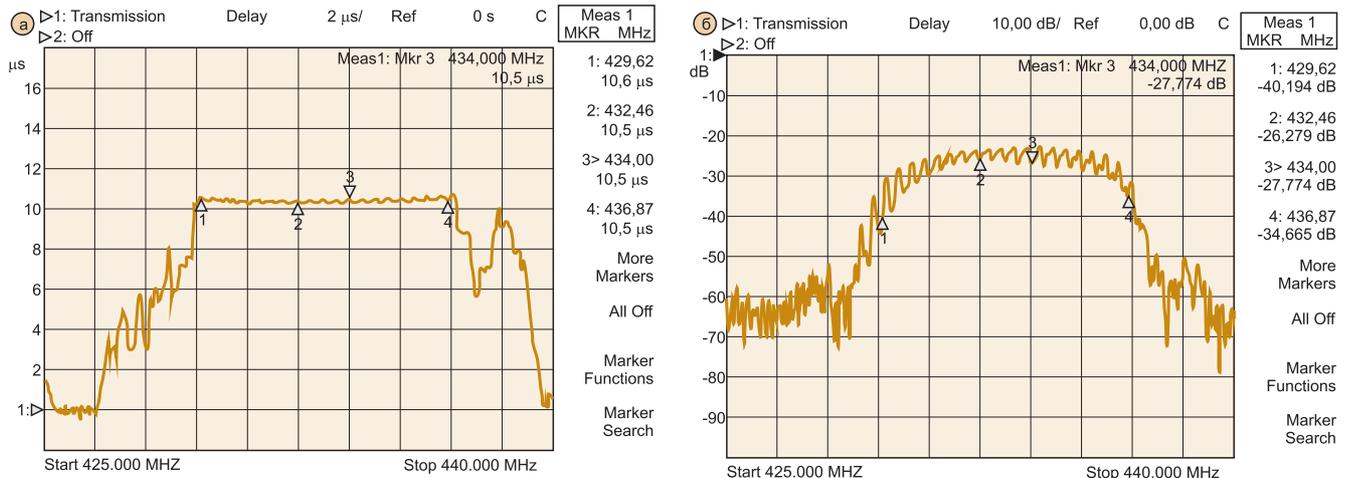


Рис. 3. Результаты измерения: а) задержки в элементе, б) вносимых потерь в элементе

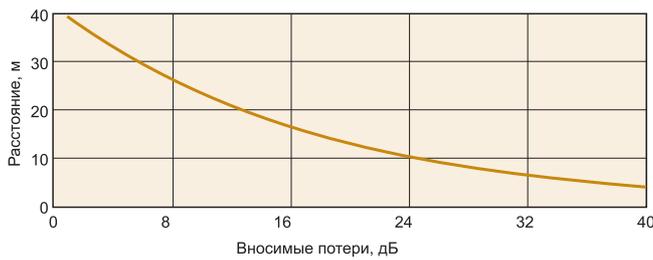


Рис. 4

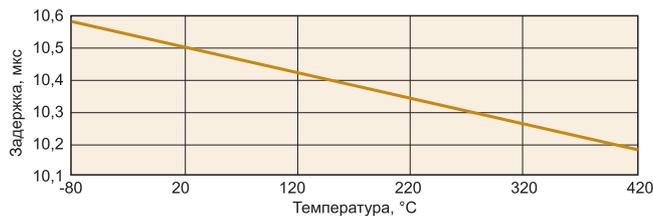


Рис. 5

Температурная зависимость времени задержки ПАВ ЛЗ аппроксимируется полиномом третьей степени [1]. Для ниобата лития полагают коэффициенты первой и второй степеней полинома равными нулю, т.е. температурная зависимость времени задержки является линейной. Для среза ХУ 128° величина температурного коэффициента задержки ТКЗ ( $TCD_0$ ) составляет  $75 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . С учетом линейности при величине задержки  $\tau_0 = 10,5$  мкс, измеренной при  $20^\circ\text{C}$ , расчетная величина задержки  $\tau_0$  при  $T_0 = -80^\circ\text{C}$  составляет 10,5793 мкс. Уравнение температурной зависимости задержки имеет вид:

$$\tau(T) = \tau_0 [1 + TCD_0 (T - T_0)]. \quad (2)$$

На рис. 5 приведена расчетная зависимость задержки от температуры в диапазоне  $-80 \dots 420^\circ\text{C}$ .

При этом расчетная величина задержки в диапазоне температур  $-40 \dots 100^\circ\text{C}$  составляет 10,548 ... 10,421 мкс. Величина приращения задержки на  $0,1^\circ\text{C}$  (разрешающая способность по температуре) составляет  $-79,4$  пс. Создание измерительной аппаратуры со столь высокой разрешающей способностью по времени является нетривиальной задачей.

Для измерения задержки применяются фазовый и амплитудный методы во временной области [3] и частотный метод [2, 3], основанный на математическом аппарате обратного преобразования Фурье. Рассмотрение частотного метода выходит за рамки данной статьи.

Устройства бесконтактного считывания, реализующие фазовый и амплитудный методы, являются аналогами радиолокационных приемопередающих устройств импульсного типа. Принципиальное отличие от радиолокационных устройств, принимающих отраженный от цели радиопульс, заключается в том, что скорость ПАВ на пять порядков меньше скорости распространения электромагнитной волны. После излучения зондирующего радиопульса работа РПУ должна быть запрещена на время, сопоставимое с измеряемой задержкой (единицы мкс), во избежание ложного приема помех отражения.

Фазовый метод измерения принято считать наиболее точным. Приращение задержки, согласно (2), составляет:

$$\Delta\tau(T) = \tau(T_0) - \tau(T). \quad (3)$$

Абсолютное приращение фазы, выраженное в угловых градусах, составляет:

$$\Delta\Phi(T) = 360 f_{\text{ср}} \Delta\tau(T), \quad (4)$$

где  $f_{\text{ср}}$  – частота сравнения. Относительное приращение фазы составляет:

$$\Delta\Phi_{\text{rel}}(T) = \begin{cases} \Delta\Phi(T), & \Delta\Phi(T) < 360 \\ \text{mod}(\Delta\Phi(T), 360), & \Delta\Phi(T) \geq 360 \end{cases}. \quad (5)$$

При частоте сравнения, равной частоте колебания ЗРИ, абсолютное приращение фазы на  $0,01^\circ\text{C}$  составляет  $1,24$  угловых градуса. Несмотря на техническую сложность реализации высокоточного фазового детектора, данный метод дает возможность измерять температуру с очень высокой разрешающей способностью. Возможным вариантом увеличения разрешающей способности по температуре является увеличение задержки ПАВ ЛЗ, что, однако, увеличивает потери и уменьшает дальность радиолинии.

В состав устройства входят следующие узлы:

- входные цепи, включающие приемопередающую антенну, полосовой фильтр ВРФ, переключатель "прием/передача" T/R;
- РПДУ, включающее умножитель опорной частоты фре PLL, усилитель мощности РА, формирователь ЗРИ ТХ;
- РПУ прямого преобразования, включающее входной МШУ, усилитель с изменяемым коэффициентом усиления, когерентный квадратурный демодулятор, фильтры нижних частот LPF синфазного  $I(t)$  и квадратурного  $Q(t)$  каналов;
- аналого-цифровые преобразователи синфазного и квадратурного каналов, формирующие цифровые отсчеты  $I[n]$ ,  $Q[n]$ ;
- процессор цифровой обработки сигналов, формирующий управляющие сигналы СТЛ и выполняющий вычисление температуры;
- устройство индикации.

Вычисление фазового угла после накопления массивов отсчетов  $I[n]$ ,  $Q[n]$  выполняется по формуле:

$$\Delta\Phi = \arctg \left( \frac{\sum Q[n]}{\sum I[n]} \right). \quad (6)$$

Достоинством рассматриваемой схемы является принцип когерентного (оптимального) приема, при котором максимизируется соотношение "сигнал/шум" на выходе демодулятора. Недостатком является неидентичность амплитудных и фазовых характеристик синфазного и квадратурного каналов, приводящая к погрешностям отсчетов  $I[n]$  и  $Q[n]$ .

Наиболее серьезным недостатком данного метода является неоднозначность измерения фазы. Для задержки 10,5 мкс и опорной частоты 433,92 МГц одно-

значное измерение фазы возможно в очень узком, не превышающем 2,9 °С диапазоне температур. Рис. 6 иллюстрирует эту зависимость, рассчитанную по формуле (5).

Расширение диапазона измеряемых температур требует значительного усложнения схемы.

Применение современных высокотехнологичных РЭК дает возможность построить значительно более простое устройство считывания, основанное на амплитудном методе измерения.

В отличие от рассмотренной выше схемы фазового измерителя, значительно упрощено РПУ, состоящее из входного МШУ, логарифмического усилителя-детектора LOG AMP и компаратора СМР. Логарифмический усилитель-детектор используется для прямого детектирования радиоимпульсов. Измерение задержки производится специализированной микросхемой (ASIC)

высокоточного измерителя временных интервалов, обеспечивающей измерение в диапазоне 500 нс...4 мс с разрешающей способностью 65 пс. Управление устройством осуществляется с помощью недорогого восьмиразрядного микроконтроллера MCU. На рис. 7 изображен конструктивный макет устройства считывания, управляемого от ПЭВМ, снабженный четвертьволновой штыревой антенной вертикальной поляризации.

Применение пассивных ПАВ датчиков в промышленности, науке, сфере ЖКХ является, безусловно, перспективным. Малая себестоимость, дистанционный доступ, возможность массового производства с применением микроэлектронной технологии выгодно отличают пассивные ПАВ датчики от датчиков других типов. Для создания конкурентоспособной продукции и успешного продвижения ее на рынок необходимо решение следующих задач:

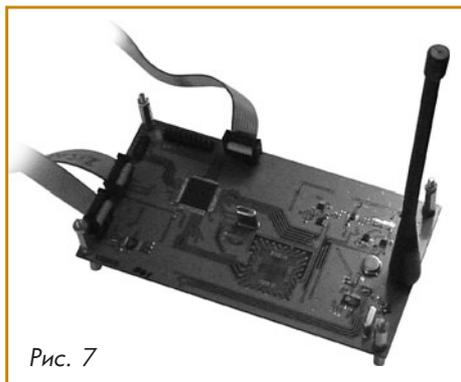


Рис. 7

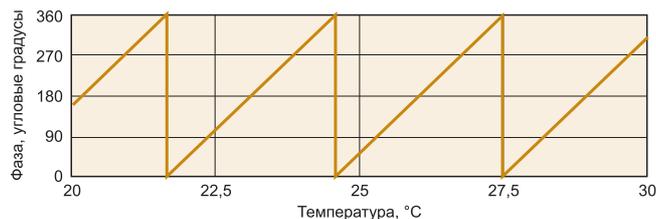


Рис. 6. Зависимость фазового угла от температуры

- изыскание возможности снижения вносимых потерь с целью увеличения дальности радиолинии;
- разработка портативных устройств считывания, по массогабаритным и ценовым характеристикам сравнимых с современными мобильными средствами радиосвязи;
- исследовательские и конструкторские работы в области антенной и высокочастотной техники

и разработка малогабаритных датчиков температуры различного назначения.

#### Список литература

1. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. 2-е изд. Энергоатомиздат, 1989.
2. Pohl A. A Review of Wireless SAW Sensors, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 47, No. 2, March 2000.
3. Reindl L., Scholl G., Ostertag T., Pohl A., Weigel R. Wireless Remote Identification and Sensing with SAW Devices, Proc. IEEE 1998 MMT/AP International Workshop on Commercial Radio Sensor Techniques
4. Елисеев Н. Перспективные ПАВ-датчики Transense/Honeywell // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2008. № 1.
5. Багдасарян С. и др. ПАВ-датчики дистанционного контроля физических величин // Там же. 2008. № 1.
6. Казаринова Ю.М. Радиотехнические системы. Уч. для вузов. М.: Высшая школа. 1990.

*Гальперин Юрий Алексеевич — инженер I категории ОАО НПП "Эталон". Контактный телефон (3812) 36-84-00. E-mail: fgup@omsketalon.ru*

#### Интегрированные ZigBee-сенсоры расширяют продуктивную линейку Drop-in Networking

Digi International представила XBee® сенсоры — автономные беспроводные сенсоры с длительным сроком работы от внутренних батарей, предназначенные для легкой интеграции в приложения Drop-in Networking или сети ZigBee. Технология ZigBee делает возможным создание дешевых по стоимости, экономичных по энергопотреблению сетевых устройств для самоорганизующихся и самовосстанавливающихся mesh-сетей. Компактные XBee-сенсоры позволяют заказчикам легко собирать данные в режиме РВ с узлов сети ZigBee и являются идеальными для приложений промышленной автоматизации, безопасности, управления энергопотреблением, контроля транспортных средств и многих других.

Для заказа доступны XBee-сенсоры в комбинации: температура+свет или температура+влажность+свет. Сенсоры также легко интегрируются с семейством шлюзов Digi Drop-in

Networking, адаптеров и модулей через ZigBee-сети. Используя среду разработки Python, которая поддерживается в шлюзах Digi ConnectPort™, пользователи могут контролировать обстановку и срабатывание порогов и принимать решения на базе этой информации. XBee-сенсоры в настоящее время поддерживаются платформой Digi XBee ZNet 2.5 с дальнейшей поддержкой платформы Digi XBee ZB (ZigBee Pro Feature Set). Это также улучшает совместимость с продукцией ZigBee других производителей.

В качестве дополнительных опций Digi предлагает широкий ряд сенсоров Watchport® для Drop-in Networking с питанием от батарей или внешних источников, которые измеряют дистанцию/приближение, влажность, температуру, ускорение/наклон и присутствие воды. Сенсоры Watchport для Drop-in Networking интегрированы с сенсорными адаптерами для подключения к ZigBee.

[Http://www.digi.com](http://www.digi.com)