

УДК 621.396

А.А. АКУЛИНИЧЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО РАДИОКАНАЛУ ISM-ДИАПАЗОНА

Предложен принцип построения телеметрических контрольно-измерительных систем с передачей данных по радиоканалу ISM-диапазона, в которых вместо традиционных кварцевых резонаторов с фиксированной частотой, применяемых при построении схем опорных генераторов, используются модулированные измеряемым физическим параметром кварцевые резонаторы. Разработана конструкция модулированного кварцевого резонатора с переменным межэлектродным зазором для измерения избыточного воздушного давления, на основе теории тонких пластин и оболочек Кирхгофа проведен теоретический расчет разработанной конструкции, экспериментально снята и проанализирована её модуляционная характеристика. Даны рекомендации по выбору режимов работы модулированного кварцевого резонатора в зависимости от применяемой элементной базы и частотного ISM-поддиапазона.

телеметрическая система, опорный генератор, модулятор, кварцевый резонатор, емкостное управление, резонирующая мембрана, межэлектродный зазор, измерительный преобразователь

Введение

Бурное развитие современных технологий и технологических процессов, их многоэтапность и высокие требования к точности исполнения операций наряду с растущими темпами промышленного производства приводят к необходимости непрерывного и длительного сбора большого объёма информации о состоянии как объекта, так и средств производства на всех этапах производственного процесса. В этой связи наблюдается активный рост количества предлагаемых технологических контроллеров и контрольно-измерительных систем (КИС), в том числе распределенных, сбора данных и управления, требующий их объединения в общую структуру и создания единого центра управления.

Самым простым решением этой задачи является проводная связь КИС с центром управления. Такая связь ограничивает подвижность технологического оборудования, машин и механизмов и связанных с ними КИС. Кроме того, проводная связь требует существенных материальных и временных затрат на организацию каналов связи.

Более широкие возможности представляют КИС со встроенными флеш-накопителями таких произво-

дителей, как Memtech и Altec [1]. Однако эти системы очень дорогие, работают по жестко установленной программе, что не позволяет осуществлять оперативный контроль рабочих параметров.

1. Формулирование проблемы

Наиболее перспективными являются КИС сбора и беспроводной дистанционной передачи информации. К их числу, в частности, относятся КИС фирм Moxa Technologies Co. [1], Real Time Devices Finland OY [2], работающие в двух частотных диапазонах – 900 и 1800 МГц и имеющие встроенные приёмники GPS и разъёмы для подключения SIM-карты. Благодаря этому КИС перечисленных фирм-производителей не только осуществляют сбор и дистанционную передачу технологической информации, но и позволяют определять своё местоположение.

Приведенные результаты анализа тенденций развития систем сбора и обработки измерительной информации положены в основу разработки систем дистанционного контроля с использованием радиоканала, которые имеют широкие функциональные возможности. Малый радиус действия систем (не более 2 км) ориентирует на применение ISM-диапазона [3] и высокоэффективной элементной

базы для работы в нём, выпускаемой мировыми производителями. Прямое сопряжение первичных измерителей в ISM-трансиверах не предусмотрено, поэтому возникает необходимость в решении данного вопроса.

Целью работы является разработка принципа построения КИС, позволяющей измерять 3–6 параметров состояния объекта и осуществлять беспроводную передачу полученной информации в центр управления, а благодаря наличию двусторонней связи обеспечивать гибкий алгоритм работы системы. Особенности этой системы являются использование нелицензируемых ISM-диапазонов и современных интегральных приёмопередатчиков, специально разработанных для этих целей, применение вместо традиционных опорных кварцевых резонаторов (КР) с фиксированной стандартной частотой модулированных кварцевых резонаторов (МКР) – частотных датчиков, создание теоретико-конструкторских основ их построения.

2. Решение проблемы

Непосредственно измеряемый физический параметр, например, давление, влажность, вибрация, температура, состав вещества, оказывает модулирующее воздействие на МКР. В результате такого воздействия изменяется резонансная частота МКР. Коммутируя МКР, получаем систему с частотной

модуляцией и временным разделением сигналов.

Выбор рабочего диапазона частот должен осуществляться из ряда регламентированных ETSI частот, отведенных для промышленного, медицинского и научного применения [3]. Проведенный анализ показал, что наиболее предпочтительными являются диапазоны 6765...6795 кГц, 13553...13567 кГц, 433,05...433,79 МГц и 902...928 МГц.

2.1. Структура и принцип действия КИС

Ядром предлагаемой системы (рис. 1) является приемопередатчик ISM-диапазона. В зависимости от выбранного диапазона частот могут использоваться различные типы приемопередатчиков (трансиверов). В частности, для диапазонов 6765...6795 кГц и 13553...13567 кГц целесообразно использовать трансивер MLX90121, а для 433,05...433,79 МГц и 902...928 МГц – TH7120 [4].

Система работает следующим образом.

На объект устанавливается ряд кварцевых датчиков в виде МКР (Modulated X-tals Block), предназначенных для измерения различных физических параметров. Посредством управляемого микроконтроллера (3wire bus μ -Controller) мультиплексора (MUX) осуществляется коммутация необходимого МКР в схему опорного генератора (RO) трансивера. В процессе измерения (режим передачи) величина эквивалентного последовательного сопротивления

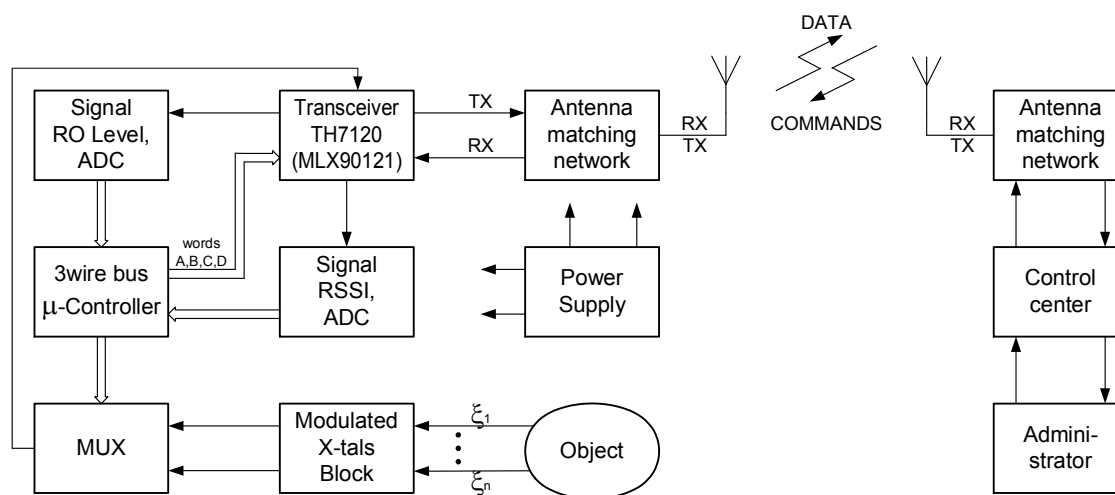


Рис. 1. Система сбора и передачи данных по радиоканалу ISM

(ESR) МКР изменяется, причем для МКР измерения динамического давления это изменение может быть весьма существенным. Такое изменение предлагается оценивать по текущей величине амплитуды сигнала опорного генератора (Signal RO Level). Компенсация же этого изменения осуществляется с помощью микроконтроллера, формирующего специальное цифровое слово В (B word), в соответствии с которым в схеме RO изменяется положение рабочей точки его активного элемента (ток эмиттера).

В ходе измерительной процедуры расстояние между местом нахождения объекта и центром управления (Control centre) изменяется в широких пределах. Для сохранения устойчивой связи в режиме приёма команд управления непрерывно контролируется уровень принятого сигнала (Signal RSSI) и по его величине с помощью микроконтроллера формируется цифровое управляющее слово А (A word), в соответствии с которым изменяется коэффициент усиления малошумящего усилителя приемной части трансивера, а также коэффициент усиления усилителя мощности передающей части трансивера. Управляющие цифровые слова С и D устанавливают необходимые параметры работы трансивера в режиме частотой модуляции.

Антенная согласующая цепь (Antenna matching network) и источник питания (Power Supply) являются стандартными элементами системы.

Входящий в состав системы микроконтроллер должен обеспечивать управление трансивером по трехпроводной шине. В частности, может быть использован микроконтроллер ADuC812 [5].

2.2. Конструкции МКР

В настоящий момент наиболее детально проработан канал измерения избыточного пульсирующего воздушного давления на базе МКР с модуляцией межэлектродного зазора [6].

Конструкция МКР (рис. 2) обеспечивает его установку и штуцерное соединение с камерой давления контролируемого объекта.

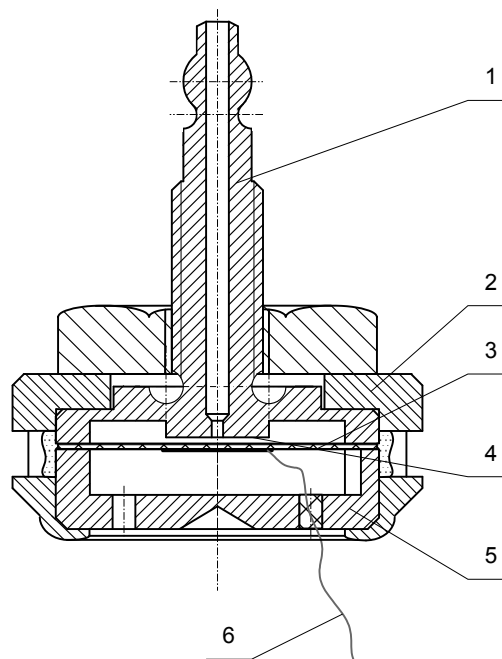


Рис. 2. Конструкция МКР

При отсутствии избыточного по отношению к атмосферному давлению воздуха в камере давления МКР, ограниченной пьезоэлементом 3 и внутренней поверхностью крышки 1, деформация пьезоэлемента 3, выполняющего роль резонирующей мембраны, не происходит, так как внутренний объём основания 5 не герметизирован и давление на пьезоэлемент 3 с обеих сторон одинаково. Кварцевый резонатор, образованный пьезоэлементом 3 и цилиндрическим выступом 4, обращенным к пьезоэлементу 3, и включенный в схему автогенератора приёмопередатчика потенциальным выводом 6 и корпусным общим выводом МКР, возбуждается на частоте, соответствующей нулевому избыточному давлению. На выходе автогенератора образуется информационный сигнал, частота которого f_0 соответствует началу градуировочной характеристики МКР. При давлении в камере давления, превышающем атмосферное, происходит малый прогиб пьезоэлемента 3, защемленного между крышкой 1 и основанием 5, в результате чего величина зазора между свободной

поверхностью пьезоэлемента и поверхностью цилиндрического выступа 4 увеличивается, что приводит к увеличению частоты $f(p)$. Величина прогиба пьезоэлемента 3 определяется в соответствии с теорией тонких пластин и оболочек Кирхгофа [6] следующим образом:

$$w(x, y) = w_0 \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{r^2} \right)^2, \quad (1)$$

где

$$w_0(p) = p \left(4h^3 \left[\frac{C_{11}}{r^4} + \frac{C_{11} + 2C_{44}}{3r^4} \right] \right)^{-1}, \quad (2)$$

где r - радиус поверхности мембраны, свободной от защемления; h - толщина мембраны; C_{11}, C_{12}, C_{44} - модули упругости кварца; x, y - координаты точек мембраны; p - прикладываемое давление.

Следствием прогиба пьезоэлемента 3 является возникновение в последнем механических напряжений растяжения-сжатия, что также приводит к изменению частоты $f(p)$ в связи с проявлением механизма тензочувствительности пьезоэлемента 3.

На основании формул (1) и (2) для рассматриваемой конструкции МКР рассчитана величина прогиба пьезоэлемента (рис. 3), составляющая 17,3 мкм. Толщина пьезоэлемента (169 мкм) существенно превышает величину её прогиба, поэтому пьезоэлемент представляет собой «жесткую» мембрану.

Применение трехмерного инженерного пакета ANSYS позволяет с большей точностью определять характеристики напряженно-деформированного состояния кварцевой мембраны. Полученные с применением ANSYS расчеты прогиба пьезоэлемента с точностью в 3...6 % совпадают с расчетами по формулам (1) и (2), что позволяет для оценочных расчетов ограничиться использованием последних.

Кроме того, разработанный МКР благодаря двум особенностям конструкции позволяет существенно снизить температурную погрешность измерения.

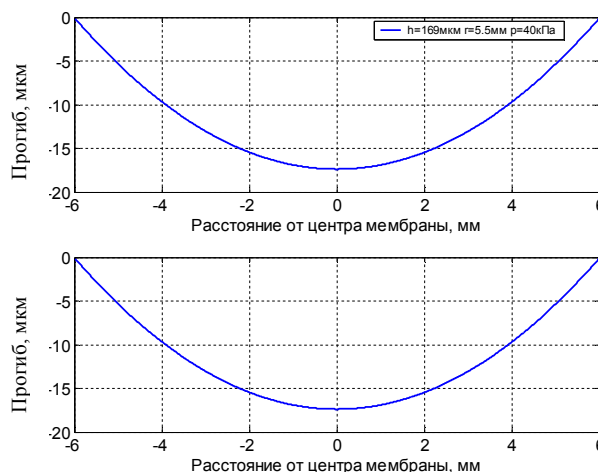


Рис. 3. График деформации мембраны

Так, во-первых, поверхности пьезоэлемента и металлические поверхности, защемляющие его, имеют малые шероховатости, поэтому силы трения, возникающие из-за различия температурных коэффициентов, малы. Следовательно, дополнительная термомеханическая погрешность датчика существенно снижена. Во-вторых, главные термомеханические напряжения системы «обойма – крышка – пьезоэлемент – основание» ориентированы так, что действуют в азимутах пьезоэлемента, для которых коэффициент Ратайского равен нулю [7]. Это означает, что в идеальном случае эта составляющая температурной погрешности равна нулю, а практически – весьма мала.

Таким образом, в рассматриваемом МКР практически полностью устранена температурная погрешность и имеют место два механизма управления частотой кварцевого резонатора: емкостное управление за счет изменения величины зазора между свободной поверхностью пьезоэлемента и поверхностью цилиндрического выступа 4 и управление на основе эффекта тензочувствительности. Вклад в управление частотой последнего механизма пренебрежимо мал по сравнению с вкладом первого. Поэтому форма градуировочной характеристики МКР определяется механизмом емкостного управления в соответствии с формулой

$$f(w) = f_0 \sqrt{1 + \frac{m}{1 + \frac{h_{пэ}}{\epsilon_{пэ} w}}} \approx f_0 \left[1 + \frac{0.5m}{1 + \frac{h_{пэ}}{\epsilon_{пэ} w}} \right], \quad (3)$$

где f_0 - номинальная частота колебательной системы при $w = 0$; $h_{пэ}$ - частотоопределяющий размер ПЭ (толщина); $\epsilon_{пэ}$ - диэлектрическая проницаемость материала ПЭ; m - емкостное отношение, и может быть с большой степенью точности аппроксимирована дробно-линейной функцией первого порядка вида

$$f(p) = \frac{a_0 + a_1 p}{1 + a_2 p}, \quad (4)$$

где a_0, a_1, a_2 - коэффициенты аппроксимации.

3. Теоретическое и экспериментальное исследование работы МКР

Эквивалентная электрическая схема МКР (рис. 4) учитывает управляющий эффект от изменения емкости зазора $C_{заз}$, входных параметров опорного генератора R_p, C_p , а также изменение динамических параметров МКР L_q и C_q , происходящее вследствие возникновения в пьезоэлементе механических напряжений [8]. При изменении дав-

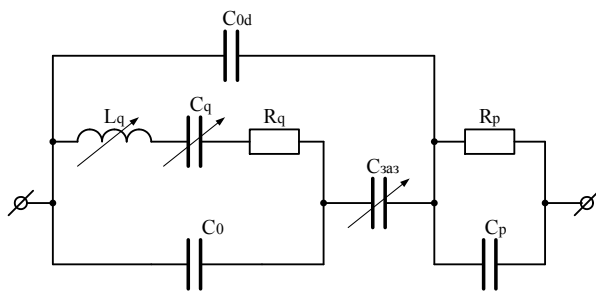


Рис. 4. Универсальная эквивалентная схема МКР: L_q, C_q, R_q и C_0 - параметры динамической ветви и параллельная ёмкость МКР; $C_{заз}$ - ёмкость зазора; C_{0d} - дополнительная (паразитная) параллельная ёмкость; R_p, C_p - эквивалентные параметры комплексного сопротивления входа RO

ления изменяется частота последовательного резонанса МКР в соответствии с бикубическим уравнением

$$a_6 w^6 + a_4 w^4 + a_2 w^2 + a_0 = 0, \quad (5)$$

где $a_0 = C_s (Mp + sC_{0d}/C_0)$;

$$a_2 = \left(s^2 C_{0d} C_{d1} + C_{заз} M^2 (k + (1 + \chi/M) C_{d2}) \right) T_p^2 - R_q^2 C_q^2 \left(\theta^2 C_{0d} (2Q_{кр}^2 (1 + m/\theta) - 1) + \right.$$

$$\left. + C_{заз} (2Q_{кр}^2 (s + \chi \cdot m/2) - \theta/R_q) \right);$$

$$a_4 = -T_q^2 \left(\theta^2 (2Q_{кр}^2 (1 + m/\theta) - 1) C_{0d} C_{d1} + \right.$$

$$\left. + C_{заз} (Q_{кр}^2 (2s + m\chi) - \theta/R_q) C_{d2} + \right.$$

$$\left. + k C_{заз} (2Q_{кр}^2 M - 1/R_q^2) \right) T_p^2 + \theta (C_{0d} \theta + C_{заз}) / w_q^4;$$

$$a_6 = T_p^2 (C_{0d} \theta + C_{заз}) (C_{d1} \theta + k) / w_q^4;$$

$$\chi = C_{заз}/C_0; \quad C_s = C_q + C_0 + C_{заз}; \quad \theta = 1 + \chi;$$

$$k = C_{заз}/C_p; \quad s = 1 + m + \chi; \quad M = 1 + m;$$

$$C_{d1} = 1 + C_{0d}/C_p; \quad C_{d2} = 1 + 2C_{0d}/C_p;$$

$m = C_q/C_0$ - емкостное отношение МКР;

$T_q = R_q C_q$ и $T_p = R_p C_p$ - постоянные времени

динамической и нагрузочной цепей МКР соответственно; $Q_{кр} = 1/(w_q R_q C_q)$ и $w_q = 1/\sqrt{L_q C_q}$ - собственная добротность и частота последовательного резонанса динамической ветви МКР соответственно, являющиеся функциями параметров схемы.

При использовании пьезоэлементов с $f_q = 6765 \dots 13567$ кГц (низкочастотные ISM-диапазоны) целесообразно использовать МКР совместно с трансивером MLX90121. Трансивер TH7120 целесообразно применять для работы в диапазонах 433...928 МГц, причем, поскольку опорная частота в этой схеме умножается на 64 и 128 соответственно, максимальная девиация частоты МКР должна быть малой (порядка 1 кГц). В этом применении МКР (см. рис. 2) целесообразно использовать в режиме модулированной ёмкости, соединяя его после-

довательно с дополнительным кварцевым резонатором с $f_q = 7,15$ МГц. Эквивалентная схема МКР остается справедливой и в этом случае, однако роль $C_{зав}$ здесь уже будет играть модулируемая ёмкость МКР.

Моделирование уравнения (5) в MatLab показало, что девиация частоты МКР при изменении давления $p = (0 \dots 0,4) \cdot 10^4$ Па составит $\Delta f = 9,8$ кГц.

Макетный образец МКР, снабженный пьезоэлементом АТ-среза диаметром 14 мм с собственной резонансной частотой 10002 кГц и имеющий контур заземления 11 мм, при нагружении давлением $p = (0 \dots 0,4) \cdot 10^4$ Па показал девиацию частоты 10,3 кГц (рис. 5). При этом вклад в перестройку частоты за счет тензоэффекта составляет 265 Гц, что в 40 раз меньше вклада в перестройку частоты за счет модуляции межэлектродного зазора.

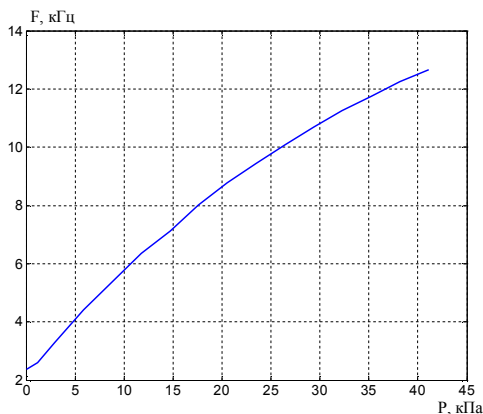


Рис. 5. Экспериментальная модуляционная характеристика МКР

Для текущего измерения температуры объекта или окружающей среды в описываемой системе эффективно работают МКР с термочувствительными срезами (ПЯ или SC) с соответствующим номиналом резонансной частоты. Применение в составе МКР кварцевых пьезоэлементов, обладающих высокой добротностью и стабильностью, а также рациональная конструкция измерительного преобразователя обеспечивают основную погрешность измерения порядка $0,3 \dots 0,5$ % [7].

Заклучение

Таким образом, использование современной элементной базы высокого уровня интеграции и предложенного принципа построения систем сбора и передачи данных, а также разработка нового типа частотного модулятора в виде предложенных МКР, включаемых в схемы трансиверов в качестве частото задающих элементов опорных генераторов, позволяет создавать высокоточные и относительно недорогие телеметрические системы сбора и передачи информации по радиоканалу.

Литература

1. Компания «Индустриальные компьютерные системы», www.ipc2U.ru
2. Saturn Data International, www.saturn-data.com
3. ETSI Future Role Group, Recommendation 13 adopted by ETSI 34th General Assembly meeting (Nice, 23-24 November, 1999).
4. www.melexis.com
5. www.analog.com
6. Патент № 59936А України МКІ 7 G01L 9/08, G01L9/12. Датчик тиску / Ф.Ф. Колпаков, А.А. Акулиничев, С.К. Підченко, А.А. Таранчук. — 2003. — Бюл. № 9.
7. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.
8. Колпаков Ф.Ф., Підченко С.К., Акулиничев А.А. Моделирование управляемой пьезорезонансной колебательной системы с низкодобротной RC-цепью // Зб. наук. пр. VII наук.-техн. конф. "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". — Хмельницький. — 2000. — С. 148-152.

Поступила в редакцию 26.12.2003

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Лахно, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков