

## Терморезистивные датчики

## Проблемы повышения быстродействия

*Н. Дубовой, Д. Дударев*

*В статье рассматриваются проблемы использования терморезистивных датчиков в системах контроля и управления. Исследуются динамические характеристики терморезистивных преобразователей и методы повышения их быстродействия. Обосновываются преимущества метода введения отрицательной обратной связи.*

**Т**ермопреобразователи широко применяются в самых разных областях науки и техники, микроэлектронике, тонкой химической технологии, медицине, генной инженерии, микробиологии, в системах жизнеобеспечения и т. д. Существуют три основные группы термопреобразователей: полупроводниковые, металлические терморезисторы и термопары. Исследования показали, что на данный момент наиболее перспективными первичными преобразователями информации являются полупроводниковые терморезисторы. По сравнению с термопарами и металлическими терморезисторами они обладают более высокой чувствительностью, низкой стоимостью и, что наиболее важно, малыми размерами и массой. Масса терморезистора прямо связана с его инерционностью, и чем она меньше, тем выше быстродействие. Благодаря развитию технологий микроэлектроники сегодня уже выпускаются миниатюрные терморезисторы диаметром менее миллиметра и массой в несколько миллиграммов.

Одна из причин широкого распространения термопреобразователей — способность измерять не только температуру, но и другие параметры: давление, влажность, плотность, скорость и т.д. [1]. Состояние окружающей среды определяется по величине электрического сопротивления датчика. Так, например, измерение давления газа с помощью термопреобразователей основано на использовании зависимости интенсивности передачи тепла от нагретого тела к газу от давления газа.

Теплообмен термопреобразователя со средой описывается законом Ньютона:

$$P_{\alpha} = k \cdot (T - \Theta),$$

где  $P_{\alpha}$  — мощность, рассеиваемая терморезистором в окружающую среду;  $k$  — коэффициент рассеивания терморезистора;  $T$  — температура термопреобразователя;  $\Theta$  — температура окружающей среды.

Коэффициент существенно зависит от давления среды, которое можно вычислить, зафиксировав параметры и измерив сопротивление датчика.

Приборы, использующие закономерности теплообмена, позволяют измерять скорости стационарных и нестационарных потоков, температуру среды и ее пульсации, давление и концентрацию газовых компонентов в смеси газов [2].

Вместе с тем, терморезисторам присущ серьезный недостаток, который существенно ограничивает возможности их применения. Даже самые быстродействующие отечественные терморезисторы (элементы типа СТЗ-25) имеют постоянную времени порядка 0,4 с, что не позволяет применять их при контроле быстро протекающих процессов, например при измерении температур высокоскоростных газовых потоков или средних и пульсационных составляющих турбулентных потоков. Таким образом, повышение быстродействия терморезистивных преобразователей — одна из важнейших задач при построении систем контроля и управления.

Известны несколько способов повышения быстродействия термопреобразователей. Наиболее популярный сегодня — метод коррекции динамических характеристик датчика [3]. Суть метода состоит в изменении структуры измерительной цепи путем введения в нее специальных корректирующих устройств.

Для улучшения динамических свойств первичных преобразователей чаще всего применяются последовательные корректирующие звенья. Исследование эффекта коррекции удобно провести, пользуясь понятием передаточной функции.

Пусть динамические свойства датчика характеризуются простейшей передаточной функцией:

$$W_d(p) = \frac{1}{\tau_d \cdot p + 1}, \quad (1)$$

где  $\tau_d$  — постоянная времени датчика.

Сигнал, вырабатываемый термопреобразователем, подается на корректирующее устройство, имеющее передаточную функцию:

$$W_k(p) = \frac{\tau_k \cdot p + 1}{\tau_k \cdot p + k}, \quad (2)$$

где  $\tau_k$  — постоянная времени корректирующего устройства,

$k$  — передаточный коэффициент корректирующего устройства.

Поскольку датчик и корректирующее устройство работают как линейные преобразователи, взаимосвязь между сигналом, поступающим на датчик, и сигналом с выхода корректирующего устройства может быть найдена путем перемножения функций  $W_d$  и  $W_k$ :

$$W_d(p) \cdot W_k(p) = \frac{1}{\tau_d \cdot p + 1} \cdot \frac{\tau_k \cdot p + 1}{\tau_k \cdot p + k}. \quad (3)$$

Получив значение  $\tau_k$  таким образом, чтобы  $\tau_d = \tau_k$ , получаем:

$$W_d(p) \cdot W_k(p) = \frac{1}{\tau_d \cdot p + k} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\tau_d \cdot p + 1}. \quad (4)$$

В результате передаточная функция термопреобразователя с корректирующим устройством имеет тот же вид, что и для отдельного датчика, но постоянная времени уменьшилась в  $k$  раз.

Для практической реализации корректирующих устройств, как правило, применяют схемы, изображенные на рис. 1.

Из формулы (3) следует, что для сохранения вида передаточной функции термопреобразователя необходимо выполнить условие  $\tau_d = \tau_k$ . Отклонение  $\tau_k$  от  $\tau_d$  в ту или иную сторону вызывает искажение переходной характеристики. Быстродействие измерительной цепи при перекомпенсации ( $\tau_k > \tau_d$ ) или недокомпенсации ( $\tau_k < \tau_d$ ) ухудшается по сравнению с условиями оптимальной настройки.

Корректирующие устройства для увеличения быстродействия и снижения динамических погрешностей применяли многие исследователи. Пассивные четырехполюсники типа RC или LC были использованы для компенсации инерции термоанемометров. Последовательная электрическая коррекция показаний термопреобразователей применялась Д.Ф. Симбирским, В.А. Тепляшиным, А.И. Банниковым для измере-

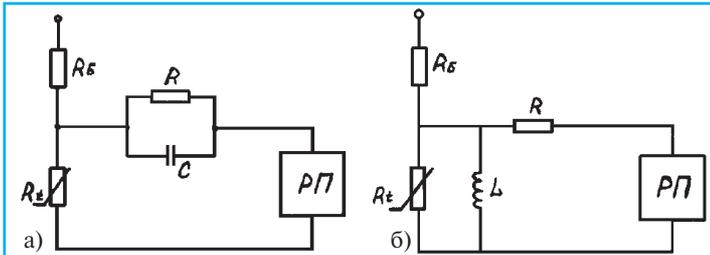


Рис. 1. Способы включения схем коррекции:  
а) коррекция с помощью RC контура; б) коррекция с помощью RL контура.  
РП – регистрирующий прибор

ния температуры газов, Д.Ф. Тартаковским — при измерении температуры жидкостей [4]. В некоторых случаях эффективную постоянную времени  $\tau_{ef}$  удавалось понизить на один-два порядка по сравнению с показателем инерции термопреобразователя. Однако условие идеальной коррекции  $\tau_d = \tau_k$  при реальных измерениях часто нарушается. Основная причина — непостоянство показателя инерции термоприемника  $\tau_d$ , обусловленное его зависимостью от коэффициента теплоотдачи и температурного фактора. В результате компенсации инерционности термопреобразователя происходит лишь частично, динамические ошибки полностью не устраняются, а в некоторых случаях могут быть весьма значительными.

Другой известный и проверенный способ снижения динамической погрешности измерения температуры — метод двух термоприемников, предложенный Г. Пфримом и дополненный Н.Н. Огородниковым [4]. Метод основан на использовании в процессе измерений двух термопреобразователей с разными постоянными времени. Уравнения теплообмена каждого термопреобразователя могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} + \frac{1}{\tau_{d1}} \cdot (T_1 - \Theta) = 0, \\ \frac{dT_2}{dt} + \frac{1}{\tau_{d2}} \cdot (T_2 - \Theta) = 0; \end{cases} \quad (5)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — температура первого и второго термопреобразователя;  $\tau_{d1}$  и  $\tau_{d2}$  — постоянные времени первого и второго термопреобразователя;  $\Theta$  — температура окружающей среды.

Искомую температуру среды можно выразить через показания терморезисторов и отношение значений тепловой инерции:

$$\Theta = \frac{T_1 - T_2 \cdot f}{1 - f}, \quad (6)$$

$$\text{где } f = \frac{\tau_{d1}}{\tau_{d2}} \cdot \frac{dT_1/dt}{dT_2/dt}.$$

Из формулы (6) следует, что  $f$  зависит не от конкретных значений показателей тепловой инерции, а от их отношения.

Регистрируя показания преобразователей  $T_1$  и  $T_2$  и определяя скорость из-

менения их температуры, при известном значении коэффициента  $f$  можно рассчитать действительную температуру  $\Theta$ . Замечательная особенность метода в том, что при определении действительного значения температуры или погрешности ее измерения нет необходимости знать абсолютные значения постоянных времени. Систематические и случайные изменения



Рис. 2. Структурная схема цепи  $R_T R$

данного параметра, учет которых при обычных приемах введения поправок был бы затруднен или вообще исключен, почти не оказывают влияния на коэффициент. Недостатком метода является необходимость располагать термоприемники на некотором расстоянии друг от друга, чтобы исключить взаимный теплообмен. Вот почему метод может эффективно использоваться лишь в средах с равномерным распределением температуры по объему и неприменим для регистрации тепловых неоднородностей и флуктуаций в массе вещества. Кроме того, реализация данного метода требует значительных аппаратных затрат.

Исследования показали, что разработка схемы включения полупроводникового терморезистора является сложной задачей синтеза измерительной цепи, которая решается неоднозначно. Это подтверждается большим разнообразием схем с теплозависимыми сопротивлениями. Наиболее перспективным представляется включение терморезистора в плечо мостовой схемы, питаемой от источника напряжения, изменяемого таким образом, чтобы сопротивление терморезистора, а следовательно, и его температура, оставались постоянными. Такое включение устраняет влияние помех по цепи питания на процесс измерения и обеспечивает работу терморезистора в режиме постоянной температуры. Этот режим подразумевает, что температура терморезистора изменяется очень незначительно при изменении условий те-

плообмена, позволяя описывать его поведение в линейном приближении.

Для мостовой схемы ток, протекающий через терморезистор, определяется как

$$I_T = \frac{U_M}{R_T + R},$$

где  $U_M$  — напряжение питания мостовой схемы,  $R$  — сопротивление, включенное последовательно с терморезистором.

Из выражения видно, что анализ состояний цепи  $R_T R$  — первый шаг при построении схемы регистрации тепловых сигналов.

Поведение терморезистора при изменении температуры окружающей среды описывается уравнением теплового

баланса [2]:

$$P_T = P_\alpha + P, \quad (7)$$

где  $P_T$  — мощность, подводимая к терморезистору;  $P_\alpha$  — мощность, рассеиваемая терморезистором в окружающую среду;  $P$  — мощность, идущая на изменение теплосодержания терморезистора.

Раскрывая каждый член в уравнении (7), получим следующую систему:

$$\begin{cases} P_\alpha = k \cdot (T - \Theta), \\ P_T = I_{RT}^2 \cdot R_T, \\ P = C_T \cdot \frac{dT}{dt}, \\ R_T = R_\infty \cdot e^{B/T}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $C_T$  — теплоемкость терморезистора;  $k$  — коэффициент рассеивания терморезистора;  $\Theta$  — температура окружающей среды;  $I_{RT}$  — мгновенное значение тока в терморезисторе;  $B$ ,  $R_\infty$  — константы, определяющие характеристику терморезистора.

Пользоваться исходными уравнениями терморезистора для исследования его свойств весьма затруднительно, так как они содержат нелинейные функции. Поэтому исследовать нестационарные процессы в цепях с терморезисторами лучше в линейном приближении. С учетом этого, выражая через малые приращения уравнение теплового баланса, получим:

$$\begin{cases} \Delta P_\alpha = k \cdot (\Delta T - \Delta \Theta), \\ \Delta P_T = 2 \cdot U_{RT_0} \cdot \Delta I_{RT} + I_{RT_0}^2 \cdot \Delta R_T, \\ \Delta P = C_T \cdot \frac{dT}{dt}, \\ \Delta R_T = -\beta_0 \cdot R_{T_0} \cdot \Delta T. \end{cases} \quad (9)$$

Подставляя систему уравнений (9) в уравнение теплового баланса, получим следующее уравнение:

$$C_T \cdot \frac{dT}{dt} + (k + I_{RT}^2 \cdot \beta_o \cdot R_{T0}) \cdot \Delta T = 2 \cdot U_{RT0} \cdot \Delta I_{RT} + k \cdot \Delta \Theta. \quad (10)$$

Для описания переходных процессов в терморезисторах удобно использовать динамические параметры:

$$\tau_e = \frac{C_o}{k} \quad \text{— тепловая постоянная времени;}$$

$$D_o = \frac{\beta_o \cdot P_o}{k} \quad \text{— динамический множитель;}$$

$$\tau_c = \frac{\tau_o}{1 + D_o} \quad \text{— электрическая постоянная времени.}$$

Используя выражения для параметров  $\tau_o$  и  $D_o$ , преобразуем уравнение (10):

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1 + D_o}{\tau_o} \cdot \Delta T = - \frac{2 \cdot D_o}{\tau_o \cdot \beta_o \cdot I_{RT0}} \cdot \Delta I_{RT} + \frac{1}{\tau_o} \cdot \Delta \Theta. \quad (11)$$

Так как величины  $\Delta T$  и  $\Delta R_T$  взаимозависимы, перейдем от  $\Delta T$  к  $\Delta R_T$ :

$$\frac{dR_T}{dT} + \frac{1 + D_o}{\tau_o} \cdot \Delta R_T = \frac{2 \cdot D_o \cdot R_{T0}}{\tau_o \cdot I_{RT0}} \cdot \Delta I_{RT} - \frac{\beta_o \cdot R_{T0}}{\tau_o} \cdot \Delta \Theta. \quad (12)$$

Умножим левую и правую часть уравнения (12) на комплекс  $\frac{\tau_o}{R_{T0} \cdot (1 + D_o)}$  и применим преобразование Лапласа:

$$\frac{\tau_e \cdot p + 1}{R_{T0}} \cdot \Delta R_T = \frac{2 \cdot D_o}{(1 + D_o) \cdot I_{RT0}} \cdot \Delta I_{RT} - \frac{\beta_o}{1 + D_o} \cdot \Delta \Theta, \quad (13)$$

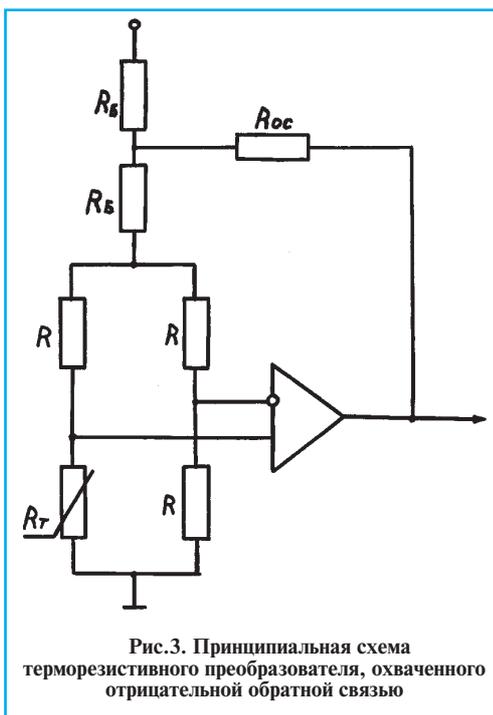
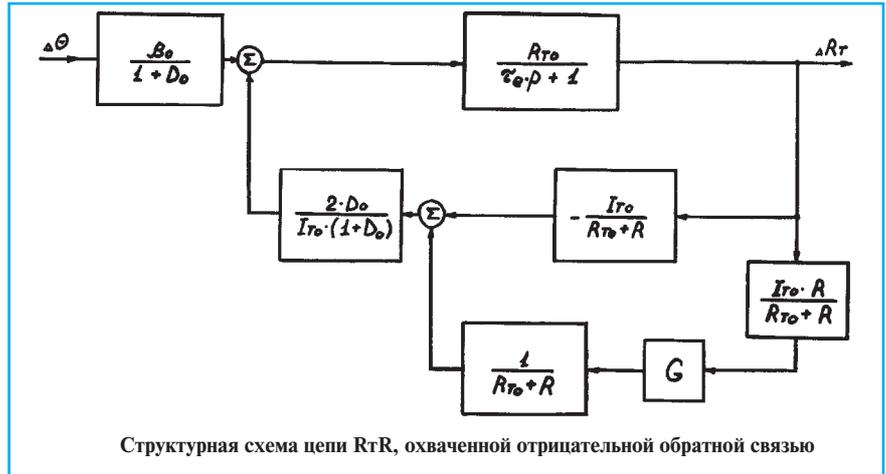


Рис.3. Принципиальная схема терморезистивного преобразователя, охваченного отрицательной обратной связью



Структурная схема цепи R<sub>T</sub>R, охваченной отрицательной обратной связью

где

$$\Delta I_{RT} = \frac{I_{RT0}}{R_{T0} + R} \cdot \Delta R_T.$$

Уравнение (13) описывает зависимость изменения сопротивления терморезистора  $\Delta R_T$  от изменения температуры окружающей среды  $\Theta$ . На его основе можно построить структурную схему цепи с терморезистором, определяющая динамические характеристики схемы, имеет вид:

$$\frac{\Delta R_T}{\Delta \Theta} = \frac{\beta_o \cdot R_{T0}}{\tau_e \cdot p + 1 + D_o} \cdot \frac{R - R_{T0}}{R + R_{T0}}. \quad (14)$$

Приводя выражение (14) к каноническому виду, получим:

$$W(p) = \frac{\Delta R_T}{\Delta \Theta} = \frac{K_o}{\tau_e \cdot p + 1},$$

где

$$K_o = \frac{\beta_o \cdot R_{T0}}{1 - D_o} \cdot \frac{R_{T0} - R}{R_{T0} + R},$$

$$\tau_e = \frac{\tau_e}{1 - D_o} \cdot \frac{R_{T0} - R}{R_{T0} + R}.$$

Таким образом, терморезистор, используемый в качестве термочувствительного элемента, в линейном приближении может быть представлен апериодическим инерционным звеном первого порядка.

Из уравнения передаточной характеристики следует, что значение постоянной времени зависит от значения  $D_o$ , которое определяется режимом работы терморезистора, его рассеиваемой мощностью. Однако увеличивать рассеиваемую мощность можно лишь до определенного предела, называемого максимальной рассеиваемой мощностью терморезистора. Превышение этого предела ведет к разрушению терморезистора.

Более эффективно на постоянную времени влияет изменение напряжения питания мостовой схемы, поддерживающее постоянный температурный режим терморези-

стора [5]. Изменить напряжение можно с помощью отрицательной обратной связи, которая обеспечивала бы заданное соотношение между значением отклонения температуры окружающей среды и изменением величины сопротивления терморезистора. Авторами статьи отрицательная обратная связь была реализована с помощью операционного усилителя, на вход которого подавалось напряжение разбаланса моста, а выходной сигнал изменял питающее напряжение мостовой схемы (рис.3).

Введение усилителя преобразует структурную схему цепи с терморезистором (рис.4), и уравнение (13) приводится к виду:

$$\frac{\tau_e \cdot p + 1}{R_{T0}} \Delta R_T = \frac{2 \cdot D_o}{(1 + D_o) \cdot I_{RT0}} \cdot \Delta I_{RT} - \frac{\beta_o}{1 + D_o} \cdot \Delta \Theta, \quad (15)$$

$$\Delta I_{RT} = \frac{I_{RT0} \cdot (G - 1) - I_{RT0} \cdot R_{T0}}{(R_{T0} + R)^2} \cdot \Delta R_T,$$

$G$  — коэффициент влияния обратной связи.

Из (15) получим передаточную функцию для цепи с терморезистором, охваченной отрицательной обратной связью:

$$\frac{\Delta R_T}{\Delta \Theta} = \frac{\beta_o \cdot R_{T0} \cdot (R_{T0} + R)^2}{(\tau_e \cdot p + 1) \cdot (R_{T0} + R)^2 \cdot (1 + D_o) + 2 \cdot D_o \cdot R_{T0} \cdot (R \cdot G - R_{T0})}. \quad (16)$$

Приведем уравнение (16) к каноническому виду:

$$W(p) = \frac{\Delta R_T}{\Delta \Theta} = \frac{K_G}{\tau_G \cdot p + 1}, \quad (17)$$

где

$$K_G = \frac{\beta_o \cdot R_{T0}}{1 + D_o + \frac{2 \cdot D_o \cdot R_{T0} \cdot (R \cdot G - R_{T0})}{(R_{T0} + R)^2}}$$

$$\tau_G = \frac{\tau_e}{1 + \frac{2 \cdot D_o \cdot R_{T0} \cdot (R \cdot G - R_{T0})}{(R_{T0} + R)^2 \cdot (1 + D_o)}}.$$

Анализируя выражение для  $\tau_G$ , легко увидеть, что с увеличением глубины отрицательной обратной связи постоянная времени терморезистивного преоб-

разователя уменьшается. При использовании терморезистора СТЗ-25 ( $R_{T_0}=1,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$  и  $\tau_G=0,4 \text{ с}$ ) и параметрах цепи  $R=1,5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$ ,  $G=100$  постоянная времени  $\tau_G$  составляет 0,0078с.

Таким образом, отрицательная обратная связь в значительной степени снижает постоянную времени терморезистивного преобразователя. Обеспечив достаточную ее глубину ( $G \approx 0,01 \text{ с}$ ), можно получить прибор с  $\tau_G \approx 0,01 \text{ с}$ , что существенно расширяет возможности его использования в системах контроля и управления.

Введение отрицательной обратной связи практически полностью компенсирует инерционность терморезистора. Отсюда следует вывод о том, что быстродействующие терморезистивные датчики-преобразователи можно построить

на основе сравнительно медленных элементов.

Сопоставление рассмотренных методов (коррекции динамических характеристик, двух термопреобразователей и обратной связи), подтверждает серьезные преимущества последнего. Введение обратной связи не только уменьшает постоянную времени, но и стабилизирует температурный режим терморезистора, обеспечивая постоянное значение показателя инерции и снижая погрешность измерений. Кроме того, в режиме постоянной температуры зависимость сопротивления от температуры оказывается линейной, т.е. не требуется дополнительных схем линеаризации. Реализация метода обратной связи очень проста и не требует значительных аппаратных затрат.

На основе метода обратной связи в

МГИЭТ спроектированы приборы ИПС-1 (измерительный преобразователь скорости потока) и ИПТ-1 (измерительный преобразователь температуры).

### Литература

1. Гордов А.Н. Основы температурных измерений. М.:1992.
2. Шашков А.Г. Терморезисторы и их применение. М.:1967.
3. Шукшуров В.Е. Корректирующие звенья в устройствах измерения нестационарных температур. М.:1980.
4. Ярышев В.Н. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Л.:1992.
5. Дубовой Н.Д., Осокин В.И., Поротов В.Н., Толчинский А.Д. Автоматизация измерений и контроля электрических и неэлектрических величин. М.:1987.

## Представляем авторов статьи

**ДУБОВОЙ Николай Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, начальник отраслевой научно-исследовательской лаборатории МГИЭТ. Известный специалист в области автоматизированных систем контроля технологических процессов и изделий. Лауреат премии Совета Министров СССР за разработку и внедрение систем неразрушающего контроля изделий космической техники.

**ДУДАРЕВ Дмитрий Александрович**. В 1995 году окончил факультет микроприборов и технической кибернетики МГИЭТ. Аспирант научно-исследовательской лаборатории управляющих и информационных систем.

**В 2005 году на рынке появятся ДОЗУ емкостью 1 Гбит**

### Дайджесты

В конце 1996 года фирма Samsung Electronics продемонстрировала полностью функционирующую схему ДОЗУ емкостью 1 Гбит. Время выборки ДОЗУ с мультисинхронной архитектурой при комнатной температуре составляет 30 нс, напряжение питания — 1,8—2,0 В. Схема изготовлена по КМОП-технологии с 0,18-мкм топологическими нормами и занимает площадь 569, 5 мм<sup>2</sup> (примерно в шесть раз большую, чем схема последнего варианта микропроцессора PowerPC фирмы Motorola, содержащая 1,074 млрд. полностью функционирующих ячеек памяти). К концу столетия фирма планирует выпустить опытные образцы схемы. Крупносерийное производство будет освоено к 2005 году.

В стремлении не отстать от конкурента, LG Semicon организовала совместное исследовательское подразделение с Национальным университетом Сеула. Фирма планирует затратить на разработку ДОЗУ емкостью 1 Гбит 18,3 млн. долл., университет предоставит свои лаборатории.

*Electronic Engineering Times, 1996, N927, p.2*  
*Electronic Design, 1997, v.45, N1, p.28*

Динамометрический преобразователь на базе микроэлектромеханической схемы (МЭМС), разработанный учеными Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, позволяет измерять усилие, развиваемое отдельными клетками сердечных мышц. Преобразователь выполнен по стандартной КМОП-технологии и имеет трехмерную структуру с алюминиевыми навесными соединителями, пьезорезистивным датчиком на основе поликристаллического кремния и КМОП-схемой усилителя. Для формирования структур с ультрамелкими элементами применялся разработанный специалистами университета новый метод травления кремния с помощью раствора на основе фторида ксенона.

Опытный образец преобразователя, укрепленный на тканях сердечной мышцы, способен непосредственно измерять ее сокращение. По мнению разработчиков, это позволит улучшить разрешение при создании моделей, описывающих работу сердца.

*Electronic Engineering Times, 1996, N887, p.39*

**Новые возможности в подавлении электромагнитных помех**

### Дайджесты

Совместными усилиями фирм AVX и Куосега выпущено семейство керамических чип-компонентов KNF, которые, по утверждению разработчиков, предоставят конструкторам электронных систем новые возможности в подавлении электромагнитных помех. Устройство представляет собой фильтр с распределенными параметрами, образуемый конденсатором и элементом индуктивности. Рабочее напряжение фильтров семейства равно 25 В, ток — 200 мА. Значение емкости лежит в диапазоне 33 - 235 пФ. Частота отсечки фильтров равна 25, 50, 100 и 200 МГц. Среднее значение коэффициента подавления помех в диапазоне частот от 200 МГц до 1,1 ГГц — 20 дБ. Фильтры нового семейства выпускаются в типоразмере 1206 (3,2x1,6 мм). Цена их колеблется от 20 до 25 центов при закупке партии в 100 тыс. шт. Компоненты предназначены для сотовых радиотелефонов, портативных компьютеров, цифровых телевизоров и кассетных видеомагнитофонов.

Фирма AVX также выпустила монтируемые на поверхность танталовые конденсаторы с чрезвычайно низким эквивалентным последовательным сопротивлением (ЭПС), предназначенные для замены алюминиевых электролитических конденсаторов. Конденсаторы серии TPS-V выпущены в новом низкопрофильном V-корпусе. Отношение номинальных значений емкости к напряжению у них превышает 3500 мкФ при напряжении 16 В), среднеквадратичное значение потребляемого тока при комнатной температуре равно 2 А. Размер конденсаторов в корпусе V-типа — 7x6 мм. В отличие от алюминиевых компонентов новые устройства пригодны для пайки методом расплавления полуды. Цена их — 0,85—1,5 долл. при закупке партии в 10 тыс. шт., что примерно на 10% выше цены алюминиевых приборов с аналогичными параметрами. Конденсаторы предназначены для стабилизаторов напряжения источников питания. Фирма также выпускает компоненты серии TPS-V с значениями ЭПС 55 мОм на частоте 10 кГц. Цена этих компонентов — 0,9—1,2 долларов.

*Electronic Engineering Times, 1996, N923, p.84*

**МЭМС регистрирует поле, создаваемое при сокращении мышцы сердца**

### Дайджесты