

Измерительный преобразователь для широкополосных вольтметров переменного тока

Олег Дворников, В. Чеховский, Юрий Шутьевич

Рассмотрен измерительный преобразователь переменного напряжения произвольной формы в постоянное по уровню среднеквадратического значения, имеющий погрешность менее 3% для синусоидальных сигналов с эффективным значением от 0,3 до 2,5 В и частотой от 20 Гц до 100 МГц.

Измерительные преобразователи среднеквадратического значения напряжения (ПСКЗ) являются основой различных электроизмерительных приборов – вольтметров переменного тока ВЗ, преобразователей напряжения В9 и др. Серийно выпускаемые микросхемы экспоненциально-логарифмических ПСКЗ (AD536, AD636, AD637) обладают высокой точностью, но небольшим частотным диапазоном, пропорциональным уровню входного сигнала [1]. Микросхемы преобразователей, использующих аналоговые множители напряжения (AD834, AD8361, AD8362, AD8317), могут обрабатывать высокочастотные сигналы, однако не допускают наличия постоянной и низкочастотной составляющих в спектре сигнала, и их погрешность довольно велика [2].

В связи с этим для высокоточного преобразования сигналов произвольной формы обычно используются термоэлектрические преобразователи [3], из которых наилучшим соотношением качество/цена характеризуются полупроводниковые транзисторные термопреобразователи. На основе теоретического анализа [4] разработаны различные электрические схемы ПСКЗ с транзисторными термопреобразователями [4, 5]. Однако исследования показали, что для обеспечения технологичности изготовления при массовом производстве и стабильности характеристик такие ПСКЗ должны быть модифицированы, а именно: увеличена эффективность преобразования мощности входного сигнала в выходное напряжение термопреобразователя и максимально уменьшена площадь печатной платы, предназначенной для размещения ПСКЗ в термостате. Необходимо также разработать методику регулировки, обеспечивающую высокую линейность передаточной характеристики транзисторных ПСКЗ.

Для решения указанных задач нами разработана и изготовлена микросборка полупроводникового дифференциального термоэлектрического преобразователя РБПН001 [6] с коэффициентом преобразования от 2,5 до 3,0 мВ/мВт и электронный модуль ПСКЗ на её основе.

Для решения указанных задач нами разработана и изготовлена микросборка полупроводникового дифференциального термоэлектрического преобразователя РБПН001 [6] с коэффициентом преобразования от 2,5 до 3,0 мВ/мВт и электронный модуль ПСКЗ на её основе.

Микросборка РБПН001 (см. рис. 1) состоит из двух кремниевых кристаллов, размещённых на теплоизолирующей подложке. Каждый кристалл содержит два нагревательных резистора и *n-p-n*-транзистор. При необходимости резисторы можно соединить параллельно для увеличения выходного сигнала термоэлектрического преобразователя либо последовательно для увеличения входного сопротивления и ослабления требований к усилителю, находящемуся перед термоэлектрическим преобразователем [5]. Особое внимание при проектировании микросборки уде-

лялось увеличению коэффициента термоэлектрического преобразования. Для этого максимально уменьшено расстояние между нагревательным резистором и датчиком температуры – эмиттерным переходом *n-p-n*-транзистора, значительно уменьшен отвод тепла от кристаллов за счёт выбора материала теплоизолирующей подложки, минимизации площади и толщины полупроводниковых кристаллов, уменьшения длины и диаметра проводников, соединяющих контактные площадки кристалла и выводы корпуса [7].

Преобразователь, выполненный на микросборке РБПН001, функционирует следующим образом. Известно, что температура резистора является линейной функцией от рассеиваемой резистором мощности и, следовательно, определяется квадратом среднеквадратического значения приложенного напряжения или тока:

$$P = \frac{1}{TR} \int_0^T V_{\text{INP}}^2(t) dt, \quad (1)$$

где P – средняя мощность, рассеиваемая напряжением $V_{\text{INP}}(t)$ на резисторе R за время T .

Если изменяющийся во времени сигнал $V_{\text{INP}}(t)$ приложен к нагревательному резистору R_A , то мощность, рассеиваемая на этом резисторе, приводит к его нагреванию, передаче тепла к транзистору Q_A и изменению напряжения на прямо смещённом эмиттерном переходе Q_A . В том случае, когда напряжение на резисторе R_B отличается от напряжения на R_A , сигнал разбаланса, равный разности коллекторных напряжений Q_A и Q_B , будет усиливаться DA_2 , поступать через схему извлечения квадратного корня DA_3-DA_5 на резистор R_B и приводить к изменению мощности, рассеиваемой R_B . При этом изменяется температура R_B , Q_B , напряжение на прямо смещённом эмиттерном и, следовательно, обратно смещённом коллекторном переходе Q_B .

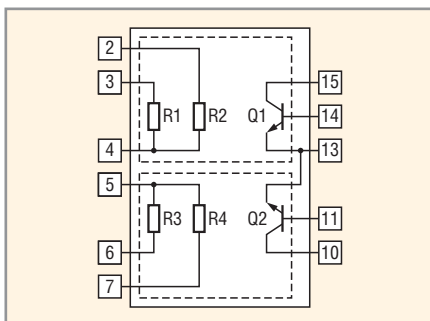


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная микросборки РБПН001

Обратная связь через цепь DA₂–DA₅ приведёт к такому изменению напряжения на резисторе R_B, при котором коллекторные напряжения Q_A и Q_B будут одинаковыми. Если резисторы R_A, R_B и транзисторы Q_A, Q_B имеют идентичные характеристики, то при нулевом напряжении разбаланса напряжение постоянного тока на R_B (V_{RB}) будет прямо пропорционально среднеквадратическому значению изменяющегося во времени входного сигнала V_{INPRMS}. Другими словами, мощность напряжения постоянного тока, подаваемая на резистор R_B, равна мощности, рассеиваемой резистором R_A от изменяющегося во времени сигнала:

$$P_{RA} = P_{RB}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{TR_A} \int_0^T V_{INP}^2(t) dt = \frac{V_{RB}^2}{R_B}, \quad (3)$$

при R_A = R_B,

$$V_{RB} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{INP}^2(t) dt} \equiv V_{INPRMS}. \quad (4)$$

Для средне- и высокочастотных сигналов происходит усреднение входной мощности благодаря тепловой постоянной времени полупроводниковых кристаллов, что обеспечивает постоянное напряжение на коллекторе Q_A.

Схема ПСКЗ, приведённая на рисунке 2, имеет ряд особенностей. В неё включен диод D₃ для устранения положительной обратной связи, возникающей при отрицательном напряжении на R_B, и конденсаторы C₂, C₄, C₅, обеспечивающие устойчивую работу дифференциального каскада (Q_A, Q_B, R₂, R₃, R₅, R₆) и усилителя DA₂. Источник тока дифференциального каскада выполнен на высокоомном резисторе R₄, зашунтированном конденсатором C₁. Такое схемотехническое решение обладает меньшим уровнем шума по сравнению с активным источником тока. Для улучшения переходной характеристики ПСКЗ введена схема извлечения квадратного корня на операционных усилителях (ОУ) DA₃, DA₅ и наборе n–p–n-транзисторов DA₄.

Преобразователь реализован на печатной плате размером 30 × 45 × 5 мм. Для подачи сигналов и напряжения питания применяются проводники, присоединяемые к плате через монтажные отверстия.

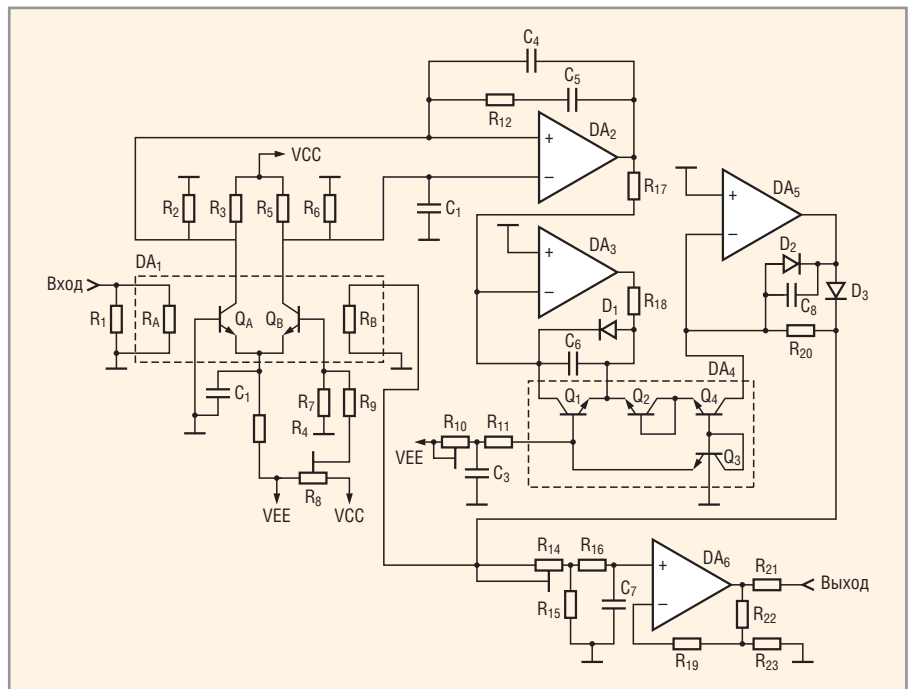


Рис. 2. Принципиальная схема электронного модуля ПСКЗ (D₁–D₃ – BAV99; DA₁ – БРПН001; DA₂ – ОР–27; DA₃, DA₅ – AD711; DA₄ – CA3046; DA₆ – LTC1150)

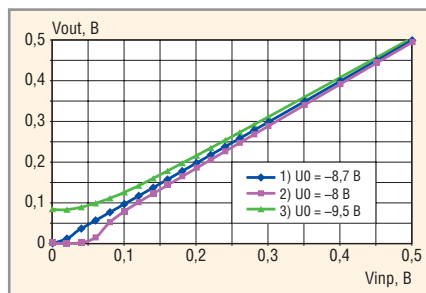


Рис. 3. Передаточная характеристика ПСКЗ при различном напряжении (V₀) на входе делителя R₇, R₉

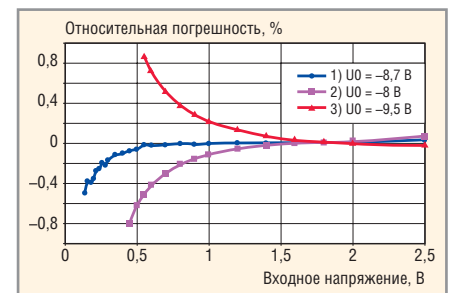


Рис. 4. Относительная погрешность ПСКЗ при различном напряжении (V₀) на входе делителя R₇, R₉

Особое внимание уделено достижению линейности передаточной характеристики с помощью регулировочных элементов, для чего:

- 1) потенциометром R₈ компенсируется напряжение смещения всего ПСКЗ, а именно устанавливается близкое к нулю напряжение в узле «Выход» при нулевом напряжении в узле «Вход»;
- 2) резистивным делителем R₁₄, R₁₅ и масштабирующим усилителем DA₆, R₁₉, R₂₂, R₂₃ задаётся требуемый коэффициент преобразования во всём динамическом диапазоне;
- 3) потенциометром R₁₀ корректируется режим по постоянному току

схемы извлечения квадратного корня, что позволяет выбрать область вольтамперных характеристик транзисторов DA₄, гарантирующую максимальную линейность передаточной характеристики.

Возможность выполнения высокоточной настройки ПСКЗ иллюстрируют результаты измерений передаточной характеристики (см. рис. 3) и относительной погрешности (см. рис. 4) ПСКЗ для входного напряжения постоянного тока и одного регулируемого потенциометром R₈ параметра – напряжения (V₀) на входе делителя R₇, R₉. При небольшом входном напряжении ПСКЗ имеет зо-

Таблица 1. Зависимость относительной погрешности преобразования Δ от уровня входного напряжения постоянного тока V_{INPDC}

| V _{INPDC} , B | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Δ, % | -1,500 | -0,350 | -0,167 | -0,060 | -0,043 | -0,020 | -0,013 | -0,010 | -0,004 |

Таблица 2. Зависимость относительной погрешности преобразования Δ от уровня V_{INPRMS} и частоты f входного напряжения синусоидальной формы

| Параметры | Частота входного напряжения синусоидальной формы | | | | | | | | |
|---|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | от 20 Гц до 1 МГц | 1 МГц | 3 МГц | 5 МГц | 10 МГц | 30 МГц | 50 МГц | 100 МГц | 150 МГц |
| Δ , %, при $V_{\text{INPRMS}} = 1$ В | 0,07 | -0,40 | -0,50 | -0,40 | -0,10 | -0,60 | -0,86 | -1,83 | -5,97 |
| Δ , %, при $V_{\text{INPRMS}} = 0,3$ В | 0,15 | -0,87 | -0,99 | -0,93 | -0,77 | -1,33 | -1,77 | -2,73 | -6,1 |
| Источник сигнала | Fluke 5720A | Fluke 9500 | Fluke 9500 | Fluke 9500 | Fluke 9500 | Fluke 9500 | Fluke 9500 | Fluke 9500 | Fluke 9500 |

ну нечувствительности, но существует диапазон значений напряжения V_0 , при котором характеристика максимально линейна (кривая 1 на рисунке 3). Для исследованного экземпляра ПСКЗ величина V_0 должна быть равна $-8,6 \pm 0,3$ В, что обеспечивает минимальную относительную погрешность. Учитывая коэффициент ослабления делителя R_7 , R_9 , максимальная линейность достигнута при напряжении смещения дифференциальной пары Q_A/Q_B , приблизительно равном $-0,5$ мВ.

Измерение погрешности преобразования ПСКЗ проводилось при помощи высокостабильных источников питания Б5-78/1, прецизионного цифрового вольтметра В7-74 и калибраторов фирмы Fluke типа 5720А и 9500. Результаты измерения параметров макетного образца ПСКЗ приведены в таблицах 1 и 2.

Так как в диапазоне частот синусоидального сигнала от 1 до 100 МГц зарегистрированная погрешность ПСКЗ сравнима с погрешностью источника входного сигнала (прибора Fluke 9500), можно предположить, что реальная погрешность ПСКЗ в этом диапазоне частот меньше полученных значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворников О.В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 1. Преобразователи с экспоненциально-логарифмической обратной связью. Компоненты и технологии. 2004. № 9. С. 62-69.
2. Дворников О.В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 2. Преобразователи на аналоговых умножителях на-

пряжения. Компоненты и технологии. 2005. № 1. С. 34-39.

3. Дворников О.В. Микроэлектронные преобразователи переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения. Часть 3. Применение термоэлектрических преобразователей. Компоненты и технологии. 2005. № 2. С. 84-93.
4. Ott W.E. A new technique of thermal RMS measurement. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1974. Vol. 9. No. 12. P. 374-380.
5. Грязнов М.И. Измерение параметров импульсов. Радио и связь. 1991. С. 120-200.
6. Дворников О.В. Полупроводниковый дифференциальный термоэлектрический преобразователь. Chip News. 2004. № 8. С. 34-38.
7. Дворников О.В., Муравьев Б.Д., Володкевич А.А. Термочувствительная интегральная схема. Пат. 8810. Респ. Беларусь. МПК Н 01L 21/82, G 01R 19/03. ОАО «МНИПИ». № а20040544. заявл. 14.06.2004. ©