

## УСИЛИТЕЛИ

## AMPLIFIERS

Особенности применения

Features of Precision

прецизионных операционных усилителей ..... 2 ..... Op Amps Application

## СИГНАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ И МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ

## DSPs AND MICROCONTROLLERS

Перспективные сигнальные процессоры ..... 18 ..... Perspective Signal Processors

Показатели производительности сигнальных процессоров ... 26 ..... Benchmark Analysis for Signal Processors

## КОНТРОЛЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

## CONTROL AND AUTOMATION

Датчик относительной влажности воздуха DB-8Б ..... 27 ..... Relative Humidity Sensor DB-8B

## ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ

## SURFACE MOUNT TECHNOLOGY

Поверхностный монтаж электронных компонентов ..... 28 ..... Surface Mount Technology Circuits Assembly

VD MAIS восемь лет ..... 48 ..... VD MAIS' Eighth Anniversary

## ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И СИСТЕМЫ

## ELECTRONIC COMPONENTS AND SYSTEMS

2002 январь № 1 (53)

January 2002 No 1 (53)

Массовый ежемесячный научно-технический журнал

Monthly Scientific and Technical Journal

Учредитель и издатель:

Founder and Publisher:

Научно-производственная фирма **VD MAIS**Scientific-Production Firm **VD MAIS**

Зарегистрирован Министерством информации Украины 24.07.96 г.

Свидетельство о регистрации серия КВ № 2081Б

Издается с мая 1996 г. Подписной индекс 40633

Главный редактор: В.А. Романов

Director V.A. Davidenko

Head Editor V.A. Romanov

Зам. главного редактора: А.В. Ермолович

Managing Editor A.V. Yermolovich

Редакционная коллегия:

Editorial Board

В.В. Гирич, В.А. Давиденко, Н.Б. Малиновский,

V.V. Girich, V.A. Davidenko, N.B. Malynovskyy,

Г.Д. Местечкина, В.А. Тодосийчук, С.Б. Яковлев

G.D. Mestechkina, V.A. Todosiychuk, S.B. Yakovlev

Набор: А.С. Гриневич, Е.М. Шелест

Type and setting A.S. Grinevich, E.M. Shelest

Верстка и дизайн: М.С. Заславская

Design and Layout M.S. Zaslavskaya

Дизайн: А.А. Чабан

Design A.A. Chaban

Адрес: Украина, 01033, Киев, а/я 942, ул. Жилианская, 29

Address: Zhilyanska Str. 29, P.O. Box 942, 01033, Kyiv, Ukraine

Тел.: (380-44) 227-2262, 227-1356; Факс: (380-44) 227-3668; E-mail: info@vdmals.kiev.ua; Интернет: www.vdmals.kiev.ua

Цветоделение и печать: ДП "Такі справи", т./ф.: 446-2420.

Подписано к печати 28.01.2002. Формат 60x84/8. Тираж 1000 экз. Зак. № 201-157-0142



## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

*Прецизионные операционные усилители (ОУ) находят широкое применение в самых различных областях техники, особенно для усиления малых выходных сигналов различных датчиков. Особое внимание в статье уделено анализу влияния различных параметров прецизионных ОУ на точность усилителей постоянного тока на их основе. Приведены некоторые практические рекомендации.*

**В. Литвих**

Операционные усилители на сегодняшний день наиболее широко применяются в аналоговых и аналого-цифровых системах сбора и обработки измерительной информации. Несмотря на большое количество всевозможных типов ОУ, традиционная классификация, которую использует большинство фирм-производителей, обязательно включает определенные типы усилителей, за которыми закрепилось название "прецизионные ОУ". Несмотря на то, что это определение имеет качественный характер, оно предполагает, что численные значения некоторых параметров существенно выше, чем у других типов ОУ. Как следствие, использование прецизионных ОУ позволяет обеспечить существенно меньшие значения погрешностей схем, выполненных на их основе. Наибольшее распространение такие усилители получили в различных схемах, предназначенных для усиления или преобразования малых постоянных (или относительно низкочастотных) сигналов.

Чтобы правильно выбрать ОУ для выполнения определенного набора требований, разработчик должен четко обозначить те параметры, которые необходимо обеспечивать в проектируемой схеме: уровни входного и выходного сигналов, коэффициент усиления замкнутой системы, требуемый уровень точности, входной и выходной импеданс схемы, параметры окружающей среды и другие факторы. Не менее важно представлять, что определенный изготовитель ОУ имеет в виду, указывая значения тех или иных его параметров. Два разных изготовителя могут указывать практически одинаковые значения параметров, но при этом основываться на различных методах их измерений. Это может привести к неправильному выбору усилителя.

Основная особенность использования прецизионных ОУ для решения поставленной технической задачи состоит не столько в выборе определенного схемотехнического решения (вопросы схемотехники различных устройств на основе ОУ достаточно подробно о-

вещены как в учебниках по электронике, так и в спецификации на многие современные усилители), сколько в выборе такого типа ОУ, параметры которого обеспечивают выполнение определенного набора требований. Это, в свою очередь, предполагает проведение детального анализа тех погрешностей, которые обусловлены как параметрами самого ОУ, так и других элементов схемы. Именно поэтому в данной статье особое внимание уделено анализу различных погрешностей одного из наиболее распространенных типов схем на основе прецизионных ОУ — усилителя постоянного тока (УПТ).

### 1. ОСНОВНЫЕ НОРМИРУЕМЫЕ ДЛЯ ОУ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### Параметры, характеризующие усилительные свойства ОУ

Для усилителей, входной каскад которых реализован как традиционный дифференциальный (для обозначения такого типа ОУ применяется термин «Voltage-Feedback»), параметр, характеризующий их усилительные свойства, нормируют в виде коэффициента усиления по напряжению  $A_{OL}$  (Open-Loop Gain) — отношения изменения выходного напряжения  $\Delta V_{OUT}$  к изменению входного дифференциального напряжения  $\Delta V_{IN}$ :  $A_{VOL} = \Delta V_{OUT} / \Delta V_{IN}$ . Существует определенная специфика нормирования этого параметра различными фирмами-производителями. Так фирма MAXIM для своих ОУ нормирует значение коэффициента усиления в режиме большого сигнала (Large-Signal Open-Loop Gain) в логарифмических единицах — дБ. Фирма Burr-Brown, называя этот параметр «Open-Loop Voltage Gain», также приводит его значение в дБ. Фирма Analog Devices, называя этот параметр Open-Loop Gain, обычно приводит его значение в В/мкВ (V/ $\mu$ V). Поскольку коэффициент усиления ОУ зависит от частоты, для большинства из них приводится амплитудно-частотная характеристика (зависимость модуля коэффициента усиления от частоты) как для разомкнутого усилителя, так и охваченного обратной связью.

Для ОУ типа «Current-Feedback» усилительным параметром является сопротивление прямой передачи  $R_T$  (transresistance) — отношение изменения выходного напряжения  $\Delta V_{OUT}$  к изменению входного тока  $\Delta I_{IN}$  инвертирующего входа в случае соединения неинвертирующего входа ОУ с точкой нулевого потенциала:  $R_T = \Delta V_{OUT} / \Delta I_{IN}$ . Значение сопротивления прямой пе-



редачи  $R_T$  может быть достаточно большим. Например, 200 кОм для ОУ типа ОРА685 фирмы Burr-Brown, 100 МОм для ОУ типа AD846 фирмы Analog Devices.

#### Параметры ОУ, определяющие коэффициент передачи синфазного входного напряжения

Важнейшей особенностью ОУ является ослабление синфазного напряжения  $V_{CM}$  (Common-Mode Voltage). Коэффициент передачи синфазного напряжения  $A_{CM}$  (Common-Mode Gain) представляет собой отношение изменения выходного напряжения  $\Delta V_{OUT}$  ОУ к изменению входного синфазного напряжения  $\Delta V_{CM}$ :  $A_{CM} = \Delta V_{OUT} / V_{CM}$ . Обычно для ОУ нормируют ослабление синфазного входного напряжения CMR (Common-Mode Rejection):  $CMR = 20 \log_{10}(CMRR)$ , где CMRR (Common-Mode Rejection Ratio) — коэффициент ослабления синфазного напряжения, который определяется как отношение коэффициента усиления дифференциального напряжения  $A_{DM}$  к коэффициенту передачи синфазного напряжения  $A_{CM}$ :  $CMRR = A_{DM} / A_{CM}$ . Для большинства прецизионных ОУ на низких частотах значение CMR > 100 дБ.

Точное нормирование CMR усложняется тем, что обусловленная синфазным напряжением погрешность нелинейно зависит от его уровня, а также от температуры. Поэтому данные о CMR, публикуемые, например, фирмой Analog Devices, являются усредненными, т. к. они нормируются при определенных значениях синфазного напряжения, выходного сопротивления источника синфазного напряжения и температуры.

#### Входное напряжение смещения $V_{OS}$ , временной ( $V_{OS}/\Delta t$ ) и температурный ( $V_{OS}/\Delta T$ ) дрейф входного напряжения смещения

Входное напряжение смещения  $V_{OS}$  (Input Offset Voltage) определяется как напряжение на выходе некоторого идеального источника напряжения, подключение которого ко входу ОУ обеспечивает значение выходного напряжения, равное нулю:  $V_{OUT} = 0 |_{V_{IN} = V_{OS}}$ . Для большинства современных прецизионных ОУ типовое значение  $V_{OS} \leq 10$  мкВ. Поскольку значение этого параметра зависит от времени эксплуатации, то некоторые фирмы (например, Analog Devices, Burr-Brown), указывают значение этого параметра как "начальное напряжение смещения" (Initial Input Offset Voltage) при температуре 25 °С и определенном значении напряжений питания. Значение  $V_{OS}$ , которое нормирует фирма MAXIM для своих ОУ, измеряется в течение минуты после включения питания.

Временной дрейф напряжения смещения ( $V_{OS}/\Delta t$ ) или долговременная стабильность напряжения смещения (Long-Term Input Offset Voltage Stability) характеризует некоторый усредненный тренд входного напряжения смещения  $V_{OS}$  после первых 30 дней эксплуатации (исключая первый час эксплуатации). Его нормируют обычно в мкВ/мес. Например, для прецизионного ОУ

типа AD707 фирмы Analog Devices временной дрейф напряжения смещения ( $V_{OS}/\Delta t$ ) не превышает 0.3 мкВ/мес. Учитывая нелинейную зависимость напряжения смещения от времени, фирма MAXIM для некоторых типов прецизионных ОУ (MAX430/432) нормирует этот параметр в нВ/ $\sqrt{\text{мес}}$ .

Температурный дрейф напряжения смещения ( $V_{OS}/\Delta T$ ) [мкВ/°С] является одним из важнейших параметров, характеризующих точность ОУ. Для современных прецизионных усилителей типовое значение ( $V_{OS}/\Delta T$ )  $\leq 0.1$  мкВ.

#### Входной ток $I_B$ , разность входных токов $I_{OS}$ и их температурный дрейф ( $\Delta I_B / \Delta T$ ), ( $\Delta I_{OS} / \Delta T$ )

Несмотря на то, что параметры "Input Bias Current" и "Input Offset Current", нормируемые для всех прецизионных ОУ, формально переводятся как "входной ток смещения", между ними существует принципиальное различие. По определению "Input Bias Current"  $I_B$  — это входной ток (по инвертирующему  $I_{B-}$  и неинвертирующему  $I_{B+}$  входам). Для всех ОУ, которые производит фирма Analog Devices, нормируется не среднее значение обоих входных токов, а их максимальное значение. "Input Offset Current",  $I_{OS}$  — параметр, который представляет собой разность входных токов:  $I_{OS} = I_{B+} - I_{B-}$ . Большинство фирм параметры  $\Delta I_B / \Delta T$ ,  $\Delta I_{OS} / \Delta T$  нормирует в пА/°С как средний температурный дрейф входного тока и разности входных токов (обычно для максимального диапазона температур от  $T_{мин}$  до  $T_{макс}$ ). Фирма MAXIM, нормируя  $I_B$ ,  $I_{OS}$  при температуре 25 °С, ограничивается указанием того, что значения этих параметров удваиваются на каждые 10 °С в диапазоне температур от 60 °С до  $T_{макс}$ .

#### Шумовые характеристики ОУ

Основными характеристиками, которые позволяют оценить шумовые свойства конкретного ОУ, являются спектральная плотность входного (т. е. приведенного ко входу) напряжения шумов (Voltage Noise Spectral Density) и спектральная плотность шумовой составляющей входных токов (Input Current Noise Spectral Density). Шум прецизионных ОУ имеет две составляющие: шум, спектральная плотность напряжения которого в области средних частот практически постоянна (для такого шума иногда используется определение "белый" шум, что, строго говоря, не является достаточно корректным), и низкочастотный шум, для которого, как правило, используют определение "1/f шум", т. е. шум, спектральная плотность мощности которого обратно пропорциональна частоте. Существует определенное различие в нормировании обеих составляющих шума. Для "белого" шума обычно указывают среднеквадратическое значение (rms) приведенного ко входу напряжения шумов (Input Voltage Noise — IVN) в полосе 1 Гц на определенной частоте (или на некоторых частотах). Например, для ОУ типа AD797 фирма Analog Devices

Типовые значения основных параметров прецизионных ОУ

| Фирма          | Тип ОУ  | Напряжение питания, В, мин/макс | $A_{OL}$ , дБ/(В/мкВ) | $V_{OS}$ , мкВ | $I_B$ , нА | $I_{OS}$ , нА | $\Delta V_{OS}/\Delta T$ , мкВ/°С | $\Delta I_B/\Delta T$ , нА/°С | IVN, нВ/√Гц | ICN, пА/√Гц | CMRR, дБ |
|----------------|---------|---------------------------------|-----------------------|----------------|------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|----------|
| Analog Devices | AD855x  | +2.7/+6                         | 145 дБ                | 1              | 0.01       | 0.02          | 0.005                             | -                             | 42          | 0.002       | 140      |
|                | AD857x  | +2.7/+6                         | 145 дБ                | 1              | 0.01       | 0.02          | 0.005                             | -                             | 42          | 0.002       | 140      |
|                | AD707C  | ±3/±22                          | 10 В/мкВ              | 5              | 0.5        | 0.02          | 0.03                              | 0.01                          | 10          | 0.14        | 140      |
| Burr-Brown     | OPA77E  | ±3/±22                          | 12 В/мкВ              | 10             | 1.2        | 0.3           | 0.03                              | 0.04                          | 7.5         | 0.26        | 140      |
|                | OPA177E | ±3/±22                          | 12 В/мкВ              | 4              | 0.5        | 0.3           | 0.03                              | 0.04                          | 55          | 4.5         | 140      |
| MAXIM          | MAX42x  | ±2.5/±16.5                      | 150 дБ                | 1              | 0.01       | 0.015         | 0.02                              | -                             | -           | 0.01        | 140      |
|                | MAX43x  | ±2.5/±16.5                      | 150 дБ                | 1              | 0.01       | 0.015         | 0.02                              | -                             | -           | 0.01        | 140      |

нормирует среднеквадратическое значение входного напряжения шума, равное  $0.9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  в полосе 1 Гц на частоте 1 кГц. Низкочастотный  $1/f$  шум обычно нормируют в диапазоне частот от 0.01 до 1 Гц (или от 0.1 до 10 Гц) в виде значения двойного амплитудного напряжения (peak-to-peak — p-p). Для некоторых типов прецизионных ОУ указывают значение  $f_C$  угловой частоты  $1/f$  шума, т. е. частоты, на которой спектральная плотность  $1/f$  шума равна спектральной плотности "белого" шума, причем меньшее значение этого параметра соответствует лучшим характеристикам усилителя. Значение угловой частоты  $f_C$  может находиться в пределах от долей герц для прецизионных ОУ, выполненных на основе биполярной технологии (например, 0.7 Гц для ОУ AD707 фирмы Analog Devices), и нескольких сотен герц для ОУ, входной каскад которых выполнен на полевых транзисторах.

Аналогичным образом нормируют шумовую составляющую входного тока (Input Current Noise — ICN) ОУ — в виде среднеквадратического значения тока (пА/√Гц) на определенной частоте (или на некоторых частотах) для "белого" шума и в виде значения двойного амплитудного тока в определенном диапазоне низких частот для  $1/f$  шума.

В таблице приведены типовые значения основных параметров прецизионных ОУ.

## 2. ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ НЕКОТОРЫХ СУПЕРПРЕЦИЗИОННЫХ ОУ

Ключевыми параметрами прецизионных ОУ являются входное напряжение смещения  $V_{OS}$  и температурный дрейф входного напряжения смещения ( $V_{OS}/\Delta T$ ), входные токи  $I_{B+}$ ,  $I_{B-}$ , разность входных токов  $I_{OS}$  и их температурный дрейф. Минимальное значение этих параметров в ОУ, реализованных на основе традиционного дифференциального каскада, ограничено технологическими возможностями обеспечения идентичности характеристик транзисторов и резисто-

ров. Радикальным методом снижения значения указанных параметров в УПТ является реализация их по структуре М-ДМ (Модулятор-Демодулятор). Основная идея, положенная в основу реализации таких усилителей (рис. 1), состоит в преобразовании с помощью модулятора (переключатель  $SW1$ ) входного постоянного напряжения  $V_{IN}$  в переменное  $u_{IN}(t)$ , усилении этого напряжения с помощью усилителя переменного напряжения (входной разделительный конденсатор  $C2$ , усилитель  $Y$ , выходной разделительный конденсатор  $C3$ ), в котором отсутствует напряжение смещения, и последующем преобразовании усиленного переменного напряжения  $u_{OUT}(t)$  в постоянное напряжение  $V_{OUT}$  с помощью демодулятора (переключатель  $SW2$ ).

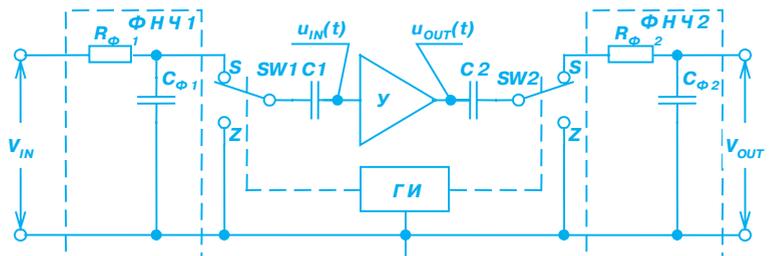


Рис. 1. Структурная схема УПТ типа М-ДМ

Модулятором и демодулятором управляет генератор импульсов (ГИ) с частотой  $f_{CI}$ , значение которой обычно выбирают в пределах от сотен Гц до нескольких кГц. Элементы  $R_{Ф1}$ ,  $C_{Ф1}$  выполняют функции фильтра нижних частот ФНЧ1 (antialiasing filter). Элементы  $R_{Ф2}$ ,  $C_{Ф2}$  также выполняют функции фильтра нижних частот ФНЧ2, который предназначен для уменьшения уровня переменной составляющей демодулированного напряжения.

Существует и иная трактовка принципа работы УПТ типа М-ДМ как устройства с автоматической коррекцией напряжения смещения [1], в соответствии с которой конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  в такте, когда переключатели  $SW1$ ,  $SW2$  находятся в положении "Z" (zero), заряжаются соответственно до входного и выходного напряжения смещения усилителя  $Y$ , а в такте, когда пере-



ключатели  $SW1$ ,  $SW2$  находятся в положении "S" (sample), вход усилителя  $У$  подключается к входному напряжению  $V_{IN}$  через конденсатор  $C1$  (благодаря чему осуществляется компенсация входного напряжения смещения усилителя  $У$ ), а выход усилителя  $У$  подключается к выходному полюсу (напряжение  $V_{OUT}$ ) через конденсатор  $C2$ , благодаря чему осуществляется компенсация напряжения смещения усилителя  $У$ .

Классической схеме усилителя типа М-ДМ присущ ряд недостатков. Во-первых, конечное значение диапазона частот  $f_K$  такого усилителя принципиально ограничено частотой коммутации  $f_{CL}$  переключателей  $SW1$ ,  $SW2$  (в соответствии с теоремой Котельникова эта частота должна быть не менее чем в два раза больше частоты  $f_K$ ). Дополнительным ограничением диапазона частот усилителя типа М-ДМ является наличие фильтра нижних частот  $\Phi НЧ1$ . Во-вторых, в такте "zero" вход усилителя  $У$  отключается от входного напряжения  $V_{IN}$ .

Развитие идеи периодической коммутации привело к появлению нового схемотехнического решения для реализации прецизионных усилителей типа "Chopper Stabilized" — например, ОУ типа MAX420,423, MAX430-432 фирмы MAXIM, семейство ОУ AD855x, AD863x фирмы Analog Devices. Среди упомянутых усилителей наиболее прецизионными являются ОУ семейства AD855x фирмы Analog Devices —  $V_{OS} < 5$  мкВ,  $(\Delta V_{OS}/\Delta T) < 50$  нВ/°С. Это объясняет тот факт, что фирма Analog Devices в свое время анонсировала их появление как ОУ типа "Zero Drift Op-Amp", т. е. усилителей с практически нулевым дрейфом напряжения смещения.

Упрощенная структурная схема ОУ семейства AD855x приведена на рис. 2. Она содержит два усилителя: основной  $У1$  (main amp) и дополнительный  $У2$  (nulling amp), который используется для коррекции напряжения смещения (т. е. "обнуления") основного усилителя  $У1$ .

Источники напряжения  $V_{OS1}$ ,  $V_{OS2}$  (рис. 2) моделируют входное напряжение смещения усилителей  $У1$  и  $У2$ . Оба усилителя,  $У1$  и  $У2$ , кроме традиционных входов — инвертирующего и неинвертирующего — имеют дополнительный (регулирующий) вход ( $B_1$  и  $B_2$  соответственно), что определяет его название Trimmable Op-Amp. Выходное напряжение  $V_{OUT}$  такого усилителя связано с напряжениями  $V_{IN}$ ,  $V_{TR}$  на его входах соотношением:

$$V_{OUT} = A(V_{IN} + V_{OS}) \pm BV_{TR},$$

где  $A$  — коэффициент усиления дифференциального напряжения  $V_{IN} = V_{IN+} - V_{IN-}$ ,  $B$  — коэффициент усиления по регулирующему входу.

Принцип работы ОУ семейства AD855x подробно

описан в [2]. Суть работы такого усилителя состоит в том, что влияние напряжения смещения  $V_{OS2}$  дополнительного усилителя  $У2$  (благодаря режиму самокалибровки, который реализуется в два такта) существенно ослабляется при условии, что  $B_2 \gg 1$ :  $V_{OUT2}(t_2) \cong A_2[V_{IN} + V_{OS2}/(1+B_2)]$ , где  $t_2$  — момент окончания второго такта. Это напряжение  $V_{OUT2}(t_2)$  запоминается на конденсаторе  $C2$  и прикладывается к регулирующему входу  $У1$ , в результате чего значение выходного напряжения  $V_{OUT1}(t_2)$  усилителя  $У1$  в момент  $t_2$  определяется выражением:

$$V_{OUT1}(t_2) \cong A_1[V_{IN} + V_{OS1}] + B_1V_{OUT2}(t_2). \quad (1)$$

При условии, что  $A_1 = A_2 = A \gg 1$  и  $B_1 = B_2 = B \gg 1$ , выражение (1) приобретает вид:

$$V_{OUT1}(t_2) \cong V_{IN}AB \left[ 1 + (V_{OS1} + V_{OS2})/B \right]. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что входное эквивалентное напряжение смещения  $V_{OS,IN}$  определяется входным напряжением смещения основного и дополнительного усилителей, уменьшенным в  $B$  раз:  $V_{OS,IN} \cong [V_{OS1} + V_{OS2}/B]$ .

Существуют некоторые особенности реализации прецизионных операционных усилителей типа "Chopper Stabilized" различными фирмами. Например, в ОУ типа MAX421-MAX423 фирмы MAXIM используются внешние конденсаторы  $C1$ ,  $C2$  (в отличие от ОУ типа MAX430, MAX432 фирмы MAXIM или ОУ семейства AD855x фирмы Analog Devices, в которых эти конденсаторы размещены на кристалле — on chip). В ОУ типа MAX421, MAX423 предусмотрены дополнительные выводы, которые позволяют под-

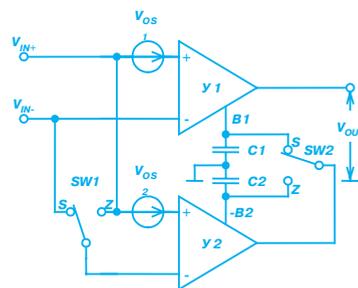


Рис. 2. Структурная схема ОУ семейства AD855x фирмы Analog Devices

ключать внешний генератор импульсов. Особенностью ОУ типа MAX421-MAX423 является определенная специфика реализации выходного каскада, которая в сочетании с дополнительным выводом Output Clamp позволяет уменьшить время восстановления после перегрузки (overload recovery time).

В отличие от традиционного усилителя типа М-ДМ в усилителях типа "Chopper Stabilized" входное напряжение  $V_{IN}$  не отключается от входа основного усилителя  $У1$ . Кроме того, конечное значение диапазона частот  $f_K$  не ограничено половинным значением частоты коммутации  $f_{CL}$ , как в традиционных усилителях типа М-ДМ. Однако коммутация переключателей  $SW1$ ,  $SW2$  вызывает появление дополнительных гармониче-

ских составляющих в спектре выходного напряжения на частотах, кратных частоте коммутации  $f_{CL}=4$  кГц (см. [2], Fig. 35, 37).

Уникальной особенностью ОУ семейства AD855х является то, что в них, благодаря описанному выше принципу работы, практически полностью устраняется влияние низкочастотного  $1/f$  шума (при условии, что частота коммутации  $f_{CL}$  намного больше угловой  $f_C$  частоты  $1/f$  шума): спектральная плотность входного напряжения шумов в полосе частот от 0.1 до 10 Гц практически постоянна (см. [2], Fig. 32, 33). Однако коммутация переключателей  $SW1$ ,  $SW2$  несколько увеличивает составляющую широкополосного ("белого") шума такого ОУ по сравнению с прецизионными биполярными ОУ  $42$  нВ $\sqrt{Гц}$  на частоте 1 кГц в усилителях семейства AD855х и  $10$  нВ $\sqrt{Гц}$  на частоте 1 кГц в усилителях типа AD707 фирмы Analog Devices.

ОУ семейства AD855х фирмы Analog Devices являются усилителями типа Rail-to-Rail: с однополярным напряжением питания (Single Supply) и при напряжении питания  $V_{SS}=+5$  В выходное напряжение усилителей  $V_{OUT}$  может изменяться в пределах от 1 мВ до 4.998 В.

### 3. УЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОУ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТОЧНОСТЬ УПТ НА ИХ ОСНОВЕ

Среди всего многообразия схем на основе прецизионных ОУ самую многочисленную группу составляют УПТ. Для УПТ обычно учитывают две составляющие погрешности: аддитивную погрешность (или, как ее еще называют, погрешность смещения — offset error, погрешность нуля) и мультипликативную погрешность (или погрешность коэффициента усиления — gain error). В свою очередь, каждая из этих погрешностей имеет в общем случае три составляющих:

- систематическую, которая остается неизменной в процессе эксплуатации или изменяется по известному закону
- дрейфовую, которая обусловлена медленным (непредсказуемым) изменением параметров ОУ в зависимости от времени и параметров окружающей среды (обычно в зависимости от температуры окружающей среды)
- случайную, обусловленную шумами.

Приведенное выше разделение составляющих погрешности важно при выборе различных методов

уменьшения каждой из них.

Поскольку в ограниченном объеме данной статьи невозможно дать исчерпывающий анализ влияния параметров ОУ на погрешности УПТ, в данном разделе основное внимание уделено методике анализа различных составляющих погрешности базовых (т. е. наиболее распространенных) схем УПТ. На рис. 3, 4 приведены базовые схемы таких УПТ: инвертирующего (рис. 3, а), неинвертирующего (рис. 3, б) и дифференциального на одном ОУ (рис. 3, в) на двух (рис. 4, а) и трех (рис. 4, б) ОУ.

**3.1. Анализ аддитивной погрешности УПТ на основе ОУ.** Источниками систематической составляющей аддитивной погрешности УПТ на основе ОУ являются напряжение смещения  $V_{OS}$  и входные токи  $I_{B+}$ ,  $I_{B-}$  (или разность входных токов  $I_{OS}$ ). Методику анализа этой составляющей погрешности проиллюстрируем на примере схемы, приведенной на рис. 5, которую можно рассматривать как обобщенную схему УПТ на одном ОУ (рис. 3). Действительно, при  $V_{IN,2}=0$ ,  $R_{i2}=R'1=R'2=0$  схема, приведенная на рис. 5, тождественна инвертирующему УПТ (рис. 3, а); при  $V_{IN,1}=0$ ,  $R_{i1}=0$ ,  $R4=\infty$  — неинвертирующему УПТ (рис. 3, б). В обобщенной схеме УПТ ОУ представлен в виде идеального (ИОУ), на входе которого включены источники, моделирующие его погрешности. Источник напряжения  $V_{OS}$  моделирует входное напряжение смещения ОУ, источники тока  $I_{B+}$ ,  $I_{B-}$  — входные токи ОУ.

Несмотря на то, что систематическая составляющая аддитивной погрешности может быть практически полностью компенсирована либо путем ручной регулировки, либо методами цифровой калибровки с помощью микропроцессора или микроконтроллера, ее значение необходимо учитывать для определения диа-

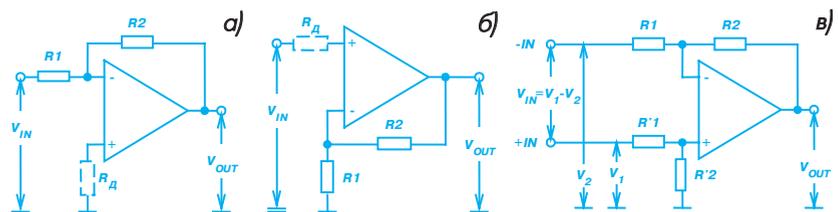


Рис. 3. Схема инвертирующего (а), неинвертирующего (б) и дифференциального (в) УПТ на одном ОУ

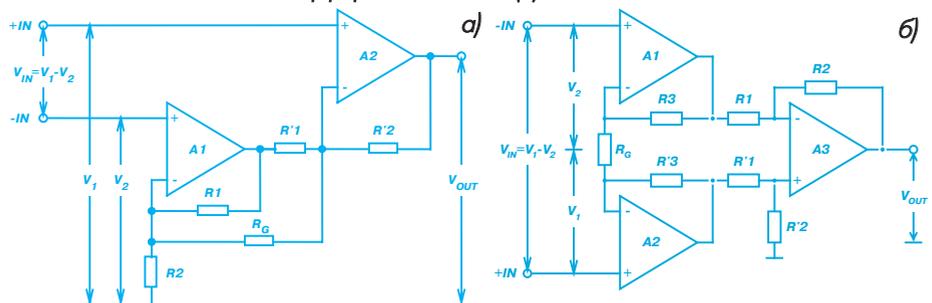


Рис. 4. Схема дифференциального УПТ на двух (а) и трех (б) ОУ



пазона необходимых компенсирующих воздействий и предупреждения возможной перегрузки включенных после него блоков.

Основными источниками систематической составляющей аддитивной погрешности являются входное напряжение смещения  $V_{OS}$  (начальное значение) и входные токи  $I_{B+}$ ,  $I_{B-}$ , которые, протекая по внешним резисторам  $R_{EX+}$ ,  $R_{EX-}$ , подключенным к инвертирующему и неинвертирующему входам ОУ, также создают определенное напряжение смещения. Современные прецизионные ОУ имеют типовое значение  $V_{OS}$  в пределах от единиц до десятков мкВ (например, от 5 до 30 мкВ для AD707, 1 мкВ для AD855х фирмы Analog Devices, от 4 до 20 мкВ для ОРА177 фирмы Burr-Brown, от 5 до 10 мкВ для МАХ420 фирмы МАХИМ). Максимальное значение абсолютной аддитивной погрешности  $V_{IN.OS}$ , приведенной ко входу УПТ, изображенного на рис. 5, определяется выражением:

$$V_{IN.OS} = \pm(V_{OS} + V_{(I_{B+})} + V_{(I_{B-})}), \quad (3)$$

где  $V_{(I_{B+})} = I_{B+}R_{EX+}$ ,  $V_{(I_{B-})} = I_{B-}R_{EX-}$  — составляющие аддитивной погрешности, обусловленные входными токами ОУ;  $R_{EX-} \equiv R2 // (R1 + R2)$ ,  $R_{EX+} \equiv R'2 // (R'1 + R1)$ . Обозначение "//" означает параллельное соединение резисторов.

Соответственно значение относительной  $\delta$  (или приведенной  $\delta_{ГП}$ ) аддитивной погрешности определяется как отношение значения абсолютной погрешности  $V_{IN.OS}$  к значению входного напряжения  $V_{IN}$  (или к номинальному значению входного напряжения  $V_{IN.N}$ ):  $\delta = V_{IN.OS} / V_{IN}$ ,  $\delta_{ГП} = V_{IN.OS} / V_{IN.N}$ . Для оценки погрешностей схем на основе прецизионных ОУ в англоязычной технической литературе часто используют своеобразную единицу — ppm (parts per million —  $1 \cdot 10^{-6}$  или  $1 \cdot 10^{-4}$  %). Кроме того, для оценки уровня соответствующей погрешности применительно к аналого-цифровым системам сбора и обработки измерительной информации значение погрешности пересчитывают в единицы младшего разряда (EMP или LSB — Least Significant Bit) аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который используется в системе. Например, для случая, когда в аналого-цифровой системе обработки используется 12-разрядный АЦП,  $1 \text{ EMP} = 0.024 \% = 244 \text{ ppm}$ ; для 18-разрядного АЦП  $1 \text{ EMP} = 3.8 \times 10^{-4} \% = 3.8 \text{ ppm}$ . В общем случае  $1 \text{ EMP} = (10^6 / 2^n) \text{ ppm}$ , где  $n$  — число разрядов АЦП.

В прецизионных ОУ, имеющих стандартный входной каскад на биполярных транзисторах (рис. 6, а),

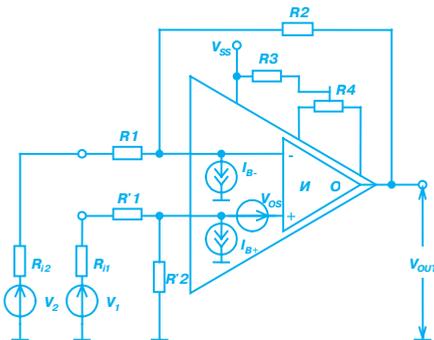


Рис. 5. Обобщенная схема УПТ для анализа аддитивной погрешности

входные токи  $I_{B+}$ ,  $I_{B-}$  хорошо согласованы, имеют один знак, а их значение обычно находится в пределах от 50 нА до 400 нА.

Это обеспечивает существенно меньшее значение разности входных токов, чем значение входного тока. Поэтому для минимизации составляющей абсолютной аддитивной погрешности  $V_{IN.OS}$ , которая обусловлена входными токами  $I_{B+}$ ,  $I_{B-}$  ОУ, необходимо обеспечивать выполнение условия:

$$R_{EX-} = R_{EX+} = R_{EX}. \quad (4)$$

В этом случае формула (3) преобразуется к виду:

$$V_{IN.OS} = \pm \{V_{OS} + I_{OS} R_{EX}\}, \quad (5)$$

где  $I_{OS}$  — разность входных токов. Применительно к схемам УПТ, приведенным на рис. 3, а, б (при условии, что источники входного напряжения  $V_{IN}$  имеют внутреннее сопротивление  $R_i=0$ ), минимизация составляющей аддитивной погрешности, обусловленной входными токами ОУ, означает необходимость подключения к одному из входов дополнительного резистора с сопротивлением  $R_D = R1 \times R2 / (R1 + R2)$ , показанного штриховой линией.

Следует обратить внимание на то, что условие (4) не следует выполнять в ОУ с компенсацией входных токов (например, ОРА177 фирмы Burr-Brown или AD707 фирмы Analog Devices, рис. 6, б). Такая компенсация обеспечивает уменьшение входных токов до значений в пределах 0.5-10 нА, т. е.  $I_{OS} \approx I_B$ , однако они не так

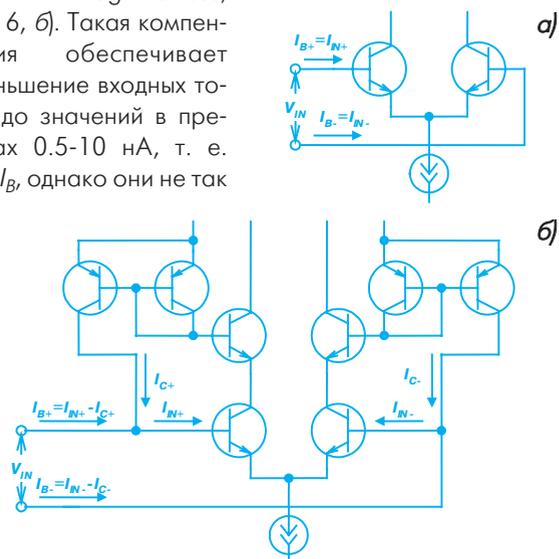


Рис. 6. Схемы дифференциального каскада без компенсации (а) и с компенсацией (б) входных токов

хорошо согласованы и могут иметь разные знаки. Поэтому включение дополнительного резистора  $R_D$  может привести к увеличению систематической составляющей аддитивной погрешности.

В большинстве одинарных (single) ОУ имеются специальные выводы (обычно это выводы 1 и 8, см. рис. 5), подключение к которым потенциометра  $R_4$  позволяет обеспечить ручную компенсацию (теоретически до нуля при определенной температуре окружающего воздуха) напряжения смещения независимо от причины его возникновения: за счет входного напряжения смещения  $V_{OS}$  и/или за счет разности входных токов  $I_{OS}$ . Резистор  $R_3$  позволяет изменить диапазон регулирования напряжения смещения  $V_{IN,OS}$ . Например, для ОУ типа AD707 фирмы Analog Devices при  $R_3=0$ ,  $R_4=20$  кОм диапазон регулирования  $V_{OS}$  составляет 3 мВ, а при  $R_3=10$  кОм,  $R_4=2$  кОм — 200 мкВ. В сложных системах (состоящих, например, из последовательно включенных нескольких блоков, каждый из которых имеет свою аддитивную погрешность) не рекомендуется использование такого способа компенсации входного напряжения смещения  $V_{IN,OS}$ . Такая компенсация общей аддитивной погрешности может создать в том ОУ, в котором осуществляется регулировка, существенно большее входное напряжение смещения  $V_{OS}$  по сравнению с начальным значением. Поскольку для большинства прецизионных ОУ большому значению напряжения смещения  $V_{OS}$  соответствует больший дрейф напряжения смещения  $\Delta V_{OS}/\Delta T$ , то перекompенсация может вызвать увеличение дрейфовой составляющей аддитивной погрешности.

Методика анализа систематической составляющей аддитивной погрешности дифференциальных УПТ (рис. 3, б; рис. 4) не отличается от описанной выше. Однако учет составляющей погрешности, обусловленной входными токами ОУ, требует учета особенностей источника входного сигнала, который в самом общем случае может иметь две составляющие выходного сопротивления: выходное сопротивление  $R_{i,CM}$  источника синфазного напряжения  $V_{CM}$  и выходное сопротивление  $R_{i,DM}$  источника дифференциального напряжения  $V_{DM} \equiv V_{IN}$  (рис. 7).

Для входных токов  $I_{1,B+}$ ,  $I_{2,B+}$  усилителей  $A1$ ,  $A2$  (рис. 3, б; рис. 4) значения внешних резисторов  $R_{1,EX+}$ ,  $R_{2,EX+}$  определяются выражением:  $R_{1,EX+}=R_{2,EX+}=R_{i,CM}+(R_{i,DM}/2)$ . Однако, учитывая, что напряжение  $\Delta V_{CM}=(I_{1,B+}+I_{2,B+})R_{i,CM}$ , которое выделяется на сопротивлении  $R_{i,CM}$ , является составляющей синфазного напряжения, а также то, что для дифференциальных УПТ коэффи-

циент ослабления синфазного напряжения  $CMRR \gg 1$ , влиянием напряжения  $\Delta V_{CM}$  на аддитивную погрешность можно пренебречь. В то же время падение напряжения  $\Delta V_{DM}$ :

$$\Delta V_{DM} \equiv V_{(I_{B+})} = I_{1,B+} (R_{i,DM}/2) - I_{2,B+} (R_{i,DM}/2) = (I_{1,B+} - I_{2,B+}) R_{i,DM}, \quad (6)$$

на обоих сопротивлениях  $R_{i,DM}$  за счет протекания токов  $I_{1,B+}$ ,  $I_{2,B+}$  является источником систематической составляющей аддитивной погрешности (источник этого напряжения  $\Delta V_{DM}$  соединен последовательно с источником входного напряжения  $V_{IN}$ ).

Составляющая систематической аддитивной погрешности дифференциальных УПТ на двух или трех ОУ, обусловленная входными токами  $I_{1,B+}$ ,  $I_{2,B+}$  ОУ  $A1$ ,  $A2$ , определяется из соответствующих схем. С учетом того, что в этих схемах между резисторами обычно выдерживаются определенные соотношения, для схемы, приведенной на рис. 4, а, значение  $R_{1,EX+}=R_{1,EX+}=R1//R2//R_G$  (с учетом того, что  $R2/R1=R'2/R'1$ ); на схеме рис. 4, б —  $R_{1,EX+}=R_{1,EX+}=R3+(R3//R_G)$  (с учетом того, что  $R3=R'3$ ).

Применительно к дифференциальному УПТ, схема которого приведена на рис. 8, в формуле (3) необходимо учесть еще одну составляющую систематической аддитивной погрешности, которая обусловлена аддитивной погрешностью  $V_{3,IN,OS}$  дифференциального усилителя на ОУ  $A3$ :

$$V_{IN,OS} = \pm [V_{OS} + V_{(I_{B+})} + V_{(I_{B-})} + (V_{3,IN,OS}/G_{12})], \quad (7)$$

где  $G_{12}$  — коэффициент усиления дифференциального парафазного каскада на ОУ  $A1$ ,  $A2$ .

В некоторых случаях составляющая систематической аддитивной погрешности, обусловленная входными токами ОУ, может трансформироваться в погрешность линейности, зависящую от входного напряжения  $V_{IN}$ . Например, если дифференциальный УПТ используется для усиления напряжения на термометре сопротивления, то изменение температуры, естественно, вызывает изменение его сопротивления, т. е. изменение  $R_{i,DM}$ , и, как следствие, изменение падения напряжения на нем, обусловленного входными токами ОУ.

Источниками дрейфовой составляющей аддитивной погрешности  $V_{IN,OS,d}$  являются температурный и временной дрейф напряжения смещения  $V_{OS}$  и разности входных токов  $I_{OS}$ :  $\Delta V_{OS}/\Delta T$ ,

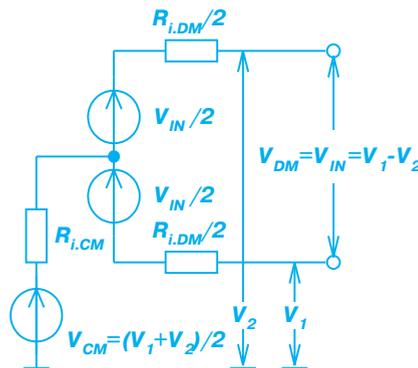


Рис. 7. Обобщенная схема источника сигнала для дифференциальных УПТ

$\Delta V_{OS}/\Delta t$ ,  $\Delta I_{OS}/\Delta T$ ,  $\Delta I_{OS}/\Delta t$ . Для определения дрейфовой составляющей аддитивной погрешности  $V_{IN.OS.d}$ , обусловленной, например, изменением температуры окружающего воздуха от  $T_{мин}$  до  $T_{макс}$ , можно воспользоваться приведенными выше формулами с той лишь разницей, что все слагаемые, обусловленные температурным дрейфом напряжения смещения  $\Delta V_{OS}/\Delta T$  и температурным дрейфом разности входных токов  $\Delta I_{OS}/\Delta T$  в диапазоне температур  $(T_{макс} - T_{мин})$ , рассматриваются как некоррелированные случайные величины с равномерным законом распределения. Например, для схем УПТ (рис. 3, а, б) дрейфовая составляющая аддитивной погрешности определяется формулой:

$$V_{IN.OS.d} = \pm (T_{max} - T_{min}) \sqrt{(\Delta V_{OS}/\Delta T)^2 + [(\Delta I_{OS}/\Delta T) \cdot R_D]^2}. \quad (8)$$

Анализ дрейфовой составляющей аддитивной погрешности, обусловленной изменением параметров ОУ во времени, принципиально ничем не отличается от приведенного выше анализа дрейфовой составляющей аддитивной погрешности, обусловленной изменением параметров ОУ под влиянием температуры окружающего воздуха. Анализ усложняется только тем, что для большинства прецизионных ОУ не нормируется временная нестабильность входных токов (или разности входных токов).

Одним из наиболее радикальных методов уменьшения дрейфовой составляющей аддитивной погрешности УПТ (обусловленной изменением температуры окружающего воздуха) в аналоговых системах является выбор ОУ, имеющего меньшие значения параметров  $(\Delta V_{OS}/\Delta T)$  и  $(\Delta I_{OS}/\Delta T)$ . Например, если в схеме УПТ (рис. 3, б) номинальное значение входного напряжения  $V_{IN.N}=10$  мВ, сопротивления резисторов цепи обратной связи имеют значения  $R1=1$  кОм и  $R2=99$  кОм (что соответствует коэффициенту усиления усилителя  $G=100$ ), используется прецизионный ОУ типа MAX400 фирмы MAXIM с параметрами  $(\Delta V_{OS}/\Delta T)_{max}=0.3$  мкВ/°С,  $(\Delta I_{OS}/\Delta T)_{max}=25$  пА/°С, то приведенная дрейфовая составляющая аддитивной погрешности  $\delta_{ГП}$  в диапазоне температур от  $T_{мин}=20$  °С до  $T_{макс}=30$  °С, вычисляемая в соответствии с формулой (8), имеет значение  $\delta_{ГП}=310$  ppm, что составляет приблизительно 1.5 ЕМР для 12-разрядного АЦП. Если же в качестве усилителя в той же схеме применяется прецизионный ОУ типа AD8551 фирмы Analog Devices с параметрами  $(\Delta V_{OS}/\Delta T)_{max}=0.005$  мкВ/°С,  $(\Delta I_{OS}/\Delta T)_{max}=5$  пА/°С, то эта составляющая аддитивной погрешности в том же диапазоне температур имеет значение  $\delta_{ГП}=7$  ppm, что составляет приблизительно 2 ЕМР для 18-разрядного АЦП.

В аналого-цифровых системах сбора и обработки измерительной информации эффективным методом уменьшения влияния дрейфовой составляющей аддитивной погрешности является периодическая установка нуля системы, которую выполняют при изменении температуры окружающего воздуха на определенное значение и/или по прошествии определенного времени.

Источниками случайной составляющей аддитивной погрешности УПТ являются шумы элементов схемы как самих ОУ, так и внешних по отношению к ним компонентов. Рассмотрим методику анализа шумовых характеристик УПТ на примере эквивалентной схемы (рис. 8), в которой ОУ полагается идеальным, а дополнительные источники моделируют соответствующие составляющие шума.

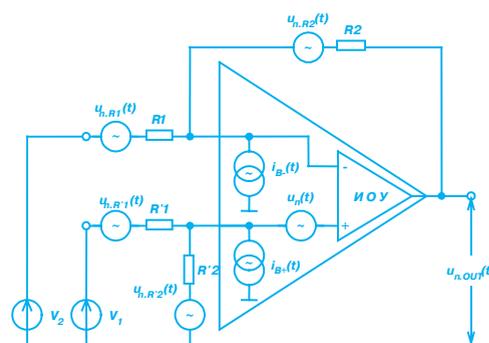


Рис. 8. Эквивалентная схема для анализа шумовых характеристик ОУ

В частности, источник напряжения  $u_n(t)$  моделирует приведенное ко входу напряжение шумов ОУ, источники тока  $i_n-(t)$ ,  $i_n+(t)$  — шумовые составляющие входных токов ОУ по инвертирующему и неинвертирующему входам, а источники напряжения  $u_{n,R1}(t)$ ,  $u_{n,R2}(t)$ ,  $u_{n,R1}(t)$ ,  $u_{n,R2}(t)$  — напряжения шумов резисторов  $R1$ ,  $R2$ ,  $R1$ ,  $R2$ . Шумы, создаваемые внутренним сопротивлением источников напряжения, являются составляющими выходного напряжения этих источников, поэтому они при анализе случайной составляющей обычно не учитываются.

Любой резистор с сопротивлением  $R$  является источником теплового шума  $u_{n,R}(t)$  (шум Джонсона), среднеквадратическое значение которого  $V_{n,R}$  в полосе частот 1 Гц определяется формулой:  $V_{n,R}=\sqrt{4kTR}$  [В/√Гц], где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура в К.

Для практического применения полезными являются следующие простые соотношения:

- резистор с сопротивлением  $R=100$  кОм создает в полосе частот 1 Гц шумовое напряжение, среднеквадратическое значение которого  $V_{n,R} \cong 40$  нВ
- резистор с сопротивлением  $R$  создает в полосе частот  $\Delta f$  шумовое напряжение, среднеквадратическое

значение которого определяется формулой:

$$V_{n,r} = (40 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}) \sqrt{\Delta f \cdot R / (100 \text{ кОм})}. \quad (9)$$

Среднеквадратическое значение  $V_{n,IN}(f_L, f_H)$  приведенное ко входу усилителя напряжения "белого" шума в полосе частот  $\Delta f$  от нижней  $f_L$  до верхней  $f_H$  частоты определяется формулой:

$$V_{n,IN}(f_H, f_L) = \sqrt{(f_H - f_L) \left[ (V_{u_n})^2 + (V_{i_{n+}})^2 + (V_{i_{n-}})^2 + \sum_{j=1}^4 (V_{R_j} \chi_{R_j})^2 \right]}, \quad (10)$$

где  $V_{u_n}$ , (нВ/√Гц) — составляющая среднеквадратического значения входного шума УПТ, обусловленная приведенным ко входу ОУ напряжением шумов в полосе частот 1 Гц;  $V_{u_n} = \sqrt{IN}$ ;  $V_{i_{n+}} = \sqrt{ICN[R' \cdot 1 \times R^2 / (R' \cdot 1 + R^2)]}$ ,  $V_{i_{n-}} = \sqrt{ICN[R \cdot 1 \times R^2 / (R \cdot 1 + R^2)]}$  — составляющие среднеквадратического значения входного шума УПТ, обусловленные шумовыми составляющими входных токов ОУ в полосе частот 1 Гц;  $V_{R_j} \chi_{R_j}$  — среднеквадратическое значение напряжения шумов резистора  $R_j$  и коэффициент его влияния на приведенное ко входу УПТ напряжение шума  $u_{n,IN}(f)$  соответственно.

Описанную методику анализа случайной составляющей аддитивной погрешности можно распространить на схемы дифференциальных УПТ (рис. 3, б и рис. 4), учитывая, при необходимости, также выходные сопротивления источников входных напряжений.

Поскольку для шумовых сигналов в инженерной практике обычно принимают коэффициент амплитуды  $K_A = 3.3$ , то максимальное приведенное значение случайной составляющей аддитивной погрешности определяется по формуле  $\delta_{ПР,СЛ} = V_{n,IN} K_A / V_{IN,N}$ , где  $V_{IN,N}$  — номинальное значение входного напряжения. Например, если в УПТ, построенном по приведенной на рис. 3, б схеме, номинальное значение входного напряжения  $V_{IN,N} = 10$  мВ (при значении выходного сопротивления  $R_j = 10$  кОм), сопротивления резисторов цепи обратной связи имеют значения  $R1 = 1$  кОм и  $R2 = 99$  кОм (что соответствует коэффициенту усиления усилителя  $G = 100$ ) и используется прецизионный ОУ типа AD707 фирмы Analog Devices с параметрами  $V_{CN} = 10$  нВ/√Гц,  $ICN = 0,15$  пА/√Гц, то приведенная случайная составляющая аддитивной погрешности в диапазоне частот от 10 Гц до 100 кГц ( $\Delta f \approx 10^5$  Гц) имеет значение  $\delta_{ПР,СЛ} = 330$  ppm, что составляет приблизительно 1.5 ЕМР для 12-разрядного АЦП.

В аналоговых системах эффективным методом уменьшения случайной составляющей аддитивной погрешности является использование на выходе УПТ фильтра нижних частот (или совмещение ФНЧ с УПТ), который ограничивает диапазон частот "белого" шу-

ма. Если предположить, что в рассмотренном выше примере ФНЧ ограничивает диапазон частот значением 10 кГц (т. е. уменьшает значение  $\Delta f$  по сравнению с рассмотренным случаем в 100 раз), то приведенное значение случайной составляющей аддитивной погрешности уменьшится в 10 раз и составит  $\pm 33$  ppm — приблизительно  $\pm 2$  ЕМР для 16-разрядного АЦП.

В аналого-цифровых системах сбора и обработки измерительной информации эффективным методом уменьшения случайной составляющей аддитивной погрешности является усреднение ряда последовательных результатов аналого-цифрового преобразования (естественно, при условии, что эти результаты некоррелированы между собой).

**3.2. Анализ мультипликативной погрешности УПТ на основе прецизионных ОУ.** Мультипликативная погрешность УПТ на основе ОУ определяется в основном параметрами и характеристиками резисторов обратной связи ОУ, значения которых определяют коэффициент усиления  $G$  УПТ.

При условии, что значение коэффициента усиления ОУ  $A_{OL} \rightarrow \infty$ , значения коэффициентов усиления УПТ, схемы которых приведены на рис. 3, определяются следующими формулами:

- для схемы рис. 3, а  $G = V_{OUT} / V_{IN} = R2 / R1$
- для схемы рис. 3, б  $G = V_{OUT} / V_{IN} = (R1 + R2) / R1$
- для схемы рис. 3, в выходное напряжение  $V_{OUT}$  связано со входными напряжениями  $V1, V2$  соотношением:

$$V_{OUT} = V1 \frac{R'2}{R'1} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) / \left( 1 + \frac{R'2}{R'1} \right) - V2 \frac{R2}{R1}. \quad (11)$$

При выполнении соотношения  $R2 / R1 = R'2 / R'1$  коэффициент усиления  $G$  дифференциального входного напряжения  $V_{IN} = V1 - V2$  определяется выражением:

$$G = V_{OUT} / (V1 - V2) = R2 / R1. \quad (12)$$

Для дифференциального УПТ, схема которого приведена на рис. 4, а, выходное напряжение  $V_{OUT}$  связано со входными напряжениями  $V1$  и  $V2$  соотношением:

$$V_{OUT} = V1 \left( 1 + \frac{R'2}{R_G} + \frac{R'2}{R1} + \frac{R1}{R_G} \frac{R'2}{R'1} \right) - V2 \left( \frac{R1}{R2} \frac{R'2}{R'1} + \frac{R'2}{R_G} + \frac{R'2}{R1} + \frac{R1}{R_G} \frac{R'2}{R'1} \right). \quad (13)$$

Если выполняются соотношения  $R2 / R1 = R'2 / R'1$  и  $R1 = R'1$ , то коэффициент усиления  $G$  дифференциального входного напряжения  $V_{IN} = (V1 - V2)$  определяется выражением:

$$G = V_{OUT} / (V1 - V2) = 1 + R2 / R1 + 2 \cdot R2 / R_G. \quad (14)$$

Для дифференциального УПТ, схема которого при-



ведена на рис. 4, б, выходное напряжение  $V_{OUT}$  связано со входными напряжениями  $V_1$  и  $V_2$  соотношением:

$$V_{OUT} = \left( V_1 + \frac{(V_1 - V_2)R_3}{R_G + R_3 + R_3} \right) \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - \left( V_2 - \frac{(V_1 - V_2)R_3}{R_G + R_3 + R_3} \right) \frac{R_2}{R_1}. \quad (15)$$

Если выполняются соотношения  $R_2/R_1 = R_2/R_1$ ,  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_3$ , то коэффициент усиления  $G$  дифференциального входного напряжения  $V_{IN} = V_1 - V_2$  определяется выражением:

$$G = V_{OUT} / (V_1 - V_2) = 1 + 2 \cdot R_3 / R_G. \quad (16)$$

Так же как и систематическая составляющая аддитивной погрешности, систематическая составляющая мультипликативной погрешности  $\gamma_{G,s}$  может быть практически полностью компенсирована либо путем ручной регулировки в аналоговых системах, либо путем калибровки измерительного канала в цифровом виде в аналого-цифровых системах. Однако учет этой составляющей погрешности важен с точки зрения определения возможного диапазона регулирования.

Систематическая составляющая мультипликативной погрешности  $\gamma_{G,s}$  определяется, в основном, относительным отклонением (допуском)  $\delta_{R_i} = \Delta R_i / R_i$  резисторов  $R_i$ , значения которых определяют коэффициент усиления конкретного УПТ и в меньшей степени конечным значением коэффициента усиления ОУ  $A_{OL}$ , который зависит, например, от напряжения питания  $V_{SS}$ . Максимальное значение систематической составляющей мультипликативной погрешности  $\gamma_{G,s}$  определяется формулой:

$$\gamma_{G,s} = \pm \sum_j |\chi_j \cdot \delta_{R_j}|, \quad (17)$$

где  $\chi_j = (G/R_j)/(R_j/G)$  — коэффициенты влияния допуска резисторов  $R_j$  на погрешность  $\gamma_{G,s}$ .

Несложно убедиться, что для инвертирующего УПТ коэффициенты влияния имеют значения  $\chi_1 = 1$ ,  $\chi_2 = -1$ . Для неинвертирующего УПТ  $\chi_1 = -(G-1)/G$ ,  $\chi_2 = (G-1)/G$ , что при  $G \gg 1$  дает значения коэффициентов влияния  $\chi_1 \approx -1$ ,  $\chi_2 \approx 1$ . Это означает, что использование в этих схемах резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  с допуском  $\delta_R = 1\%$  при  $G \gg 1$  вызывает появление систематической составляющей мультипликативной погрешности с максимальным значением  $\gamma_{G,s} \approx \pm 2\%$ .

Систематическая составляющая мультипликативной погрешности  $\gamma_{G,s}$ , обусловленная конечным значением коэффициента усиления ОУ  $A_{OL}$ , определяется формулой:

$$\gamma_{G,s} = -G / (G + A_{OL}) \approx -G / A_{OL}.$$

Для ОУ типа OP77 фирмы Analog Devices при

$V_{SS} = \pm 5$  В значение  $A_{OL} \approx 5 \cdot 10^6$ , что при  $G = 100$  вызывает появление этой составляющей погрешности  $\gamma_{G,s} = -20$  ppm, а при  $V_{SS} = \pm 5$  В (значение  $A_{OL} \approx 12 \cdot 10^6$ )  $\gamma_{G,s} \approx -8$  ppm.

Дрейфовая составляющая мультипликативной погрешности  $\gamma_{G,d}$  обусловлена как зависимостью коэффициента усиления ОУ  $A_{OL}$  от температуры окружающего воздуха, так и температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) резисторов, определяющих значение коэффициента усиления. Например, для ОУ типа OP77 фирмы Analog Devices при изменении температуры окружающего воздуха от  $T_{мин} = 5^\circ\text{C}$  до  $T_{макс} = 65^\circ\text{C}$  параметр  $A_{OL}$  изменяется от  $A_{OL,мин} \approx 11 \cdot 10^6$  до  $A_{OL,макс} \approx 16 \cdot 10^6$ . Возникающую при этом мультипликативную погрешность можно оценить по формуле:

$$\gamma_{G,d} = G \left[ \left( 1 / A_{OL,мин} \right) - \left( 1 / A_{OL,макс} \right) \right]. \quad (18)$$

Если в схеме на основе этого ОУ значение  $G = 1000$ , то  $\gamma_{G,d} \approx 30$  ppm, что соответствует приблизительно 0.5 ЕМР для 14-разрядного АЦП. Уменьшение значения этой составляющей дрейфовой мультипликативной погрешности можно обеспечить выбором соответствующего типа усилителя. Например, для ОУ типа AD707, AD855х фирмы Analog Devices значение параметра  $A_{OL}$  практически не зависит от температуры.

Для определения дрейфовой составляющей мультипликативной погрешности  $\gamma_{G,d}$ , обусловленной ТКС резисторов, можно воспользоваться формулой (19):

$$\gamma_{G,d} = \pm (T_{макс} - T_{мин}) \sqrt{\sum_j (\chi_j \cdot TKS_{R_j})^2}, \quad (19)$$

которая учитывает тот факт, что независимо от знака ТКС резисторов, слагаемые в формуле (17) рассматриваются как случайные некоррелированные величины. Так, использование резисторов типа С2-29В с ТКС = 25 ppm/°C при  $G \gg 1$  в УПТ, построенных по приведенным на рис. 3, а, б схемам, в диапазоне температур от  $T_{мин} = 20^\circ\text{C}$  до  $T_{макс} = 30^\circ\text{C}$  вызовет появление дрейфовой составляющей мультипликативной погрешности  $\gamma_{G,d} = 354$  ppm, что соответствует 1.5 ЕМР для 12-разрядного АЦП.

Если же значения ТКС некоторых резисторов равны и имеют один знак, то, с учетом знаков коэффициентов влияния  $\chi_j$  возможна частичная взаимная компенсация слагаемых:

$$\gamma_{G,d} = \pm (T_{макс} - T_{мин}) \sum_j (\chi_j \cdot TKS_{R_j}). \quad (20)$$

Дополнительная составляющая дрейфовой мультипликативной погрешности может возникать из-за самонагрева резисторов. Например, если в схеме, при-

веденной на рис. 3, а, используются резисторы  $R1=100 \text{ Ом}$ ,  $R2=9.9 \text{ кОм}$  с номинальной мощностью рассеивания  $P=0.125 \text{ Вт}$  и тепловым сопротивлением  $125 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ , то при  $\text{ТКС}=+25 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$  и  $V_{IN}=100 \text{ мВ}$  на резисторе  $R2$  будет рассеиваться мощность  $9.9 \text{ мВт}$ , что вызовет увеличение его температуры на  $1.24 \text{ }^\circ\text{C}$ , и, как следствие, изменение его сопротивления на  $31 \text{ ppm}$ . Изменение температуры резистора  $R1$  составит всего  $0.0125 \text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому его сопротивление практически не изменится. Следовательно, дрейфовая составляющая мультипликативной погрешности, обусловленная самонагревом резисторов,  $\gamma_{G,d} = 31 \text{ ppm}$ , что соответствует приблизительно  $0.5 \text{ ЕМР}$  для 14-разрядного АЦП.

Для минимизации значения этой и подобных составляющих мультипликативной погрешности используют резисторы с точно подобранными ТКС и обеспечивают между ними по возможности минимальный градиент температуры. Наилучшие результаты обеспечиваются при использовании резисторных цепей, расположенных на одной подложке либо внутри микросхемы, либо выполненных как отдельный блок тонкопленочной резистивной цепи. В тонкопленочных резисторах, изготавливаемых на кремниевой подложке с начальным допуском  $\pm 20 \%$ , использование лазерной подгонки сопротивлений позволяет обеспечить не только малую погрешность соотношения между сопротивлениями резисторов (меньше  $100 \text{ ppm}$ ), но и отличие их ТКС на уровне  $3 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ .

Поскольку из перечисленных составляющих дрейфовой мультипликативной погрешности наиболее весомой является составляющая, обусловленная изменением сопротивления резисторов в диапазоне температур от  $T_{\text{мин}}$  до  $T_{\text{макс}}$ , то повышения точности схем на основе прецизионных ОУ можно достичь либо использованием высокостабильных резисторов, либо путем периодической калибровки, которая достаточно просто реализуется в аналого-цифровых системах сбора и обработки измерительной информации.

Существует еще две дополнительные составляющие мультипликативной погрешности. Одна из них обусловлена синфазным напряжением  $V_{CM}$ . Для неинвертирующего УПТ (рис. 3, б)  $V_{CM}=V_{IN}$ , поэтому выходное напряжение определяется выражением:

$$V_{OUT} = G \left[ V_{IN} + \left( V_{IN} / \text{CMRR} \right) \right] = V_{IN} G (1 + \gamma_{CM}),$$

где  $\gamma_{CM} = (1 / \text{CMRR})$  — составляющая мультипликативной погрешности, обусловленная синфазным напряжением  $V_{CM}$ . Если учесть, что для прецизионных ОУ  $\text{CMR} > 100 \text{ дБ}$  (например,  $140 \text{ дБ}$  для ОУ типов AD707, AD855х фирмы Analog Devices, OPA177 фирмы Burr-Brown), то эта составляющая мультипликативной погрешности неинвертирующего УПТ имеет пренебре-

жимо малое значение. В инвертирующем УПТ (рис. 3, а) синфазное напряжение  $V_{CM}=0$ , поэтому для него эта составляющая погрешности принципиально равна нулю.

Схемы дифференциальных УПТ принципиально более чувствительны к наличию синфазного напряжения  $V_{CM}$ . Для таких усилителей конечное значение  $\text{CMRR}$  обусловлено отличием коэффициентов усиления напряжений  $V_1, V_2$  по инвертирующему (-IN) и неинвертирующему (+IN) входам, что связано с нарушением соотношения  $R2/R1=R'2/R'1$  и возникновением погрешности, обусловленной синфазным напряжением  $V_{CM}$ .

Для дифференциального УПТ (рис. 3, в) значение выходного напряжения  $V_{OUT}$ , обусловленное только синфазным напряжением  $V_{CM}=V_1$ , равно:

$$V_{OUT}|_{V_1=V_2} = \pm V_1 (R2/R1) / [1 + (R2/R1)] \gamma_r,$$

где  $\gamma_r = \Delta(R'2/R'1)/(R2/R1)$  — относительное изменение отношения  $R'2/R'1$ . Учитывая, что для этого УПТ  $R2/R1=G$ , получим:  $\text{CMRR} = (1+G)/\gamma_r$ . Это означает, что в случае, когда  $\gamma_r = \pm 0.1 \%$  и  $G=1$ , ослабление синфазного сигнала  $\text{CMR} = 20 \log_{10} [1+g/\gamma_r] \approx 66 \text{ дБ}$ . В то же время прецизионный дифференциальный усилитель с единичным коэффициентом усиления (Precision Unity Gain Differential Amplifier) типа INA105 фирмы Burr-Brown, структурная схема которого соответствует рис. 3, в, имеет погрешность коэффициента усиления (т. е. систематическую составляющую мультипликативной погрешности) не более  $0.01 \%$ , что достигается лазерной подгонкой сопротивления резисторов  $R1=R2=R'1=R'2=25 \text{ кОм}$ . Как следствие, значение  $\text{CMR}$  этого усилителя не менее  $100 \text{ дБ}$ . Для дифференциальных УПТ на двух или трех ОУ (рис. 4) значение  $\text{CMRR}$  также зависит от точности выполнения соотношения  $R2/R1=R'2/R'1$  и определяется выражением  $\text{CMRR} = G/\gamma_r$ .

В зависимости от условий применения дифференциального УПТ погрешность, обусловленная конечным значением  $\text{CMRR}$ , может иметь характер аддитивной или мультипликативной погрешности. Например, если в качестве источника входного напряжения  $V_{IN}$  дифференциального УПТ используется тензопреобразователь, выполненный по мостовой схеме (рис. 9), коэффициент преобразования которого  $2 \text{ мВ/В}$ , то при напряжении питания датчика  $V_{REF} = 12 \text{ В}$  номинальное значение входного напряжения УПТ  $V_{IN,N} = 24 \text{ мВ}$ . Если для усиления выходного напряжения такого датчика до зна-

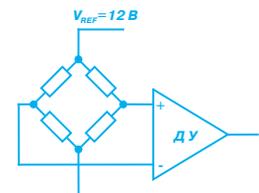


Рис. 9. Подключение мостового тензопреобразователя к дифференциальному УПТ

чения 2.4 В используется дифференциальный УПТ (рис. 4, в) с коэффициентом усиления  $G=100$ , а резисторы, используемые в УПТ, имеют допуск  $\delta_R=0.1\%$ , то относительная погрешность отношения  $\gamma_f=2\delta_R=0.2\%$ . С учетом того, что синфазное напряжение  $V_{CM}=V_{REF}/2=6$  В, приведенная погрешность, обусловленная синфазным напряжением, имеет значение 0.5% и является систематической аддитивной погрешностью, поскольку ее значение не зависит от значения входного дифференциального напряжения.

Иная ситуация возникает в случае, когда дифференциальный УПТ используется в канале измерения температуры, причем в качестве датчика применяется термометр сопротивления (рис. 10). Если для измерения температуры от 0 до 500 °С используется медный термометр сопротивления типа ТСМ, гр. 24, а значение стабильного тока  $I_{REF}=1$  мА, то синфазное напряжение  $V_{CM}=R_T I_{REF}/2$  будет изменяться от 0.05 В (при измерении температуры 0 °С) до значения 0.077 В (при измерении температуры 500 °С). Это

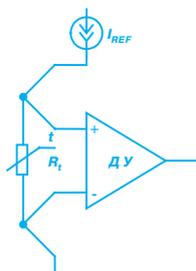


Рис. 10. Подключение термометра сопротивления к дифференциальному УПТ

означает, что кроме систематической составляющей аддитивной погрешности, обусловленной значением  $V_{CM}=0.05$  В, будет возникать систематическая составляющая мультипликативной погрешности.

Другая дополнительная составляющая погрешности обусловлена тем, что для некоторых типов ОУ существует зависимость значения коэффициента усиления  $A_{OL}$  от выходного напряжения  $V_{OUT}$ , что вызывает изменение коэффициента усиления  $G$  схемы на основе ОУ. Значение этой погрешности можно определить по формуле (18).

Кроме УПТ, достаточно распространенными являются еще два типа схем: преобразователи напряжение/ток и ток/напряжение. Преобразователи напряжение/ток чаще всего используются как источники стабильного тока для питания некоторых типов датчиков (например, термометров сопротивления или тензопреобразователей). Для их реализации обычно используют две схемы включения ОУ (рис. 3, а, б) при условии включения сопротивления нагрузки  $R_L$  вместо резистора  $R_2$  и использовании в качестве входного напряжения  $V_{IN}$  опорного напряжения  $V_{REF}$ . Поскольку значение опорного напряжения обычно выбирают в пределах единиц вольт, а ток нагрузки для указанных типов датчиков обычно составляет не менее 1 мА, то составляющие погрешности такого преобразователя, обусловленные параметрами ОУ (напряжением сме-

щения и разностью входных токов, а также их температурным дрейфом) создают пренебрежимо малые погрешности. Температурная нестабильность тока нагрузки  $I_L=V_{REF}/R_1$ , которая может вызывать появление дрейфовой составляющей мультипликативной погрешности, определяется ТКС резистора  $R_1$  и температурным коэффициентом напряжения источника  $V_{REF}$ .

Существует большое количество датчиков различных физических величин (фотодиоды, пьезоэлектрические акселерометры и гидрофоны, датчики влажности и т. п.), выходное сопротивление которых может составлять единицы или десятки мегом. Для преобразования выходного сигнала таких датчиков в пропорциональное напряжение постоянного тока обычно используются преобразователи ток/напряжение. Поскольку выходным сигналом таких датчиков является ток (или заряд) с очень малым значением, то основной отличительной особенностью ОУ, которые обычно применяются для этих целей, является малое значение входного тока. Использование таких ОУ также имеет свои особенности. Однако поскольку такие усилители относятся к иному классификационному типу (Low Bias Current Op Amp), то освещение этого вопроса выходит за рамки тематики данной статьи.

#### 4. УЧЕТ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ СХЕМ НА ОСНОВЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОУ

Высокие технические характеристики прецизионных ОУ делают их незаменимыми для реализации схем, предназначенных для усиления и/или преобразования сигналов малого уровня. При проектировании этих схем необходимо учитывать ряд дополнительных погрешностей, источники которых не связаны с параметрами ОУ. Одной из основных проблем, связанных с реализацией таких схем, является эффект термопары: при соединении проводников из различных материалов в месте контакта возникает термоЭДС, значение которой зависит как от типа проводников, так и от температуры.

На рис. 11 приведена в качестве элемента некоторой цепи модель резистора, в которой учтена комбинация различных термопар, являющихся источниками паразитных термоЭДС (полярность включения термопар показана условно).

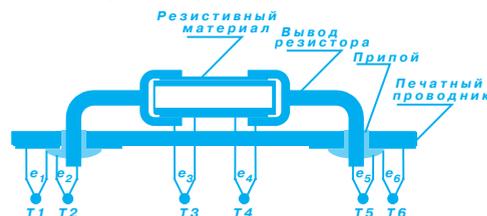


Рис. 11. Модель резистора, в которой учтены источники паразитных термоЭДС

Подобная модель может содержать и большее число термопар, если учесть, например, что выводы резистора покрыты иным (по сравнению с материалом вывода) проводящим материалом. В местах соединения между резистивным материалом и выводами образуются две термопары, значение термоЭДС которых может достигать  $400 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$  (в случае угольного композиционного резистора) и не превышает  $0.05 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$  в случае использования специальных резисторов, например, производимых фирмой RCD Component, Inc. [3]. Источники тепла в таких участках цепи часто не так опасны, как перепады температур. Такие перепады могут привести к тому, что выводы резистора окажутся в разных температурных условиях. Поскольку количество термопар, возникающих слева и справа (условно) от резистора, всегда принципиально равно, то результирующая паразитная термоЭДС  $\Delta e_{\text{П}}$  обусловлена только перепадом температур  $\Delta T$  между выводами резистора. Эти эффекты не имеют особого значения на переменном токе или в условиях равных температур, однако в том случае, когда мощность рассеяния на резисторе или его расположение относительно источников тепла могут привести к тому, что температура его выводов будет разной, возникнет разностная паразитная термоЭДС  $\Delta e_{\text{П}}$ , величина которой может существенно превосходить значение входного напряжения смещения прецизионных ОУ, таких, например, как OP177, AD707 и особенно ОУ типа "Chopper Stabilized". Борьба с этим явлением трудно, поскольку даже в том случае, когда соединения выполняются только медным проводом, в месте спая двух медных проводов разных изготовителей может возникнуть термоЭДС до  $0.2 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ .

На рис. 12, а показано, каким образом способ установки резистора может влиять на значение разностной паразитной термоЭДС  $\Delta e_{\text{П}}$ . Установка резистора для экономии места вертикально неизбежно приведет к перепаду температур  $\Delta T = (T_2 - T_1)$  между его выводами, особенно в случае рассеяния резистором сколь угодно значительной мощности. Размещение резистора вдоль плоскости печатной платы позволит избежать этого при условии, что отсутствует воздушный поток, направленный параллельно его оси. Расположив ось резистора под прямым углом к потоку воздуха,

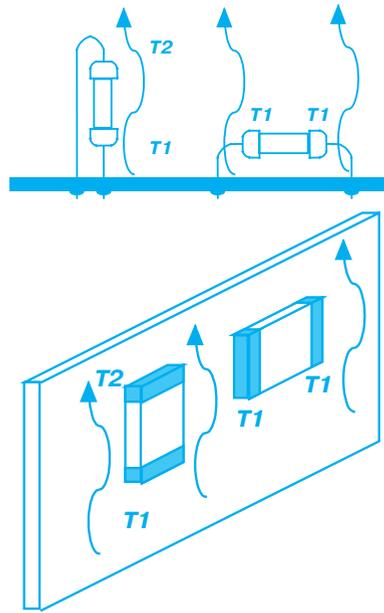


Рис. 12. Влияние на перепад температур между выводами резистора способа его установки (а) и ориентации в пространстве (б)

можно свести такую погрешность к минимуму, поскольку в этом случае выводы резистора находятся в одинаковых температурных условиях.

Когда печатные платы в блоке устанавливаются вертикально, за счет конвекционного охлаждения (направление потока воздуха снизу вверх) между выводами резистора может возникнуть существенный градиент температуры в случае, если ось резистора расположена вдоль конвекционного потока. Поэтому для снижения разности температур выводов резистора его тепловую ось целесообразно размещать перпендикулярно воздушному потоку (рис. 12, б).

При использовании SMD-резисторов разностная паразитная термоЭДС  $\Delta e_{\text{П}}$  обычно существенно меньше, чем для традиционных резисторов: меньшие размеры SMD-резисторов обеспечивают более однородное тепловое поле, в котором находится резистор, и, как следствие, меньшее значение разностной паразитной термоЭДС  $\Delta e_{\text{П}}$ .

Упрощенная схема, приведенная на рис. 13, иллюстрирует ситуацию, при которой сигнал с выхода мостового датчика подключен ко входу дифференциального усилителя (ДУ) через  $RC$  фильтры. Каждый из резисторов  $R_{\text{Ф}}$  представляет собой последовательное включение нескольких термопар, создающих паразитные термоЭДС и образующих некоторую эквивалентную разностную термоЭДС  $\Delta e_{\text{П}}$ . Еще одна пара термопар возникает в местах соединения медного печатного проводника с выводами ДУ, которые обычно изготавливаются из сплава железа, кобальта и никеля (ковар). В месте соединения медь-ковар возникает термоЭДС порядка  $35 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ . Очевидно, что такая схема может обеспечить необходимую точность только при условии надлежащего расчета тепловых и электрических параметров. К эффективным мерам уменьшения влияния паразитных термоЭДС можно отнести:

- сведение к минимуму количества спаев
- максимально возможное уменьшение перепадов температур за счет надлежащего размещения

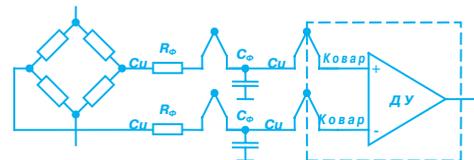


Рис. 13. Схема подключения мостового датчика к дифференциальному усилителю

элементов

- устранение воздушных потоков, направленных на чувствительные узлы
- максимальное уменьшение мощности рассеяния в чувствительных к перепаду температур устройствах
- надлежащий подбор прецизионных резисторов
- одинаковое количество спаев в каждом из каналов ДУ.

Еще одним полезным приемом при проектировании низковольтных цепей является так называемая "тепловая симметрия". Это может быть ввод дополнительных резисторов и соединений, благодаря чему возможна взаимная компенсация паразитных термоЭДС. Примером такого дополнительного резистора, значение которого не влияет на коэффициент усиления УПТ, может быть резистор  $R_d$  в схеме УПТ, приведенной на рис. 3, б: при равенстве температур резисторов  $R_d$  и  $R_1$  паразитная термоЭДС, возникающая в цепи инвертирующего входа ОУ из-за подключения резистора  $R_1$ , будет компенсироваться паразитной термоЭДС, возникающей в цепи неинвертирующего входа ОУ из-за подключения дополнительного резистора  $R_d$ . Несмотря на то, что для компенсации паразитных термоЭДС сопротивление резистора  $R_d$  не имеет значения (важно, чтобы он был того же типа, что и резистор  $R_1$ ), его сопротивление, тем не менее, для минимизации погрешности, обусловленной разностью входных токов ОУ, целесообразно выбирать в соответствии с условием  $R_d = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2)$ . В канале, параметры которого критичны к паразитным термоЭДС, по возможности следует избегать использования гнезд, разъемов, переключателей или реле, которые могут также вносить либо "неизвестные" спаи, либо нестабильные переходные сопротивления контактов.

Малые значения входных токов прецизионных ОУ обуславливают их использование в усилителях или преобразователях сигнала от датчиков с высоким выходным сопротивлением. Поскольку входные токи в ОУ могут иметь значение от единиц до десятков пА, нельзя недооценивать проблемы, связанные с подключением датчика ко входу ОУ. В этих случаях ток утечки по плате вследствие загрязнения поверхности или через материал платы может создать определенные проблемы. Заметного уменьшения тока утечки и связанных с ним погрешностей можно добиться путем применения плат из материала с малыми токами утеч-



Рис. 14. Уменьшение токов утечки с помощью тефлоновой втулки

ки и надлежащей их чистки по окончании сборки. Для того чтобы избежать в дальнейшем увеличения токов утечки из-за загрязнения платы, платы заливают специальными компаундами, которые, наряду с высоким удельным объемом сопротивлением и теплопроводностью должны иметь малый тангенс угла диэлектрических потерь. В некоторых случаях для изоляции точек соединения элементов с очень высоким импедансом может понадобиться тефлоновая втулка (рис. 14) и/или охранные кольца (см., например, [4]).

## 5. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОУ

В заключение приведем примеры применения прецизионных ОУ в разработках НИИ автоматизации экспериментальных исследований Национального технического университета Украины "КПИ".

На рис. 15 и 16 приведены схемы преобразователей среднеквадратического напряжения (ПСКН), которые предназначены для использования в широкополосных вольтметрах среднеквадратического напряжения в диапазоне частот до 100 МГц. В таких ПСКН в качестве квадраторов используются термоэлектрические преобразователи напряжения типа ТВБ-4. Учитывая малый уровень термоЭДС на их выходе (порядка 10 мВ), в качестве УПТ для последующего усиления используются прецизионные ОУ типа AD8551 фирмы Analog Devices.

Особенностью ПСКН (рис. 16) является то, что в нем реализуется изотермический режим работы термопреобразователя В1. Благодаря изотермическому

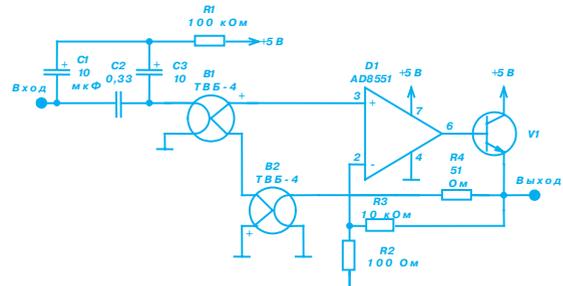


Рис. 15. Схема линейного преобразователя среднеквадратического напряжения

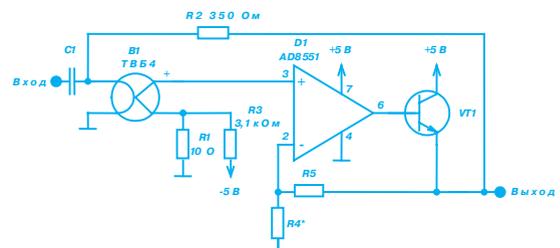


Рис. 16. Схема быстродействующего преобразователя среднеквадратического напряжения

режиму работы схема такого ПСКН имеет высокое быстродействие, которое определяется коэффициентом петлевого усиления схемы: произведением коэффициента усиления УПТ (ОУ  $D1$ , охваченный обратной связью) на коэффициент передачи цепи обратной связи (делитель напряжения, образованный резистором  $R2$  и нагревателем термопреобразователя  $B1$ , в котором  $R_H=48$  Ом). Независимо от значения входного переменного напряжения, на входе УПТ (ОУ  $D1$ ) поддерживается постоянное значение ЭДС 16 мВ. Изменяя сопротивление резистора  $R4$  \* (т. е. изменяя коэффициент усиления УПТ), можно обеспечить различные режимы быстродействия вольтметра, в котором он используется.

Схема квадратичного ПСКН на полевых транзисторах, который предназначен для использования в микровольтметре среднеквадратического напряжения для диапазона частот от 10 Гц до 20 МГц, приведена на рис. 17. Значение постоянной составляющей

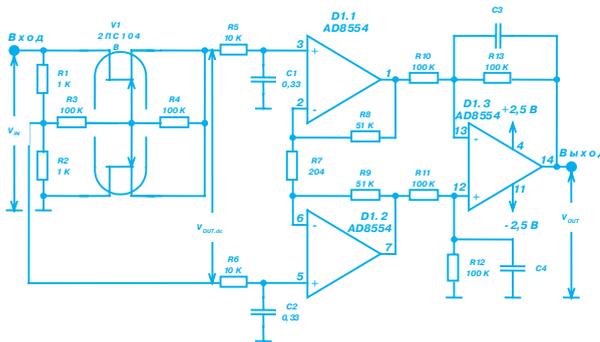


Рис. 17. Схема квадратичного преобразователя среднеквадратического напряжения

$V_{OUT,dc}$  выходного напряжения квадратора (транзисторы  $V1$ , резисторы  $R1...R4$ ) определяется формулой:  $V_{OUT,dc} = V_{IN}^2 / 8V_{OF}$ , где  $V_{OF}$  — напряжение отсечки полевых транзисторов. Учитывая, что для транзисторов типа 2PC104B типовое значение напряжения отсечки  $V_{OF}=0.6$  В, при номинальном значении входного переменного напряжения  $V_{IN}=100$  мВ уровень постоянной составляющей выходного напряжения квадратора  $V_{OUT,dc} \approx 2$  мВ. Для усиления выходного напряжения квадратора используется дифференциальный УПТ с коэффициентом усиления  $G=500$  (см. рис. 4, б). Учитывая малое значение входного напряжения УПТ, а также то, что синфазное напряжение определяется входным переменным напряжением, при проектировании преобразователя предпочтение отдано ОУ семейства AD8554, а не инструментальному усилителю, например, типа AD620.

На рис. 18 приведена схема преобразователя амплитудного напряжения (ПАН), или так называемого двойного пикового детектора, который используется в высокочастотном милливольтметре для диапазона ча-

стот от 100 кГц до 1 ГГц. Особенностью такого ПАН, который выполнен на диодах Шоттки (диодная сборка  $V1$  типа HSMS-281C фирмы Agilent Technologies), является то, что при малых уровнях входного переменного напряжения (меньше 100 мВ) его характеристика преобразования существенно отличается от линейной и приближается к квадратичной. Так, если при номинальном значении входного переменного напряжения 1 В (что соответствует диапазону измерения с конечным значением  $V_K=1$  В) выходное постоянное напряжение ПАН приблизительно равно 2.8 В, то при номинальном значении входного переменного напряжения 10 мВ (т. е. на диапазоне измерения с конечным значением  $V_K=10$  В) выходное постоянное напряжение приблизительно равно 3.5 мВ, если обеспечивается режим холостого хода ПАН. Поэтому использование ОУ типа AD8551 в качестве повторителя напряжения, обеспечивающего режим холостого хода ПАН и минимальное значение аддитивной погрешности, позволяет не только улучшить метрологические характеристики, но и частично решить еще одну проблему. Поскольку такой преобразователь размещается в выносном пробнике милливольтметра, то при отсутствии повторителя напряжения схема имеет очень высокое выходное сопротивление, что, как следствие, требует тщательного экранирования линии, по которой малое выходное напряжение с выхода ПАН передается непосредственно к прибору. Схема выполнена на печатной плате размерами 27x7.5 мм, что позволяет разместить ее в пробнике диаметром 12 мм (как в высокочастотном милливольтметре ВЗ-62). На плате также размещен датчик температуры TMP03 фирмы Analog Devices, с помощью которого осуществляется измерение температуры внутри пробника и соответствующая коррекция (в микропроцессорном контроллере) с целью уменьшения влияния температурной погрешности характеристики преобразования.

На рис. 19 приведена упрощенная схема аналого-

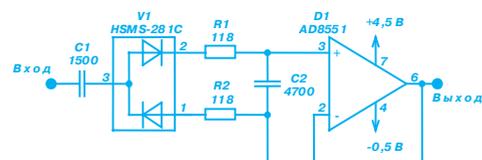


Рис. 18. Схема преобразователя амплитудного напряжения

цифрового измерительного канала для усиления сигнала с выхода термометров сопротивления. Для термометра сопротивления  $R_t$  используется четырехпроводная схема включения. Ток через термометр  $I_{Rt} = V_{SS} / (R_t + R_3 + 2R_{л})$  ( $R_{л}$  — сопротивление линии) преобразуется в напряжение  $V_{||Rt} = R_4 \times I_{Rt}$ , пропорциональное току  $I_{Rt}$ , с помощью преобразователя постоянного тока — в напряжение ( $D1.2$ ) на основе прецизионного

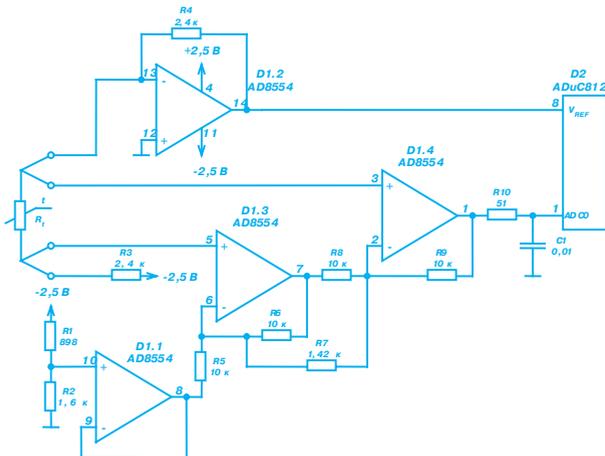


Рис. 19. Схема аналого-цифрового канала для измерения температуры

ОУ типа AD8554. Напряжение  $V_{I(Rt)}$  используется в качестве опорного напряжения  $V_{REF}$  для микроконвертера ADuC812. Дифференциальный УПТ (D1.3, D1.4) обеспечивает коэффициент усиления  $G=16.1$ . На один из аналоговых входов микроконвертера ADuC812 подается напряжение  $V_{V(Rt)}=(R_{t0}+\Delta R_t)I_{Rt}G+V_C$ , где  $V_C$  — напряжение на выходе повторителя напряжения (D1.1),

$R_{t0}$  — сопротивление термометра при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Поскольку  $V_C=-R_{t0}I_{Rt}G$ , то результат аналого-цифрового преобразования в микроконвертере ADuC812 определяется формулой:

$$N_{(\Delta R_t)} = V_{V(Rt)} \frac{N_N}{V_{REF}} = \Delta R_t \frac{G}{R4} N_N = \alpha R_{t0} t \frac{G}{R4} N_N,$$

где  $N_N=(2^{12}-1)$  — номинальное значение кода АЦП в микроконвертере ADuC812;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления меди.

Подробную информацию о разработанных устройствах можно получить по адресу: [tuz@aer.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:tuz@aer.ntu-kpi.kiev.ua)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning. — Analog Devices Technical Reference Books. Published by Analog Devices.
2. Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifiers AD8551/AD8552/AD8554. — Data sheet Analog Devices, Inc., 1999.
3. <http://www.rcd-comp.com>
4. Low Power, Low Noise Precision FET Op Amp AD795. — Data Sheet Analog Devices, Inc., 1999.

Джерела живлення (ДЖ) підприємства "ДЕЛЬТА"

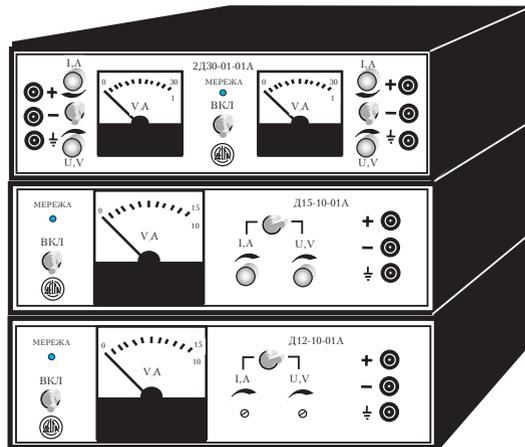
| Назва   | $U_{\text{вих}}'$<br>В | $I_{\text{н}}'$<br>А | Уст. $U_{\text{вих}}'$<br>В | Ціна, грн<br>без ПДВ |
|---|------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Лабораторні:</b>                                   |                        |                      |                             |                      |
| 2Д30-01-01А<br>(2 незалеж. ДЖ)                        | 0-30                   | 0-1                  | —                           | 530                  |
| Д15-10-01А  | 0-15                   | 0-10                 | —                           | 334                  |
| Д15-20-01А  | 0-15                   | 0-20                 | —                           | 530                  |
| Д30-06-01А  | 0-30                   | 0-6                  | —                           | 360                  |
| Д30-10-01А  | 0-30                   | 0-10                 | —                           | 530                  |
| Д60-03-01А  | 0-60                   | 0-3                  | —                           | 334                  |
| Д60-06-01А  | 0-60                   | 0-6                  | —                           | 636                  |
| Д80-02-01А  | 0-80                   | 0-2                  | —                           | 334                  |
| Д80-05-01А  | 0-80                   | 0-5                  | —                           | 689                  |
| <b>З можливістю підключення акумулятора в буфері:</b> |                        |                      |                             |                      |
| Д12-10-01А  | 0-15                   | 0-10                 | 13.8                        | 334                  |
| Д12-20-01А  | 0-15                   | 0-20                 | 13.8                        | 530                  |
| Д24-06-01А  | 0-30                   | 0-6                  | 26.4                        | 360                  |
| Д24-10-01А  | 0-30                   | 0-10                 | 26.4                        | 530                  |
| Д48-03-01А  | 0-60                   | 0-3                  | 55.2                        | 334                  |
| Д48-06-01А  | 0-60                   | 0-6                  | 55.2                        | 636                  |
| Д60-02-01А  | 0-80                   | 0-2                  | 69.0                        | 334                  |
| Д60-05-01А  | 0-80                   | 0-5                  | 69.0                        | 689                  |

А також виробляємо потужні джерела для АТС, для апаратури на кораблях, для радіостанцій, джерела безперебійного живлення (UPS), перетворювачі напруги DC/DA, DC/DC, регулятори температури та інше.

46010, м. Тернопіль, вул. Текстильна, 38, КП "ДЕЛЬТА"

тел./факс: (0352) 25-58-52, [delta@delta.te.ua](mailto:delta@delta.te.ua) [www.bit.ternopil.ua/ukr/Firm/Delta](http://www.bit.ternopil.ua/ukr/Firm/Delta)

ТУ У 01497468.001-95  
сертифікат UA1.018.08138-96



Захист від перевантажень, короткого замикання, х-ка I/U (автомат. перехід в режим стаб. струму).

**Цілодобова робота**  
**при максимальному навантаженні. ККД — 90 %.**

Габаритні розміри — 250x210x80 мм,  
маса — не більше 2 кг.

**Гарантія 5 років.** Доставка безплатна.

Замовлення більше 30 шт. — знижка 10 %.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Вслед за фирмой Motorola, выпускающей сигнальные процессоры MSC8101 и MSC8102 с процессорным ядром StarCore (совместная разработка фирм Motorola и Lucent Technologies), фирма Analog Devices готовится начать производство сигнальных процессоров ADSP-21535/21532 (Blackfin™ DSP) на базе архитектуры MSA (Micro Signal Architecture), разработанной ею совместно с фирмой Intel. Статья знакомит с возможностями и архитектурой новых сигнальных процессоров ADSP-21535/21532, которые могут найти широкое применение при реализации приложений цифровой обработки сигналов (DSP-приложений) в устройствах самого разного назначения.

### В. Охрименко

Удержать господствующие позиции на мировом рынке сигнальных процессоров можно только за счет выпуска новых высокопроизводительных и экономичных сигнальных процессоров, удовлетворяющих всевозрастающие требования. Это справедливо, в первую очередь, для бурно развивающихся средств телекоммуникаций. Разработка новых продуктов требует не только огромных капиталовложений, но и объединения творческих усилий ведущих специалистов разных фирм. В результате совместной работы специалистов фирм Motorola и Lucent Technologies, занимающих лидирующее положение на мировом рынке сигнальных процессоров, появилось новое высокопроизводительное DSP ядро StarCore, воплотившее в себе все достоинства архитектуры VLIW (very long instruction word). DSP ядро StarCore реализовано в сигнальных процессорах MSC8101 и MSC8102 фирмы Motorola. 16-разрядное вычислительное ядро MSC8101 содержит четыре арифметико-логических устройства (ALU), в составе которых реализованы умножитель/накопитель (MAC) и 40-разрядное устройство сдвига. Кроме того, процессорное ядро содержит два адресных генератора. Такой мощный набор вычислительных устройств обеспечивает MSC8101 производительность 1200 MIPS при тактовой частоте процессорного ядра 300 МГц. Объем встроенной памяти MSC8101 составляет 512 кбайт. Напряжение питания процессорного ядра 1.5 В. Производительность нового MSC8102 составляет 4800 MIPS при тактовой частоте процессорного ядра 300 МГц. Такая высокая производительность достигается за счет интеграции на одном кристалле четырех независимых процессорных ядер StarCore. Высокая производительность MSC8101 и MSC8102, основанная на VLIW архитектуре процессорного ядра, и большой объем встроенной памяти определяют основные сферы применения этих сигнальных процессоров. Это многоканальные базовые станции мобильной радиотелефонной связи, многока-

нальные модемы с уплотнением данных и другие устройства, в которых требуется реализация большого объема вычислений.

В ADSP-21535 на базе новой архитектуры MSA реализована VLIW-подобная архитектура процессорного ядра, которая при той же тактовой частоте (300 МГц) не может обеспечить производительность, достигнутую в MSC8101. Однако ADSP-21535 отличается другими неоспоримыми преимуществами [1-5]:

- процессорное ядро сочетает арифметические устройства, используемые в сигнальных процессорах, и набор RISC-подобных инструкций, характерных для микроконтроллеров
- наличием модифицированного набора инструкций, часть которых адаптирована для реализации функций управления/контроля, что традиционно было присуще лишь микропроцессорам
- низким энергопотреблением, что достигается за счет программного управления тактовой частотой процессорного ядра и периферийных устройств, а также напряжением питания процессорного ядра (от 0.9 до 1.5 В)
- упрощенным по сравнению с другими сигнальными процессорами процессом программирования ADSP-21535, что достигается использованием языков высокого уровня (компилятор с языка C++ обеспечивает достаточно высокую плотность машинного кода)
- набором инструкций процессорного ядра, дополненным специальными инструкциями, позволяющими ускорить обработку аудио- и видеосигналов при использовании алгоритмов, применяемых в распространенных стандартах MPEG2, MPEG4, JPEG
- широким набором встроенных периферийных устройств и, в первую очередь, контроллером PCI-шины, позволяющим использовать ADSP-21535 в системах разного назначения.

Широкое распространение персональных компьютеров на базе PCI-шины послужило мощным стимулом для создания вначале средств, поддерживающих интерфейс между сигнальным процессором и PCI-шиной, а затем и сигнальных процессоров со встроенным контроллером PCI-шины. Фирма Texas Instruments одна из первых выпустила микросхему моста PCI-DSP (PCI2040), обеспечивающую подключение сигнальных процессоров типа TMS320C54x и TMS320C6000 к шине PCI. Затем был создан сигнальный процессор TMS320C6205 со встроенным контроллером PCI-шины. В середине 2000 года фирма Analog Devices анонсировала свой первый сигнальный процессор ADSP-2192 на базе двух процессорных ядер со встроенными

контроллерами ISA- и PCI-шины.

Встроенный контроллер PCI-шины открывает новые возможности для реализации открытых вычислительных систем на базе ADSP-21535. Сигнальные процессоры TMS320C54x, TMS320C6000, ADSP-219x можно использовать только в качестве сопроцессора на PCI-шине, что позволяет многократно увеличить быстродействие системы при использовании DSP-приложений. Новый ADSP-21535 отличается от выпущенных ранее тем, что его можно использовать в качестве ведущего (master) на PCI-шине, что в перспективе (с учетом планируемого увеличения в будущем тактовой частоты до 1 ГГц) открывает беспрецедентные возможности для создания на базе ADSP-21535 мощных открытых универсальных мультипроцессорных вычислительных систем самого широкого назначения и не только для цифровой обработки сигналов. Поскольку встроенный контроллер PCI-шины позволяет ADSP-21535 выполнять функции главного процессора (режим master) в системе, в ADSP-21535 имеются средства, поддерживающие два режима работы. Это режим супервизора и пользователя. Блок управления памятью (Memory Management Unit — MMU) обеспечивает защиту от доступа к системным ресурсам (регистрам управления/контроля встроенных периферийных устройств и к памяти), что предотвращает обращение к ним в режиме пользователя и защищает тем самым ресурсы операционной системы и системное программное обеспечение от непреднамеренной модификации. В режиме супервизора разрешен доступ ко всем ресурсам ADSP-21535: процессорному ядру, памяти и встроенным периферийным устройствам. Новые перспективы для реализации вычислительных систем на базе ADSP-21535 основаны не только на возможностях, предоставляемых контроллером PCI-шины, но и на широком наборе встроенных периферийных устройств, которые обеспечивают связь с "внешним миром" (USB, UART, SPI, SCI-порты, блок MMU).

В ADSP-21535 реализована система динамического управления энергопотреблением, основанная на изменении параметров процессорного ядра и периферийных устройств в процессе работы, что позволяет использовать ADSP-21535 в мобильных портативных средствах связи (пейджерх, мобильных телефонах и т. п.).

В ADSP-21535 на базе новой архитектуры MSA имеется возможность реализовать два принципа параллельной обработки данных. При параллельной обработке типа SIMD (Single Instruction Multiple Data — один поток команд, много потоков данных) выбираемые инструкции передаются для одновременного выполнения в независимые вычислительные устройства. Процессорное ядро ADSP-21535 содержит два ALU и два блока MAC. Принцип параллельной обработки типа SIMD реализован также в серийно выпускаемых сигнальных процессорах ADSP-21160/21161 фирмы

Analog Devices. В вычислительных системах типа SIMD можно значительно увеличить скорость вычислений при обработке векторных данных (цифровая обработка сигналов в средствах мультимедиа), при многоканальной обработке, а также в других приложениях цифровой обработки сигналов. В сигнальных процессорах с VLIW архитектурой обычно осуществляется одновременная выборка (multi-issue) и выполнение нескольких инструкций (например, в TMS320C6000 одновременно выбирается восемь инструкций). Управляющее устройство процессорного ядра ADSP-21535 может трактовать 32-разрядную инструкцию как две 16-разрядные, что обеспечивает одновременное выполнение двух независимых операций в вычислительных устройствах ADSP-21535. Более того, продолжая развивать принцип параллельной обработки, фирма Analog Devices в ADSP-21535, как и в анонсированном сигнальном процессоре TigerSHARC, пошла по пути не только наращивания дополнительных вычислительных устройств, а и реализовала возможность логического разделения (расщепления) ALU на отдельные блоки. Подобный подход, реализованный в ADSP-21535, позволяет в одном 32-разрядном ALU выполнять две операции с 16-разрядными данными.

Архитектура MSA позволила создать новый класс сигнальных процессоров, архитектура которых оптимизирована для выполнения цифровой обработки сигналов и функций управления/контроля, что ранее было характерно преимущественно для микроконтроллеров. Новая унифицированная модель программирования устраняет все проблемы, которые традиционно были связаны с неоднородностью систем, построенных на базе нескольких процессоров. В подобных системах цифровая обработка сигналов и функции управления/контроля выполнялись процессорами, реализованными на базе абсолютно разных архитектур. Новые сигнальные процессоры семейства ADSP-215xx одинаково хорошо адаптированы для цифровой обработки аудио- и видеосигналов, текста и реализации функций управления/контроля. Кроме того, в новых ADSP-215xx интегрирован широкий набор периферийных устройств. Благодаря беспрецедентной степени интеграции периферийных устройств на кристалле, реализованным возможностям в части выполнения цифровой обработки сигналов и функций управления/контроля, сигнальные процессоры ADSP-21535 относятся к зарождающемуся классу устройств System on Chip — SOC (систем на кристалле).

ADSP-21535 (образцы которого были представлены осенью 2001 года) — первый сигнальный процессор нового высокопроизводительного семейства ADSP-215xx. Структурная схема ADSP-21535 приведена на рис. 1 [1]. Все сигнальные процессоры семейства ADSP-215xx будут иметь процессорное ядро, реализованное на базе архитектуры MSA, что обеспечит им полную совместимость между собой на уровне

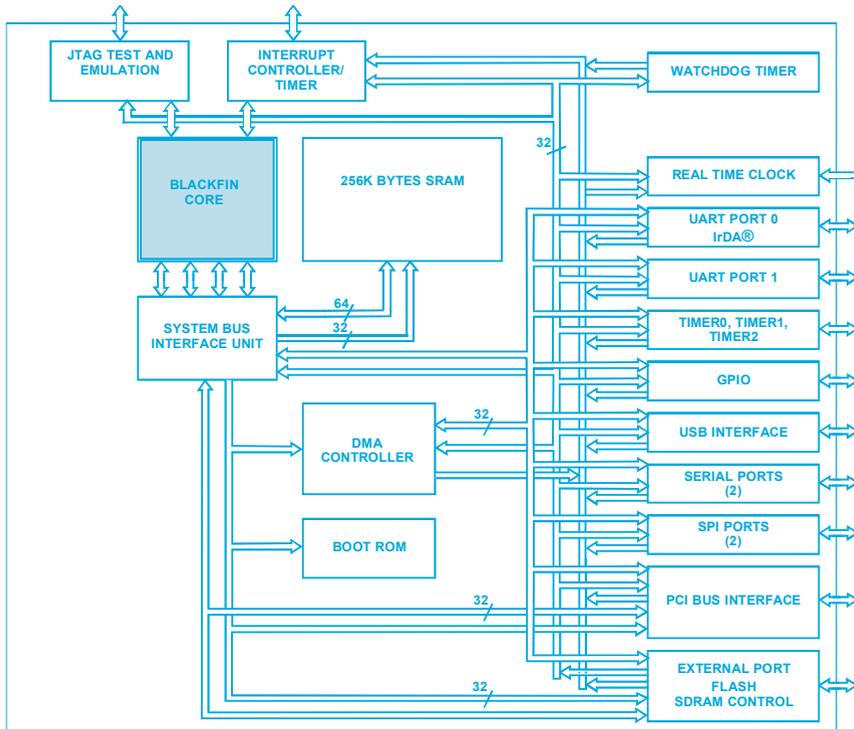


Рис. 1. Структурная схема ADSP-21535

кодов инструкций. Кроме того, новые сигнальные процессоры семейства ADSP-215xx будут иметь расширенный набор встроенных периферийных устройств. В середине 2002 года предполагается выпустить первые образцы процессоров ADSP-21532. Новые ADSP-21532 по сравнению с ADSP-21535 будут иметь меньший объем встроенной памяти, ограниченный набор периферийных устройств, уменьшенные габариты и стоимость. Структурная схема ADSP-21532 приведена на рис. 2 [3]. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики сигнальных процессоров ADSP-21535 и ADSP-21532. В отличие от ADSP-21535, в новом ADSP-21532 будут реализованы интерфейсы I<sup>2</sup>S и CCIR-656, широко используемые соответственно в профессиональной аудио- и видеоаппаратуре. Кроме того, в ADSP-21532 будет предусмотрена память типа ROM и встроенный регулятор напряжения, что позволит сократить количество внешних электронных

компонентов и, тем самым, снизить стоимость систем, в которых он будет использоваться. Поскольку основные области применения ADSP-21532 — встроенные системы самого разного назначения, процессоры ADSP-21532 будут предназначены для работы в диапазоне температур от -25 до 105 °С. Предполагается, что сигнальные процессоры ADSP-21535 и ADSP-21532 будут работать с тактовой частотой процессорного ядра 300 МГц. Однако, в последующих модификациях сигнальных процессоров на базе архитектуры MSA планируется достичь тактовой частоты 1 ГГц (при напряжении питания процессорного ядра вплоть до 0.7 В), что обеспечит производительность 2000 ММАС (миллион операций умножения с накоплением).

Основные сферы применения ADSP-21535: Интернет-приложения (встроенные интерфейсы шин PCI и USB позволяют подключать ADSP-21535 к устройствам, имеющим связь с сетью Интернет); многоканальные базовые станции (большой объем встроенной памяти и многоканальные последовательные порты позволяют реализовать многоканальную обработку).

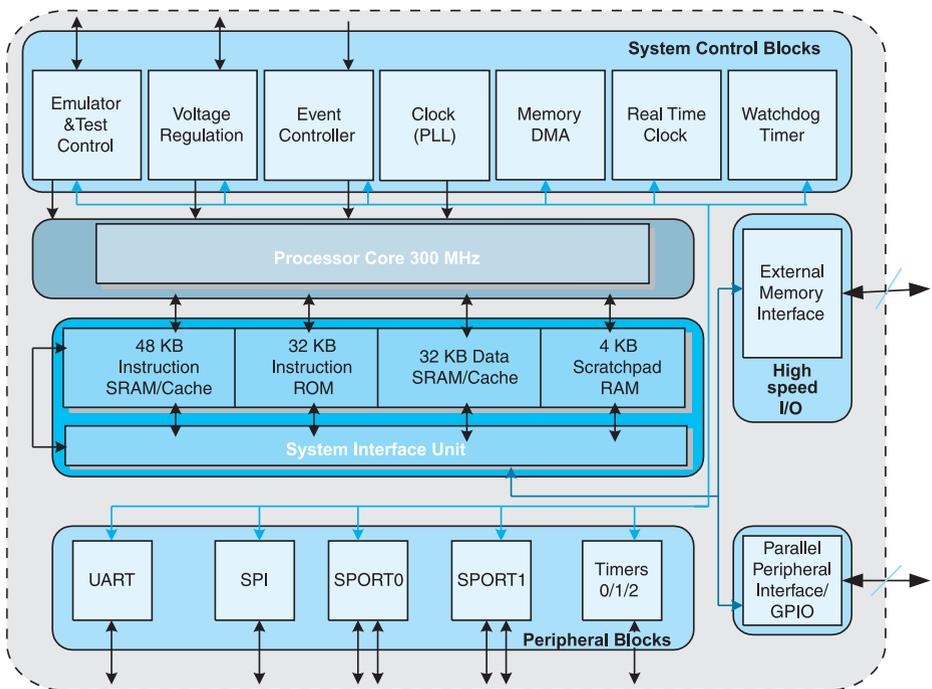


Рис. 2. Структурная схема ADSP-21532

Таблица 1. Сравнительные характеристики сигнальных процессоров ADSP-21535 и ADSP-21532

| Наименование параметра                             | ADSP-21535       | ADSP-21532                  |
|--|------------------|-----------------------------|
| Тактовая частота процессорного ядра, МГц           | 300              | 300                         |
| Процессорное ядро                                  | 16-разрядное     |                             |
| Производительность, ММАС                           | 600              | 600                         |
| Встроенная память, Кбайт                           | RAM              | 308                         |
|  | ROM              | –                           |
| Интерфейс внешней памяти, число разрядов           | 32               | 16                          |
| Интерфейс PCI-шины                                 | •                | –                           |
| Интерфейс USB-шины                                 | •                | –                           |
| Порт UART  | 2                | 1                           |
| Порт SPI   | 2                | 1                           |
| Интерфейсы I <sup>2</sup> S, CCIR-656              | –                | •                           |
| JTAG порт  | •                | •                           |
| ФАПЧ (умножение частоты от 1 до 31 раза)           | •                | •                           |
| Три универсальных таймера                          | •                | •                           |
| "Сторожевой" таймер, таймер реального времени      | •                | •                           |
| Напряжение питания процессорного ядра, В           | 0.9...1.5        | 0.9...1.5                   |
| Встроенный регулятор напряжения                    | –                | вх. напряжение 2.25 ... 3.6 |
| Количество выводов и тип корпуса                   | 256 - PBGA       | 160-MiniBGA                 |
| Диапазон рабочих температур, °С                    | 0...85           | -25...105                   |
| Ориентировочная стоимость в партии 10 тыс. шт., \$ | 34               | 9.95                        |
| Первые образцы                                     | сентябрь 2001 г. | лето 2002 г.                |

Архитектура ADSP-21535 основана на модифицированном процессорном ядре, адаптированном для параллельных вычислений; большом объеме встроенной памяти (назначение отдельных блоков можно программно изменять); широком наборе встроенных периферийных устройств (таймеров разного назначения, USB-, UART-, SPI-, SCI-портов, контроллера шины PCI, контроллера внешней памяти разного типа, портов ввода/вывода общего назначения, JTAG-порта).

**Процессорное ядро** представляет собой 16-разрядное ядро с фиксированной точкой, оптимизированное для реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов. Ядро содержит два блока MAC, два 32-разрядных ALU (или четыре 8-разрядных видео-ALU), одно 40-разрядное устройство сдвига. Два 16-разрядных блока MAC, в составе которых имеются 40-разрядные аккумуляторы, выполняют операции в течение одного цикла, что обеспечивает производительность 600 ММАС при тактовой частоте процессорного ядра 300 МГц. Каждый блок ALU может оперировать с 8-, 16- или 32-разрядными числами. В течение одного цикла в каждом из ALU могут выполняться две операции с 16-разрядными числами. Данные в ALU поступают из многопортового регистрового файла,

который можно рассматривать как восемь 32-разрядных регистров или шестнадцать 16-разрядных. Два адресных генератора (DAG) обеспечивают одновременную адресацию двух операндов. При формировании адресов используются шестнадцать основных 32-разрядных регистров: Index (I0...I3), Modify (M0...M3), Length (L0...L3) и Base (B0...B3). Кроме того, используются еще восемь дополнительных 32-разрядных регистров: шесть адресных указателей и два счетчика циклов. Генераторы адресов поддерживают бит-реверсивную и циклическую адресацию. Архитектура процессорного ядра ADSP-21535 обеспечивает выполнение в течение одного цикла операций в двух независимых ALU пересылку двух 32-разрядных слов данных (две операции чтения или одну — чтения и одну — записи), модификацию двух адресных указателей и счетчика циклов. Структурная схема процессорного ядра приведена на рис. 3. В инструкциях, выполняемых процессорным ядром, кодируется одновременное выполнение нескольких операций, что свойственно архитектуре всех сигнальных процес-

соров. Это позволяет одновременно использовать все вычислительные ресурсы процессорного ядра. В то же время инструкции имеют много характерных особенностей, реализованных в используемых в микроконтроллерах инструкциях, что в результате дает возможность после компиляции программ, составленных на языке C или C++, получить минимальный объем машинного кода. В ADSP-21535 реализованы инструкции, адаптированные для выполнения функций управления/контроля. Это инструкции, выполняющие произвольную перестановку битов, операции с отдельными битами, очистку и модификацию отдельных битов, целочисленные операции с 8- и 16-разрядными данными. Длина инструкций составляет 16 или 32 разряда. Наиболее часто используемые инструкции имеют длину 16 разрядов.

Кроме того, процессорное ядро поддерживает работу в режимах пользователя (прикладные программы) и супервизора (операционная система, драйверы, отладчики и т. п.).

Для синхронизации работы процессорного ядра и периферийных устройств используются тактовые сигналы разной частоты. Тактовая частота процессорного ядра (CCLK) получается умножением системой

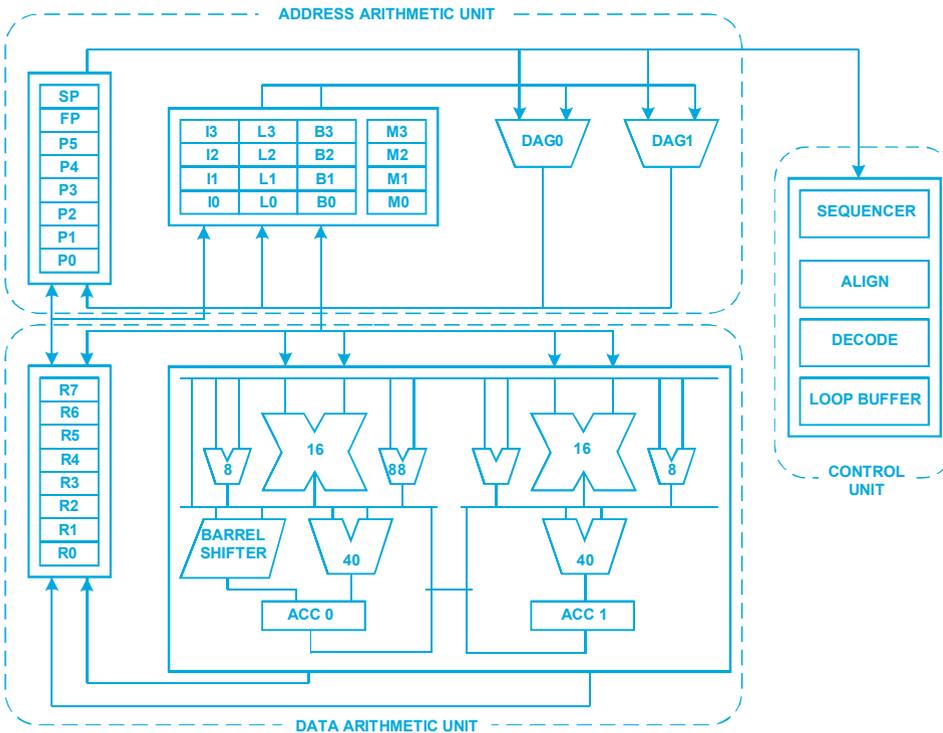


Рис. 3. Структурная схема процессорного ядра

ФАПЧ частоты входного тактового сигнала (вход CLKIN). После сброса значение тактовой частоты процессорного ядра определяется логическими состояниями соответствующих входов ADSP-21535. Синхронизация работы периферийных устройств осуществляется сигналом SCLK. После сброса частота тактового сигнала SCLK определяется логическими состояниями соответствующих входов ADSP-21535. Максимальное значение частоты SCLK составляет 133 МГц. Скорость обмена данными по встроенным шинам (между процессорным ядром и периферийными устройствами) определяется частотой тактового сигнала SCLK. В ходе выполнения программы частоту тактового сигнала CCLK (процессорное ядро) и SCLK (периферийные устройства) можно программно изменять, что, собственно, и лежит в основе одного из реализованных в ADSP-21535 методов динамического управления энергопотреблением.

**Память.** Адресуемое пространство памяти ADSP-21535 составляет 4 Гбайта. Память делится на встроенную и внешнюю.

Встроенная память типа RAM имеет объем 308 Кбайт и состоит из двух блоков (L1 и L2). Объем памяти блока L1 составляет 52 Кбайта, блока L2 — 256 Кбайт. Структура встроенной памяти приведена на рис. 4. В составе блока L1 имеется три банка памяти.

Первый банк объемом 16 Кбайт используется для хранения программного кода и может быть конфигурирован как кэш-память или память с произвольным

доступом (RAM).

Второй банк объемом 32 Кбайта (два сегмента по 16 Кбайт) используется для хранения данных и может быть конфигурирован как кэш-память или память с произвольным доступом.

Третий банк объемом 4 Кбайта представляет собой дополнительную память блока L1, которая может использоваться только как память с произвольным доступом для хранения локальных данных или в качестве стека.

Обмен данными между процессорным ядром и блоком памяти L1 осуществляется с максимально возможным быстродействием.

Блок встроенной памяти L2 предназначен для хранения данных и/или программного кода и может использоваться только в качестве памяти с произвольным доступом. В фазе адресации цикла обмена между процессорным ядром и блоком L2 имеется незначительная задержка, после которой обмен данными выполняется в пакетном режиме. Процессорное ядро ADSP-21535 связано с блоком памяти L2 64-разрядной шиной данных, что обеспечивает максимальную скорость обмена данными порядка 2.4 Гбайта/с при тактовой частоте 300 МГц.

Встроенный блок памяти типа ROM используется для хранения программы начальной загрузки.

Для регистров управления/контроля процессорного ядра и периферийных устройств выделено адресное пространство объемом 4 Мбайта (два блока по 2 Мбайта). Доступ к содержимому первого блока разрешен только со стороны процессорного ядра и только в режиме супервизора. Доступ к содержимому регистров управления/контроля из второго блока разрешен как со стороны процессорного ядра (режим супервизора) так и от других устройств на PCI-шине (если не установлен режим защиты).

Внешняя память общим объемом до 768 Мбайт может включать синхронную динамическую память (SDRAM), асинхронную статическую (SRAM), флэш-память или ROM-память. Обмен данными между ADSP-21535 и внешней памятью осуществляется по 32-разрядной шине данных (адресация по 32-разрядной шине адреса). Управление обменом данными с внешней

памятью осуществляется с помощью контроллера внешней памяти (External Memory Controller — EMC).

Адресуемое пространство памяти типа SDRAM состоит из четырех блоков объемом от 16 до 128 Мбайт. Таким образом, максимальный объем внешней памяти типа SDRAM составляет 512 Мбайт.

Адресуемое пространство асинхронной памяти состоит из четырех блоков объемом по 64 Мбайта. В нем можно размещать порты ввода/вывода внешних устройств.

Адресное пространство PCI-шины делится на три области — область памяти, портов ввода/вывода и конфигурации. Адресуемое пространство памяти и портов ввода/вывода PCI-шины составляет 4 Гбайта. Поэтому обращение со стороны ADSP-21535 к памяти, портам ввода/вывода и области конфигурации PCI-шины выполняется через выделенные окна в адресном пространстве ADSP-21535. Для окна, предназначенного для обращения к памяти PCI-шины, выделено адресное пространство 128 Мбайт; для окна, через которое осуществляется обращение к портам ввода/вывода PCI-шины — 64 Кбайта. Специальные регистры базовых адресов памяти и портов ввода/вывода обеспечивают позиционирование соответствующих окон в адресном пространстве PCI-шины. Область конфигурации PCI-шины имеет ограниченный объем, и обмен данными между ADSP-21535 и областью конфигурации выполняется через порт ввода/вывода, который имеет фиксированный адрес (EFFF FFFC) в адресном пространстве ADSP-21535.

**Контроллер DMA** выполняет пересылки данных между встроенными периферийными устройствами (все последовательные порты) и областями памяти (внешней и встроенной), которые могут размещаться в любом месте адресуемого пространства ADSP-21535. Для описания параметров (длины блока, адреса и т. п.), необходимых для пересылки данных, имеется набор регистров управления. Пересылка данных в режиме DMA возможна также между отдельными областями адресуемого пространства ADSP-21535.

**Контроллер PCI-шины** реализует интерфейс PCI шины (33 МГц, 32-разрядная шина данных), полностью отвечающий требованиям стандарта PCI Local Bus Specification (Revision 2.2) и служит в качестве моста между PCI и процессорным ядром ADSP-21535, а также встроенными и внешними по отношению к ADSP-21535 периферийными устройствами. В спецификациях стандарта PCI-шины определены два типа устройств шины: целевое (target) и ведущее (master). Контроллер PCI-шины ADSP-21535 реализует все функции как целевого, так и ведущего устройства на шине PCI. В качестве целевого устройства сигнальный процессор ADSP-21535 может быть программно конфигурирован хост-процессором (мастером) шины. В этом случае ADSP-21535 является по сути интеллектуальным устройством ввода/вывода на шине PCI. Если

ADSP-21535 служит в качестве целевого устройства, встроенный контроллер DMA используется для пересылки данных по шине в режиме прямого доступа. В качестве ведущего устройства ADSP-21535 эмулирует все функции хост-процессора PCI-шины. Следует подчеркнуть, что ADSP-21535 — идеальный выбор для реализации интеллектуальных внешних устройств и хост-процессора на PCI-шине.

**Контроллер внешней памяти** обеспечивает высокоскоростной обмен данными с внешней памятью разного типа: синхронной динамической памятью типа SDRAM (стандарт PC133) и асинхронной — SRAM, ROM или флэш. Контроллер внешней памяти состоит из контроллеров SDRAM и асинхронной памяти. Контроллер SDRAM реализует интерфейс с четырьмя блоками памяти типа SDRAM в 16- или 32-разрядном формате. Контроллер асинхронной памяти реализует интерфейс с четырьмя блоками внешней памяти и/или устройствами ввода/вывода. Параметры циклов обмена настраиваются отдельно для каждого блока, что дает возможность подключать к ADSP-21535 память самых разных типов. Обмен с асинхронной памятью выполняется в 32- или 16-разрядном формате. В первом случае обеспечивается высокоскоростной обмен данными, во втором — снижается стоимость внешней памяти, а, следовательно, и стоимость системы в целом.

**Таймеры.** В ADSP-21535 имеется три универсальных таймера общего назначения, таймер реального времени и "сторожевой".

В каждом из трех универсальных таймеров предусмотрено несколько режимов работы, которые устанавливаются программно. Таймеры можно использовать для формирования ШИМ-сигнала в стандартном режиме таймера (тактирование внешним или внутренним сигналом) и измерения длительности импульсов. Последний режим используется контроллером UART-порта для автоматического определения скорости передачи данных через UART-порт. Каждый из трех таймеров может формировать сигнал прерывания, что позволяет просто синхронизировать работу процессорного ядра с внешними событиями. В дополнение к трем универсальным таймерам общего назначения имеется четвертый таймер, который тактируется сигналом той же частоты, что и процессорное ядро. Этот дополнительный таймер предназначен для формирования периодических прерываний, используемых при работе операционной системы.

Таймер реального времени (Real-Time Clock — RTC) предназначен для реализации часов реального времени. RTC имеет отдельные выходы для подключения напряжения питания (3.3 В), что обеспечивает его работу даже в случае, если процессорное ядро и периферийные устройства находятся в энергосберегающих режимах работы. RTC работает от отдельного внешнего кварцевого резонатора (частота 32 768 Гц). Таймер реального времени может генерировать сиг-

нал прерывания каждую секунду, минуту или день, а, кроме того, сигнал прерывания может формироваться при достижении заранее запрограммированного значения. Последний режим можно использовать для генерации разного рода предупредительных сигналов. Выход ADSP-21535 из режимов с пониженным энергопотреблением может осуществляться по сигналам прерываний, формируемых RTC.

"Сторожевой" — 32-разрядный таймер, тактируемый внутренним сигналом SCLK (максимальная частота 133 МГц). "Сторожевой" таймер обеспечивает выход из неопределенных состояний, вызванных ошибками в программе или любыми другими причинами. После обнуления "сторожевой" таймер может формировать сигнал аппаратного сброса (reset), немаскируемое или стандартное прерывание. Сигнал аппаратного сброса может формироваться отдельно для процессорного ядра и периферийных устройств. С помощью опроса соответствующих разрядов регистра управления/контроля "сторожевого" таймера всегда можно определить, был ли инициирован аппаратный сброс "сторожевым" таймером.

**Последовательные порты.** Для обмена данными в последовательном формате с внешними устройствами разного типа в ADSP-21535 имеются: два SPORT (Serial Port), два SPI (Serial Peripheral Interface) порта, два стандартных UART и USB (Universal Serial Bus) порта. Последовательные высокоскоростные порты обеспечивают обмен данными с аудиокодеками, модемами и другими внешними устройствами.

Два независимых многоканальных синхронных двунаправленных порта (SPORT0 и SPORT1) можно также использовать для межпроцессорного обмена данными. Прием и передача данных выполняются через буферные регистры, тактовая частота и синхроимпульсы формируются ADSP-21535, но при необходимости тактовая частота и синхроимпульсы могут формироваться и внешними устройствами. Частота тактового сигнала может находиться в диапазоне от 1 кГц до 66.5 МГц. Длина слова при последовательной передаче данных через SPORT может меняться от 3 до 16 разрядов. В каждом SPORT порту реализован аппаратный компандер (А- или μ-закон) в соответствии с рекомендациями G.711. SPORT порты поддерживают многоканальную передачу данных (24 или 32 канала), причем протокол передачи совместим с протоколами, принятыми в стандартах H.100, H.110, MVIP-90 и NMVIP. Обмен данными через SPORT может выполняться в программном режиме, по прерываниям или в режиме DMA. Причем управление работой каналов DMA, обеспечивающих пересылку данных между SPORT и памятью, может осуществляться процессорным ядром ADSP-21535 или хост-процессором.

Два последовательных стандартных SPI порта позволяют организовать обмен данными между процессорами в системе или с любыми внешними устройства-

ми (АЦП, кодеками и т. п.), в которых реализован интерфейс SPI порта. SPI порты обеспечивают полнодуплексный синхронный обмен данными в последовательном формате. Контроллер SPI порта поддерживает два режима работы: master и slave. Скорость передачи данных устанавливается программно. Прием и передача данных через SPI порты может осуществляться с использованием соответствующих каналов контроллера DMA.

Два полнодуплексных стандартных UART порта обеспечивают асинхронный обмен данными в последовательном формате (от 5 до 8 разрядов). Обмен данными можно осуществлять в программном режиме и по прерываниям. Скорость передачи данных устанавливается программно. В каждом из UART портов реализована возможность автоматического определения скорости передачи данных. В этом случае для определения длительности битового интервала используются встроенные универсальные таймеры общего назначения. В контроллере DMA для каждого UART порта выделено два независимых канала (отдельно для приема и передачи). В одном из UART портов имеется возможность реализовывать стандартный протокол (SIR-протокол), используемый при обмене данными по инфракрасному каналу связи.

USB порт можно использовать для связи с персональным компьютером или любыми другими внешними устройствами. Интерфейс USB порта полностью совместим со спецификациями стандарта USB 1.1. Режимы работы USB порта устанавливаются программно. Обмен данными через USB порт можно выполнять с использованием каналов контроллера DMA.

**Управление энергопотреблением.** Нельзя обойти вниманием и те новые преимущества ADSP-21535, которые могут обеспечить ему широкое применение во встроенных портативных системах. В отличие от сигнальных процессоров, выпущенных ранее, в ADSP-21535 фирма Analog Devices реализовала новые возможности по управлению энергопотреблением, которые достигаются, во-первых, за счет отключения тактового сигнала и/или уменьшения тактовой частоты процессорного ядра и отдельных периферийных устройств, а, во-вторых, за счет изменения напряжения питания процессорного ядра.

В ADSP-21535 имеется четыре режима работы, в которых снижение энергопотребления достигается за счет отключения тактового сигнала, обеспечивающе-

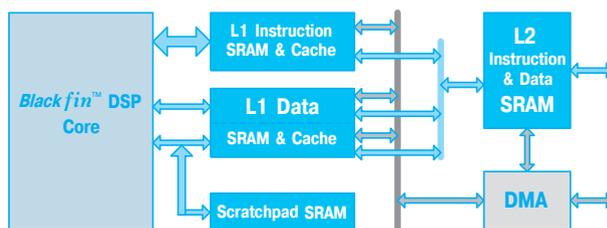


Рис. 4. Структура встроенной памяти

Таблица 2. Энергосберегающие режимы работы ADSP-21535

| Режим работы | ФАПЧ            | такты́е сигналы |      |
|--------------|-----------------|-----------------|------|
|              |                 | CCLK            | SCLK |
| Full on      | вкл             | вкл             | вкл  |
| Active       | не используется | вкл             | вкл  |
| Relaxed      | откл            | вкл             | вкл  |
| Sleep        | откл            | откл            | вкл  |
| Deep Sleep   | откл            | откл            | откл |

го работу отдельных устройств. К таким устройствам относятся: система ФАПЧ, процессорное ядро, почти все периферийные устройства.

В табл. 2 приведены энергосберегающие режимы работы ADSP-21535.

В режиме Full on работают все устройства ADSP-21535 (такты́е частота максимальна).

В режиме Active входной тактовый сигнал (вход CLKIN) используется для непосредственного формирования CCLK и SCLK (ФАПЧ в этом случае не используется для генерации этих сигналов). Снижения тока потребления можно достичь, если частота CCLK равна половине частоты входного сигнала CLKIN.

В режиме Relaxed ФАПЧ отключается, что вызывает дополнительное снижение тока потребления. В режимах Active и Relaxed поддерживается обмен данными с блоком памяти L1 в режиме DMA.

В режиме Sleep процессорное ядро прекращает работу. Любые прерывания, в том числе и от RTC, обеспечивают выход из этого режима.

Режим Deep Sleep характеризуется отключением тактовых сигналов CCLK и SCLK. Только с помощью внешнего сигнала сброса или прерывания от RTC можно вернуть ADSP-21535 в рабочее состояние.

С помощью регистра управления тактовой частотой периферийных устройств возможно отключение тактового сигнала от отдельных устройств. Это контроллер PCI-шины; контроллер DMA; порты SPORT, SPI, UART, USB; универсальные таймеры.

Во многих случаях снижения энергопотребления можно достичь за счет уменьшения тактовой частоты CCLK и SCLK, которое выполняется на программном уровне.

Потребляемая мощность и тактовая частота связаны пропорциональной зависимостью. Однако, более эффективного управления потребляемой мощностью можно добиться за счет изменения напряжения питания, поскольку мощность и напряжение связаны квадратической зависимостью. В ADSP-21535 процессорное ядро (напряжение питания 0.86...1.575 В), ФАПЧ (1.425...1.575 В), RTC (3.15...3.45 В), входы/выходы PCI-шины (3.15...3.45 В), другие внешние входы/выходы, включая и вход CLKIN (2.5...3.45 В), имеют отдельные выводы для подключения питания. Схема подключения

питания процессорного ядра дает возможность реализовать динамическое управление напряжением питания процессорного ядра. В ADSP-21535 для этой цели необходимо использовать внешний регулятор напряжения (в новом ADSP-21532 будет реализован встроенный регулятор напряжения).

В качестве примера эффективности динамического управления энергопотреблением можно привести следующее. При снижении тактовой частоты с 300 до 50 МГц и напряжения питания процессорного ядра с 1.5 до 1.2 В общая потребляемая мощность сокращается до уровня 10 % мощности, потребляемой при номинальных значениях напряжения питания и тактовой частоты.

**Средства отладки.** Средства отладки ADSP-21535, предлагаемые фирмой Analog Devices, базируются на интегрированной отладочной среде (Integrated Development Environment — IDE), которая включает программное обеспечение Visual DSP++, оценочные платы и внутрисхемный эмулятор. В состав Visual DSP++ входят: ассемблер с алгебраическим синтаксисом, компоновщик, загрузчик, симулятор, C/C++ компилятор и библиотека программ на языке C/C++ для реализации некоторых DSP-приложений. С помощью внутрисхемного эмулятора осуществляется загрузка в ADSP-21535 программного кода, точек останова, проверка и модификация содержимого регистров процессорного ядра и ячеек памяти. Для подключения внутрисхемного эмулятора в ADSP-21535 реализован специальный тестовый порт (Test Access Port — TAP), выполненный в соответствии с рекомендациями стандарта IEEE 1149.1. Кроме того, в состав отладочных средств входит оценочная плата ADSP-21535 EZ-Kit.

Нет сомнения в том, что благодаря уникальным возможностям, которые присущи всем устройствам типа SoC (система на кристалле), и высоким параметрам сигнальных процессоров семейства ADSP-215xx, они будут широко применяться как при реализации мультипроцессорных вычислительных систем, так и при создании экономичных встраиваемых устройств цифровой обработки сигналов.

Более детальную информацию о сигнальных процессорах семейства ADSP-215xx и средствах отладки, предлагаемых фирмой Analog Devices, можно найти в сети Интернет по адресу: [www.analog.com/blackfin](http://www.analog.com/blackfin)

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Preliminary Technical Data ADSP-21535. — Analog Devices, 2001.
2. ADSP-21535 — High-Performance 16-bit DSP for Internet Appliances ([www.analog.com](http://www.analog.com)).
3. ADSP-21532 — High-Performance 16-bit DSP for Cost-Sensitive Consumer Applications ([www.analog.com](http://www.analog.com)).
4. Blackfin DSP ([www.analog.com](http://www.analog.com)).
5. [www.analog.com/blackfin](http://www.analog.com/blackfin)

## ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ \*

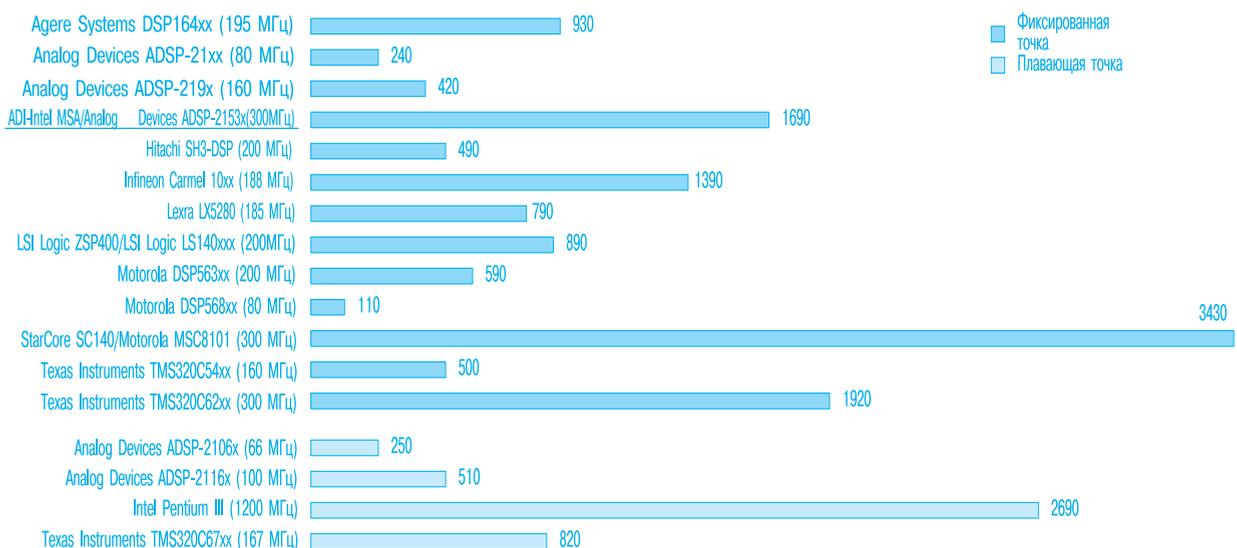
Один из важнейших параметров сигнальных процессоров — производительность. В статье приведены показатели реальной производительности сигнальных процессоров разных типов при выполнении алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Традиционно производители сигнальных процессоров для оценки производительности процессоров используют единицы MIPS (миллион инструкций в секунду), MFLOPS (миллион операций с плавающей точкой в секунду), MMAC (миллион операций умножения с накоплением). Исторически сложилось так, что, в отличие от архитектуры популярных универсальных микропроцессоров для массовых персональных компьютеров, архитектура сигнальных процессоров разных производителей существенно варьируется от одной модели процессора к другой. Вследствие особенностей архитектуры сигнальных процессоров разных типов такие показатели производительности, как MIPS, MFLOPS, MMAC, не могут в полной мере отражать вычислительную мощность процессоров при выполнении алгоритмов цифровой обработки сигналов. Оценить производительность сигнальных процессоров и получить количественные показатели производительности, использование которых позволяет выполнять сравнительную оценку сигнальных процессоров разных типов при выполнении цифровой обработки сигналов, мож-

но только пользуясь методикой, предложенной независимой ассоциацией BDTI (Berkeley Design Technology, Inc.). Ассоциация BDTI создана в 1991 г. и специализируется на анализе архитектуры, разработке алгоритмов и тестовых программ, оценке реальной производительности сигнальных процессоров разных производителей. Суть методики, предложенной BDTI, заключается в измерении времени выполнения программ, реализующих двенадцать базовых контрольных алгоритмов, в результате чего и получают обобщенные показатели производительности. Услугами BDTI пользуются известные фирмы: ZCOM, AMD, Analog Devices, Ericsson, Hewlett-Packard, IBM, Infineon Technologies, Intel, Microsoft, Motorola, NEC, Nokia, Texas Instruments, Xilinx и др. Специалисты BDTI регулярно выполняют тестирование сигнальных процессоров разных типов.

С результатами тестирования можно ознакомиться на страницах ведущих специализированных изданий и на Web-сайте BDTI ([www.bdti.com](http://www.bdti.com)).

На рисунке приведены уточненные результаты тестирования (BDTI, декабрь 2001 г.) и показатели производительности сигнальных процессоров разных типов, в том числе и нового ADSP-21535 (BlackfinDSP), созданного на базе новой архитектуры, разработанной совместно фирмами Analog Devices и Intel.



Производительность сигнальных процессоров разных типов

\* BDTI<sup>mark2000</sup>™ Scores. Updated December 2001 ([www.bdti.com](http://www.bdti.com)).



## ДАТЧИК ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА ДВ-8Б

В статье представлена новая модификация емкостного датчика, предназначенного для измерения влажности воздуха и невзрывоопасных газов в диапазоне температур от 0 до 85 °С.

**В. Петренко, А. Цубин**

В [1, 2] был представлен ряд емкостных датчиков типа ДВ-7 и ДВ-8, предназначенных для применения в технологическом оборудовании для сушки промышленных продуктов и системах мониторинга параметров микроклимата. Для модификации ДВ-8Б расширена сфера применения, улучшены эксплуатационные характеристики, разработано более совершенное метрологическое обеспечение.

Датчик ДВ-8Б может применяться как для контроля параметров микроклимата в промышленных помещениях, так и для контроля влажности воздуха в камерах технологических агрегатов или в воздуховодах. При этом обеспечивается необходимая степень защиты его сенсора.

Первая степень защиты сенсора обеспечивает работу датчика в нормальных условиях, вторая предназначена для датчиков, работающих в запыленном помещении с температурой воздуха до 85 °С. Третья степень защиты может обеспечить работу датчика в потоке воздуха, засоренного твердыми частицами, в диапазоне температур до 85 °С (для датчика ДВ-8Б) и до 150 °С (для датчиков с расширенными температурными диапазонами).

Разработанное для датчика ДВ-8Б метрологическое обеспечение позволяет ощутимо уменьшить сложности, связанные с необходимостью периодической поверки и калибровки датчиков. При использовании калибраторов КМ-2 или КМ-3 калибровка датчиков может производиться на месте эксплуатации по двум или трем точкам соответственно.

Применение современной элементной базы фирмы Analog Devices позволило, наряду с уменьшением стоимости датчика, повысить стабильность его выходного сигнала во времени.

Технические характеристики датчика:

- диапазон измеряемой влажности воздуха (без конденсации влаги), % от 0 до 100
- абсолютная погрешность измерения, %, не более  $\pm 3$
- время реакции на скачок влажности воздуха (с мембранным металлопластиковым фильтром), с, не более 20
- выходной сигнал (ток), мА от 4 до 20
- диапазон рабочих температур, °С от 0 до 80
- максимально допустимая рабочая температура, °С 85
- напряжение питания, В от 15 до 30
- габариты, мм:
  - гигрометрический зонд  $\varnothing 16 \times 110$
  - корпус преобразователя  $\varnothing 50 \times 60$
- масса, кг, не более 0.3.

На рис. 1, 2 показаны соответственно характеристика преобразования датчика ДВ-8Б и функция распределения погрешности измерений, полученные в процессе исследований и государственной метрологической аттестации партии датчиков. Указанные выше характеристики являются типовыми для датчиков модификации ДВ-8Б.

Корпус преобразователя датчика изготовлен из ударопрочного компаунда АГ-5. Гигрометрический зонд изготовлен из нержавеющей стали и покрыт пластиком. Под крышкой размещены клеммы для подключения кабеля, проходящего через уплотняющий сальник, и органы калибровки начала и конца диапазона измерений.

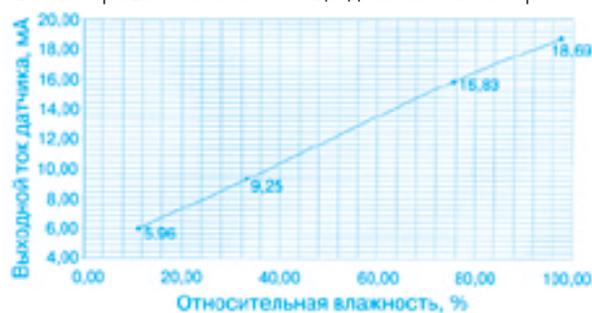


Рис. 1. Характеристика преобразования датчика ДВ-8Б

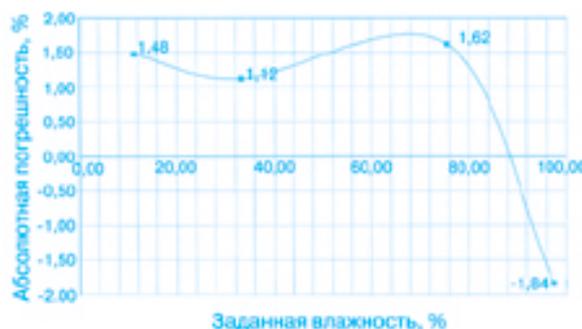


Рис. 2. Распределение погрешности датчика ДВ-8Б

Датчик может устанавливаться на стенке помещения и на технологическом агрегате. В последнем случае датчик устанавливается на наружной стороне технологического агрегата таким образом, что гигрометрический зонд проходит в камеру через сквозное отверстие  $\varnothing 19$  мм, которое уплотняется резиновым кольцом.

В комплект поставки входят: датчик ДВ-8Б, детали крепления на объекте, уплотнитель сальника, формуляр, свидетельство о государственной метрологической аттестации, упаковочная коробка.

Более подробные сведения можно получить по тел.: (044) 211-82-09 или e-mail: ukrkia@nbi.com.ua

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Петренко В. Цубин А. Датчик относительной влажности воздуха // ЭКиС — Киев: VD MAIS, 2000, 8.
2. Петренко В. Цубин А. Датчик относительной влажности воздуха ДВ-8 для сушильных аппаратов // ЭКиС — Киев: VD MAIS, 2001, 4.

## ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

*В обзорной статье, подготовленной на основе ранее опубликованных материалов, рассмотрены основные преимущества технологии поверхностного монтажа электронных компонентов (ЭК), представлены характеристики их корпусов и используемых материалов, технологии и оборудование ведущих фирм для монтажа ЭК на платы. Даны рекомендации по выбору оптимального комплекта оборудования в зависимости от уровня производства и объёма выпускаемой продукции.*

**А. Грачев, Н. Малиновский**

Современная аппаратура отличается высокой интеграцией и технологичностью, малым весом и высокой надёжностью. Эти достижения в значительной степени обусловлены успехами в области технологии поверхностного монтажа.

К основным преимуществам этой технологии по сравнению с монтажом в отверстия относятся:

- повышение плотности монтажа ЭК на плате в 4—6 раз
- уменьшение габаритов на 60 % и снижение в 3—5 раз веса
- возможность монтажа ЭК с двух сторон платы
- повышение быстродействия и улучшение электрических характеристик, связанных с длиной выводов ЭК
- упрощение автоматизации монтажа ЭК на платы, увеличение в десятки раз производительности процесса монтажа
- снижение стоимости монтажа печатных узлов (ПУ) вследствие уменьшения трудоёмкости и использования меньшего числа простых плат, в которых уменьшены размеры и число слоёв
- повышение виброустойчивости и вибропрочности ПУ в два раза
- повышенная способность отвода тепла от кристаллов интегральных схем (ИС), что является очень важным для безотказной работы аппаратуры [1]
- оборудование для технологии поверхностного монтажа проще, надёжнее, обладает производительностью в десятки раз выше и требует в два раза меньше производственных площадей по сравнению с оборудованием для монтажа в отверстия.

Естественно, переход на новую технологию обусловил появление новой элементной базы и особые требования к качеству печатных плат (ПП).

### 1. Элементная база для поверхностного монтажа ЭК

Современная технология поверхностного монтажа

предусматривает следующие требования к электронным компонентам:

- минимальные массу и габариты, плоскостность, низкий профиль выводов, невысокую стоимость, обеспечение стандартизации
- пригодность к автоматизированному монтажу, возможность использования существующих методов пайки
- высокую термостойкость в условиях длительной тепловой нагрузки в процессе пайки
- возможность современного корпусирования.

В настоящее время на рынке ЭК имеется большой выбор элементов в различных корпусах для поверхностного монтажа. Причём, разработка корпусов для ЭК приблизилась к такой стадии, когда её роль становится столь же важной, как и разработка самих компонентов. Основными компонентами для поверхностного монтажа являются большие (БИС) и сверхбольшие (СБИС) интегральные схемы (ИС) и полупроводниковые приборы в малогабаритных корпусах. Существует большой выбор корпусов для поверхностного монтажа. Необходимо отметить, что размеры кристалла ИС продолжают увеличиваться, а размеры элементов в нем — уменьшаться, поэтому специалисты, занимающиеся вопросами сборки компонентов, столкнулись с двойной проблемой. Во-первых, необходимо собирать физически большой кристалл, высокая плотность элементов в котором требует увеличения числа контактных площадок для соединения его с внутренними выводами корпуса. Во-вторых, увеличение размеров и плотности упаковки элементов в кристаллах БИС и СБИС требует увеличения числа выводов в корпусах, в которые они монтируются, что может приводить к возрастанию их размеров, веса, ухудшению электрических характеристик и быстродействия микроприборов [2].

Поэтому техника корпусирования БИС и СБИС — динамичная, бурно развивающаяся область микроэлектроники, при этом основной тенденцией является стремление к минимизации объёмов корпусов при одновременном росте числа выводов с уменьшением расстояния между ними.

*Основные типы корпусов ИС полупроводниковых приборов для поверхностного монтажа.*

Классификация корпусов подробно рассмотрена в работе [3]. Корпуса классифицируют в зависимости от конструктивных особенностей и геометрических размеров. Классификация корпусов для поверхностного монтажа приведена на рис. 1. В соответствии с этой классификацией в таблице 1 приведены основные данные о наиболее распространённых и перспек-

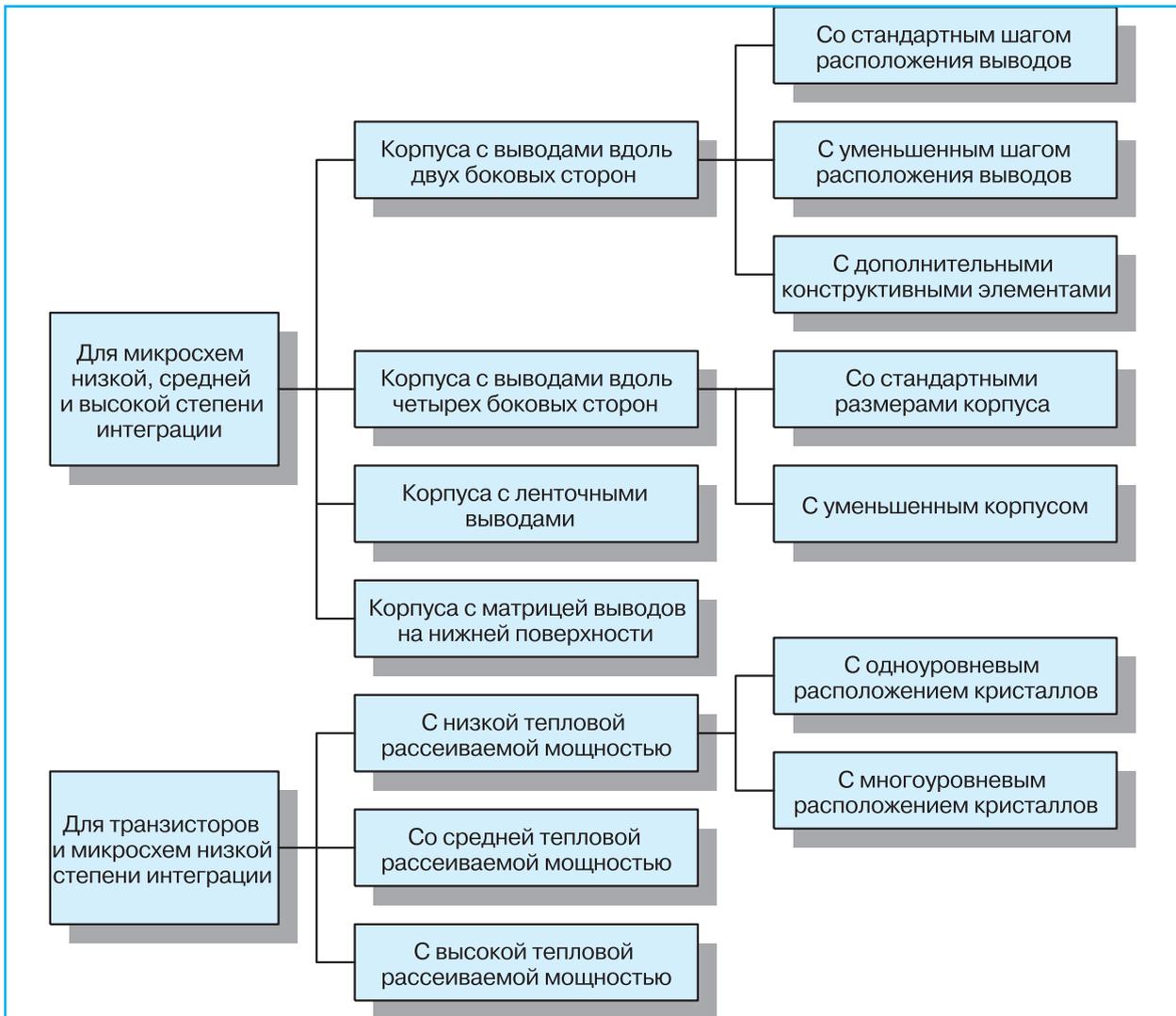


Рис. 1. Классификация корпусов микросхем, предназначенных для поверхностного монтажа

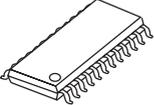
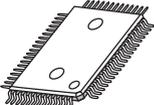
тивных типах корпусов. Следует отметить, что некоторые изготовители в справочных данных в качестве основного приводят фирменное обозначение корпуса, а в комментариях дают сведения о соответствии фирменного обозначения общепринятому. Кроме того, часто перед общепринятыми обозначениями корпусов ставят букву, определяющую материал, из которого сделан корпус: Р — пластик, С — керамика, М — металл-керамика.

Корпуса с выводами по периметру входят в состав семейства SOP, SOJ, QFJ, QFP, DIP. Наиболее распространены корпуса SOP (число выводов от 8 до 100) и QFP (число выводов от 20 до 304). В корпусах с большим количеством выводов выпускают цифровые микросхемы средней и высокой степени интеграции, в корпусах с малым количеством выводов — цифровые микросхемы малой и средней степени интеграции, аналоговые микросхемы, диоды и транзисторы.

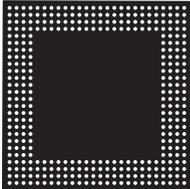
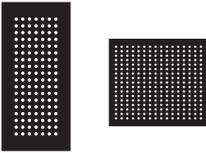
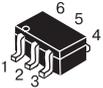
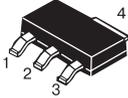
Микросхемы в исполнении TSP имеют ленточные выводы из тонкой медной или алюминиевой фольги на полимерной плёнке, прикреплённые к кристаллу пайкой или ультразвуковой сваркой. После установки на плату микросхемы должны герметизироваться в составе платы. Они поставляются на ленте-носителе и хорошо приспособлены для автоматизированного контроля параметров и монтажа. Этот тип микросхем применяют в недорогой, не подлежащей ремонту аппаратуре с большими объёмами выпуска.

Для микросхем высокой и сверхвысокой степени интеграции в последние годы получили широкое распространение корпуса BGA, поскольку они относительно недороги и при большом количестве выводов занимают мало места на плате. Согласно технологии BGA бескорпусные кристаллы (один или несколько) монтируют на поверхность печатной микросхемы и герметизируют полимерным компаундом.

Таблица 1. Корпуса микросхем для поверхностного монтажа

| Корпус  |   | Краткое описание  | Шаг выводов, мм        | Внешний вид корпуса   |
|---|---|---|------------------------|---|
| Тип   | Полное название   |   |                        |   |
| 1. Корпуса для микросхем низкой, средней и высокой степени интеграции |   |   |                        |   |
| 1.1. С выводами вдоль двух боковых сторон корпуса                     |   |   |                        |   |
| 1.1.1. Со стандартным шагом расположения выводов                      |   |   |                        |   |
| SO, SOP, SOL, SOIC  | Small Outline Package, Small Outline Integrated Circuit | Выводы в виде крыла чайки или в виде буквы "L"  | 1.27                   |    |
| SOJ   | Small Outline J-Lead Package                            | Выводы в виде буквы "J"   | 1.27                   |    |
| TSOP, вариант II  | Thin Small Outline Package                              | Корпус с уменьшенной высотой над платой (не более 1.27 мм), выводы расположены вдоль длинной стороны корпуса  | 1.27                   |    |
| 1.1.2. С уменьшенным шагом расположения выводов                       |   |   |                        |   |
| TSOP, вариант I   | Thin Small Outline Package                              | Корпус с уменьшенной высотой над платой (не более 1.27 мм), выводы расположены вдоль короткой стороны корпуса | 0.5                    |  |
| SSOP, SSOL  | Shrink Small Outline Package                            | Корпус SOP с уменьшенным шагом расположения выводов   | 1.00, 0.80, 0.65, 0.50 |   |
| TSSOP   | Thin Shrink Small Outline Package                       | Корпус SSOP с уменьшенной высотой над платой (не более 1.27 мм). Стандартизован EIAJ, JEDEC                   | 0.65, 0.50             |   |
| TVSOP   | Thin Very Small Outline Package                         | Миниатюрный корпус SOP  | 0.40                   |   |
| uSOIC   | microSOIC   | Миниатюрный корпус SOIC   | 0.65                   |   |
| 1.2. С выводами вдоль четырёх сторон корпуса                          |   |   |                        |   |
| 1.2.1. Со стандартными размерами корпуса                              |   |   |                        |   |
| QFP   | Quad Flat Package                                       | Выводы в виде крыла чайки вдоль четырех сторон корпуса  | 1.00, 0.80, 0.65       |  |
| PLCC  | Plastic Leaded Chip Carrier                             | Кристаллоноситель с выводами в виде буквы "J". Стандартизован EIAJ, JEDEC                                     | 1.27, 0.635            |   |
| 1.2.2. С уменьшенными размерами корпуса                               |   |   |                        |   |
| LQFP, TQFP  | Low Profile (Thin) Quad Flat Package                    | Корпус QFP с уменьшенной высотой над платой (не более 1.27 мм)  | 0.80, 0.65             |  |
| MQFP  | Metric Thin Quad Flat Package                           | Корпус QFP с метрическим шагом выводов и уменьшенной высотой над платой                                       | 0.50                   |   |
| FQFP  | Fine Pitch Quad Flat Package                            | Корпус QFP с малым шагом расположения выводов. Стандартизован EIAJ  | 0.40                   |   |

Продолжение таблицы 1. Корпуса микросхем для поверхностного монтажа

| Корпус  |                          | Краткое описание  | Шаг выводов, мм | Внешний вид корпуса   |
|---|--------------------------|---|-----------------|---|
| Тип   | Полное название          |   |                 |   |
| 1.3. С матрицей выводов на нижней поверхности корпуса             |                          |   |                 |   |
| BGA   | Ball Grid Array          | Микросхема или многокристальный модуль на двухслойной печатной микроплате, снабжен массивом шариковых выводов   | 1.27, 1.00      |    |
| CSP   | Chip Scale Package       | Корпус с размерами, незначительно превышающими размеры кристалла. Снабжен массивом шариковых выводов  | 1.00, 0.50      |    |
| 2. Корпуса для транзисторов и микросхем низкой степени интеграции |                          |   |                 |   |
| 2.1. С низкой рассеиваемой мощностью                              |                          |   |                 |   |
| SOT-23  | Small Outline Transistor | Для диодов, транзисторов, микросхем с малым количеством выводов. SOT-23 выпускается также в варианте исполнения с пятью (SOT-5, SOT-23-5) или шестью (SOT-6, SOT-23-6) выводами | 0.95            |    |
| SOT-143   |                          |   | 1.90            |   |
| SOT-323   |                          |   | 0.65            |  |
| SOT-363   |                          |   | 0.65            |  |
| 2.2. Со средней рассеиваемой мощностью                            |                          |   |                 |   |
| SOT-223   | Small Outline Transistor | Для транзисторов, микросхем с малым количеством выводов (DC/DC преобразователей, стабилизаторов напряжения)   | 1.90            |  |
| DPAC  | D-package                |   | 4.80            |  |
| 2.3. С высокой рассеиваемой мощностью                             |                          |   |                 |   |
| D <sup>2</sup> PAC  | D-package                | Для транзисторов и микросхем с повышенной рассеиваемой мощностью, высоким напряжением питания. Как правило, это приборы с импульсными токами до 100 А                           | 2.54/5.08       |  |
| D <sup>3</sup> PAC  | D-package                |   | 10.9            |  |

Микросхемы в корпусах BGA паяются на платы с помощью выводов, выполненных в виде массива шариков припоя на контактных площадках микроплаты. Дальнейшее развитие технологии корпусов BGA привело к созданию корпусов типа CSP, в которых отсутствует печатная микроплата, а шариковые выводы размещены непосредственно на контактных площадках в верхнем слое металлизации кристалла. После формирования шариковых выводов кристалл заливают тонким слоем пластмассы и монтируют на печатной плате так же, как корпус BGA. В случае необходимости на верхней стороне микросхемы устанавливают теплоотвод. По эффективности использования площади платы эта технология практически не уступает технологии flip-chip (монтаж на плату перевернутых бескорпусных кристаллов и герметизация их полимерным компаундом в составе платы).

Основным тормозом в массовом выпуске микросхем в корпусах типа CSP и широком применении технологии flip-chip является отсутствие надежного и недорогого способа уменьшения напряжений в системе кристалл-печатная плата, возникающих из-за различия температурных коэффициентов расширения полупроводникового кристалла ( $2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), меди ( $16.6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) и диэлектрика типа FR-4 ( $15 \dots 19 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), из которого делают печатные платы. Поэтому основные усилия разработчиков направлены на повышение надежности таких микросхем путём создания между кристаллом и платой недорогой переходной структуры, гасящей температурные напряжения.

Для микросхем, имеющих регулярную структуру, небольшую потребляемую мощность и малое количество выводов (типичные представители подобных микросхем — микросхемы памяти) начали развивать технологию изготовления многоуровневых («этажерочных») модулей 3DM. Согласно одному из вариантов этой технологии каждый уровень выполняется аналогично микросхеме BGA, кристалл устанавливается методом flip-chip и заливается слоем полимерного компаунда. Затем микроплаты разных уровней собирают в столбик, шариковые выводы пропаивают для создания вертикальных соединительных проводников, платы столбика скрепляют полимерным компаундом. Полученный модуль монтируют на плату с помощью шариковых выводов.

Корпуса семейства SOT первоначально были разработаны для транзисторов и имели три вывода (за исключением SOT-363, который имел 6 выводов). Однако впоследствии изготовители начали применять эти корпуса для микросхем, при необходимости увеличивая количество выводов с сохранением прежних габаритов. В частности, выпускаются микросхемы в корпусах SOT-23 с пятью выводами и D2PAK — с четырьмя.

С точки зрения конструктора, разнообразие типоразмеров корпусов незначительно усложняет процесс

разработки печатных плат, если их размеры заданы в одной измерительной системе. И наоборот, процесс разработки усложняется, если на плате для части корпусов размеры заданы в дюймах, а для остальных — в миллиметрах. Поэтому разработчику принципиальной электрической схемы следует стремиться к выбору микросхем, размеры которых заданы в единой измерительной системе.

### Тонкоплёночные чип-резисторы

В общем количестве электронных компонентов, используемых при производстве аппаратуры, пассивные составляют 70 %, причём не менее 50 % из них приходится на резисторы.

Конструкция чип-резисторов показана на рис. 2. Основанием чип-резисторов служит керамическая подложка на основе оксида алюминия, на которую наносится резистивный слой. Высокая точность величины сопротивления достигается лазерной подгонкой. Электрический контакт с печатной платой обеспечивается трёхслойной поверхностью, состоящей из внутреннего слоя выводов палладий-серебро, барьерного слоя никеля и внешнего слоя выводов олово-свинец или олово. Введение в конструкцию дополнительного слоя никеля при пайке предотвращает миграцию серебра из внутреннего выводного слоя в припой. На защитное покрытие из боросиликатного стекла наносится несмываемая кодовая маркировка номинала. Благодаря высокому качеству и стабильности параметров, чип-резисторы являются оптимальным выбором для любой аппаратуры.

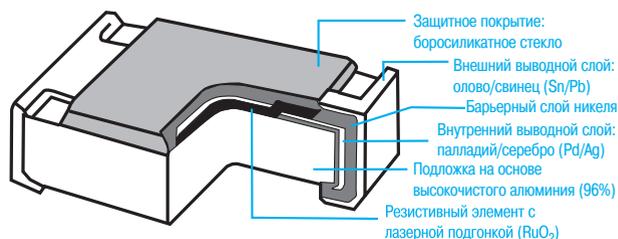


Рис. 2. Конструкция чип-резистора

Основные характеристики тонкоплёночных, чип-резисторов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики чип-резисторов

| Параметры/модель                                 |            | CR0603                        | CR0805 | CR1206 |
|--|------------|-------------------------------|--------|--------|
| Номинальная мощность при 70 °С, Вт               |            | 1/10                          | 1/8    | 1/4    |
| Диапазон рабочих температур, °С                  |            | от -55 до 125                 |        |        |
| Максимальное напряжение, В                       | рабочее    | 50                            | 150    | 200    |
|  | перегрузки | 100                           | 300    | 400    |
| Диапазон сопротивлений/температурный коэффициент | ΔR=5 %     | 0 Ом - 10 МОм/<br>±200 ppm/°С |        |        |
|  | ΔR=1 %     | 10 Ом - 1 МОм/<br>±100 ppm/°С |        |        |

Таблица 3. Характеристики чип-конденсаторов

| Параметры/ тип диэлектрика      | NPO/COG                          | X7R   | Z5U     | Y5V         |
|---------------------------------|----------------------------------|-------|---------|-------------|
| Диапазон рабочих температур, °C | -55...125                        |       | 10...85 | -30...85    |
| Допустимое отклонение ёмкости   | до 10 пФ — ±0.5 пФ; более — ±5 % | ±10 % | ±20 %   | -20 — +80 % |
| Рабочее напряжение, В (=/~)     | 50/25                            | 50/16 | 50/16   | 25/16       |
| Сопротивление изоляции, МОм     | более 10 000                     |       |         |             |

### Керамические чип-конденсаторы

Конденсаторы были первыми ЭК, которые стали выпускать в исполнении, рассчитанном для монтажа на поверхность. Это самый распространённый вид конденсаторов в настоящее время. При малых габаритах они обеспечивают реализацию широкой шкалы ёмкости и заданного температурного коэффициента. Простота технологии изготовления делает керамические конденсаторы массовых серий самым дешёвым видом этих компонентов. Конструкция керамического чип-конденсатора приведена на рис. 3.

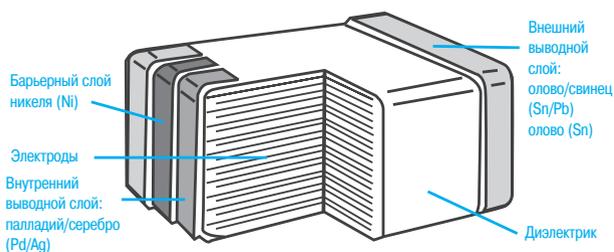


Рис. 3. Конструкция чип-конденсатора

Такие чип-конденсаторы обладают высокой механической прочностью и выдерживают высокие механические нагрузки, возникающие при изготовлении и эксплуатации. Электрический контакт с печатной платой обеспечивается так же, как и при монтаже чип-резисторов.

Основные преимущества керамических чип-конденсаторов:

- трёхслойные контактные поверхности с барьерным слоем никеля
- высококачественные диэлектрические материалы
- стойкость ко всем видам пайки.

Основные характеристики керамических конденсаторов приведены в таблице 3.

Характеристики диэлектрических материалов:

- NPO/COG — ультрастабильная керамика. Имеет очень малые потери при изменениях температуры и близкие к нулю эффекты старения. Обладает низкой диэлектрической проницаемостью
- X7R — высокая диэлектрическая проницаемость. Средние значения потерь при изменениях температуры и эффектов старения
- Z5U, Y5V — высокая диэлектрическая проницаемость.

Необходимо отметить, что развитие элементной базы для поверхностного монтажа характеризуется

следующими особенностями:

- дальнейшим повышением степени интеграции полупроводниковых БИС, СБИС с расширением их функциональных возможностей
- возрастающим разнообразием корпусов для поверхностного монтажа активных и пассивных компонентов
- появлением для БИС и СБИС корпусов с особо малыми расстояниями между выводами или контактами, число которых возрастает, а также конструкций с использованием технологии flip-chip, безвыводных корпусов и с выводами на нижней стороне корпуса
- разработкой и выпуском конструкций широкого ряда дискретных элементов (индуктивностей, трансформаторов, переключателей) для монтажа на поверхность ПП.

## II. Печатные платы

Переход от выводного монтажа к технологии поверхностного монтажа обеспечил уменьшение размеров ПП. При этом размеры плат определяются характеристиками материалов, из которых они изготавливаются, т. к. в процессе пайки электронных компонентов одновременно происходит нагрев плат. Кроме того, необходимость уменьшения размеров плат связана с технологической оснасткой и оборудованием для монтажа и пайки.

Конструкция ПП для поверхностного монтажа должна обеспечивать повышенную плотность монтажа (в среднем более восьми компонентов на 1 см<sup>2</sup>), ширину проводящих дорожек и расстояний между ними менее 0.2 мм, минимальную длину межсоединений, отсутствие навесных перемычек, монтаж компонентов с двух сторон, возможность более интенсивного теплоотвода, полную автоматизацию сборки и монтажа компонентов, а также контроль качества сборки.

Применение современных компонентов для поверхностного монтажа требует особых подходов к проектированию ПП при выборе конфигурации и размеров контактных площадок и соединительных проводников, а также допусков на изготовление ПП. Следует подчеркнуть, что изготовители в документации на пассивные и активные электронные компоненты обычно приводят рекомендации по размерам и расположению контактных площадок, а также способу пайки с указанием температурно-временной характеристики процесса.

Для изготовления ПП применяют различные органические и неорганические материалы. При этом со-

# ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ

**Научно-производственная фирма VD MAIS** предлагает услуги по проектированию и изготовлению печатных плат.

**Проектирование** производится по принципиальным схемам и техническим требованиям заказчика в САПР на базе программного пакета PCAD (версии 4.5, 8.5). Спроектированная печатная плата представляется в виде файла .PCB.

**Изготовление** выполняется по стандарту IPC-A-600E на производстве, сертифицированном по ISO 9002. Обеспечивается изготовление одно-, двусторонних и многослойных печатных плат 3...5 классов точности с современными токопроводящими и защитными покрытиями. Базовые материалы, используемые в производстве, имеют сертификат безопасности **UL**. При изготовлении все платы проходят электрическое тестирование.

**Объем заказа не ограничен**, срок выполнения заказа — от трех до пяти недель. Исходные данные предоставляются на дискете или по электронной почте. Доставка готовых печатных плат — экспресс-почтой UPS или DHL.

**В офисе фирмы VD MAIS** по телефону (044) 227-5281 или по электронной почте (**e-mail: zinchenko@vdmαι.kiev.ua**)

**Вы можете:** • ознакомиться с техническими характеристиками и образцами печатных плат

- узнать порядок представления исходных данных для проектирования и изготовления плат
- получить сведения о ценах и сроках выполнения заказа.

вершенствуются известные технологические процессы, а также появляются новые, позволяющие существенно снизить производственные затраты и улучшить качество ПП [4]: лазерное экспонирование рисунка на шаблонах или самих ПП, покрытых резистом; применение неудаляемых резистов, сухих (например, терромагнитных) резистов, способствующих повышению производительности при получении рисунка металлизации на ПП.

При создании коммутационных проводников преобладают аддитивная и полуаддитивная технологии, однако, многие зарубежные фирмы используют и субтрактивную технологию, которая, как известно, требует применения фольгированных диэлектрических материалов, позволяющих получить минимальную ширину проводящих дорожек 50-100 мкм.

Изготовление ПП с повышенной плотностью монтажа поставило ряд задач, главными из которых являются:

- согласование по температурному коэффициенту расширения платы и монтируемых на ней электронных компонентов
- обеспечение теплоотвода при повышенной рассеиваемой мощности
- оптимизация геометрии элементов коммутации с учетом специфики электронных компонентов, а также свойств применяемых припоев, защитных и клеевых материалов.

### III. Материалы для поверхностного монтажа

#### Паяльная паста

При подготовке ПП к монтажу на контактные площадки наносится паяльная паста. Выбор паяльной пасты является важной задачей, поскольку она должна обладать клеящими свойствами, чтобы удерживать компоненты в требуемом положении, иметь хорошие характеристики текучести, т. е. с одной стороны хоро-

шо наноситься трафаретной печатью, а с другой — не растекаться за пределы контактной площадки. Кроме того, паяльная паста должна обеспечивать необходимые электрические характеристики и иметь фиксированный срок хранения.

Частицы припоя сферической формы обеспечивают наилучшую технологичность паяльной пасты при её нанесении, а также оптимальное поверхностное натяжение при хорошей адгезионной прочности паяемых материалов. Замечено, что силы поверхностного натяжения вызывают не только образование галтелей на контактных площадках при оплавлении припоя, но и создают крутящий момент в месте контакта вывода компонента с припоем, что приводит к смещению, а в отдельных случаях — и к смещению навесного компонента в процессе пайки [5]. Размер галтелей припоя становится критичнее с уменьшением размеров электронного компонента, поэтому массу порошка припоя в составе паяльной пасты необходимо регулировать так, чтобы размер галтели, например, для чип-элемента не превышал 2/3 его толщины. При этом обеспечивается равномерное распределение термических и механических напряжений в системе вывод компонента-припой-контактная площадка на плате. В противном случае возможны трещины в паяных соединениях, отслаивание выводов компонентов, их смещение и разворот [6].

Наличие инородных примесей в паяльной пасте или на границах раздела — паяльная паста-контактная площадка и паста-вывод компонента — затрудняет пайку и ухудшает воспроизводимость характеристик паяного соединения. Например, вследствие уменьшения смачиваемости припоем контактирующих поверхностей происходит образование шариков припоя. Это нередко бывает при высокой концентрации оксидов в зоне пайки. Устранить эффект образования

шариков можно либо введением в состав пасты специально выбранного флюса, либо изменением химического состава связующего материала.

Характеристики паяльных паст на примере паст фирмы AIM (США), особенности их использования и способы нанесения на контактные площадки плат подробно рассмотрены в [7].

#### Адгезивы

Адгезивы, или клеящие материалы, используются в основном для крепления навесных компонентов перед пайкой волной припоя, а также могут входить в состав паяльных паст.

При выборе материала адгезива, гарантирующего надёжность крепления навесного компонента, следует учитывать температуру отверждения адгезива, его долговечность, совместимость с припоем и флюсом, химическую инертность к ним и материалам конструкции навесного компонента, а также устойчивость к механическим и термическим напряжениям. Кроме того, адгезив не должен поглощать влагу или флюс, а также не должен создавать механические напряжения.

Для крепления ЭК на плату широкое применение получили клеи на основе эпоксидных смол, которые имеют довольно низкую температуру отверждения, малый уровень ионных загрязнений, малые деформации при сдвиге и большую прочность, чем припой.

Перспективными являются адгезивы, представляющие собой акрилатно-эпоксидную систему, отверждающуюся при воздействии ультрафиолетового излучения с последующей термообработкой в конвекционной печи или печи с инфракрасным (ИК) излучением в течение 3-5 мин при температуре 120-150 °С. Для нанесения адгезивов на печатные платы используют в основном три метода: трафаретную печать, дозированную подачу с помощью электропневматического дозатора, а также метод переноса капли клея.

#### Защитные покрытия

Для обеспечения защиты смонтированного печатного узла от климатических воздействий при его эксплуатации используется лак.

Дозированное нанесение материалов припоя, высокая плотность монтажа, пайка с общим нагревом электронных компонентов и платы, а также другие особенности поверхностного монтажа вызывают повышение требований к материалам защитных покрытий, например, к их механическим и антикоррозионным свойствам. Кроме того, такие защитные покрытия не должны содержать легко испаряющиеся компоненты.

Тепловые свойства и характерные особенности защитных покрытий можно рассмотреть на примере защитного лака SCC3 марки DCA200H/DCA05L фирмы Electrolube, поставляемого VD MAIS. Данный лак — гибкое прозрачное покрытие из модифицированного полимера. Имеет следующие характерные особенности:

- хорошие адгезионные свойства в любых климатических условиях, включая большие высоты и декомпрессию
- устойчив к большинству растворителей, смазочных материалов и хладагентов
- устойчив к плесневым грибкам и воздействию ультрафиолетового излучения, к продолжительному воздействию тропического климата и соляного тумана
- диапазон эксплуатационных температур от -70 до 200 °С
- имеет глянцевую высокопрочную поверхность и чистый бледно-соломенный цвет
- обладает хорошими диэлектрическими свойствами на различных частотах при толщине покрытия от 25 до 50 мкм
- имеет флуоресцентное свечение под воздействием ультрафиолетового излучения, что облегчает контроль состояния покрытия на однородность и отсутствие дефектов
- обеспечивает прожигание паяльником без выделения токсичных газов типа изоцианатов
- при контакте с цинком и кадмием не вызывает их коррозии (не содержит фенол)
- вязкость при 20 °С 165-215 сантипуаз
- электрическая прочность 90 кВ/мм
- электрическое сопротивление  $1 \times 10^{15}$  Ом/см
- негорюч.

Нанесение лака на ПУ производится кистью, погружением или распылением. Толщина покрытия лака зависит от метода нанесения. Перед нанесением лака платы должны быть тщательно отмыты от флюса, это необходимо для обеспечения его максимально возможной адгезии. Следует отметить, что перечисленные свойства лака зависят от его термообработки. Перед термообработкой при температуре 90 °С в течение 24 часов лак должен быть просушен не менее двенадцати часов при комнатной температуре, что необходимо для полного испарения растворителя.

#### IV. Методы монтажа компонентов на поверхность плат

По мере освоения и внедрения в производство аппаратуры поверхностного монтажа наметились три технологические схемы монтажа, отличающиеся размещением компонентов на плате:

- на одной или обеих сторонах устанавливаются только компоненты для поверхностного монтажа
- на верхней стороне устанавливаются компоненты для навесного и поверхностного монтажа; на нижней стороне — компоненты для поверхностного монтажа или сочетание компонентов для поверхностного и навесного монтажа, на этой стороне платы компоненты могут отсутствовать
- на верхней стороне только компоненты для навесного монтажа; на нижней — компоненты для поверхностного монтажа, большей частью пассивные (резисторы, конденсаторы).

До некоторых пор наиболее распространенным был последний вариант, что характерно для переходного периода в освоении поверхностного монтажа, поскольку изготовление печатных узлов со смешанным составом компонентов позволяет максимально использовать имеющееся оборудование, например, для пайки.

Однако расширение возможности приобретения различных компонентов, оборудования и материалов для поверхностного монтажа ускоряет процесс перехода к первому варианту технологической схемы монтажа.

**Пайка электронных компонентов на поверхность плат**

В настоящее время для пайки электронных компонентов на поверхность печатных плат используется пайка двойной волной припоя и методы пайки с расплавлением дозированного припоя. Методы пайки постоянно модернизируются, видоизменяются и совершенствуются.

**Пайка двойной волной припоя**

Характерным для пайки двойной волной припоя является различие параметров волн припоя, которые подбираются таким образом, чтобы первая волна — скоростная и турбулентная — обеспечивала полную смачиваемость и оплавление всех зон пайки на плате, а вторая — с меньшей скоростью истечения — удаляла излишки припоя, предотвращая образование наплывов и затекание припоя между компонентами. Данный метод пайки эффективен в крупносерийном производстве при монтаже на простые платы большого количества пассивных чип-элементов и активных элементов в корпусах типа SO, SOT и SOP.

**Пайка расплавлением дозированного припоя**

Перспективным методом пайки компонентов на поверхность ПП является пайка расплавлением дозированного припоя.

**Пайка с инфракрасным и конвекционным нагревом**

В случае применения паяльной пасты пайка элементов поверхностного монтажа осуществляется бесконтактным оплавлением пасты, нанесённой на контактные площадки под выводами элементов. Передача тепла к паяемым узлам осуществляется в основном с помощью инфракрасного излучения (при оплавлении

или инфракрасным нагревателем) или потока разогретого газа (при оплавлении потоком разогретого воздуха, инертного газа).

В серийном производстве пайку производят в автоматизированных печах. Упрощённая конструкция печи приведена на рис. 4. В качестве нагревателей при разных способах пайки используются инфракрасные нагреватели или системы форсунок, через которые подается разогретый воздух, азот или пары фторорганических соединений. Платы перемещаются через печь с помощью конвейерной ленты из нержавеющей стали (при оплавлении плат с односторонним монтажом) или транспортёром из нескольких параллельных цепей (при оплавлении плат с двусторонним монтажом). При движении плат через печь выдерживается график изменения температуры, приведённый на рис. 5. Перед оплавлением припоя плата выдерживается при постоянной температуре ниже точки оплавления для достижения теплового баланса и уменьшения напряжений в плате и компонентах.

Передача тепла ИК излучением по своей природе отличается от конвекционного переноса тепла гораздо большей скоростью. При этом для качественного проведения пайки важно знать длину волны ИК излучения, прозрачность среды, а также характер поведения паяльной пасты в условиях облучения. Обычно инфракрасную пайку ЭК на поверхность ПП проводят с использованием ИК излучения с длиной волны в диапазоне 1.2-2.5 мкм, в котором органические вещества прозрачны, что позволяет излучению проникать в глубину паяльной пасты, удалять из неё растворитель, не повреждая защитную паяльную маску.

При ИК пайке поглощающая способность нагреваемых ЭК должна быть постоянной, однако отмечено, что её величина зависит от состояния отражающей поверхности компонента [9]. Кроме того, недостатком ИК пайки является неравномерный нагрев платы и компонентов, который можно уменьшить, снизив скорость движения конвейера [10].

В отличие от ИК нагрева, конвекционный метод передачи тепла при пайке ЭК обеспечивает равномерный щадящий нагрев печатного узла, исключая появление теневых эффектов. Поэтому наиболее перспективным методом является пайка с использованием конвекционного нагрева.

Рассматривая особенности пайки электронных компонентов в печах, следует отметить, что при пайке одновременно с платой нагреваются установленные на ней компоненты, причём

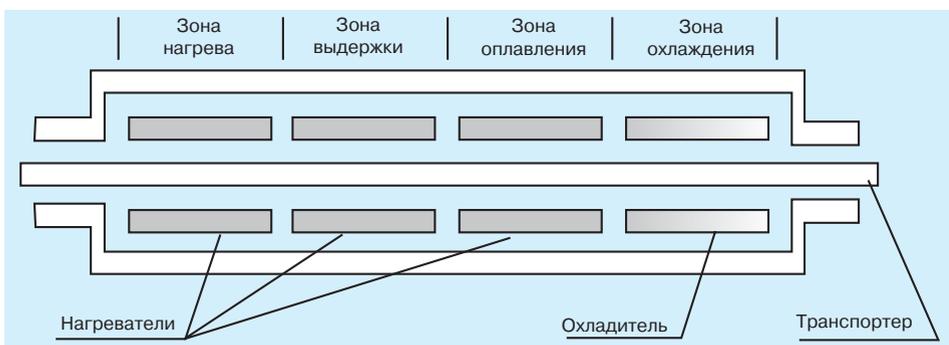


Рис. 4. Упрощенная конструкция печи для пайки печатных узлов

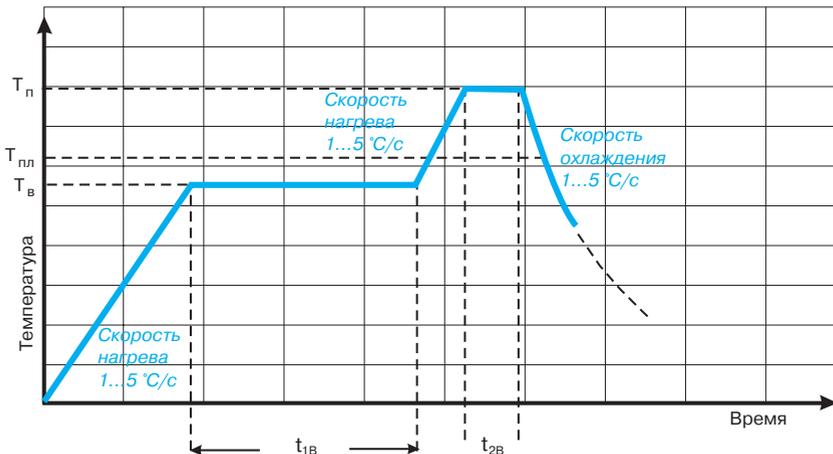


Рис. 5. Профиль изменения температуры для пайки печатного узла

Профиль изменения температуры для пайки печатной платы в печи:

$T_B = (150 \dots 160) \text{ } ^\circ\text{C}$  — температура выдержки для прогрева платы

$T_{пл} = (180 \dots 200) \text{ } ^\circ\text{C}$  — температура плавления припоя

$T_{п} = (215 \dots 280) \text{ } ^\circ\text{C}$  — пиковая температура в зоне оплавления припоя

$t_{1B} \gg 60 \text{ с}$  — время выдержки

$t_{2B} \gg 10 \text{ с}$  — время воздействия пиковой температуры

из-за относительно высокой скорости нагрева внутри компонентов создаётся неоднородное распределение температуры, вызывающее механические напряжения, которые могут разрушить компонент. Разрушение компонентов является одной из причин брака при пайке методом оплавления припоя в печах.

Уменьшить количество разрушенных при пайке компонентов путём снижения скорости нагрева не удаётся в связи с тем, что при этом внутренние напряжения возникнут из-за того, что компоненты имеют сложную структуру и состоят из материалов с разными коэффициентами температурного расширения. С этой точки зрения более выгодными являются быстрые нагрев и охлаждение, поскольку в этом случае внутри компонента температура не успевает подняться. Поэтому очень важным является строгое соблюдение рекомендуемого паспорта на компонент режима пайки.

Другая причина брака кроется в физических и химических процессах, протекающих в месте пайки. Прочное паяное соединение — вывод электронного компонента-контактная площадка на плате — образуется тогда, когда на границе раздела двух материалов (например, меди и оловянно-свинцового припоя) происходит взаимная диффузия атомов металлов. Чтобы создать условия для диффузии, прежде всего необходимо смачива-

ние припоем поверхности металла. Для этого металл при пайке покрывают флюсом и нагревают до температуры выше точки плавления припоя. При нагревании флюс переходит в жидкое состояние и растворяет загрязнение и окислы на поверхности металла, затем жидкий припой силой поверхностного натяжения распределяется по чистой поверхности металла.

Скорость распределения припоя по выводу компонента и контактной площадке на плате определяется не только состоянием их поверхностей (окислены ли они, загрязнены или нет), но и свойствами используемого флюса (умеренно активного, активного или очень активного), а также качеством самого припоя. Стабильность точки плавления припоя и его текучесть при нагреве выше этой точки в значительной мере определяются точностью поддержания состава припоя и содержанием в нём примесей. В современных технологиях пайки электронных компонентов на поверхность плат используют только высококачественные припои с составом, контролируемым с высокой точностью (например, американской фирмы AIM). Эти припои даже при небольшом превышении температуры над точкой плавления имеют высокую текучесть по металлу. Таким образом формируется граница взаимодействия металла и припоя, на которой образуется слой сплава из всех взаимодействующих металлов. Толщина этого слоя и его структура зависят от температуры и времени пайки. В свою очередь, прочность паяного соединения зависит от толщины и состава слоя нового сплава. В частности, если при пайке температура незначительно превышает точку плавления припоя, диффузия происходит медленно и за время пайки слой нового сплава не успевает образоваться. Такое "холодное" паяное соединение отличается низкой механической прочностью.

Если пайку производить при высокой температуре и длительное время, то на границе взаимодействия образуется относи-

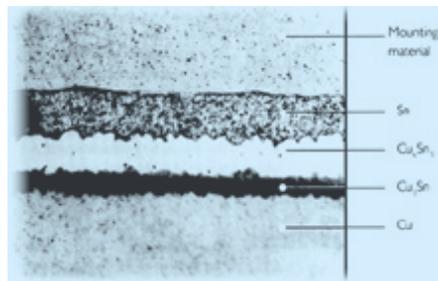


Рис. 6. Кристаллы интерметаллических соединений в припое



Рис. 7. Структура паяного соединения после длительной пайки с перегревом

тельно толстый слой, насыщенный кристаллами интерметаллических соединений меди (рис. 6, 7) и обладающий высокой хрупкостью. При термоциклировании печатного узла, воздействию на него вибрации и ударов такое паяное соединение быстро разрушается.

Есть и другие причины, которые делают высокотемпературную пайку нежелательной. Чем выше температура пайки, тем больше механические напряжения, вызванные различием температурных коэффициентов расширения платы и компонентов. В начале кристаллизации припоя имеет малую прочность и механические напряжения могут легко разрушить паяное соединение при остывании платы. Такие дефекты пайки характерны для компонентов в корпусах типов Chip, MELF и шариковых выводов компонентов в корпусах типа CSP. Длительная высокотемпературная пайка таких компонентов нежелательна также по другой причине. Эти компоненты имеют тонкий слой металлизации, которая может растворяться в припое при пайке. Следовательно, существует оптимум по температуре и длительности процесса пайки, обеспечивающий формирование паяного соединения максимальной прочности.

Согласно исследованиям паяное соединение максимальной прочности формируется при перегреве припоя на 50-70 °С относительно точки плавления и длительности процесса пайки 1-2 с.

#### У. Оборудование для монтажа ЭК на поверхность ПП в условиях мелкосерийного, серийного и крупносерийного производства

Выбор оборудования для поверхностного монтажа проводится с учетом технологической схемы монтажа ЭК на ПП, количества активных и пассивных ЭК, класса точности и размеров ПП, требуемой производительности процесса и вида производства аппаратуры.

В данном разделе приводится перечень и характеристики различного оборудования для поверхностного монтажа, рекомендуемого и поставляемого НПФ VD MAIS, обеспечивающей его запуск, гарантийное и послегарантийное обслуживание.

#### Высоконадёжный ручной монтаж и демонтаж электронных компонентов

В условиях малосерийного производства пайку компонентов в корпусах всех типов можно выполнять с использованием специализированных паяльных станций, например, фирмы PACE (США).

В отличие от ранее выпускавшихся и используемых в производстве паяльных устройств, паяльные станции фирмы PACE содержат блок управления температурой, который позволяет поддерживать стабильной температуру рабочей части наконечника паяльника и проводить пайку электронных компонентов на плату с локализацией нагрева зоны соединения, что ускоряет процесс пайки и обеспечивает образование паяных соединений без нагрева компонентов и платы.

Кроме того, достаточный запас мощности паяльного устройства в процессе пайки обеспечивает мгновенную «подкачку» тепла в зону пайки и поддержание стабильной температуры расплава припоя, несмотря на отвод тепла в соединяемые элементы.

При такой пайке компоненты не нагреваются так сильно, как в печи, и, благодаря контактной теплопередаче, обеспечивается оптимальный по времени и температуре режим пайки компонентов.

#### Паяльные станции с контактным нагревом

Паяльные станции с контактным нагревом, выпускаемые фирмой PACE (США) и поставляемые НПФ VD MAIS, могут комплектоваться универсальным паяльником и/или специализированным термоинструментом пяти типов. К термоинструменту выпускается широкая гамма легкозаменяемых наконечников с износостойким покрытием. Эти наконечники позволяют повысить производительность монтажа компонентов в отверстия и на поверхность печатных плат. При выполнении ремонтных работ эти наконечники позволяют демонтировать компоненты без повреждения печатных плат и самих компонентов. В состав базового комплекта паяльных станций входит штатный термоинструмент с наконечником одного типа.

Станции выпускаются в двух модификациях: с аналоговой и цифровой системой управления. Станции с аналоговой системой управления имеют минимальную стоимость, с цифровой — отличаются повышенной точностью и наличием ряда дополнительных функций:

- автоматического снижения температуры жала паяльника при перерывах в пайке
- автоматического отключения паяльника при длительных перерывах в пайке
- защиты паролем от несанкционированной смены режима пайки.

Ряд паяльных станций комплектуется встроенной системой нагнетания и откачки воздуха. Эта система обеспечивает функционирование такого ручного термоинструмента как термоотсос (ручной паяльник с пневматическим отсосом для удаления расплавленного припоя), термоэкстрактор, минитермофен и отличается низким уровнем шума. Система откачки через 1.2 с после включения обеспечивает разрежение, необходимое для работы термоотсоса.

Система нагнетания воздуха обеспечивает функционирование ручного минитермофена. Этот минитермофен позволяет выполнять простые операции монтажа и демонтажа компонентов потоком горячего воздуха.

Одноканальные паяльные станции ST25 и ST45 (рис. 8) предназначены для выполнения пайки и несложных ремонтных работ. Станции комплектуются универсальным паяльником PS-80, к которому поставляется 100 наконечников. Станции могут доукомплек-

товываться термопинцетом ТТ-65, предназначенным для выполнения расширенного набора операций и демонтажа SMD компонентов. Паяльная станция ST25 снабжена аналоговой системой управления, ST45 — цифровой.

Паяльные станции ST25 и ST45 получили широкое распространение на производстве и в сервисных службах, благодаря возможности выполнения пайки ИС в различных корпусах с помощью наконечника «миниволна», а также использования одного и того же паяльника PS80 как для пайки на платы термочувствительных компонентов, так и силовых компонентов с повышенной теплоёмкостью.

#### Паяльные станции MBT201 и MBT250

Трёхканальные паяльные станции MBT201 и MBT250 (рис. 9 и 10) широко используются в сервисных центрах по ремонту аппаратуры. Эти станции оснащены микропроцессорными системами управления. Каждая из станций обеспечивает одновременную работу трёх ручных паяльников системы SensaTemp, оснащённых набором наконечников для монтажа и ремонта печатных плат с устанавливаемыми в отверстия и на поверхность компонентами. Станции рассчитаны на напряжение питания 220 В переменного тока и потребляют от сети мощность 212 ВА. Габариты станций: 135(В)×165(Ш)×260(Г) мм.

В состав паяльных станций входят:

- микропроцессорная система управления с клавиатурой и жидкокристаллическим индикатором
- вакуумный термоотсос с использованием эффекта пневмоудара для удаления припоя из отверстий и с поверхности платы
- откачивающая и нагнетающая воздушная



Рис. 8. Паяльные станции ST-25 (а) и ST-45 (б)



Рис. 9. Паяльная станция MBT201



Рис. 10. Трёхканальная паяльная станция MBT250

- а) система "QUIET FLO"
- комплект ручных паяльников (в состав станции MBT201 входят паяльники PS-80 и термоотсос/термоэкстрактор SX-80; в состав станции MBT250 входят паяльник PS-80, термоотсос/термоэкстрактор SX-80, термоэкстрактор TP-65 и термопинцет ТТ-65).

- б) Микропроцессорная система управления обеспечивает калибровку системы измерения температуры, установку режима стабилизации любого значения температуры в диапазоне от 38 до 482 °С, автоматическую компенсацию колебания температуры жала при пайке. Для исключения несанкционированного доступа смена режимов пайки может быть защищена паролем. Параметры настройки режимов хранятся в энергонезависимой памяти. Система управления автоматически уменьшает нагрев и затем отключает любой из паяльников, если им не пользовались в течение заданного интервала времени.

Автоматизированный вакуумный термоотсос за 100 мс удаляет припой из отверстий в толстых многослойных печатных платах, не повреждая их и не вызывая отслаивания контактных площадок. Необходимость повторного удаления припоя, дополнительной очистки наконечника или отверстия практически исключена. Откачивающая система в течение 1.2 с обеспечивает необходимое для очистки следующего отверстия разрежение воздуха.

Откачивающая и нагнетающая воздушная система работает с

## ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ

низким шумом, быстро подключается к паяльнику и отключается от него, может использоваться с термоотсосом, термоэкстрактом или термофеном.

Паяльники и наконечники к ним (рис. 11) поставляются отдельно, могут подключаться к любым паяльным станциям и предназначены для изменения комплектации в соответствии с потребностями производства. Конструктивное исполнение паяльников обеспечивает возможность оперативной смены наконечников. При установке в паяльник холодного наконечника его разогрев до рабочей температуры происходит за 10-15 с.

Для пайки монтируемых на поверхность компонентов разработаны паяльные наконечники типа "Mini-Wave". Они обеспечивают квазиоптимальный режим пайки с минимальным временем воздействия высокой температуры на выводы компонентов и контактные площадки плат. Эти наконечники имеют на жале эллипсоидальную полость, служащую резервуаром для расплавленного припоя. Пайка таким жалом осуществляется путём его перемещения вдоль ряда выводов микросхемы, как показано на рис. 12.

Микросхемы и контактных площадок платы касает-

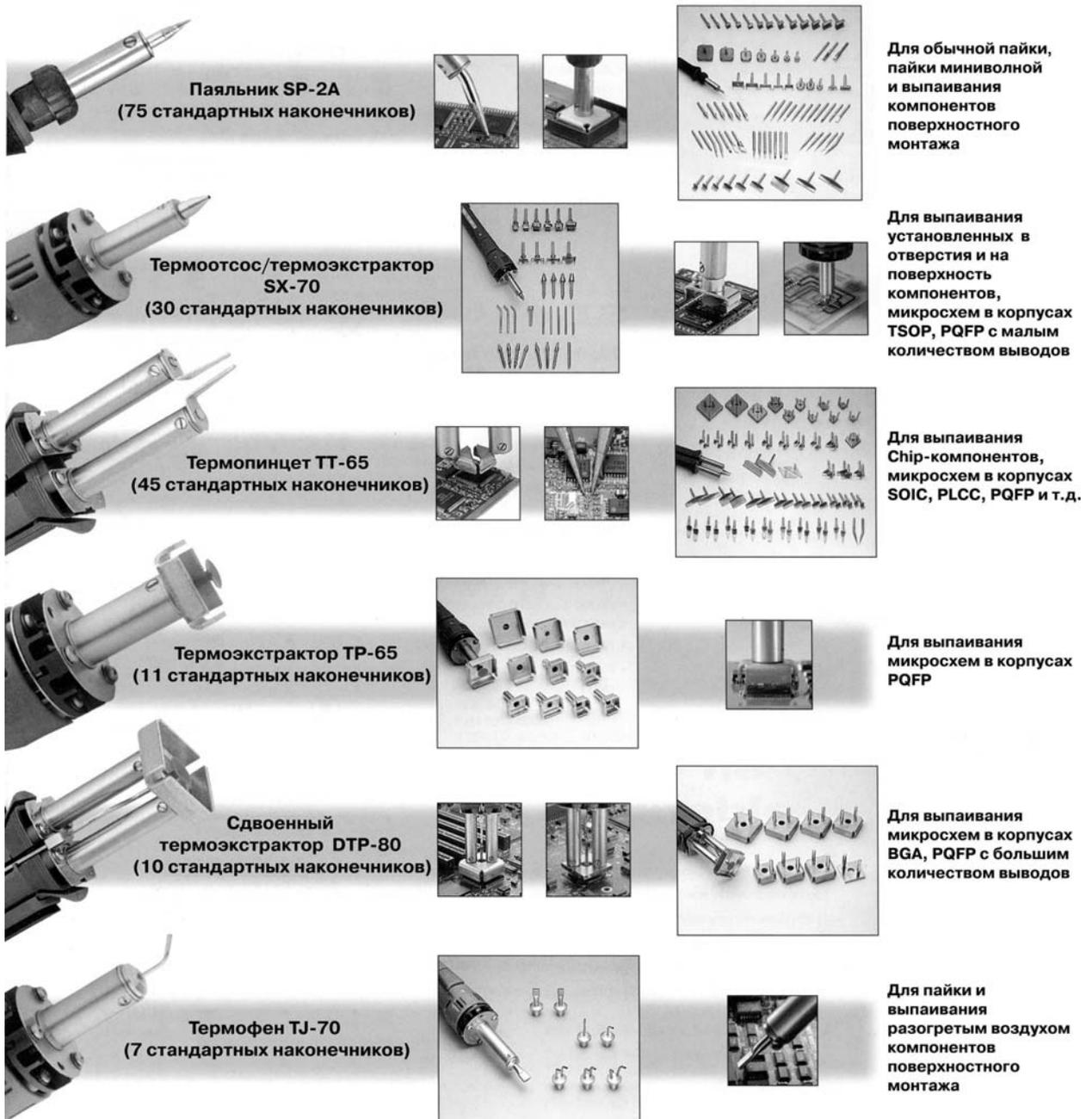


Рис. 11. Паяльники фирмы PACE и наконечники для них

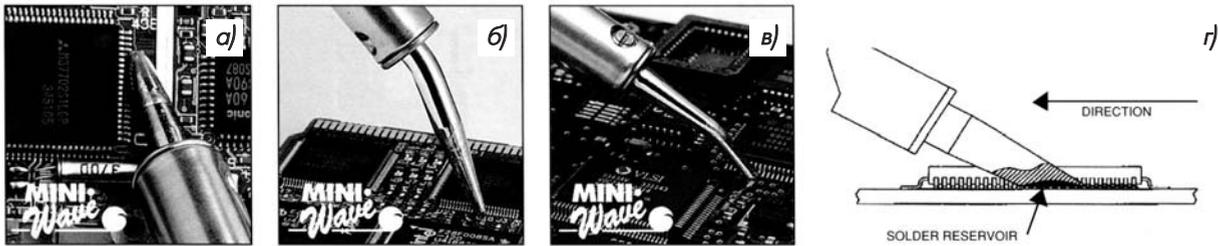


Рис. 12. Паяльные наконечники типа "Mini-Wave": стандартный (а), для пайки микросхем с малым шагом расположения выводов (б), изогнутый (в); способ доставки припоя в место пайки (г)

ся только припой, находящийся в эллипсоидальной полости, а длительность теплового воздействия определяется размерами этой полости и скоростью движения жала. В место пайки каждого вывода попадает строго дозированная порция припоя, что исключает образование паразитных перемычек между выводами.

#### Конвекционная система TF700

Конвекционная система TF700 (рис. 13) обеспечивает:

- конвекционную пайку электронных компонентов в различных корпусах (в том числе BGA) в температурном режиме, строго соответствующем требованиям фирм-изготовителей компонентов
- программирование и отработку многозонного температурного профиля
- управление скоростью нагрева и охлаждения за счёт изменения интенсивности воздушного потока
- автоматический вакуумный захват компонентов
- не повреждающий демонтаж и повторный монтаж электронных компонентов на поверхность печатных плат.

Технические характеристики:

- максимальный размер печатных плат, мм 510×460
- температура воздуха, °С 93 ... 427
- максимальный расход воздуха, л/мин 25
- максимальный размер компонента, мм 51
- габариты (В×Ш×Г), мм 425×423×533.

Система оснащена координатным столиком для точного перемещения печатной платы под

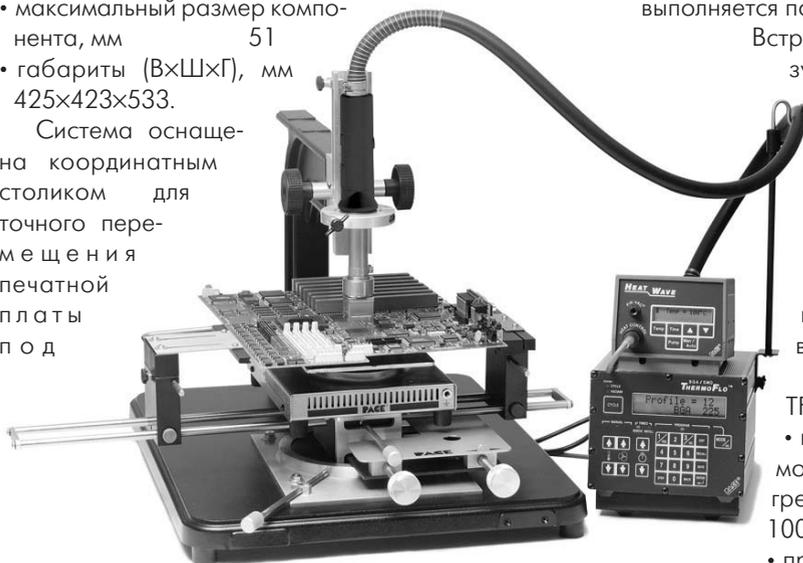


Рис. 13. Конвекционная система TF700

термофеном и системой предварительного нагрева платы.

#### Конвекционная система TF2000

Система TF2000 (рис. 14) обеспечивает монтаж и демонтаж любых монтируемых на поверхность компонентов, в том числе в корпусах PBGA, uBGA, CSP, Flip Chip с максимальным размером стороны корпуса до 50 мм. Пайка компонентов выполняется путём оплавления припоя потоком нагретого воздуха, подаваемого из термофена через специальные насадки. Высокую точность поддержания температуры воздуха обеспечивает замкнутая система регулирования. Установка компонентов на плату осуществляется с помощью автоматизированного вакуумного захвата. TF2000 имеет встроенные системы откачивания и нагнетания воздуха. Для минимизации тепловых напряжений при пайке система снабжена инфракрасным устройством предварительного нагрева плат с замкнутой системой регулирования температуры. Встроенный вентилятор обеспечивает охлаждение платы после пайки.

Система TF2000 комплектуется персональным компьютером или видеомонитором. Управление работой TF2000 осуществляется со встроенного пульта управления или компьютера. Операция пайки компонента выполняется под управлением программы.

Встроенная видеоконтрольная система визуализирует с высоким разрешением на видеомониторе или дисплее компьютера взаимное положение микросхемы и платы и обеспечивает точное совмещение выводов микросхемы с контактными площадками платы. Видеоконтрольная система не требует калибровки, что уменьшает производственные потери времени и снижает вероятность возникновения брака.

Основные параметры системы TF2000:

- нагрев платы со стороны монтажа (демонтажа) компонента осуществляется нагретым воздухом, диапазон температур от 100 до 500 °С
- предварительный нагрев платы выполняется инфракрасным излучением, размер

зоны нагрева 220×155 мм (по заказу поставляются нагреватели с зоной нагрева 470×340 мм), диапазон температур от 100 до 500 °С

- максимальные размеры платы 430×360 мм (по заказу поставляются держатели плат с размерами до 470×340 мм)
- питание 230 В, 50 Гц, потребляемая мощность не более 1600 ВА
- габариты 516×491×517 мм (Ш×В×Г)
- масса 66 кг.

Параметры системы управления TF2000:

- процесс пайки выполняется под управлением программы, которая создаётся на ПК или с помощью встроенных ЖК дисплея и клавиатуры
- устройство автономного управления хранит в памяти до 40 температурных профилей, в персональном компьютере может храниться любое количество профилей
- контроль отработки заданного профиля выполняется с помощью датчиков температуры на основе термопар, система имеет два входа для подключения термопар
- пользователь может создать требуемые температурные профили с помощью двух находящихся в постоянной памяти эталонных профилей.

Система предварительного нагрева TF2000:

- обеспечивает равномерное распределение температуры в зоне нагрева
- снабжена регулируемым прецизионным подпружиненным держателем платы
- имеет регулируемые концевые упоры, которые обеспечивают повторяемость установки плат
- обеспечивает выравнивание покоробленных плат.

Параметры видеоконтрольной системы TF2000:

- цветная телевизионная камера имеет 125-кратное увеличение, автоматическую фокусировку и двухскоростной трансфокатор
- выдвижной кожух защищает оптическую систему от загрязнения
- система осветителей обеспечивает независимую регулировку уровней освещённости компонента и платы.

#### Трафаретная печать

Оборудование трафаретной печати предназначено для нанесения паяльной пасты на ПП методом трафаретной печати через металлические или полимерные сетчатые трафареты. В отдельных случаях оборудование трафаретной печати используется для нанесения клея.

Рекомендуемым и поставляемым НПФ VD MAIS оборудованием для трафаретной печати (в условиях мелкосерийного производства) могут быть установки SDG255R и 60/60P, а также полуавтомат EPS-T, используемый в серийном производстве аппаратуры.

Устройство SDG-255R (рис. 15) предназначено для

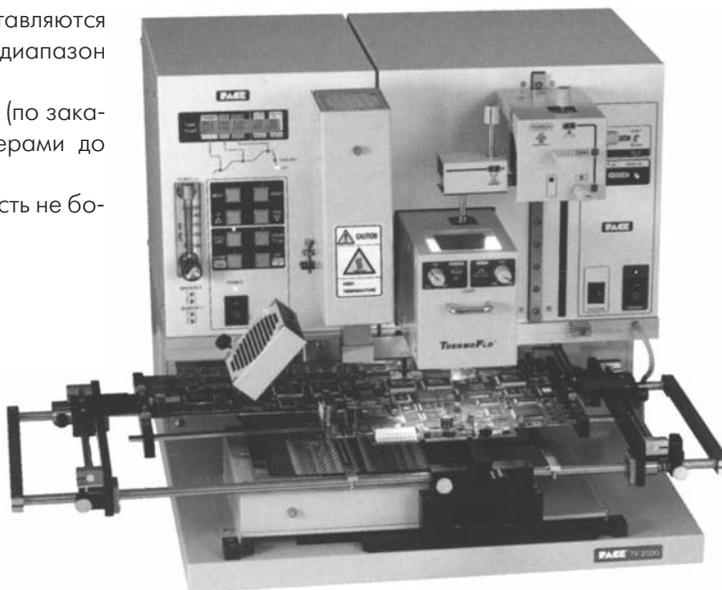


Рис. 14. Конвекционная система TF2000

нанесения паяльной пасты через металлические трафареты в условиях мелкосерийного производства. Размер рабочего поля устройства 165×235 мм, габариты устройства 260×400×80 мм. Совмещение рисунка трафарета с контактными площадками печатной платы производится с помощью микрометрических винтов отдельно по двум осям и углу, за счёт чего достигается высокая точность совмещения трафарета с печатной платой, необходимая при нанесении паяльной пасты для монтажа компонентов с малым шагом выводов.

Устройство HSM 60/60P (рис. 16) предназначено для нанесения паяльной пасты и клея через металлические трафареты в условиях мелкосерийного производства и отличается компактностью и лёгкостью юстировки трафарета относительно платы. Ракель равномерно прижимается к трафарету с помощью пневмоцилиндра. Перемещение ракеля осуществляется вруч-

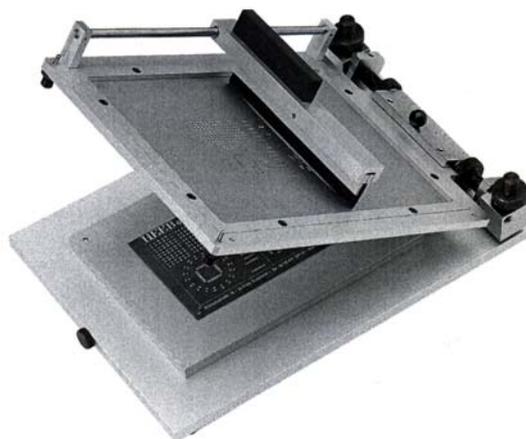


Рис. 15. Устройство трафаретной печати SDG-255R

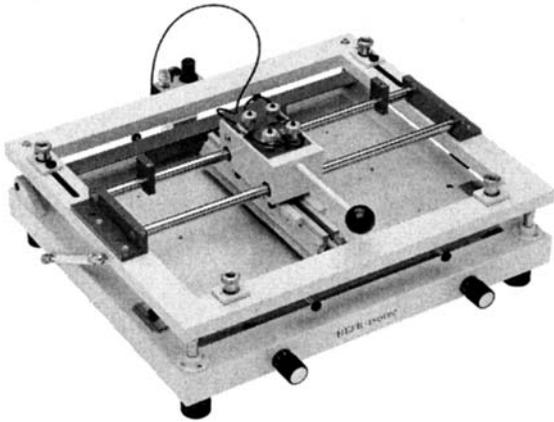


Рис. 16. Устройство трафаретной печати HSM60/60P

ную по двум цилиндрическим направляющим, снабжённым шарикоподшипниковыми муфтами. Размер рабочего поля устройства 250×380 или 380×380 мм, габариты устройства 750×750 мм, масса 60 кг. Для работы устройства необходим сжатый воздух давлением не менее 4 атм.

Полуавтоматическая установка EPS-T (рис. 17) предназначена для автоматического нанесения паяльной пасты, смена плат производится вручную. Печатная плата фиксируется вакуумным захватом, подъём и опускание трафарета с системой перемещения ракеля, полив пасты, прижим и перемещение ракеля производятся автоматически. Максимальное время цикла



Рис. 17. Полуавтоматическая установка трафаретной печати EPS-T

нанесения пасты на плату не превышает 6 с. Установка снабжена микрометрическими винтами для совмещения трафарета с платой по плоскости и угловому положению. В состав установки входит встроенная система нагнетания и откачки воздуха. Максимальный размер платы 300×350 мм (EPS-T300) или 500×500 мм (EPS-T500). Габариты установок (Д×Ш×В):

EPS-T300 — 1400×1000×1250, EPS-T500 — 1700×1200×1250 мм.

#### Дозирование

Оборудование дозирования предназначено для нанесения клея и паяльной пасты на ПП отдельными дозами. Электропневматические дозаторы могут встраиваться в оборудование для установки компонентов на печатные платы.

Рекомендовать к использованию в производстве можно дозаторы CMS-300 и CMS-900, которые поставляются НПФ VD MAIS.

Ручной дозатор CMS-300 (рис. 18) предназначен для нанесения флюса, паяльной пасты, клея или других вязких материалов при ремонте и мелкосерийном производстве печатных плат. Конструктивно дозатор выполнен в виде настольного блока и содержит встроен-



Рис. 18. Дозатор CMS-300



Рис. 19. Дозатор CMS-900



Рис. 20. Автомат дозирования DP50V

енный компрессор. Габариты дозатора 200×180×90 мм.

Дозатор с вакуумным пинцетом CMS-900 (рис. 19) предназначен для ручного нанесения флюса, паяльной пасты, клея или других вязких материалов, а также установки компонентов при ремонте и в мелкосерийном производстве печатных плат. Конструктивно дозатор выполнен в виде настольного блока и содержит встроенную систему нагнетания и откачки воздуха. Габариты устройства 250×180×90 мм.

Высокопроизводительный автомат дозирования DP50V фирмы Samsung (рис. 20) предназначен для высококачественного нанесения клея или паяльной пасты в условиях серийного производства. DP50V рассчитан на одновременную работу с автоматом установки компонентов на плату, для чего может комплектоваться автоматическим конвейером с различной направленностью движения и регулировкой ширины транспортера.

Автомат снабжён системой технического зрения для автоматической коррекции и лазерным сенсором для контроля доз. Основные параметры автомата:

- скорость дозирования

до 40 000 доз в час

- точность установки дозируемого материала ±0.1 мм
- габариты автомата 1520×1385×1300 мм
- потребляемая мощность 2.5 кВА
- вес 1300 кг.

#### Установка компонентов на ПП

В мелкосерийном производстве для ручной установки электронных компонентов на поверхность плат используются манипуляторы начального уровня. Простая, удобная и надёжная в работе модульная конструкция манипулятора позволяет пользователю наиболее удобным для него образом компоновать оборудование и осуществлять быструю его переналадку при переходе с одного типа печатного узла на другой [11].

Устройство CMS-100TF для ручной установки компонентов позволяет сконфигурировать рабочее место монтажника. Устройство (рис. 21) отличается модульным принципом построения, простотой конструкции, небольшими габаритами и низкой стоимостью. В зависимости от конкретных потребностей производства устройство комплектуется набором питателей (из ленты, кассет, россыпи), необходимым манипулятором с вакуумным пинцетом и дозатором, системой нагнетания и откачки воздуха. Максимальный размер печатных плат 250×320 мм, зона перемещения манипулятора 700×500 мм, габариты устройства 1150×560×180 мм. Производительность устройства 150 ... 300 компонентов в час.

В серийном производстве последовательную установку ЭК на жёстко фиксированные или подвижные печатные платы осуществляют автоматы типа "pick and place". Их отличительная особенность — повышенная универсальность компоновки ПП, возможность монтажа любых компонентов.

Рекомендуемыми и поставляемыми НПФ VD MAIS автоматами для установки компонентов на поверхность ПП являются автоматы фирмы Samsung.

Автоматы CP20C/CV, CP45FV™, CP60L™ (рис. 22) построены по модульному принципу, имеют компьютерные системы управления, обеспечивают работу установочных головок и транспортных систем, а также взаимодействие систем центрирования, коррекции и



Рис. 21. Устройство CMS-100TF для ручной установки компонентов на плату

Таблица 4. Характеристики автоматов для установки ЭК

| Параметры                                   |      | Тип автомата              |                |                |                          |
|---|------|---------------------------|----------------|----------------|--------------------------|
|   |      | CP20C/CV                  | CP45F™         | CP45FV™        | CP60L™                   |
| Размеры печатных плат, мм                   | макс | 460×400×4                 | 460×400×4      | 460×400×4      | 500×400×4                |
|   | мин  | 50×5×0.4                  | 50×30×0.4      | 50×30×0.4      | 50×50×0.4                |
| Типы устанавливаемых компонентов            |      | SOP, QFP, chip            | QFP, BGA, chip | QFP, CSP, chip | SOP, QFP, BGA, CSP, chip |
| Время установки чип-компонента, с           |      | 0.37                      | 0.19           | 0.19           | 0.1                      |
| Ширина ленты питателей, мм                  |      | 8, 12, 16, 24, 32, 44, 56 |                |                |                          |
| Точность установки компонентов на плату, мм | chip | ±0.1                      | ±(0.08...0.1)  | ±(0.08...0.1)  | ±0.065                   |
|   | QFP  | ±(0.05...0.08)            | ±0.065         | ±0.04          | ±0.065                   |
| Габариты, мм                                |      | 1660×1540×1408            | 1660×1540×1408 | 1660×1540×1408 | 1700×1870×1470           |
| Масса, кг                                   |      | 1100                      | 1150           | 1150           | 2010                     |

опознания компонентов. Технологическая характеристика автоматов приведена в таблице 4.

#### Оборудование для пайки ЭК оплавлением доз припоя

Примером печей с конвекционным нагревом, поставляемых НПФ VD MAIS и предназначенных для выполнения групповой пайки с расплавлением дозированного припоя в воздушной среде или среде азота с автоматической отработкой теплового профиля пайки, служат п е ч и



Рис. 22. Автомат CP60L™



Рис. 23. Печи для конвекционной пайки

Таблица 5. Характеристики печей серии SM

| Тип печи  | Неконвейерная печь SM500 | Конвейерные печи |              |              |
|---|--------------------------|------------------|--------------|--------------|
|   |                          | SM1500           | SM2000       | SM3000       |
| Число зон (стадий) нагрева и охлаждения         | 4                        | 3                | 5            | 7            |
| Диапазон регулирования температуры нагрева, °C  | 100...299                | 80...320         |              |              |
| Макс. габариты платы, мм (длина×ширина×глубина) | 305×305×(-)              | (-)×305×35       |              | (-)×350×35   |
| Тип сети/напряжение, В/макс. ток фазы, А        | 1ф./220/13               | 1ф./ 220/32      | 3ф./ 380/16  | 3ф./ 380/16  |
| Габариты печи, мм (длина×ширина×глубина)        | 790×780×310              | 1500×780×295     | 2000×780×295 | 3000×780×295 |
| Масса печи, кг                                  | 40                       | 120              | 200          | 300          |

(рис. 23) серии SM фирмы Reddish Electronics (Великобритания).

Они имеют широкий спектр производительности и могут применяться в производстве с любым объемом выпуска продукции. Основные параметры печей приведены в табл. 5. Неконвейерная печь предназначена для изготовления опытных образцов и мелкосерийного выпуска печатных узлов. Конвейерные печи предназначены для производств со средним и большим объемом выпуска продукции. Скорость движения конвейера в этих печах варьируется в диапазоне от 7.7 до



Рис. 24. Конвейерная печь конвекционного оплавления начального уровня MISTRAL 260

68 см/с.

Используемый в печах метод принудительной конвекции воздуха или азота обеспечивает равномерный щадящий нагрев компонентов и платы и предотвращает возникновение теневых эффектов. Все печи имеют окна в верхней крышке, позволяющие наблюдать за ходом технологического процесса. В памяти контроллеров печей может храниться до 255 стандартных профилей пайки. Печи комплектуются системой измерения истинной температуры компонентов на печатной плате.

**Конвейерная печь конвекционного оплавления MISTRAL 260**

Печь конвекционного оплавления MISTRAL 260 (рис. 24) имеет три температурные зоны: две зоны предварительного подогрева и одну — оплавления. Регулировка температуры в каждой зоне осуществляется отдельно с помощью удобной панели управления, причём для каждой зоны имеется индикация температуры как устанавливаемой, так и действительной.

Печь конструктивно выполнена в настольном варианте и имеет конвейерную систему с регулировкой скорости. Печь поставляется с термопарами для измерения температуры на поверхности плат и последовательным портом для связи с компьютером, что позволяет контролировать процессы пайки. При-

менение данной печи в мелкосерийном производстве позволяет значительно повысить качество изготавливаемых изделий по сравнению с ручной пайкой, а следовательно и их конкурентоспособность.

- Основные технические характеристики MISTRAL 260:
- длина рабочей зоны 860 мм
  - скорость конвейера 10-120 см/мин
  - максимальная ширина печатной платы 265 мм.

**Конвейерная печь конвекционного оплавления MISTRAL 360**

Четырёхзонная конвейерная печь конвекционного оплавления припоя MISTRAL 360 (рис. 25) предназначена для использования в условиях серийного производства. Она имеет три температурные зоны предварительного подогрева и одну температурную зону пайки. Конвейерная система с регулировкой скорости обеспечивает плавное перемещение печатных плат.

Печь может поставляться в настольном исполнении или на станине, оснащена системой управления на основе персонального компьютера. Компьютерная система управления позволяет гибко изменять параметры процесса с возможностью графического отображения профилей. Дополнительные термопары позволяют при необходимости измерить температуру в отдельных точках на поверхности печатных плат.

- Основные технические характеристики MISTRAL 360:
- длина рабочей зоны 1400 мм
  - скорость конвейера 10-120 см/мин
  - максимальная ширина печатной платы 365 мм
  - пайка — принудительной конвекцией.

Для конвекционной пайки электронных компонентов в условиях серийного и крупносерийного производства НПФ VD MAIS поставляются конвейерные печи RF2062C, RF2082C (рис. 26) и RF20102C фирмы Samsung. Печи поставляются на станине с сетчатым или цепным конвейером. Пара-



Рис. 25. Конвейерная печь конвекционного оплавления MISTRAL 360

метры техпроцесса пайки в печах контролируются встроенным микропроцессором и выводятся на дисплей пульта управления. Печи имеют соответственно 6, 8 и 10 зон на-

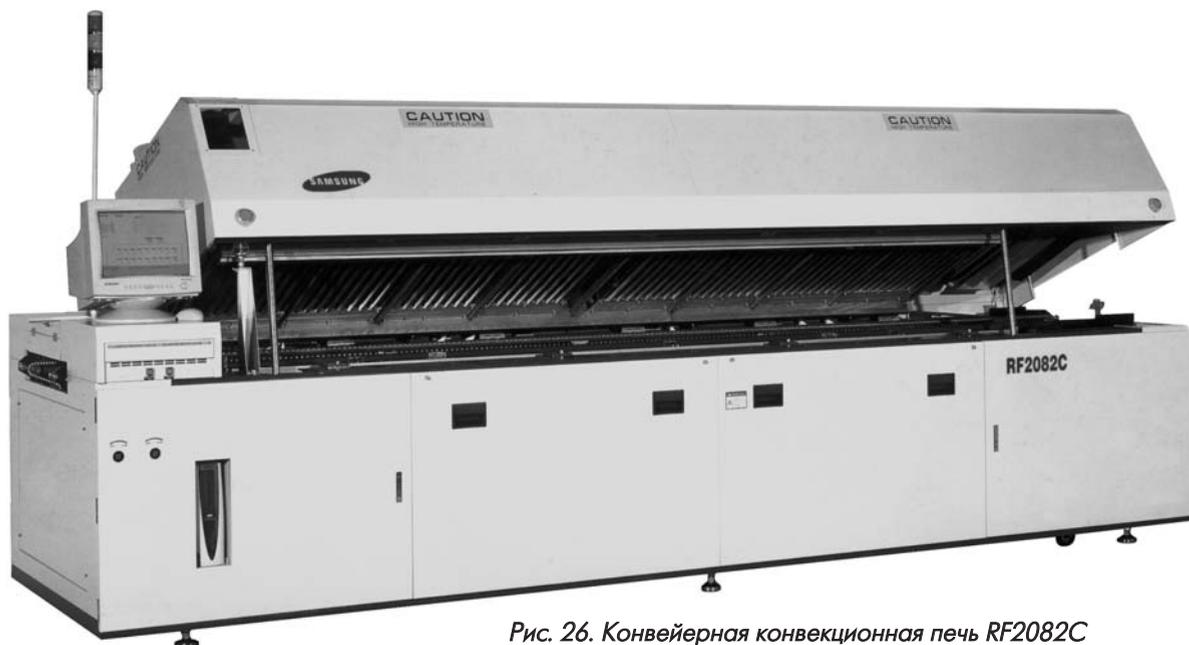


Рис. 26. Конвейерная конвекционная печь RF2082C

Таблица 6. Характеристики печей для групповой пайки

| Наименование параметра             | Тип печи       |                |                |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                    | RF2062C        | RF2082C        | RF20102C       |
| Количество зон                     | 6              | 8              | 10             |
| Потребл. мощн., кВА                | 35             | 43             | 51             |
| Потребляемый ток, А                | 105            | 125            | 145            |
| Скорость нагнетания воздуха, м/с   | 0.5 - 4        |                |                |
| Скорость движения конвейера, м/мин | 0.3 - 1.6      |                |                |
| Габариты, мм                       | 3530×1200×1420 | 4250×1200×1450 | 4970×1200×1420 |
| Масса, кг                          | 1400           | 1500           | 1600           |

грева с отдельной конвекцией в каждой зоне. Технические характеристики печей приведены в таблице 6.

Таким образом, представленные материалы свидетельствуют о том, что появление новых ЭК и ПП создало предпосылки к разработке и широкому внедрению в производство новых методов монтажа компонентов на поверхность плат, которые позволяют собрать большое количество компонентов на ПП меньшей площади, чем при монтаже в отверстия.

Дальнейшее развитие элементной базы для поверхностного монтажа направлено на размещение БИС и СБИС в корпусах BGA и CSP, а также на создание новых конструкций пассивных элементов для поверхностного монтажа, что коренным образом изменит облик аппаратуры и во многом будет определять её характеристики.

Представленное профессиональное оборудование американской фирмы PACE обеспечивает надёжный качественный ручной монтаж ЭК на поверхность ПП в мелкосерийном производстве.

При монтаже ЭК на поверхность ПП в условиях серийного производства лучшие результаты могут быть получены в случае использования автоматизированного оборудования и групповых методов пайки дозированием припоя в конвекционных печах.

Рассмотренное и поставляемое НПФ VD MAIS современное зарубежное оборудование и материалы позволяют выпускать аппаратуру с использованием технологии поверхностного монтажа в мелкосерийном и серийном производстве.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Грачев А. А., Шайденко Н. П., Рывкин Е. М. Монтаж элементов на поверхность печатных плат при сборке РЭА. Обзоры по электронной технике, серия 7. Технология, организация производства и оборудование, выпуск 5 (1183) // ЦНИИ "Электроника", 1986.
2. Грачев А. А., Галушка А. И., Кошевой Б. Ф., Шайденко Н. П. Монтаж микрокорпусов интегральных схем на плату. Обзоры по электронной технике, серия 7. Технология, организация производства и оборудование, выпуск 4 (1005), ЦНИИ "Электроника", 1984.
3. Ермолович А. Корпуса микросхем и поверхностный монтаж // ЭКиС. — Киев: VD MAIS, 1998, 8.
4. Грачев Л. А., Ерошенко Р. А. Задачи совершенствования технологии печатных плат // Электронная техника, серия 7, выпуск 6 (127), 1984.
5. Грачев А. А., Черевко Н. В., Сагайдачная Т. В. Формирование паяных соединений при монтаже

## VD MAIS 8 ЛЕТ

Уважаемые читатели ЭКиС, партнеры и клиенты VD MAIS, в декабре 2001 года учредителю и издателю нашего журнала, фирме VD MAIS, исполнилось 8 лет.

Возраст не юбилейный, но об итогах деятельности фирмы за первый год нового тысячелетия хочется Вам рассказать. С 2001 года, в дополнение к прямым поставкам продукции более чем двадцати фирм, выполняются прямые поставки изделий фирм Portwell, Nameg, Microtips, Wago. Будучи в 2000 году дистрибьютором 23 фирм, в 2001 VD MAIS стала дистрибьютором еще двух — Murata и Charleswater.

Самыми важными показателями деятельности VD MAIS являются востребованность ее услуг на украинском рынке и сохранение доверия клиентов. Мы с удовлетворением можем сказать, что не только сохранили своих постоянных клиентов, но и увеличили их число. Это результат повседневной работы каждого сотрудника фирмы и стремления четко выполнять взятые на себя обязательства.

Появление новых клиентов связано и с расширением сферы услуг. Так к новым услугам относятся поставки запасных частей к офисной технике фирмы Hewlett-Packard, авторизированным реселлером которой в Украине стала фирма VD MAIS. Более 70 % запросов сервисных центров Украины по ремонту и обслуживанию офисной техники HP выполняется сразу же со склада VD MAIS в Киеве.

Для повышения оперативности работы с клиентами в дополнение к открытому два года назад представительству VD MAIS в Харькове в центрах наиболее развитых промышленных регионов Украины — Днепрпетровске и Донецке — открыты региональные представительства. Сокращение сроков поставки обеспечивается и введенной с 2001 года услугой размещения заказов через сеть Интернет на web-сайте VD MAIS.

Расширено направление разработки и изготовления печатных плат: выросло число заказчиков, количество видов изготавливаемых плат увеличилось вдвое. В пять раз возросло за 2001 год число заказов на выполнение сборки и монтажа печатных плат.

Поставляемое VD MAIS оборудование и материалы SMT находят все большее применение в возрождающейся электронной промышленности Украины, это

требует подготовки специалистов, владеющих технологией SMT. Внедрению поставляемого VD MAIS оборудования и материалов SMT во многом способствуют открытые фирмой в 2000 г. курсы по обучению технологии SMT. Выпускниками курсов за два года стали более 100 слушателей.

Расширена дилерская сеть и растет число клиентов в активно развивающемся направлении — поставках приборов Precision QID, предназначенных для измерения уровня глюкозы в крови. Их производителем является всемирно известная фирма Abbott-MediSense (США), официальным дистрибьютором которой в Украине является фирма VD MAIS.

Для ознакомления специалистов с новыми изделиями всемирно известных фирм-производителей высокоинтегрированных электронных устройств и компонентов и условиями их применения фирмой VD MAIS были проведены семинары с участием представителей фирм Analog Devices и Motorola, в каждом из которых приняли участие до 250 разработчиков и производителей отечественной аппаратуры. Причем к проведению семинара по продукции фирмы Analog Devices, были привлечены также отечественные ученые из НТУУ "КПИ". С их участием были проведены затем аналогичные семинары, организованные VD MAIS, в Харькове и Виннице. Опыт организации выездных семинаров, судя по активности их участников, подтвердил целесообразность информирования о новых достижениях в создании элементной базы специалистов "на местах", т. к. многие из них лишены возможности посещать киевские семинары и выставки.

В 2001 году фирма VD MAIS была участником тридцати международных и региональных выставок, в том числе шестнадцати, проходивших в разных городах Украины, и четырех — за ее пределами: в Санкт-Петербурге, Риге и Кишиневе.

Постоянный поиск новых методов и направлений сотрудничества с клиентами и партнерами, динамика роста VD MAIS, а также заметное оживление всех отраслей промышленности Украины настраивают на оптимистический лад, и мы верим, что 2002 год будет годом новых достижений!

### Внимание! Конкурс!

Редакция журнала «Электронные компоненты и системы» объявляет конкурс на лучшую разработку года в области вычислительной и измерительной техники, медицинской электроники, средств связи и систем управления, средств учета электроэнергии, расхода воды и тепла.

**Лучшие разработки будут отмечены ценными подарками и дипломами.**

Материалы на конкурс оформляются в виде статей объемом до двух страниц, включая иллюстрации, и направляются в редакцию в электронном виде (на дискете или по e-mail) для публикации в журнале ЭКиС. Операционная среда — Win95/98/2000. При подведении итогов конкурса будет учтено мнение читателей.