

Особенности организации тестирования ЭКБ в диапазоне температур

А. Белоус, чл.-корр. НАН Беларуси, д. т. н., профессор¹,
С. Ефименко, к. т. н., доцент², В. Смолич³

УДК 621.382 | ВАК 05.27.06

Для электронной аппаратуры важно обеспечивать работоспособность в широком диапазоне температур окружающей среды, которая определяется в первую очередь работоспособностью используемой электронной компонентной базы (ЭКБ). В статье приведены обзор и классификация оборудования для тестирования в серийном производстве микросхем и полупроводниковых приборов в диапазоне температур. Показано, что для тестирования могут применяться как автоматизированные, так и неавтоматизированные системы. Приведены основные характеристики различных серийно выпускаемых устройств для задания температур.

Микросхемы и полупроводниковые приборы должны быть работоспособными в достаточно широком диапазоне температур. Если для аппаратуры массового применения (коммерческой) этот диапазон составляет от -10 до 70 °С, для промышленной аппаратуры – от -20 (иногда указывают -40) до 85 °С, для автомобильной электроники – от -40 до 125 °С, то для аппаратуры специального применения и для космоса – от -60 до 125 °С (рис. 1). Для того чтобы гарантировать работоспособность микросхем в этом диапазоне температур, необходимо проводить их тестирование с использованием специального оборудования. Процесс тестирования обычно включает в себя проведение функционального контроля и проверки электрических параметров в соответствии с конструкторской документацией и техническими условиями на микросхему [1]. В серийном производстве особую важность приобретает производительность процесса тестирования, поскольку большая длительность тестирования может привести к росту себестоимости микросхем.

В общем случае для проведения тестирования микросхем в диапазоне температур в серийном производстве используется программно-аппаратный комплекс, состоящий из тестера или автоматизированной измерительной системы (АИС) с персональным компьютером (ПК) и устройства, обеспечивающего задание температуры с требуемой точностью (рис. 2).

ПК обеспечивает управление комплексом, разработку и отладку специальных измерительных программ. АИС обеспечивает процесс проведения функционального контроля и измерение электрических параметров микросхем. Количество тестов функционального контроля зависит от сложности микросхем – для сложно-функциональных микросхем программа функционального контроля может содержать сотни тысяч и даже миллионы тестов. От количества тестов в программе и частоты их следования

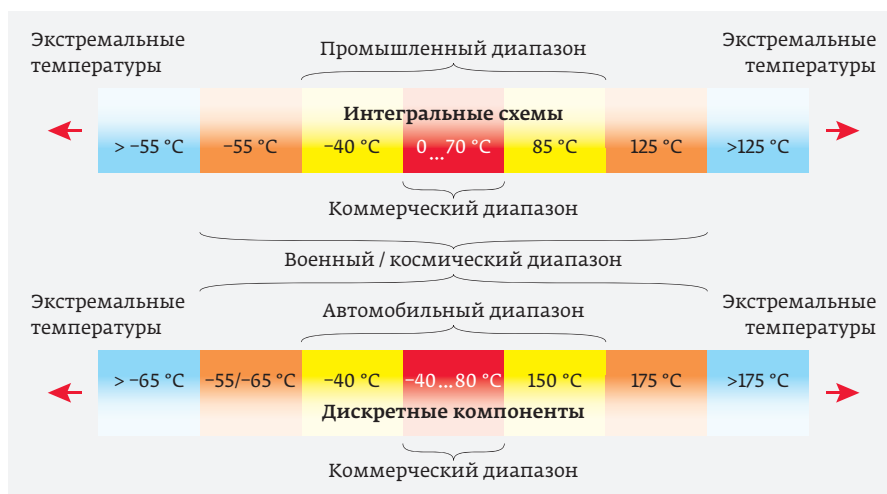


Рис. 1. Температурные диапазоны работоспособности ЭКБ

¹ ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», заместитель генерального директора по научно-техническим программам и научной работе. ABelous@integral.by.
² ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», главный конструктор. SEfimenko@integral.by.
³ ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ведущий инженер. VSmolich@integral.by.



Рис. 2. Типовой состав комплекса для проведения измерений микросхем в диапазоне температур [2, 8]

зависит общее время тестирования одной микросхемы, которое может составлять от долей секунды до десятков минут. В серийном производстве важно снижать длительность процессов тестирования, поскольку большое время тестирования увеличивает себестоимость и цену продукции.

В настоящее время в отечественном серийном производстве для тестирования ЭКБ в широком диапазоне температур используется большое количество АИС, которые работают в комплексе с проходными камерами и УИК.ИМ. Это как достаточно долго используемые АИС «Вахта», «Виадук», СИС 24, «Меандр 11», «Меандр 12», «Мезон», Icomat-200, Icomat-115, «Викинг», так и более современные АИС – «Дакота», «Декада», Formula 2K, Formula HF3M, Agilent 9300 и др. Такое разнообразие АИС обусловлено спецификой тестирования микросхем различного функционального назначения: БИС памяти, микропроцессоров и микроконтроллеров, цифровой логики, стабилизаторов напряжения, операционных усилителей и др.

Упрощенная классификация типов устройств для задания температур при тестировании микросхем приведена на рис. 3, а в табл. 1 – основные параметры этих устройств, для неавтоматизированных и автоматизированных устройств.

В качестве основных неавтоматизированных устройств здесь представлены два типа УИК.ИМ 1-019 (изготовитель АО «НПЦ «ЭлТест», Санкт-Петербург) и Thermojet (SP SCIENTIFIC, США).



Рис. 3. Классификация устройств для задания температур при тестировании микросхем

Все типы автоматизированных устройств разделены на три отдельные группы: проходные камеры, «простые» хендлеры и гравитационные хендлеры. Рассмотрим более подробно принцип работы и технические характеристики этих устройств.

НЕАВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАДАНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Устройство термостатирующее УИК.ИМ 1-19

В мелкосерийном производстве для тестирования микросхем в диапазоне температур обычно применяются устройства АО «НПЦ «ЭлТест» типа УИК.ИМ (рис. 4). Достоинство этих устройств – отсутствие длинных соединительных кабелей позволяет производить тестирование микросхем на частотах более 20 МГц.

Испытание изделий производится в термостате, который устанавливается на жесткое основание. Чувствительным элементом этого устройства является термометр сопротивления, расположенный непосредственно в испытательном объеме термостата. Повышенная температура в термостате достигается с помощью нагревателя, а пониженная температура обеспечивается подачей жидкого азота в термостат через трубчатый распылитель. Обогреватель обеспечивает температуру внешней обечайки термостата 20 °С во избежание выпадения на ней инея или росы и управляется термостатом [3].

Этот термостат может быть легко установлен или снят с основания, причем при снятии термостата с основания



Рис. 4. Устройство термостатирующее УИК.ИМ [3]

происходит автоматическое отключение систем подачи азота, питания электродвигателя и нагревателя.

Диапазон подаваемых температур устанавливается в пределах от -110 до 150 °С. Время достижения теплового режима составляет 10–20 мин. Расход жидкого азота – 4 кг/ч. Важное достоинство этого устройства – низкая стоимость, ориентировочная стоимость устройства составляет 10 тыс. долл.

Особенности устройства: возможность сопряжения с любыми типами АИС, проточная система охлаждения, параметрический контроль испытываемых микросхем, возможность проведения испытаний по самостоятельно задаваемым пользователем программам, отсутствие инея и росы на выводах контактных устройств и т. д. Тестирование высокочастотных микросхем в корпусах типа LCC целесообразно производить с использованием **УИК.ИМ** [3].

Недостаток таких устройств возможность одновременного тестирования только одной микросхемы, а также необходимость использования жидкого азота при тестировании на низкой температуре.

Устройства термостатирующие ThermoJet и Thermostream

Устройства термостатирующие или модуляторы окружающей среды **ThermoJet ES** (ThermoJet Environment Simulator) компании SP Scientific [4, 5] и **ATS-710-M Thermostream** компании Temptronic [6, 7] – это похожие по принципу действия системы задания температуры с контролируемой точностью. Они обеспечивают воздушный поток до 20 фут³/мин. (примерно 0,566 м³/мин) для быстрого изменения температуры тестируемого устройства с достаточно высокой точностью (рис. 5).

Эти устройства могут применяться для измерения высокочастотных микросхем ($f > 20$ МГц) и небольших объемов микросхем при мелкосерийном производстве. В них используется терморукав, что позволяет отказаться от длинных соединительных жгутов и обеспечивает контролируемый диапазон температур от -80 °С до 225 °С с точностью 0,5–1 °С. Следует отметить, что эти установки обеспечивают интенсивное изменение температуры даже в режиме 24/7 (24 часа, 7 дней в неделю) в циклах от 125 до -55 °С и от -55 до 125 °С. Эти устройства

характеризуются самым малым временем достижения (набора) требуемой температуры – 10–15 с.

Приобретение таких установок целесообразно в первую очередь для обеспечения измерения прецизионных и высокочастотных микросхем. Ориентировочная стоимость таких установок составляет 60 тыс. долл. (с компрессором).

Достоинством устройств термостатирующих ThermoJet и Thermostream является то, что они не требуют использования внешнего источника охлаждения, такого как жидкий диоксид углерода или азот, а используют стандартные, экологически чистые хладагенты. К тому же данные системы экономят затраты на техническое обслуживание [4–7].

Недостатком неавтоматизированных устройств является низкая производительность процесса тестирования, ограничивающая их использование в **крупносерийном производстве** микросхем и полупроводниковых приборов. Кроме того их производительность во многом зависит от индивидуальных особенностей и навыков человека-оператора. Автоматизировать процесс тестирования на крайних температурах возможно путем использования устройств термостатирующих ThermoJet ES и ATS-710-M Thermostream в комплекте с гравитационными хендлерами MH200 EVO / MH250 EVO, о чем будет сказано ниже.



Рис. 5. Устройства термостатирующие: а – ThermoJet ES компании SP Scientific; б – ATS-710-M Thermostream компании Temptronic

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАДАНИЯ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ МИКРОСХЕМ

Проходные камеры

Более производительными устройствами по сравнению с вышерассмотренными являются проходные камеры **ПКВ-1, ПКВ-2, ПКВ-2М, ПКВ-3, ПКВ-4, ПКВ-5**, поставляемые НИИПМ (г. Воронеж). Это новое поколение проходных камер, пришедшие на смену ранее выпускаемым ПК5003, ПК5005. Предназначены камеры для обеспечения измерения внешней АИС электрических параметров микросхем в спутниках-носителях при положительных и отрицательных температурах в диапазоне от -60 до 150 °С, сортировки их по группам годности. Отличаются камеры ПКВ друг от друга размерами используемых спутников-носителей 19×25 мм (ПКВ-1), 32×32 мм (ПКВ-2 и ПКВ-2М), 51×51 мм (ПКВ-3), 94×94 мм (ПКВ-4), 63×63 мм (ПКВ-5). Принцип действия камеры заключается в том, что испытуемые ИМС, помещенные в технологические спутники-носители, выдерживаются при заданной температуре определенное время, необходимое для установления теплового равновесия, затем поступают в контактирующее устройство, где осуществляется тестирование – проверка статических, динамических параметров и проведение функционального контроля. Выдержка ИМС в камере определяется временем транспортирования их от позиции загрузки к позиции контактирования. Время транспортирования определяется емкостью внутренней карусели и длительностью измерительного цикла [8].

По сравнению с ранее выпускаемыми камерами ПК5003, ПК5005 в камерах нового поколения ПКВ примерно в четыре раза уменьшено энергопотребление, и, за счет уменьшения габаритных размеров, сокращено в два раза время выхода на заданный температурный режим. Для работы камеры при отрицательных температурах необходимо подавать жидкий азот под давлением. Основные технические характеристики ПКВ приведены в табл. 1 [8], внешний вид проходных камер ПКВ-1, ПКВ-2, ПКВ-3 – на рис. 6 [8].

Недостатком проходных камер является наличие дополнительного жгута, что создает серьезные проблемы на высоких частотах.

Еще одним отечественным предприятием, выпускающим проходные камеры, является ЗАО «ПКК Миландр» (Зеленоград). **Проходная камера ЗАО «ПКК Миландр»** имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными, а именно – проходная камера ЗАО «ПКК Миландр»



Рис. 6. Проходные камеры: а – ПКВ-1; б – ПКВ-2; в – ПКВ-3

имеет более высокую точность поддержания заданной температуры во всем измеряемом диапазоне $\pm 1,5$ °С, меньший интервал времени достижения предельных температур – 20 мин., уменьшенный расход азота – 2 л/ч вместо 6 л/ч, большой срок эксплуатации без дополнительного обслуживания, а перемещение камеры не вызывает трудностей.

Технические характеристики и внешний вид проходной камеры представлены в табл. 1 и на рис. 7 [9].

Хендлеры

Хендлер (Handler) – манипулятор, специализированное устройство для сортировки микросхем по группам.

Хендлеры компаний Multitest, Exatron, Rasco, Microtec, Seiko-Epson, Chroma, JHT, Advantest и других используются для измерения микросхем при крайних температурах при наличии существенных объемов.



Рис. 7. Проходная камера «ПКК Миландр»



Рис. 8. Хендлер 3110

Кратко рассмотрим возможности и особенности хендлеров фирмы Chroma (Тайвань). Эта фирма выпускает целый ряд хендлеров – модели 3110, 3110-FT, 3111, 3160-С, 3180 [10]. Отличаются они производительностью и соответственно стоимостью. Следует отметить, что из них только две модели позволяют производить тестирование микросхем в полном расширенном диапазоне температур от -55 до 150 °С, что не соответствует диапазону температур для отечественных изделий военного и космического применения (от -60 °С). Подача жидкого азота необходима при температуре тестирования ниже -40 °С (до -55 °С). Это модели 3110 и 3160-С (рис. 8, 9 и табл. 1).

Хендлеры обеспечивают автоматизированное перемещение микросхем в температурной камере с лотка в контактирующий узел, подключенный к АИС, и перемещение в другие лотки после тестирования. Лотки отдельные для годных по электрическим параметрам микросхем и для бракованных. Хендлеры позволяют производить тестирование микросхем в широком ряде корпусов: BGA, μ BGA, QFP, QFN, Flip-Chip, TSOP и других с размерами от 3×3 мм до 55×55 мм. Время достижения установившегося теплового режима здесь составляет до 30–50 мин. Хендлер 3110 обеспечивает одновременное тестирование только одной микросхемы, поэтому его производительность – до 500 микросхем в час. Хендлер 3160-С работает в Multiple Site-режиме, то есть обеспечивает возможность параллельного тестирования 1, 2, 4 или даже 8 микросхем. Поэтому его максимальная производительность – до 3200 микросхем в час.

Конечно, оборудование такого типа стоит сотни тысяч долларов, поэтому основными недостатками установок фирмы Chroma являются высокая стоимость и необходимость подачи жидкого азота при температуре тестирования ниже -40 °С.

Фирма JHT (Китай) также выпускает ряд хендлеров [11]. Но только два из них обеспечивают проведение тестирования микросхем в расширенном диапазоне температур



Рис. 9. Хендлер 3160

от -55 до 130 °С – COLLIE-301HC и EXCEED-8808 (рис. 10, 11 и табл. 1). Достоинством этих систем является то, что для них не требуется подача жидкого азота при пониженной температуре тестирования -55 °С. Хендлеры позволяют производить тестирование микросхем в широком ряде корпусов: QFN, QFP, BGA, LGA, PLCC, PGA, CSP, TSOP и других с размерами от 2×2 мм до 70×70 мм.

Так называемый односайтный лабораторный хендлер COLLIE-301HC позиционируется как «полностью автоматизированный thermostream». Здесь зона нагрева/охлаждения находится только под тестовой «рукой», а термоизоляция обеспечивается резиновой чашей, которая «накрывает» объект контроля на плате и препятствует поступлению температур во внутренний объем хендлера [11].

Для обеспечения надежной работоспособности этого хендлера потребуется подача сжатого осушенного воздуха и компрессор. Предназначен он для автоматизации процесса измерений/испытаний мелких и средних партий. Хендлер COLLIE-301HC обеспечивает одновременное тестирование только одной микросхемы, поэтому его производительность – до 600 микросхем в час.

Хендлер EXCEED-8808 работает в Multiple Site-режиме, то есть обеспечивает параллельное тестирование 1, 2, 4 или 8 микросхем. Поэтому его производительность – до 6600 микросхем в час. Предназначен он для автоматизации процесса измерений/испытаний больших партий микросхем.

Из общего ряда хендлеров фирмы Advantest, США, можно выделить две модели – M4171 и M4841 (рис. 11) [12]. Хендлер M4171 – это портативный односайтный манипулятор. Он автоматизирует загрузку и выгрузку устройств, задание требуемой температуры, сортировку микросхем после тестирования. Предназначен для применения в испытательных центрах, в которых большое число испытаний сегодня включает применение «ручной» обработки при тестировании. Кроме того, он имеет функцию активного

Таблица 1. Параметры устройств, задающих температуру при тестировании микросхем

Наименование параметра	Неавтоматизированные устройства		Автоматизированные устройства				
	УИК.ИМ 1-019, АО «НПЦ «ЭлТест», Санкт-Петербург	Thermojet, sp scientific, США ATS-710-M Thermostream, Temptronic, США	Гравитационные хендлеры	Проходные камеры		Хендлеры	
				ПКВ, НИИПМ, Воронеж	Проходная камера ПКК, Миландр, Зеленоград	MODEL 3110 / MODEL 3160-C, Chroma, Тайвань	COLLIE-301HC / EXCEED-8808, JHT, Китай
Диапазон подаваемых температур, °С	От -110 до 150	От -80 до 225	От -60 до 175 в комплекте с Thermostream	От -60 до 150	От -60 до 150	От -55 до 150	От -55 до 130
Отклонение температуры в рабочей зоне, °С	±2	±1	±1	±3 (в диапазоне от -60 до 100) ±5 (в диапазоне от 100 до 150)	±1,5	±2	±1-3
Время достижения установившегося теплового режима	10-20 мин.	10-15 с	10-15 с с Thermostream	30-50 мин.	20 мин.	30-50 мин.	5-10мин. / 15-30мин.
Время восстановления температурного режима после смены прибора	1 мин.	10-15 с	Не требуется Thermostream	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Не требуется
Применение жидкого азота на низкой температуре	Требуется 4 кг / ч	Не требуется (хладоагент)	Не требуется (хладоагент в Thermostream)	Требуется 6 л / ч	Требуется 2 л / ч	До -40 °С (без азота); до -55 °С(азот)	Не требуется (хладоагент)
Производительность, шт / ч *	До 60	До 60 До 3000 в комплекте MN250 EVO и Thermostream	До 1200 / 3000	ПКВ1 – до 2000 ПКВ2 – до 1344 ПКВ5 – до 408	До 1800	От 500 / От 3200	Макс. 600 / Макс. 6600
Относительная стоимость (ориентировочно)	1	6 (с компрессором)	3-6	8	7	30-50	30-50
Количество одновременно измеряемых микросхем	1	1	1	1	1	1 / 1, 2, 4, 8	1 / 1, 2, 4, 8
Потребляемая мощность	0,3 кВт	6,6 кВт		1,3 кВт		3 кВт / 10 кВт	До 6,6 кВт
Интерфейс	USB	IEEE (GPIB), RS-232		RS-232	RS-232 GPIB	RS-232, TCP / IP опция: GPIB; TTL / TTL & GPIB опция: TCP / IP	GPIB, RS-232 / GPIB, TTL, RS-232, Network
Масса, кг	8,1	193 / 236	Менее 70 / 130	150-200		750 / 1650	300 / 1500

* Производительность зависит от времени измерения конкретной микросхемы

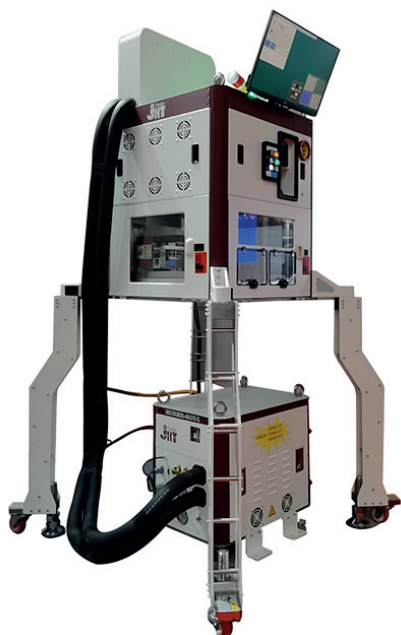


Рис. 11. Хендлер EXCEED-8808

Рис. 10.
Хендлер
COLLIE-301HC

терморегулирования (АТC), которая обычно доступна только на более дорогих хендлерах. Хендлером M4171 можно управлять дистанционно из любой точки мира через сетевое соединение [12]. Хендлер M4171 обеспечивает тестирование микросхем в диапазоне от – 45 до 125 °С.

Хендлер M4841 (рис. 12б) предназначен для тестирования микросхем в диапазоне температур от – 40 до 125 °С. Может выпускаться с опцией от – 55 до 175 °С. Используется при крупносерийном производстве микросхем. Обеспечивает в Multiple Site-режиме параллельное тестирование до 32 микросхем с производительностью – до 18 500 микросхем в час.

Гравитационные хендлеры (Microtec)

Фирма Microtec Handling Systems (Германия) предложила свое оригинальное решение автоматизации процесса тестирования микросхем в диапазоне температур. Здесь



Рис. 12. Хендлеры M4171 (а) и M4841 (б)

микросхемы загружаются во всем известные пеналы, используемые для упаковки. В оборудовании фирмы Microtec эти пеналы являются технологической тарой. Выгрузка микросхем из пеналов в узел контактирования и загрузка в пеналы микросхем после тестирования производится под действием силы тяжести. Поэтому эти хендлеры и называют «гравитационными». Microtec выпускает целый ряд гравитационных хендлеров, которые совмещаются с термостатическими системами Thermostream, ThermoJet для создания требуемой температуры при тестировании микросхем.

Тестирование в расширенном температурном диапазоне реализуется в двух моделях хендлеров: **MH200** (от –60 до 175 °С) и **MH250** (от –60 до 165 °С). Хендлеры позволяют производить тестирование микросхем в большом ряде корпусов: SO, TSSOP, QSOP, VSOP, SSOP, SOT, SOJ, TO, DIP, SIP, ZIP, PLCC, LCC, MLP, QFN и др.

Хендлер **MH200 EVO** фирмы Microtec представлен на рис. 13. Гравитационный тестер MH200 EVO разработан для обеспечения наилучшего соотношения цена / производительность для тестирования небольших партий и применения в лабораторных условиях. Небольшая занимаемая площадь позволяет поместить установку на столе или непосредственно на испытательном оборудовании и идеально подходит для тестирования 10 000–50 000 устройств в неделю [13, 14].

Преимуществом этого оборудования является его небольшие габаритные размеры, вес без компрессора составляет 23 кг [13, 14].

На рис. 14 представлен общий вид еще одного хендлера **MH250 EVO** фирмы Microtec [13]. MH250 EVO – это гравитационный хендлер, который является продолжением популярной серии MH2XX от Microhandling Handhabungsgeräte GmbH. Здесь загрузка и выгрузка микросхем для тестирования также производится под действием силы тяжести из пеналов. Этот быстрый преобразователь может обеспечивать температуру тестирования от –60 до 165 °С. Длинная направляющая камеры выдержки позволяет быстро нагревать и охлаждать устройства, управляемые несколькими датчиками по всей камере, причем для проведения тестирования при повышенной температуре дополнительное оборудование не требуется. Подача холодного воздуха производится внешним термостатом.

Простое преобразование из одного комплекта в другой осуществляется в течение 10 мин.

Одним из преимуществ является простое и удобное управление. Так же простая и понятная модульная сборка: удобный в обслуживании дизайн с новейшими

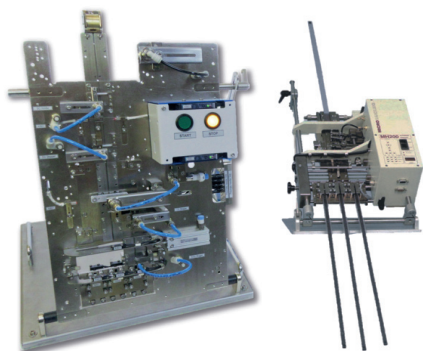


Рис. 13.
Хендлер
MH200 EVO:
а – внешний
вид;
б – в рабочем
состоянии

электронными компонентами, наименьшее время простоя, а также можно легко устранить неисправности.

Так же существуют различные варианты вывода: ленты, катушки и др. Имеются индивидуальные опоры, регулируется угол наклона и высота. Возможно тестирование микросхем в корпусах типа SO, TSSOP, QSOP, VSOP, SSOP, SOT, SOJ, TO, DIP, SIP, ZIP, PLCC, LCC, MLP, QFN и др. [13, 14].

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ ХЕНДЛЕРОВ MH200 И MH250

MH250 имеет в себе зону предварительной обработки микросхем, за счет чего само измерение в температурной камере происходит быстрее, то есть не надо ждать пока ИМС нагреется/охладится в самой камере, для этого есть специальная зона предварительной обработки. Соответственно, пока часть микросхем находится там, другая часть уже проверяется. В MH200 нагрев/охлаждение происходит только в температурной камере, установка не имеет предварительных зон обработки.

MH250 имеет возможность установки пяти пеналов на вход, а MH200 – одного или двух пеналов на вход. Хендлер MH250 позволяет устанавливать пять пеналов на выходе, MH200 – три пенала на выходе. В хендлере MH250 нагрев может происходить в самой камере, для чего в нее встроена нагревательная часть. В хендлере MH200 нагрев производится только с помощью внешнего Thermostream. Охлаждение микросхем в обоих хендлерах MH250 и MH200 осуществляется при помощи внешнего Thermostream. Хендлер MH250 устанавливается на полу, а MH200 – можно устанавливать на обычном рабочем столе.

Таким образом, сегодня на рынке существует достаточно большой ряд автоматизированных и неавтоматизированных устройств, задающих температуру при тестировании микросхем. Выбор конкретного устройства осуществляется, исходя из требуемого температурного диапазона, объема выпуска микросхем и финансовой возможности осуществить закупку.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ефименко С. А., Кособуцкая Н. В.** Модернизация метода тестирования мощной интегральной микросхемы или полупро-

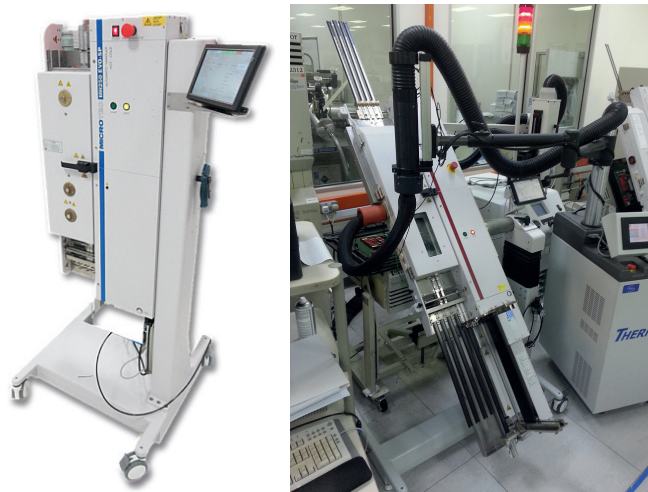


Рис. 14. Хендлер MH250 EVO: а – внешний вид; б – в рабочем состоянии в комплекте с Thermostream

водникового прибора в диапазоне температур // 14-я Международная научно-техническая конференция «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2021». 17–19 ноября 2021 г.

Минск, БНТУ. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/109648/60-62.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

2. ФОРМ: [Электронный ресурс]. URL: <https://form.ru/products/chip/hf-ultra/>.
3. ЭлТест [Электронный ресурс]. URL: https://www.est-test.ru/equipment/oborudovanie2/oborudovanie2_7.html.
4. ThermoJet – Precision Temperature Cycling System: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pharmaceuticalonline.com/doc/thermojet-precision-temperature-cycling-syste-0002>.
5. FTS Systems, SP SCIENTIFIC: [Электронный ресурс]. URL: <https://photos.labwrench.com/equipmentManuals/20192-6933.pdf>.
6. Temptronic, ThermoStream: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intestthermal.com/temptronic/thermostream>.
7. Temptronic, ATS-710-M ThermoStream: [Электронный ресурс]. URL: [http://itt-group.ru/d/118349/d/temptronicats-710-m_\(zashifrovan\)_2.pdf](http://itt-group.ru/d/118349/d/temptronicats-710-m_(zashifrovan)_2.pdf).
8. НИИПМ: [Электронный ресурс]. URL: <http://vniipm.ru/ru/produkcija/category/view/22>.
9. Миландр: [Электронный ресурс]. URL: <https://device.milandr.ru/products/izmeritelnaya-i-ispytatelnaya-apparatura/prokhodnaya-kamera/>.
10. Chroma: [Электронный ресурс]. URL: https://www.chromaate.com/eu/products_list/ic_pick_place_handler#nav_breadcrumb.
11. JHT Design: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jht-design.com>.
12. ADVANTEST: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.advantest.com/products/test-handler/>.
13. Microtec: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.microtec-hs.com/services/gravity-test-handlers/>.
14. Applied Engineering Solution, Microtec Handlers: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aesrep.com/MicroTec.php>.

