

## Формирование и усиление сигналов

УДК 621.396

### ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПРОВЕРКИ РАБОТСПОСОБНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КМОП МИКРОСХЕМ

#### **Драч Владимир Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

*E-mail:* drach@bmstu-kaluga.ru.

#### **Крисанов Сергей Сергеевич**

студент магистратуры, Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

*E-mail:* hilgan@mail.ru.

*Адрес:* 248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, 2.

*Аннотация:* На предприятиях, специализирующихся на производстве микроэлектронных изделий, одной из основных задач является проверка параметров выпускаемой продукции. В настоящее время для этого используются измерительные комплексы, обладающие рядом недостатков. В настоящей статье описан новый программно-аппаратный комплекс проверки работоспособности микросхем на примере высоковольтных аналоговых КМОП ключей, который обладает объективными преимуществами для конкретного предприятия. Программно-аппаратный комплекс построен по модульному принципу, управляющий узел выполнен под управлением микроконтроллера. Основные модули комплекса: блок коммутации часть, измерительный блок, блок управления. Присутствует два варианта исполнения модуля коммутации: модульная и монолитная. Представлены структурная схема, схема электрическая принципиальная и топология печатной платы. Рассчитаны предельные характеристики комплекса, вычислена точность измерений. Апробация комплекса проведена на высоковольтных аналоговых КМОП ключах в условиях реального производства.

*Ключевые слова:* программно-аппаратный комплекс, точность измерения, проверка, микросхема, ИМС.

#### **Введение**

Номенклатура выпускаемых в настоящее время интегральных микросхем (ИС) достаточно широка. Для контроля качества выпускаемой продукции каждая микросхема проходит целый ряд испытаний [1–4]. По результатам испытаний выявляются годные приборы, которые полностью соответствуют требованиям как технического задания, так и заказчиков. Для проведения таких испытаний, как правило, используется различное измерительное оборудование [4–8]: вольтметры, осциллографы и т.д. Для качественного и быстрого проведения измерений применяют сложные измерительные системы [9, 10], примерами таковых являются измерительные системы 14КСЦ-64-006 «Вахта» и ИИЭ-ИМЭ-3 «Интеграл». Обе эти

измерительные системы обладают очевидными положительными качествами, но им свойственны общие недостатки – они обладают большими массогабаритными показателями, требуют написания программы управления (требуются знания специальных языков программирования) и сложно поддаются модификации под нестандартные задачи. В частности, система «Вахта» не может производить какого-либо рода математические вычисления. Вот почему актуальной задачей является разработка измерительной системы, имеющей большой функционал, со способностью модификации под конкретную задачу, а также обладающей относительной мобильностью (для транспортировки одним человеком в случае необходи-

мости) и не требующей сложного программирования.

В настоящей статье описан программно-аппаратный комплекс проверки работоспособности и электрических параметров интегральных микросхем. Апробация комплекса проведена на высоковольтных аналоговых КМОП ключах в условиях реального производства.

### Обзор аналогов и прототипов

Рассмотрим детально аналоги, их достоинства и недостатки.

«Вахта» – одна из первых измерительных систем, обладающая спектром положительных характеристик: состоит из дискретных компонентов, в результате чего обладает очень хорошей ремонтопригодностью; имеет высокую частоту проверки микросхемы, до 3 мс при выходном сопротивлении менее 10 кОм; имеет высокую точность измерений (особенно по току) и т.д. Но она обладает рядом недостатков: не может производить вычисления; состоит из блоков, каждый из которых не может быть перемещён одним человеком; большие габаритные размеры (зависит от числа блоков); на выходе получаются дихотомические данные в формате: «Годен» / «Брак» и др.

«Интеграл» – более новая измерительная система, которая по характеристикам совпадает с «Вахтой», но имеет меньшее максимальное напряжение, выдаваемое встроенными источниками. Этим обусловлена и более низкая себестоимость.

Общий недостаток этих систем – они измеряют только статические параметры ИС, что требует отдельно разрабатывать оснастку для проведения измерений динамических параметров.

### Постановка задачи

Для устранения описанных недостатков, а также для того, чтобы позволить разработчикам тестировать микросхемы по специфической одноразовой программе (написанной без применения узкоспециализированных языков

программирования), с целью обнаружения места брака или проверки предельных режимов схемы был разработан измерительный комплекс, описываемый в настоящей статье. Выделим его особенности.

Достоинства:

1. Малая масса и габаритные размеры, портативный.
2. Высокая ремонтопригодность.
3. Возможность модификации за счёт добавления новых модулей, ограниченная лишь только мощностью управляющего устройства и некоторыми особенностями конструкции, что позволяет измерить схемы с любым числом выводов, использовать несколько измерителей разной точности и т.д.
4. Способность производить вычисления, а также проводить измерения динамических характеристик и отбраковывать схемы по динамическим параметрам.

5. Энергоэффективность, комплекс имеет малую потребляемую мощность.

6. Выходное напряжение до 30 В, способность коммутировать напряжение до 125 В с внешнего источника.

Недостатки:

1. Точность измерений по напряжению 3 мВ – этого бывает не всегда достаточно.
2. Низкая помехозащищенность (данная проблема решается в настоящее время и будет изложена в следующей работе).
3. Не способен регистрировать сверхмалые токи.

### Описание измерительного комплекса

Программно-аппаратный комплекс состоит из трёх основных блоков: блок коммутации, измерительный блок и блок управления. Разберём каждую компоненту более подробно.

#### 1. Блок коммутации.

Отвечает за коммутацию выводов микросхемы и источников сигнала согласно обновлённого алгоритма. Обычно это тестовая таблица, где в строках расположен номер теста, а в столбцах номер вывода и соответствующий режим на нём.

Блок коммутации состоит из следующих элементов:

1. Реле НК4100f-DC5V-SHG. Выбрана именно эта марка реле, т.к. она обладает рядом критериев:

- рабочее напряжение от 5 вольт;
- коммутация напряжения до  $\pm 128$  вольт;
- 2 входных вывода, но реле нормально-замкнуто на один из них.

2. Транзисторы n-канальные BSS123, которые выбраны для данного применения из следующих соображений:

- крутизна 370, благодаря чему обеспечивается быстродействие схемы 180 нс.
- сопротивление 5 Ом при 4,5 В на затворе.
- предельное напряжение сток-исток 100 В.
- доступность.

Единственный недостаток: низкая рассеиваемая мощность, что может привести к нагреву.

3. Фильтры: используются только пассивные фильтры.

4. Сдвиговые регистры: предназначены для уменьшения количества используемых выводов микроконтроллера, который используется в управляющей части.

5. Пассивные компоненты, индикаторы, разъёмы и т.п.

Присутствует два варианта исполнения блока коммутации: модульный и монолитный.

Модульный вариант предполагает наличие реле (управляющий контакт состоит из двух ножек: одна соединена с землей, другая с транзистором), транзистора (сток подсоединён к источнику 9 В, исток – к управляющему контакту реле, затвор имеет внешний вывод через разъём), ограничивающий резистор и фильтр. Контакты расположены таким образом, что модули можно соединять в цепочку, при этом происходит соединение общего вывода для управления реле и управляющего источника напряжением 9 В. Выход и вход реле, а также сигнал для его управления, в цепочку соеди-

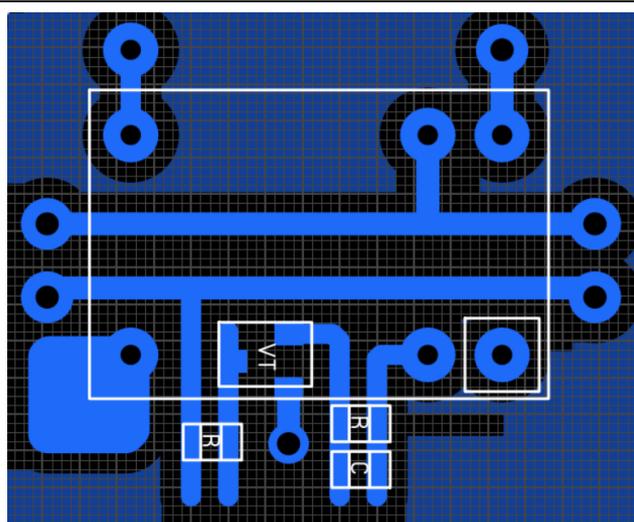


Рис. 1. Трассировка модульного исполнения коммутирующей части

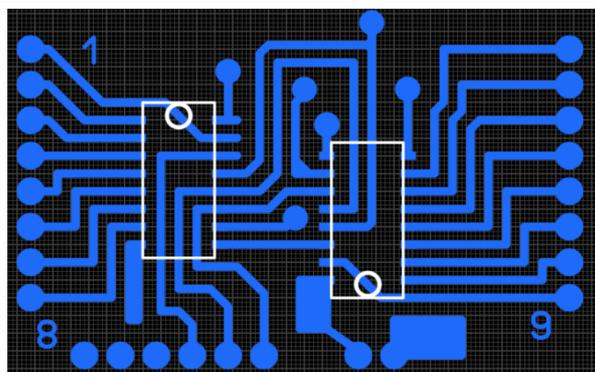


Рис. 2. Трассировка модульного исполнения управляющей части

нить не представляется возможным, поэтому они отдельно подключаются к каждому модулю. Управление на сдвиговых регистрах организовано на отдельной плате, чтобы получить одинаковое быстродействие у каждого ключа и уровень шумов не множился с каждым подключённым модулем. Преимущества такого подхода – универсальность и быстрота сборки, что очень полезно при тестировании схемы разработчиком, когда необходимо оперативно переконфигурировать систему перед измерениями. Недостатки: большое число соединителей; невысокая надёжность; для некоторых случаев высокий уровень шума; при числе выводов микросхемы более 16 система становится очень громоздкой, не способной к перемещениям без закрепления на какой-либо твёрдой поверхности.

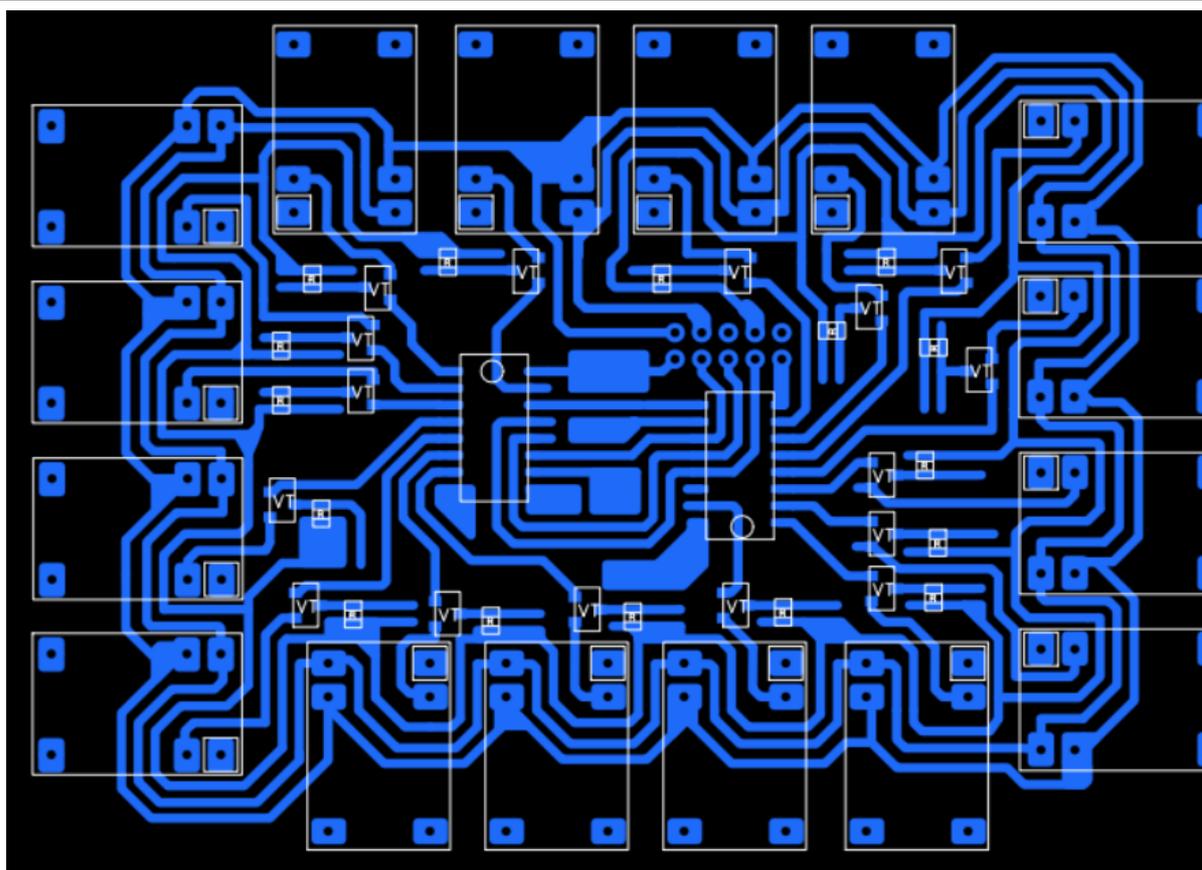


Рис. 3. Трассировка монолитного исполнения

На рис. 1 и рис. 2 приведены варианты трассировки при модульном исполнении коммутирующей и управляющей частей соответственно.

В случае монолитного варианта – вся система управления реализована на одной плате. При этом одна плата управляет отдельным источником. У такой конструкции три главных плюса: надёжность, минимум шумов (в том числе и от других источников), малые габариты. Компоновка на печатной плате выполнена в соответствии с рис. 3.

Подключение осуществляется с помощью шлейфов 1,27 мм марки FRC-25-10 к интерфейсу управления и источнику коммутируемого напряжения, и шлейфом марки FRC-25-16 к тестовому образцу.

## II. Измерительный блок.

Предусмотрено два варианта исполнения: съёмное и встроенное. На данный момент реализовано только встроенное. Оно состоит из

шестнадцатиразрядного регистра, позволяющего получить точность 3 мВ (при измерении напряжений до 5 В, но на каждые 5 вольт погрешность удваивается, т.е. при измерении напряжения 30 В погрешность составит 18 мВ) не применяя никаких дополнительных схемотехнических и программных методов. Используемый регистр и интерфейс I<sup>2</sup>C позволяют уменьшить число задействованных выводов микроконтроллера для получения данных с измерителей, сокращая их число до 3. При этом возможно подключение неограниченного числа измерителей (если позволит мощность).

Для реализации более точных измерений применяется 2 метода:

1. Программный, который позволяет увеличить точность измерений в два раза, т.е. до 1,5 мВ (т.к. в сдвиговом регистре физически используется только 15 разрядов из 16, но программно можно настроить режим использования 16-и разрядов)

2. Схемотехнический – самый простой способ (делитель напряжения реализован на прецизионных резисторах). С его помощью можно добиться точности до 1,5 мВ на всем диапазоне допустимых напряжений.

Измерение тока реализуется методом включения в цепь с выводами микросхем прецизионного резистора с малым сопротивлением (1 Ом), способного рассеивать мощность до 50 Вт без дополнительного охлаждения. С точки зрения надёжности было бы желательно применять резисторы с номинальной рассеиваемой мощностью 100 Вт, что увеличило бы запас по надёжности резистора вдвое, однако при контроле интегральных микросхем протекание тока свыше 1 А на одном выводе не требуется (за исключением тех случаев, когда при проверке начинают протекать сквозные токи); мощность растёт пропорционально квадрату напряжения/тока, следовательно, это позволит увеличить допустимые пределы по току/напряжению только на 25 %; цена на такие резисторы растёт экспоненциально при мощностях более 25 Вт (это становится важно, т.к. необходима установка таких резисторов на каждый вывод).

Экспериментальным путём было установлено, что при напряжении до 5 вольт возможно контролировать ток с точностью до 4 нА (при условии отсутствия токов утечки через сам измеритель). Чтобы получить более высокую точность измерений требуется специальная калибровка, предполагающая измерение реального сопротивления (как мощного резистора, описанного выше, так и сопротивлений в цепи измерителя).

Использование съёмных измерителей обусловлено необходимостью подключать измеритель к испытываемой схеме, минимизируя при этом паразитную ёмкость, что требуется для качественной оценки динамических свойств схемы. Если микросхему можно установить в тару-спутник и обеспечить омический контакт с измерительным устройством через разъёмы, которые в нем установлены, то съёмных измерительных устройств не требуется (конструк-

ция прибора обеспечивает минимально возможные для него ёмкости при таком включении).

### III. Блок управления.

Представляет собой модуль на базе микроконтроллера, работающий по загружаемой в него программе. В его функции входит управление коммутацией (в соответствии с загруженными заранее тестовыми таблицами), а также сбор, преобразование и хранение данных о результатах измерений. Предусмотрена возможность напрямую задавать сигналы, обходя управляющую программу.

Частота работы микроконтроллера и его быстродействие позволяют производить достаточно большой объём вычислений над полученными от измерительной части данными. При связи с ПЭВМ комплекс способен выводить статистические данные. Частота работы управляющей части превышает в несколько раз частотные возможности коммутирующей системы, при которых обеспечивается режим измерений, что позволяет проводить часть расчётов в промежутках между выполнениями тестов. Это полезно в тех случаях, когда при проверке микросхемы требуется вести статистику, проводить сравнение с другими проверенными образцами или же отслеживать динамику.

На рис. 4 и рис. 5 приведены графики, полученные с помощью осциллографа, которые показывают задержку между сигналом на управляющей (красная линия) и коммутирующей (синяя линия) частях при включении и выключении соответственно.

Можно наблюдать переходные процессы на управляющем сигнале (график слева), но они заканчиваются ещё до того момента, когда управляющая схема успевает отреагировать на этот сигнал, поэтому они не влияют на работу прибора. При размыкании цепи коммутации выводов с источниками (график справа) видно, что в тот момент, когда сигнал на управлении имеет потенциал земли, а коммутирующая схема ещё не успела отреагировать на эти измерения, наблюдается дребезг в цепи комму-

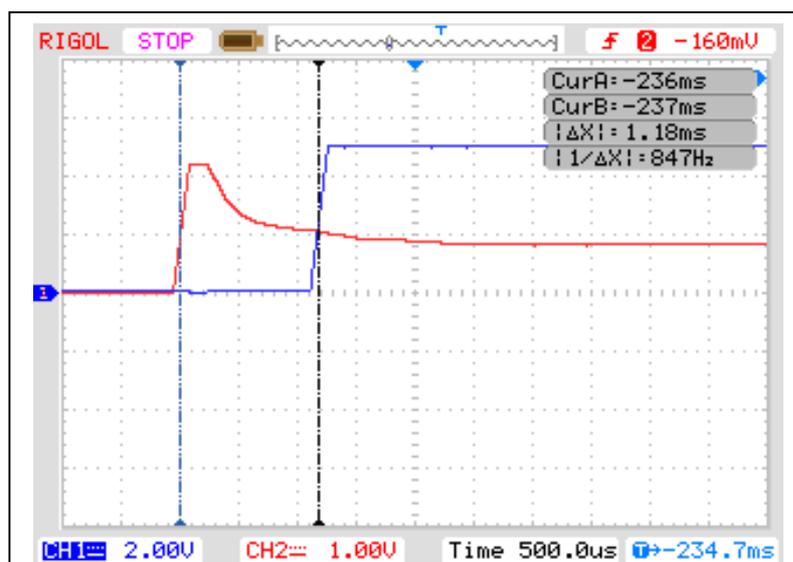


Рис. 4. Время задержки при включении

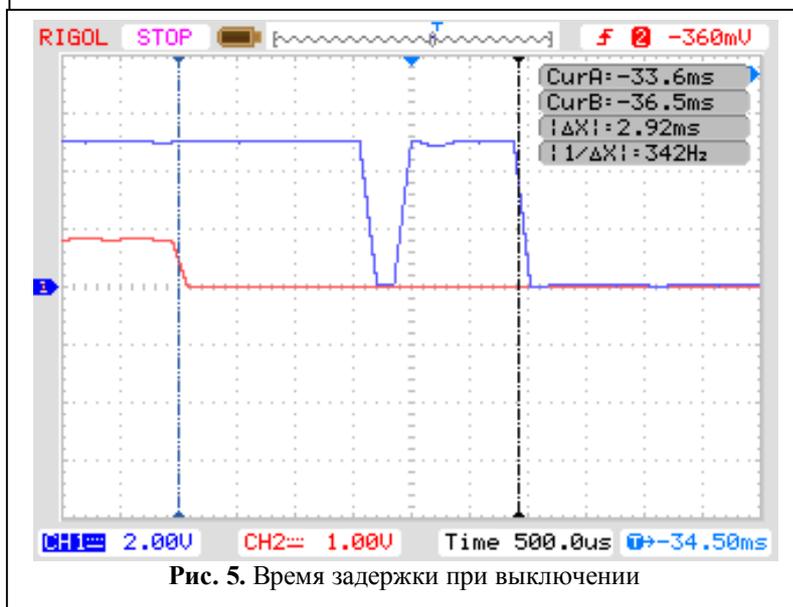


Рис. 5. Время задержки при выключении

тации, связанный с дребезгом реле. Дребезг не имеет выплесков напряжений выше нормы, поэтому является допустимым.

Если принять график слева за включение схемы, а график справа – за выключение, то время включения (разница между изменением сигнала на управлении и реакции сигнала на коммутирующей схеме) будет составлять 1,18 мс, а выключения – 2,92 мс. При одновременном включении 16 ключей время включения возрастёт до 6 мс (если судить по самому медленному ключу). Следовательно, минимальным временем переключения схемы можно считать 10 мс, что позволяет производить

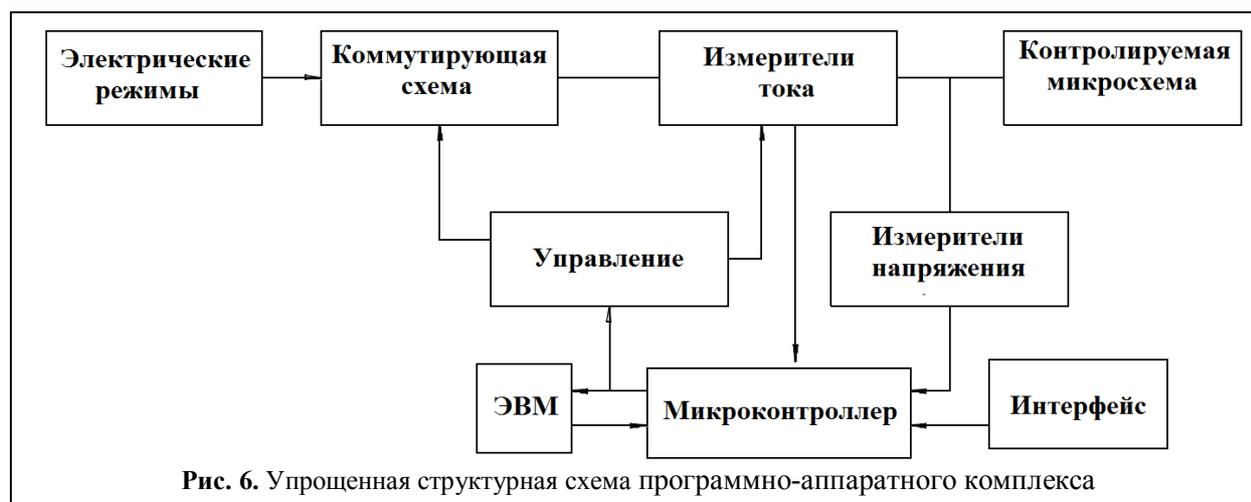
до 100 измерений в секунду. К сожалению, надо учитывать и время реакции проверяемой микросхемы, пока на ней не установится устойчивое состояние. Это замедляет скорость проверки до 4–6 тестов в секунду, а иногда и более. Возникает конфликт между стремлением повысить быстродействие измерительного устройства и ограничениями по времени реакции. Минимизация фактора данного противоречия требует рассмотрения двух точек зрения:

1. Экономия времени будет оказывать существенное влияние при увеличении программы выпуска микросхем.

2. Минимальное время позволяет обеспечивать необходимый фронт нарастания сигнала, который необходимо учитывать для обеспечения условий измерения.

В результате, можно привести упрощенную структурную схему разработанного программно-аппаратного комплекса проверки работоспособности и электрических параметров высоковольтных аналоговых КМОП ключей (рис. 6).

Электрические режимы, представляющие собой токи или напряжения от источников питания, через коммутирующую схему подаются на контролируемую микросхему. Управление обеспечивает подачу требуемых режимов на выводы микросхемы согласно схеме проверки, которые в виде тестовых таблиц хранятся в микроконтроллере. Таблицы составляются либо через интерфейс, либо загружаются через ПЭМВ. После установки нужного режима выполняется измерение токов и напряжений, значения которых передаются микроконтроллеру и обрабатываются.



### Выводы

Разработан программно-аппаратный комплекс проверки работоспособности и электрических параметров микросхем. В ходе разработки были выполнены все цели и задачи, поставленные в техническом задании на разрабатываемое устройство. Результатом является программно-аппаратный комплекс проверки работоспособности и электрических параметров высоковольтных аналоговых КМОП-ключей, имеющих следующие особенности:

1. Возможность коммутации высоких значений тока и напряжения.
2. Универсальность, проявляющаяся в возможности модификации стенда под проверку микросхем большинства других серий с коммутацией различных типов корпусов.
3. Простота настройки и программирования, что позволяет в кратчайшие сроки разрабатывать программы измерений, что эффективнее всего на этапе опытно-конструкторских работ.
4. Малые массогабаритные показатели, позволяющие устанавливать такой прибор в любом месте, и не требующие больших усилий для транспортировки.
5. Простота в ремонте, обслуживании, а также отсутствие дорогостоящих блоков, что позволяет быстро проводить ремонт, в том числе непосредственно на месте.

Апробация комплекса проведена на высоковольтных аналоговых КМОП-ключах в ус-

ловиях реального производства.

В качестве дальнейшего развития работы можно предложить решение следующих задач:

- аналитическим путём рассчитать погрешностей измерения по току,
- разработать и внедрить ряд мер по уменьшению дребезга схемы,
- ввести возможность подключения измерителей и источников к схемам, которые невозможно подключить к блокам напрямую,
- добавить встроенные источники питания.

### Литература

1. Салеев Д.В. Управление качеством технологического процесса производства интегральных микросхем // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 53–57.
2. Драч В.Е., Чухраев И.В. Комплексное исследование качества подзатворного диэлектрика МДП-ИС // Радиопромышленность. 2013. № 3. С. 96–103.
3. Дорошевич В.К., Марин В.П., Дорошевич П.В. Исследование факторов, влияющих на качество микросхем // Качество и жизнь. 2015. № 2 (6). С. 53–57.
4. Драч В.Е., Родионов А.В. Метод анализа деградации подзатворного диэлектрика быстродействующего полевого транзистора // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 10. С. 79–84.
5. Пятин Ю.М. Проектирование элементов измерительных приборов. Учеб. пособие для втузов. М.: Высшая школа, 1977. 304 с.
6. Меерсон А.М. Радиоизмерительная техника. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, 1978. 408 с.
7. Рудзит Я.А., Плуталов В.Н. Основы метрологии, точности и надежности в приборостроении:

Учеб. пособие для студентов приборостроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1991. 304 с.

8. Грязнов М.И., Гуревич М.Л., Маграчев З.В. Измерение импульсных напряжений. М.: Советское радио, 1969. 336 с.

9. Белоброва Е.С., Куприянова И.Ю. Российское оборудование для функционального контроля интегральных микросхем // В сборнике: Качество в производственных и социально-экономических

системах. Сборник научных трудов 6-й Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Ответственный редактор Е.В. Павлов. 2018. С. 93–96.

10. Почуфаров А.О., Зоголь Р.В., Брагина А.Д., Шадрин Д.В. Устройство автоматического контроля цифровых микросхем // В книге: Новые информационные технологии в исследовании сложных структур / Материалы Двенадцатой конференции с международным участием. 2018. С. 41.

Поступила 2 апреля 2019 г.

English

## SOFTWARE AND HARDWARE PACKAGE TO CHECK PERFORMANCE AND ELECTRICAL PARAMETERS OF CMOS MICROCHIPS

**Vladimir Evgenyevich Drach** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kaluga Affiliated Branch of "Bauman Moscow State Technical University (National Research University of technology)".

*E-mail:* drach@bmstu-kaluga.ru

**Sergey Sergeyevich Krisanov** – Graduate Student, Kaluga Affiliated Branch of "Bauman Moscow State Technical University (National Research University of technology)".

*E-mail:* hilgan@mail.ru.

Address: 248000, Russia, Kaluga, Bazhenov str., 2,

*Abstract:* One of the main tasks of any microelectronics manufacturer is to check microchip electrical parameters. There are used specialized measuring systems for such a check that have both merits and obvious flaws, which requires using two or more different systems at the same manufacturing company. Therefore, the vital task is to find a solution that enables to combine the maximum number of merits and acceptable flaws for a particular manufacturer. Hardware and software package was developed to that effect which has the following main characteristics: performance and electrical parameters' check of CMOS series microchips produced in industrial manufacturing cycle; the device is made out of chips and general-purpose discrete components; it is easy to upgrade for a specific task; it can measure currents and voltages and calculate and gather statistics as well; it does not require knowledge of specific programming languages for the purpose of measurement program; it has small weight and size indicators; it is of low cost; there is no programmable voltage sources. The measuring package comprises the following major parts: switching unit (taking care of outputs of microchip and signal sources), measuring unit (using I<sup>2</sup>C interface), the control unit (microcontroller-based unit taking care of data management, conversion and storage etc.). The provision was made for PC-backed operation as well as independent operation. Thus, this measuring system can be used to measure parameters at any production stage, which will reduce the development cost of measuring equipment, simplify the development cycle of microchips and enable to quickly obtain statistical data. Moreover, this approach will enable the most efficient work on R&D (research and development) stage, when analysis and constant upgrading of manufactured object design are conducted.

*Keywords:* hardware and software package, measurement accuracy, verification, microchip, IC.

### References

1. Saleev D.V. Quality management of technological process for integrated chip production. Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies. 2013. No. 10. Pp. 53–57.
2. Drach V.E., Chukhrayev I.V. Quality comprehensive analysis of MDP-IS gate dielectric. Radio Industry. 2013. No. 3. Pp. 96–103.
3. Doroshevich V.K., Marin V.P., Doroshevich P.V. Investigation of factors affecting microchip quality. Quality and Life. 2015. No. 2 (6). Pp. 53–57.
4. Drach V.E., Rodionov A.V. Breakdown analysis method for gate dielectric of fast-acting field-effect transistor. Electromagnetic waves and electronic systems. 2014. Vol. 19. No. 10. Pp. 79–84.
5. Pyatin Yu.M. Engineering of measuring instrument elements. Study guide for Higher Technical Education Institutions. Moscow: Vysshaya Shkola, 1977. 304 p.

6. *Meyerson A.M.* Radio-measuring equipment. 3rd ed., rev. and enl.. Leningrad: Energiya, 1978. 408 p.
7. *Rudzit Ya.A., Plutalov V.N.* Fundamentals of measurement science, accuracy and reliability in instrument-making industry: Study guide for students majoring in instrument making of Higher Education Institutions. Moscow: Mechanical Engineering, 1991. 304 p.
8. *Gryaznov M.I., Gurevich M.L., Magrachev Z.V.* Pulsed voltage measurement. Moscow: Sovetskoye Radio, 1969. 336 p.
9. *Belobrova E.S., Kupriyanova I.Yu.* Russian equipment for functional control of integrated circuits. Collection: Quality in production and socio-economic systems. Collection of scientific papers of the 6th International Scientific and Technical Conference. In 2 volumes. Publishing editor: *E.V. Pavlov*. 2018. Pp. 93–96.
10. *Pochufarov A.O., Zogol R.V., Bragin, A. D., Shadrin D.V.* Automatic control device of digital microchips. Book: New information technologies in research of complex structures. Proceedings of the Twelfth Conference with multinational delegates' participation. 2018. P. 41.