

Подход к обнаружению внутренних дефектов КМОП-микросхем

И. Ю. Булаев, *bulaev.ivan@gmail.com*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Для комплектования высоконадежной аппаратуры необходимо допускать только те изделия ЭКБ, которым до этапа монтажа проведен полный функциональный и параметрический контроль. Испытательный центр зачастую не способен провести полноценный функциональный контроль изделий ЭКБ, т.к. не имеет информации о внутренних блоках сложно-функциональных изделий и способах их взаимодействия. Ситуацию осложняет то, что степень интеграции и функциональность современных микросхем постоянно растет. Другая проблема — прогнозирование дальнейшей безотказной работы изделия и выявление внутренних скрытых дефектов. На раннем этапе эксплуатации микросхема может содержать незначительные внутренние скрытые дефекты, величина которых практически не влияет на работоспособность микросхемы. Однако по истечении некоторого времени наработки в результате протекания деградиационных процессов материалов изделия дефект может увеличиться и привести к необратимому отказу изделия. Поэтому крайне важно на этапе автономных испытаний изделия, не в составе аппаратуры, обнаружить такие внутренние дефекты. В статье поясняется необходимость проведения поиска малых скрытых дефектов изделий ЭКБ, предлагается сравнение наиболее популярных методов диагностики, обсуждаются проблемы применения существующих методов для диагностики современных микросхем, предлагается подход к обнаружению малых внутренних дефектов микросхемы до этапа ее монтажа в аппаратуру.

Ключевые слова: дефект, обрыв, КМОП, диагностика, испытания

Method to Detect Internal Defects of CMOS-Microcircuits

I. Yu. Bulaev, *bulaev.ivan@gmail.com*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. For the acquisition of highly reliable equipment it is necessary to allow only those electronic components, which before the installation phase are fully functional and parametric. The testing center is often not able to conduct a full-fledged functional control of the electronic components products, because does not have information about internal blocks of complex functional products and how they interact with each other. The situation is complicated by the fact that the degree of integration and functionality of modern microcircuits is constantly growing. Another problem is the forecasting of further trouble-free operation of the product and the detection of internal hidden defects. At an early stage of operation, the microcircuit can contain insignificant internal hidden defects, the value of which practically does not affect the performance of the microcircuit. However, after a certain amount of time has elapsed as a result of the degradation processes of the product materials, the defect may increase and lead to irreversible failure of the product. Therefore, it is extremely important at the stage of autonomous testing of a product, not as part of equipment, to detect such internal defects. The article explains the need to search for small hidden defects in EEE products, suggests comparison of the most popular diagnostic methods, discusses the problems of using existing methods for diagnosing modern microcircuits, suggests an approach to detecting small internal defects of the microcircuit before the stage of its installation in equipment.

Keywords: defect, failure, CMOS, diagnostics, tests

Внутренние дефекты изделий электронной компонентной базы (ЭКБ), к которым можно отнести диоды, транзисторы, интегральные микросхемы, микросборки, пассивные компоненты и пр., иногда невозможно обнаружить с помощью обычного функционального или параметрического контроля. В тех случаях, когда дефекты слишком малы, они не оказывают значительного влияния на работу изделия ЭКБ (далее — изделия) и не приводят ни к выходу электрических параметров за пределы допустимых норм, ни к нарушению функционирования.

Однако по истечении некоторого времени наработки в результате протекания деградиационных процессов материалов изделия дефект может увеличиться и привести к необратимому отказу изделия. Поэтому крайне важно на этапе автономных испытаний изделия, не в составе аппаратуры, обнаружить такие внутренние дефекты.

Кроме того, сложность современных микросхем настолько велика, что задача проведения полного функционального контроля всех внутренних блоков «в дальних уголках» изделия становится практически невыполнимой. Ситуацию усугубляет то, что испытатель, как правило, не имеет никакой информации о внутренней структуре и схемотехнической реализации микросхемы.

На выявление скрытых дефектов и компенсацию недостаточного функционального контроля направлена, например, электротермотренировка (ЭТТ), при которой на изделия воздействуют различными факторами, ускоряющими процесс старения материалов — напряжение, температура и т. д. С помощью такого испытания за относительно непродолжительное время (несколько дней) удается симитировать некоторый срок жизни изделия (несколько лет). После проведения испытания потенциально ненадежные изделия либо откажут, либо дрейф их информативных параметров (разница значений, измеренных до ЭТТ и после) будет сильно отличаться от дрейфа исправных изделий.

Однако ЭТТ является довольно продолжительным и дорогостоящим испытанием, требующим специализированного оборудования, оснастки и методик выбора режима. Заменить ЭТТ могут методы диагностического неразрушающего контроля (ДНК), позволяющие косвенным образом,

с помощью измерения электрических параметров (токов, напряжений, временных интервалов) судить о наличии или отсутствии внутренних дефектов изделия.

Практически все методы ДНК основаны на статистической обработке и сравнении измеренных параметров по партии изделий при одном и том же воздействии. ДНК имеет смысл проводить только для изделий одной партии.

Далее изделия, содержащие дефект, будем называть «ненадежными», не содержащие — «надежными».

Методы ДНК кроме своих преимуществ, заключающихся в возможности отбраковки ненадежных изделий при минимальных затратах, обладают рядом недостатков.

Следует отметить, что далеко не все перечисленные методы применимы к любому типу изделий ЭКБ. Табл. 1 демонстрирует применимость методов ДНК для каждого из типов изделий ЭКБ.

Из таблицы видно, что для ДНК микросхем и микросборок применимы все перечисленные методы, в то время как для контроля пассивных компонентов существует меньше всего методов. С одной стороны, такая ситуация кажется логичной, т. к. микросхемы и микросборки являются наиболее сложными типами изделий ЭКБ и для подтверждения их качества требуется провести как можно больше проверок. С другой стороны, из заключений комиссий по анализам отказов приборов видно, что зачастую причиной неисправности является скрытый дефект именно пассивного компонента.

Таким образом, необходимо проведение исследовательских работ по разработке новых, более совершенных методов ДНК пассивных компонентов.

В табл. 2 приводятся преимущества и недостатки методов ДНК.

Общим недостатком методов ДНК является то, что в случае наличия дефекта у большинства изделий в партии существует опасность отбраковки надежных изделий, т. к. их параметры могут не попасть в доверительный интервал, в то время как ненадежные изделия не будут отбракованы вовсе. Главная причина данной проблемы кроется в отсутствии «эталонного» образца с заранее неизвестными границами отбраковки, в результате

Таблица 1. Применимость методов ДНК для различных типов изделий ЭКБ

Тип метода	Интегральные микросхемы и микросборки	Полупроводниковые приборы	Пассивные компоненты
Ужесточенные нормы	+	+	+
Статический ток потребления	+	—	—
Динамический ток потребления	+	—	—
Критическое напряжение питания	+	—	—
Гистерезис параметров	+	+	+
Анализ ВАХ	+	+	—
Радиационные методы	+	+	+
Низкочастотный шум	+	+	+
Электростатический метод	+	+	+

Таблица 2. Преимущества и недостатки различных методов ДНК

Тип метода	Преимущества	Недостатки
Ужесточенные нормы	Простой в реализации метод, позволяющий обнаружить образцы с аномальными характеристиками	Опасность отбраковать лучшие образцы
Статический ток потребления	Простой в реализации метод, позволяющий обнаружить внутренние паразитные сопротивления	Невозможность обнаружить малые дефекты изделий с высокой степенью интеграции
Динамический ток потребления	Метод, позволяющий обнаружить внутренние паразитные сопротивления и емкости	Высокая сложность реализации и обработки результатов
Критическое напряжение питания	Простой в реализации метод, позволяющий обнаружить внутренние паразитные сопротивления	Отсутствуют
Гистерезис параметров	Возможность обнаружения изделий с нестабильной конструкцией	Требуется высокоточная измерительная аппаратура и дорогостоящее испытательное оборудование
Анализ ВАХ	Возможность обнаружения дефектов $p-n$ -переходов	Отсутствует возможность диагностики $p-n$ -переходов внутренних вентилях микросхем
Радиационные методы	Обнаружение объектов с пониженной стойкостью к радиационному излучению	Высокая сложность реализации, опасность повреждения изделия
Низкочастотный шум	Обнаружение образцов с повышенным количеством примесей, дислокаций и микротрещин	Требуется высокоточное измерительное оборудование
Электростатический метод	Обнаружение объектов с пониженной стойкостью к электростатическому разряду	Высокая сложность реализации, опасность повреждения изделия

чего приходится определять границы с применением статистических методов.

Для решения данной проблемы предлагается организовать сотрудничество производителей изделий ЭКБ с испытательными центрами, которое должно заключаться в передаче испытательным центрам моделей, по которым можно было бы оценить степень изменения параметров изделия при внесении дефекта определенной величины в ту или иную часть изделия.

Кроме того, из таблицы следует, что ряд методов требует применения высокоточного измерительного оборудования и сложного испытательного оборудования, которое практически отсутствует на отечественном рынке. Применение оборудования иностранного производства влечет за собой определенные проблемы, связанные со стоимостью, сроками поставки и уровнем технической поддержки. Для решения данной проблемы необходима разработка собственного оборудования, способного обеспечить необходимый уровень точностей и воздействий.

Большой проблемой является то, что вследствие повышения степени интеграции современных изделий ЭКБ и применения принципиально новых материалов старые методы ДНК показывают низкую эффективность и их использование в процессе испытаний экономически невыгодно. Необходимо проводить работы, задействовав испытательные центры и производителей ЭКБ по совершенствованию старых методов и разработке новых. Работы должны включать в себя обязательную проверку эффективности методов ДНК, например при проведении корреляционного анализа результатов ДНК и ресурсных испытаний.

Кроме того, следует проводить корреляционный анализ результатов ДНК и ЭТТ. В случае получения высокой корреляции необходимо заменять длительную и дорогостоящую ЭТТ на ДНК.

На данный момент производители ЭКБ не признают результаты ДНК, проведенного в испытательном центре. Это приводит к тому, что у заказчика испытаний отсутствует возможность проведения рекламационных работ для изделий, забракованных по результатам ДНК. Для решения данной проблемы предлагается утвердить некоторые методы ДНК на уровне государственных или отраслевых стандартов.

Наиболее широко применяемые методы ДНК, такие как отбраковка по статическому и динамическому токам потребления, критическому напряжению питания и другое, имеют один общий недостаток: чтобы обнаружить дефект, его нужно обязательно «активировать», т. е. произвести переключение вентиля, содержащего дефект из одного логического состояния в другое. Таким образом, для обеспечения 100% тестового покрытия необходимо произвести переключение каждого вентиля изделия ЭКБ и при этом провести измерение информативного параметра, что затруднительно для современных микросхем. Таким образом, возникает необходимость разработки методов ДНК, воздействующих комплексно на все изделие и обнаруживающих наличие дефекта в любой точке структуры изделия, пусть и без возможности его локализации.

Наиболее часто встречающиеся внутренние дефекты современных КМОП-микросхем — это низкое сопротивление (в предельном случае — короткое замыкание) между двумя точками схемы там, где сопротивление должно быть максимальным, или большое сопротивление (в предельном случае — обрыв) между двумя точками там, где сопротивление должно быть минимальным. В иностранной литературе такие дефекты получили названия «Short» (замыкание) и «Open» (обрыв) [1].

Если дефект микросхемы невелик (например, замыкание выхода вентиля на питание через 10 кОм или неполный обрыв проводника между двумя вентилями, увеличивающий сопротивление цепи на 100 Ом и т. п.), он может быть не обнаружен при проведении обычного функционального и параметрического контроля по причине несовершенства тестов и характеристик контрольно-измерительного оборудования.

Однако когда такая микросхема проработает некоторое время в составе аппаратуры, размеры дефектов могут увеличиться, что приведет к отказу микросхемы. Таким образом необходимо обнаружить такие дефекты до этапа монтажа в аппаратуру. Вопросы обнаружения дефектов типа «замыкание» обсуждались в [2]. В данной статье приводится теоретическое обоснование методики поиска дефектов типа «обрыв».

Рассмотрим передаточную характеристику КМОП-вентиля (рис. 1). При напряжении на входе

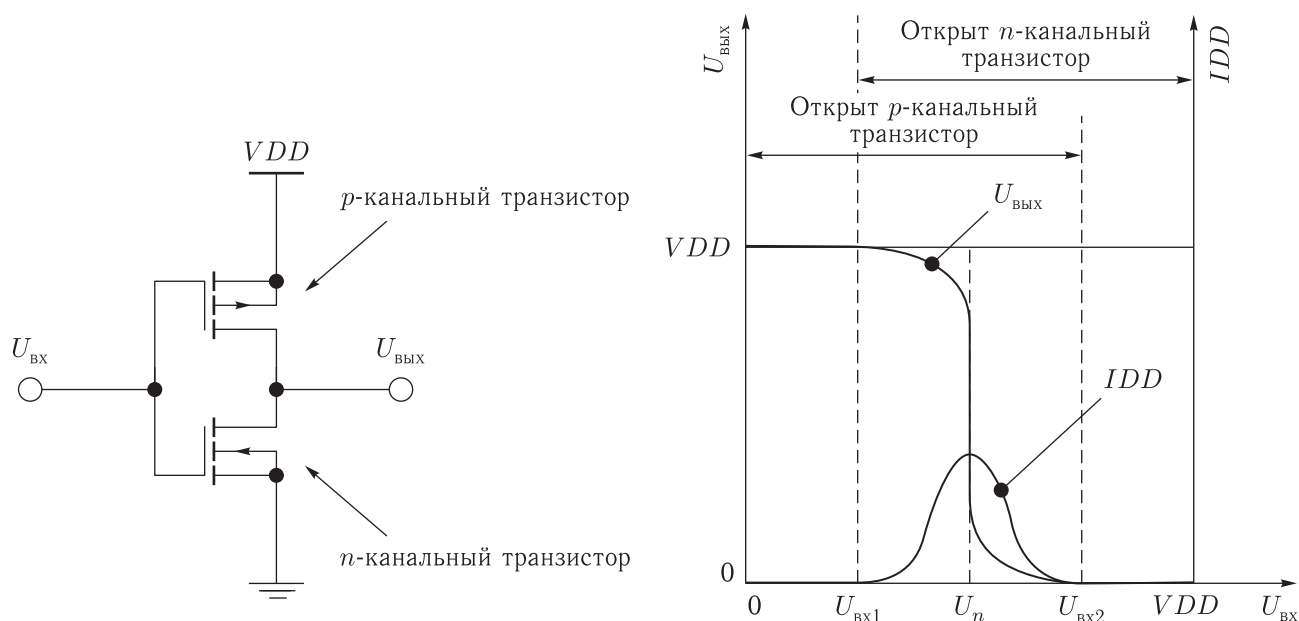
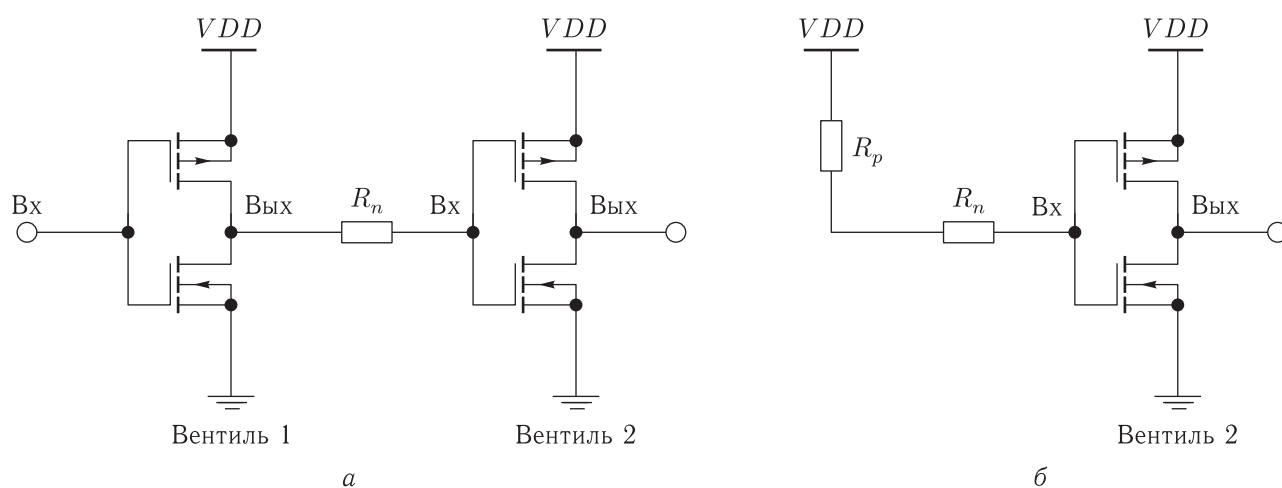


Рис. 1. Передаточная характеристика КМОП-инвертора

Рис. 2. Соединение двух вентилей через паразитное сопротивление R_n (а) и эквивалентная схема при напряжении на входе первого вентилей, равном 0 В (б)

вентилей $U_{ВХ}$ от 0 В до $U_{ВХ1}$ n -канальный транзистор закрыт, p -канальный транзистор открыт — связь между питанием и землей микросхемы отсутствует и ток потребления IDD практически равен нулю. Аналогичная ситуация наблюдается при нахождении напряжения на входе вентилей в диапазоне от $U_{ВХ2}$ до VDD , когда p -канальный транзистор закрыт, а n -канальный транзистор открыт. При напряжении на входе вентилей в диапазоне от $U_{ВХ1}$ до $U_{ВХ2}$ оба транзистора открываются, образуя

гальваническую связь между питанием и землей. В этом случае ток потребления микросхемы увеличивается, причем максимальным он будет при напряжении на входе вентилей, равном пороговому напряжению переключения U_n .

Дефекты типа «обрыв» в КМОП-структурах подразделяются на два основных типа: обрыв затвора и обрыв стока или истока. Рассмотрим первый тип — появление паразитного сопротивления R_n между выходом первого вентилей и входом

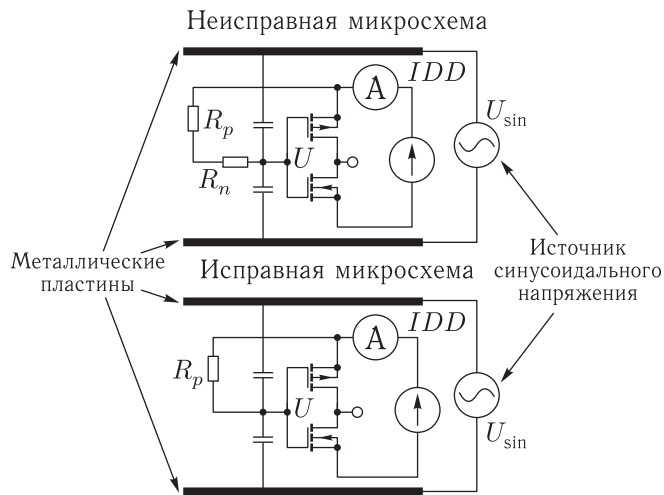
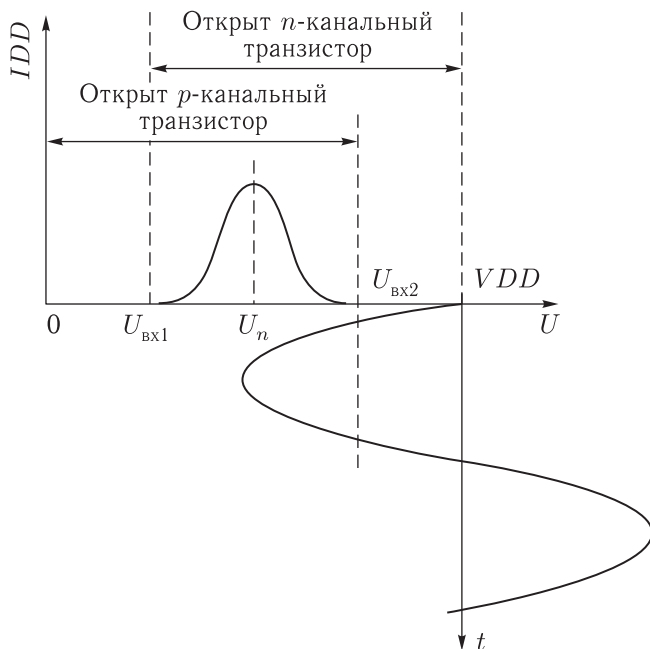
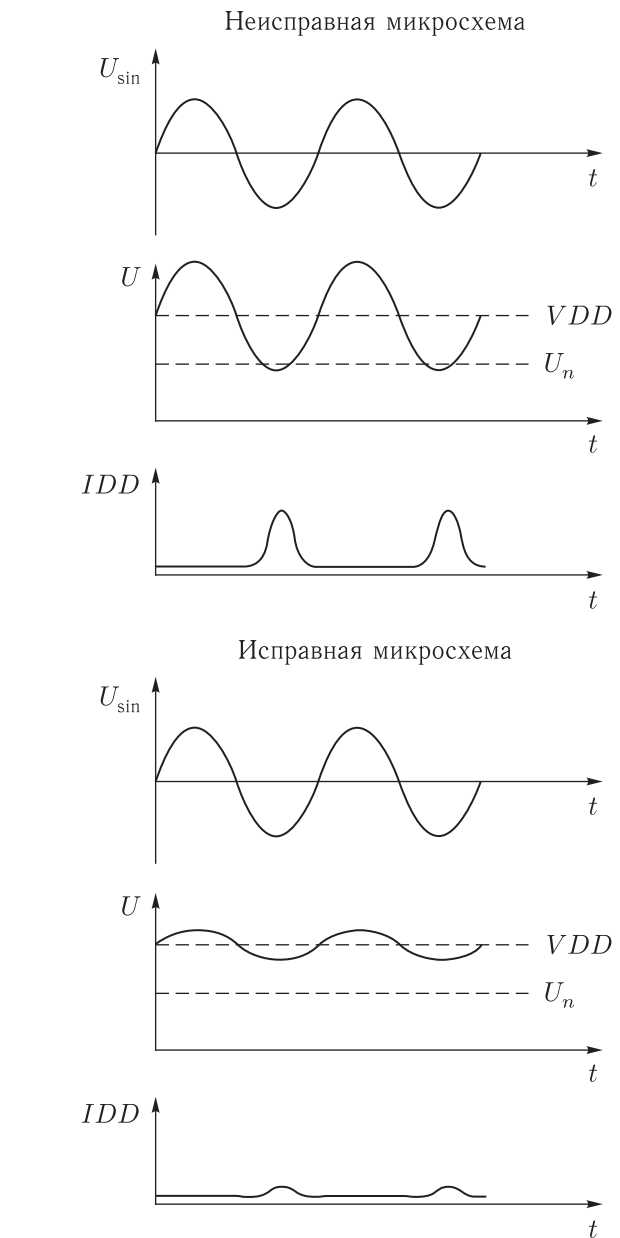


Рис. 3. Схема проведения эксперимента

Рис. 4. Появление импульса тока потребления I_{DD} при достижении помехи на входе вентиля U порогового значения U_n

второго вентиля (рис. 2, а). Допустим, на входе первого вентиля установлено 0 В. Тогда выход первого вентиля подключит вход второго вентиля к питанию через последовательное сопротивление своего p -канального транзистора R_p и паразитного сопротивления R_n (рис. 2, б).

Таким образом, по сравнению с исправной микросхемой, у микросхемы с дефектом вход вен-

Рис. 5. Различие осциллограмм тока потребления I_{DD} у исправной и неисправной микросхем при одном и том же уровне напряжения U_{sin}

тиля имеет более слабую связь с питанием, а следовательно, более подвержен воздействию наводок.

Поместим микросхему в переменное электрическое поле, расположив ее между двумя металлическими пластинами, к которым приложено синусоидальное напряжение, и произведем измерение тока потребления (рис. 3). Между каждой точкой микросхемы и металлическими пластинами

образуется емкость, следовательно, на входы всех вентилях микросхемы будет наводиться помеха, величину которой можно варьировать при помощи амплитуды и частоты синусоидального напряжения.

Уровень наводимой помехи U на входе вентиля неисправной микросхемы будет больше, чем у исправной. Увеличивая амплитуду и частоту синусоидального напряжения U_{sin} , можно добиться уровня помехи, достаточной для открытия p -канального транзистора (рис. 4).

В этом случае будет наблюдаться протекание сквозного тока потребления. У исправной микросхемы при тех же параметрах синусоидального напряжения уровень помехи будет значительно ниже и не приведет к переключениям вентиля (рис. 5).

Таким образом, варьируя параметры синусоидального сигнала и сравнивая токи потребления отдельных образцов одной партии микросхем, становится возможным выявить микросхемы с внутренними дефектами типа «обрыв».

Список литературы

1. *Segura J., Hawkins C.F.* CMOS Electronics: How It Works, How It Fails // Wiley-IEEE Press, 2004.
2. *Булаев И.Ю.* Диагностический неразрушающий контроль ЭКБ. Вариации метода критического напряжения питания // Материалы XII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2013. С. 256–259.