

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 004.052.42 + 537.862

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств

К.А. Бойков[®],
М.С. Костин,
Г.В. Куликов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: nauchnyi@yandex.ru

Резюме. Впервые разработан и представлен пассивный метод радиосенсорной диагностики целостности сигналов микропроцессорных устройств, основанный на регистрации электрической составляющей ближнего поля электромагнитных излучений, индуцируемых вследствие тактового формирования (непостоянства) импульсной характеристики цифровой цепи, обусловленной динамической перестройкой активной конфигурации ее внутрисхемной и периферийной архитектуры. Показано, что реальное излучение есть суперпозиция полей излучателей активной архитектуры микропроцессора, у каждого из которых своя импульсная и амплитудно-частотная характеристика со своими пиками и провалами, резонансами и возбуждениями. Представлено выражение для свободной составляющей при колебательном характере процесса перераспределения энергии между реактивными накопителями, зависящей от значений емкостей подзатворных диэлектриков МДП-транзисторов, барьерных и диффузионных емкостей p - n переходов, индуктивностей и омических сопротивлений элементов цепи и схемы их архитектурного соединения. Подготовлен и проведен эксперимент по методу пассивной радиоволновой технической диагностики микропроцессорных устройств на специально разработанном тестовом образце с известным алгоритмом выполнения команд. Представлены результаты регистрации серий сигнальных радиопрофилей при запуске образца цифрового устройства и проведена корреляционная оценка воспроизводимости эксперимента. Доказано, что на реперном сигнальном радиопрофиле формируются временные интервальные переходы свободных осцилляций, соответствующие обращению микроконтроллера к периферии по алгоритму командного функционирования образца. Показана возможность получения подробной информации о характере периферийной нагрузки и ее работоспособности посредством исследования соответствующих участков реперного сигнального радиопрофиля. Установлено, что на регистрируемых радиоизображениях четким образом идентифицируются спектрально-временные фреймы программно-аппаратного функционирования исследуемого цифрового устройства.

Ключевые слова: техническая диагностика, радиосенсорное сканирование, сигнальный радиопрофиль, микропроцессорное устройство, внутрисхемная архитектура, периферийная архитектура, целостность сигналов, электромагнитное излучение, свободные колебания

• Поступила: 23.03.2021 • Доработана: 05.04.2021 • Принята к опубликованию: 12.04.2021

Для цитирования: Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств. *Российский технологический журнал*. 2021;9(4):20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Radiosensory diagnostics of signal integrity in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices

Konstantin A. Boikov[@],
Mikhail S. Kostin,
Gennady V. Kulikov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: nauchnyi@yandex.ru

Abstract. For the first time, a passive method for radiosensor diagnostics of the integrity of signals from microprocessor devices was developed and presented. The method is based on the registration of the electrical component of the near field of electromagnetic radiation induced as a result of the clock formation (variability) of the impulse response of a digital circuit caused by the dynamic restructuring of the active configuration of its in-circuit and peripheral architecture. It is shown that real radiation is a superposition of fields of emitters of the active architecture of a microprocessor, each of which has its own impulse and amplitude-frequency characteristics with its own peaks and dips, resonances and excitations. An expression of the free component is presented for the oscillatory nature of the process of energy redistribution between reactive storage devices, which depends on the capacitances of the gate dielectrics of MIS transistors, barrier and diffusion capacities of *p-n* junctions, inductances and ohmic resistances of circuit elements and the scheme of their architectural connection. An experiment was prepared and carried out on the method of passive radio-wave technical diagnostics of microprocessor devices on a specially developed test sample with a known command execution algorithm. The results of registration of a series of signal radio profiles when starting a sample of a digital device are presented, and a correlation assessment of the reproducibility of the experiment is carried out. It is proved that time interval transitions of free oscillations are formed on the reference signal radio profile. These transitions correspond to the microcontroller's reference to the periphery according to the algorithm of the command functioning of the sample. The possibility of obtaining detailed information about the nature of the peripheral load and its performance by examining the corresponding sections of the reference signal radio profile is shown. It was found that the spectral-time frames of the software and hardware functioning of the digital device under study are clearly identified on the recorded radio images.

Keywords: technical diagnostics, radio sensor scanning, signal radio profile, microprocessor device, in-circuit architecture, peripheral architecture, signal integrity, electromagnetic radiation, free oscillations

• Submitted: 23.03.2021 • Revised: 05.04.2021 • Accepted: 12.04.2021

For citation: Boikov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. Radiosensory diagnostics of signal integrity in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(4):20–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-4-20-27>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Активное применение цифровых микропроцессорных устройств (ЦМУ) стало неотъемлемой частью производственного и техносферного обеспечения стратегически важных отраслей радиоэлектронного сектора экономики. Рост автоматизированного управления на любом направлении деятельности современного общества сопровождается стремительным развитием и усложнением уже существующих ЦМУ. Одновременно с этим, непрерывно возрастающие требования к надежности сложных аппаратно-программных систем [1], от правильной работы которых зависят, в конечном счете, здоровье и жизнь людей, контроль состояния окружающей среды, устойчивое производство и военно-экономическая безопасность, вызывают необходимость создания эффективных методов технической диагностики (ТД) целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств [2]. Очевидно, что во время работы ЦМУ не исключены отказы, частичное или полное прекращение функционирования – сбой алгоритма, системное «зависание», внештатное командное прерывание или перегрев в результате естественного старения материалов самого кристалла и радиокомпонентов цепей обвязки, наводимых электромагнитных и электростатических полей, нарушения условий эксплуатации и т.д. [3]. Выявление и устранение причин появления дефектов, приводящих к нарушению функционированию ЦМУ, является на сегодняшний день актуальной задачей их эффективной ТД. При этом особенно важно выявлять возможные причины отказа ЦМУ на ранних этапах, заблаговременно предшествующих сбою работы той или иной радиоэлектронной системы.

Сегодня под ТД в общем смысле следует понимать отрасль научно-технических знаний, сущность которой составляют теория, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы [2]. Области применения ТД расширяются, так как она становится гарантией надежности и достоверного функционирования ЦМУ. ТД ЦМУ можно разбить на следующие две основные задачи: текущий контроль (мониторинг функционирования в допустимых интервалах) и автоматическая защита (при опасных отклонениях вводится противодействие фактору, вызвавшему отклонение).

Одними из проверенных и отработанных производственных средств для выполнения ТД ЦМУ являются внутрисхемные технологии JTAG-тестирования, известные также под названием «граничное сканирование» [4]. Задачи ТД, решаемые в рамках JTAG-технологий, относятся к системно ограниченному обнаружению структурных, по большей части программных, а не функционально-аппаратных

неисправностей. При этом для применения технологии JTAG-тестирования необходим гальванический доступ к возможным местам возникновения этих неисправностей посредством JTAG-регистра, если речь идет о тестировании на уровне отдельных плат или систем, или посредством так называемой JTAG-оболочки, если речь идет о тестировании на уровне арифметико-логического устройства микропроцессора [5].

Следует заметить, что ни одна из совершенных производственных технологий структурного тестирования на сегодняшний день не обеспечивает полного покрытия дефектов, следовательно, для обеспечения приемлемого уровня ТД используются комбинации различных технологий, необходимых для тех типов неисправностей, в которых они максимально эффективны, в том числе основанных на бесконтактных методах радиоволновой диагностики.

В работе приводится новый пассивный метод диагностики функционирования ЦМУ – пассивная радиоволновая ТД – основанный на регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений, индуцируемых вследствие тактового формирования импульсной характеристики цепей ЦМУ, обусловленной динамической перестройкой активной конфигурации внутрисхемной и периферийной архитектуры ЦМУ. Предлагаемый метод откроет новые возможности радиосенсорной ТД для обнаружения сигнально-архитектурных и функциональных неисправностей ЦМУ, которые невозможно идентифицировать при помощи JTAG-технологий.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПАССИВНОЙ РАДИОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Метод пассивной радиосенсорной ТД основан на регистрации и анализе во временной области электрической составляющей электромагнитных излучений ($E_{\text{И}}$), существующих в диапазоне частот 1 кГц ... 10 ГГц, создаваемых самими ЦМУ. Данное излучение отражает процесс функционирования устройства, а полученный при регистрации $E_{\text{И}}$ сигнальный радиопрофиль (СРП) корректно функционирующего ЦМУ возможно занести в электронную базу в качестве репера для дальнейшей постобработки.

Модуль электрической составляющей электромагнитных излучений в случае ЦМУ при тактировании определяется как [6]

$$|E_{\text{И}}| = 2 \cdot A \cdot \frac{\sin(\tau \pi f n)}{\pi n}, \quad (1)$$

где τ – длительность тактового импульса; n – число тактовых импульсов; f – частота следования импульсов тактирования; A – амплитуда возбуждения при переключении состояния периферии.

Следует понимать, что реальное излучение есть суперпозиция полей излучателей активной архитектуры ЦМУ, у каждого из которых своя импульсная и амплитудно-частотная характеристика со своими пиками и провалами, резонансами и возбуждениями. Однако функционирование ЦМУ связано с тактированием, т.е. возбуждения, возникающие при взаимодействии микропроцессора с периферией, разнесены во времени.

Узлы и элементы электронной аппаратуры, в которых имеют место большие напряжения и протекают малые токи, создают в ближней зоне побочного излучения электромагнитные поля с преобладанием электрической компоненты [7].

Как правило, все ЦМУ имеют стабилизацию по питанию в виде шунтирующего керамического конденсатора (емкостной группы), поэтому при подаче напряжения питания возникает перераспределение энергии между элементами фильтрации и паразитными индуктивностями (далее – накопителями), которое имеет колебательный характер. Скорость затухания колебаний будет зависеть от соотношения нагрузочных параметров потребителей (ядро ЦМУ и его периферия) и накопителей, причем чем меньше нагрузка потребителя, тем медленнее будут затухать колебания.

Поскольку в ЦМУ взаимодействие с периферией (конфигурация портов общего назначения, переключение и чтение АЦП, управление нагрузкой и т.д.) осуществляется с каждым тактом, то здесь также имеют место возникновения колебательного перераспределения энергии между накопителями, в роли которых выступают емкости подзатворных диэлектриков МДП-транзисторов, барьерные и диффузионные емкости p - n переходов [8].

Аналитически отношение величины нагрузок потребителей и накопителей определяется значением корней характеристического уравнения, составленного для электрической цепи [9]. В общем случае по законам Ома и Кирхгофа составляются уравнения электромагнитного состояния цепи для мгновенных значений напряжений и токов

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = V_{CC}, \quad (2)$$

где i – ток, протекающий в цепи; R – омическое сопротивление токопроводящих соединителей; L – индуктивность накопителей; C – емкость накопителей; V_{CC} – напряжение питания.

Поскольку интерес представляет регистрация электрической составляющей электромагнитных излучений, то целесообразно получить уравнение относительно напряжения U . Подставив в (2) значение тока через емкостный накопитель $i = C \frac{dU}{dt}$, получим

$$RC \frac{dU}{dt} + LC \frac{d^2U}{dt^2} + U = V_{CC}. \quad (3)$$

При этом выражение (3) может быть записано как характеристическое уравнение:

$$RCp + LCp^2 + 1 = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) – решение с нулевой правой частью, соответствует режиму, когда внешняя принуждающая сила источника V_{CC} на цепь непосредственно не воздействует. Влияние V_{CC} проявляется здесь через энергию, запасенную в полях индуктивных и емкостных накопителей. То есть, речь идет о свободном режиме работы и общее решение уравнения (4) называется свободной составляющей (U_{CB}).

Выражение для свободной составляющей определяется видом корней характеристического уравнения и зависит от значений параметров элементов цепи (R , L , C) и схемы их соединений. При колебательном характере процесса перераспределения энергии между накопителями корни характеристического уравнения (4) комплексно-сопряженные $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega$, а выражение свободной составляющей имеет вид [10]:

$$U_{CB}(t) = Xe^{-\delta t} \sin(\omega t), \quad (5)$$

где X – постоянная интегрирования, зависящая от значений параметров накопителей; δ – коэффициент затухания; ω – угловая частота.

Таким образом, после подачи напряжения питания и запуска тактового генератора ЦМУ возможна регистрация и идентификация СРП электрической составляющей электромагнитных излучений, созданных самим устройством. В результате колебательного характера процесса перераспределения энергии между накопителями (динамической перестройки периферийной архитектуры ЦМУ) профиль временного перераспределения электрической компоненты ближнего поля несет информацию о настройке микропроцессора на функционирование, подключении нагрузок, чтения данных из аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [11] и прочее взаимодействие с периферией.

2. ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального исследования излучения ЦМУ разработан экспериментальный образец, состоящий из микроконтроллера ATmega16 (DD1) [12], обвязочных компонентов ($R1$, $R2$, $C1$, $C2$), периферийной нагрузки в виде светодиода ($HL1$). Принципиальная электрическая схема прототипа ЦМУ приведена на рис. 1 (неиспользуемые выводы DD1 скрыты).

В функциональном состоянии ЦМУ работает по заданному алгоритму. После подачи питания от источника Б1 посредством ключа SA1 контроллер DD1 конфигурируется на функционирование: настраивает порт A.4 на выход (вывод 36 DD1) и подключает его к потенциалу питания (таким образом загорается светодиод HL1); порт A.3 (вывод 37 DD1) настраивается как АЦП с разрядностью 10 бит и возможностью чтения напряжения на входе X2. Подачей напряжения низкого уровня на вход X1 осуществляется сброс микроконтроллера на выполнение начального конфигурирования.

Для регистрации СРП электрической составляющей электромагнитных излучений в эксперименте использовались сверхбыстродействующий осциллограф реального времени DSOS604A (6 ГГц) и логопериодическая сверхширокополосная антенна с рабочим диапазоном от 80 МГц до 2 ГГц (рис. 2).

При подаче питающего напряжения на микропроцессорное устройство (МУ) принятый логопериодической антенной (А) СРП, обнаруживается и

регистрируется сверхбыстродействующим осциллографом реального времени (БО). Далее полученные данные передаются в персональный компьютер (ПК) с возможностью постобработки и корреляционного анализа полученных значений.

Пуск микроконтроллера происходит при подаче напряжения питания на его вывод V_{CC} , все регистры ввода-вывода переводятся в исходное состояние, и в счетчик команд записывается начальный адрес. По истечении интервала времени t (как правило, несколько микросекунд), необходимого для стабилизации напряжения питания и запуска тактового генератора, микроконтроллер приступает к выполнению программы, начиная с команды, записанной в его памяти по нулевому адресу (рис. 3).

На рис. 3 представлен СРП (график (а) на рис. 3) суперпозиции полей излучения связанных с наличием накопителя в виде фильтрующей емкости C2 и включением блока компаратора напряжения (BODLEVEL). Далее идут свободные колебания

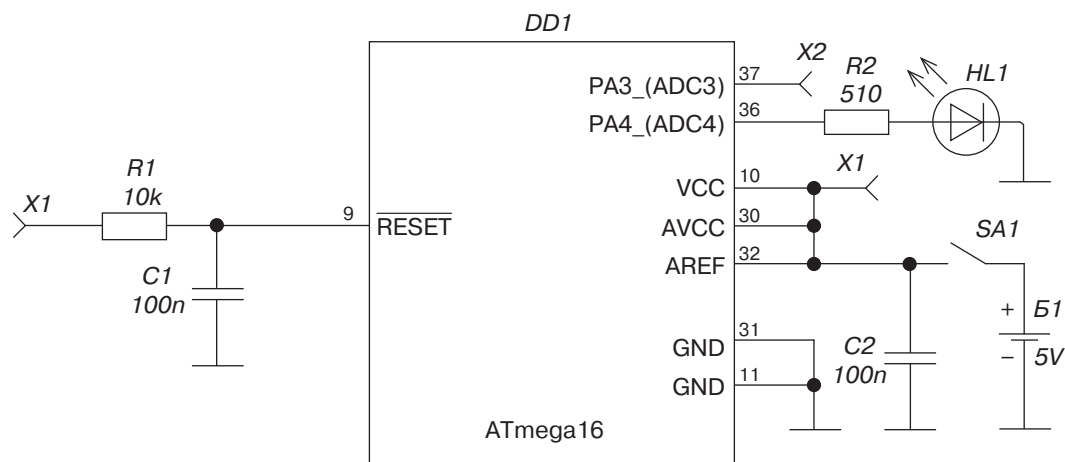


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема прототипа экспериментального образца

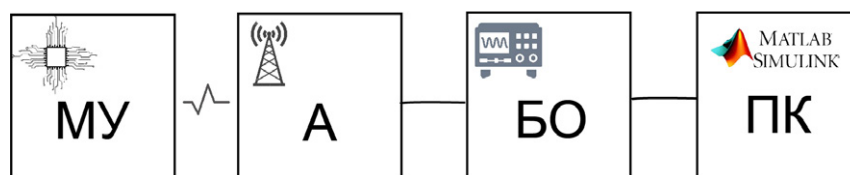


Рис. 2. Блок-схема проведения эксперимента

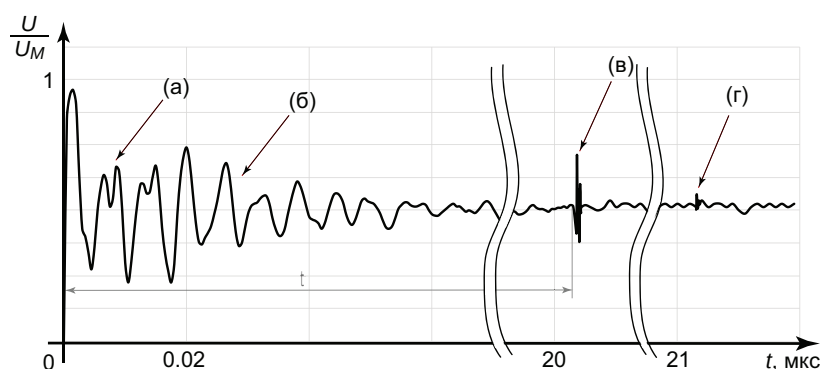


Рис. 3. Осциллограмма приведенного СРП функционирования экспериментального образца ЦМУ

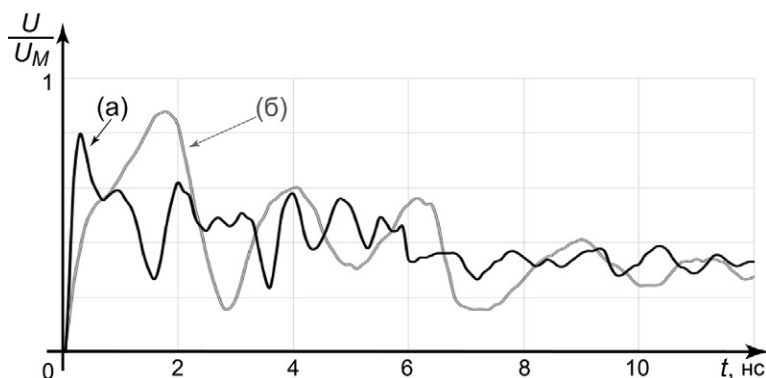


Рис. 4. Осциллограмма приведенного СРП при активации нагрузки

(график (б) на рис. 3), описываемые выражением (5) и связанные только с перераспределением энергии в фильтрующей цепи. Выполнение программы (график (в) на рис. 3) начинается через интервал стабилизации t с настройки порта А.4 на выход и подключения его к потенциалу питания. Небольшой всплеск (график (г) на рис. 3) на СРП функционирования тестового образца связан с чтением показания АЦП на входе Х2.

Для оценки воспроизводимости СРП функционирования одного и того же ЦМУ необходимо провести серию измерений и вычислить взаимную корреляцию r [13]:

$$r = \frac{\sum (Y_{1,i} - \bar{Y}_1) \cdot (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\sum (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)^2 \cdot \sum (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)^2}}, \quad (6)$$

где $Y_1 = \frac{U}{U_M}$ — выборки значений сигнала (а);

$Y_2 = \frac{U_B}{U_{MB}}$ — выборки значений сигнала (б);

$\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{1,i}$, $\bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{2,i}$ — средние значения выборок; M — число выборок.

Используя выражение (6), получим, что при числе выборок $M = 100$ взаимная корреляция между любым из полученных СРП $r > 0.9$, что говорит о существенном сходстве исследуемых радиоизображений [7].

С точки зрения ТД интересна область (в) настройки порта А.4 на выход и подключения его к потенциалу питания, что приводит к активизации нагрузки в виде включения светодиода HL1. На рис. 4 представлены два СРП активизации нагрузки: (а) — нагрузка исправна; (б) — нагрузка повреждена (отсутствует).

В случае исправной нагрузки (график (а) на рис. 4) СРП представляет суперпозицию полей излучения, связанных с барьерной и диффузионной емкостью светодиода, а также емкостями подзатворного диэлектрика и емкостью сток-подложка МДП-транзистора

(ключа), коммутирующего порт общего назначения. Когда же нагрузка неисправна или отсутствует (график (б) на рис. 4), СРП представляет собой перераспределение энергии в накопителях, связанных только с емкостью подзатворного диэлектрика и емкостью сток-подложка МДП-транзистора (ключа).

Следует заметить, что перераспределение энергии (динамичность активной архитектуры) при запираании и отпираании транзисторного ключа на полевом транзисторе сопровождается появлением импульсов (колебаний) в выходной цепи [14, 15]. Размах и форма данных импульсов зависят от параметров полевого транзистора и формы управляющего напряжения. В общем же случае перераспределение энергии в $p-n$ переходах связано с двумя процессами. Первый — накопление неосновных носителей заряда в базе при прямом смещении $p-n$ перехода и рассасывание при уменьшении управляющего напряжения. Электрическое поле в базе обычно невелико, и движение неосновных носителей определяется законами диффузии; накопление носителей и их рассасывание влияют на свойства $p-n$ перехода в режиме переключения. Второй — инерционный процесс перезарядки барьерной емкости $p-n$ перехода, что также влияет на его свойства [8].

Становится очевидно, что, зная реперный СРП, СРП исследуемого ЦМУ, частоту и коэффициент затухания возмущений, возможно судить не только характере и исправности нагрузки, но и о функционировании ЦМУ в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывают научно-практические исследования, на основе которых разрабатываются промышленные методики ТД ЦМУ, далеко не все проблемы ТД микропроцессорных устройств к настоящему времени решены, и не для каждой из них можно представить рамки возможных радиотехнических решений, которые вследствие молниеносного развития самих цифровых устройств постоянно сдвигаются и размываются [2, 3, 5]. Несмотря на это, ТД необходима и также стремительно

развивается как в области программных средств, так и в аппаратной среде.

В работе впервые представлен метод пассивной радиоволновой технической диагностики ЦМУ, основанный на регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений, индуцируемых вследствие непрерывного тактового формирования импульсной характеристики цифровой цепи, обусловленной динамической перестройкой активной конфигурации ее внутрисхемной и периферийной архитектуры. На основе физико-математического обоснования предложенного метода был разработан экспериментальный образец ЦМУ и проведено лабораторное испытание, подтверждающее воспроизводимость эффективной регистрации переключения режимов и выявления дефектов в архитектуре ЦМУ при помощи радиосенсорного сканирования. В ходе эксперимента были сняты серии СРП, показавшие воспроизводимость по взаимной корреляции не хуже 0.9.

При более детальном исследовании СРП была показана возможность оценки корректности

функционирования ЦМУ в программной и аппаратной воспроизводимой области. Также показана возможность исследования характера нагрузки, ее параметров и исправного функционирования.

Предлагаемый метод пассивной радиоволновой технической диагностики, основанный на регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений, создаваемых самими ЦМУ, открывает новые возможности ТД для дистанционного обнаружения структурных, функционально-аппаратных неисправностей и целостности сигналов ЦМУ, что особенно актуально при исследовании ЦМУ, эксплуатируемых в условиях, где полностью/частично исключается эффективность или возможность применения технологии JTAG-тестирования, требующей надежного гальванического доступа к опросу параметров аппаратной обвязки радиоэлектронного изделия [10, 14].

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петушков Г.В. Оценка и прогнозирование надежности для высоконадежных программно-аппаратных систем на примере центров обработки данных. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):21–26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-21-26>
2. Еременко В.Т. и др. *Техническая диагностика электронных средств*. Орел: ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК»; 2012. 157 с. ISBN 978-5-93932-424-3
3. Воробьев Ю.М. Методы контроля, обнаружения и диагностики неисправности цифровых устройств на ранних этапах отказов. В сб.: «Вузовская наука в современных условиях»: сб. мат. 54-й научно-технической конференции. Ульяновск: УлГТУ; 2020. С. 100–103.
4. Куликов Г.В., Костин М.С., Воруничев Д.С. Реинжиниринг изделий электронных средств в задачах внутрисистемного контррадиопротиводействия. *Вестник РАЕН*. 2018;18(3):75–86.
5. Hu Y., Li W., Wang Y.F., Jin G., Jiang X. A JTAG-based management bus on backplane for modular instruments. *Journal of Instrumentation*. 2019;14(9):T09002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/T09002>
6. Васильев Р.А., Ротков Л.Ю. *Обнаружение побочных электромагнитных излучений и наводок с помощью программно-аппаратного комплекса «Легенда»*. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет; 2018. 45 с.
7. Костин М.С., Бойков К.А. *Радиоволновые технологии субнаносекундного разрешения: монография*. М.: РТУ МИРЭА; 2021. 142 с.
8. Ткаченко Ф.А. *Электронные приборы и устройства*. М.: Инфра-М; 2018. 156 с.
9. Башарин С.А. *Теоретические основы электротехники*. М.: Академия; 2018. 192 с.

REFERENCES

1. Petushkov G.V. Evaluation and reliability prediction for highly reliable software and hardware systems: The case of data processing centers. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):21–26 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-21-26>
2. Eremenko V.T., et al. *Tekhnicheskaya diagnostika elektronnykh sredstv (Technical diagnostics of electronic devices)*. Orel: FGBOU VPO “Gosuniversitet – UNPK”; 2012. 157 p. (in Russ.). ISBN 978-5-93932-424-3
3. Vorob'ev Yu.M. Methods for monitoring, detecting and diagnosing the malfunction of digital devices in the early stages of failures. In: “Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh”: sb. mat. 54 nauchno-tekhnicheskoi konf. (Collection of materials of the 54th scientific and technical conference “University science in modern conditions”). Ul'yanovsk: UlGTU; 2020, p. 100–103. (in Russ.).
4. Kulikov G.V., Kostin M.S., Vorunichev D.S. Reengineering of electronic devices in the problems of insert system counterradiointerference. *Vestnik RAEN = Bulletin of Russian Academy of Natural Sciences*. 2018;18(3):75–86 (in Russ.).
5. Hu Y., Li W., Wang Y.F., Jin G., Jiang X. A JTAG-based management bus on backplane for modular instruments. *Journal of Instrumentation*. 2019;14(9):T09002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/T09002>
6. Vasil'ev R.A., Rotkov L.Yu. *Obnaruzhenie pobochnykh elektromagnitnykh izluchenii i navodok s pomoshch'yu programmno-apparatnogo kompleksa “Legenda” (Detection of spurious electromagnetic radiation and interference using the Legend software and hardware complex)*. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskii gosuniversitet; 2018. 45 p. (in Russ.).

10. Костин М.С., Ворунинчев Д.С. *Реинжиниринг радиоэлектронных средств*. М.: МИРЭА; 2018. 131 с. ISBN 978-5-7339-1466-4
11. Osolinskiy O., Kochan V., Dombrovskiy Z., Sachenko A., Kochan O. ADC for energy measurement systems of microcontroller. In: *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2019, p. 1012–1019. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924462>
12. Очкуренко Г.О. Программирование микроконтроллеров семейства AtMega на базе системы Arduino. *Теория и практика современной науки*. 2019;4(46):178–183.
13. Бойков К.А. Разработка и исследование системы радиоимпульсной регенерации для устройств высокоскоростной стробоскопической оцифровки. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf>
14. Костин М.С., Ворунинчев Д.С., Марков Д.В. Реинжиниринговые исследования печатных плат с многослойной топологией в аспектах обеспечения технического противодействия. *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2018;1(137):47–56.
15. Костин М.С., Ворунинчев Д.С., Марков Д.В. Реинжиниринг радиоэлектронных цепей и сигналов печатных узлов с многослойной топологией в аспектах обеспечения технического противодействия. *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2018;3(139):49–56.
7. Kostin M.S., Boikov K.A. *Radiovolnovye tekhnologii subnanosekundnogo razresheniya: monografiya (Radio wave technologies of subnanosecond resolution: monograph)*. Moscow: RTU MIREA; 2021. 142 p. (in Russ.).
8. Tkachenko F.A. *Elektronnye pribory i ustroystva (Electronic devices and devices)*. Moscow: Infra-M; 2018. 156 p. (in Russ.).
9. Basharin S.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki (Theoretical foundations of electrical engineering)*. Moscow: Akademiya; 2018. 192 p. (in Russ.).
10. Kostin M.S., Vorunichev D.S. *Reinzhiniring radioelektronnykh sredstv (Reengineering of radio electronic means)*. Moscow: MIREA; 2018. 131 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7339-1466-4
11. Osolinskiy O., Kochan V., Dombrovskiy Z., Sachenko A., Kochan O. ADC for energy measurement systems of microcontroller. In: *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2019, p. 1012–1019. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924462>
12. Ochukurenko G.O. Programming of microcontrollers of AtMega family on the basis of Arduino system. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki = Theory and Practice of Modern Science*. 2019;4(46):178–183 (in Russ.).
13. Boikov K.A. Development and research of a radio pulse regeneration system for high-speed stroboscopic digitizing devices. *Zhurnal Radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2018;3 (in Russ.). Available from URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf>
14. Kostin M.S., Vorunichev D.S., Markov D.V. Reengineering study of PCB with multi-layer topology in aspects ensuring technical counteraction. *Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*. 2018;1(137):47–56 (in Russ.).
15. Kostin M.S., Vorunichev D.S., Markov D.V. Reengineering of electronic circuits and signals of node PCB with multi-layer topology in aspects ensuring technical counteraction. *Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*. 2018;3(139):49–56 (in Russ.).

Об авторах

Бойков Константин Анатольевич, к.т.н., доцент, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nauchnyi@yandex.ru. Scopus Author ID 57208926258.

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671.

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

About the authors

Konstantin A. Boikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nauchnyi@yandex.ru. Scopus Author ID 57208926258.

Mikhail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671.

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>