

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 537.874

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>

Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики

К. А. Бойков✉

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

✉ nauchnyi@yandex.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время техническая диагностика (ТД) стремительно развивается как в области программных средств, так и в аппаратной среде. Несмотря на это современные методы ТД (виброметрия, тепловой контроль, JTAG-тестирование, оптический контроль) либо обладают высокой инерцией, занимают процессорное время, требуют остановки функционирования электронного устройства, либо требуют гальванического контакта с объектом исследования, что зачастую недопустимо. Данные недостатки позволяет устранить пассивная радиосенсорная ТД. В современной научной литературе практически не определены параметры технического диагностирования электронных устройств, которые она обеспечивает.

Цель работы. Представление параметров электронных устройств, оценку которых может обеспечить пассивная радиосенсорная ТД.

Материалы и методы. Для получения сигнальных радиопрофилей использовались методы проведения экспериментальных исследований с применением метрологического оборудования, программно-численные методы моделирования радиоволновых процессов и анализа результатов. С целью нахождения параметров сигнального радиопрофиля использовался математический метод решения дифференциальных уравнений.

Результаты. Освещены основные принципы, результаты и инструментарий радиосенсорной ТД. Получено уравнение для сигнального радиопрофиля, излучаемого электронным узлом устройства, а также выражение для его свободных составляющих. Показан способ оценки корректности проведения ТД при известном числе свободных составляющих принятого сигнального радиопрофиля и репера. Представлена возможность получения информации о температуре, падении напряжения, быстродействии излучающих узлов, а также состоянии входящих в него компонентов и режимах работы p - n -переходов. Показано, что данную информацию несут в себе параметры уравнения для сигнального радиопрофиля.

Заключение. Полученное основное уравнение позволяет провести бесконтактную, дистанционную пассивную радиосенсорную ТД не только методом корреляционного анализа принятого сигнала, но и с детальным разбором типа неисправности каждого электронного узла. Данный метод ТД с использованием значений представленных параметров открывает новые возможности в области исследования технического состояния электронных устройств.

Ключевые слова: техническая диагностика, сигнальный радиопрофиль, свободные колебания, время затухания, суперпозиция излучений

Для цитирования: Бойков К. А. Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 6. С. 63–70. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021; принята к публикации после рецензирования 19.12.2021; опубликована онлайн 29.12.2021



Determination of Parameters of Electronic Devices by the Method of Passive Radio-Sensor Technical Diagnostics

Konstantin A. Boikov✉

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

✉ nauchnyi@yandex.ru

Abstract

Introduction. Technical diagnostics (TD) as a nascent discipline is rapidly developing in the field of both software and hardware. Modern TD methods, such as vibrometry, thermal control, JTAG testing and optical control, either exhibit high inertia, consume processor time, require suspension of the electronic device, or demand a galvanic contact with the study object, which is often unacceptable. These disadvantages can be eliminated by passive radio-sensor TD. To date, little information has been published on the parameters of electronic devices provided by this method.

Aim. Determination of the parameters of electronic devices, the assessment of which can be provided by passive radio-sensor TD.

Materials and methods. Signal radio profiles were obtained experimentally using metrological equipment and software-numerical methods for modeling radio wave processes. The parameters of the signal radio profile were calculated by a mathematical method for solving differential equations.

Results. The main principles and results of radio-sensor TD, as well as the simplest toolkit, are shown. An equation is obtained for the signal radio profile emitted by the electronic unit of the device, as well as an expression for its free components. An approach for assessing the TD correctness based on the number of free components of the received signal radio profile and the reference is described. The possibility of obtaining information about temperature, voltage drop, speed of emitting nodes, as well as the state of its components and modes of operation of *p-n*-junctions is demonstrated. It is shown that this information is carried by the parameters of the basic equation for the signal radio profile.

Conclusion. The derived basic equation allows a non-contact, remote passive radio-sensor TD to be conducted by correlation analysis of the received signal, providing a detailed examination of malfunctions in each electronic unit. The described TD method based on the presented parameters is promising for assessing the technical state of electronic devices.

Keywords: technical diagnostics, signal radio profile, free oscillations, decay time, radiation superposition

For citation: Boikov K. A. Determination of Parameters of Electronic Devices by the Method of Passive Radio-Sensor Technical Diagnostics. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 6, pp. 63–70. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 22.11.2021; accepted 19.12.2021; published online 29.12.2021

Введение. Техническая диагностика (ТД) относительно молодая наука и в общем смысле представляет отрасль научно-технических знаний, состоящих из теории, методов и средств обнаружения дефектов объектов технической природы [1]. Методы ТД непрерывно совершенствуются, а области применения расширяются, так как ТД становится основным способом подтверждения надежности функционирования электронных устройств. Развитием ТД является метод пассивной радиосенсорной технической диагностики (ПРТД), впервые представленный в [2], основанный на регистрации электрической составляющей ближнего поля электро-

магнитных излучений, возникающих при перераспределении энергии в реактивных накопителях электронных узлов. В отличие от известных методов ТД (виброметрия, тепловой контроль, оптический контроль) ПРТД не требует гальванического контакта с исследуемым образцом, не занимает процессорное время и не влияет на объект исследования. Это является бесспорным преимуществом ПРТД перед современными методами ТД, в том числе и перед одним из отработанных производственных средств для выполнения ТД – JTAG-тестированием, известным также под названием "граничное сканирование" [3].

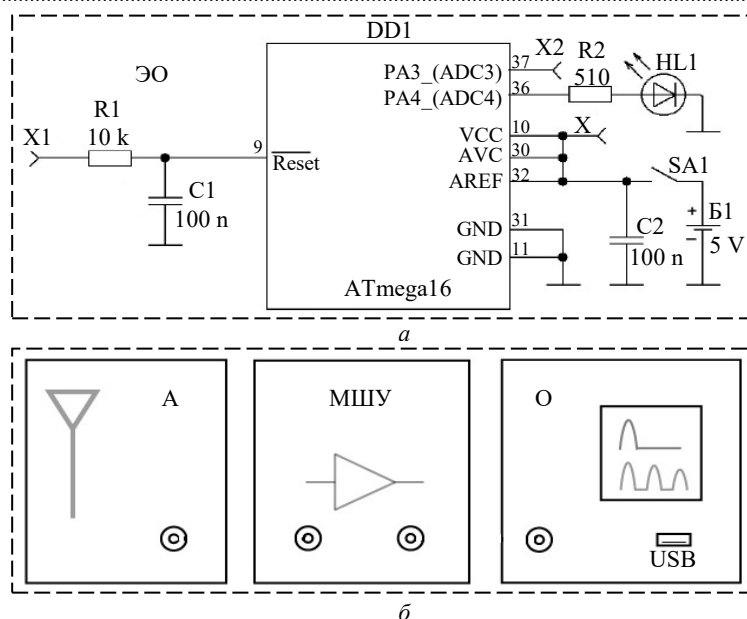


Рис. 1. Структурная схема измерительного экспериментального стенда:
 а – экспериментальный образец; б – измерительный стенд

Fig. 1. Block diagram of the measuring experimental stand: а – experimental sample; б – measuring stand

Материалы и методы. Как и любой другой метод ТД, ПРТД имеет свой инструментарий, а также набор диагностируемых параметров, явно или косвенно получаемых в результате исследований. Базовым применением ПРТД является сравнение полученного от объекта излучения или сигнального радиопрофиля (СРП), отражающего процесс его функционирования, с СРП корректно функционирующего аналогичного устройства (репером) для дальнейшей постобработки методами корреляционного анализа.

Структурная схема измерительного экспериментального стенда для осуществления метода ПРТД представлена на рис. 1.

Экспериментальный образец (ЭО) (рис. 1, а) состоит из микроконтроллера ATmega16 (DD1) [4], обвязочных компонентов (R1, R2, C1, C2) и периферийной нагрузки в виде светодиода (HL1). Выбор микроконтроллера для ЭО не случаен, поскольку гибкость и простота его конфигурации позволяют проводить эксперименты наиболее эффективно. В функциональном состоянии ЭО работает по заданному алгоритму. После подачи питания от источника Б1 посредством ключа SA1 контроллер DD1 конфигурируется на функционирование: настраивает порт А4 на выход (вывод 36 DD1) и подключает его к потенциалу питания, запуская светодиод HL1. Подачей напряжения низкого уровня на вход X1 осуществляется сброс микроконтроллера на выполнение начального конфигурирования.

При подаче питающего напряжения на ЭО

излученный СРП принимается широкополосной измерительной рупорной антенной Пб-123 (А) и усиливается малошумящим сверхширокополосным усилителем (МШУ) LNA 10M-8GHz. Усиленный СРП обнаруживается и регистрируется сверхбыстродействующим осциллографом (О) реального времени R&H RTP164. Далее полученные данные загружаются в персональный компьютер для постобработки и корреляционного анализа полученных значений.

На рис. 2 представлены 2 СРП ключевого элемента порта общего назначения микроконтроллера AtMega16 в момент активации нагрузки HL1: 1 – нагрузка исправна, 2 – нагрузка

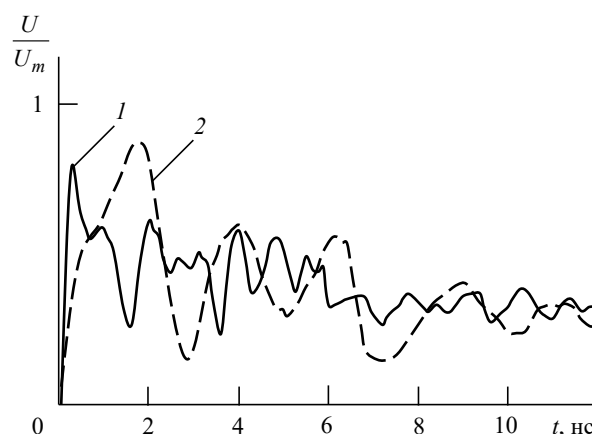


Рис. 2. Осциллограмма приведенного СРП при активации нагрузки: 1 – нагрузка исправна; 2 – нагрузка неисправна (отсутствует)

Fig. 2. Oscillogram of the given PSA when the load is activated:
 1 – the load is fault-free; 2 – the load is faulty (absent)

ка повреждена (отсутствует).

При наличии исправной нагрузки (рис. 2, 1) СРП представляет собой суперпозицию полей излучения, связанных с барьерной и диффузионной емкостями светодиода, а также емкостью подзатворного диэлектрика и емкостью сток-подложка МДП-транзистора (ключа), коммутирующего порт общего назначения. Когда же нагрузка неисправна или отсутствует (рис. 2, 2), СРП представляет собой перераспределение энергии в накопителях, связанных только с емкостью подзатворного диэлектрика МДП-транзистора (ключа). Взаимная корреляция кривых 1 и 2 на рис. 2: $r < 0.7$, что свидетельствует об их существенном различии.

Однако на практике существуют случаи, когда неисправность не проявляется в столь явном виде и обычного корреляционного анализа СРП недостаточно. Для более широкого представления возможностей ПРТД необходимо перейти к аналитическому отношению нагрузок потребителей и накопителей в исследуемом узле, определяемому значением корней характеристического уравнения, составленного для излучающей цепи [5]:

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

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

Для электрической составляющей электромагнитных излучений имеет смысл переписать уравнение относительно напряжения U . При замене в (1) значения тока через емкостный накопитель на $i = C \frac{dU}{dt}$ получим:

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

При колебательном перераспределении энергии (2) можно свести к известному характеристическому уравнению с нулевой правой частью:

$$RCp + LCp^2 + 1 = 0. \quad (3)$$

где $p = \frac{dU}{dt}$ – параметр, показывающий порядок дифференциального уравнения.

Поскольку при излучении энергии электронным устройством (или узлом) речь идет о колебательном характере процесса перераспределения

энергии, т. е. общее решение (3) является свободной составляющей ($U_{св}$), а корни комплексно-сопряженными $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega$. Тогда выражение свободной составляющей имеет вид [6]

$$U_{св}(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t), \quad (4)$$

где U_0 – постоянная интегрирования, зависящая от значений параметров накопителей; δ – коэффициент затухания; ω – угловая частота.

Результаты. На практике узел состоит из группы компонентов, итоговый СРП узла – суперпозиция СРП входных и выходных цепей его составляющих, излучающих свободные затухающие колебания в моменты времени, соответствующие приходу управляющего импульса. В соответствии с (4) можно записать:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{сви}(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} e^{-\delta_i(t-t_{0i})} \sin[2\pi f_i(t-t_{0i})], \quad (5)$$

где N – число источников затухающих колебаний; $U_{сви}$ – мгновенное значение приведенного уровня i -го колебания; U_{0i} – приведенная амплитуда первой полуволны i -го колебания; δ_i – коэффициент затухания i -го колебания; t – текущий момент времени; t_{0i} – момент времени начала излучения i -го колебания; f_i – частота i -го колебания.

Следует заметить, что (5) является основным уравнением для СРП, излучаемого электронным узлом устройства, и справедливо только при выполнении условия $t - t_{0i} > 0$, при $t - t_{0i} \leq 0$: $U_{сви} = 0$. С физической точки зрения это означает отсутствие i -го колебания в момент, когда в соответствующем узле или элементе еще не происходит перераспределение энергии между реактивными накопителями.

На рис. 3 представлен сложный СРП, иллюстрирующий (5). Данный профиль получен в результате моделирования схемы, состоящей из двух параллельно соединенных МОП-ключей с известными входными и выходными характеристиками [7].

При получении СРП в результате измерений (рис. 3, а) для разложения его на составляющие (рис. 3, б) и нахождения их параметров необходимо провести операцию декомпозиции, т. е. сопоставить исходному СРП сумму составляющих

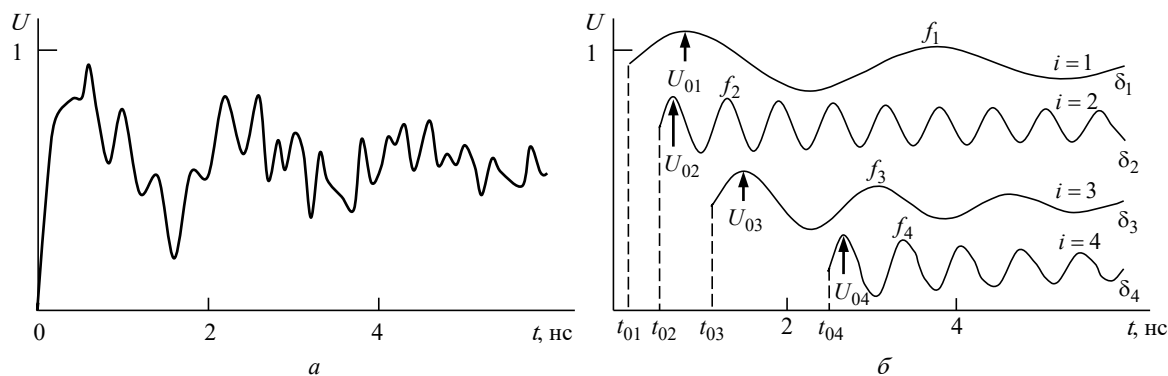


Рис. 3. СРП, полученный в результате моделирования: а – суперпозиция излучений; б – составляющие СРП

Fig. 3. SRP obtained as a result of modeling: а – superposition of radiation; б – components of the SRP

сигналов, математическая обработка которых более полно раскрывает информационные аспекты исходного сигнала [8]. Поскольку представленный СРП получен по результатам моделирования, то формовременные параметры его составляющих известны заранее, что не требует проведения математически сложной операции декомпозиции для дальнейших исследований.

Зная N в (5) (рис. 3, б), можно определить, все ли интересующие элементы узла участвуют в излучении. Если N полученного СРП меньше, чем N репера, то следует делать вывод о выходе из строя либо шунтировании некоторых компонентов интересующего узла. В случае равенства все элементы узла участвуют в излучении. При превышении числа излучателей в тестовом СРП по сравнению с репером можно говорить о неверном вычислении данного параметра либо некорректном производстве измерения.

Приведенная амплитуда первой полуволны колебаний U_0 определяется уровнем мощности излучения компонентов интересующего узла относительно друг друга. Известно, что в общем случае мощность излучения элемента узла пропорциональна квадрату падения напряжения на излучателе V и обратно пропорциональна удвоенному волновому сопротивлению излучателя Z [9]:

$$P \sim \frac{|V|^2}{2Z}. \quad (6)$$

Волновое сопротивление оценивается по формуле Хаммерстада–Дженсена [10–12]:

$$Z = \frac{Z_L}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (7)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость изолирующего материала подложки [11];

$$Z_L = \frac{Z_0}{2\pi} \ln \left\{ \frac{H}{W} \left[6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(30.67 \frac{H}{W} \right)^{0.75} \right] \right] + \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{W} \right)^2} \right\} \quad (8)$$

– волновое сопротивление в однородной среде, где Z_0 – волновое сопротивление вакуума; W – ширина излучателя; H – высота подложки.

Как видно из (7) и (8), волновое сопротивление излучателя не зависит от электрических параметров исследуемого узла, следовательно, с достаточно высокой точностью, опираясь на (6), параметр U_0 в (5) может быть использован для оценки значения падений напряжения на излучателе в момент колебательного перераспределения энергии в нем.

Коэффициент затухания колебаний δ или время затухания τ (величина, обратная δ) показывает, как быстро колебания теряют свою энергию [13]:

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad (9)$$

где R – эквивалентное омическое сопротивление контура; L – эквивалентная индуктивность контура.

Эквивалентная индуктивность контура фактически не меняется под воздействием внешних факторов, тогда как эквивалентное омическое сопротивление имеет существенную температурную зависимость. Максимальным температурным изменениям подвержены удельные сопротивления подводящего проводника ρ и удельные сопротивления токопроводящих областей полупроводниковых приборов:

$$\frac{d\rho}{dT} = \alpha_\rho \rho, \quad (10)$$

где α_p – температурный коэффициент удельного сопротивления проводника (для меди $\alpha_p = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

С точки зрения ПРТД, с учетом (9) и (10) время затухания показывает в основном отличие температуры излучающего узла от температуры, при которой были сняты СРП репера.

Частота свободного колебания f может быть определена как [14]

$$f = \frac{\sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}}{2\pi}. \quad (11)$$

Здесь

$$C = \frac{2.64 \cdot 10^{-11} (\epsilon_r + 1.41)}{\ln\left(\frac{5.98H}{0.8W + T}\right)} l + C_k \quad (12)$$

– эквивалентная емкость контура [11], где l – длина излучателя; C_k – емкости компонентов (подзатворная емкость полевых транзисторов, барьерные и диффузионные емкости p - n -переходов).

Индуктивность излучателя связана с его емкостью через волновое сопротивление [11]:

$$L = \frac{2.64 \cdot 10^{-11} (\epsilon_r + 1.41)}{\ln\left(\frac{5.98H}{0.8W + T}\right)} l Z^2. \quad (13)$$

Выражения (9), (11)–(13) при значениях эквивалентных емкостей в районе десятков пикофарад, а эквивалентных омических сопротивлений около десятых долей ома (справедливо на практике) означают, что частота колебания f несет в себе информацию о качестве подзатворных диэлектриков в МОП-транзисторах либо о режимах работы p - n -переходов излучающих узлов.

Момент времени начала излучения t_0 показывает, как быстро сигнал прошел от одной группы реактивных накопителей к другой (например, от входной цепи МОП-транзистора до выходной – параметр Turn-On Delay Time), тем самым отражая быстродействие узла. Сравнив значение данного параметра, полученное в результате измерения, со справочным значением, можно сделать вывод о техническом состоянии узла.

Обсуждение. Учитывая изложенное, можно построить таблицу параметров СРП и соответствующих им параметров электронного узла.

Определение параметров СРП, представленных в таблице, имеет смысл при сравнении их с

Параметры сигнального радиопрофиля
 Signal radio profile parameters

| Параметр СРП | Параметр электронного устройства |
|--------------|--|
| U_0 | Падение напряжения на излучателе |
| δ | Температура излучающего узла |
| t_0 | Быстродействие излучающего узла |
| f | Качество диэлектрика, режим работы p - n -перехода |
| N | Число излучающих узлов |

параметрами репера. Однако даже визуально исследуя рис. 3, б, можно сказать, что излучение узла состоит из четырех компонентов ($N = 4$), т. е. излучают входные и выходные цепи двух параллельно включенных МОП-транзисторов. Также можно сделать вывод о характере нагрузки МОП-транзисторов – омическая, поскольку от нее нет дополнительных излучений, режим работы МОП-транзисторов ключевой (инверторный).

Очевидно, что быстродействие первого транзистора выше, поскольку $t_{02} - t_{01} \approx 0.4$ нс (задержка включения первого транзистора), $t_{04} - t_{03} \approx 1.4$ нс (задержка включения второго транзистора).

Поскольку $U_{01} \approx U_{02} \approx U_{03} \approx U_{04}$, можно сделать вывод об идентичном падении напряжения на излучателях, причем на затвор МОП-транзисторов подан управляющий потенциал, равный напряжению питания узла (что соответствует действительности).

Представленные в статье результаты позволяют оценить преимущества бесконтактного и практически безынерционного метода ПРТД. Проведя несложные измерения по регистрации излучаемого СРП, возможно дистанционное обнаружение структурных и функционально-аппаратных неисправностей, целостности сигналов электронных устройств, что особенно актуально при исследовании микропроцессорных устройств, эксплуатируемых в условиях, исключающих возможность применения технологии JTAG-тестирования, требующей надежного гальванического доступа к опросу параметров аппаратной обвязки радиоэлектронного изделия [15]. Разложение сложного СРП на составляющие и оценка их параметров открывает новые возможности в области ТД молниеносно развивающейся электронной техники как в области программных средств, так и в аппаратной среде.

Список литературы

1. Mineev V. A., Danilov A. D. Automation of technical diagnostics of electronic devices // Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP2020'SCT): Proc. of the XXVth Intern. Open Science Conf., Yelm. USA: Science Book Publishing House LLC, 2020. P. 158–163.
2. Бойков К. А., Костин М. С., Куликов Г. В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств // Российский технологический журн. 2021. Т. 9, № 4. С. 20–27. doi: 10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27
3. A JTAG-based management bus on backplane for modular instruments / Y. Hu, W. Li, Y. F. Wang, G. Jin, X. Jiang // J. of Instrumentation. 2019. Vol. 14, № 9. P. T09002. doi: 10.1088/1748-0221/14/09/T09002
4. Очкуренко Г. О. Программирование микроконтроллеров семейства AtMega на базе системы Arduino // Теория и практика современной науки. 2019. № 4 (46). С. 178–183.
5. Ефимов А. А. Мельников С. Ю. Моделирование переходных процессов в цепях переменного тока средствами Multisim // Информатизация инженерного образования: тр. Междунар. науч.-практ. конф. ИНФОРИНО-2016. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. С. 498–501.
6. Моделирование переходных процессов в катушке-конденсаторе при импульсном воздействии / П. А. Бутырин, Г. Г. Гусев, Д. В. Михеев, А. А. Кваснюк, М. В. Карпунина, Ф. Н. Шакирзянов // Изв. Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 1. С. 109–122. doi: 10.1134/S000233101901014X
7. Бойков К. А. Моделирование температурной зависимости колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в электронных схемах на МОП-транзисторах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 4. С. 1–11. doi: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.002
8. Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA // J. of electronic science and technology. 2019. Vol. 17, № 2. P. 135–151. doi: 10.11989/JEST.1674-862X.6071911
9. Лебедев Е. Ф., Осташев В. Е., Ульянов А. В. Устройства генерирования сверхширокополосных излучений радиочастотного диапазона с генераторами возбуждения полупроводникового типа // Вестн. Концерна ВКО "Алмаз – Антей". 2018. № 1 (24). С. 35–42. doi: 10.38013/2542-0542-2018-1-35-42
10. Hammerstad E., Jensen O. Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. 1980. P. 407–409. doi: 10.1109/MWSYM.1980.1124303
11. Бойков К. А. Моделирование и анализ колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в ключевых радиоэлектронных схемах на МОП-транзисторах // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 6. P. 1–14. doi: 10.30898/1684-1719.2021.6.14
12. Калькуляторы. URL: <https://radiopro.ru/calculator/list> (дата обращения 15.11.2021)
13. Нурматов О. Е. Анализ электромеханических колебаний в регулируемой электрической системе // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. / Магнитогорский техн. ун-т им. Г. И. Носова. Магнитогорск, 2017. С. 106–116.
14. Болдуреску Д. К., Лазарев М. В. Программа визуализации колебаний в RLC-контуре // Студенческая наука Подмосквю: материалы Междунар. науч. конф. молодых ученых / ГГТУ. Орехово-Зуево, 2019. С. 32–34.
15. Костин М. С., Воруничев Д. С. Реинжиниринг радиоэлектронных средств / МИРЭА. М., 2018. 132 с.

Информация об авторе

Бойков Константин Анатольевич – кандидат технических наук (2018), доцент (2021) кафедры радиоволновых процессов и технологий МИРЭА – Российского технологического университета. Автор 30 научных работ. Сфера научных интересов – техническая диагностика, регенеративные системы, декомпозиция сложных сигналов, масштабное-временное преобразование сигналов.

Адрес: МИРЭА – Российский технологический университет, пр. Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия
E-mail: nauchnyi@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0213-7337>

References

1. Mineev V. A., Danilov A. D. Automation of Technical Diagnostics of Electronic Devices. Modern Informatization Problems in Simulation and Social Technologies (MIP2020'SCT): Proc. of the XXVth Intern. Open Science Conf., Yelm, USA, Science Book Publishing House LLC, 2020, pp. 158–163.
2. Boikov K. A., Kostin M. S., Kulikov G. V. Radiosen-
- sory Diagnostics of the Integrity of Signals of In-Circuit and Peripheral Architecture of Microprocessor Devices. Russian Technological J. 2021, vol. 9, no. 4, pp. 20–27. doi: 10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27 (In Russ.)
3. Hu Y., Li W., Wang Y. F., Jin G., Jiang X. A JTAG-Based Management Bus on Backplane for Modular Instruments. J. of Instrumentation. 2019, vol. 14, no. 9,

p. T09002. doi: 10.1088/1748-0221/14/09/T09002

4. Ochkurenko G. O. Programming of Microcontrollers of the AtMega Family Based on the Arduino System. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki* [Theory and Practice of Modern Science]. 2019, no. 4 (46), pp. 178–183. (In Russ.)

5. Efimov A. A. Melnikov S. Yu. Modeling of Transient Processes in Alternating Current Circuits by Means of Multi-Sim. *Informatizatsiya inzhenerenogo obrazovaniya* [Informatization of Engineering Education]. Proc. of the Intern. Sci. and Pract. Conf. INFORINO-2016. Moscow, *Izdatel'skiy dom MEI*, 2016, pp. 498–501. (In Russ.)

6. Butyrin P. A., Gusev G. G., Mikheev D. V., Kvasnjuk A. A., Karpunina M. V., Shakirzjanov F. N. Modeling of Transient Processes in a Coil-Capacitor under Impulse Influence. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2019, no. 1, pp. 109–122. doi: 10.1134/S000233101901014X (In Russ.)

7. Boikov K. A. Modeling the Temperature Dependence of the Vibrational Redistribution of Energy with its Own Electromagnetic Radiation in Electronic Circuits on MOS Transistors. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021, vol. 9, no. 4, pp. 1–11. doi: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.002 (In Russ.)

8. Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA. *J. of electronic science and technology*. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 135–151. doi: 10.11989/JEST.1674-862X.6071911

9. Lebedev Y. F., Ostashev V. Y., Ulyanov A. V. Means for Generating Ultra-Wideband and Radio-Frequency

Emissions with Semiconductor Field Generators. *J. of "Almaz – Antey"*. 2018, № 1 (24), pp. 35–42. doi: 10.38013/2542-0542-2018-1-35-42 (In Russ.)

10. Hammerstad E., Jensen O. Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design. *IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. IEEE*, 1980, pp. 407–409. doi: 10.1109/MWSYM.1980.1124303

11. Boikov K. A. Modeling and Analysis of Wavering Redistribution of Energy in the Presence of its Own Electromagnetic Radiation in Key Electronic Circuits on MOS Transistors. *Zhurnal Radioelektroniki* [J. of Radio Electronics]. 2021, no. 6, pp. 1–14. doi: 10.30898/1684-1719.2021.6.14 (In Russ.)

12. Calculators. *RadioProg*. Available at: <https://radioprogram.ru/calculator/list> (accessed 15.11.2021).

13. Nurmatov O. E. Analysis of Electromechanical Vibrations in a Regulated Electrical System. *Energeticheskie i elektrotehnicheskie sistemy* [Energy and Electrical Systems]. Magnitogorsk, *Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2017, pp. 106–116. (In Russ.)

14. Bolduresku D. K. Program for Visualization of Oscillations in the RLC-Contour. *Studencheskaya nauka Podmoskov'yu: Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh* [Student Science of the Moscow Region: Proc. of the Intern. Scientific Conf. of Young Scientists]. Orekhovo-Zuevo, *State Humanitarian and Technological University*, 2019, pp. 32–34. (In Russ.)

15. Kostin M. S., Vorunichiev D. S. *Reinzhiniring radioelektronnykh sredstv* [Reengineering of Radio-Electronic Means]. Mocsow, *MIREA*, 2018, 131 p. (In Russ.)

Information about the author

Konstantin A. Boikov, Cand. Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor (2021) at the Department of Radio Wave Processes and Technologies, MIREA – Russian Technological University. The author of 30 scientific publications. Area of expertise: technical diagnostics, regenerative systems, decomposition of complex signals, time-scale transformation of signals.

Address: MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Ave., Moscow 119454, Russia

E-mail: nauchnyi@yandex.ru.

<https://orcid.org/0000-0003-0213-7337>
