

## РАДИОСЕНСОРНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СЛОЖНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УЗЛА

© 2022 г. К. А. Бойков<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет 119454 Москва, просп. Вернадского, 78, Россия

\*E-mail: nauchnyi@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 03.04.2022 г.

Принята к публикации 21.04.2022 г.

Основными преимуществами метода пассивной радиосенсорной технической диагностики (ПРТД) над наиболее значимыми способами определения технического состояния (виброметрия, тепловой контроль, JTAG-тестирование, оптический контроль) являются: отсутствие инерции, отсутствие затрат процессорного времени, отсутствие гальванического контакта с объектом исследования. Однако в современной научной литературе практически не уделяется внимания анализу сигнальных радиопрофилей (СРП) электрической составляющей электромагнитных излучений, созданных сложными электронными узлами (СЭУ). Цель данного исследования – развитие метода ПРТД посредством анализа сигнальных радиопрофилей СЭУ с декомпозицией и экстракцией параметров. В работе представлены выражения для колебательного перераспределения энергии, описывающие процесс формирования СРП. Предложен новый способ декомпозиции СРП, позволяющий получить информацию об основных параметрах излучателей СЭУ. Подготовлен и проведен эксперимент по регистрации и исследованию СРП в различных режимах работы СЭУ. Получены значения параметров СРП, указывающие на наличие неисправности в электронном узле, либо на неверный режим функционирования. Данные исследования могут быть использованы в пассивной радиосенсорной технической диагностике, при определении аппаратных неисправностей, либо деградации параметров элементов на ранних стадиях.

*Ключевые слова:* сигнальный радиопрофиль, корреляционный анализ, декомпозиция сигнала, экстракция параметров, техническая диагностика

DOI: 10.31857/S0235009222030027

### ВВЕДЕНИЕ

Надежность современных электронных устройств (ЭУ) в настоящее время неуклонно растет. Несмотря на это, высокая стоимость, уникальность, тяжелые условия монтажа и пусконаладочных работ, использование на объектах критической инфраструктуры (Кубарев и др., 2020; Masloboev, 2020), вызывают необходимость создания эффективных методов технической диагностики (ТД) – отрасли научно-технических знаний, сущность которых составляют теория, методы и средства обнаружения, и поиск дефектов объектов технической природы (Еременко, 2012).

Изменение значения внутренних параметров электронных узлов с выходом их за допустимые пределы могут привести к преждевременным отказам либо сбоям функционирования ЭУ. Современные методы по определению технического состояния ЭУ направлены на обнаружение и локализацию возникших неисправностей или предсказания появления неисправностей ввиду обна-

ружения скрытых дефектов. Помимо старения и деградации электронных устройств возможными являются неисправности, связанные с дефектами, не выявленными в ходе производственных исследований. Данные неисправности могут проявиться в любое время при эксплуатации электронного изделия в условиях воздействия реальных факторов.

Анализ современного состояния научно-технической проблемы ТД показал, что каждый из методов имеет свои недостатки, порой несовместимые с объектом исследования. Техническая диагностика – творческий процесс, основанный на совместном использовании этих способов, от носителей которых возникают разногласия среди исследователей. Применение того или иного способа проверки исправности элементов объекта зависит от конкретного типа ЭУ, личных качеств оператора и условий проведения исследования.

Развитием теории технической диагностики является метод ПРТД (Бойков и др., 2021; Бой-

**Таблица 1.** Сравнительная таблица основных параметров методов ТД

Метод ТД	Возможность функциональной диагностики	Бесконтактное получение информации	Время, необходимое для проведения единичной диагностики	Независимость от опыта исследователя
Тепловой	+	+/-	От нескольких секунд	+
Электрический	-	+	От нескольких секунд	+
Магнитный	-	+	От нескольких секунд	+
Радиационный	-	+	От нескольких секунд	+
Радиоволновой	-	+	От нескольких миллисекунд	+
Оптический	-	+	От нескольких миллисекунд	-
Справочников	+	-	От нескольких минут	-
Радиосенсорный	+	+	От нескольких миллисекунд	+

ков, Костин, 2021), основанный на регистрации электрической составляющей ближнего поля (или СРП), при собственных излучениях электронных узлов. Пассивная радиосенсорная техническая диагностика имеет существенные преимущества перед современными методами ТД (в том числе и перед JTAG-тестированием (Hu et al., 2019): не требует гальванического контакта с исследуемым образцом, не занимает процессорное время и не влияет на объект исследования. На основе обзора научной литературы, в табл. 1 приведен общий сравнительный анализ основных параметров особо значимых методов ТД.

Один из самых популярных на сегодняшний день тепловой метод ТД обладает высокой инерционностью и невозможностью регистрации быстроизменяющихся процессов. Электрический, магнитный, радиационный, радиоволновой и оптический методы ТД требуют наличия сложного оборудования по созданию, излучению и приему электромагнитных волн с различным частотным спектром, что усложняет процесс диагностики. К тому же данные методы ТД требуют остановки функционирования объекта исследования, что зачастую неприемлемо. Недостатками самого доступного из методов технической диагностики — метода справочников, является тесная взаимосвязь результатов диагностики с опытом исследователя, необходимость доступа ко всем узлам и соединениям, чувствительность к погрешностям вычислений. Перечисленных недостатков лишен новый радиосенсорный метод ТД, основное отличие которого от известного радиоволнового метода заключается в отсутствии генератора зондирующих импульсов.

Исследование пассивной радиосенсорной технической диагностики — актуальная задача, позволяющая открыть новые возможности теории ТД, дистанционно определяя неисправности ЭУ на самых ранних стадиях, не оказывая влияния на объект исследования.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Как и любой другой метод технической диагностики, ПРТД имеет свой инструментарий, а также набор диагностируемых параметров, явно или косвенно получаемых в результате проводимых исследований.

**Колебательное перераспределение энергии.** Наличие фильтрующих и паразитных емкостей в ЭУ при подаче напряжения питания ведет к перераспределению энергии между элементами фильтрации и паразитными реактивными накопителями (далее — накопителями), которое имеет колебательный характер. Затухание колебаний здесь будет зависеть от соотношения нагрузочных параметров потребителей и накопителей, причем чем меньше нагрузка потребителя, тем медленнее затухают колебания. Также в электронных узлах ЭУ имеет место возникновение колебательного перераспределения энергии между накопителями, в роли которых выступают емкости подзатворных диэлектриков МОП-структур, барьерные и диффузионные емкости p-n переходов, переходов Шоттки (Ткаченко, 2018).

Для излучения при колебательном перераспределении энергии мощность должна быть передана от источника на излучающий элемент. На практике наиболее часто встречается непосредственное излучение источника, например, подводящих линий или отдельного компонента. Также встречаются излучения через подключенные кабели питания, шины данных или сигнальные линии.

Аналитически отношение величины нагрузок потребителей и накопителей определяется значением корней характеристического уравнения, составленного для электрической цепи (Башарин, 2018):

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

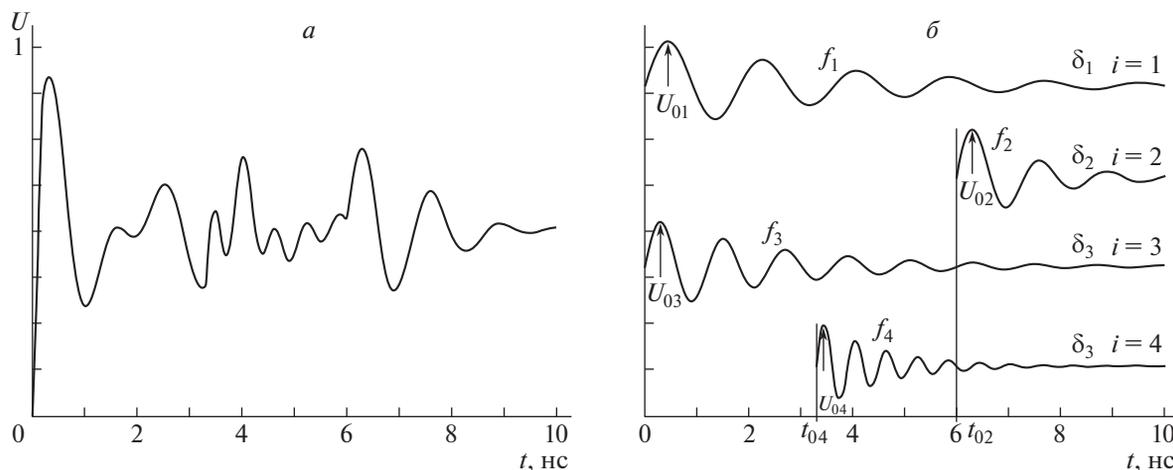


Рис. 1. Сигнальные радиопрофили *a* – суперпозиция излучений; *b* – составляющие СРП.

где  $R$  – общее омическое сопротивление,  $L$  – общая индуктивность,  $C$  – общая емкость,  $p$  – параметр, равный  $\frac{dU}{dt}$ .

Следует заметить, что порядок данного уравнения равен числу независимых накопителей энергии, под которыми понимаются паразитные индуктивности и емкости в схеме соединения элементов электронного узла. В случае цепей третьего порядка и выше найти параметры колебаний можно лишь приближенно, выделив отдельные составляющие процесса. Однако, исследуя природу возникновения реактивных накопителей, их номиналы и способы соединения, с незначительной погрешностью (на практике менее 5%) можно привести уравнения высших порядков к уравнению (1). Решение данного уравнения – решение с нулевой правой частью, соответствует режиму, когда внешняя принуждающая сила источника на цепь непосредственно не воздействует. Влияние проявляется здесь через энергию, запасенную в полях индуктивных и емкостных накопителей, т.е. речь идет о свободном режиме работы, и общее решение уравнения (1) называется свободной составляющей ( $U_{CB}$ ).

Выражение для свободной составляющей определяется видом корней характеристического уравнения и зависит от значений параметров элементов цепи ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ). При колебательном характере процесса перераспределения энергии между накопителями корни характеристического уравнения (1) комплексно-сопряженные  $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega$ .

Наличие пары комплексно-сопряженных корней обуславливает появление затухающих синусоидальных колебаний. Тогда выражение свободной составляющей имеет вид (Башарин, 2018)

$$U_{CB}(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где  $U_0$  – начальная амплитуда колебаний (постоянная интегрирования, зависящая от значений параметров накопителей),  $\delta$  – коэффициент затухания,  $\omega$  – угловая частота колебаний,  $\varphi$  – начальная фаза колебаний (постоянная интегрирования, зависящая от значений параметров накопителей).

Поскольку обычно электронный 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 (Бойков, 2021):

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{CBi}(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} e^{-\delta_i(t-t_{0i})} \sin[\omega_i(t-t_{0i})], \quad (3)$$

где  $t$  – текущий момент времени,  $t_0$  – момент времени начала излучения  $i$ -го колебания.

Выражение (3) является основным уравнением для СРП, излучаемого электронным узлом устройства и справедливо только при выполнении условия  $t - t_{0i} \geq 0$ , а при  $t - t_{0i} < 0$ :  $U_{CBi} = 0$ . 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. Также в выражении (3) отсутствует начальная фаза излучения, поскольку этот параметр косвенно входит в  $t_0$ .

На рис. 1 представлен сложный СРП, иллюстрирующий выражение (3).

**Декомпозиция СРП.** Для детального исследования СРП необходимо представить его в виде суммы составляющих сигналов, математическая обработка которых более проста и более полно раскрывает информационные аспекты исходного сигнала (Reddy, Rameshwar, 2019).

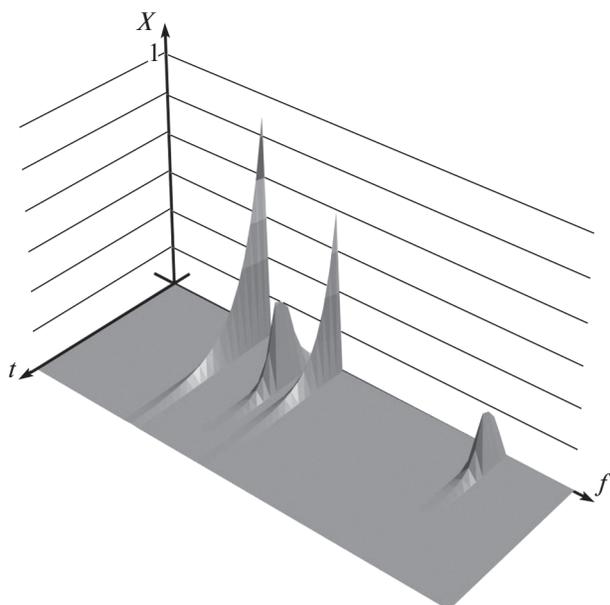


Рис. 2. Частотно-временной спектр сигнальных радиопрофилей.

Для получения информации о коэффициенте затухания и времени начала излучения (фазе) для каждого из колебаний предлагается воспользоваться идеей оконного преобразования Фурье (Астахов и др., 2019; Данилов, 2020) и получить спектр затухающих колебаний со сдвигом на каждый дискрет:

$$X(f, h) = \sum_{c=h}^{O-1+h} U(O) \exp\left(-j \frac{2\pi f c}{O}\right), \quad (4)$$

где  $K$  – общее число точек СРП,  $O$  – число точек, образующих “окно” преобразования,  $h$  – номер отсчета положения “окна” ( $0 < h < K - O$ ),  $U(O)$  – сигнал, дискретизированный во времени,  $c$  – номер отсчета.

Для удобства отображения по полученным отсчетам строится двумерная зависимость нормированной (приведенной) амплитуды спектра сигнала от частоты и от положения “окна” (рис. 2).

Положение окна на оси времени  $t$  связано с  $h$  через частоту дискретизации  $f_D$  СРП:  $t = \frac{h}{f_D}$ .

По данной зависимости нетрудно определить частоту излучения  $f$  (по максимумам частотной характеристики) и момент времени начала излучения  $i$ -го колебания. Поскольку положение “окна” изменяется со временем, то при его приближении к моменту начала излучения  $i$ -го колебания значение приведенного амплитудного спектра на данной частоте увеличивается и достигает максимума. Далее по мере продвижения

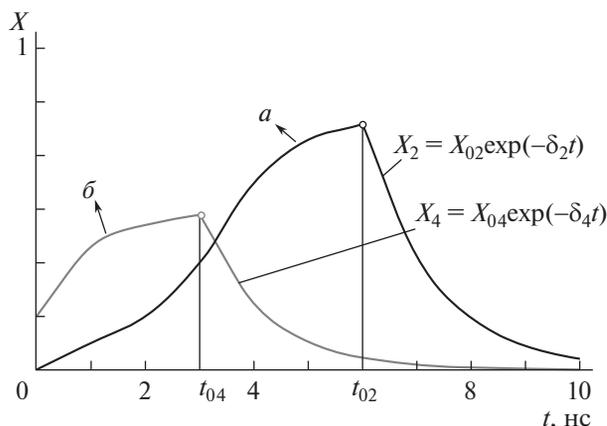


Рис. 3. Определение времени начала излучения  $a$  – для  $i = 2$ ;  $b$  – для  $i = 4$ .

“окна” по оси времени происходит затухание приведенного амплитудного спектра с тем же коэффициентом, что и затухание  $i$ -го колебания:

$$X_i = X_{0i} e^{-\delta_i \cdot t}, \quad (5)$$

где  $X_{0i}$  – приведенный амплитудный спектр  $i$ -го колебания в начальной точке.

Момент перехода от возрастания к затуханию (точка экстремума) и есть точка начала излучения (рис. 3).

Время начала излучения можно определить двумя способами. По дискретам кривых (рис. 2 и 3) найти максимальное значение  $X$ . Искомая величина – ордината точки  $t_{0i}$ . Данный метод не обладает высокой точностью, поскольку сильно зависит от частоты дискретизации. Более точное определение времени включения излучения  $t_{0i}$  возможно при аппроксимации кривых полиномом  $j$ -й степени с последующим нахождением экстремума:

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{d\left(\sum_{n=0}^j c_n t^n\right)}{dt} = 0, \quad (6)$$

где  $c_n$  – коэффициенты полинома.

Очевидно, чем выше степень аппроксимации, тем точнее полученное значение. Анализ показывает, что данный метод при  $j = 6$  позволяет повысить точность нахождения времени включения приблизительно на 30%.

Амплитудный спектр является суммой амплитуд колебаний во времени, для нахождения амплитуды первой полуволны каждого колебания необходимо провести операцию дифференцирования по времени (определить скорость измене-

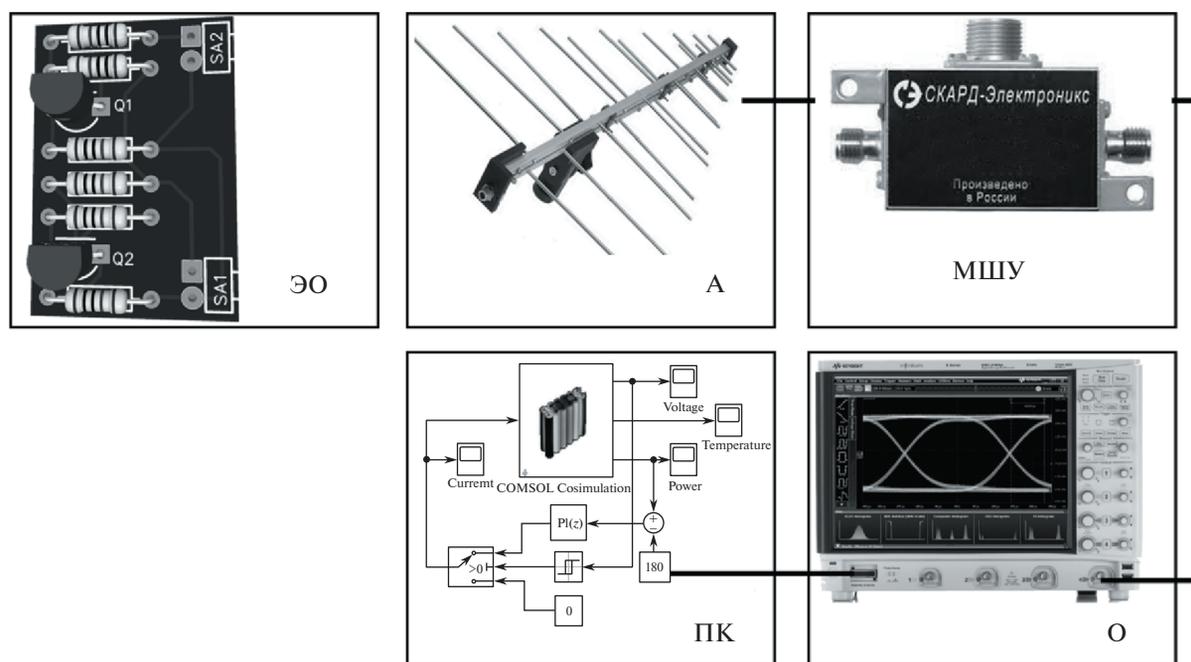


Рис. 4. Блок-схема измерительной системы (ЭО – экспериментальный образец, А – измерительная антенна, МШУ – малошумящий сверхширокополосный усилитель, О – сверхбыстродействующий осциллограф реального времени, ПК – персональный компьютер).

ния  $v_i$ ) приведенного амплитудного спектра в начальной точке:

$$v_i = \frac{dX_i}{dt} = -X_{0i}\delta_i \exp(-\delta_i t). \quad (7)$$

Таким образом, подставив начальный момент времени ( $t = 0$ ) в выражение (7), можно записать

$$v_i = -X_{0i}\delta_i. \quad (8)$$

Знак “–” в выражении (8) говорит об изменении приведенного амплитудного спектра в сторону уменьшения.

Поскольку на рис. 2 представлены приведенные значения уровня сигнала, то и работать необходимо с приведенными начальными амплитудами. Для определения значений начальных амплитуд колебаний каждого из излучателей нужно найти максимальное значение параметра  $|v_i|$  и относительно него найти начальные амплитуды (привести к  $|v_i|$ ):

$$U_{0i} = \frac{|v_i|}{|v_{i\max}|}. \quad (9)$$

**Подготовка и проведение эксперимента.** Для проведения испытаний по регистрации СРП с дальнейшей декомпозицией и анализом параметров построена измерительная система, представленная на рис. 4.

Сигнальный радиопрофиль, излученный ЭО (экспериментальным образцом – исследуемым

устройством), принимается широкополосной антенной А (сверхширокополосная измерительная логопериодическая антенна *П6-122М2*, производитель *СКАРД-Электроникс, Россия*) и усиливается МШУ – малошумящим сверхширокополосным усилителем (*АСК001030*, производитель *СКАРД-Электроникс, Россия*). Усиленный СРП обнаруживается и регистрируется сверхбыстродействующим осциллографом реального времени О (*DSOS604A*, производитель *Keysight Technologies Company Ltd., Kumai*). Полученные в результате измерения данные передаются в персональный компьютер ПК для декомпозиции и экстракции параметров СРП.

На рис. 5 представлен разработанный для проведения испытаний ЭО, состоящий из параллельно соединенных: ключа на МОП-транзисторе и ключа на биполярном транзисторе (БПТ).

Управляющее напряжение на затвор МОП-транзистора *2N7000* (Q1) и базу БПТ *BC547* (Q2) от источника питания + 5 В, подключенного к разъему SA1, подается посредством замыкания контактов SA2. R1 – переключатель, R2 – подтягивающий резистор 100 кОм, R3, R6 – нагрузка 100 Ом, R4, R5 – делитель напряжения. Эксперимент будет проведен для трех случаев: нормальное функционирование; отсутствие нагрузки Q1 (демонстрация R3); повышение напряжения питания до +6 В.

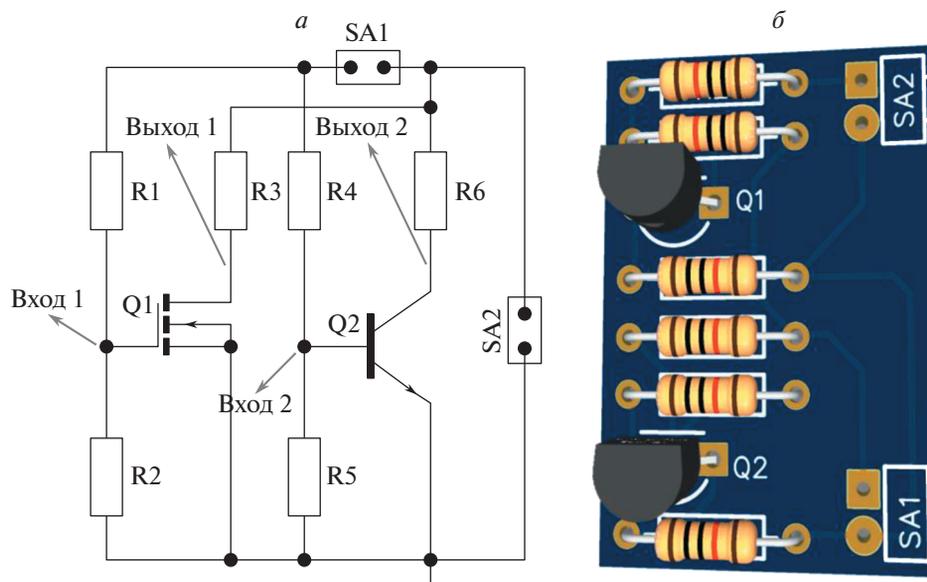


Рис. 5. Составной узел на МОП-транзисторе и БПТ.  
 а – электрическая принципиальная схема; б – общий вид.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

После подачи управляющего напряжения составной узел ЭО излучает сложный СРП, который регистрируется и обрабатывается измерительной системой (рис. 4). СРП корректно функционирующего образца в дальнейшем будем называть репером. Как было сказано выше, ито-

Таблица 2. Значения параметров репера и СРП без нагрузки Q1

Образцы	$N$	$f$ , ГГц	$\delta$ , нс <sup>-1</sup>	$t_0$ , нс	$U_0$
Репер (вход 1)	1	0.66	-0.32	0	1
Без нагрузки (вход 1)	1	0.68	-0.31	0	0.95
Несоответствие, %	–	3	3	–	5
Репер (вход 2)	1	0.93	-0.45	0	1
Без нагрузки (вход 2)	1	0.98	-0.43	0	0.98
Несоответствие, %	–	5	5	–	2
Репер (выход 1)	1	0.83	-0.77	5.2	1
Без нагрузки (выход 1)	–	–	–	–	–
Несоответствие, %	–	–	–	–	–
Репер (выход 2)	1	1.89	-0.88	3	0.7
Без нагрузки (выход 2)	1	1.8	-0.85	3.1	0.73
Несоответствие, %	–	5	4	3	5

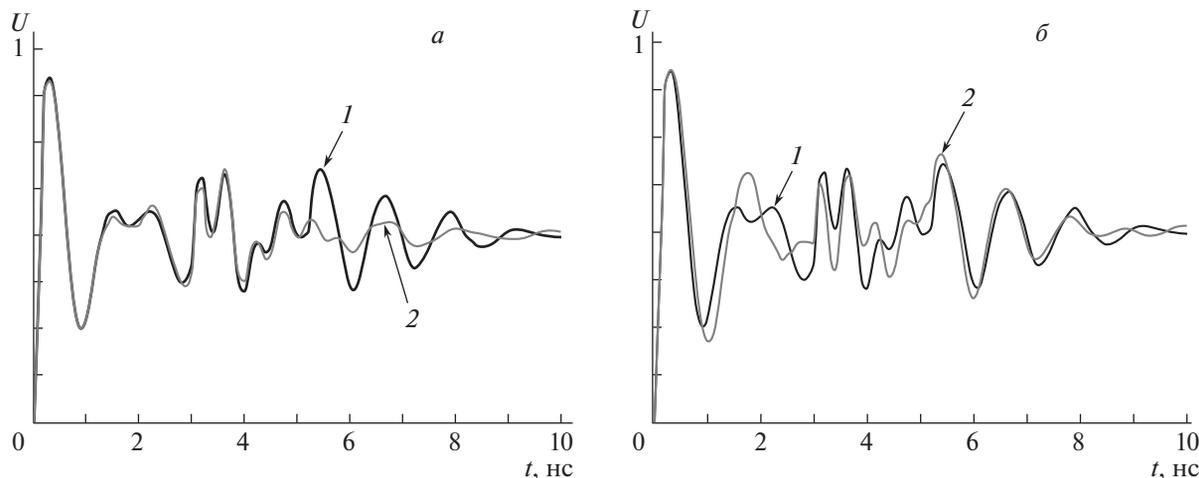
говый сигнальный радиопрофиль составного узла – суперпозиция излучений входных и выходных цепей. Излучения входной цепи МОП-транзистора (вход 1) в основном связаны с емкостью затвора, а выходной (выход 1) с емкостью донной части р-п-перехода сток-подложка. Время включения выходного излучения связано с временем самого элемента (параметр Turn-On Delay Time). Излучения входной цепи БПТ (вход 2) в основном связаны с емкостью перехода база-эмиттер, значение которой имеет сильную нелинейную зависимость от напряжения. Излучения выходной цепи БПТ (выход 2) связаны с емкостью перехода коллектор-подложка. Время включения выходного излучения связано с частотой переключения.

На рис. 6 показаны СРП репера в сравнении с СРП ЭО без нагрузки (R3 демонтирован) и СРП ЭО с повышенным напряжением питания +6 В (ПНП). В табл. 2 и 3 представлены значения параметров, зарегистрированных СРП.

Результаты эксперимента показывают, что значения параметров СРП, полученных при различных типах неисправностей, позволяют не только определить саму неисправность, но и локализовать ее.

## ОБСУЖДЕНИЕ

При отсутствии нагрузки Q1 из СРП полностью пропал один излучатель, связанный с выходной цепью (выход 1, рис. 6, а). Значения остальных параметров изменились в пределах погрешности измерения. Число  $N$  в выражении (3)



**Рис. 6.** Сравнение сигнальных радиопрофилей.

*a* – ЭО без нагрузки (R3 демонтирован); *б* – ЭО с повышенным напряжением питания +6 В. Кривые: 1 – репер, 2 – исследуемый СРП.

показывает число источников затухающих колебаний (рис. 1), зная которое можно определить, все ли интересующие элементы узла участвуют в излучении. Для этого необходимо знать число излучателей в реперном СРП, зарегистрированном от априори функционального узла. В случае, если  $N$  полученного СРП меньше, чем число излучателей репера  $N_p$ , то следует делать вывод о выходе из строя, либо шунтировании некоторых компонентов интересующего узла, либо о некорректном производстве измерения. Принять решение в данной ситуации поможет совокупность параметров СРП. 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.

При подаче повышенного напряжения питания на ЭО наиболее заметно изменение частоты излучения входной цепи БПТ (на 16%, рис. 6, б). Для определения причины данного изменения необходимо учесть, что входная емкость БПТ база-эмиттер СВЕ равна сумме диффузионной  $C_{BED}$  и барьерной  $C_{BEB}$  составляющих (Vostokov et al., 2020):

$$C_{BE} = C_{BED} + C_{BEB}. \quad (10)$$

Поскольку эмиттерный переход работает в прямом смещении, то  $C_{BED} \gg C_{BEB}$  и можно записать (Разевиг, 1999)

$$C_{BE} \approx C_{BED} = t_f \frac{dI_B}{dV_{BE}}, \quad (11)$$

где  $t_f$  – расчетное время переноса заряда через базу,  $I_B$  – ток базы,  $V_{BE}$  – падение напряжения на переходе база-эмиттер.

В свою очередь

$$t_f = TF \left[ 1 + XTF \left( \frac{I_B}{I_B + ITF} \right)^2 e^{\frac{V_{BC}}{1.44 \cdot VTF}} \right], \quad (12)$$

где  $TF$  – время переноса заряда через базу в нормальном режиме,  $XTF$  – коэффициент, определяющий зависимость  $TF$  от смещения база-коллектор ( $V_{BC}$ ),  $ITF$  – ток, характеризующий зависимость  $TF$  от тока коллектора,  $VTF$  –

**Таблица 3.** Значения параметров репера и СРП с некорректным питанием

Образцы	$N$	$f$ , ГГц	$\delta$ , нс <sup>-1</sup>	$t_0$ , нс	$U_0$
Репер (вход 1)	1	0.66	-0.32	0	1
НП (вход 1)	1	0.69	-0.33	0	0.96
Несоответствие, %	–	5	3	–	4
Репер (вход 2)	1	0.93	-0.45	0	1
НП (вход 2)	1	0.80	-0.42	0	0.96
Несоответствие, %	–	16	7	–	4
Репер (выход 1)	1	0.83	-0.77	5.2	1
НП (выход 1)	1	0.87	-0.76	5.5	0.98
Несоответствие, %	–	5	2	6	2
Репер (выход 2)	1	1.89	-0.88	3	0.7
НП (выход 2)	1	2	-0.83	3.2	0.75
Несоответствие, %	–	6	6	7	7

напряжение, характеризующее зависимость ТГ от  $V_{BC}$  (Разевиг, 1999).

Из выражения (12) видно, что расчетное время переноса заряда через базу, а следовательно, и входная емкость база-эмиттер имеют сильную нелинейную зависимость от напряжения ( $V_{BC}$ ), что обуславливает заметное изменение частоты излучения входной цепи БПТ.

Значения выходных параметров также несущественно изменились, что связано с изменением выходных барьерных емкостей обратных смещенных р-п-переходов полупроводниковых компонентов.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в представленной работе впервые исследован сложный сигнальный радиопрофиль, полученный от СЭУ. Предложенные выражения для колебательного перераспределения энергии и способ декомпозиции позволяют провести экстракцию параметров СРП с последующим их анализом. Сравнение параметров репера и СРП экспериментального образца с дефектом позволяет определить не только тип неисправности и место ее возникновения, но и неверный режим работы электронных компонентов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о преимуществах метода ПРТД по сравнению с существующими на сегодняшний день методами ТД – это скорость принятия решения, отсутствие инерционности и гальванического контакта с исследуемым объектом. Следует заметить, что все измерения по регистрации излучаемого СРП с последующим анализом были проведены дистанционно, без доступа к экспериментальному образцу, что открывает новые возможности в проведении ТД молниеносно развивающихся электронных устройств.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной статьи подтвердил отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахов Н.В., Башкиров А.В., Журилова О.Е., Макаров О.Ю. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье. *Радиотехника*. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 109–112.
- Башарин С.А. *Теоретические основы электротехники*. М.: Академия, 2018. 192 с.
- Бойков К.А. Моделирование и анализ колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в ключевых радиоэлектронных схемах на МОП-транзисторах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. № 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>
- Бойков К.А. Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики. Известия высших учебных заведений России. *Радиоэлектроника*. 2021. С. 63–70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>
- 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). С. 20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>
- Бойков К.А., Костин М.С. *Метод радиосенсорной технической диагностики микропроцессорных устройств*. Новые технологии высшей школы. Наука, техника, педагогика (Россия, Москва, 26 марта 2021 г.). М.: Московский Политех, 2021. С. 119–123.
- Данилов Д.Е. Оконное преобразование Фурье при вычислении частотно-временных корреляционных функций. *Globus: Технические науки*. 2020. № 4 (35). С. 20–25.
- Еременко В.Т. *Техническая диагностика электронных средств*. Орел: ФГБОУ ВПО “Госуниверситет – УНПК”, 2012. 157 с.
- Кубарев А.В., Лапсарь А.П., Асютиков А.А. Синтез модели объекта критической информационной инфраструктуры для безопасного функционирования технической системы в условиях деструктивного информационного воздействия. *Вопросы кибербезопасности*. 2020. № 6 (40). С. 48–56. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-06-48-56>
- Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. М.: Солон, 1999. 698 с.
- Ткаченко Ф.А. *Электронные приборы и устройства*. М.: Инфра-М, 2018. 156 с.
- Hu Y., Li W., Wang Y.F., Jin G., Jiang X. A JTAG-based management bus on backplane for modular instruments. *J. Instrumentation*. 2019. Т. 14. № 9. P. T09002.
- Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2020. No. 4 (32). P. 115–130. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-13>
- Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA. *J. Electron. Sci. Technol.* 2019. V. 17. No. 2. P. 135–151.
- Vostokov N.V., Revin M.V., Shashkin V.I. Microwave detector diodes based on InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures. *J. Applied Physics*. 2020. V. 127. No. 4. P. 044503. <https://doi.org/10.1063/1.5131737>

## Radio-sensor technical diagnosis complex electronic assembly

K. A. Boikov<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> MIREA – Russian Technological University 119454 Moscow, prosp. Vernadsky, 78, Russia

<sup>#</sup> E-mail: nauchnyi@yandex.ru

The main advantages of the method of passive radiosensor technical diagnostics (PRTD) over the most significant methods for determining the technical condition (vibrometry, thermal control, JTAG testing, optical control) are: no inertia, no processor time, no galvanic contact with the object of study. In modern scientific literature, almost no attention is paid to the analysis of signal radio profiles (SRP) of the electrical component of electromagnetic radiation created by the electronic device itself. The purpose of this study is to develop the PRTD method by analyzing complex SRPs with decomposition and parameter extraction. The paper presents expressions for the oscillatory redistribution of energy, which describe the process of formation of the SRP. A new method of SRP decomposition is proposed, which makes it possible to obtain information about the main parameters of the emitters of the electronic assembly. An experiment was prepared and carried out to register and study the SRP of a composite electronic assembly in various operating modes. The values of the SRP parameters were obtained, indicating the presence of a malfunction in the electronic unit, or an incorrect mode of operation. These studies can be used in PRTD, in determining hardware failures, or degradation of element parameters in the early stages.

*Key words:* signal radio profile, correlation analysis, signal decomposition, parameter extraction, technical diagnostics

### REFERENCES

- Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.Ye., Makarov O.Yu. Chastotno-vremennoy analiz nestatsionarnykh signalov metodami veyvlet-preobrazovaniya i okonnogo preobrazovaniya Fur'ye [Time-Frequency Analysis of Nonstationary Signals by Wavelet Transform and Windowed Fourier Transform]. *Radiotekhnika* [Radio engineering]. 2019. T. 83. № 6 (8). P. 109–112 (in Russian).
- Basharin S.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. M.: Akademiya, 2018. 192 p. (in Russian).
- Boikov K.A. Modelirovaniye i analiz kolebatel'nogo perezraspredeleniya energii pri sobstvennykh elektromagnitnykh izlucheniyyakh v klyuchevykh radioelektronnykh skhemakh na MOP-tranzistorakh [Modeling and analysis of oscillatory redistribution of energy with own electromagnetic radiation in key radio-electronic circuits on MOS transistors]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of radio electronics], 2021. № 6. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>. (in Russian).
- Boikov K.A. Opreddeniye parametrov elektronnykh ustroystv metodom passivnoy radiosensornoy tekhnicheskoy diagnostiki [Determination of the parameters of electronic devices by the method of passive radio sensor technical diagnostics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [News of higher educational institutions of Russia. Radioelectronics]. 2021. P. 63–70. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70> (in Russian).
- Boikov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. Radiosensornaya diagnostika tselostnosti signalov vnutrikhemnoy i periferiynoy arkhitektury mikroprotssornykh ustroystv [Radiosensor diagnostics of signal integrity of in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices]. *Rossiyskiy tekhnologicheskyy zhurnal* [Russian technological journal]. 2021. V. 9 (4). P. 20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27> (in Russian).
- Boikov K.A., Kostin M.S. Metod radiosensornoy tekhnicheskoy diagnostiki mikroprotssornykh ustroystv [Method of radio sensor technical diagnostics of microprocessor devices]. *Novyye tekhnologii vysshey shkoly. Nauka, tekhnika, pedagogika* [New technologies of higher education. Science, technology, pedagogy]. Moscow: Moskovskiy Politekh, 2021. P. 119–123 (in Russian).
- Danilov D.Ye. Okonnnoye preobrazovaniye Fur'ye pri vychislenii chastotno-vremennykh korrelyatsionnykh funktsiy [Windowed Fourier Transform in Computing Time-Frequency Correlation Functions]. *Globus: Tekhnicheskkiye nauki* [Globus: Engineering Sciences]. 2020. № 4 (35). P. 20–25 (in Russian).
- Yeremenko V.T. Tekhnicheskaya diagnostika elektronnykh sredstv [Technical diagnostics of electronic means]. Orel: FGBOU VPO “Gosuniversitet – UNPK”, 2012. 157 p. (in Russian).
- Kubarev A.V., Lapsar' A.P., Asyutikov A.A. Sintez modeli ob"yekta kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury dlya bezopasnogo funktsionirovaniya tekhnicheskoy sistemy v usloviyakh destruktivnogo informatsionnogo vozdeystviya [Synthesis of a critical information infrastructure object model for the safe functioning of a technical system under destructive information impact]. *Voprosy kiberbezopasnosti* [Cybersecurity Issues]. 2020. № 6 (40). P. 48–56. <https://doi.org/0.21681/2311-3456-2020-06-48-56>. (in Russian).
- Razevig V.D. Sistema skvoznogo proyektirovaniya elektronnykh ustroystv [System of end-to-end design of

- electronic devices] Design Lab 8.0. M.: Solon, 1999. 698 p. (in Russian).
- Tkachenko F.A. Elektronnyye pribory i ustroystva [Electronic appliances and devices]. M.: Infra-M, 2018. 156 p. (in Russian).
- Hu Y., Li W., Wang Y.F., Jin G., Jiang X. A JTAG-based management bus on backplane for modular instruments. *J. Instrumentation*. 2019. T. 14. № 9. P. T09002.
- Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2020. No. 4 (32). P. 115–130. <https://doi.org/10.21685/2307-4205-2020-4-13>.
- Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA. *J. Electron. Sci. Technol.* 2019. V. 17. No. 2. P. 135–151.
- Vostokov N.V., Revin M.V., Shashkin V.I. Microwave detector diodes based on InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures. *J. Applied Physics*. 2020. V. 127. No 4. P. 044503. <https://doi.org/10.1063/1.5131737>.