

21. Nane R. et al. A Survey and Evaluation of FPGA High-Level Synthesis Tools, in *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Oct. 2016, Vol. 35, No. 10, pp. 1591-1604.
22. Nane R., Sima V.-M., Olivier B., Meeuws R., Yankova Y., Bertels K. DWARV 2.0: A CoSy-based C-to-VHDL Hardware Compiler, In *FPL*, 2012, pp. 619-622.
23. Pilato C. and Ferrandi F. Bambu: A Modular Framework for the High Level Synthesis of Memory-intensive Applications, In *FPL*, 2013, pp. 1-4.
24. Canis A., Choi J., Aldham M., Zhang V., Kammoona A., Anderson J.H., Brown S., Czajkowski T. LegUp: High-Level Synthesis for FPGA-based Processor, *Accelerator Systems. In ACM FPGA*, 2011, pp. 33-36.
25. Make Slow Software Run Fast with Vivado HLS. Available at: <https://www.xilinx.com/publications/xcellonline/run-fast-with-Vivado-HLS.pdf>, last accessed 2021/03/10 (accessed 18 November 2021).
26. Vitis Unified Software Platform Documentation. Application Acceleration Development. Available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2019_2/ug1393-vitis-application-acceleration.pdf, last accessed 2021/03/10 (accessed 18 November 2021).
27. Пяа Levin, Alexey Dordopulo, Vyacheslav Gudkov, Andrey Gulenok, Alexander Bovkun, Georgyi Yevstafiyev, Kirill Alekseev. Software development tools for fpga-based reconfigurable systems programming, In: *communications in computer and information science*, 2019, Vol. 1129, Chapter parallel computing technologies, pp. 1-16.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Мельников Андрей Кимович – АО «Вычислительные решения»; e-mail: anta-mak@umail.ru; ak@comp-sol.ru; Москва, Россия; г.н.с.; к.т.н.; доцент ВАК.

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: iilevin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; зав. кафедрой ИМС; д.т.н.; профессор.

Дордопуло Алексей Игоревич – НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров; e-mail: dordopulo@superevm.ru; г. Таганрог, Россия; начальник отдела; к.т.н.

Писаренко Иван Вадимович – e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; научный сотрудник.

Melnikov Andrey Kimovich – JSC "Computing Solutions"; e-mail: anta-mak@umail.ru; ak@comp-sol.ru; Moscow, Russia; chief researcher, cand. of eng. sc.; associate professor of the Higher Attestation Commission.

Levin Il'ya Izrailevich – Southern Federal University; iilevin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Dordopulo Alexey Igorevich – Supercomputers and Neurocomputers Research Cente; e-mail: dordopulo@superevm.ru; Taganrog, Russia; head of department; cand. of eng. sc.

Pisarenko Ivan Vadimovich – ivan123tgn@yandex.ru; research associate.

УДК 537.874

DOI 10.18522/2311-3103-2021-7-19-31

К.А. Бойков

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Преимуществом перспективного метода пассивной радиосенсорной технической диагностики (ПРТД) над существующими на сегодняшний день способами определения технического состояния (виброметрия, тепловой контроль, JTAG-тестирование, оптический контроль) являются: отсутствие инерции, отсутствие затрат процессорного времени, отсутствие гальванического контакта с объектом исследования. В современной научной

литературе практически не уделяется внимания численным моделям электронных устройств, в том числе на биполярных транзисторах (БПТ), которые описывают процесс колебательного перераспределения энергии и излучения, используемого в ПРТД. Поэтому целью данного исследования является развитие метода ПРТД посредством разработки, анализа и сравнения схемотехнической и электродинамической моделей колебательного перераспределения энергии в БПТ. В работе представлены и проанализированы упрощенные схемотехническая и электродинамическая модели колебательного перераспределения энергии в БПТ. Рассчитаны параметры моделей, получены численные сигнальные радиопрофили (СРП) электрической составляющей электромагнитных излучений, созданных самим радиоэлектронным узлом, построенным на БПТ. Показаны способы корректировки справочных параметров в зависимости от реальных условий включения БПТ. Установлено, что взаимная корреляционная функция СРП, полученных в результате схемотехнического и электродинамического моделирования, не ниже 0,93, что говорит о высоком сходстве представленных моделей. На практике использование разработанных моделей при анализе СРП, полученных путем регистрации собственных излучений радиотехнических узлов электронных устройств, позволит с достаточно высокой точностью определить режим функционирования БПТ и его быстродействие. Данный анализ может быть использован в ПРТД, указывая на неисправности сигнальных цепей, либо на деградацию параметров самого элемента на ранних стадиях.

Биполярный транзистор; сигнальный радиопрофиль; техническая диагностика; корреляционный анализ; радиотехнический узел; свободные колебания.

К.А. Boikov

CIRCUIT AND ELECTRODYNAMIC SIMULATION OF THE OSCILLATORY PROCESS OF ENERGY REDISTRIBUTION IN A BIPOLAR TRANSISTOR

The advantage of the promising method of passive radiosensor technical diagnostics (PRTD) over the currently existing 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 numerical models of electronic devices, including those based on bipolar transistors (BPT), which describe the process of oscillatory redistribution of energy and radiation used in PRTD. Therefore, the purpose of this study is to develop the PRTD method through the development, analysis and comparison of circuit and electrodynamic models of oscillatory energy redistribution in the BPT. The paper presents and analyzes simplified circuit and electrodynamic models of oscillatory redistribution of energy in the BPT. The parameters of the models are calculated signal radio profiles (SRP) are obtained for the electrical component of electromagnetic radiation created by the radio-electronic unit itself, built on the BPT. Methods for adjusting the reference parameters depending on the actual conditions for switching on the BPT are shown. It has been established that the cross-correlation function of the SRP obtained as a result of circuit and electrodynamic modeling is not lower than 0.93, which indicates a high similarity of the presented models. In practice, the use of the developed models in the analysis of SRP obtained by recording the intrinsic emissions of radio engineering components of electronic devices will allow us to determine the operating mode of the BPT and its speed with a sufficiently high accuracy. This analysis can be used in the PRTD, indicating a malfunction of the signal circuits, or degradation of the parameters of the element itself in the early stages.

Bipolar transistor; signal radio profile; technical diagnostics; correlation analysis; radio engineering unit; free vibrations.

Введение. Основной гарантией бесперебойного функционирования электронных устройств (ЭУ) на сегодняшний день является техническая диагностика (ТД) – молодая, но стремительно развивающаяся отрасль научно-технических знаний, состоящих из теории, методов и средств обнаружения дефектов объектов технической природы [1]. Развивает теорию ТД перспективный метод ПРТД, впервые представленный в работах [2, 3] и метод пассивной радиосенсорной ау-

тентификации (ПРА) [4], основанные на регистрации электрической составляющей ближнего поля электромагнитных излучений, возникающих при перераспределении энергии в реактивных накопителях ЭУ.

Несмотря на возрастающую популярность МОП-структур [5], такие устройства, как стабилизаторы, генераторы, усилители, аттенюаторы неизменно имеют в своей конфигурации узлы на биполярных транзисторах (БПТ). Наличие входных и выходных емкостей самого БПТ, а также подводящих паразитных емкостей и индуктивностей, при подаче питающих и управляющих сигналов ведет к перераспределению энергии между данными реактивными накопителями. Таким образом, возможна регистрация и идентификация СРП – электрической составляющей электромагнитных излучений, созданных самим узлом, содержащим БПТ.

В труде [6] доказано, что общий СРП узла является линейной суперпозицией СРП входных и выходных цепей составляющих его излучателей:

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

где U_{CB} – мгновенное значение приведенного уровня i -го колебания, U_0 – приведенная амплитуда первой полуволны i -го колебания, δ – коэффициент затухания i -го колебания, t – текущий момент времени, t_0 – момент времени начала излучения i -го колебания, f – частота i -го колебания.

ПРТД показывает, что суперпозиция полей излучения каждого электронного узла несет информацию о функционировании прибора, о его техническом состоянии. Особенно это актуально для радиоэлектронных узлов на БПТ, поскольку номинальные значения их параметров имеют нелинейную функциональную зависимость не только от внешних условий, но и от способа подключения. Для определения технического состояния данных узлов электронного устройства необходимо провести анализ СРП, и полезно сопоставить исходному СРП сумму составляющих сигналов, обработка которых более проста и более полно раскрывает информационные аспекты исходного сигнала [7]. Однако декомпозиция сложного СРП – непростая математическая задача, связанная с массивами данных, многократными преобразованиями и как следствие, возникновением дополнительных расчетных погрешностей. Поэтому моделирование колебательного перераспределения энергии в БПТ значительно упростит анализ СРП, позволит прогнозировать возможное развитие неисправности на самых ранних этапах, отличить оригинальное устройство (или узел) от контрафакта. Также корреляционный анализ зарегистрированных СРП и СРП, полученных в результате моделирования, может показать ошибки в режимах работы БПТ, снижение его быстродействия, деградацию областей.

Схемотехническое моделирование. В современных программах схемотехнического моделирования, использующих Spice модели компонентов, в основном применяется схема замещения БПТ в виде адаптированной модели Гуммеля-Пуна [8, 9]. Поскольку для рассматриваемого случая наибольший интерес представляют емкостные накопители БПТ, то для построения модели колебательного перераспределения энергии возможно модифицировать более простую модель БПТ – модель Эберса-Молла [10], основанную на использовании квадратичных уравнений. В этой модели необходимо учесть паразитные емкости, индуктивности и омические сопротивления проводников, подводящих управляющие сигналы к БПТ.

На рис. 1 представлена разработанная упрощенная модель колебательного перераспределения энергии в БПТ в программе схемотехнического моделирования ISIS пакета Proteus 8 Professional [11].

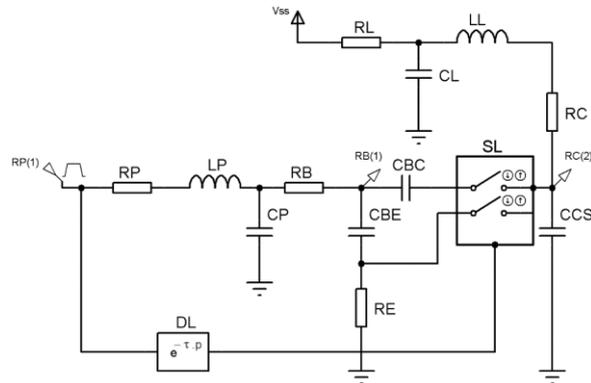


Рис. 1. Упрощенная модель колебательного перераспределения энергии в БПТ

На данном рисунке:

- RP – Эквивалентное сопротивление подводящих проводников;
- LP – Эквивалентная индуктивность подводящих проводников (вход);
- CP – Эквивалентная емкость подводящих проводников (вход);
- RB – Объемное сопротивление базы;
- RE – Объемное сопротивление эмиттера;
- RC – Объемное сопротивление коллектора;
- CBE – Емкость перехода база – эмиттер;
- CBC – Емкость перехода база – коллектор;
- CCS – Емкость коллектор – подложка;
- IC – Ток коллектора;
- DL – Задержка включения нагрузки;
- SL – Управляемый ключ (в нормальном состоянии разомкнут, при подаче управляющего напряжения – замкнут);
- RL – Сопротивление нагрузки;
- LL – Эквивалентная индуктивность подводящих проводников (выход);
- CL – Эквивалентная емкость подводящих проводников (выход);
- Vss – Напряжение питания узла;
- RB(1) – Выход излучения;
- RC(2) – Выход излучения.

Для запуска моделирования рассмотрим параметры популярного БПТ n-p-n типа – BC547B (аналог КТ3102) [12].

Емкость перехода база – эмиттер (CBE) – справочный параметр, однако он указан для нулевого смещения, что делает необходимым его пересчет для модели под реальные условия прямого смещения.

Емкость CBE равна сумме диффузионной C_{BED} и барьерной C_{BEB} составляющих [13]:

$$CBE = C_{BED} + C_{BEB}. \quad (2)$$

Поскольку эмиттерный переход работает в прямом смещении, то $C_{BED} \gg C_{BEB}$ и можно записать [14]:

$$CBE \approx C_{BED} = t_f \frac{dI_B}{dV_{BE}}, \quad (3)$$

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

В свою очередь:

$$t_f = TF \left[1 + XTF \left(\frac{I_B}{I_B + ITF} \right)^2 e^{\frac{V_{BC}}{1,44 \cdot VTF}} \right], \quad (4)$$

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 – напряжение, характеризующее зависимость TF от V_{BC} [14].

Емкости перехода база – коллектор (CBC) и коллектор – подложка (CCS) находятся в обратном смещении и также могут быть скорректированы по зависимостям, представленным в справочной информации [12].

Для запуска моделирования необходимо найти значения параметров RP , LP , CP , LL , CL . Их значения можно рассчитать, зная геометрию подводящих линий. На рис 2 представлена предполагаемая топология исследуемой печатной платы.

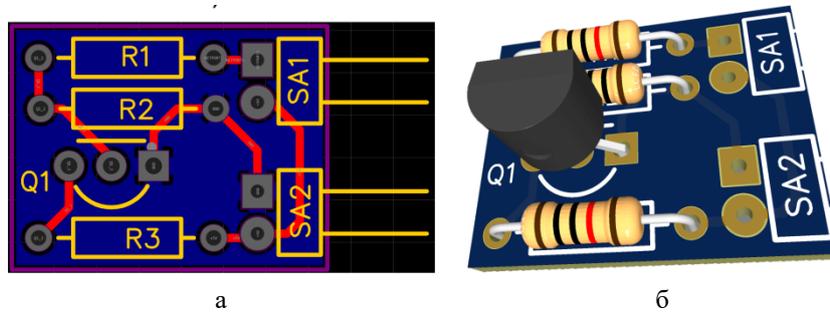


Рис. 2. Топология исследуемого образца: а – вид сверху, б – общий вид

На данном рисунке $R1$, $R2$ – резистивный делитель, $R3$ – нагрузка 100 Ом ($R3 = RL$), $SA2$ – выводы для подачи питания, $SA1$ – выводы для подачи управляющего напряжения, $Q1$ – транзистор $BC547B$.

Параметры подводящей линии можно приблизительно оценить по формулам Э. Хаммерстада и О. Дженсена для импеданса микрополосковой линии в однородной среде [15].

Погонная емкость C_p микрополосковой линии (при $CP = C_p \cdot l$) определяется как:

$$C_p = \frac{2,64 \cdot 10^{-11} (\epsilon_r + 1,41)}{\ln \left(\frac{5,98 \cdot H}{0,8 \cdot W + T} \right)}, \quad (5)$$

где W – ширина микрополосковой линии в миллиметрах, T – высота микрополосковой линии в миллиметрах, H – высота подложки в миллиметрах, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость изолирующего материала подложки, l – длина микрополосковой линии в миллиметрах.

Погонную индуктивность L_p микрополосковой линии (при $LP = L_p \cdot l$) можно оценить как:

$$L_p = C_p \cdot Z^2, \quad (6)$$

где Z – волновое сопротивление микрополосковой линии в омах, рассчитанное по формуле Хаммерстада-Дженсена:

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

где Z_L – волновое сопротивление микрополосковой линии в однородной среде в омах [16, 17].

$$Z_L = \frac{Z_0}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{H}{W} \left(6 + (2\pi - 6) \cdot \exp \left(- \left(30,67 \cdot \frac{H}{W} \right)^{0,75} \right) \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{W} \right)^2} \right], \quad (8)$$

где Z_0 – волновое сопротивление вакуума.

Погонное сопротивление R_p микрополосковой линии (при $RP = R_p \cdot l$) рассчитывается как:

$$R_p = \frac{\rho}{W \cdot d}, \quad (9)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника, d – толщина материала.

Остальные значения параметров модели, представленной на рис. 1 зависят от конкретного БПТ и их можно узнать используя справочные данные (либо параметры Spice модели). Параметр DL (задержка включения нагрузки) в справочной литературе явным образом не представлен. Однако время установления стационарного тока в БПТ определяется временем жизни неосновных носителей заряда в базе, а также задержкой вносимой входной емкостью и связано с граничной частотой транзистора f_{cp} примерным соотношением [18]:

$$DL \approx \frac{1}{f_{cp}}, \quad (10)$$

При излучении энергии электронным узлом, содержащем БПТ, речь идет о колебательном характере процесса перераспределения энергии, то есть общее решение характеристического уравнения, полученного из аналитического отношения величин нагрузок потребителей и накопителей в исследуемом узле, является свободной составляющей (U_{CB}), а корни комплексно-сопряженными $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega$. Само выражение свободной составляющей имеет вид [19]:

$$U_{CB}(t) = U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega t), \quad (11)$$

где ω – угловая частота.

Для свободных колебаний угловую частоту можно определить как [20]:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (12)$$

Таким образом в модели, представленной на рис. 1 свободные колебания затухают тем быстрее, чем больше паразитные сопротивления подводящих проводников и объемные сопротивления токопроводящих слоев БПТ. Также очевидно, что чем меньше входные и выходные емкости БПТ, тем выше собственная частота колебаний.

Опираясь на выражения **Ошибка! Источник ссылки не найден.–Ошибка! Источник ссылки не найден.** и справочные данные, рассчитываются параметры модели. Входная цепь: $SBE \approx 11$ пФ, $SBC \approx 4$ пФ, $RE \approx 580$ мОм, $RB \approx 100$ мОм, $RP \approx 100$ мОм, $LP \approx 500$ пГн, $CP \approx 1$ пФ. Выходная цепь: $RC \approx 2$ Ом, $LL \approx 500$ пГн, $CL \approx 1$ пФ, $RL = 1$ кОм, $CCS \approx 3$ пФ, $DL \approx 3,3$ нс. Параметры воздействия: $V_{ss} = 5$ В, $RP(1)$ – «ступенька» 0-0,7 В (скорость нарастания 1В/пс). Аналоговый анализ (analogue analysis) проводится в точках $RB(1)$ и $RC(1)$.

Электродинамическое моделирование. Данный вид моделирования колебательного перераспределения энергии будет произведен в пакете программ FEKO [21]. Расчет в среде FEKO основан на нескольких методах: метод моментов (МоМ), методы геометрической и физической оптики, многопортовой метод [22]. В МоМ металлические компоненты замещаются эквивалентными электрическими токами, протекающими по поверхности. Далее оценивается возбуждение окружающей среды поверхностными токами посредством тензорных функций Грина [23] с наложением граничных условий и последующим расчетом эквивалентных токов. Перед выполнением указанных вычислений происходит деление металлической структуры на элементарные площадки и аппроксимация тока в границах площадки посредством постоянных, линейных и треугольных функций (базисных функций). Граничные условия на поверхностях металлических элементов в МоМ применяются в нескольких точках в пределах одной элементарной площадки, с образованием в конкретных точках системы линейных алгебраических уравнений. Уравнения определяются на основе коэффициентов базисных функций (амплитудное значение токов, протекающих в диапазоне выделенной площадки) и решаются методом исключения Гаусса. Разбиение объекта на элементарные площадки в форме треугольника дает возможность описывать искривленные поверхности. На практике приемлемая в ходе моделирования точность обеспечивается при размере элементарной площадки не более $0,1 \cdot \lambda$, где λ – длина волны [24]. Число линейных алгебраических уравнений в данном случае, соответствует числу разбиений.

На рис. 3 представлена электродинамическая модель колебательного перераспределения энергии в ключевом узле на БПТ в программе электродинамического моделирования Altair Feko.

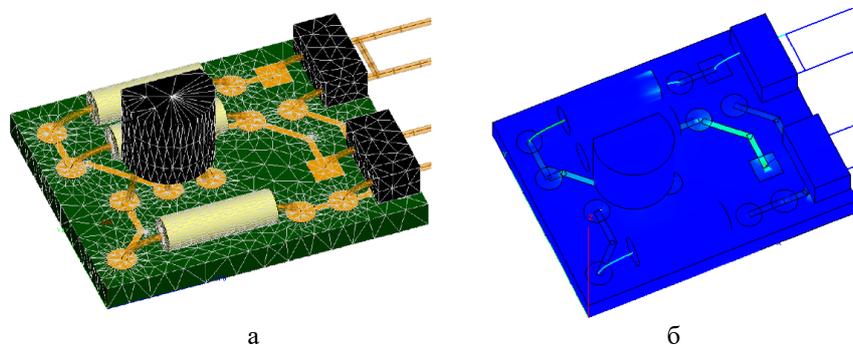


Рис. 3. Электродинамическая модель колебательного перераспределения энергии в БПТ (копия с экрана): а – общий вид, б – протекание тока

Топологические размеры и координаты размещения компонентов соответствуют топологии, представленной на рис. 2. Также к структуре были добавлены Spice модели БПТ, резисторов и источника питания через модуль Schematic (рис. 4).

Для определения излучающей способности разработанной модели необходимо построить зависимость электрической компоненты E электромагнитного поля от частоты в модуле Cartesian (рис. 5).

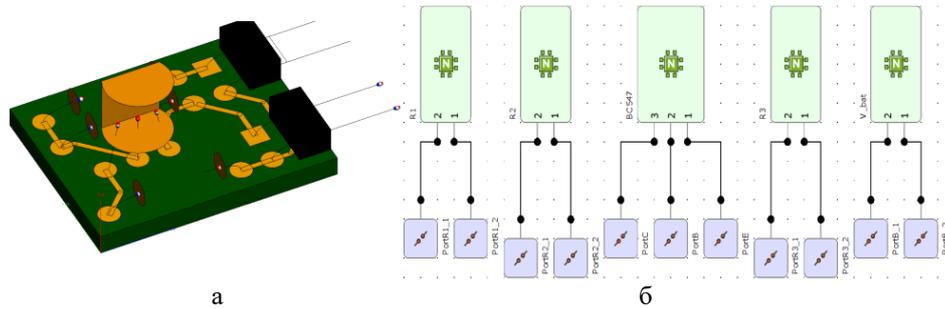


Рис. 4. Подключение Spice моделей компонентов (копия с экрана):
а – расположение портов, б – соединения компонентов

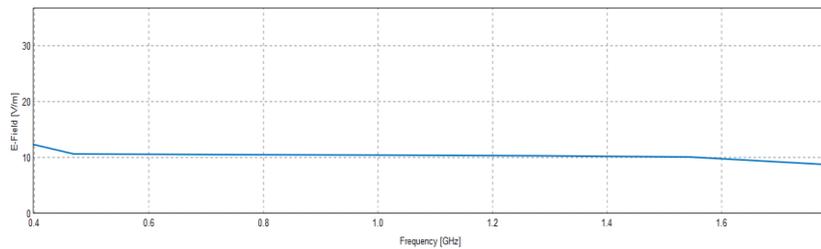


Рис. 5. Зависимость электрической компоненты электромагнитного поля от частоты (копия с экрана)

Как видно из приведенного рисунка, в исследуемом диапазоне частот зависимость нелинейная. На частотах 1,6–1,8 ГГц E снижается приблизительно на 20 %, что будет сказываться на параметре U_0 для выходного излучателя БПТ в этом частотном диапазоне. Данную зависимость необходимо учитывать в дальнейших исследованиях.

Сравнение результатов. После запуска моделирования, были получены два СРП. Для сравнения данных СРП, схематехнического и электродинамического моделирования, необходимо провести корреляционный анализ (рис. б).

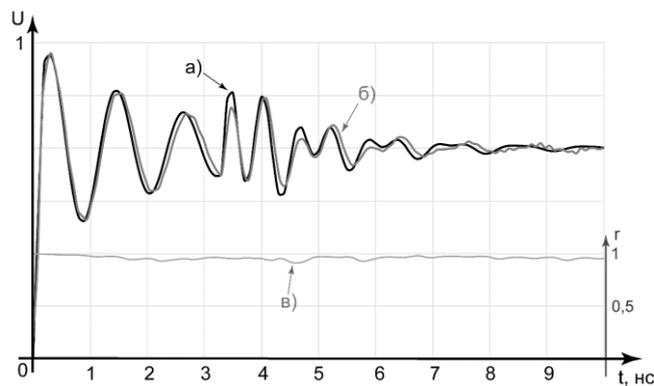


Рис. 6. СРП колебательного перераспределения энергии в ключе на БПТ в режиме инвертора: а) схематехническое моделирование, б) электродинамическое моделирование, в) корреляционная функция

Для определения различия в полученных СРП недостаточно вычислить их взаимную корреляцию, поскольку общая корреляция может существенно отличаться от корреляции в определенных диапазонах. Поэтому необходимо построить корреляционную функцию $r(h)$ между СРП различных экспериментальных образцов [25]:

$$r(h) = \frac{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1) \cdot (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)^2 \cdot \sum_{i=h}^{M+h} (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)^2}}, \quad (13)$$

где M – число выборок («окно»), h – номер отсчета положения «окна» ($0 < h < K - M$), K – общее число отсчетов СРП, $Y_1 = \frac{U}{U_M}$ – выборки значений СРП a , $Y_2 = \frac{U_B}{U_{MB}}$ –

выборки значений СРП b , $\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{1,i}$, $\bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{2,i}$ – средние значения

выборок, U – значение СРП a в точке выборки, U_M – максимальное значение СРП a , U_B – значение СРП b в точке выборки, U_{MB} – максимальное значение СРП b .

Корреляционная функция между СРП, полученными в результате схемотехнического и электродинамического моделирования не опускается ниже 0,93, что по коэффициентам Чеддока [26] говорит о сильной корреляционной связи двух кривых. Корреляционная функция не учитывает масштаба сигналов, поэтому необходим детальный анализ с экстракцией параметров излучателей БПТ (табл. 1).

Таблица 1

Значения параметров СРП

Модели	N	f , ГГц	δ , нс ⁻¹	t_0 , нс	U_0
Схемотехническая (вход)	2	0,83	-0,41	0	0,98
Электродинамическая (вход)		0,81	-0,42	0	1
Несоответствие, %	-	2	2	-	2
Схемотехническая (выход)	2	1,67	-0,85	3,3	1
Электродинамическая (выход)		1,62	-0,83	3,3	0,88
Несоответствие, %	-	3	3	0	12

Таблица показывает хорошее соответствие параметров входных излучателей (не менее 98 %). Выходной излучатель имеет более высокое несоответствие, особенно параметра U_0 (12 %). Это связано с топологическими особенностями образца и хорошо описывается зависимостью, представленной на рис. 5.

Заключение. В работе впервые представлена модель колебательного перераспределения энергии БПТ в программе электродинамического моделирования Altair Feko и в программе схемотехнического моделирования ISIS пакета Proteus 8 Professional. При корректном задании параметров, разработанная модель позволяет формировать импульсные характеристики входных и выходных цепей БПТ, обусловленные наличием реактивных накопителей в радиотехническом узле. На основе физико-математического обоснования предложенных моделей были уточнены параметры входных и выходных емкостей с учетом реальных условий включения БПТ. Высокая степень строгости описания структур при электродинамическом моделировании позволяет получить более точные сведения о колебательном процессе перераспределения энергии в ЭУ, по сравнению с аналитическим расчетом и

другими видами моделирования. Однако временные затраты и ресурсы для проведения схмотехнического и электродинамического моделирования несопоставимы. Расчет схмотехнической модели современными серверными системами занимает около 5 секунд, в то время как расчет электродинамического моделирования этими же системами занимает более 8 часов. Выходом из данной ситуации видится учет частотной зависимости электрической составляющей электромагнитного поля при использовании результатов схмотехнического моделирования.

Предлагаемые модели могут быть использованы в ПРТД и ПРА, основанных на регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений, создаваемых самими радиоэлектронными устройствами, открывая новые возможности в области обеспечения безотказного функционирования, а также защиты от реинжиниринга оригинальных электронных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Еременко В.Т.* Техническая диагностика электронных средств. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», 2012. – 157 с.
2. *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>.
3. *Бойков К.А., Костин М.С.* Метод радиосенсорной технической диагностики микропроцессорных устройств // Новые технологии высшей школы. Наука, техника, педагогика: Матер. Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2021» (Россия, Москва, 26 марта 2021 года). – М.: Московский Политех, 2021. – С. 119-123.
4. *Бойков К.А.* Метод радиоволновой аутентификации микропроцессорных устройств: пат. 2755153 Рос. Федерации МПК H04L 9/32 / заявитель и правообладатель Бойков К.А. – № 2021103796; заявл. 16.02.2021; опубл. 13.09.2021, Бюл. №26.
5. *Евстифеев А.В.* Микроконтроллеры AVR семейств Mega. Руководство пользователя. – М.: ДМК, 2015. – 588 с.
6. *Бойков К.А.* Определение параметров электронных устройств методом пассивной радиосенсорной технической диагностики // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2021. – № 24 (6). – С. 63-70. – <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>.
7. *Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao.* Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA // Journal of electronic science and technology. – June 2019. – Vol. 17, No. 2. – P. 135-151.
8. *Khvalin A.L.* Modeling 2T937 Bipolar Transistors Based on Experimental Static and Frequency Characteristics // Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 61, No. 8. – P. 831-835. – DOI: 10.1007/s11018-018-1510-6.
9. *Wang J. Liang S. [et al.].* An improved SPICE model of SiC BJT incorporating surface recombination effect // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34, No 7. – P. 6794-6802. – DOI: 10.1109/TPEL.2018.2871594.
10. *Gu J. Gaspard P.* Counting statistics and microreversibility in stochastic models of transistors // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2020. – Vol. 2020, No. 10. – P. 103206. – DOI: 10.1088/1742-5468/abbcd5.
11. *Evangelina C.S. Lenin A.* Human health monitoring using wearable sensor // Sensor Review. – 2019. – Vol. 39, No. 3. – P. 364-376. – DOI: 10.1108/SR-05-2018-0111.
12. Fairchild semiconductor BC546/547/548/549/550 datasheets. – URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/BC546.pdf> (дата обращения 16.01.2022).
13. *Vostokov N.V., Revin M.V., Shashkin V.I.* Microwave detector diodes based on InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127, No. 4. – P. 044503. – DOI: 10.1063/1.5131737.
14. *Разевиг В.Д.* Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. – М.: Солон, 1999. – 698 с.

15. *Kizimenko V.V., Ulanouski A.V.* Comparative analysis of the various resonator models in the input impedance calculation of the microstrip antennas // *Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2016: Materials of 39-th International Conference (Vienna, June 27-29, 2016).
16. *Бойков К.А.* Моделирование и анализ колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в ключевых радиоэлектронных схемах на МОП-транзисторах // *Журнал радиоэлектроники*. – 2021. – № 6. – <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14> (дата обращения: 25.11.2021).
17. Научно-технический портал по радиоэлектронике “RadioProg”. Раздел «Калькуляторы». – URL: <https://radioprogram.ru/calculator/list> (дата обращения: 11.01.2022).
18. *Землянухин П.А.* Исследование характеристик умножителя частоты гармонических колебаний на базе ограничителя напряжения // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 5 (190). – С. 90-102.
19. *Ткаченко Ф.А.* Электронные приборы и устройства. – М.: Инфра-М, 2018. – 156 с.
20. *Баширин С.А.* Теоретические основы электротехники. – М.: Академия, 2018. – 192 с.
21. *Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А.* Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. – М.: One-Book, 2013. – 423 с.
22. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2008. – 246 с.
23. *Григорьев А.Д.* Метод вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2012. – 432 с.
24. *Ахияров В.В.* Использование интегрального и дифференциального методов теории дифракции для прогноза напряженности поля над земной поверхностью // *Электронное научно-техническое издание «Наука и Образование»*, 2011.
25. *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> (дата обращения: 11.01.2022).
26. *Костин М.С., Шильцин А.В.* Моделирование радиофотонных повторителей субнаносекундных сигналов с дробным мультиплексированием // *Сб. тр. IV международной научно-практической конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2019»)»*. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. – С. 257-260.

REFERENCES

1. *Eremenko V.T.* Tekhnicheskaya diagnostika elektronnykh sredstv [Technical diagnostics of electronic means]. Orel: FGBOU VPO «Gosuniversitet - UNPK», 2012, 157 p.
2. *Boykov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V.* Radiosensornaya diagnostika tselostnosti signalov vnutrirkhemnoy i periferiynoy arkhitektury mikroprotsessornykh ustroystv [Radiosensory diagnostics of signal integrity of in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2021, No. 9 (4), pp. 20-27. Available at: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>.
3. *Boykov K.A., Kostin M.S.* Metod radiosensornoy tekhnicheskoy diagnostiki mikroprotsessornykh ustroystv [Method of radiosensory technical diagnostics of microprocessor devices], *Novye tekhnologii vysshey shkoly. Nauka, tekhnika, pedagogika: Mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka – Obshchestvo – Tekhnologii – 2021» (Rossiya, Moskva, 26 marta 2021 goda)* [New technologies of higher education. Science, technology, pedagogy: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Science - Society - Technologies - 2021" (Russia, Moscow, March 26, 2021)]. Moscow: Moskovskiy Politekh, 2021, pp. 119-123.
4. *Boykov K.A.* Metod radiovolnovoy autentifikatsii mikroprotsessornykh ustroystv: pat. 2755153 Ros. Federatsii MPK H04L 9/32 [Method of radio wave authentication of microprocessor devices: pat. 2755153 Ros. IPC Federation H04L 9/32], applicant and copyright holder Boykov K.A. No. 2021103796; announced on 16.02.2021; published on 13.09.2021, Bull. No. 26.
5. *Evstifeev A.V.* Mikrokontrollery AVR semeystv Mega. Rukovodstvo pol'zovatelya [AVR microcontrollers of the Mega family. User Manual.]. Moscow: DMK, 2015, 588 p.
6. *Boykov K.A.* Opredelenie parametrov elektronnykh ustroystv metodom passivnoy radiosensornoy tekhnicheskoy diagnostiki [Determination of parameters of electronic devices by the method of passive radiosensory technical diagnostics], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics], 2021, No. 24 (6), pp. 63-70. Available at: <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-63-70>.

7. Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA, *Journal of electronic science and technology*, June 2019, Vol. 17, No. 2, pp. 135-151.
8. Khvalin A. L. Modeling 2T937 Bipolar Transistors Based on Experimental Static and Frequency Characteristics, *Measurement Techniques*, 2018, Vol. 61, No. 8, pp. 831-835. DOI: 10.1007/s11018-018-1510-6.
9. Wang J. Liang S. [et al.]. An improved SPICE model of SiC BJT incorporating surface recombination effect, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, Vol. 34, No 7, pp. 6794-6802. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2871594.
10. Gu J. Gaspard P. Counting statistics and microreversibility in stochastic models of transistors, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2020, Vol. 2020, No. 10, pp. 103206. – DOI: 10.1088/1742-5468/abbcd5.
11. Evangeline C.S. Lenin A. Human health monitoring using wearable sensor, *Sensor Review*, 2019, Vol. 39, No. 3, pp. 364-376. DOI: 10.1108/SR-05-2018-0111.
12. Fairchild semiconductor BC546/547/548/549/550 datasheets. Available at: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/BC546.pdf> (accessed 16 January 2022).
13. Vostokov N.V., Revin M.V., Shashkin V.I. Microwave detector diodes based on InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures, *Journal of Applied Physics*, 2020, Vol. 127, No. 4, pp. 044503. DOI: 10.1063/1.5131737.
14. Razevig V.D. Sistema skvoznogo proektirovaniya elektronnykh ustroystv Design Lab 8.0 [The system of end-to-end design of electronic devices Design Lab 8.0]. Moscow: Solon, 1999, 698 p.
15. Kizimenko V.V., Ulanouski A.V. Comparative analysis of the various resonator models in the input impedance calculation of the microstrip antennas, *Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2016: Materials of 39-th International Conference (Vienna, June 27-29, 2016)*.
16. Boykov K.A. Modelirovaniye i analiz kolebatel'nogo pereraspredeleniya energii pri sobstvennykh elektromagnitnykh izlucheniyyakh v klyuchevykh radioelektronnykh skhemakh na MOP-tranzistorakh [Modeling and analysis of the vibrational redistribution of energy with its own electromagnetic radiation in key electronic circuits on MOSFETs], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2021, No. 6. Available at: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14> (accessed 25 November 2021).
17. Nauchno-tekhnicheskii portal po radioelektronike "RadioProg". Razdel «Kal'kulyatory» [Scientific and technical portal on radio electronics "RadioProg". Section "Calculators"]. Available at: <https://radioprogram.ru/calculator/list> (accessed 11 January 2022).
18. Zemlyanukhin P.A. Issledovanie kharakteristik umnozhitelya chastoty garmonicheskikh kolebaniy na baze ogranichitelya napryazheniya [Investigation of the characteristics of a harmonic frequency multiplier based on a voltage limiter], *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 5 (190), pp. 90-102.
19. Tkachenko F.A. Elektronnyye pribory i ustroystva [Electronic devices and devices]. Moscow: Infra-M, 2018, 156 p.
20. Basharin S.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Akademiya, 2018, 192 p.
21. Bankov S.E., Gribanov A.N., Kurushin A.A. Elektrodinamicheskoe modelirovaniye antenykh i SVCh struktur s ispol'zovaniem FEKO [Electrodynamic modeling of antenna and microwave structures using FEKO]. Moscow: One-Book, 2013, 423 p.
22. Bankov S.E., Kurushin A.A. Raschet izluchaemykh struktur s pomoshch'yu FEKO [Calculation of radiated structures using FEKO]. Moscow: ZAO «NPP «RODNIK», 2008, 246 p.
23. Grigor'ev A.D. Metod vychislitel'noy elektrodinamiki [Method of computational electrodynamics]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 432 p.
24. Akhiyarov V.V. Ispol'zovaniye integral'nogo i differentsial'nogo metodov teorii difraktsii dlya prognoza napryazhennosti polya nad zemnoy poverkhnost'yu [The use of integral and differential methods of diffraction theory to predict the field strength above the Earth's surface], *Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie «Nauka i Obrazovanie», 2011* [Electronic scientific and technical publication "Science and Education", 2011].
25. Boykov K.A. Razrabotka i issledovaniye sistemy radioimpul'snoy regeneratsii dlya ustroystv vysokoskorostnoy stroboskopicheskoy otsifrovki [Development and research of a radio pulse regeneration system for high-speed stroboscopic digitization devices], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2018, No. 3. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf> (accessed 11 January 2022).

26. *Kostin M.S., Shil'tsin A.V. Modelirovanie radiofotonnykh povtoriteley subnanosekundnykh signalov s drobnym mul'tipleksirovaniem [Modeling of radiophoton repeaters of subnanosecond signals with fractional multiplexing], Sb. tr. IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konf. «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya radiotekhnicheskikh i infokommunikatsionnykh sistem («Radioinfokom-2019») [Proceedings of the IV International Scientific and practical Conference "Actual problems and prospects of development of radio engineering and infocommunication systems ("Radioinfocom-2019")]. Moscow: MIREA – Rossiyskiy tekhnologicheskii universitet, 2019, pp. 257-260.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор М.С. Костин.

Бойков Константин Анатольевич – ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», e-mail: nauchnyi@yandex.ru; Москва, Россия; кафедра радиоволновых процессов и технологий; к.т.н.

Boikov Konstantin Anatol'evich – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University»; e-mail: nauchnyi@yandex.ru; Moscow, Russia; the department of radio wave processes and technologies; cand. of eng. sc.

УДК 681.3

DOI 10.18522/2311-3103-2021-7-31-40

С.А. Ткалич

ГИБРИДНАЯ МЕТОДИКА ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПРИОРИТЕТНОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ

Рассматривается задача построения системы принятия решений в рамках автоматизированных систем безаварийного управления технологическими процессами на основе моделей прогнозирования. Представлен анализ моделей и методов прогнозирования аварийных ситуаций. Сформулирована задача разработки методики практической реализации системы на основе интегрального критерия безаварийного управления, учитывающего запасы времени на приведение процесса в нормальное состояние (система прогнозирования аварийных ситуаций) и ресурсную составляющую (система плано-предупредительного обслуживания). Сделан вывод о целесообразности построения систем принятия решений и автоматизированных систем управления на основе моделей прогнозирования, как наиболее перспективного подхода к решению задачи безаварийного управления технологическими процессами. Принцип построения системы принятия решений основан на использовании интегрального критерия безаварийного управления. Представлена блок - схема алгоритма расчёта интегрального критерия безаварийного управления. Предложена гибридная методика практической реализации подобных систем на основе приоритетного регулирования, включающего в себя и штатный регулятор. Описана процедура формирования приоритетных регуляторов по данным прогноза. Приведена блок-схема алгоритма приоритетного регулятора, определяющего критический параметр на основе теории чувствительности. В случае положительного прогноза на аварию происходит выбор критического параметра по максимуму коэффициента чувствительности и на штатный регулятор из матрицы критических значений подается в качестве уставки минимальное или максимальное значение параметра в зависимости от знака скорости его изменения. Дана структура системы принятия решения на основе концепции безаварийного управления технологическими процессами. Станция безаварийного управления формирует данные для модуля принятия решения на основе композиционной модели прогнозирования аварийных ситуаций и интегрального критерия безаварийного управления. Приведена блок-схема алгоритма модуля принятия решения по приоритетному регулированию.

Прогнозирование; аварийная ситуация; технологический процесс; композиционная модель; интегральный критерий; модуль принятия решения; приоритетный регулятор.