

УДК 537.874

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.002](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.002)

Моделирование температурной зависимости колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в электронных схемах на МОП-транзисторах

К.А. Бойков

*МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Российская Федерация*

Резюме. В статье представлено моделирование температурной зависимости колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в электронных схемах на МОП-транзисторах. Данное исследование охватывает области радиосенсорной технической диагностики и аутентификации, использующие регистрацию электрической составляющей ближнего поля электромагнитных излучений, индуцируемых самим электронным узлом. В программе схемотехнического моделирования ISIS пакета Proteus 8 Professional построена модель ключевого элемента, основанная на методах узловых потенциалов, контурных токов при решении квадратичных уравнений. По рассчитанным параметрам модели получены численные сигнальные радиопрофили электрической составляющей электромагнитных излучений и их температурные зависимости. Показана связь времени затухания колебаний с температурой в виде простого аналитического выражения. Подготовлен и проведен эксперимент по определению корректности полученной температурной зависимости ключевого узла. Проведена корреляционная оценка воспроизводимости сигнальных радиопрофилей, полученных в результате моделирования и при проведении эксперимента. Установлено, что их взаимная корреляция не ниже 0,93, что говорит о достоверности представленного исследования. Сделан вывод о возможности использования полученных результатов в радиосенсорной технической диагностике при определении температуры электронного узла либо для нивелирования температурного дрейфа сигнального радиопрофиля.

Ключевые слова: сигнальный радиопрофиль, время затухания, электромагнитное излучение, свободные колебания, техническая диагностика, температурная зависимость.

Для цитирования: 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;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1053> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.002

Modeling the temperature dependence of the energy vibrational redistribution with its own electromagnetic radiation in electronic circuits on MOS transistors

K.A. Boikov

*MIREA – Russian Technological University,
Moscow, Russia*

Abstract. This paper presents a temperature dependence model of the energy vibrational redistribution with its own electromagnetic radiation in electronic circuits on MOS transistors. The research was carried out in a new field of technical diagnostics - radiosensory technical diagnostics and authentication, based on the electrical component registration of the electromagnetic radiation near field induced by the electronic unit itself. In the ISIS circuit simulation program of the Proteus 8 Professional package, utilizing PSpice component models, a key element model is built, based on the methods of nodal potentials, loop currents and the solution of quadratic equations. The calculated parameters of the model were used to obtain numerical signal radio profiles of the electrical component of electromagnetic radiation and their temperature dependences. The relationship between the decay time of oscillations and temperature is shown in the form of a simple analytical expression. An experiment was prepared and conducted to determine the temperature of the key node using the presented model. A correlation assessment of the signal radio profiles reproducibility derived as a result of modeling and during the experiment was undertaken. It was found that their mutual correlation is no lower than 0.93, and the error in determining the decay time is no more than 10 %, which indicates the reliability of the presented study. A conclusion is made and the possibility of using the results achieved in radiosensor technical diagnostics is shown when determining the temperature of an electronic unit or for leveling the temperature drift of the signal radio profile.

Keywords: signal radio profile, decay time, electromagnetic radiation, free oscillations, technical diagnostics, temperature dependence.

For citation: 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;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1053> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.002 (In Russ).

Введение

В настоящее время требования к надежности сложных аппаратно-программных систем непрерывно возрастают, ведь от корректного их функционирования зависит не только устойчивое экономическое развитие, контроль состояния окружающей среды, но и, в конечном счете, здоровье и жизнь людей. Все это делает необходимым усовершенствование и создание эффективных методов технической диагностики (ТД) электронных устройств [1]. В работах [2, 3] представлен новый пассивный метод диагностики функционирования цифровых микропроцессорных устройств – пассивная радиоволновая техническая диагностика (ПРТД) – основанный на регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений, возникающих при перераспределении энергии в реактивных накопителях. В работе [4] представлены и проанализированы упрощенные модели колебательного перераспределения энергии в МОП-транзисторе – основном компоненте современной электроники. Данные модели могут быть использованы как в ПРТД неисправностей на ранних стадиях их возникновения, так и для нивелирования температурных зависимостей в методе радиоволновой аутентификации микропроцессорных устройств (РАМУ), защищенном патентом на изобретение Российской Федерации [5].

Современные сложные аппаратно-программные системы функционируют в широком температурном диапазоне, поэтому использование методов ПРТД и РАМУ невозможно без учета влияния температуры. Целью представленной работы является развитие методов ПРТД и РАМУ посредством создания модели температурной зависимости колебательного перераспределения энергии в одном из важнейших на сегодняшний день элементе современной электронной техники – МОП-транзисторе.

Материалы и методы

На Рисунке 1 представлена упрощенная модель колебательного перераспределения энергии в МОП-транзисторе в режиме инвертора [4].

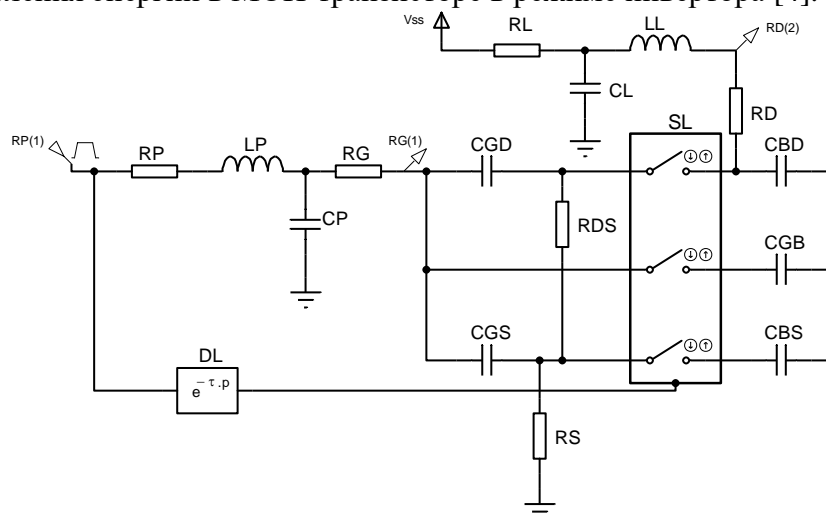


Рисунок 1 – Упрощенная модель колебательного перераспределения энергии в МОП-транзисторе в режиме инвертора
Figure 1 – Simplified model of vibrational energy redistribution in a MOS transistor in inverter mode

На данном рисунке:

- RP – Эквивалентное сопротивление подводящих проводников;
- LP – Эквивалентная индуктивность подводящих проводников;
- CP – Эквивалентная емкость подводящих проводников;
- RG – Объемное сопротивление затвора;
- RDS – Сопротивление утечки сток-исток;
- RS – Объемное сопротивление истока;
- CGD – Емкость перекрытия затвор-сток на длину канала (за счет боковой диффузии);
- CGS – Емкость перекрытия затвор-исток (за счет боковой диффузии);
- RP(1) – Управляющий выход (порт);
- RG(1) – Выход излучения.
- DL – Задержка включения (Turn-On Delay Time);
- SL – Управляемый трехпозиционный ключ (в нормальном состоянии разомкнут, при подаче управляющего напряжения – замкнут);
- RL – Сопротивление нагрузки;
- RD – Объемное сопротивление стока;
- CGB – Емкость перекрытия затвор-подложка (за счет выхода затвора за пределы канала);
- CBD – Емкость донной части p-n-перехода сток-подложка при нулевом смещении;
- CBS – Емкость донной части p-n-перехода исток-подложка при нулевом смещении;
- Vss – Питание ключевого узла;
- RD(2) – Выход излучения.

В работах [4, 6] приводится расчет таких параметров подводящего печатного проводника, как: погонная емкость C_P , погонная индуктивность L_P , волновое сопротивление Z , погонное активное сопротивление R_P для нормальных условий. Для температурной корректировки значений данных параметров следует учесть температурные зависимости ширины W , высоты H и длины подводящей линии l , а также относительной диэлектрической проницаемости изолирующего материала подложки ϵ_r и удельного электрического сопротивления материала проводника ρ .

Для относительной диэлектрической проницаемости изолирующего материала подложки ϵ_r можно написать:

$$\frac{d\epsilon_r}{dT} = \alpha_\epsilon \epsilon_r, \quad (1)$$

где α_ϵ – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, T – текущая температура.

У неполярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость незначительно уменьшается с ростом температуры, величина α_ϵ негативна и для текстолита FR4 составляет около -10^{-4} 1/К.

Также можно записать выражение для температурного изменения линейных размеров подводящего проводника, например, для длины линии l :

$$\frac{dl}{dT} = \alpha_l l, \quad (2)$$

где α_l – температурный коэффициент линейного расширения проводника. Для меди $\alpha_l = 1,66 \cdot 10^{-6}$ 1/К.

Температурное изменение удельного сопротивления подводящего проводника ρ :

$$\frac{d\rho}{dT} = \alpha_\rho \rho, \quad (3)$$

где α_ρ – температурный коэффициент удельного сопротивления проводника. Для меди $\alpha_\rho = 4,1 \cdot 10^{-3}$ 1/К.

Остальные значения параметров модели, представленной на Рисунке 1, и температурные коэффициенты зависят от габаритов подзатворного диэлектрика и длины канала конкретного МОП-транзистора и их можно узнать, используя справочные данные (либо параметры SPICE модели [7]).

Собственная частота свободных колебаний определяется как [8]:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}, \quad (4)$$

где L – эквивалентная индуктивность контура, C – эквивалентная емкость контура, R – эквивалентное омическое сопротивление контура, $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания.

Согласно выражению (4) свободные колебания затухают тем быстрее, чем выше паразитные сопротивления подводящих проводников и объемные сопротивления токопроводящих слоев МОП-транзистора. Также очевидно, что чем меньше габариты самого МОП-транзистора (снижается значение параметра C), тем выше собственная частота колебаний.

Результаты

Для запуска моделирования рассмотрим ключевой элемент порта общего назначения популярного 8-ми битного микроконтроллера ATmega16-16AU [9,10]. Входная цепь: CGD \approx 20 пФ, CGS \approx 160 пФ, CGB \approx 20 пФ, RG \approx 300 мОм, RD \approx 100 мОм, RP \approx 100 мОм, LP \approx 500 пГн, CP \approx 1 пФ. Выходная цепь: RDS \approx 10 Мом,

$R_S \approx 100$ мОм, $C_{BD} \approx 20$ пФ, $C_{BS} \approx 20$ пФ, $R_L = 10$ кОм, $D_L \approx 2$ нс. Параметры воздействия: $V_{SS} = 5$ В, $RP(1)$ – «ступенька» 0-5 В (скорость нарастания 1В/пс). Аналоговый анализ (analogue analysis) проводится в точках $RG(1)$ и $RD(2)$ для температур промышленного диапазона $-55^{\circ}\text{C} \dots 100^{\circ}\text{C}$.

На Рисунке 2 представлены три сигнальных радиопрофиля (СРП), полученных в результате моделирования колебательного перераспределения энергии в ключе на МОП-транзисторе в режиме инвертора: Рисунок 2а – при $T = 25^{\circ}\text{C}$, Рисунок 2б – при $T = -55^{\circ}\text{C}$, Рисунок 2в – при $T = 100^{\circ}\text{C}$.

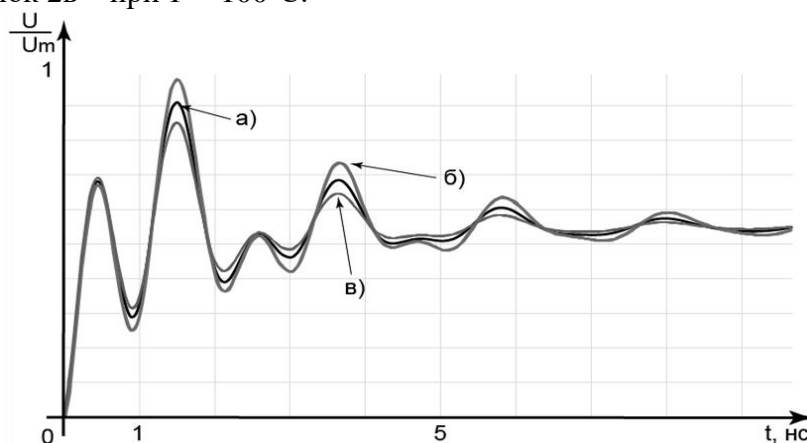


Рисунок 2 – СРП колебательного перераспределения энергии в ключе на МОП-транзисторе в режиме инвертора при различных температурах:

а) $T = 25^{\circ}\text{C}$, б) $T = -55^{\circ}\text{C}$, в) $T = 100^{\circ}\text{C}$

Figure 2 – Signal radio profile of the vibrational redistribution of energy in the switch on the MOS transistor in the inverter mode at different temperatures:

а) $T = 25^{\circ}\text{C}$, б) $T = -55^{\circ}\text{C}$, в) $T = 100^{\circ}\text{C}$

Известно, что СРП, представленные на Рисунке 2 – суперпозиция колебательных излучений входной и выходной цепи МОП-транзистора, а для определения коэффициентов затухания и оценки температурной зависимости необходимо провести их декомпозицию. Декомпозиция затухающих колебаний при неизвестном коэффициенте затухания, начальной амплитуде, фазе и частоте исходных гармоник – сложная математическая задача, которая не входит в рамки данной работы. В случае представленной модели все параметры рассчитаны и известны, что дает возможность провести моделирование отдельно для входной и выходной цепей. Для оценки времени затухания τ (величины обратной δ) достаточно получить СРП, например, входной цепи (Рисунок 3).

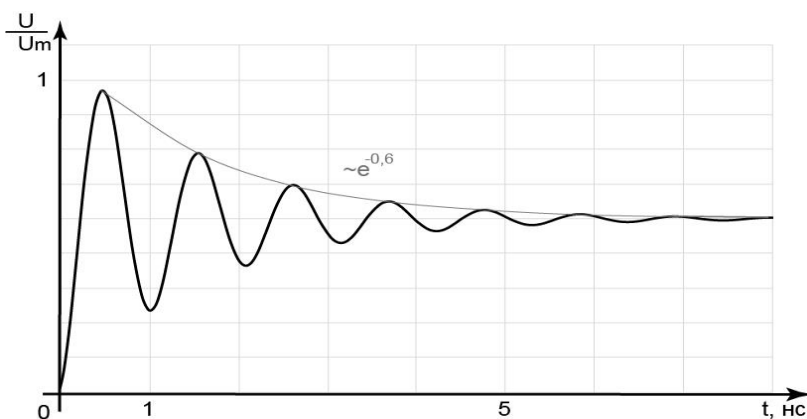


Рисунок 3 – СРП колебательного перераспределения энергии во входной цепи ключа на МОП-транзисторе при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure 3 – Signal radio profile of vibrational energy redistribution in the input circuit of the switch on a MOS transistor at $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

При колебательном характере процесса перераспределения энергии между накопителями выражение свободной составляющей имеет вид [8]:

$$U_{CB}(t) = U_1 e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (5)$$

где U_1 – амплитуда первого колебания, ω – собственная частота затухающих колебаний, φ_0 – начальная фаза колебания.

По огибающей затухающего колебания для случая, представленного на Рисунке 3, можно определить δ и, соответственно, τ : $\tau = |\delta^{-1}| \approx 1,67\text{ нс}$.

Таким же образом возможно получить СРП для входной цепи во всем исследуемом температурном диапазоне и, вычислив время затухания, построить температурную зависимость данного параметра (Рисунок 4).

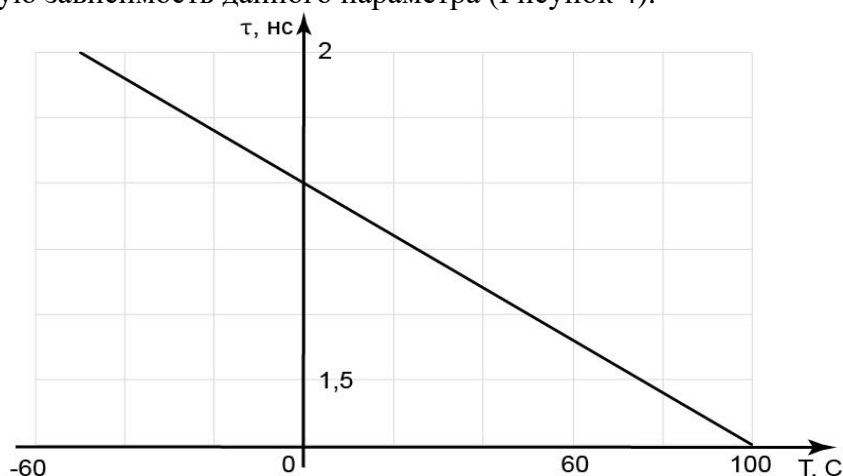


Рисунок 4 – Зависимость времени затухания колебаний во входной цепи МОП-транзистора от температуры

Figure 4 – Dependence of the decay time of oscillations in the input circuit of the MOS transistor on temperature

Для оценки достоверности результатов моделирования был использован, построенный в работах [2, 3] экспериментальный образец – микропроцессорное устройство (МУ), состоящее из микроконтроллера ATmega16 (DD1), обвязочных компонентов ($R1$, $C1$, $C2$), нагрузки (RL). Принципиальная электрическая схема прототипа МУ приведена на Рисунке 5 (неиспользуемые выводы DD1 скрыты).

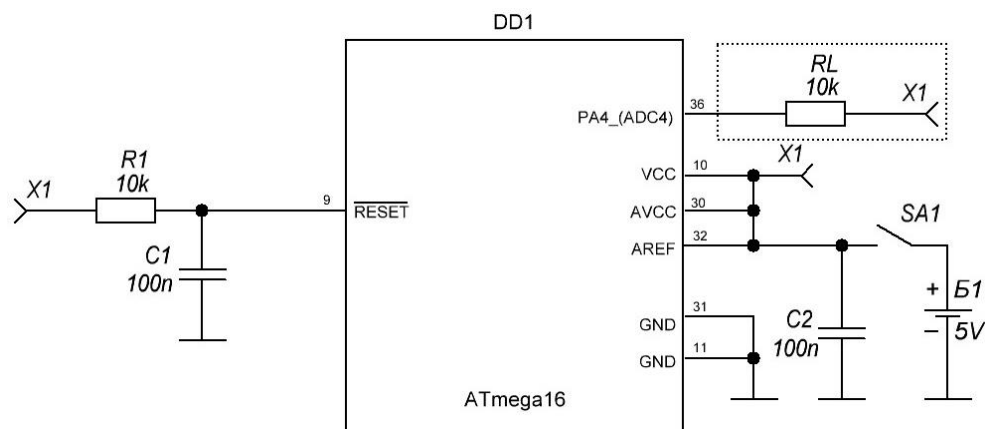


Рисунок 5 – Принципиальная электрическая схема прототипа МУ
Figure 5 – Schematic electrical diagram of a microcontroller prototype

Эксперимент проводился в подвальном помещении с температурой окружающего воздуха 10°C . После подачи питания от источника *Б1* посредством ключа *SA1*, *DD1* конфигурирует порт *A.4* на выход (вывод 36 *DD1*) и подключает к общей точке. Для регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений в эксперименте использовался сверхбыстродействующий осциллограф реального времени DSOS604A (6 ГГц) и логопериодическая сверхширокополосная антенна с рабочим диапазоном от 80 МГц до 2 ГГц (Рисунок 6).

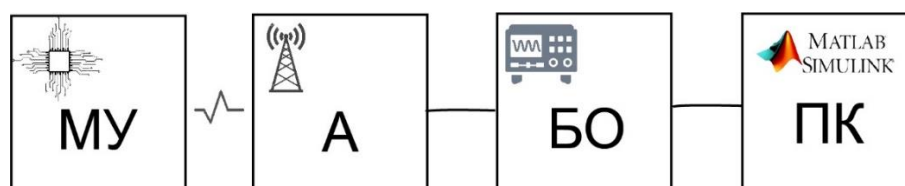


Рисунок 6 – Блок-схема проведения эксперимента
Figure 6 – Block diagram of the experiment

При подаче питающего напряжения на *МУ*, принятый логопериодической антенной (*А*) СРП обнаруживается и регистрируется сверхбыстродействующим осциллографом реального времени (*БО*). Далее данные передаются в персональный компьютер (*ПК*) с возможностью постобработки и корреляционного анализа.

На Рисунке 7 представлены два СРП, полученные при $T = 10^{\circ}\text{C}$: Рисунок 7а – СРП, полученный в результате моделирования, Рисунок 7б – СРП, полученный в результате проведения эксперимента.

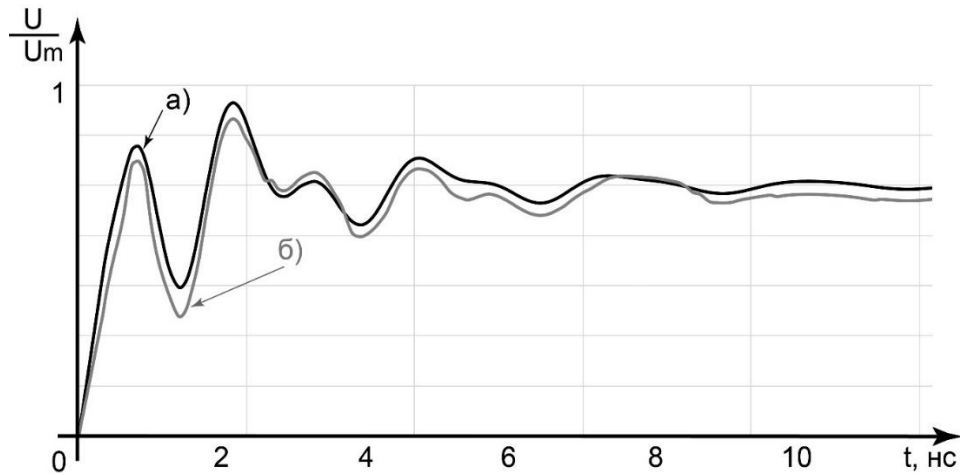


Рисунок 7 – СРП колебательного перераспределения энергии в ключе на МОП-транзисторе
Figure 7 – Signal radio profile of the vibrational redistribution of energy in the switch on the MOS transistor

Обсуждение

По результатам моделирования, представленным на Рисунке 2, видно, что частота и фаза колебаний в широком диапазоне температур практически не изменяется, однако изменяется коэффициент затухания колебаний – с повышением температуры колебания затухают быстрее. Используя эту закономерность и зависимость времени затухания от температуры для рассматриваемой модели (Рисунок 4), можно получить линейное выражение:

$$\tau[\text{нс}] = 1,8 - \frac{T[^\circ\text{C}]}{250}, \quad (6)$$

Рамки применимости выражения (6) ограничены исследуемым температурным диапазоном.

Для оценки корректности представленной температурной модели, полученных результатов и зависимостей была вычислена взаимная корреляция r СРП, полученных при моделировании и в ходе эксперимента (Рисунок 7) [11]:

$$r = \frac{\sum (Y_{1,i} - \bar{Y}_1) \cdot (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\sum (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)^2 \cdot \sum (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)^2}}, \quad (7)$$

где $Y_1 = \frac{U}{U_M}$ – выборки значений сигнала a , $Y_2 = \frac{U_B}{U_{MB}}$ – выборки значений сигнала b ,

$\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{1,i}$, $\bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Y_{2,i}$ – средние значения выборок, M – число выборок, U – значение

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

Используя выражение (7), при числе выборок $M = 100$ взаимная корреляция между импульсами a и b , $r = 0,93$, что говорит о существенном сходстве исследуемых СРП.

Оценка времени затухания по полученным экспериментальным данным показывает, что $\tau \approx 1,7$ нс. Если рассчитать время затухания, используя выражение (6), то

$$\tau = 1,8 - \frac{10}{250} = 1,76 \text{ нс} . \quad 8)$$

Учитывая, что весь диапазон времени затухания в данном исследовании укладывается в 0,6 нс, то разница между расчетным временем затухания и полученным экспериментально не более 10 %. Очевидно, что это расхождение включает в себя не только точность описания модели, но и инструментальную погрешность измерений, анализ которой не входит в рамки данной работы.

Заключение

В работе представлено исследование температурных зависимостей СРП модели колебательного перераспределения энергии в МОП-транзисторе в программе схемотехнического моделирования ISIS пакета Proteus 8 Professional, проведен соответствующий эксперимент по проверке достоверности и функциональности данной модели. При корректном задании параметров, разработанная модель позволит не только формировать импульсные характеристики цифровой цепи, обусловленные наличием реактивных накопителей в радиотехническом узле, но и анализировать температуру цифрового узла на основе показанных температурных зависимостей времени затухания (коэффициента затухания).

СРП, полученные при различных температурах ключевых элементов, в сравнении с реперными СРП позволяют предсказать возможные проблемы в цепи ключевого элемента и при дальнейшем анализе указывают на места возникновения данных проблем при перегреве в широком температурном диапазоне функционирования сложных аппаратно-программных систем.

Предлагаемая модель может быть использована в пассивной радиоволновой технической диагностике и аутентификации, основанных на регистрации электрической составляющей электромагнитных излучений, создаваемых самими радиоэлектронными устройствами, открывая новые возможности диагностики неисправностей на ранних стадиях их возникновения, а также для определения подлинности электронных узлов в частности и электронного устройства в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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):20–27. DOI: <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: материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2021» – Москва: Московский Политех*. 2021:119–123.
4. Бойков К.А. Моделирование и анализ колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в ключевых радиоэлектронных схемах на МОП-транзисторах. *Журнал радиоэлектроники*. 2021;6. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>
5. 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.
6. Kizimenko V.V., Ulanouski A.V. Comparative analysis of the various resonator models in the input impedance calculation of the microstrip antennas. *Proceedings of 39-th International Conference «Telecommunications and Signal Processing (TSP)»*. Vienna. June 27-29. 2016.
 7. Амелин С.А., Амелина М.А. Разновидности SPICE-моделей транзисторов с изолированным затвором. *Сб. трудов VII Межд. научн.-техн. конф. «Энергетика, информатика, инновации» – 2017. В 3-х томах*. 2017;2:15–20.
 8. Башарин С.А. *Теоретические основы электротехники*. М.: Академия; 2018. 192 с.
 9. Евстифеев А.В. *Микроконтроллеры AVR семейств Mega. Руководство пользователя*. М.: ДМК; 2015. 588 с.
 10. Очкуренко Г.О. Программирование микроконтроллеров семейства AtMega на базе системы Arduino. *Теория и практика современной науки*. 2019;4(46):178–183.
 11. Бойков К.А. Разработка и исследование системы радиоимпульсной регенерации для устройств высокоскоростной стробоскопической оцифровки. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;3. Доступно по: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf>

REFERENCES

1. Yeremenko V.T. *Technical diagnostics of electronic devices*. Orel: FGBOU VPO «Gosuniversitet – UNPK»; 2012. 157 p. (In Russ)
2. Boikov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. Radiosensor diagnostics of the integrity of signals of in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal*. 2021;9(4):20–27. DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>(In Russ)
3. Boikov K.A., Kostin M.S. Method of radiosensor technical diagnostics of microprocessor devices. *Novyye tekhnologii vysshey shkoly. Nauka, tekhnika, pedagogika: materialy Vse-rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka – Obshchestvo – Tekhnologii – 2021» - Moskva: Moskovskiy Politekh*. 2021:119–123. (In Russ)
4. Boikov K.A. Modeling and analysis of vibrational redistribution of energy with its own electromagnetic radiation in key electronic circuits on MOS transistors. *Zhurnal radioelektroniki*. 2021;6. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14> (In Russ)
5. Boikov K.A. *Method of radio wave authentication of microprocessor devices*: pat. 2755153 Ros. Federatsii MPK H04L 9/32 / заявитель i правообладатель Boikov K.A. No. 2021103796; заявл. 16.02.2021; опубл. 13.09.2021, Бюл. No. 26. (In Russ)
6. Kizimenko V.V., Ulanouski A.V. Comparative analysis of the various resonator models in the input impedance calculation of the microstrip antennas. *Proceedings of 39-th International Conference «Telecommunications and Signal Processing (TSP)»*. Vienna. June 27-29. 2016.
7. Amelin S.A., Amelina M.A. Varieties of SPICE IGBT Transistors. *Proceedings of the VII Int. scientific and technical conference «Energy, Informatics, Innovation»*. 2017. V 3-kh tomakh. 2017;2:15–20. (In Russ)
8. Basharin S.A. *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. М.: Akademiya; 2018. 192 p. (In Russ)
9. Yevstifeyev A.V. *AVR microcontrollers of the Mega families. User guide*. М.: ДМК; 2015. 588 p.
10. Ochurenko G.O. Programming microcontrollers of the AtMega family based on the Arduino system. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*. 2019;4(46):178–183.

11. Boikov K.A. Development and research of a radio pulse regeneration system for high-speed stroboscopic digitizing devices. *Zhurnal radioelektroniki* . 2018;3. Available from: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бойков Константин Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация.

e-mail: nauchnyi@yandex.ru

Konstantin A. Boikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Wave Processes and Technologies of the Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA - Russian Technological University", Moscow, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 22.09.2021; одобрена после рецензирования 09.10.2021; принята к публикации 19.10.2021.

The article was submitted 22.09.2021; approved after reviewing 09.10.2021; accepted for publication 19.10.2021.