

УДК 621.3.038

Методология моделирования транзисторных оптопар ЗОТ122 с учетом температурной зависимости *

Д.В. ОЗЕРКИН¹, С.А. РУСАНОВСКИЙ²

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, кандидат технических наук, доцент. E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

² 634050, РФ, г. Томск, пр. Кирова, 56в, НПЦ «Полюс», генеральный директор, кандидат технических наук. E-mail: rusa10@yandex.ru

Характерной особенностью электронной компонентной базы, применяемой в бортовой космической аппаратуре, является широкий температурный диапазон функционирования (от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$). Математические модели, которые адекватно описывают поведение прототипов при комнатной температуре, становятся непригодными для моделирования процессов в экстремальных условиях эксплуатации. Возникает задача по разработке математических моделей электронной компонентной базы специального применения, адекватно описывающих поведение прототипов в широком температурном диапазоне. В номенклатуре электронной компонентной базы, применяемой в отечественной бортовой космической радиоаппаратуре, достаточно распространены транзисторные оптопары ЗОТ122. Для исследования была отобрана партия из пяти однотипных транзисторных оптопар ЗОТ122А производства АО «Оptron». В статье рассмотрены методологические вопросы SPICE-моделирования указанных транзисторных оптопар с учетом температурной зависимости. Показано, что образцы транзисторных оптопар ЗОТ122А одной партии поставки отличаются технологическим разбросом параметров. Этот факт затрудняет использование классической методологии синтеза SPICE-моделей по справочным данным, поскольку адекватность полученных моделей по отношению к своим прототипам неудовлетворительна. Авторами предложена оригинальная методология синтеза транзисторных оптопар, основанная на измерении электрических параметров образцов при разных температурах. Результаты измерения в конечном итоге преобразуются в вектор, состоящий из 11 параметров. При этом синтез множества подобных транзисторных оптопар из семейства ЗОТ122 будет заключаться в отыскании коэффициентов этого вектора. Для одного из образцов транзисторной оптопары проведена апробация разработанной методологии. Итогом явилась синтезированная SPICE-модель с невязкой результатов экспериментальных измерений и результатов моделирования не превышающих 2 %.

Ключевые слова: бортовая космическая радиоэлектронная аппаратура, транзисторная оптопара, температурная стабильность, вольт-амперная характеристика, выходное остаточное напряжение, квадратичная аппроксимация, SPICE модель, OrCAD

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-3-76-94

* Статья получена 10 апреля 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ

Разработанные к настоящему времени математические модели электронной компонентной базы (ЭКБ) широкого применения дают удовлетворительное совпадение температурных зависимостей параметров с соответствующими параметрами прототипов при температуре среды, близкой к лабораторной (комнатной). Совсем иначе складывается ситуация для ЭКБ военного и/или космического применения [1, 2]. Одна из характерных особенностей такой ЭКБ – широкий температурный диапазон функционирования (от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$). Как следствие, происходит значительное изменение параметров ЭКБ относительно своего номинального значения. При этом математическая модель, которая адекватно описывала поведение прототипа при комнатной температуре, становится непригодной для моделирования процессов в экстремальных условиях эксплуатации. Становится актуальной задача разработки математических моделей ЭКБ специального применения, адекватно описывающих поведение прототипов в широком температурном диапазоне.

Вопросы моделирования транзисторных оптопар (оптронов) находили отражение в отечественной и зарубежной печати. Так, в работе M.F. Deveney [3] разработаны модели с термозависимыми параметрами для оптронов, изготовленных из дискретных компонентов. В качестве прототипа рассматривались сборка, состоящая из источника фотонов (лазерный диод либо светоизлучающий диод) и фотодиода на основе соединения Ga-Al-As. В результате автором получена простая SPICE-модель для оптрона дискретного исполнения. Модель может быть использована для точного моделирования работы оптронов, состоящих из разных типов источников и приемников, в температурном диапазоне от -55 до $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Моделирование температурных зависимостей интегральных оптронов в статье не затронуто.

В отечественной работе А.Е. Милешкина [4] рассматриваются методы полиномиальной интерполяции функции зависимости параметров оптронов, а также составления эквивалентной схемы замещения с управляемыми источниками тока. Автор статьи разработал модели фоторезисторных оптронов применительно к популярному программному комплексу NI MultiSim. Вопросы моделирования фототранзисторных оптронов в работе не рассматривались.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В номенклатуре ЭКБ, применяемой в отечественной бортовой космической радиоаппаратуре, достаточно распространены транзисторные оптопары ЗОТ122 (рис. 1). Оптопары выпускаются в металлокерамическом корпусе и предназначены для коммутации цепей постоянного тока. Излучатель оптопары представляет собой мезаэпитаксиальный диод на основе твердого раствора Ga-Al-As; приемником служит кремниевый планарный *n-p-n* составной фототранзистор [5, 6].

В настоящей работе предложена методология моделирования транзисторных оптопар интегрального исполнения с температурной зависимостью параметров, ориентированная на SPICE-подобные симуляторы (Cadence OrCAD). Оригинальная методология является развитием принципов и спосо-

бов, отработанных авторами в [7, 8]. Для исследования была отобрана партия из пяти однотипных транзисторных оптопар ЗОТ122А производства АО «Оп-трон» [9], изготовленных по аАО.339.200 ТУ. Акционерное общество «Оп-трон» – одно из старейших предприятий отечественной электронной про-мышленности, созданное в 1956 году.

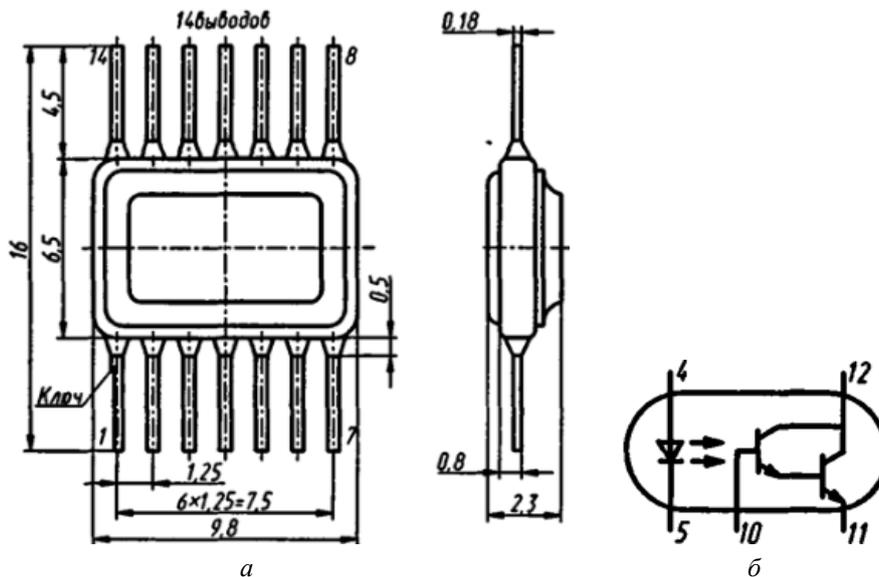


Рис. 1. Оптопара транзисторная ЗОТ122А:

а – конструктивные данные; б – электрическая схема

Предприятие специализируется на выпуске широкого класса оптоэлек-тронных приборов, ультрастабильных, аттестуемых, прецизионных стабилит-ронов, *p-i-n* СВЧ-диодов, диодов общего назначения и других электронных компонентов, а также производит средства и системы отображения информа-ции, системы управления двигателями постоянного и переменного тока, си-стемы управления водоснабжением, водоотведением, кондиционированием.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ-ПРОТОТИПОВ ЗОТ122А

Первая часть методологии моделирования направлена на получение экс-периментальных зависимостей параметров для образцов-прототипов ЗОТ122А. Для измерений использовалась экспериментальная установка, структурная схема которой представлена на рис. 2.

Основа экспериментальной установки – комплекс для температурных испытаний Thermostream TR04310А. Комплекс TR04310А специально разра-ботан для быстрых, качественных и точных испытаний печатных плат, элек-тронных компонентов и модулей [10]. Принцип работы комплекса построен на температурном воздействии сжатого воздуха с большим расходом на ис-пытываемый образец (микросхему или печатную плату). Остальная неиспы-тываемая поверхность объекта накрывается защитным термоизолирующим

полотном (держатель термоизолирующий). Большой расход воздуха и давление позволяют комплексу менять температуру на образце за считанные секунды в очень широком диапазоне. Этот диапазон температур шире, чем у любых стандартных климатических камер. Главным преимуществом комплекса ТР04310А является очень высокая точность контроля температуры ($\pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$), этот параметр превышает показатели самых качественных климатических камер.

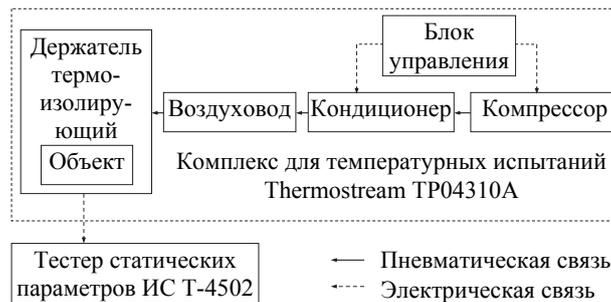


Рис. 2. Структурная схема измерительной установки

Измерения электрических параметров образцов при разных температурах осуществляются тестером статических параметров интегральных схем Т-4502 [11]. Тестер предназначен для контроля, измерения и классификации цифровых интегральных и гибридных схем с количеством выводов до 64, обеспечивает контроль и задание напряжений от 0 до $\pm 55\text{ В}$, контроль токов от 0 до $\pm 150\text{ мкА}$, задание тока до $\pm 500\text{ мА}$.

Результаты измерений представлены в графическом виде (рис. 3–7). Каждая координатная плоскость соответствует определенному виду измерений и содержит семейство характеристик пяти испытуемых образцов.

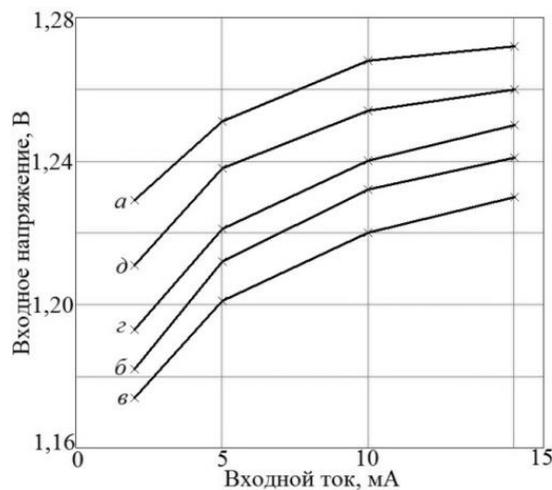


Рис. 3. Семейство входных вольт-амперных характеристик:

a – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3;
г – образец 4; *д* – образец 5

Проведем качественный анализ результатов измерения. Входные вольт-амперные характеристики (рис. 3) для оптопар традиционно строятся в системе $U_{ВХ} = f(I_{ВХ})$. Для каждого образца взято по четыре экспериментальных значения входного тока. Можно наблюдать ярко выраженную нелинейную зависимость входного напряжения от входного тока. Разброс входного напряжения при неизменном входном токе для различных образцов составляет около 0,05 В.

Для удобства последующего синтеза математической модели транзисторной оптопары предлагается иное представление температурной зависимости входного напряжения, отличающееся от классического (рис. 4). Пусть исходная рабочая точка каждого испытуемого образца имеет координаты $I_{ВХ} = 5$ мА; $T_{ОКР.0} = 25$ °С. Взяты три отсчета температуры среды $T_{ОКР.1} = -60$ °С; $T_{ОКР.0} = 25$ °С; $T_{ОКР.2} = 70$ °С. Разность напряжения вычислена как $\Delta U_{ВХ.ij} = (U_{ВХ.ij} - U_{ВХ.0j})|_{I_{ВХ}=5\text{мА}}$, где i – номер отсчета температуры среды; j – номер испытуемого образца. В результате можно наблюдать в относительном масштабе слабую нелинейную зависимость входного напряжения от температуры. Семейство характеристик имеет общую точку пересечения при $T_{ОКР.0j} = 25$ °С; $\Delta U_{ВХ.0j} = 0$ В.

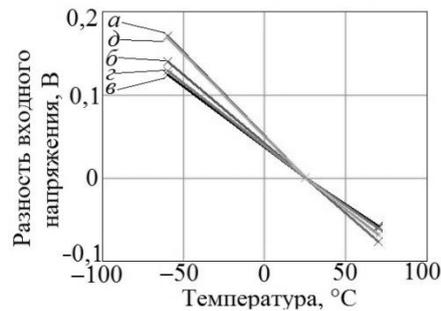


Рис. 4. Температурная зависимость входного напряжения, построенная относительно базовой рабочей точки $I_{ВХ} = 5$ мА; $T_{ОКР} = 25$ °С:

a – образец 1; $б$ – образец 2; $в$ – образец 3;
 $г$ – образец 4; $д$ – образец 5

Зависимость выходного остаточного напряжения от выходного тока измерена для двух значений входного тока $I_{ВХ} = 5$ мА и $I_{ВХ} = 10$ мА (рис. 5). Характеристики выходного остаточного напряжения имеют нелинейный, монотонно возрастающий характер. Для образцов 1 и 5 наблюдается нестабильность выходного остаточного напряжения при малых значениях выходного тока. Образцы 2, 3 и 4 обладают хорошей стабильностью выходной характеристики.

Основываясь на зависимости выходного остаточного напряжения от выходного тока, построенной при различных значениях входного тока, можно построить иную функциональную зависимость транзисторной оптопары – сопротивление прямой передачи (рис. 6). Если зафиксировать значение выходного тока (пусть $I_{ВЫХ} = 15$ мА), то тогда сопротивлением прямой передачи

будет функция одного аргумента $R_{пр.п} = f(I_{вх}, I_{вых})|_{I_{вых} = const} = F(I_{вх})$, и она может быть представлена в двумерной системе координат:

$$R_{пр.п} = \frac{U_{вых}}{I_{вх}} \Big|_{I_{вых} = const}$$

Семейство характеристик прямой передачи имеет линейный характер, так как построено по двум точкам ($I_{вх} = 5 \text{ мА}$ и $I_{вх} = 10 \text{ мА}$).

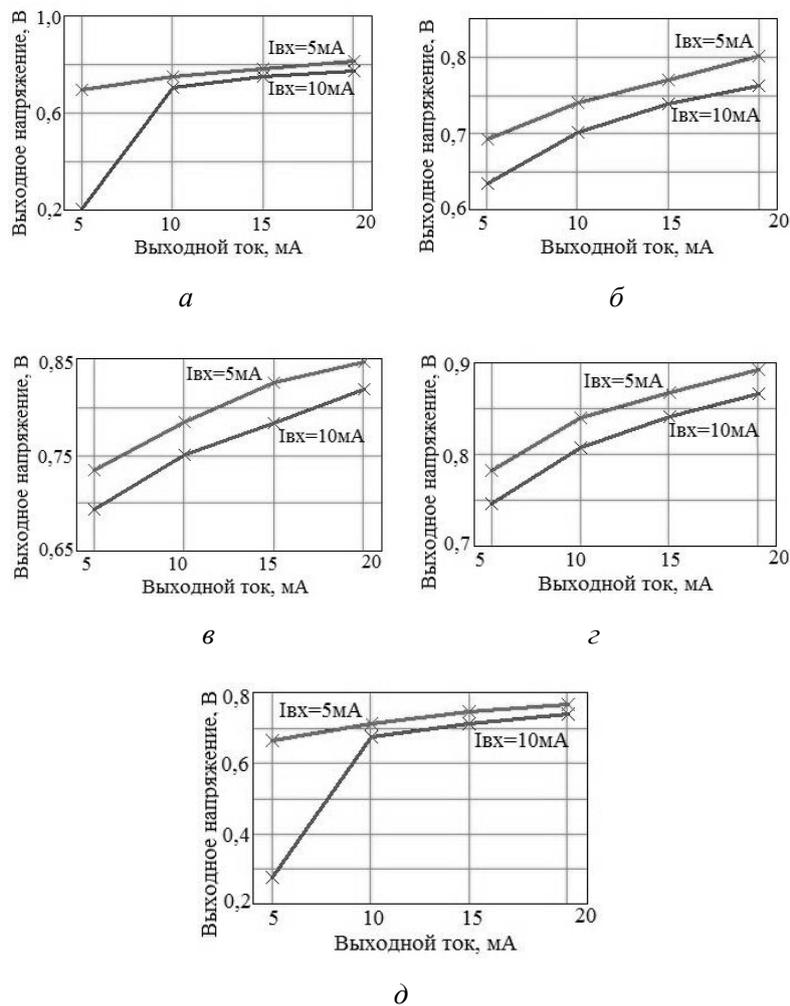


Рис. 5. Зависимость выходного остаточного напряжения от выходного тока:

а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4;
 д – образец 5

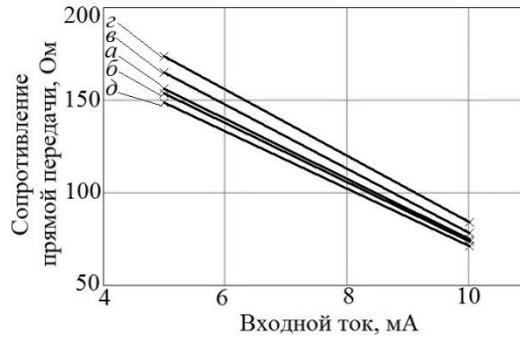


Рис. 6. Сопротивление прямой передачи:

a – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3;
г – образец 4; *д* – образец 5

На основе зависимости выходного остаточного напряжения от выходного тока (рис. 5) можно построить новое семейство характеристик – относительно базовой рабочей точки. Такое представление (рис. 7) удобно для последующего синтеза математической модели.

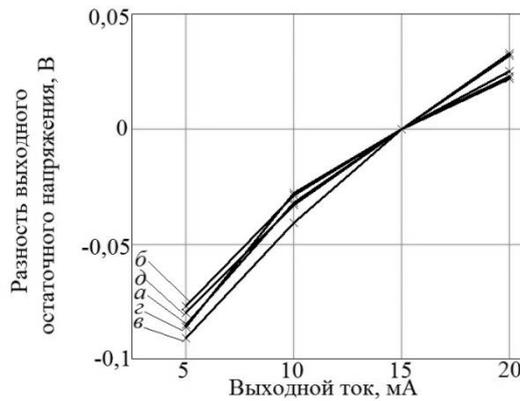


Рис. 7. Семейство выходных вольт-амперных характеристик, построенных относительно базовой рабочей точки $I_{ВХ} = 5$ мА; $I_{ВЫХ} = 15$ мА:

a – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3;
г – образец 4; *д* – образец 5

Пусть исходная рабочая точка $(I_{ВЫХ,0}, U_{ВЫХ,0})$ каждого испытуемого образца имеет координату $I_{ВЫХ,0} = 15$ мА при $I_{ВХ} = 5$ мА. Разность выходного остаточного напряжения вычислена как $\Delta U_{ВЫХ,ij} = (U_{ВЫХ,ij} - U_{ВЫХ,0j})|_{I_{ВХ}=5\text{мА}}$, где i – номер отсчета выходного тока ($i \in \{5\text{мА}; 10\text{мА}; 15\text{мА}; 20\text{мА}\}$); j – номер испытуемого образца. В результате можно наблюдать в относительном масштабе слабую нелинейную зависимость выходного остаточного напряжения от выходного тока. Семейство характеристик имеет общую точку пересечения при $I_{ВЫХ,0j} = 15$ мА; $\Delta U_{ВХ,0j} = 0$ В.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРНОЙ ОПТОПАРЫ 3ОТ122А

Для очерчивания границ применимости будущей математической модели предлагается структурная схема (рис. 8), состоящая из двух основных блоков: каскада излучателя и каскада фотоприемника. Внутреннее наполнение каскадов соответствует наблюдаемым процессам на предыдущем этапе исследования. Входной сигнал (входной ток $I_{ВХ}$) поступает на датчик тока $PA1$, который выделяет его величину и знак. Затем сигнал преобразуется с помощью функционального источника напряжения $G1$, управляемого входным током. Закон функционального преобразования определяется экспериментальной зависимостью $U_{ВХ} = f(I_{ВХ})$ из рис. 3. Суммирующее устройство $U1$ учитывает характер входной вольт-амперной характеристики (ВАХ), обусловленный как нелинейностью при комнатной температуре $U'_{ВХ} = f(I_{ВХ})$, так и аддитивными тепловыми процессами $\Delta U_{ВХ} = f(T_{СР})$, наблюдаемыми на рис. 4. Суммарный нелинейный сигнал – входное термозависимое напряжение $U_{ВХ} = U'_{ВХ} + \Delta U_{ВХ}$.

Датчик тока $PA1$ каскада излучателя связан с источником напряжения $G3$, управляемого током и находящегося в каскаде фотоприемника. Закон функционального преобразования в $G3$ определяется как произведение сопротивления прямой передачи (рис. 6) на входной ток: $U'_{ВЫХ} = f(R_{ПР.П}) \cdot I_{ВХ}$. Датчик тока $PA2$ каскада фотоприемника выделяет величину и знак выходного тока $I_{ВЫХ}$. Эта информация служит для работы генератора нелинейности выходной ВАХ $G4$. Закон функционального преобразования в $G4$ определяется по экспериментальной зависимости на рис. 7 и носит аддитивный характер $\Delta U_{ВЫХ} = f(I_{ВЫХ})$. Суммирующее устройство $U2$ учитывает основную и аддитивную (нелинейную) составляющую выходного напряжения: $U_{ВЫХ} = U'_{ВЫХ} + \Delta U_{ВЫХ}$. Суммарный нелинейный сигнал поступает в инерционное звено $Z1$, которое формирует определенное значение постоянной времени τ при работе в импульсном режиме. На выходе инерционного звена – выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ транзисторной оптопары, обладающее следующими совокупными свойствами:

- 1) функциональная зависимость от входного тока;
- 2) аддитивная составляющая нелинейности выходного каскада;
- 3) инерционность выходного каскада во временной области.

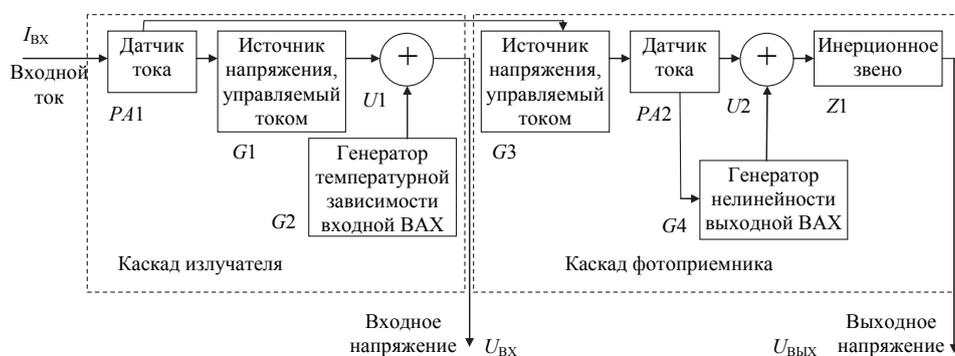


Рис. 8. Структуризация модели транзисторной оптопары 3ОТ122А

Структурная проработка транзисторной оптопары (рис. 8) позволяет предложить компактную математическую модель. Проведенный качественный анализ нелинейностей экспериментальных зависимостей (рис. 3–7) говорит о том, что математическая модель может базироваться на полиномах второго порядка.

Пусть входное напряжение транзисторной оптопары есть функция двух аргументов – входного тока $I_{\text{ВХ}}$ и температуры окружающей среды T :

$$U_{\text{ВХ}} = f_1(I_{\text{ВХ}}, T). \quad (1)$$

Произведем декомпозицию функции (1) путем фиксации одного из аргументов – температуры – на определенном уровне. Тогда получим частную функцию $U'_{\text{ВХ}} = F_1(I_{\text{ВХ}})$, зависящую только от входного тока и аппроксимируемую полиномом второго порядка:

$$U'_{\text{ВХ}} = f_1(I_{\text{ВХ}}, T)|_{T=25^\circ\text{C}} = F_1(I_{\text{ВХ}}) = a1 \cdot I_{\text{ВХ}}^2 + a2 \cdot I_{\text{ВХ}} + a3. \quad (2)$$

Аддитивная составляющая нелинейности входной ВАХ $\Delta U_{\text{ВХ}}$, зависящая от температуры окружающей среды, есть разность функций (1) и (2), вычисленная при фиксированном значении входного тока $I_{\text{ВХ}}$:

$$\Delta U_{\text{ВХ}} = f_2(T) = f_1(I_{\text{ВХ}}, T)|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}} - F_1(I_{\text{ВХ}})|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}} = b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3. \quad (3)$$

Суммарный сигнал входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$ есть композиция функций (2) и (3) или сумма двух полиномов:

$$U_{\text{ВХ}} = U'_{\text{ВХ}} + \Delta U_{\text{ВХ}} = a1 \cdot I_{\text{ВХ}}^2 + a2 \cdot I_{\text{ВХ}} + a3 + b1 \cdot T^2 + b2 \cdot T + b3. \quad (4)$$

Сопротивление прямой передачи есть функция двух аргументов – входного тока $I_{\text{ВХ}}$ и выходного тока $I_{\text{ВЫХ}}$:

$$R_{\text{ПР.П}} = f_3(I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВЫХ}}). \quad (5)$$

Произведем декомпозицию функции (5) путем фиксации одного из аргументов – выходного тока – на определенном уровне. Получим частную функцию $F_3(I_{\text{ВХ}})$, зависящую только от входного тока и аппроксимируемую полиномом первого порядка:

$$R_{\text{ПР.П}} = f_3(I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВЫХ}})|_{I_{\text{ВЫХ}}=\text{const}} = F_3(I_{\text{ВХ}}) = c1 \cdot I_{\text{ВХ}} + c2. \quad (6)$$

Линейность полинома обусловлена тем, что семейство характеристик на рис. 6 было построено по двум точкам. В общем случае полином (6) может иметь более высокий порядок.

Напряжение прямой передачи есть произведение функции (6) на входной ток $I_{\text{ВХ}}$:

$$U_{\text{ПР.П}} = R_{\text{ПР.П}} \cdot I_{\text{ВХ}} = F_3(I_{\text{ВХ}}) \cdot I_{\text{ВХ}} = (c1 \cdot I_{\text{ВХ}} + c2) \cdot I_{\text{ВХ}} = c1 \cdot I_{\text{ВХ}}^2 + c2 \cdot I_{\text{ВХ}}. \quad (7)$$

Выходное остаточное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ есть функция двух аргументов – выходного тока $I_{\text{ВЫХ}}$ и входного тока $I_{\text{ВХ}}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = f_4(I_{\text{ВЫХ}}, I_{\text{ВХ}}). \quad (8)$$

Произведем декомпозицию функции (8) путем фиксации одного из аргументов – входного тока – на определенном уровне. Получим частную функцию $F_4(I_{\text{ВЫХ}})$, зависящую только от выходного тока:

$$U'_{\text{ВЫХ}} = f_4(I_{\text{ВЫХ}}, I_{\text{ВХ}})|_{I_{\text{ВХ}}=\text{const}} = F_4(I_{\text{ВЫХ}}). \quad (9)$$

Аддитивная составляющая нелинейности выходной ВАХ $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$, зависящая от особенностей каскада фотоприемника, есть разность функций (9), вычисленных при текущих значениях аргумента $I_{\text{ВЫХ}}$ относительно фиксированного значения ($I_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$):

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ВЫХ}} = f_5(I_{\text{ВЫХ}}) &= F_4(I_{\text{ВЫХ}}) - F_4(I_{\text{ВЫХ}})|_{I_{\text{ВЫХ}}=\text{const}} = \\ &= d1 \cdot I_{\text{ВЫХ}}^2 + d2 \cdot I_{\text{ВЫХ}} + d3. \end{aligned} \quad (10)$$

Суммарный сигнал выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ есть композиция функций (7) и (10) или сумма двух полиномов:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ПР.П}} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} = c1 \cdot I_{\text{ВХ}}^2 + c2 \cdot I_{\text{ВХ}} + d1 \cdot I_{\text{ВЫХ}}^2 + d2 \cdot I_{\text{ВЫХ}} + d3. \quad (11)$$

Таким образом, уравнения (4) и (11) отражают два искомого сигнала – входное и выходное напряжение транзисторной оптопары. Многообразие конкретных реализаций математической модели транзисторной оптопары может быть задано вектором \mathbf{M} , содержащим значения коэффициентов полиномов в уравнениях (4) и (11):

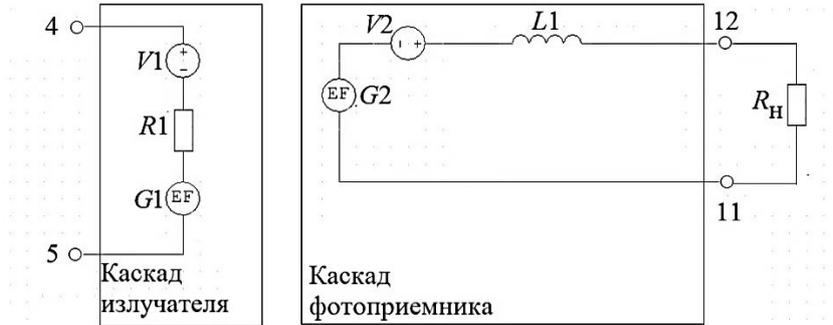
$$\mathbf{M} = \{a1, a2, a3, b1, b2, b3, c1, c2, d1, d2, d3\}. \quad (12)$$

Предположим, что переходный процесс в транзисторной оптопаре заканчивается за время $t \approx 3\tau$, когда первоначальное значение импульса выходного напряжения изменяется по модулю на порядок. Инерционное звено $Z1$ на рис. 8 представим в виде апериодического звена первого порядка (в виде LR -цепи). Роль резистора в такой цепи выполняет активное сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$. Зная время переходных процессов t и сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$, можно определить основные характеристики инерционного звена: постоянную времени τ и индуктивность L :

$$\tau = \frac{t}{3}, \quad L = \tau R_{\text{Н}}.$$

На основе структурной схемы (рис. 8) и с учетом математических моделей (4) и (11) разработана модель (рис. 9), пригодная для SPICE-симуляторов [12]. Номера внешних выводов макромодели соответствуют номерам выводов прототипа: 4, 5 – входы транзисторной оптопары; 11, 12 – выходы транзисторной оптопары. К выходам подключается активное сопротивление нагрузки $R_{\text{Н}}$. Макромодель содержит шесть элементов. Датчик тока представляет собой последовательное соединение универсального источника напряжения $V1$ с нулевым собственным значением напряжения и резистором $R1$. Заметим, что некоторые версии SPICE допускают представление датчика тока лишь из одного резистора. Источник напряжения, управляемый током $G1$, зависит от входного тока и от температуры окружающей среды. Функциональная зависимость источника $G1$ определяется уравнением (4). Коэффици-

енты полиномов записаны как параметры в виде $\{a_i\}$ и $\{b_i\}$. Переменная T воспринимается SPICE-симуляторами как глобальная (резервированная) переменная, обозначающая температуру.



$$G1 = \{a1\} \cdot I(V1) \cdot I(V1) + \{a2\} \cdot I(V1) + \{a3\} + \{b1\} \cdot T + \{b2\} \cdot T + \{b3\}$$

$$G2 = (\{c1\} \cdot I(V1) + \{c2\}) \cdot I(V1) + \{d1\} \cdot I(V2) \cdot I(V2) + \{d2\} \cdot \text{abs}(I(V2)) + \{d3\}$$

Рис. 9. Макромодель транзисторной оптопары 3OT122A

Источник напряжения, управляемый током $G2$, зависит от произведения сопротивления прямой передачи на входной ток, а также от аддитивной нелинейности каскада фотоприемника. Функциональная зависимость источника $G2$ определяется уравнением (11). Коэффициенты полиномов записаны аналогично предыдущему выражению. Датчик тока $V2$ выделяет величину выходного тока, которая используется в функциональной зависимости источника $G2$. Инерционное звено представляет собой LR -цепь, состоящую из индуктивности $L1$ и внешнего (по отношению к макромодели) сопротивления нагрузки R_n .

4. ТЕСТОВОЕ ИСПЫТАНИЕ МАКРОМОДЕЛИ

Тестовое испытание разработанной макромодели проведем на примере образца № 1 транзисторной оптопары 3OT122A. Экспериментальные зависимости полученных ранее характеристик (рис. 3–7) аппроксимируются полиномиальной зависимостью второго порядка. Матричное представление имеет вид

$$y = X\alpha + \varepsilon,$$

где X – матрица экспериментальных значений; ε – случайная ошибка; α – искомые коэффициенты полинома.

Вектор оценок \hat{y} и вектор остатков e регрессии соответственно равны:

$$\hat{y} = X\alpha,$$

$$e = y - \hat{y} = y - X\alpha.$$

Сумма квадратов остатков регрессии будет равна

$$D = e^T e = (y - X\alpha)^T (y - X\alpha).$$

Дифференцируя эту функцию по вектору параметров α и приравняв производные к нулю, получим систему уравнений

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X})\alpha = \mathbf{X}^T \mathbf{y}.$$

Для полинома второго порядка имеем коэффициенты

$$\alpha = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \quad (13)$$

Подставив в (13) экспериментальные значения для образца 1 (рис 3, 4), получим коэффициенты полинома в уравнении (4):

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{U}'_{\text{ВХ}} = \begin{cases} a1 = -339,047, \\ a2 = 8,993, \\ a3 = 1,213; \end{cases}$$

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \Delta \mathbf{U}_{\text{ВХ}} = \begin{cases} b1 = 2,313 \cdot 10^{-6}, \\ b2 = -1,931 \cdot 10^{-3}, \\ b3 = 0,047; \end{cases}$$

Итоговое уравнение (4) для образца имеет вид

$$U_{\text{ВХ}} = -339,047 I_{\text{ВХ}}^2 + 8,993 I_{\text{ВХ}} + 1,213 + 2,313 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,931 \cdot 10^{-3} T + 0,047.$$

Подставив в (13) экспериментальные значения для образца (рис. 6 и 7), получим коэффициенты полинома в уравнении (11):

$$\mathbf{C} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{R}_{\text{ПР.П}} = \begin{cases} c1 = -16\,320, \\ c2 = 238; \end{cases}$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{U}_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} d1 = -200, \\ d2 = 12,72, \\ d3 = -0,143. \end{cases}$$

Итоговое уравнение (11) для образца имеет вид

$$U_{\text{ВЫХ}} = -16\,320 \cdot I_{\text{ВХ}}^2 + 238 I_{\text{ВХ}} - 200 I_{\text{ВЫХ}}^2 + 12,72 I_{\text{ВЫХ}} - 0,143.$$

Согласно справочной информации [5, 6], время нарастания импульса выходного тока при $I_{\text{ВХ}} = 5 \text{ мА}$, $U_{\text{КОМ}} = 10 \text{ В}$, $R_{\text{Н}} = 100 \text{ Ом}$ составляет 6 мкс. Тогда постоянная времени

$$\tau = \frac{t}{3} = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{3} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ мкс}.$$

Величина индуктивности инерционного звена

$$L = \tau R_H = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.}$$

Дальнейшее моделирование происходит в схемотехническом модуле PSpice AD, входящем в программный комплекс Cadence OrCAD [13, 14]. На поле чертежа в схемном редакторе OrCAD Capture макромодель транзисторной оптопары представлена в виде условного графического обозначения четырехполюсника $U1$ (рис. 10). Нагрузкой служит активное сопротивление $R_H = 100$ Ом. Ко входу четырехполюсника подключен универсальный источник тока $I1$, форма сигнала которого и числовые значения представлены на рис. 11. Универсальный источник тока обеспечивает сигнал во всех видах анализа: по постоянному току, в частотной и временной областях.

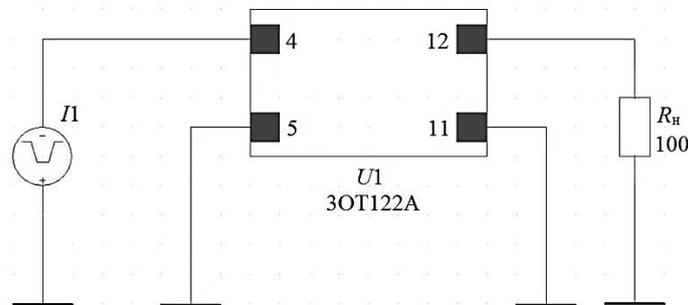


Рис. 10. Схема включения транзисторной оптопары 3OT122A

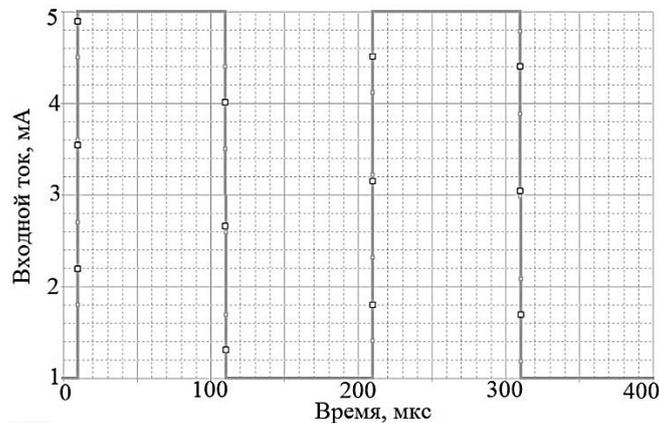


Рис. 11. Входной сигнал:

начальное значение тока $I1 = 1$ мА; импульсное значение тока $I2 = 5$ мА; время до начала переднего фронта $TD = 10$ мкс; время нарастания импульса $TR = 0,1$ мкс; время спада импульса $TF = 0,1$ мкс; ширина импульса $PW = 100$ мкс; период повторения $PER = 0,2$ мс

Тестовое схемотехническое моделирование сначала проводится по постоянному току (режим DC Sweeper). Источник тока принимает четыре фиксированных значения: 2 мА, 5 мА, 10 мА, 15 мА. При этом температура окружа-

ющей среды принимает три фиксированных значения: $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Набор фиксированных значений подобран так, чтобы быть идентичным условиям ранее проведенных экспериментальных исследований (рис. 3, 4).

Для удобства восприятия результаты экспериментальных исследований и результаты моделирования сведены на одну общую координатную плоскость (рис. 12). С качественной точки зрения можно видеть хорошее совпадение характеристик при $T_{\text{ОКР}} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ОКР}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и удовлетворительное при $T_{\text{ОКР}} = -60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количественная оценка проведена методом наименьших квадратов (см. таблицу).

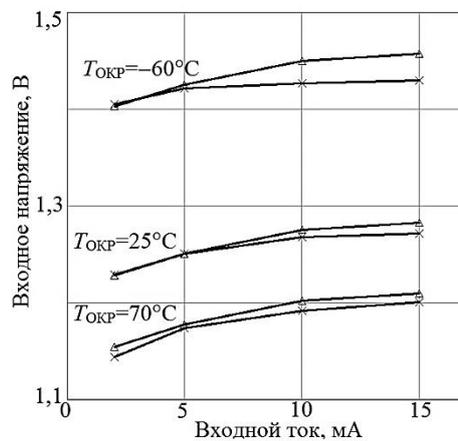


Рис. 12. Сравнительный анализ входных ВАХ для образца:

× – экспериментальные данные;
 Δ – данные моделирования

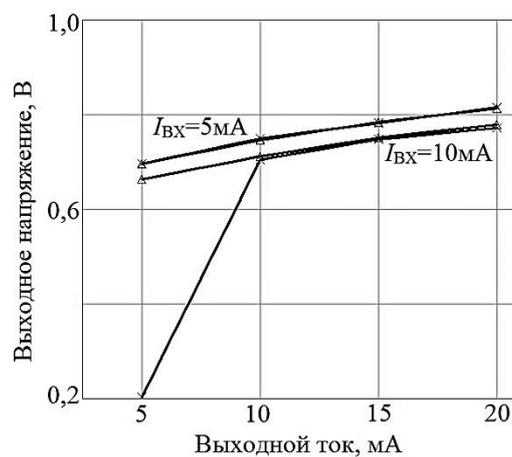


Рис. 13. Сравнительный анализ выходных ВАХ для образца:

× – экспериментальные данные;
 Δ – данные моделирования

Моделирование эффекта изменения выходного тока (рис. 13) происходит за счет варьирования масштабным коэффициентом сопротивления нагрузки. Условия схемотехнического моделирования выглядят так:

- диапазон варьирования масштабного коэффициента $R_H = 0,3 \dots 2$;
- шаг варьирования масштабного коэффициента $R_H = 0,1$;
- набор фиксированных значений входного тока $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}, 10 \text{ мА}$.

Можно наблюдать практически полное совпадение экспериментальных значений и результатов моделирования, за исключением точки $I_{ВЫХ} = 5 \text{ мА}$ при $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$. Количественная оценка приведена в таблице.

Невязка экспериментальных значений и результатов моделирования

Невязка входной ВАХ, %			Невязка выходной ВАХ, % *	
$T_{ОКР} = -60 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{ОКР} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{ОКР} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$	$I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$	$I_{ВХ} = 10 \text{ мА}$
2	0,8	1	0,3	0,7

* За исключением точки $I_{ВЫХ} = 5 \text{ мА}$ при $I_{ВХ} = 5 \text{ мА}$

Моделирование во временной области происходит в режиме Time Domain (Transient). Условия моделирования:

- момент начала анализа $t_{НАЧ} = 200 \text{ мкс}$;
- момент окончания анализа $t_{КОН} = 240 \text{ мкс}$;
- максимальный шаг приращения времени $\Delta t_{\text{max}} = 0,02 \text{ мкс}$.

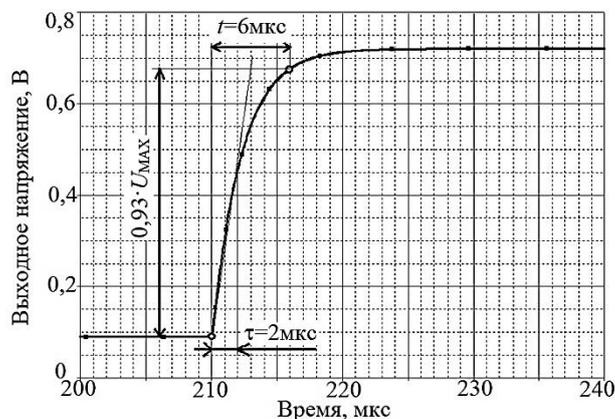


Рис. 14. Время нарастания импульса выходного напряжения для образца

Результаты моделирования во временной области (рис. 14) показывают, что за время $t = 6 \text{ мкс}$ (при постоянной времени $\tau = 2 \text{ мкс}$) уровень выходного напряжения достигает $0,93 U_{\text{max}}$. Это хорошо согласуется с классическими представлениями о числовой взаимосвязи параметров переходного процесса в инерционных звеньях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Предложенная методология моделирования транзисторных оптопар 3ОТ122 с учетом температурной зависимости позволяет имитировать входные и выходные ВАХ с высокой точностью. Невязка результатов экспериментальных измерений и результатов моделирования для испытуемого образца составляет от 0,3 до 2 % (см. таблицу).

Применение классической методологии синтеза SPICE-моделей [15], по справочным данным, приводит к неадекватным моделям по отношению к реальным образцам ЭРИ. Для различных образцов, идентичных по наименованию транзисторных оптопар, наблюдается технологический разброс параметров, который в справочных данных либо не отражается, либо отражен в усредненном виде.

Достоинство представленной методологии моделирования транзисторных оптопар 3ОТ122 состоит в том, что окончательный результат – это вектор параметров математической модели (12). Следовательно, синтез множества подобных транзисторных оптопар семейства 3ОТ122 будет заключаться в отыскании коэффициентов для вектора (12).

Упрощение предложенной макромоделей транзисторной оптопары заключается в том, что величины времени нарастания $t_{НР}$ и времени спада $t_{СП}$ импульса равны и фиксированы ($t_{НР} = t_{СП} = \text{const}$). Недостатком предложенной макромоделей транзисторной оптопары следует признать отсутствие имитации выходного тока утечки $I_{УТ,ВЫХ}$ (величина $I_{УТ,ВЫХ} \approx 100$ нА).

Перспективным способом усовершенствования предложенной макромоделей транзисторной оптопары является введение эффектов: температурной зависимости выходного тока утечки $I_{УТ,ВЫХ} = f(T_{ОКР})$, а также зависимости времени спада и времени нарастания импульса от сопротивления резистора «база–эмиттер» $t_{СП} = f(R_{БЭ})$ и $t_{НР} = f(R_{БЭ})$.

Предложенная методология моделирования транзисторной оптопары 3ОТ122 может быть распространена на другие семейства транзисторных оптопар отечественного и зарубежного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56526–2015. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования [Электронный ресурс]. – URL: http://standartgost.ru/g/ГОСТ_P_56526–2015 (дата обращения: 29.09.2017).
2. ГОСТ Р 56514–2015. Нормы прочности автоматических космических аппаратов [Электронный ресурс]. – URL: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_P_56514–2015 (дата обращения: 29.09.2017).
3. *Deveney M.F.* Temperature tracking SPICE macro-model for laser and LED driven optocoupler assemblies // IEEE Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems. – 1992. – Vol. 2. – P. 1556–1559.
4. *Милешкин А.Е.* Построение математических макромоделей компонентов фоторезисторных оптронов // Теория и практика современной науки. – 2016. – № 6-1 (12). – С. 882–886.
5. Полупроводниковые диоды. Диоды высокочастотные. Диоды импульсные. Оптоэлектронные приборы: справочник / А.Б. Гитцевич и др.; под ред. А.В. Голомедова. – М.: КУБК-а, 1997. – 592 с.

6. Иванов В.И., Аксенов А.И., Юшин А.М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 448 с.

7. Озеркин Д.В., Русановский С.А. Методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков Б19К в SPICE-подобных симуляторах // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 2. – С. 49–54.

8. Озеркин Д.В., Русановский С.А., Бондаренко В.О. Автоматизация проектирования SPICE-моделей резисторных блоков Б19К с позиции температурной стабильности // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 4. – С. 32–40.

9. Официальный сайт АО «Оптрон» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.optron.ru> (дата обращения: 29.09.2017).

10. TP04310A. Mobile Temperature System for testing components, hybrids, parts, modules, subassemblies and printed circuit boards at precise temperature [Electronic resource]. – URL: https://www.atcorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Temptronic-TP04310A_Datasheet.pdf (accessed 29.09.2017).

11. Испытательное и измерительное оборудование ОАО «ИТЦ-НПО ПМ» [Electronic resource]. – URL: <http://ttc-npom.ru/oborudovanie-ispitatelnoe-izmeritelnoe?page=2> (дата обращения: 29.09.2017).

12. Nagel L.W., Pederson L.W. SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). – Berkeley: University of California, 1973. – 65 p.

13. OrCAD Capture Tutorial [Electronic resource]. – URL: <http://www.orcad.com/resources/orcad-tutorials> (accessed 29.09.2017).

14. PSpice Tutorials [Electronic resource]. – URL: <http://www.uta.edu/ee/hw/pspice/> (accessed 29.09.2017).

15. Златин И. Создание и редактирование моделей в OrCAD 15.7 (программа Model Editor) // Компоненты и технологии. – 2007. – № 7. – С. 149–154.

Озеркин Денис Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – температурная стабильность радиоэлектронных средств. Имеет более 40 публикаций, в том числе пять учебных пособий. E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

Русановский Сергей Александрович, кандидат технических наук, генеральный директор НПЦ «Полюс. Основное направление исследований – SPICE-моделирование бортовой космической радиоаппаратуры. Имеет 10 публикаций. E-mail: rusa10@yandex.ru

The 3OT122 transistor optocoupler modeling methodology with temperature dependence*

D.V. OZERKIN¹, S.A. RUSANOVSKIY²

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

² Polus, JSC, 56v, Kirov Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation, general manager, PhD (Eng.). E-mail: rusa10@yandex.ru

A characteristic feature of the electronic component base used in on-board space equipment is a wide temperature range of operation (from –60 °C to 125 °C). Mathematical models that adequately describe the behavior of prototypes at room temperature become unsuitable for modeling processes under extreme operating conditions. The task arises to develop mathemati-

* Received 10 April 2017.

cal models of the special-purpose electronic component base that adequately describe the behavior of prototypes over a wide temperature range. In the nomenclature of the electronic component base used in domestic on-board space radio equipment, 3OT122 transistor optocouplers are quite common. A batch of five identical 3OT122A transistor optocouplers manufactured by the Optron JSC was selected for the study. In the article, methodological issues of SPICE-modeling of these transistor optocouplers are considered taking into account temperature dependence. It is shown that the samples of 3OT122A transistor optocouplers of one delivery batch are characterized by a technological spread of parameters. This fact makes it difficult to use the classical methodology for the synthesis of SPICE models based on reference data, since the adequacy of the models obtained with respect to their prototypes is unsatisfactory. The authors propose an original methodology for the synthesis of transistor optocouplers based on measuring electrical parameters of the samples at different temperatures. The measurement results are ultimately converted into a vector consisting of 11 parameters. In this case, the synthesis of a set of similar transistor optocouplers from the 3OT122 family will be the search for this vector coefficients. For one of the samples of the transistor optocoupler, the approbation of the developed methodology was carried out. The result was a synthesized SPICE model with a 2% discrepancy between experimental measurements and modeling data.

Keywords: on-board space radio-electronic equipment; transistor optocouple; temperature stability; current-voltage characteristic; output residual voltage; quadratic approximation; SPICE model; OrCAD

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-3-76-94

REFERENCES

1. GOST R 56526–2015. *Trebovaniya nadezhnosti i bezopasnosti kosmicheskikh sistem, kompleksov i avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov edinichnogo (melkoseriynogo) izgotovleniya s dlitel'nymi srokami aktivnogo sushchestvovaniya* [State Standard R 56526–2015. Reliability and safety requirements for space systems, complexes and unmanned spacecrafts of unique (small series) production with long life of active operation]. Available at: http://standartgost.ru/g/GOST_R_56526-2015 (accessed 29.09.2017).
2. GOST R 56514–2015. *Normy prochnosti avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [State Standard R 56514–2015. Strength standards for automated spacecrafts]. Available at: https://standartgost.ru/g/ГОСТ_P_56514-2015 (accessed 29.09.2017).
3. Deveney M.F. Temperature tracking SPICE macro-model for laser and LED driven optocoupler assemblies. *IEEE Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1992, vol. 2, pp. 1556–1559.
4. Mileshkin A.E. Postroenie matematicheskikh makromodelei komponentov fotorezistornykh optronov [Construction of mathematical macromodels components of the optocouplers with photoreistor]. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki – Theory and practice of modern science*, 2016, no. 6-1 (12), pp. 882–886.
5. Golomedov A.V., ed. *Poluprovodnikovye diody. Diody vysokochastotnye. Diody impul'snye. Optoelektronnye pribory: spravochnik* [Semiconductor diodes. High-frequency diodes. Impulse diodes. Optoelectronic devices: handbook]. Moscow, KUBK-a Publ., 1997. 592 p.
6. Ivanov V.I., Aksenov A.I., Yushin A.M. *Poluprovodnikovye optoelektronnye pribory: spravochnik* [Semiconductor optoelectronic devices: handbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 448 p.
7. Ozerkin D.V., Rusanovskii S.A. Metodologiya modelirovaniya temperaturnoi stabil'nosti rezistornykh blokov B19K v SPICE-podobnykh simulyatorakh [Methodology for modeling the temperature stability of the B19K resistor blocks in SPICE simulators]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2017, no. 2, pp. 49–54.
8. Ozerkin D.V., Rusanovskii S.A., Bondarenko V.O. Avtomatizatsiya proektirovaniya SPICE-modelei rezistornykh blokov B19K s pozitsii temperaturnoi stabil'nosti [SPICE model automatic

designing of B19R resistance blocks from the position of temperature stability]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 32–40.

9. *Ofitsial'nyi sait AO "Optron"* [JSC "Optron" official site]. Available at: <http://www.optron.ru> (accessed 29.09.2017).

10. *TP04310A. Mobile Temperature System for testing components, hybrids, parts, modules, subassemblies and printed circuit boards at precise temperature*. Available at: https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Tempronic-P04310A_Datasheet.pdf (accessed 29.09.2017).

11. *Ispytatel'noe i izmeritel'noe oborudovanie OAO "ITTS-NPO PM"* [JSC "ITTS-NPO PM" testing and measuring equipment]. Available at: <http://ttc-npopm.ru/oborudovanie-ispytatelnoe-izmeritelnoe?page=2> (accessed 29.09.2017).

12. Nagel L.W., Pederson L.W. *SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)*. Berkeley, University of California, 1973. 65 p.

13. *OrCAD Capture Tutorial*. Available at: <http://www.orcad.com/resources/orcad-tutorials> (accessed 29.09.2017).

14. *PSPICE Tutorials*. Available at: <http://www.uta.edu/ee/hw/pspice/> (accessed 29.09.2017).

15. Zlatin I. Sozdanie i redaktirovanie modelei v OrCAD 15.7 (programma Model Editor) [Creating and editing models in OrCAD 15.7 (Model Editor Program)]. *Komponenty i tekhnologii – Components & Technologies*, 2007, no. 7, pp. 149–154.