

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ДО СЕРЕДИНЫ УВЧ ДИАПАЗОНА ПРИ ИХ МОДЕЛИРОВАНИИ

Проскурин Н.П.

ЗНТУ, Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского 64

nickolay@zntu.edu.ua

Проведен анализ ряда моделей микро мощных оптронов для оптоэлектронных переключателей и логических элементов (ОПЛЭ) квазиимпульснопотенциального типа (КИПТ). Повышение частоты модуляции сигнала светодиода достигнуто за счет проектирования новых моделей микро мощных оптронов ОБЧ, УВЧ диапазонов с малыми размерами их элементов, режимом модуляции типа «малый сигнал» при снижении мощности потребления. Показана актуальность исследований в области интеграции ОПЛЭ в цифровые электронные и оптоэлектронные интегральные схемы. Отмечена отечественная программная среда с открытыми математическими моделями электронных приборов (элементов). Ил.5. библ. 16 наимен.

Ключевые слова: математическая модель, оптроны, элементы, излучатель, фотоприемник, микро мощные режимы переключения.

Проведено аналіз ряду моделей мікропотужних оптронів для оптоелектронних перемикачів і логічних елементів (ОПЛЕ) квазіімпульснопотенційного типу (КІПТ). Підвищення частоти модуляції сигналу світлодіода досягнуто за рахунок проектування нових моделей мікропотужних оптронів ДВЧ, УВЧ діапазонів з малими розмірами їх елементів, режимом модуляції типу «малий сигнал» при зниженні потужності споживання. Показана актуальність досліджень в області інтеграції ОПЛЕ в цифрові електронні і оптоелектронні інтегральні схеми. Відзначено вітчизняне програмне середовище із відкритими математичними моделями приладів (елементів). Іл.5. бібл. 16 наймен.

METHODOLOGY OF INCREASING FREQUENCY CHARACTERISTICS OPTOELECTRONIC LOGIC CIRCUITS UNTIL THE MIDDLE OF THE UHF BAND DURING THEIR MODELING

Proskurin N.P.

ZNTU, Ukraine, 69063, Zaporozje, ul. Zukovskogo 64

nickolay@zntu.edu.ua

*Key words: mathematical model, optocouplers, elements, radiator photodetector,
micro-power switching modes.*

The analysis of some models of micropower optocouplers for optoelectronic switches and logic elements (OSLE) of the quasi-impulse potential type (QIPT) was realized. Mathematical models of elements (MME) of electronic devices are a set of interrelated mathematical and formal-logical expressions and display the actual physical processes and phenomena. When developing electronic devices, components and equipment used programming environments (PE) type P-CAD, RSpice, OrCAD, Proteus, et al., who have a major drawback: the closed nature for the researcher of the mathematical models of devices (MMD). The author proposed to use for research PE MAES-P having open MMP, MMD. The study aims to improve the frequency characteristics of micropower OSLE and results of mathematical modeling of circuits (taking into account features and capabilities of the selected methodology toolkit). The objectives of the study are: analysis and justification mode selection switch LED optocoupler; grouping parameters of differentiation and MME, MMP, after analysis and classification: geometric, physical, gear, mixed, etc.) and the

determination and verification of the proposed techniques for improving the frequency characteristics with a decrease in power consumption. Increased frequency modulation signal LED achieved by designing new models micropower optocouplers VHF, UHF bands with small size of their elements, the modulation mode of the "small signal" while reducing power consumption. The outputs of the conclusions:

- Results of the research and simulation of optoelectronic MMD confirmed the adequacy of the presentation of the possibility of breaking down of the MME, MMP parameters to geometry, transmission and physical and combinations there of. Described, tested and simulated small and micro-power MEM (optocoupler UHF type LED- p-i-n PD with HF n-p-n Tr.), indicating the achieving the goal of research through accomplishing of tasks;

- The obtained results, switching parameters, research models and schemes OPLE on micropower optocouplers HF, VHF and UHF bands indicate the prospects and the current offer the author approaches to achieve the parameters of the known types of electronic switching logic;

- A type of MMD optocoupler LED- p-i-n PD with UV on the n-MOS Tr. is proposed, some of its switching characteristics are investigated in low-power mode, the PE MAES-P;

- As a research tool the home-produced simulation environment PE MAES-P was used, which includes dozens of open MMD for research schemes, which can be supplemented with new MMD (including with the design parameters).

The urgency of research in the field of integration of OSLE in digital electronic and optoelectronic integrated circuits. II.5, 16 bibliography entries.

Вступ. Постановка проблемы в общем виде и актуальность. Моделирование элементной базы, узлов, схем, систем, устройств аналоговой и цифровой техники является обязательной частью научных исследований, разработок и проверки (верификации) инженерных решений. Наибольшее распространение получили функциональные, параметрические и **математические модели** (их комбинации). Последние относительно универсальны и позволяют проверить, прогнозировать развитие явлений или процессов, отыскать способы управления ими и моделировать поведение узлов, устройств во времени, с учетом внешних условий (давления, температуры, влажности, радиации, др.). **Математические модели элементов (ММЭ)** и электронных приборов (ММП) чаще всего представляют собой совокупность взаимосвязанных математических и формально-логических выражений и, как правило, отображают реальные физические процессы и явления [1]. Они являются основой применения вычислительной техники для построения высокоточных компьютерных моделей, т.к. соответствуют физической сути явлений исследуемых процессов с высокой точностью и широко используются как инструмент разработки, исследования и оптимизации схем. Наибольшее развитие при разработке электронных приборов, узлов и аппаратуры на ПК в странах СНГ получили программные среды (ПС) типа P-CAD, PSpice, OrCAD, Proteus, др. [1-4]. Они предназначены для решения следующих задач: графический ввод принципиальных схем, моделирование цифровых и аналоговых устройств, проектирование логических интегральных схем (ИС), разработка печатных плат (размещение компонентов и трассировка печатных проводников), др.. Каталоги библиотек моделей (БМ) и корпусов компонентов пополняются моделями элементов, приборов, схем от фирм -производителей, что обеспечивает выбор из имеющейся БМ, но связывает разработчика только с существующими моделями, а через них - с конкретными производителями электронных изделий. **Недостатком таких ПС являются закрытость внутренних параметров моделей, ограничение возможностей создания новых приборов на их основе, отсутствие инструмента моделирования для электронных компонентов с расчетными параметрами.** Например, известная ПС серии OrCAD принадлежат компании Cadence Design Systems. Одна из последних версий OrCAD 16.6 [5] (вышла в 2012г.) имеет поддержку БМ компонентов (в виде ММЭ: резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов, тиристоров, модулей, светодиодов (СД),

оптронов, интегральных схем (ИС), микроконтроллеров, силовых и переключательных модулей, др.) **исключительно от производителей**. Она обновляется путем скачивания пакетов от фирм: Analog Devices, Linear Technology, Intel, Siemens, Texas Instruments, др.). **Возможность при исследовании ввода измененных параметров в модель и/или описания новых устройств в виде разработанных ММЭ в таких ПС отсутствует.** Причина - жесткая их связь с существующими БМ и закрытые для пользователя описания ММЭ (в виде «черного ящика»), которые **разрабатывает и пополняет за плату только производитель изделия**. Анализ имеющихся и доступных ПС (с точки зрения открытости ММЭ) указал оригинальную отечественную разработку -ПС МАЭС-П (Моделирование Аналоговых Электронных Схем) [6,7]. ПС МАЭС-П предназначена для автоматизированного проектирования на ПК устройств электронной техники, имеет БМ с десятками типов электронных приборов производства СНГ и их импортных аналогов, не имеет ограничений на пополнение состава БМ, структуру схем и моделей и распространяется бесплатно. Ее особенностью является открытость ММЭ, ММП что позволяет: моделировать электрические схемы аналоговых и/или цифровых приборов из БМ и/или вводить в них виртуальные расчетные параметры, например новых полупроводниковых структур (ППС): разработанных приборов, ИС, узлов, устройств, блоков, и в том числе – новые ММЭ, например, микромощных оптронов ОБЧ-УВЧ диапазонов для схем цифровой оптоэлектронной логики. Применение данной ПС при моделировании электронных схем обеспечивает: высокую точность (сравнима с P-Spice), возможность изменения внешних условий (температура, радиация, др.), а также использование ее положительных качеств (доступность ПС, открытость ММЭ, ММП и возможность пополнения БМ) и развитого инструментария, что **является достаточно актуальным**.

Основная часть. 1. Анализ последних исследований и публикаций, обзор предметной области и нерешенные задачи. В литературных источниках, InterNet приведены многочисленные результаты, сообщения по мало- и микромощным режимам переключения оптоэлектронных ППС типа СД [8-10] (связано с недостатками проводных металлических соединений между электронными улами, внутри ИС, др.) и заменой их на оптические связи, интерфейсы, каналы передачи. Так, источник [8] сообщает о технологии связи light-peak (Intel совместно с Apple) между блоками аппаратуры и достижении объема передачи до 10ГБ/с (длина линии до 100м); в [9] утверждается о создании на кристалле (с помощью нанофотонных технологий) экспериментального одномодового микромощного СД с частотой модулирования до 10 ГГц; в [10] подытоживается, что решение проблемы коммутации в будущем для ИС может лежать в плоскости оптоэлектроники и фотоники. Указанные источники сообщают о полученных результатах макетных исследований (т.е. выполненных на реальных устройствах), но **не раскрывают результаты моделирования и методологию, инструментарий, особенности режимов работы их излучателей и фотоприемников**. Большая часть из них размещаются на отдельных платах, представляют собой ППС в виде дискретных (или экспериментальных) приборов –инжекционных лазеров (ИЛ) и/или суперлюминисцентных диодов (СЛД) и не содержат регулярных повторяющихся структур (например, транзисторов, интегральных оптронов или их составляющих). Источник [11] указывает методику прикладных исследований мало- и микромощных режимов работы (под этими терминами приняты величины исследуемых рабочих токов СД стандартных оптронов меньших номинальных в 10 и 100 раз, соответственно) оптронов производства СНГ, например АОД130А (СД- р-і-п ФД) [12], который входит в схему оптоэлектронной матрицы коммутации. **Однако вопросы моделирования, методологии повышения частоты переключения СД оптронов, снижения их потребления в работе не исследуются.** Поэтому представляет интерес рассмотрение предложенных автором подходов при математическом моделировании схем для достижения ВЧ режимом переключения СД излучателей микромощных интегральных оптронов (типа СД- р-і-п ФД), как составных частей ОПЛЭ для проектов оптических интерфейсов цифровых ИС.

2. Постановка задания: цель и задачи исследования. Целью исследования является особенности методологии повышения частотных характеристик и снижения потребления микромощных ОПЛЭ и результаты математического моделирования их схем (с учетом возможностей выбранного инструментария). **Задачами** исследования являются: анализ и обоснование выбора режимов переключения СД оптронов; группировка параметров ММЭ, ММП после их анализа и классификации (например, по признакам: геометрические, физические, передаточные, смешанные, др.), а также проверка предложенных методик повышения их частотных характеристик при снижении потребляемой мощности результатами моделирования.

3. Описание особенностей режимов, выбранного инструментария моделирования и его некоторых характеристик. Отметим, что с учетом цели исследования, при выборе режимов работы СД особый интерес представляет изучение режимов его ВЧ модуляции, в котором включение (наличие излучения) обеспечивается переводом СД в зону 2 ВАХ, а выключение (отсутствие излучения) - переводом СД в зону 1 ВАХ при близости к $U_{\text{Порог. СД}}$. СД в обоих случаях, как указано на рис.1а. Это обеспечивает определенные преимущества схем ОПЛЭ: ненасыщенные режимы включения и значения токов СД (на 1...2 порядка менее номинальных) на его ВАХ (рис.1а), повышение частоты переключения в десять и более раз, а также возможность достичь значения мощностей переключения электронных цифровых схем известных типов логики (ТТЛШ, n-МОП, К-МОП, др.). При этом следует учесть возможность получения резкого изменения значения дифференциального сопротивления СД (при достаточно малом изменении управляющего сигнала и емкости р-п перехода C_{p-n} $i_{\text{СД}} \sim \Delta Q / \Delta U$). Эти условия соответствуют режиму «малого сигнала» (МС, рис.1б), который отличается повышенной частотой модуляции по сравнению с режимом «большого сигнала» (БС, рис.1в) за счет резкого снижения времени переходных процессов в р-п переходе СД. Режим МС обеспечивают наложением на ток $I_{\text{Пр. порог. СД}}$ смещения в виде гармонического возмущения на рабочей частоте F [13].

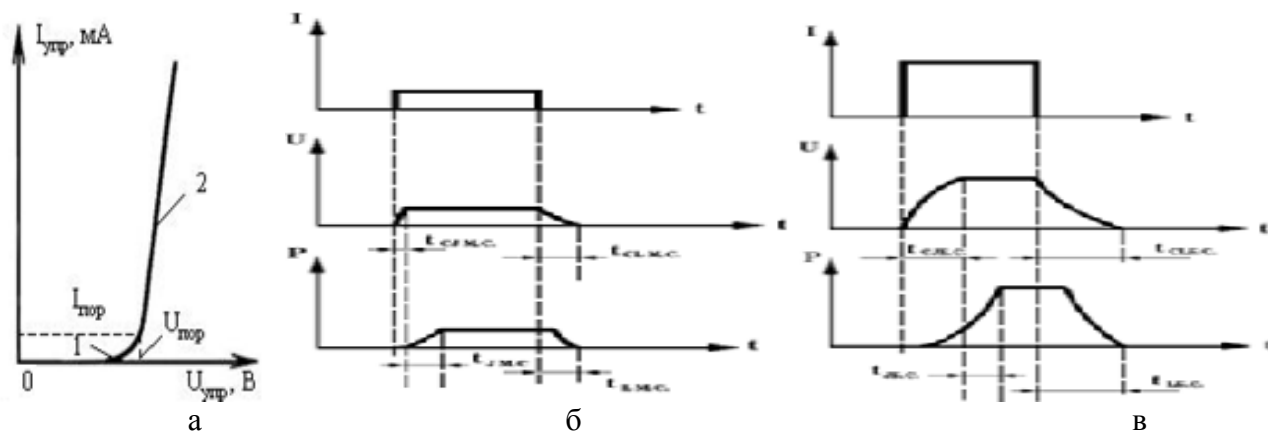


Рис.1 ВАХ СД (а) и временные графики импульсов (исходный, напряжения, тока) для режимов: «малый сигнал» (б) и «большой сигнал» (в).

На рис.2 а-д показаны электрические и эквивалентные схемы принятые в ПС МАЭС-П: диод (а, г); n-p-n транзистор (б, д); оптрон СД-ФТр. (в, е). Описание моделей диода (Д), транзистора (Тр) представлены в виде ММЭ Эберса-Молла (взята за основу) и Норенкова-Логана [6,7]. Описание модели Д включает в себя два двухполюсника (ДП): первый ДП1- нелинейный источник тока J_d (моделирует ток нелинейной части ВАХ р-п перехода Д, реактивные составляющие тока, обусловленные его барьерной и диффузионной емкостями и описывается известным экспоненциальным выражением для одного р-п перехода); второй ДП2- резистор R_d (описывает сопротивление высокоомной области базы Д). Для отражения электрических процессов Д (например СД, ФД, др.), работающем в статическом, динамическом режимах на прямой, обратной ветвях ВАХ, используется универсальная его нелинейная модель - Д. Модель рассчитана на режимы малых, средних и больших токов,

учитывает эффект накопления неосновных НЗ в Д. Модель фототранзистора (ФТр., три р-п перехода) представлена в виде собственно ФД (J2), подключенного к базе п-р-п Тр., который образован двумя Д (J4-эмиттерный и J3-коллекторный переходы, соответственно), рис.2е. Тр. выполняет роль усилителя-формирователя (УФ) импульса фототока ФД, значение которого задано частью переданной электрической мощности СД (обычно 1... 5%).

Двухполюсники (типа R, L, C, J и E лит., их комбинации) являются «первокирпичиками» для описания элемента, прибора, схемы, узла, устройства в ПС МАЭС-П. В БМ ПС МАЭС-П имеется ММП оптоэлектронного коммутатора - оптрона 249КП1 (СД-ФТр.) в нескольких ее модификациях [12]. Описание элементов (СД, ФТр. п-р-п типа) в виде ММЭ из БМ включают: излучатель СД (один р-п переход, включен в прямом направлении), параметр тока СД J1 задан нелинейной функцией F213; ФП в виде р-и-п ФД (один р-п переход включен в обратном направлении), параметр фототока J2 Тр. задан функцией F14 в виде части от потребляемой мощности СД (коэффициент передачи по току $K_{ФП}$ от 0,5% до 1,0% для разных видов оптрона 249КП1); УФ- п-р-п Тр.: два р-п перехода (Э-Б включен в прямом, Б-К - в обратном направлении), параметр выходного тока коллектора J3 (р-п переход Б-К) задан функцией F215; параметр входного тока эмиттера J4 (п-р переход Э-Б) задан функцией F216. Электрические, эквивалентные схемы Д, п-р-п Тр., оптрона СД-ФТр. приведены на рис.1а-е [12]. Для исследований выбрана модель оптрона 249КП1С (со значениями наилучших параметров, в т.ч. коэффициента передачи по току $K_{ФП} \geq 1\%$, меньшими значениями R1, R2; C1, др.), что обеспечит условия переключения СД в цепочке схем ОПЛЭ, которые приведены на рис.3а-в [14]. Количество каскадов преобразования в некоторых схемах ОПЛЭ может быть сведено к 1...3 (достигается увеличение быстродействия и ее упрощение). Следовательно, если ко входу схемы рис.3в присоединить один (или несколько - n) фотоприемников (ФП): фоторезисторов (ФР), фотодиодов (ФД), как показано на рис.3а (на которые приходит излучение от СД n предыдущих оптронов), то получится электрическая схема ОПЛЭ типа n ИЛИ-НЕ, а при n=1 оптоэлектронный инвертор (ОИ). Типовая тестовая схема на трех ОИ в виде самовозбуждающегося кольцевого генератора импульсов (КГИ), может быть выполнена на трех оптронах типа 249КП1С (СД-ФТр.) приведена на рис.4 а-г (в центре). При этом связи между каскадами каждого ОИ в схеме исключительно оптические.

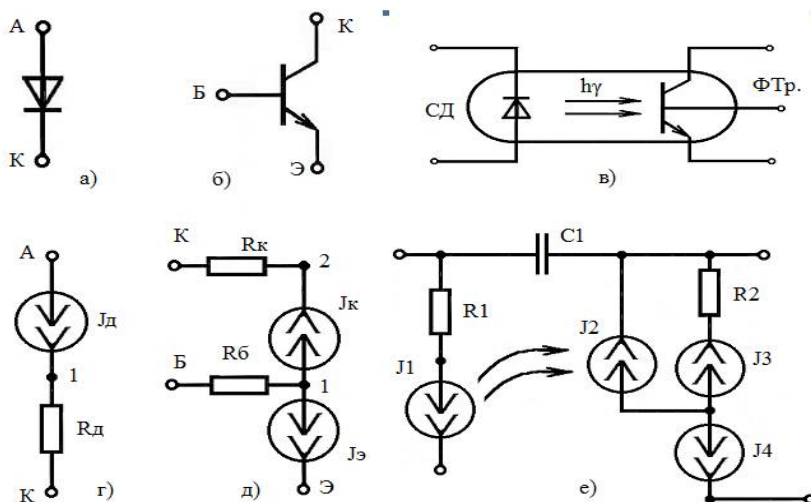


Рис.2 а-е Обозначения нелинейных элементов, входящих в оптрон и их модели: диод (а,г); п-р-п транзистор (б,д), фототранзисторный оптрон типа СД-ФТр. (в,е).

4. Особенности ММЭ в ПС МАЭС-П и методология анализа их параметров. Для отражения электрических процессов в диоде (СД, ФД, др.), работающем в статическом, динамическом режимах на прямой, обратной ветвях ВАХ, используется универсальная нелинейная модель диода (Д). Модель рассчитана на режимы малых, средних и больших токов, учитывает эффект накопления неосновных носителей заряда (НЗ) в Д, эквивалентная схема которого приведена на рис.2г.

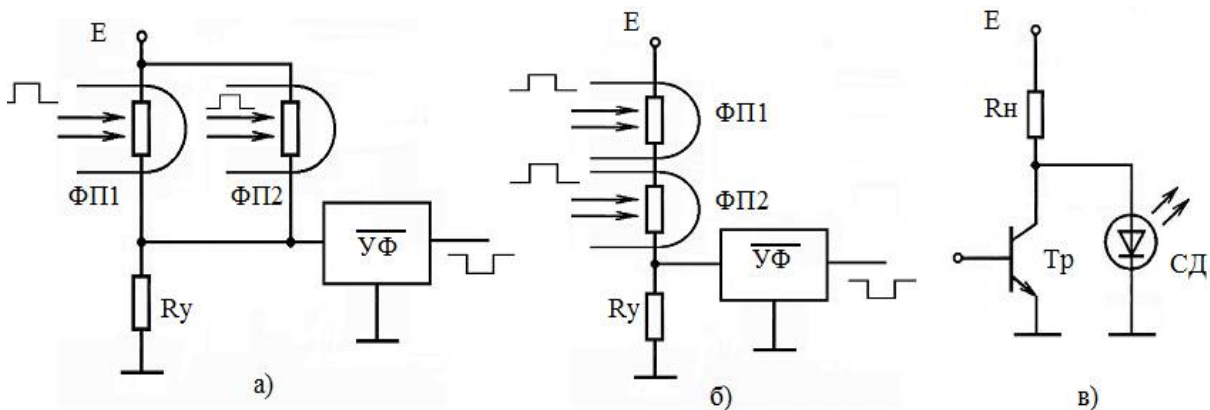


Рис.3а-в. Схемы ОПЛЭ: 2ИЛИ-НЕ– а; 2И-НЕ– б; ВЧ переключения (модуляции) СД на n-p-n биполярном Тр.–в.

Сопротивление R_d описывает омическое сопротивление базы (Б, высокоомная область ППС). Источник J_d описывается нелинейной функцией F213 (моделирует ток ВАХ p-n перехода и реактивные составляющие тока, обусловленные барьерной и диффузной емкостями Д). Функция F213 в МАЭС-П описывается выражением: $F213(0, IT, МФТ, ТАУ, C0, RY \# AR1)$, где 0 - начальное значение тока диода на ВАХ; IT - тепловой ток p-n перехода; МФТ - температурные потенциалы p-n перехода; ТАУ - постоянная времени диффузной емкости p-n перехода; C0 - барьерная емкость p-n перехода; RY - сопротивление утечки p-n перехода; AR1 - аргумент (напряжение ИП для описываемой функции и/или схемы). В итоге функция F213 реализует зависимость тока Д, представленную выражением:

$$Y = \text{EXP}\left(\frac{1}{\text{МФТ}} * \text{AR1} + \text{LN}(\text{IT})\right) - \text{IT} + (C0 + \frac{\text{ТАУ}}{\text{МФТ}} * \text{EXP}\left(\frac{\text{AR1}}{\text{МФТ}} * \text{AR1} + \text{LN}(\text{IT})\right)) * \frac{\text{DAR1}}{\text{DT}} + \frac{\text{AR1}}{\text{RY}}$$

В ПС МАЭС-П реализуется модель биполярного n-p-n транзистора (Тр.) Эберса-Молла (с учетом особенностей модели Норенкова-Логана), которая является универсальной. В основе ее лежит представление его из двух Д (один включен в прямом направлении, второй - в обратном); двух резисторов - базы R_b и коллектора R_k , что позволяет с высокой степенью приближения отразить реальные нелинейные характеристики Тр. (режимы: насыщения, отсечки, нормальном активном или инверсном). Эквивалентная схема n-p-n Тр. приведена на рис.2д. Нелинейные источники тока J_k и J_ε моделируют его токи коллектора (К) и эмиттера (Э). Сопротивления R_b и R_k отображают объемные сопротивления Б и К.

Функция F215 моделирует полный ток К Тр. и входным языком МАЭС-П описывается так: $F215(\text{BETA1}, \text{ITK}, \text{МФТК}, \text{ТАУК}, \text{C0K}, \text{RYK}, \text{BETA}, \text{ITЭ}, \text{МФТЭ}, \text{ТАУЭ}, \text{C0Э}, \text{RYЭ} \# \text{AR1}, \text{AR2})$, где BETA1, BETA- инверсный, нормальный коэффициент передачи тока, схема ОЭ; ITK, ITE - тепловые тока Б-К, Э-Б p-n переходов Тр.; МФТК, МФТЭ - температурные потенциалы Б-К, Э-Б p-n переходов Тр.; ТАУК, ТАУЭ - постоянные времени диффузных емкостей Б-К, Э-Б p-n переходов Тр.; C0K, C0Э - барьерные емкости Б-К, Э-Б переходов Тр.; RYK, RYЭ - сопротивления Б-К и Э-Б переходов Тр.; AR1, AR2 - напряжение на Б-К и Э-Б p-n переходах Тр.. Функция F216 моделирует ток Э Тр. в схеме с ОЭ и входным языком МАЭС описывается: $F216(\text{BETA1} \# \text{A1}, \text{AR2})$, где BETA1 - инверсный коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ. Описание n-p-n Тр. (рис.2д, схема с ОЭ) на языке ПС МАЭС-П имеет вид [6,7]:

МОДЕЛЬ n-p-n; название, тип Тр.

ЭЛЕМЕНТЫ: RБ, Б-1 = RБ; сопротивление Б n-p-n Тр.

RК, К-2 = RК; сопротивление К n-p-n Тр.

JK, 1-2 = F215(BETA1, ITK, МФТК, ТАУК, C0K, RYK, BETA, ITЭ, МФТЭ, ТАУЭ, C0Э, RYЭ # UJK, UJЭ); нелинейная функция тока К n-p-n Тр.

JЭ, 1-Э = F216(BETA1 # UJK, UJЭ) нелинейная функция тока Э n-p-n Тр..

С учетом моделей Д, Тр. ММЭ оптрона 249КП1С из БМ ПС МАЭС-П имеет вид (рис.2 в,е):

R1, B1-2 = 100M; сопротивление анода СД

R2, B2-11 = 220M; сопротивление коллектора n-p-n Тр.

$C1, 2-11=2\text{ПФ}$; *проходная емкость оптрона*

$J1, B1-3=F213(0, 1E-15\text{МА}, 32\text{МВ}, 1.2\text{МКС}, 100\text{ПФ}, \underline{2\text{МГОМ}} \# UJ1)$; *функция тока СД*

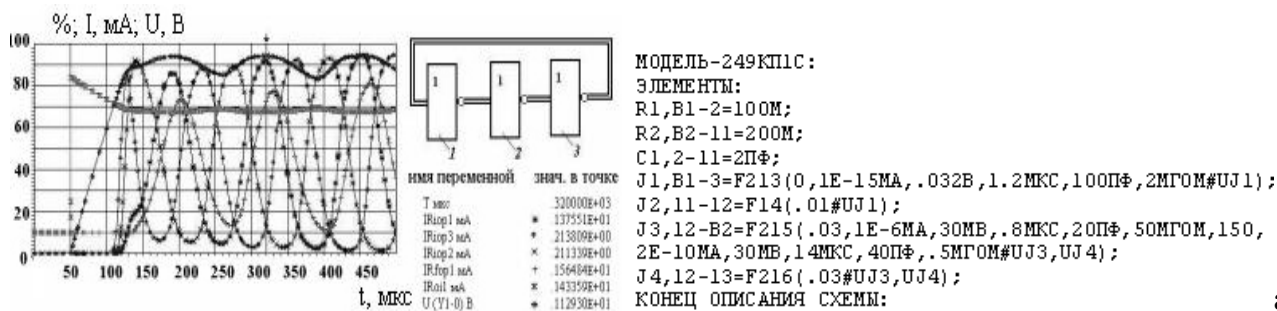
$J2, 12-11=F14(\underline{0.01} \# UJ1)$; *фототок, составляет 1% от произведения $UJ1$ (мощности) СД*

$J3, 12-B2 = F215(\underline{0.3}, 1E-6\text{МА}, 30\text{МВ}, 0.8\text{МКС}, 20\text{ПФ}, \underline{50\text{МОМ}}, \underline{150}, 2E-10\text{МА}, 30\text{МВ}, 14\text{МКС}, 40\text{ПФ}, \underline{0.5\text{МОМ}} \# UJ3, UJ4)$; *функция тока К n-p-n Тр.*

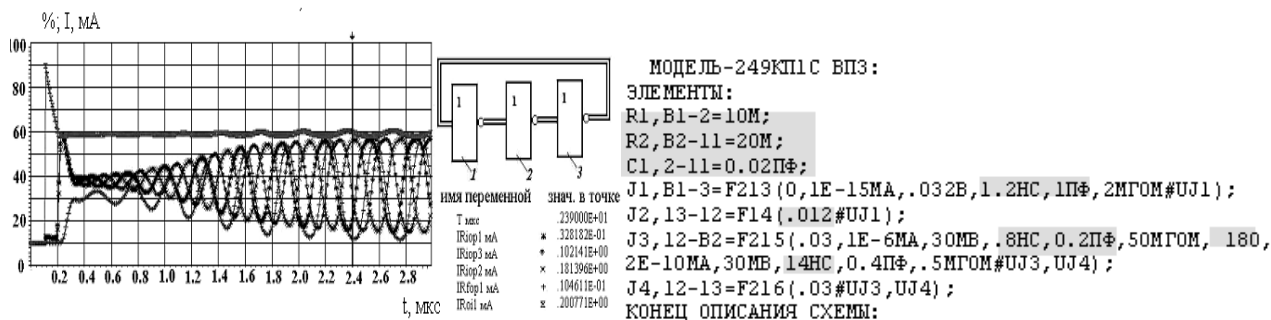
$J4, 12-13=F216(\underline{0.03} \# UJ1, UJ4)$; *функция тока Э n-p-n Тр.*

ПС МАЭС-П допускает возможность изменять и/или вводить новые (расчетные) значения параметров в ММЭ (из БМ или разрабатываемой ППС: например, коэффициент усиления, значение емкости, сопротивления, тепловой ток, др.), что положительно отличает ее возможности от «закрытых» ММЭ известных ПС моделирования. Указанные параметры модели можно условно разделить на: **геометрические** (зависят только от геометрии элементов оптрона и/или их соотношений, см. ММЭ 249КП1С- выделены серым фоном), **передаточные** (например, функция $J2$ фототока ФД в виде 1% от произведения $UJ1$ СД: выделен подчеркиванием; транзистора: ВЕТАИ, ВЕТА- выделены двойным подчеркиванием), **физические** (часть из них связана с геометрией: выделены серым фоном с подчеркиванием; часть не связана - без подчеркивания и выделения- последние определяются физическими свойствами материалов ППС и особенностями их конструкций и имеют фиксированные значения для функций $J1 \dots J4$ конкретной ППС).

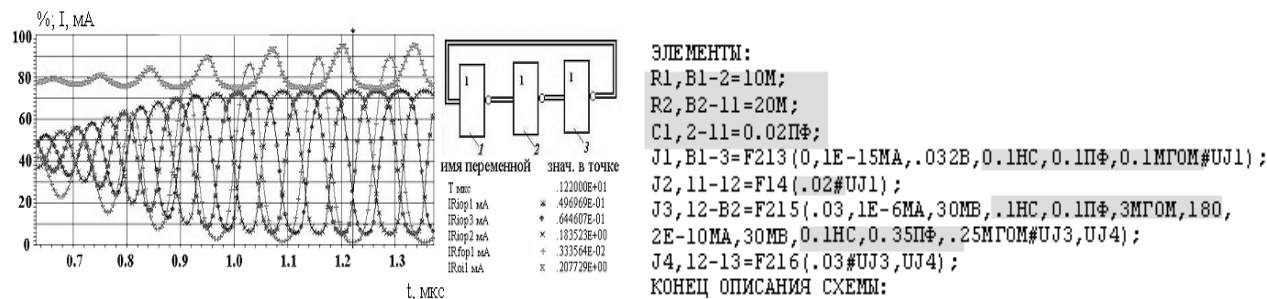
5. Некоторые результаты моделирования. На рис.4 а-г приведены графики моделирования тестовой схемы КГИ на оптронах и их результаты. Из рис.4 а,б видно, что изменение (выделены серым фоном рис.4б) геометрических и некоторых физико-геометрических параметров ММЭ исходного оптрона 249КП1С из БМ (рис.4а) привело к существенному росту частоты переключения (рис.4б). При этом введено допущение, что величины: сопротивлений R_d СД и R_k Тр. уменьшены в 10 раз; емкостей $C_0, C_0K, C_0Э$ элементов оптрона и значение проходной емкости C_1 (характеризует значение емкостной связи между СД и ФП) уменьшаются примерно в 10^2 раз (пропорциональны величинам площадей S); значения $TAU, TAUk, TAUЭ$ - уменьшаются на три порядка (пропорциональны величине $t \sim RC$). При этом дополнительно изменены (на 20%) два передаточных параметра оптрона 249КП1С: значение коэффициента передачи $K_{ФД}$ (с 0,01 до 0,012) и усиления по току $h \sim \beta$ (ВЕТА с 150 до 180) и параметры, характеризующие физические свойства материалов ее элементов СД и Тр., связанные с геометрией (выделены серым фоном, см. состав функций F213 и F215, рис.4б). На следующем шаге исследования существенные изменения параметров: передаточных $K_{ФД}$ (с 0,012 до 0,02) и физических, связанных с геометрией (в 10...16 раз - выделены серым фоном на рис.4в) на следующем этапе моделирования привели лишь к незначительному увеличению частоты переключения схемы КГИ с 3 МГц до 8 МГц (сравните описание 249КП1С ВП3 с 249КП1С ВП4; напряжение питания обеих схем $E_{Пит.} = 1,5\text{В}$). Это, видимо, указывает на исчерпание возможностей повышения частотных характеристик ММЭ оптронов 249КП1С ВП3, ВП4 изменением части физико-геометрических параметров их элементов. Далее автором (на основе использования методики выделения и формализации геометрических, передаточных, физических параметров, их комбинации расчетных ММЭ, ММП) проведены расчеты параметров элементов микромощного оптрона 249КП1С ВП5 (предложена топология, спроектированы, промоделированы и оптимизированы профили ППС: его элементов: СД, p-i-n ФД и УФ на ВЧ n-p-n Тр.) и получены результаты, в котором частота переключения схемы КГИ достигла 333 МГц. Затем проведено моделирование схемы КГИ на микромощных оптронах 249КП1С с ВП6, ВП7 которое подтвердило правомерность принятого подхода в следующем диапазоне: частоты переключения схем ОИ охватили нижнюю, среднюю части УВЧ диапазона (до 1,5 ГГц, ток потребления 120...80 мА, соответственно); часть данных представлена в публикациях автора и его коллег [15,16].



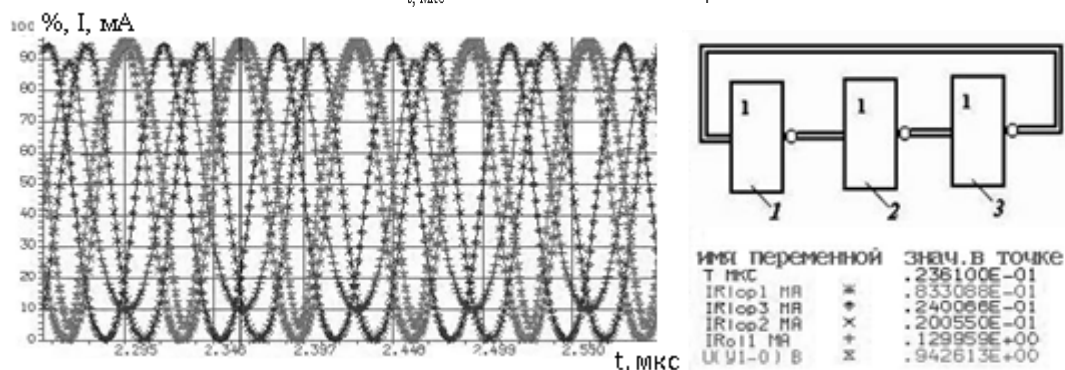
а



б



в



г

Рис.4 Графики моделирования тестовой схемы КГИ на трех инверторах и оптронах, а также их параметры: а - 249КП1С ($I_{CD \text{ макс.}} \sim 1,4\text{mA}$, $f_r \sim 8\text{кГц}$); б - 249КП1С ВПЗ ($I_{CD \text{ макс.}} \sim 0,180\text{mA}$, $f_r \sim 3\text{МГц}$); в - 249КП1С ВП4 ($I_{CD \text{ макс.}} \sim 0,180\text{mA}$, $f_r \sim 8\text{МГц}$); г - 249КП1С ВП5 ($I_{CD \text{ макс.}} \sim 0,08\text{mA}$, $f_r \sim 1,5\text{ГГц}$), где ВПЗ...5 означает «виртуальные параметры» 3-й, 4-й и 5-й моделей микро мощных оптопар, входящих в состав схемы КГИ на трех инверторах, обозначенных 1, 2 и 3 (а-г).

6. Модель оптрона с УФ на n-МОП транзисторе. В процессе исследований автором было предложено изменить УФ оптрона с биполярного на n-МОП Тр., создать и провести моделирование опытного оптрона такого типа: СД- ФД с УФ на n-МОП Тр.. Реализация мало- и микро мощных оптронов с УФ на n-МОП Тр. имеет существенные преимущества, главным из которых является реализация непосредственной коммутации каскадов со схемами n-МОП логики, которая является предпочтительной в современных цифровых устройствах (ЦУ), автоматах (ЦА) и микропроцессорной технике. В стандартной БМ МАЭС-П модель такого оптрона отсутствует. При создании автором и его коллегами модели указанного оптрона за основу была взята часть модели 249КП1С (СД-ФД), но УФ в виде n-p-n Тр. в ней был заменен на n-МОП (типа КП305: ММЭ имеется в БМ ПС МАЭС-П). Принятое обозначение n-МОП Тр., эквивалентная схема его модели, а также модели

оптрона СД-ФД с УФ на n-МОП Тр.(типа КП305) приведена на рис.5 а-в. Параметры переключения оптрона с n-МОП Тр. в схеме КГИ близки к графику переключения схемы КГИ на оптроне 249КП1С по рис.4а.

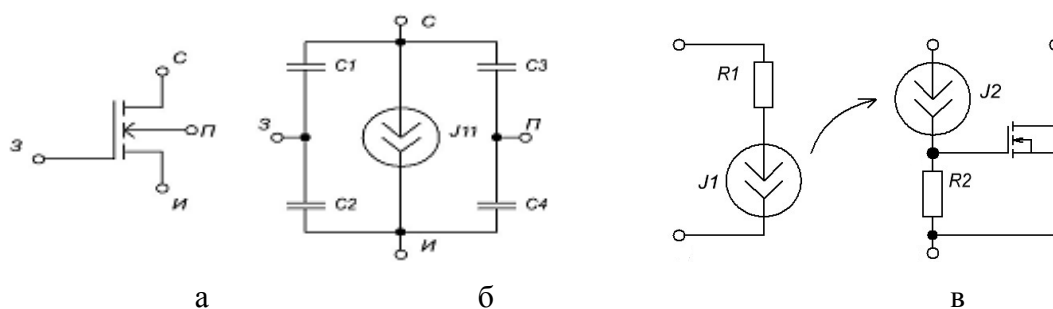


Рис.5 Обозначение (а) и модель (б) n- МОП транзистора; модель предложенного оптрона СД- ФД с УФ на n-МОП Тр. (в)

7. Обсуждения и выводы.

1. Результаты исследований и моделирования оптоэлектронных ММЭ, ММП (оптрон 249 КП1, схемы КГИ в мало- и микро мощных режимах) подтвердили адекватность представлений о разделении параметров ММЭ, ММП на геометрические, передаточные, физические и их комбинации. Описаны, опробованы и промоделированы мало- и микро мощные ММП (оптрон УВЧ диапазона типа СД- р-і-п ФД с УФ на ВЧ n-р-п Тр.), что указывает на решения поставленных задач для достижение цели исследований.

2. Полученные результаты исследований моделей и схем ОПЛЭ на микро мощных оптронах ВЧ, ОВЧ и УВЧ диапазонов, параметры их переключений указывают на перспективность предложенных автором подходов в достижении параметров переключения известных типов электронной логики.

3. Предложена ММП оптрона типа СД- р-і-п ФД с n-МОП Тр., исследованы некоторые ее переключательные характеристики в маломощном режиме в.

4. В качестве инструмента исследования применена отечественная среда моделирования ПС МАЭС-П, включающая в себя десятки открытых ММП аналоговых и цифровых схем, которые могут быть дополнены новыми ММП (в т.ч. с расчетными параметрами).

Описания ММЭ, ММП указанных мало-, микро мощных оптронов ВЧ,ОВЧ,УВЧ диапазонов и маломощного оптрона с УФ на n-МОП Тр. и схем КГИ могут быть предоставлены автором по отдельным запросам заинтересованных лиц и организаций.

5. Список литературы.

1. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Модель>. Режим доступа: свободный.-Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
2. http://ru.wikipedia.org/wiki/Система_автоматизированного_проектирования. Режим доступа: свободный.-Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
3. *Разевиг В.Д.* Система проектирования OrCAD 9.2, СОЛОН-Р, - М.: 2001.- 520 с.
4. *Ю.И Болотовский, Г.И.Таназлы.* OrCAD. Моделирование. «Поваренная книга».-М: СОЛОН-Пресс. 2005-200 с.
5. <http://electronix.ru/forum/index.php?showtopic=106716>, свободный.-Загл. с экрана. Яз. рус.
6. *А.В. Переверзев, А.К. Тимовский.* Применение программы МАЭС-П для моделирования устройств промэлектроники. -Запорожье: ЗГИА, 1997. - 100 с.
7. *Піза Д.М., Тімовський А.К., Лугін О.І.* Застосування програми МАЕС-П для моделювання радіоелектронних пристроїв. Навч. посібник.-Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. -133 с.
8. <http://macspoon.ru/apple/light-peak/> Режим доступа: свободный.-Загл. с экрана. Яз. рус.
9. <http://technosci.net/news/2011-12-03-3479> Режим доступа: свободный.-Загл. с экрана. Яз. рус.
10. <http://konspektiruem.ru/news/Cherez-shest-let-razvitie-sovremennoi-mikroelektroniki-zaidet-v-tupik-buduwee-kompjuterov-lezhit-v-fotonike-opticheskoj-peredache-dannyh/> Режим доступа: свободный.-Загл. с экрана. Яз. рус.

11. А.К. Гребнев, В.Н. Гридин, В.П. Дмитриев. Оптоэлектронные элементы и устройства. - М.: Радио и связь, 1998.- 336 с.
12. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. Справочник: В 5т./ РадиоСофт.- М., 2000 - 2003. - Т.1- 512 с.
13. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника.- М.: Радио и связь, 1989.- 360 с.
14. В.П. Кожемяко, Л.И. Тимченко, Г.Л. Лысенко, Ю.Ф. Кутаев. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники. - К.: УМК ВО, 1990.- 251 с.
15. Прокурин Н.П., Грушко С.С. Моделирование оптоэлектронного инвертора на модели микромошной оптопары УВЧ диапазона для оптических интерфейсов цифровых автоматов. Ж. Системи обробки інформації, №3(93), Харків 2011, с.72-75.
16. Прокурин М.П. Оптичні інтерфейси цифрових інтегральних схем на Si підкладках. Науковий вісник Чернівецького університету, Т.4, випуск 4, 2013, с.125-130.

Spisok literatury

1. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Model>. Rezhim dostupa: svobodnyj.-Zagl. s ekrana. Jaz. rus., angl.
2. http://ru.wikipedia.org/wiki/Sistema_avtomatizirovannogo_projektirovanija. Rezhim dostupa: Zagl. s ekrana. Jaz. rus., angl.
3. Razevig V.D. Sistema proektirovanija OrCAD 9.2, SOLON-R, - М.: 2001.- 520 s. (rus.)
4. Ju.I Bolotovskij, G.I.Tanzly. OrCAD. Modelirovanie. «Povarennaja kniga».-M: SOLON-Press. 2005-200s. (rus.)
5. <http://electronix.ru/forum/index.php?showtopic=106716> Rezhim dostupa: svobodnyj.-Zagl. s ekrana. Jaz. rus..
6. A.V. Pereverzev, A.K. Timovskij. Primenenie programmy MAJeS-P dlja modelirovanija ustrojstv promjelektroniki. -Zaporozh'e: ZGIA, 1997. - 100 s. (rus.)
7. Piza D.M., Timovs'kij A.K., Lugin O.I. Zastosuvannja programi MAES-P dlja modeljuvannja radioelektronnih pristroiv. Navch. posibnik.-Zaporizhzhja: ZNTU, 2003. -133 s.(ukr.)
8. <http://macspoon.ru/apple/light-peak/> Rezhim dostupa svobodnyj.-Zagl. s ekrana. Jaz. rus.
9. <http://technosci.net/news/2011-12-03-3479> Rezhim dostupa svobodnyj.-Zagl. s ekrana. Jaz. rus.
10. <http://konspektiruem.ru/news/Cherez-shest-let-razvitie-sovremennoi-mikroelektroniki-zaidet-v-tupik-buduwee-kompjuterov-lezhit-v-fotonike-opticheskoi-peredache-dannyh/> Rezhim dostupa svobodnyj.-Zagl. s ekrana. Jaz. rus.
11. А.К. Гребнев, В.Н. Гридин, В.П. Дмитриев. Оптоэлектронные элементы и устройства. - М.: Радио и связь, 1998.- 336 с. (rus.)
12. Jushin A.M. Optojelektronnye pribory i ih zarubezhnye analogi. Spravochnik: V 5t./ RadioSoft.- М., 2000 - 2003. - Т.1- 512 s. (rus.)
13. Nosov Ju.R. Optojelektronika.- М.: Радио и связь, 1989.- 360 s. (rus.)
14. V.P. Kozhemjako, L.I. Timchenko, G.L. Lysenko, Ju.F. Kutaev. Funkcional'nye jelementy i ustrojstva optojelektroniki. - К.: УМК ВО, 1990.- 251s. (rus.)
15. Proskurin N.P., Grushko S.S. Modelirovanie optojelektronnogo invertora na modeli mikro-moshhnoj optopary UVCh diapazona dlja opticheskikh interfejsov cifrovyyh avtomatov. Zh. Sistemi obrobki informacii, №3(93), Harkiv 2011, s.72-75. (rus.)
16. Proskurin M.P. Optichni interfeysi tsifrovih integralnih cshem na Si pidkladkah. Naukoviy visnyk Cherniveckogo universitetu, Т.4, випуск 4, 2013, s.125-130.