

**На правах рукописи**

**Рахматов Бадурдин Амируллоевич**

**РАЗРАБОТКА «ВНЕШНЕЙ» КОМПАКТНОЙ МОДЕЛИ  
ОРГАНИЧЕСКОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УЧЁТОМ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ**

**Специальность: 1.3.8 – Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук**

**Душанбе-2021**

Работа выполнена на кафедре экспериментальной и теоретической физики ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева».

**Научный руководитель:** **Турин Валентин Олегович**- кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной и теоретической физики ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С.Тургенева».

**Официальные оппоненты:** **Попов Виктор Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Национального исследовательского ядерного университета (НИЯУ) «МИФИ», Москва.

**Кадыров Абдулахат Лакимович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники Худжандского государственного университета им. академика Б.Гафурова.

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита состоится « **22** » **февраля 2022 г. в 13:00 часов** на заседании объединенного диссертационного совета 99.0.057.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Таджикском национальном университете по адресу: 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, факс (992-372) 21-77-11. Зал заседаний Диссертационного совета ТНУ.

Отзывы направлять по адресу; 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, ТНУ, диссертационный совет 99.0.057.02, E.mail: [tgnu@mail.tj](mailto:tgnu@mail.tj).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Таджикского национального университета ([www.tnu.tj](http://www.tnu.tj)).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь объединенного диссертационного совета 99.0.057.02, кандидат физ.-мат. наук, СИС

Табаров С.Х.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Органическая электроника является сравнительно молодым направлением в науке и технике и направлена на разработку электронных устройств на основе органических материалов. Органические материалы обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными монокристаллическими, поликристаллическими и аморфными материалами. Они могут быть гибкими, растяжимыми, дешевыми, биоразлагаемыми, легко наносятся на большие площади, обеспечивают более простые технологии изготовления и практически комнатные температуры технологического процесса. Основные преимущества органической электроники в сравнении с традиционной, заключаются в меньшей стоимости изготовления устройств, в их гибкости, в применении более простых технологий изготовления, в простоте утилизации, а также в возможности изготовления изделий большой площади. Считается, что устройства органической электроники можно будет создавать методами, развитыми в полиграфической промышленности, используя оборудование для трафаретной печати, флексографии, ротогравюрной и офсетной печати, а также струйные принтеры. Органическая электроника вряд ли повсеместно заменит традиционную электронику на основе моно- и поликристаллических, а также аморфных полупроводников, но обязательно займёт свою нишу, где будет более практична и рентабельна. Основные устройства органической электроники - солнечные батареи, светодиоды и органические полевые транзисторы (ОПТ).

Для эффективного проектирования интегральных схем на основе ОПТ актуальной является разработка современной компактной модели органического полевого транзистора. Основной областью применения компактных моделей является ускоренная разработка интегральных схем и печатных плат на основе результатов моделирования. Такой переход от прототипирования к моделированию позволяет существенно сократить потребность в производстве опытных партий изделий, оптимизировать выбор электронных компонентов, соответственно, существенно ускорить и удешевить разработки.

**Степень научной разработанности.** В своем развитии компактные модели органических полевых транзисторов сейчас проходят те же этапы, которые когда-то прошли и компактные модели традиционных МОП-транзисторов. Соответственно, на современном этапе, при разработке компактных моделей ОПТ, важно своевременно учитывать последние достижения в разработке компактных моделей МОП-транзисторов. Современные компактные модели должны корректно учитывать

дифференциальную проводимость в режиме насыщения, возникающую из-за короткоканальных эффектов, что обеспечивается применением корректной функции сглаживания; быть «внешними», т. е. аналитически учитывать сопротивление истока и стока; иметь правильную асимптотику зависимости тока стока от напряжения сток-исток при напряжениях, существенно превышающих напряжение насыщения и т. д.

**Объект исследования.** Объектом исследования является органический полевой транзистор (ОПТ).

**Предмет исследования.** Предметом исследования является компактная модель органического полевого транзистора.

**Цель исследования.** Целью исследования является разработка компактной модели органического полевого транзистора с корректным учётом дифференциальной проводимости в режиме насыщения и с аналитическим учётом контактных сопротивлений.

**Задачи исследования.** Достижение цели обеспечено решением следующих задач:

1. Провести информационный поиск отечественной и зарубежной научной литературы по тематике исследования.

2. Применить для компактного моделирования надпорогового тока стока «внутреннего» (без аналитического учёта сопротивлений истока и стока) ОПТ улучшенную сглаживающую функцию, основанную на степенном усреднении (известном как усреднение по Гёльдеру или как усреднение по Минковскому), что обеспечит монотонное убывание дифференциальной проводимости от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

3. Разработать общий подход для теоретического преобразования уравнения для тока стока «внутреннего» ОПТ в линейном режиме в уравнение для «внешнего» ОПТ. На основе полученного уравнения разработать аппроксимации, которые могут быть использованы при компактном моделировании «внешнего» ОПТ. Для верификации аппроксимаций разработать подход к численному решению полученного уравнения для тока стока «внешнего» ОПТ.

4. Разработать общий подход для теоретического преобразования уравнений для тока насыщения и напряжения насыщения «внутреннего» ОПТ в уравнения для тока насыщения и напряжения насыщения «внешнего» ОПТ. На основе полученных уравнений разработать аппроксимации, которые могут быть использованы при компактном моделировании «внешнего» ОПТ. Разработать подход к численному решению полученного уравнения для верификации аппроксимаций.

5. Разработать общий подход для теоретического преобразования линейной аппроксимации для тока стока «внутреннего» ОПТ в режиме насыщения, с учётом ненулевой дифференциальной проводимости, в уравнение для «внешнего» ОПТ. Рассчитать выходное дифференциальное сопротивление «внешнего» ОПТ в «точке насыщения». На основе этого расчёта разработать линейную аппроксимацию для зависимости тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в окрестности «точки насыщения». Разработать подход к численному решению полученного уравнения для «внешнего» ОПТ для верификации полученной аппроксимации.

6. Применить для компактного моделирования надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ улучшенную сглаживающую функцию, основанную на степенном усреднении линейных аппроксимаций для тока стока «внешнего» ОПТ в линейном режиме и в режиме насыщения.

7. Изучить асимптотику неявного нелинейного уравнения для тока стока в зависимости от «внешнего» напряжения сток-исток для режима насыщения с учётом ненулевой дифференциальной проводимости для «внешнего» ОПТ при росте «внешнего» напряжения сток-исток. Построить аппроксимацию для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток, пригодную для компактного моделирования в случае сильного превышения «внешним» напряжением сток-исток значения «внешнего» напряжения насыщения.

**Методология и методы исследования.** В надпороговом режиме работы «внутреннего» ОПТ выделяют два основных режима - линейный режим и режим насыщения. Оба режима, как правило, описываются линейной аппроксимацией зависимости тока стока от «внутреннего» напряжения сток-исток. Для получения уравнения для линейного режима «внешнего» ОПТ в литературе предлагается метод линеаризации, приводящий к известной линейной аппроксимации зависимости тока стока ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток. Мы развиваем этот метод и разрабатываем семейство нелинейных аппроксимаций для линейного режима «внешнего» ОПТ. Далее мы разрабатываем семейство аппроксимационных формул, пригодных для использования при компактном моделировании, для тока насыщения «внешнего» ОПТ в зависимости от «внешнего» напряжения затвор-исток, основанных на линеаризации и приближенном решении неявного нелинейного уравнения для тока насыщения «внешнего» ОПТ. (Отметим, что для «внешнего» МОП-транзистора точная расчётная формула для тока насыщения получается решением квадратного уравнения). Кроме этого, мы используем такие численные методы, как метод итераций и

бисекции, для решения неявного нелинейного уравнения для тока насыщения «внешнего» ОПТ. Это необходимо для верификации ранее полученных аппроксимационных формул. Численная реализация задачи осуществлялась на языке BASIC в виде скриптовых функций в электронной таблице LibreOffice Calc (свободное матобеспечение).

**Теоретическая значимость работы.** Разработанные модели в диссертационной работе могут быть использованы в учебниках и лекционных курсах по физике полупроводниковых приборов, а также в виде программных модулей в современных электронных САПР.

**Практическая значимость работы.** Компактная модель ОПТ необходима для эффективного проектирования электронных схем органической электроники и для теоретического анализа характеристик ОПТ. Отдельным направлением использования компактной модели ОПТ является экстракция параметров ОПТ и органических полупроводников на основе экспериментальных данных.

**Научная новизна работы** состоит в том, что:

1. Разработана новая «улучшенная» компактная модель для тока стока «внутреннего» ОПТ в надпороговом режиме работы, которая обеспечивает корректный учет дифференциальной проводимости при монотонном ее убывании от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения. Все разработанные формулы в диссертационной работе верифицированы использованием численного метода.

2. Разработаны новые аппроксимационные формулы для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ в линейном режиме от «внешнего» напряжения сток-исток, основанные на линеаризации и приближенном решении уравнения для тока стока «внешнего» ОПТ, полученные преобразованием «внутреннего» уравнения во «внешнее».

3. Разработано семейство новых аппроксимационных формул для тока насыщения «внешнего» ОПТ в зависимости от «внешнего» напряжения затвор-исток, основанных на линеаризации и приближенном решении уравнения для тока насыщения «внешнего» ОПТ, которые могут быть использованы при компактном моделировании.

4. Выведено новое уравнение для выходного дифференциального сопротивления «внешнего» ОПТ в «точке насыщения». На основе полученного уравнения разработана линейная аппроксимация для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в окрестности «точки насыщения», пригодная для компактного моделирования.

5. На основе известной линейной аппроксимации для линейного режима и разработанной линейной аппроксимации для режима насыщения «внешнего» ОПТ, разработана новая «улучшенная» компактная модель для тока стока «внешнего» ОПТ в надпороговом режиме работы, которая обеспечивает корректный учет дифференциальной проводимости при монотонном ее убывании от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

6. На основе изучения асимптотики неявного нелинейного уравнения для тока стока в зависимости от «внешнего» напряжения сток-исток для режима насыщения с учётом ненулевой дифференциальной проводимости для «внешнего» ОПТ при росте «внешнего» напряжения сток-исток было получено новое нелинейное уравнение асимптотики зависимости тока стока от «внешнего» напряжения сток-исток и новое уравнение для предельного асимптотического значения тока стока.

7. На основе изучения асимптотики неявного нелинейного уравнения для тока стока построена новая нелинейная аппроксимация для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток с выходом на предельное асимптотическое значения тока стока. Для участка трансформации от линейной аппроксимации в окрестности «точки насыщения» до нелинейной аппроксимации, обеспечивающей выход на предельное асимптотическое значение тока стока, предложена новая линейная аппроксимация.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Использование «улучшенной» сглаживающей функции для моделирования тока стока «внутреннего» ОПТ в надпороговом режиме работы обеспечивает корректный учет дифференциальной проводимости, то есть монотонное её убывание от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

2. Для «внешнего» ОПТ в линейном режиме разработаны новые аппроксимационные формулы для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток, основанные на линеаризации и приближенном решении уравнения, получающегося при преобразовании «внутреннего» уравнения для линейного режима во «внешнее» уравнение. Эти формулы могут быть использованы при компактном моделировании.

3. Разработано семейство новых аппроксимационных формул для тока насыщения «внешнего» ОПТ в зависимости от «внешнего» напряжения затвор-исток, основанных на линеаризации и приближенном решении

уравнения для тока насыщения «внешнего» ОПТ, полученного преобразованием «внутреннего» уравнения во «внешнее».

4. Выведено уравнение для выходного дифференциального сопротивления «внешнего» ОПТ в «точке насыщения». На основе полученного уравнения разработана линейная аппроксимация для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в окрестности «точки насыщения».

5. На основе известной линейной аппроксимации для линейного режима «внешнего» ОПТ и разработанной линейной аппроксимации для режима насыщения «внешнего» ОПТ, разработана новая «улучшенная» компактная модель для тока стока «внешнего» ОПТ в надпороговом режиме работы, которая обеспечивает корректный учет дифференциальной проводимости, то есть её монотонное убывание от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

6. На основе изучения асимптотики неявного нелинейного уравнения для тока стока в зависимости от «внешнего» напряжения сток-исток для режима насыщения с учётом ненулевой дифференциальной проводимости для «внешнего» ОПТ при росте «внешнего» напряжения сток-исток получено приближенное явное нелинейное уравнение асимптотики для тока стока в зависимости от «внешнего» напряжения сток-исток и уравнение для предельного асимптотического значения тока стока.

7. Предложена линейная аппроксимация для зависимости тока стока ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток для участка трансформации от линейной аппроксимации в окрестности «точки насыщения» до участка нелинейной аппроксимации, обеспечивающей выход на предельное асимптотическое значение тока стока.

**Достоверность результатов** обеспечивается верификацией разработанных аппроксимационных формул, полученных линеаризацией, как правило, неявных нелинейных уравнений, решением этих уравнений численным методом (методом итераций, методом бисекции).

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на: XIV международной научно – практической интернет – конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (Орел, Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, 15 марта – 30 июня 2016); II международной научно-практической конференции «Современные проблемы физико-математических наук» (Орёл, 24 – 27 ноября 2016); III международной научно-практической конференции «Современные проблемы физико-математических наук» (Орёл, 23 – 26 ноября 2017); IV Всероссийской научно-практической конференции с международным

участием «Современные проблемы физико-математических наук» (Орёл, 22 – 25 ноября 2018); 1<sup>st</sup> International Telecommunication Conference «Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems and Technologies». 22–23 December 2015 (Moscow, Russia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering); 2nd International Telecommunication Conference «Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems and Technologies». 1–2 June 2017, Moscow, Russia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019 International Conference on Semiconductor Technology for Ultra Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors. ECS Transactions – 2019; республиканской научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава и сотрудников ТНУ, посвященной 5500-летию древнего Саразма, 700-летию выдающегося таджикского поэта Камола Худжанди и 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования 2020-2040 гг. (Душанбе, 2020); 18th MOS-AK Workshop as Virtual Educational Event at ESSDERC/ESSCIRC. Sept. 6, 2021. Grenoble, France. Modeling of Systems and Parameter Extraction Working Group.

**Публикации.** Основные результаты отражены в 9 научных публикациях, в том числе 4 из списка РИНЦ, и 3 в журналах, индексируемых международной библиографической и реферативной базой данных Scopus. Две публикации в журналах из перечня ВАК РФ.

**Личный вклад автора** заключается в поиске и анализе литературных данных, проведении теоретических исследований и компьютерных расчетов, разработке уравнений для компактного моделирования, верификации этих уравнений с использованием численных методов и подготовке материалов для докладов на конференциях и для научных публикаций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 129 страниц компьютерного набора и состоит из введения, четырех глав и основных заключений. Диссертация содержит 57 рисунка и 1 таблицу. Библиографический список состоит из 119 источников.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния по следующим пунктам паспорта специальности: по п. 2. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы; п. 5. Разработка математических моделей построения фазовых диаграмм состояния и прогнозирование изменения физических свойств конденсированных веществ в зависимости от внешних условий их нахождения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы и описана степень научной разработанности темы исследования, описаны объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи, описаны методология и методы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна и основные результаты исследования. Приведены сведения о степени достоверности исследования и апробации результатов в научных изданиях и материалах конференций.

**В первой главе** анализируется литература по органической электронике [1], компактному моделированию ОПТ, основанному, на современном этапе, на традиционных моделях MOSFET Level 1 и BSIM3/4, а также основы теории МОП-транзистора [2-5] и ОПТ [6-9] и теории истоковой деградации [10-12].

Органический полевой транзистор (Organic Field-Effect Transistor, OFET)-это полевой транзистор, использующий органический полупроводник в своем канале. Наиболее часто используемая геометрия ОПТ- это нижний затвор с верхними электродами стока и истока (рис. 1(a)). Эта геометрия аналогична тонкопленочному транзистору (TFT).

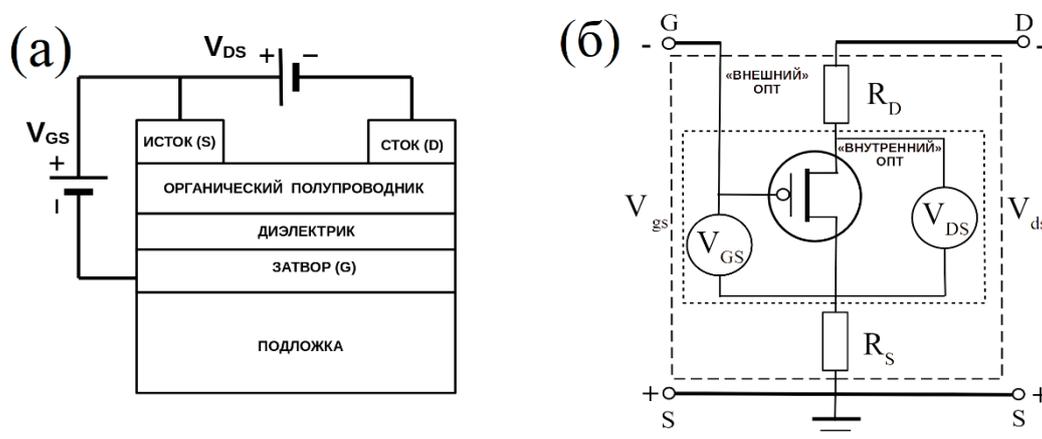


Рис. 1. Органический полевой транзистор p-типа: (а) - наиболее часто используемая геометрия ОПТ с нижним затвором и верхними электродами стока и истока; (б) - схема включения «внешнего» ОПТ с каналом p-типа для измерения выходных характеристик.

В табл. 1 приведены типовые параметры пентаценового ОПТ с каналом p-типа и его компактной модели [8], которые использовались при расчётах. В круглых скобках приведены гипотетические завышенные параметры, которые мы использовали при расчётах, чтобы более наглядно увидеть их влияние на результаты (это  $\lambda = 0,01 \text{ В}^{-1}$  и  $R_S = R_D = 1200 \text{ кОм}$ ).

Таблица 1

$\gamma$	$V_{th}$ , В	$\mu_{FET}$ ( $V_{GS} = -50$ В) $\text{см}^2 / \text{В}\cdot\text{с}$	$\alpha_S$	$R_T$ , кОм ( $R_S=R_D=R_T/2$ )	$m$	$\lambda$ , $\text{В}^{-1}$	$L$ , мкм	$W$ , мкм	$C_i$ , нФ/см <sup>2</sup>
0,91	-12	0,13	0,46	24 (2400)	1,8	$1,2 \cdot 10^{-3}$ (0,01)	40	1000	3,3

При малых напряжениях сток-исток реализуется линейный режим, и ток стока ОПТ линейно зависит от этого напряжения:

$$I_{LIN} = g_{CH} V_{DS}. \quad (1)$$

Проводимость канала определяется уравнением

$$g_{CH} = \frac{1}{R_{CH}} = \frac{\partial I_{LIN}}{\partial V_{DS}} = K \mu_{FET} V_{GT} = K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} V_{GT}^{\gamma+1}. \quad (2)$$

В уравнениях, для краткости, используется модуль централизованного напряжения на затворе

$$V_{GT} = |V_{GS} - V_{th}|. \quad (3)$$

Обозначения  $V_{GS}$  и  $V_{th}$  используются для напряжения затвор-исток и порогового напряжения, соответственно. С увеличением напряжения сток-исток ток стока переходит в насыщение. Напряжение и ток насыщения определяются уравнениями:

$$V_{SAT} = \alpha_S V_{GT}, \quad (4)$$

$$I_{SAT} = g_{CH} V_{SAT} = \alpha_S K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} V_{GT}^{\gamma+2}. \quad (5)$$

При компактном моделировании тока стока ОПТ в режиме насыщения с учётом ненулевой дифференциальной проводимости используются уравнения компактной модели MOSFET Level 1:

$$I_{ASY} = I_{SAT} \cdot (1 + \lambda V_{DS}) = I_{SAT} + g_{ASY} V_{DS}, \quad (6)$$

или BSIM3/4:

$$I_{ASY} = I_{SAT} \cdot (1 + \lambda(V_{DS} - V_{SAT})) = I_{SAT} + g_{ASY} \cdot (V_{DS} - V_{SAT}). \quad (7)$$

Также используется сглаживающая функция:

$$I = \frac{I_{LIN} I_{ASY}}{[I_{LIN}^m + I_{SAT}^m]^{1/m}}. \quad (8)$$

Анализ показывает, что уравнения (6), (7) и (8) определяют выходную проводимость недостаточно корректно, что является дефектом моделей MOSFET Level 1 и BSIM3/4.

В этом разделе предлагается новая «улучшенная» компактная модель для компактного моделирования надпорогового тока стока ОПТ (9, 10), которая основана на «улучшенной» функции сглаживания, и обеспечивает монотонное убывание выходной проводимости от максимального значения в

линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения [2, 3]:

$$I = \frac{I_{LIN} I_{ASY}^*}{[I_{LIN}^m + I_{ASY}^{*m}]^{1/m}}, \quad (9)$$

$$I_{ASY}^* = \frac{g_{CH}}{[g_{CH}^m - g_{ASY}^m]^{1/m}} \cdot I_{ASY}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлены результаты компактного моделирования с использованием традиционной (8) и улучшенной (9)-(10) сглаживающей функций. На всех рисунках нижняя кривая для напряжения на затворе  $V_{GS} = -30$  В, далее с шагом  $-5$  В до напряжения  $-50$  В; (а): уравнение (8) с асимптотикой (6); (б): уравнение (8) с асимптотикой (7); (в): уравнения (9)-(10) с асимптотикой (7); (а), (б) и (в):  $\lambda = 0,01 \text{ В}^{-1}$ ; (г):  $\lambda = 0 \text{ В}^{-1}$ . Новая сглаживающая функция (9)-(10) даёт монотонное убывание выходной проводимости ОПТ. На рис. 2(г) приведены результаты для значения  $\lambda = 0 \text{ В}^{-1}$ , где сглаживающие функции (8) и (9)-(10) дают одинаковый результат.

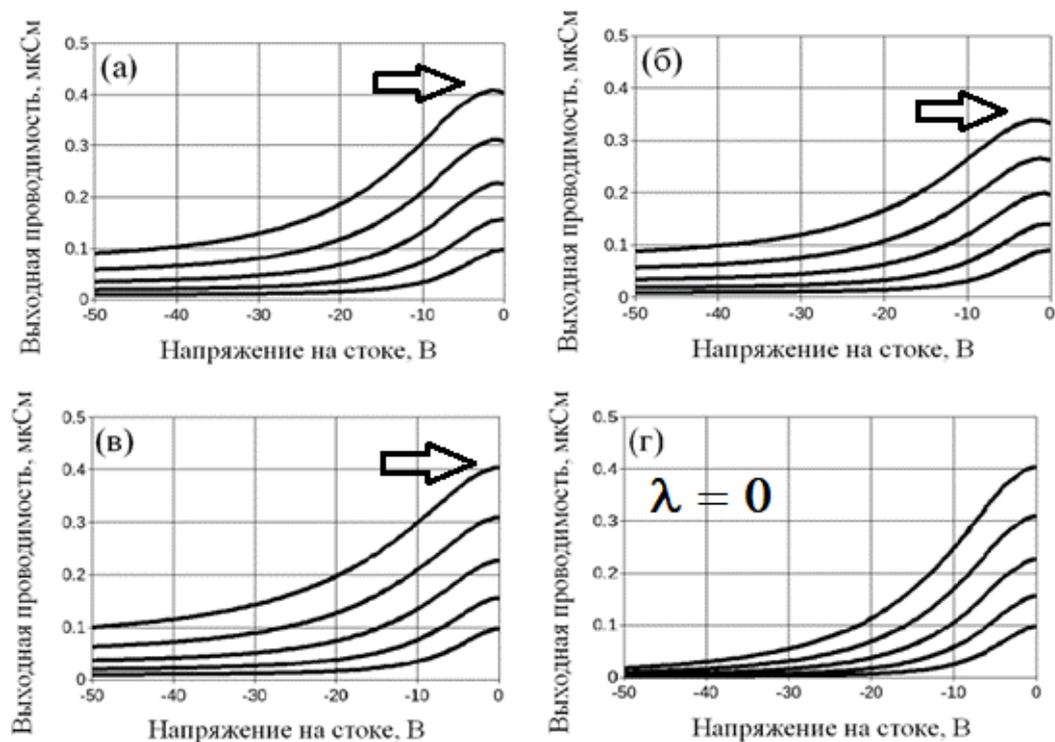


Рис. 2. Зависимости дифференциальной проводимости от напряжения стока для «внутреннего» ОПТ.

В современных компактных моделях ОПТ актуален учёт сопротивления контактов [13]. На рис. 1(б) представлен «внешний» ОПТ, представляющий из себя «внутренний» ОПТ с паразитным сопротивлением истока  $R_S$ , включенными последовательно с истоковым терминалом, и паразитным сопротивлением стока  $R_D$ , включенными последовательно со

стоковым терминалом. Между «внутренним» и «внешним» напряжениями на затворе и на стоке [14-15] выполняются соотношения:

$$V_{GT} = V_{gt} - IR_S, \quad (11)$$

$$V_{DS} = V_{ds} - IR_T. \quad (12)$$

Здесь суммарное сопротивление контактов в ОПТ  $R_T = R_S + R_D$ , а  $I$  – ток, текущий через транзистор.

Используя взаимосвязь между внутренними и внешними напряжениями на стоке, истоке и затворе, в работе был разработан общий подход для преобразования внутренней модели во «внешнюю». Получены итерационные уравнения, которые используются в качестве исходных данных для компактного моделирования.

**Во второй главе** рассматривается преобразование линейного режима работы «внутреннего» ОПТ во «внешний» случай. Получено уравнение для тока стока «внешнего» ОПТ в линейном режиме в неявной форме, которое может быть решено численно:

$$I_{lin} = K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} (V_{gt} - I_{lin} R_S)^{\gamma+1} \cdot (V_{ds} - I_{lin} R_T). \quad (13)$$

В современной литературе линейный режим во «внешнем» случае аппроксимируется линейной зависимостью тока стока от напряжения на стоке. При этом сопротивление контактов учитывается в уравнении для проводимости:

$$I_{lin 0} = g_{ch0} \cdot V_{ds} = \frac{g_{ch}(V_{gt})}{1 + R_T \cdot g_{ch}(V_{gt})} \cdot V_{ds}. \quad (14)$$

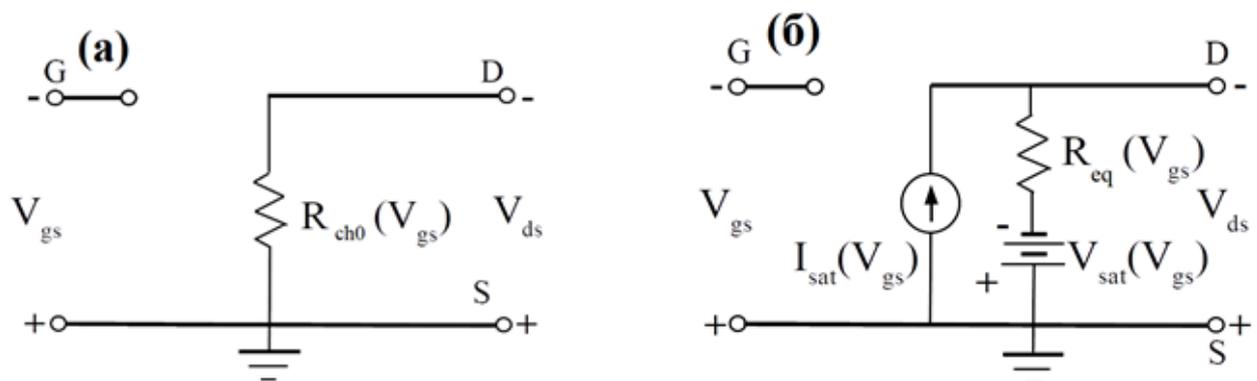


Рис. 3. Эквивалентная схема для «внешнего» ОПТ с p-каналом в линейном (омическом) режиме (а) и в режиме насыщения (б).

Отметим, что это уравнение верно только при малых значениях напряжения сток-исток и, соответственно, при малых значениях тока стока. В этом случае итоговое выходное сопротивление ОПТ тривиально складывается из последовательно соединенных сопротивлений контактов и канала ОПТ:

$$R_{cho} = \frac{1}{g_{cho}} = \frac{1}{g_{CH}(V_{gt})} + R_T = R_{CH} + R_T. \quad (15)$$

Эквивалентная схема для «внешнего» ОПТ с р-каналом в линейном (омическом) режиме представлена на рис. 3(а).

В работе также разработано простейшее нелинейное приближение для зависимости тока стока в линейном режиме от напряжения сток-исток с учетом сопротивления стока и истока, которое может быть использовано при компактном моделировании. Используя соотношение между внутренним и «внешним» напряжениями стока, истока, затвора и применяя разложение Тейлора, было получено уравнение:

$$I_{lin1} = \frac{g_{CH}(V_{gt})}{1 + g_{CH}(V_{gt}) \cdot R_T + \left. \frac{\partial g_{CH}}{\partial V_{GT}} \right|_{V_{gt}} \cdot R_S \cdot V_{ds}} \cdot V_{ds}. \quad (16)$$

Здесь

$$\left. \frac{\partial g_{CH}}{\partial V_{GT}} \right|_{V_{gt}} = K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} (\gamma + 1) V_{GT}^\gamma \Big|_{V_{gt}} = K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} (\gamma + 1) V_{gt}^\gamma = \frac{(\gamma + 1)}{V_{gt}} g_{CH}(V_{gt}).$$

Имеем:

$$I_{lin1} = \frac{g_{CH}(V_{gt})}{1 + g_{CH}(V_{gt}) \cdot (R_T + R_S \frac{\gamma+1}{V_{gt}} V_{ds})} \cdot V_{ds}. \quad (17)$$

$$r_{ch1}(V_{ds}) \approx \frac{1}{g_{ch1}} = R_{CH} + R_T + R_S \frac{\gamma+1}{V_{gt}} V_{ds}. \quad (18)$$

Получены уравнения для нелинейной зависимости «внешнего» напряжения стока и тока стока с использованием итерационного метода:

$$I_{lin, i+1} = \frac{g_{CH}(V_{gt} - I_{lin, i} \cdot R_S) \cdot V_{ds}}{1 + R_T \cdot g_{CH}(V_{gt} - I_{lin, i} \cdot R_S)}. \quad (19)$$

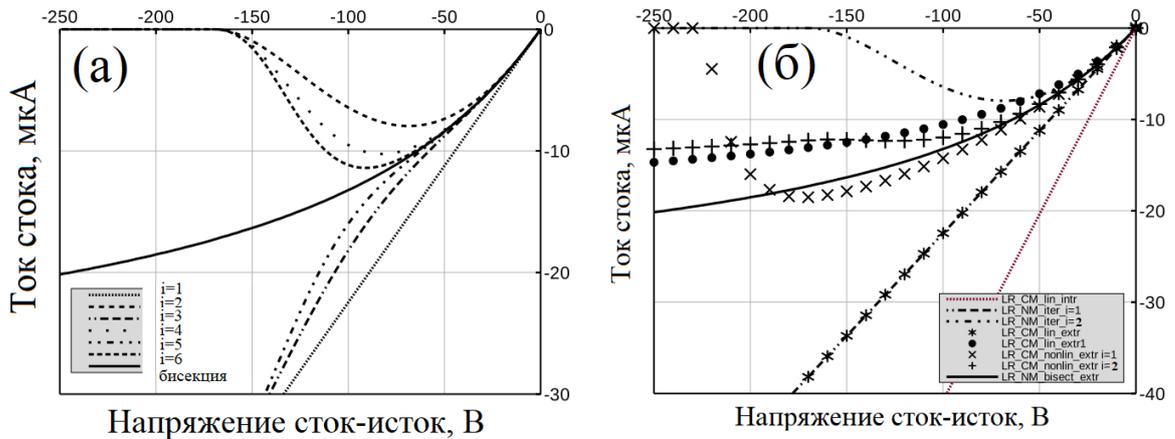


Рис. 4. Зависимости ток стока в линейном режиме от напряжения стока для ОПТ: (а) - сравнение метода итераций с результатом метода бисекции; (б) - сравнение всех компактных моделей линейного режима и моделирования методом бисекции.

Уравнения получены для различных чисел итераций (для нулевой итерации  $I_{lin, i=0} = 0$ ):

$$I_{lin, i=1} = I_{lin 0} = g_{ch0} \cdot V_{ds} = \frac{g_{CH}(V_{gt})}{1 + R_T \cdot g_{CH}(V_{gt})} \cdot V_{ds}, \quad (20)$$

$$I_{lin, i=2} = \frac{g_{CH}(V_{gt} - I_{lin, i=1} \cdot R_S) \cdot V_{ds}}{1 + R_T \cdot g_{CH}(V_{gt} - I_{lin, i=1} \cdot R_S)} = \frac{g_{CH}(V_{gt} - I_{lin 0} \cdot R_S) \cdot V_{ds}}{1 + R_T \cdot g_{CH}(V_{gt} - I_{lin 0} \cdot R_S)}. \quad (21)$$

На рис. 4(а) представлены зависимости ток стока в линейном режиме от напряжения стока для напряжения затвор-исток – 50В, для пентаценового ОПТ с общим сопротивлением 2,4 МОм. Сплошная линия для расчетов методом бисекции. Другие линии для метода итераций с разными числами итераций  $i = 1 \dots 5$ .

Нами получено квадратное уравнение, которое определяет  $I_{linCM}$  для компактного моделирования ОПТ в линейном режиме:

$$\left[ \frac{\partial g_{CH}}{\partial V_{GT}} \Big|_{V_{GT, i}} \cdot R_S \cdot R_T + \frac{\partial^2 g_{CH}}{\partial V_{GT}^2} \Big|_{V_{GT, i}} \cdot R_S^2 \cdot V_{DS, i} \right] \cdot (I_{linCM} - I_{lin, i})^2 - \left[ 1 + g_{CH}(V_{GT, i}) \cdot R_T + \frac{\partial g_{CH}}{\partial V_{GT}} \Big|_{V_{GT, i}} \cdot R_S \cdot V_{DS, i} \right] \cdot (I_{linCM} - I_{lin, i}) + g_{CH}(V_{GT, i}) \cdot V_{DS, i} - I_{lin, i} = 0. \quad (22)$$

Отсюда, мы можем найти выражения для коэффициентов квадратного уравнения:

$$a = \frac{\partial g_{CH}}{\partial V_{GT}} \Big|_{V_{GT, i}} \cdot R_S \cdot R_T + \frac{\partial^2 g_{CH}}{\partial V_{GT}^2} \Big|_{V_{GT, i}} \cdot R_S^2 \cdot V_{DS, i}$$

$$b = - \left[ 1 + g_{CH}(V_{GT, i}) \cdot R_T + \frac{\partial g_{CH}}{\partial V_{GT}} \Big|_{V_{GT, i}} \cdot R_S \cdot V_{DS, i} \right]$$

$$c = g_{CH}(V_{GT, i}) \cdot V_{DS, i} - I_{lin, i}$$

Решение квадратного уравнения дает «внешнее» нелинейное уравнение для тока стока в линейном режиме, полезное для компактного моделирования:

$$I_{linCM} = I_{lin, i} - \frac{b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{c}{a}}. \quad (23)$$

На рисунке 4(б) представлено сравнение всех компактных моделей линейного режима и моделирования методом бисекции. Зависимость тока стока в линейном режиме от напряжения стока на большом масштабе для напряжения затвор-исток – 50В, для пентаценового ОПТ с общим сопротивлением 2,4 МОм. Ультратонкая пунктирная линия – внутренняя модель (1)-(2); \* точки для компактной модели с учетом полного сопротивления в линейном режиме для линейного приближения (14)-(15);

кружки – простейшая нелинейная «внешняя» компактная модель для линейного режима (16)-(18); 2 точки 3 пунктирная линия для итераций с  $i = 1$  (20); 2 точки 1 пунктирная линия для итераций с  $i = 2$  (21); × точки предложенной нелинейной «внешней» компактной модели в линейном режиме (23) с результатом итерации с  $i = 0$  в качестве исходных данных; + точки предложенной нелинейной «внешней» компактной модели в линейном режиме (23) с результатом итерации с  $i = 1$  в качестве исходных данных. Сплошная линия для расчетов методом бисекции.

**В третьей главе** получено семейство аппроксимационных формул для тока насыщения «внешнего» ОПТ и для зависимости тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в режиме насыщения [7].

Используя соотношение между внутренним и внешним напряжениями стока, истока и затвора, из уравнения (5) получаем уравнение

$$I_{sat} = I_{SAT}(V_{gt} - I_{sat}R_S) = \alpha_S K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} (V_{gt} - I_{sat}R_S)^{\gamma+2}. \quad (24)$$

Это уравнение приводит к итерационной схеме:

$$I_{sat, i+1} = I_{SAT}(V_{gt} - I_{sat, i}R_S) = \alpha_S K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} (V_{gt} - I_{sat, i}R_S)^{\gamma+2}. \quad (25)$$

Для нулевой итерации полагаем  $I_{sat, i=0} = 0$ . Далее имеем:

$$I_{sat, i=1} = I_{SAT}(V_{gt}) = \alpha_S K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} (V_{gt})^{\gamma+2}, \quad (26)$$

$$I_{sat, i=2} = I_{SAT}(V_{gt} - I_{SAT}(V_{gt})R_S) = \alpha_S K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} (V_{gt} - I_{SAT}(V_{gt})R_S)^{\gamma+2}. \quad (27)$$

После преобразования уравнение (5), получаем семейство уравнений для компактного моделирования тока насыщения «внешнего» ОПТ с использованием в качестве начального значения ток насыщения, вычисленный за фиксированное число итераций:

$$I_{satCM} = \frac{I_{SAT}(V_{gt} - I_{sat, i}R_S) + g_{mSAT}(V_{gt} - I_{sat, i}R_S) \cdot I_{sat, i} \cdot R_S}{1 + g_{mSAT}(V_{gt} - I_{sat, i}R_S) \cdot R_S}. \quad (28)$$

Если мы используем в качестве начального значения  $I_{sat, i=0} = 0$ , то мы получим формулу для тока насыщения в «точке насыщения». Это простейшая формула для компактного моделирования:

$$I_{satCM0} = \frac{I_{SAT}(V_{gt})}{1 + g_{mSAT}(V_{gt}) \cdot R_S}. \quad (29)$$

Принимая за начальное значение  $I_{sat, i=1} = I_{SAT}(V_{gt}) = \alpha_S K \frac{\mu_0}{V_{aa}^\gamma} V_{gt}^{\gamma+2}$  и для  $I_{sat, i=2} = I_{SAT}(V_{gt} - I_{SAT}(V_{gt})R_S)$ , получаем более сложные формулы:

$$I_{satCM1} = \frac{I_{SAT}(V_{gt} - I_{sat, i=1}R_S) + g_{mSAT}(V_{gt} - I_{sat, i=1}R_S) \cdot I_{sat, i=1} \cdot R_S}{1 + g_{mSAT}(V_{gt} - I_{sat, i=1}R_S) \cdot R_S}, \quad (30)$$

$$I_{satCM2} = \frac{I_{SAT}(V_{gt} - I_{sat, i=2}R_S) + g_{mSAT}(V_{gt} - I_{sat, i=2}R_S) \cdot I_{sat, i=2} \cdot R_S}{1 + g_{mSAT}(V_{gt} - I_{sat, i=2}R_S) \cdot R_S}. \quad (31)$$

Получено уравнение «внешнего» напряжения насыщения (с учетом сопротивления стока и истока) вида

$$V_{sat} = \alpha_S V_{gt} + I_{sat} \cdot ((1 - \alpha_S)R_S + R_D). \quad (32)$$

На рис. 5 представлены зависимости тока насыщения от «внешнего» централизованного напряжения затвора и «внешнего» напряжения насыщения для различным моделей и методов расчёта. На рис. 5(а) и (б) представлены зависимости тока насыщения в зависимости от «внешнего» централизованного напряжения на затворе (а) и от напряжения насыщения (б), полученные ме-

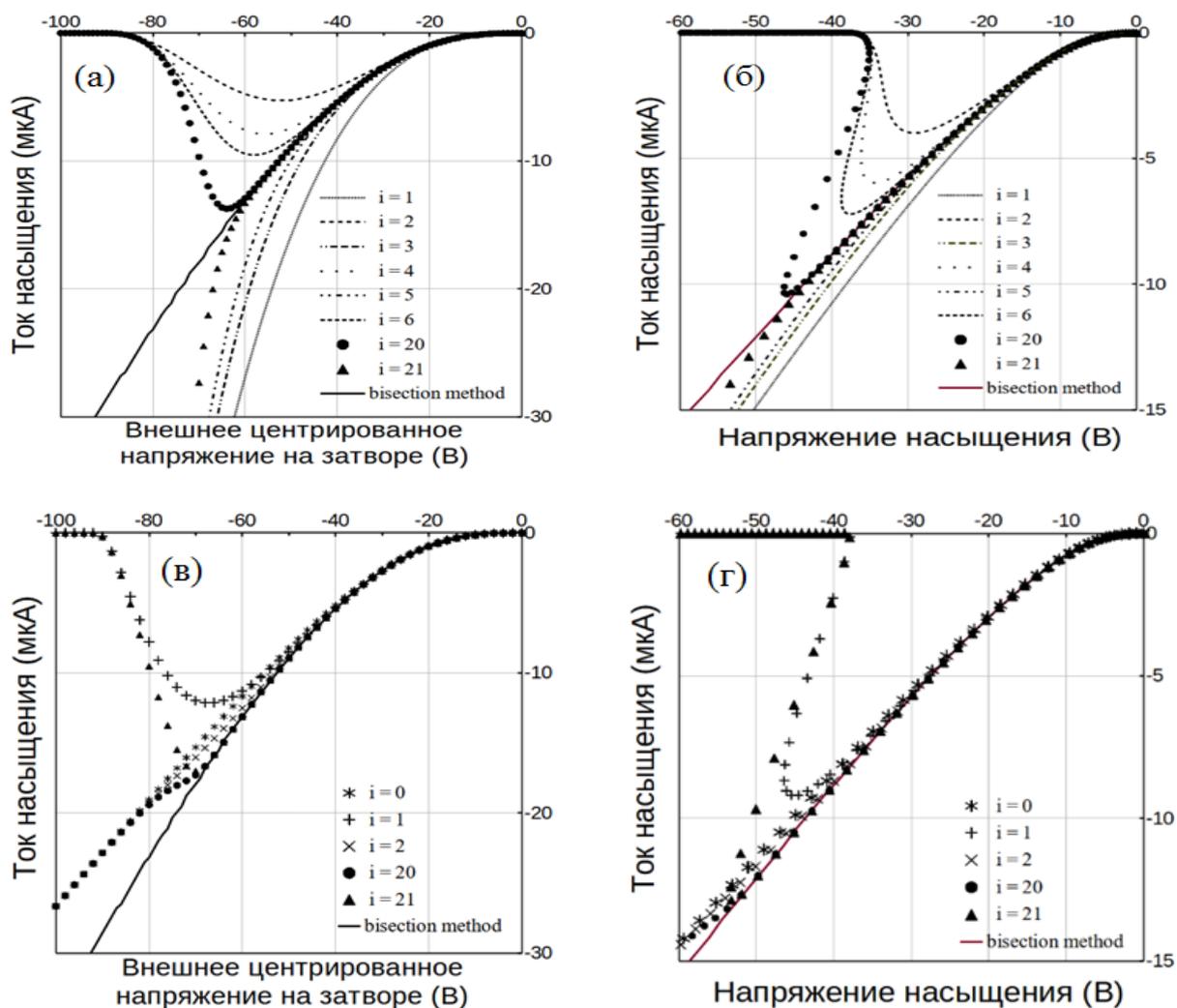


Рис. 5. Зависимости тока насыщения от «внешнего» централизованного напряжения на затворе  $V_{gt}$  и «внешнего» напряжения насыщения  $V_{sat}$  для различных моделей и методов расчёта.

тодом итераций при различном числе итераций ( $i = 1..6, 20, 21$ ) в сравнении с методом бисекции (сплошная линия). На рисунке 5(в) и (г) представлены зависимости тока насыщения в зависимости от «внешнего» централизованного напряжения на затворе (в) и от напряжения насыщения (г), полученные

компактным моделированием с начальным значением тока насыщения, полученным методом итераций с различным числом итераций ( $i = 0, 1, 2, 20, 21$ ) в сравнении с методом бисекции (сплошная линия). Наши расчеты показывают, что даже нулевая итерация  $i = 0$ , что соответствует нулевому начальному значению тока насыщения, взятая за начальную точку при компактном моделировании тока стока (уравнение (29)), дает приемлемую точность для достаточно большого диапазона напряжений на затворе и качественно верный вид зависимости тока насыщения от напряжения на затворе.

В работе разработаны уравнения для линейной аппроксимации зависимости тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток. Эта аппроксимация гарантировано проходит через «точку насыщения». При этом получено уравнение для дифференциальной проводимости с учетом сопротивлений стока и истока в «точке насыщения»:

$$I_{asy} = I_{sat} (1 + \lambda_{sat} (V_{ds} - V_{sat})) = I_{sat} + g_{sat} (V_{ds} - V_{sat}). \quad (33)$$

Представим уравнение для  $g_{sat}$  в удобной для анализа форме:

$$\frac{1}{g_{sat}} = \frac{1}{g_{ASY}} + R_D + \left(1 - b_{mSAT} + \frac{g_{mSAT}}{g_{ASY}}\right) \cdot R_S \quad (34)$$

или

$$\frac{1}{g_{sat}} = \frac{1}{\lambda I_{sat}} + R_D + \left(1 - \alpha_S + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\gamma + 2}{(V_{gt} - I_{sat} R_S)}\right) \cdot R_S. \quad (35)$$

Уравнение можно переписать в более привычной для теории истоковой деградации форме:

$$R_{eq} = R_S + R_D + r_0 + (g_{mSAT} r_0 - b_{mSAT}) R_S. \quad (36)$$

Здесь  $r_0 = 1/g_{ASY}$  выходное дифференциальное сопротивление «внутреннего» ОПТ, а  $R_{eq}$  это эквивалентное выходное сопротивление.

На рис. 3(б) приведена эквивалентная схема для «внешнего» ОПТ с р-каналом в режиме насыщения.

Изучено приближение для тока стока в режиме насыщения при высоких напряжениях на стоке. Получены формулы для асимптотического поведения тока стока и дифференциальной проводимости «внешнего» ОПТ в зависимости от «внешнего» напряжения на стоке.

Уравнение (37) определяет аппроксимацию для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток, пригодную для компактного моделирования в случае сильного превышения «внешним» напряжением сток-исток значения «внешнего» напряжения насыщения с выходом на предельное асимптотическое значение тока стока  $I_{lim}$ .

$$I_{nonlin} = I_{lim} \cdot \left( 1 - \left( \frac{I_{lim}}{I_{SAT}(V_{gt})} \cdot \frac{V_E}{V_{ds}} \right)^{\frac{1}{\gamma+2}} + \frac{1}{\gamma+2} \left( \frac{I_{lim}}{I_{SAT}(V_{gt})} \cdot \frac{V_E}{V_{ds}} \right)^{\frac{2}{\gamma+2}} \right), \quad (37)$$

$$g_{nonlin} = \frac{1}{\gamma+2} \cdot \frac{I_{lim}}{V_{ds}} \cdot \left( \frac{I_{lim}}{I_{SAT}(V_{gt})} \cdot \frac{V_E}{V_{ds}} \right)^{\frac{1}{\gamma+2}} \cdot \left( 1 - \frac{2}{\gamma+2} \cdot \left( \frac{I_{lim}}{I_{SAT}(V_{gt})} \cdot \frac{V_E}{V_{ds}} \right)^{\frac{1}{\gamma+2}} \right). \quad (38)$$

Для участка трансформации от линейной аппроксимации в окрестности «точки насыщения» (заканчивается в точке  $V_{ds}^*$  и  $I_d^*$ ) до нелинейной аппроксимации, обеспечивающей выход на предельное асимптотическое значения тока стока (начинается в точке  $V_{ds}^{**}$  и  $I_d^{**}$ ), предложена новая линейная аппроксимация:

$$I_{lin3} = I_d^{**} + g^{**}(V_{ds} - V_{ds}^{**}), \quad (39)$$

$$V_{ds}^{**} = \frac{(I_{lim} - I_{sat})}{g_{sat}} + V_{sat}, \quad (40)$$

$$I_d^{**} \cong I_{lim} \cdot \left( 1 - \left( \frac{I_{lim}}{I_{SAT}(V_{gt})} \cdot \frac{V_E}{V_{ds}^{**}} \right)^{\frac{1}{\gamma+2}} + \frac{1}{\gamma+2} \left( \frac{I_{lim}}{I_{SAT}(V_{gt})} \cdot \frac{V_E}{V_{ds}^{**}} \right)^{\frac{2}{\gamma+2}} \right), \quad (41)$$

$$V_{ds}^* = \frac{I_d^{**} - I_{sat} + g_{sat}V_{sat} - g^{**}V_{ds}^{**}}{g_{sat} - g^{**}}, \quad (42)$$

$$I_d^* = I_{sat} + g_{sat}(V_{ds}^* - V_{sat}), \quad (43)$$

$$V_{lim} = \frac{1}{g^{**}}(I_{lim} - I_d^{**}) + V_{ds}^{**}, \quad (44)$$

$$I_{lim} = V_{gt}/R_S. \quad (45)$$

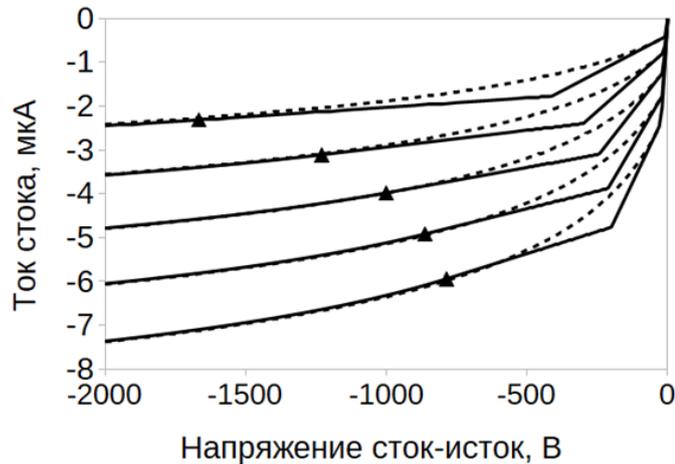


Рис. 6. Выходная характеристика «внешнего» ОПТ в кусочном приближении.

На рис. 6 представлены выходные характеристики «внешнего» ОПТ в кусочно-линейном приближении до напряжения  $V_{ds}^{**}$  (помечено треугольниками) с дальнейшим медленным выходом на уровень предельного тока по нелинейной аппроксимации (37). Пунктир – расчет с использованием

численного метода. Верхняя зависимость для напряжения затвор-исток – 30В, далее: - 35В, - 40В, - 45В, - 50В.

**В четвертой главе** разработана кусочно-линейная «внешняя» компактная модель для тока стока. Проанализирована компактная модель для тока стока ОПТ на основе традиционной сглаживающей функции:

$$I = \frac{I_{lin} I_{asy}}{(I_{lin}^m + I_{sat}^m)^{\frac{1}{m}}}. \quad (46)$$

Проанализирована компактная модель для тока стока ОПТ на основе новой улучшенной сглаживающей функции:

$$I = \frac{I_{lin} I_{asy}^*}{(I_{lin}^m + I_{asy}^{*m})^{\frac{1}{m}}}, \quad (47)$$

$$I_{asy}^* = \frac{g_{lin}}{(g_{lin}^m - g_{asy}^m)^{\frac{1}{m}}} I_{asy}. \quad (48)$$

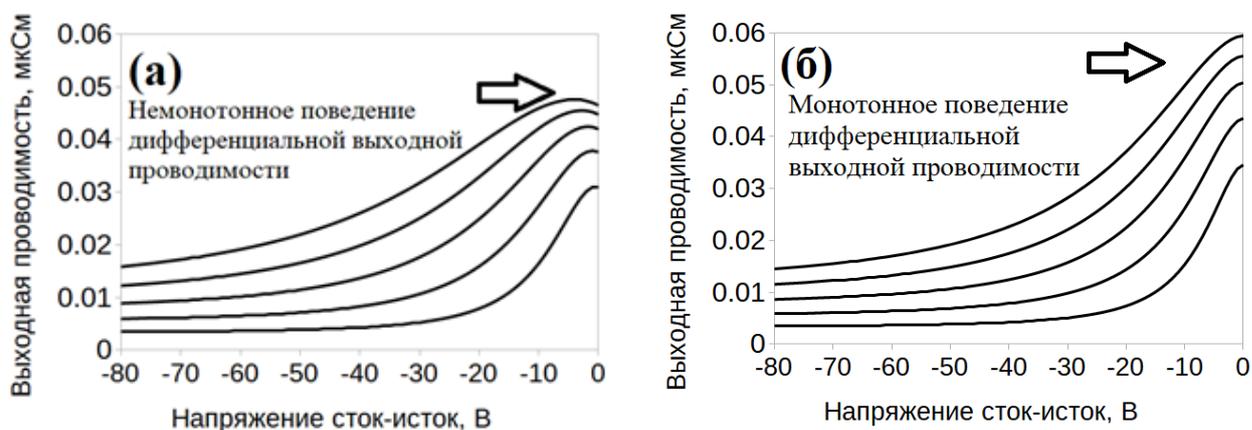


Рис. 7. Выходная проводимость «внешнего» ОПТ, рассчитанные с помощью традиционной (46), (а), и новой (б) сглаживающей функции (47, 48). Верхняя кривая для напряжения затвор-исток -30 В, далее: -35 В, -40 В, -45 В, -50 В.

Традиционная сглаживающая функция не обеспечивает монотонное убывание дифференциальной проводимости (рис. 7(а)). В то время как новая сглаживающая функция обеспечивает монотонное убывание дифференциальной проводимости (рис. 7(б)) «внешнего» ОПТ от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для компактного моделирования надпорогового тока стока «внутреннего» ОПТ была применена «улучшенная» сглаживающая функция, использующая степенное усреднение, ранее предложенная для «улучшенной» компактной модели «внутреннего» МОП-транзистора и обеспечивающая корректный учет выходной проводимости в режиме насыщения, т. е. её монотонное убывание от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

2. Получены аппроксимационные формулы для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в линейном режиме, полученные преобразованием «внутреннего» уравнения для линейного режима, которые могут быть использованы при компактном моделировании.

3. Получены аппроксимационные формулы для тока насыщения «внешнего» ОПТ в зависимости от «внешнего» напряжения затвор-исток, основанные на линеаризации и приближенном решении уравнения для тока насыщения «внешнего» ОПТ, полученного преобразованием «внутреннего» уравнения, которые могут быть использованы при компактном моделировании. Полученные аппроксимации верифицированы применением численного метода.

4. Выведено уравнение для выходного дифференциальное сопротивление «внешнего» ОПТ в «точке насыщения». На основе полученного уравнения для выходного дифференциального сопротивление «внешнего» ОПТ в «точке насыщения» разработана линейная аппроксимация для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток в окрестности «точки насыщения».

5. Для компактного моделирования надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ, включая линейный режим и режим насыщения с учётом ненулевой дифференциальной проводимости, применена улучшенная сглаживающая функция, обеспечивающая корректный учет выходной проводимости в режиме насыщения, т. е. её монотонное убывание от максимального значения в линейном режиме до минимального значения в режиме насыщения.

6. Построена аппроксимация для зависимости надпорогового тока стока «внешнего» ОПТ от «внешнего» напряжения сток-исток, пригодная для компактного моделирования в случае сильного превышения «внешним» напряжением сток-исток значения «внешнего» напряжения насыщения. Перспективным является учёт в компактной модели подпорогового тока [8,

16], эффекта подложки и реализация разработанной модели в виде Verilog-A модуля для практического применения в современных электронных САПР при моделировании схем на основе ОПТ.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Турин В.О., Рахматов Б.А., Шкарлат Р.С., Зебрев Г.И., Ким Ч.-Х., Инигез Б., Шур М.С. Кусочная аппроксимация выходной характеристики «внешнего» органического полевого транзистора с учётом ненулевой дифференциальной проводимости в режиме насыщения и эффекта ограничения тока стока из-за истоковой деградации. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2019. –Т. 9. –№ 2. - С. 137-157.
2. Рахматов Б.А., Турин В.О., Зебрев Г.И., Ким Ч.Х., Инигез Б., Шур М.С. Компактная модель для тока стока «внешнего» органического полевого транзистора на основе новой сглаживающей функции, обеспечивающей монотонное убывание дифференциальной проводимости. // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2020. – №3. – С. 146-155.
3. V.O. Turin, B.A. Rakhmatov, C.-H. Kim, B. Iñiguez. An approach to organic field-effect transistor above-threshold drains current compact modeling that provides monotonic decrease of the output conductance with drain bias increasing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016. - Vol. 151, No. 1, P. 1–5.
4. V.O. Turin, B.A. Rakhmatov, G.I. Zebrev, C.-H. Kim, B. Iñiguez, M.S. Shur. Modelling of saturation current of an organic field-effect transistor with accounting for contact resistances // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.- 2019. - Vol. 498, No. 012038, P. 1-5.
5. V.O. Turin, R.S. Shkarlat, B.A. Rakhmatov, G.I. Zebrev, C.-H. Kim, B. Iñiguez, and M.S. Shur. A Piecewise Approximation for Short-Channel “Extrinsic” MOSFET Drain Current Dependence on Drain-to-Source Bias Including Linear Triode, Linear Saturation and Asymptotic Saturation Regimes. // ECS Transactions. - 2019. - Vol. 90, No. 1, P. 101-112.
6. В.О. Турин, Б.А. Рахматов, Ч. Х. Ким, Б. Инигез. Компактное моделирование тока стока органического полевого транзистора с корректным учетом ненулевой выходной проводимости в режиме насыщения. // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: материалы XIV международной научно-практической интернет-конференции, 15 марта – 30 июня 2016 г., г. Орел / под ред. О. В. Пилипенко [и др.]. – Орел: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева.-2016.- С. 239-242.
7. В.О. Турин, Б.А. Рахматов, Г.И. Зебрев, Б. Инигез, М. С. Шур. Учет сопротивлений истока и стока в режиме насыщения при моделировании надпорогового тока в «улучшенной» компактной модели органического

полевого транзистора. // Современные проблемы физико-математических наук. Материалы II международной научно-практической конференции. 24 – 27 ноября 2016 г., Орел. — 2016. — С. 135–51.

8. В.О. Турин, Б.А. Рахматов, Г.И. Зебрев, Ч.-Х. Ким, Б. Инигез, М.С. Шур. Моделирование тока насыщения органического полевого транзистора с учётом контактных сопротивлений. // Современные проблемы физико-математических наук. Материалы III международной научно-практической конференции. 23-26 ноября 2017 г., Орёл. - 2017. - С. 299–305.

9. В.О. Турин, Б.А. Рахматов, Ч.Х. Ким. Линейная «внешняя» компактная модель асимптотики тока стока в режиме насыщения для органического полевого транзистора. // Современные проблемы физико-математических наук. Материалы IV международной научно-практической конференции. 22 – 25 ноября 2018 г., Орёл — 2018. — С. 185–190.

### Цитированная литература

[1] Chang, J.S. A Circuits and Systems Perspective of Organic/Printed Electronics: Review, Challenges, and Contemporary and Emerging Design Approaches / J.S. Chang, A.F. Facchetti, R. Reuss // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2017. Vol. 7, N 1. P. 7-26.

[2] Turin, V. The correct account of nonzero differential conductance in the saturation regime in the MOSFET compact model / V. Turin, G. Zebrev, S. Makarov, B. Iñiguez, M. Shur. //Int. J. Numer. Model. El.2014. No 27. P. 863-874.

[3] Турин, В.О. Корректный учет ненулевой дифференциальной проводимости в режиме насыщения в компактной модели полевого нанотранзистора / В.О. Турин, Г.И. Зебров, Б. Инигез, М.С. Шур // Наноинженерия. -2011. - №8. - С. 41-48.

[4] Турин, В.О. Обобщение компактной модели MOSFET Level 1 при ненулевой дифференциальной проводимости в режиме насыщения на случай ненулевых сопротивлений истока и стока / В.О. Турин, Г.И. Зебрев, С.В. Макаров [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: материалы XIII международной научно – практической интернет – конференции, 15 марта – 30 июня 2015 г., г. Орел / под ред. О. В. Пилипенко [и др.]. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. – С. 137 – 140.

[5] Turin, V. A linear “extrinsic” compact model for short-channel MOSFET drain current asymptotic dependence on drain bias in saturation regime / V. Turin, R. Shkarlat, V. Poyarkov, O. Kshensky, G. Zebrev, B. Iñiguez, M. Shur // Proc. SPIE. 2019. Vol. 11022, P. 1-9.

[6] Turin, V.O. An approach to organic field-effect transistor above-threshold drains current compact modeling that provides monotonic decrease of the output

conductance with drain bias increasing / V.O. Turin, B.A. Rakhmatov, C.H. Kim, B. Iñiguez // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 151. N1. P. 1–5.

[7] Turin, V.O. Modelling of saturation current of an organic field-effect transistor with accounting for contact resistances / V.O. Turin, B.A. Rakhmatov, G.I. Zebrev, C.-H. Kim, B. Iñiguez, M.S. Shur // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 498. N 012038.P. 1-5.

[8] Kim, C.H. A compact model for organic field-effect transistors with improved output asymptotic behaviors / C.H. Kim, A. Castro-Carranza, M. Estrada, A. Cerdeira, Y. Bonnasieux, G. Horowitz, B. Iniguez // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60. N3. P. 1136–1141.

[9] Estrada, M. Accurate modeling and parameter extraction method for organic TFTs / M. Estrada, A. Cerdeira, J. Puigdollers, L. Reséndiz, J. Pallares, L.F. Marsal, C. Voz, B. Iñiguez // Solid-State Electronics. 2005. Vol. 49, N 6. P. 1009 – 1016.

[10] Sheikholeslami, A. Circuit Intuitions: Source Degeneration / A. Sheikholeslami // IEEE Solid-State Circuits Magazine. 2014. Vol. 6, N 3, P. 8-10.

[11] Adel S. Sedra. Microelectronic Circuits / Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith. - Oxford Univ. Press, 2015. - P. 433.

[12] Turin, V.O. A piecewise approximation for short-channel "extrinsic" MOSFET drain current dependence on drain-to-source bias including linear triode, linear saturation and asymptotic saturation regimes / V.O. Turin, R.S. Shkarlat, B.A. Rakhmatov, G.I. Zebrev, C.-H. Kim, B. Iniguez, M. Shur // ECS Transactions. 2019. Vol. 90, N 1, P. 101-112.

[13] Y, Hu. The importance of contact resistance in high-mobility organic field-effect transistors studied by scanning Kelvin probe microscopy / Hu Y, Li G, Chen Z. // IEEE Electron Device Letters. 2018. Vol.39. N 2. P. 276-279.

[14] Shur, M. Physics of Semiconductor Devices / M. Shur // Prentice Hall, New Jersey, 1990. - P. 680.

[15] Ytterdal, T. Device Modeling for Analog and RF CMOS Circuit / T. Ytterdal, Y. Cheng, T. A. Fjeldly. - John Willey and Sons// New York, 2003. - P. 306.

[16] J., Fan. DC compact model for sub threshold operated organic field-effect transistors / Fan J, Zhao J, Guo X // IEEE Electron Device Letters. 2018. Vol.39. N8. P. 1191-1194.