

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Донской государственный технический университет»
в г. Шахты Ростовской области
(ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты)

А.И. Серебряков

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Учебно-методическое пособие
для аспирантов направления
09.06.01 «Информатика и вычислительная техника»
(профиль «Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления», дисциплина
«Научно-исследовательская деятельность»)

Учебное электронное издание

ШАХТЫ
2017

УДК 621.375(07)
ББК 32.844.1я73

Рецензенты:

к.т.н., доцент кафедры «Информационные системы и радиотехника»
ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты

А.И. Гавлицкий

к.т.н., доцент кафедры «Системы автоматического управления»
ИТА ЮФУ в г. Таганрог

Ю.И. Иванов

Серебряков, А.И. Низкотемпературные микросхемы [Электронный ресурс] : учеб.-метод. пособие для аспирантов направления 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» (профиль «Элементы и уст-ва вычислит. техники и систем упр.»), дисциплина «Научно-исследовательская деятельность» : учеб. электрон. изд. / А.И. Серебряков ; Ин-т сферы обслуж. и предпринимательства (филиал) федер. гос. бюджет. образоват. учреждения высш. образования «Донской гос. техн. ун-т» в г. Шахты Рост. обл. (ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты). – Электрон. дан. (1,7 Мб). – Шахты : ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования : Pentium III 866 МГц ; 256 Мб RAM ; Windows XP ; Adobe Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов PDF) ; CD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с экрана.

В учебно-методическом пособии рассматриваются теоретические вопросы проектирования и компьютерного моделирования аналоговых микросхем для устройств автоматики, работающих в тяжелых условиях эксплуатации (отрицательные температуры, проникающая радиация).

Подготовлено в рамках проекта РНФ № 16-19-00122 «Разработка основ проектирования и компьютерного моделирования аналоговых и аналого-цифровых интерфейсных микросхем IP-модулей ответственного применения датчиковых систем роботов, предназначенных для эксплуатации при низких, в т.ч. криогенных температурах» (2016–2018 гг.).

Издается по решению кафедры «Информационные системы и радиотехника» от 19.01.2017 г., протокол № 6.

© ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2017

Подписано к использованию 19.01.2017 г.

Объем 1,7 Мб

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ
в г. Шахты Ростовской области

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Особенности работы транзисторов при низких температурах	7
2. Проблемы компьютерного моделирования низкотемпературных аналоговых интегральных схем (ИС)	10
2.1. Выбор САПР и Spice-моделей.....	10
2.2 Модернизация средств схемотехнического моделирования.....	14
2.2.1 Влияние низкой температуры и радиации на активные элементы ИС	14
2.2.2 Компьютерные модели биполярных и полевых транзисторов при комплексных воздействиях	17
3. Методика моделирования низкотемпературных ИС в программном пакете LTSpiceXVII	20
3.1 Основные среды моделирования.....	21
3.2 Особенности работы с программным пакетом LTSpiceXVII.....	21
3.2.1 Описание рабочего окна, его функций и настроек	21
3.2.1.1 Меню Control Panel	23
3.2.1.2 Директивы моделирования	34
3.2.2 Пример моделирования аналоговой схемы.....	37
Заключение.....	47
Библиографический список.....	48

ВВЕДЕНИЕ

Электронная компонентная база, аналоговые и цифровые микросхемы [1-7] являются одним из приоритетов межведомственной программы Правительства РФ до 2030г. «Национальная технологическая инициатива», оказывают существенное влияние на «цифровую экономику» всех развитых стран мира.

Одно из научных направлений, развиваемых на кафедре «Информационные системы и радиотехника» ИСОиП (ф) ДГТУ (<http://shemotehnika-org.1gb.ru/index.php/ru/>), связано с созданием электронной компонентной базы для устройств автоматики (беспилотных летательных аппаратов, космороботов и т.п.) с тяжелыми условиями эксплуатации (воздействие низких температур и радиации). В этой связи темы диссертаций аспирантов кафедры, а также изучаемая ими дисциплина учебного плана «Научно-исследовательская деятельность» с общим объемом 4752 часа, предусматривают исследования радиационно-стойких и низкотемпературных микроэлектронных изделий.

Настоящее учебно-методическое пособие посвящено актуальным проблемам совершенствования Spice моделей транзисторов, а также особенностям компьютерного моделирования низкотемпературных и радиационных эффектов в аналоговых микросхемах.

Радиационно-стойкие интегральные схемы (ИС) находят применение в наукоемких областях техники, в том числе, ядерной электронике, космической аппаратуре, научном приборостроении, криогенных измерительных и медицинских приборах.

Для ряда задач физики высоких энергий и космического приборостроения необходимо иметь аналоговые ИС, сохраняющие работоспособность при одновременном воздействии низких температур и проникающей радиации (ПР). Значительную роль в обеспечении такого сочетания качественных показателей отводится выбору технологического процесса, а также оригинальных схемотехнических решений, обеспечивающих минимизацию чувствительности основных параметров микросхем к воздействию дестабилизирующих факторов.

Большинство серийно выпускаемых интегральных микросхем (ИС) обеспечивает требуемый уровень параметров в диапазоне температур от минус 40°C до 85°C, хотя существуют микросхемы, работоспособные в расширенном диапазоне температур от минус 60°C до 125°C.

При уменьшении рабочей температуры некоторые параметры ИС улучшаются, а именно увеличивается:

– быстродействие КМОП-вентилей из-за увеличения подвижности основных носителей заряда и, следовательно, крутизны КМОП-транзисторов, снижения барьерных ёмкостей p-n-переходов, уменьшения

допустимого перепада логических уровней, обусловленного более резкой передаточной характеристикой, что также позволяет снизить напряжение питания;

- полоса пропускания аналоговых КМОП-схем из-за увеличения крутизны КМОП-транзисторов и уменьшения ёмкостей р-п-переходов;

- отношение сигнал/шум из-за уменьшения тепловых и фликкер-шумов;

- точность аналоговых преобразований, в том числе из-за уменьшения падения напряжения на паразитных сопротивлениях полупроводниковых областей и межсоединений и уменьшению температурных градиентов на кристалле;

- надёжность из-за экспоненциальной зависимости интенсивности отказов от температуры, а также уменьшения обратных токов, утечек и эффекта защёлкивания (спада усиления паразитных транзисторов);

- эффективность работы мощных усилителей и источников питания.

Хотя при низких температурах возникают и отрицательные эффекты, главными из которых являются значительное снижение усиления биполярных транзисторов (БТ) и появление изгиба выходных вольтамперных характеристик (ВАХ) МОП-транзисторов, так называемый «kinkeffect», актуальность создания ИС для криогенных температур растёт из-за постоянно расширяющейся области их применения.

Низкотемпературные ИС находят применение в разных областях автоматики и связи: космической аппаратуре, ядерной электронике, научном приборостроении, криогенных измерительных и медицинских приборах. Создание криогенных микросхем крайне важно для космических применений. Это обусловлено тем, что температура вблизи и на поверхности большинства планет Солнечной системы и Луны меньше минус 60 °С, а использование нагревателей на основе радиоактивных материалов существенно увеличивает массу и габариты космических аппаратов из-за необходимости применения экранов, защищающих электронику от воздействия проникающей радиации.

Известно, что в космических аппаратах часто используются датчики, расположенные вне подогреваемых и защищенных от ПР блоков, и поэтому они подвергаются одновременному воздействию низких температур и ПР. Для улучшения отношения сигнал-шум датчиков целесообразно рядом с ними располагать интерфейсное устройство, осуществляющее предварительную обработку сигнала датчика и передающее информацию по кабелю в защищенный блок для окончательной обработки.

Необходимость проектирования низкотемпературной электроники для космических применений подтверждается рядом примеров.

Так, в «Основах государственной политики РФ в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую

перспективу», установлено, что в государственные интересы РФ в области космической деятельности входит получение научных данных о космосе, Земле и других небесных телах, в том числе исследование Луны, Марса, других тел Солнечной системы. В связи с указанным, одной из главных целей в области космической деятельности является создание научно-технического и технологического потенциалов в целях обеспечения готовности и реализации масштабных космических проектов по углублённому изучению Вселенной и Солнечной системы (в первую очередь окололунного пространства, Луны и Марса).

По словам главы НПО имени Лавочкина В. Хартова, в список из семи критических технологий, лежащих в основе планируемых к реализации программ изучения поверхности Луны и Марса, входят «технологии высокоточной и безопасной посадки, технологии глубинного (не менее 2 м) забора грунта, технологии робототехнических средств стыковки и захвата орбитальных объектов в автоматическом режиме, высоко- и низкотемпературная электроника».

Проблемам низкотемпературной электроники уделяют большое внимание специалисты как в США, так и в Европе. Основные исследования выполняются по следующим направлениям:

- применение новых материалов (Ge, SiGe, GaAs, InGaAs/InAlAs, GaN/AlGaN), техмаршрутов, модернизация транзисторов для работы при температуре жидкого азота и жидкого гелия, в том числе: кремниевых ПТП, БТ и МОП-полевых транзисторов (ПТ), Ge ПТ, GaAs ПТП, кремний-германиевых биполярных гетеротранзисторов;

- создание новых средств измерений, моделирования и проектирования низкотемпературных ИС, уточнение Spice-моделей кремниевых интегральных элементов для температур ниже 40 °К;

- исследование параметров серийно выпускаемых ИС и электрорадиоэлементов: резисторов, конденсаторов, индуктивностей при низких температурах.

Заметим, что низкотемпературная электроника требуется в разных областях: научном приборостроении, криогенных измерительных и медицинских приборах, приборах и беспилотниках для исследований Арктики и Антарктики.

Основное внимание в настоящем учебно-методическом пособии уделяется совершенствованию компьютерных моделей транзисторов и выбору средств САПР для проектирования низкотемпературных радиационно-стойких аналоговых микросхем.

Учебно-методическое пособие подготовлено с участием магистранта кафедры «Информационные системы и радиотехника» Бугаковой А.В. (раздел 3.2.1.1)

[В начало к оглавлению](#)

1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Известно, что низкотемпературные аналоговые ИС могут быть реализованы как на биполярных, так и полевых транзисторах, однако при выборе конструктивно-технологического базиса аналоговых криогенных микросхем необходимо учитывать ряд особенностей:

1. МОП-техмаршруты наиболее часто применяются при создании цифровых и аналого-цифровых ИС. При уменьшении температуры большинство параметров МОП-элементов улучшается (табл. 1), но появляются и отрицательные факторы: рост порогового напряжения и изгиб выходной ВАХ в схеме с общим истоком. В р-МОП-транзисторах изгиб ВАХ менее заметен, чем в n-МОП, и может быть минимизирован при правильном смещении n-кармана.

Таблица 1

**Параметры элементов, изготовленных по техмаршруту
Ні-СМОСII с длиной затвора, равной 2 мкм, в диапазоне температур**

Тип структуры	Параметр	Тип канала	Температура, °К		
			300	77	4,2
Рабочая	Пороговое напряжение, В	n	0,59	1,04	1,08
		p	-0,74	-1,20	-1,43
	Крутизна (относительная)	n	1,0	1,6	1,6
		p	1,0	1,4	1,4
Паразитная	Пороговое напряжение, В	n	39,4	53,4	41,8
		p	-35,8	-44,2	-45,9

Известно, что прецизионные аналоговые микросхемы не следует создавать на КМОП-транзисторах. Однако в том случае, когда КМОП-техмаршрут применяется для изготовления сложно функциональных низкотемпературных микросхем, содержащих аналоговые компоненты, при проектировании рекомендуется учитывать следующее:

– при схемотехническом моделировании не допускается применение Spice-параметров моделей, предоставляемых предприятиями-изготовителями микросхем, т.к. обычно эти параметры не предназначены для описания характеристик интегральных элементов при криогенных температурах. Следует предварительно измерить параметры КМОП-транзисторов нескольких конструкций («базовых» транзисторов) при требуемой температуре и идентифицировать их Spice-параметры;

– масштабирование ВАХ КМОП-транзисторов необходимо осуществлять не изменением отношения ширины канала W к длине L , а последовательно-параллельным соединением «базовых» транзисторов одной и той же конструкции;

– существующий технологический разброс параметров полупроводниковых слоёв приводит к более сильному (в 2-3 раза) разбросу ВАХ КМОП-транзисторов при криогенных температурах, в связи с чем необходимо применение специальных топологий транзисторов для увеличения идентичности их параметров;

– для увеличения коэффициента усиления напряжения и уменьшения уровня шумов, отнесённых ко входу, часто используют подпороговый режим работы (режим слабой инверсии) КМОП-транзисторов. Область насыщения ВАХ (высокого выходного малосигнального сопротивления) в режиме слабой инверсии описывается соотношением:

$$I_{DW} = I_{D0W} \exp \frac{V_{GS} - V_{TH}}{N_W \phi_T},$$

где I_{DW} – ток стока в подпороговой области ВАХ;

V_{GS} – напряжение затвор-исток;

I_{D0W} – ток стока при $V_{GS} = V_{TH}$;

V_{TH} – пороговое напряжение МОП-транзисторов (напряжение отсечки ПТП);

$\phi_T = kT/q$ – температурный потенциал;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура;

q – заряд электрона;

N_W – фактор, характеризующий отклонение ВАХ в подпороговой области от экспоненты, обычно величина N_W составляет от 1 до 2.

Для нормальных условий (300 °К) температурный потенциал составляет около 26 мВ, а при температуре жидкого азота – 6,3 мВ, поэтому технологический разброс величины порогового напряжения приведёт к значительному разбросу токов стока и применение режима слабой инверсии в низкотемпературных аналоговых ИС не рекомендуется.

Необходимо учитывать, что с уменьшением температуры уменьшается область напряжения исток-сток, в которой МОП-транзистор обладает высоким выходным сопротивлением, что, с одной стороны, обусловлено ростом порогового напряжения при низких температурах, а с другой – малым напряжением пробоя промежутка сток-исток транзисторов с коротким каналом.

Тепловые («белые») шумы КМОП-транзисторов уменьшаются с температурой, однако фликкер-шумы при криогенных температурах могут как уменьшаться, так и возрасти в зависимости от особенностей конкретного технологического маршрута.

2. Усиление БТ значительно уменьшается при температуре жидкого азота, что иллюстрируют результаты измерений ВАХ в схеме с общим эмиттером (ОЭ) для транзисторов базового матричного кристалла АБМК-1.3.

Для увеличения коэффициента усиления БТ в схеме с общим эмиттером (β) в некоторых работах выполнена оптимизация транзисторной структуры, а именно эмиттерная область сформирована из поликристаллического кремния и применены слабо легированные базовая и коллекторная области, что позволило существенно увеличить усиление БТ при температуре жидкого азота.

К сожалению, такие БТ обладают невысоким быстродействием, плохой радиационной стойкостью, малым напряжением Эрли (низким выходным малосигнальным сопротивлением) и чрезвычайно высоким напряжением коллектор-эмиттер в насыщении (V_{CES}). Так, $V_{CES} = 3,5$ В при $I_B = 0,5$ мкА и $T = 300$ °К. При низких температурах ($T = 78$ °К) V_{CES} уменьшается до 0,5 В, но такие БТ нельзя применять в диапазоне температур и, следовательно, в космической электронике.

По мнению некоторых специалистов, наилучшим решением для синтеза аналоговых низкотемпературных ИС является использование SiGeHBT.

При уменьшении температуры в SiGeHBT улучшается β , напряжение Эрли, граничная частота (f_T), коэффициент шума, но уменьшается β в области малых токов. Кроме того, возможно одновременное формирование на одном кристалле кремний-германиевых биполярных и МОП-транзисторов, что является большим преимуществом для создания аналого-цифровых микросхем.

3. Преимуществом кремниевых ПТП по сравнению с МОП-транзисторами и GaAsПТ является предельно малый уровень шумов на частотах менее 10 кГц при сравнимых с МОП-транзисторами величинах входных токов при криогенных температурах.

Крутизна кремниевых ПТП увеличивается при уменьшении температуры до минус 110–120 °С, а при дальнейшем понижении температуры – уменьшается. Эти особенности ВАХ наблюдаются для ПТП, изготовленных по разным технологическим маршрутам.

Известно, что для ПТП справедливы соотношения:

$$g_M = \frac{dI_D}{dV_{GS}} \approx 2\sqrt{I_D \text{BETA}},$$

$$\text{BETA} = \frac{4\epsilon\epsilon_0\mu_{CH}W}{3aL},$$

где g_M – передаточная проводимость (крутизна);

I_D – ток стока;

BETA – коэффициент пропорциональности (удельная крутизна);

μ_{CH} – подвижность основных носителей заряда в канале;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;
 ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;
 W, L – ширина и длина затвора;
 a – половина толщины токопроводящей части канала при отсутствии внешнего напряжения.

Заметим, что ПТП обычно применяют в качестве охлаждаемого «головного» транзистора, т.к. реализация функционально законченных аналоговых устройств на их основе затруднена.

[В начало к оглавлению](#)

2. ПРОБЛЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ (ИС)

Разработка радиационно-стойких низкотемпературных микросхем значительно затруднена тем, что типовые САПР и модели интегральных элементов не обеспечивают адекватные результаты схемотехнического моделирования в жестких условиях эксплуатации [8-11], а также не всегда поставляются в Россию.

Целью настоящего раздела является рассмотрение комплекса средств, позволяющих выполнять схемотехническое моделирование биполярно-полевых аналоговых микросхем (ИС) при одновременном воздействии низких температур и проникающей радиации (ПР), а также пути решения научных задач, связанных с данной проблемой. Рассмотрен выбор САПР и SPICE-моделей транзисторов для схемотехнического моделирования характеристик биполярно-полевых (BiJFET) аналоговых ИС при воздействии ПР и низких температур. Показаны направления модификации SPICE-моделей, описывающих немонотонное изменение максимального тока стока и крутизны полевого транзистора с р-п-переходом (ПТП) в диапазоне температур от -200°C до 30°C .

2.1 Выбор САПР и Spice-моделей

При схемотехническом моделировании ИС применяют разнообразные коммерческие САПР со встроенными моделями биполярного транзистора (БТ) и SPICE- параметрами, содержащимися в фирменных библиотеках предприятий изготовителей полупроводниковых приборов и ИС. Обычно это модели Гуммеля-Пуна, Шихмана–Ходжеса [12] (для ПТП). Однако до начала проектирования радиационно-стойких и низкотемпературных ИС необходимо оценить возможность и

целесообразность применения доступных для России типовых САПР и моделей интегральных элементов.

Моделирование при низких температурах вольтамперных характеристик (ВАХ) типовых БТ в различных схемотехнических САПР (OrCAD 16.6, HSPICE, LTSPICE) позволило установить, что в OrCAD, HSPICE наблюдаются «выбросы» и отклонения ВАХ при моделировании БТ при температурах менее -148°C [13]. Наряду с этим в LTSPICE такое моделирование может быть проведено при условии настройки модели и определения ее температурных параметров в нужном диапазоне. Таким образом, в LTSPICE может проводиться моделирование характеристик БТ и ПТП с учетом влияния ПР и криогенных температур.

Известно несколько методов модификации SPICE-моделей для описания влияния ПР [10]:

1. Изменение встроенной в САПР модели.
2. Идентификацией параметров моделей для каждого вида ПР [14].
3. Применение макромоделей, состоящих из доступных в выбранной САПР элементов [10, 13, 15].
4. Введение математических соотношений, описывающих параметры SPICE-моделей [10, 11, 15].

Для пользователей САПР доступны методы 2-4, каждый из которых имеет преимущества и недостатки.

Так, наиболее адекватные результаты моделирования, обеспечивает идентификация параметров моделей для каждого вида ПР. Однако эти результаты корректны только для конкретной конструкции интегрального транзистора и заданных условий облучения, а именно: поглощенной дозы гамма-излучения D_G с энергией гамма-квантов E_G , флюенса частиц (нейтронов F_N , электронов F_E , протонов F_P) и их энергий (E_N , E_E , E_P).

Известна модель для разновидностей БТ, использующая комбинацию вышеназванных методов 3 и 4: подключение схемных элементов к стандартной SPICE-модели и введение дополнительных математических выражений для описания радиационного изменения параметров [13]. Такая модель характеризуется большой универсальностью и простотой адаптации к различным существующим САПР.

Температурные эффекты во встроенных SPICE-моделях описываются с помощью линейных и квадратичных температурных коэффициентов [16]. Причем для широкого диапазона температур применяют усреднение температурных коэффициентов в диапазоне температур или вводят эмпирические температурные зависимости SPICE-параметров. Например, для высокоточного моделирования БТ в диапазоне температур от -200°C до 30°C в [17] было предложено ввести температурно-зависимый источник тока и эмпирическое температурное описание SPICE-параметров: NF, NE, ISE, VAF, IKF, RC, XTB, XTI.

Для одновременного учета влияния радиации и низких температур в БТ и ПТП допустимо применение встроенных в САПР типовых моделей Гуммеля-Пуна, Шихмана-Ходжеса и математических выражений, устанавливающих взаимосвязь параметров моделей, полупроводника и радиационного облучения, а также использование усредненных температурных коэффициентов параметров моделей и эмпирической зависимости, описывающей немонотонное изменение максимального тока стока и крутизны ПТП в диапазоне температур от -200°C до 30°C .

Так, на статические характеристики БТ и ПТП наиболее существенно влияют следующие изменяющиеся при радиационном облучении параметры модели [15]: BF, VAF, IKF, IS, ISE, RC, RE, RB, BETA, VTO, LAMBDA, RD, RS. Подробное рассмотрение этих параметров и методы идентификации приведены в [16, 18]. Взаимосвязь SPICE-параметров с параметрами полупроводника и ПР описывается приближительными математическими выражениями [15]:

$$BF \sim \frac{N_{DE}}{N_{AB}}, \quad (1)$$

$$VAF \sim N_{AB} \sqrt{\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}}, \quad (2)$$

$$IKF \sim N_{AB}, \quad (3)$$

$$IS \sim \frac{1}{N_{AB}}, \quad (4)$$

$$ISE \sim \left(\frac{d_E}{2\tau} S_E + v_S S_{SURF} \frac{n_I}{N_{AB}} \right), \quad (5)$$

$$RC \sim N_{DC}^{-1}, RE \sim N_{DE}^{-1}, RB \sim N_{AB}^{-1}, \quad (6)$$

$$BETA \sim \mu_{CH}, \quad (7)$$

$$VTO \sim N_{CH}, \quad (8)$$

$$LAMBDA \sim N_{CH}^{-0,5}, RD \sim N_D^{-1}, RS \sim N_S^{-1}, \quad (9)$$

$$\frac{n_F}{n_0} = \exp(-K_N F), \quad (10)$$

$$K_N = \frac{1}{c n_0^\gamma}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{\mu_F} = \frac{1}{\mu_0} + K_\mu F, \quad (12)$$

где N_{DE} , N_{DC} , N_{AB} , N_{CH} , N_D , N_S – концентрация доноров в эмиттере и коллекторе, акцепторов в базе n-p-n БТ, примеси в канале, стоке, истоке ПТП; d_E – ширина области пространственного заряда (ОПЗ) эмиттерного p-n-перехода; τ – эффективное время жизни носителей заряда в ОПЗ; S_E – площадь эмиттерного перехода; v_S – скорость поверхностной рекомбинации; S_{SURF} – величина площади полупроводника, на которой

происходит поверхностная рекомбинация; n_i – собственная концентрация носителей; μ_{NB} , μ_{CH} – подвижность электронов в базе n-p-n БТ, основных носителей заряда в канале ПТП; K_N , K_μ – коэффициенты радиационного изменения концентрации и подвижности основных носителей заряда; F – интегральный поток частиц; c , γ – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида частиц (электроны, протоны, гамма- кванты, нейтроны), их энергии и типа проводимости полупроводника.

Здесь и далее нижним индексом “F” обозначаются параметры после воздействия ПР, а индексом “0” - до облучения.

Соотношения (1)-(6) справедливы для n-p-n БТ, однако их допустимо применять и для p-n-p транзисторов при соответствующей замене переменных.

В [19] приведены некоторые численные значения эмпирических коэффициентов K_N , K_μ для распространенных типов облучения.

Совместное применение соотношений (1)–(12) позволяет описать радиационное изменение SPICE- параметров. Так, ниже приведен фрагмент описания модели n-p-n БТ в соответствии с правилами SPICE-подобных программ:

```
*Оценка относительного изменения концентрации
* в областях эмиттера (em), базы (pb), коллектора (epi)
.param Nnem={exp(-Fn/(444*pwr(Nem, 0.77)))}
.param Nnepi={exp(-Fn/(444*pwr(Nepi, 0.77)))}
.param Nnpb={exp(-Fn/(387*pwr(Npb, 0.77)))}
*Оценка относительного изменения подвижности
.param Mnepi={1/(1+Fn*Мepi*1.65e-18)}
*фрагмент модели NPN
.model NPN NPN
+IS={5.4e-17/Nnpb}
+BF={300*Nnem/Nnpb}
+VAF={31*Nnpb/sqrt(Nnepi)}
+IKF={4.3m*Nnpb}
+BR={0.7*Nnepi/Nnpb}
+RB={200/Nnpb}
+RBM={6.67/Nnpb}
```

Апробация рассмотренной модели выявила удовлетворительное совпадение результатов измерений и моделирования ВАХ БТ и ПТП до и после воздействия гамма-излучения и потока "быстрых" электронов [20, 21].

2.2 Модернизация средств схемотехнического моделирования

Развитие средств схемотехнического моделирования радиационно-стойких низкотемпературных микросхем целесообразно осуществлять по двум направлениям:

- совершенствование методики моделирования одновременного влияния ПР и низкой температуры на ВАХ транзисторов;
- доработка компьютерных моделей биполярных и полевых транзисторов при комплексных воздействиях.

2.2.1 Влияние низкой температуры и радиации на активные элементы ИС

Для проведения моделирования целесообразно использовать САПР LTspiceXVII с директивами температурного и параметрического анализа (.param, .step) и рассмотренные выше модели транзисторов.

На рисунке 1 приведена типовая схема включения БТ и ПТП при моделировании, а на рисунке 2 – результаты моделирования основных ВАХ с применяемыми директивами управления.

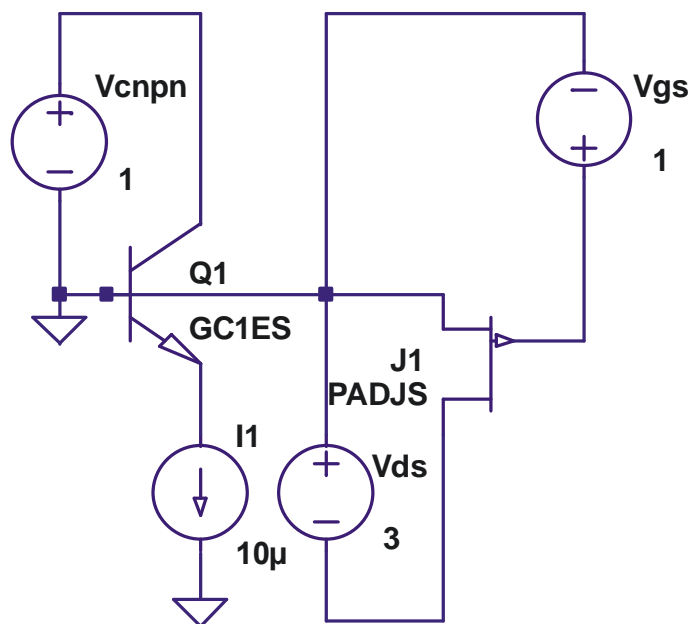


Рис. 1. Типовая схема включения БТ и ПТП при моделировании ВАХ

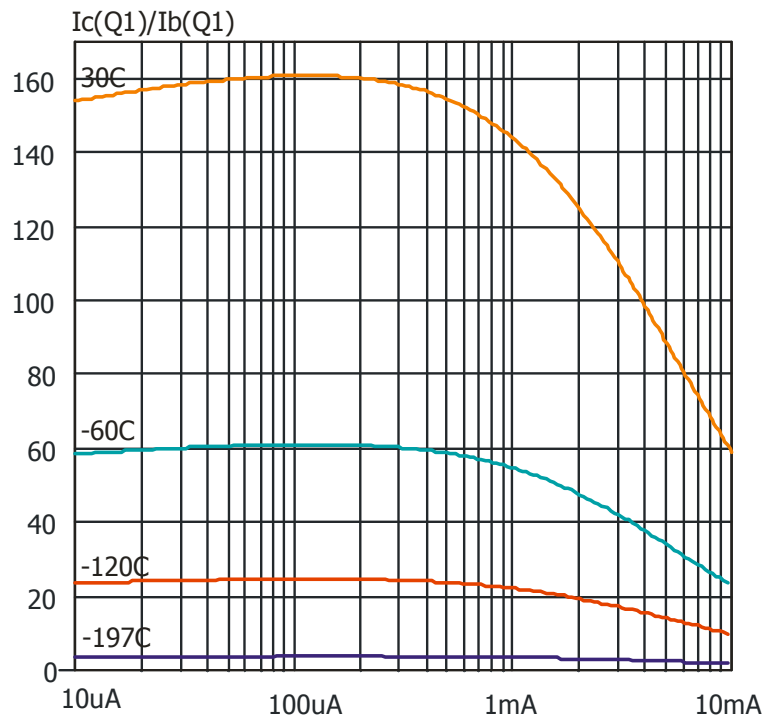


Рис. 2. Результаты моделирования зависимости β от I_E при $V_{CB}=1V$ n-p-n БТ без воздействия ПР

Директивы управления: `.step param LT list -197 -120 -60 30; .dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}; .param LT=30; .param Fn=1; .param Dg=1; .param fit=1`

Температурные коэффициенты параметров БТ были усреднены в диапазоне температур от $-197^{\circ}C$ до $30^{\circ}C$. В подрисуночных подписях использованы следующие обозначения: β – статический коэффициент усиления тока базы БТ в схеме с общим эмиттером, $\beta=I_C/I_B$; I_E , I_C , I_B , I_D – ток эмиттера, коллектора, базы БТ, ток стока ПТП; V_{CB} , V_{GS} , V_{SD} – напряжение коллектор-база БТ, затвор-исток и исток-сток ПТП, LT - глобальный параметр, описывающий температуру в градусах Цельсия.

На рисунках 3-4 представлены результаты моделирования параметров при воздействии радиации. Поток нейтронов с размерностью n/m^2 устанавливался по директиве:

`.param Fn=значение [н/м2].`

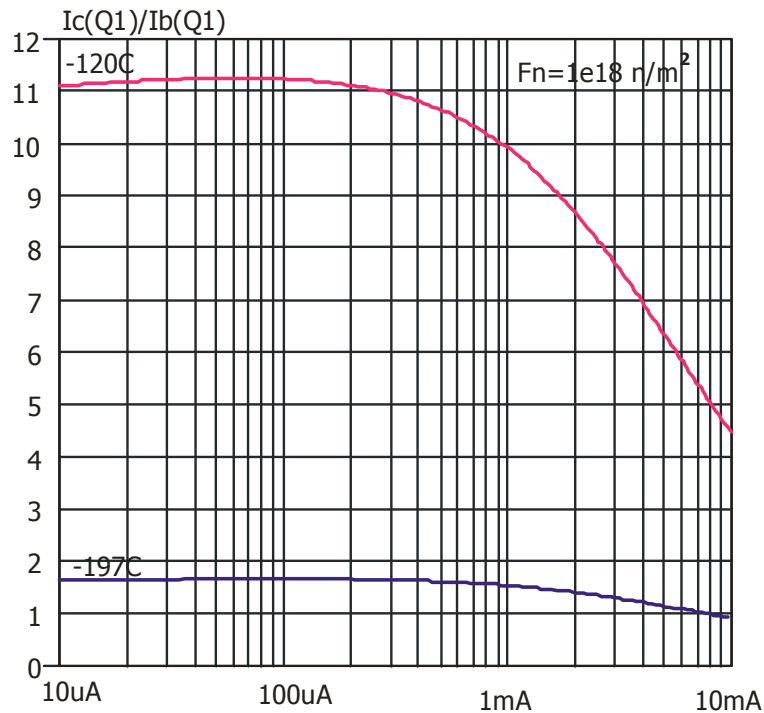


Рис. 3. Результаты моделирования зависимости β от I_E при $V_{CB}=1V$ n-p-n БТ и воздействии потока нейтронов $F_N=10^{14}$ н/см²

Директивы управления: . step param LT list -197 -120; .dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}; .param LT=30; .param Fn=1e18; .param Dg=1; .param fit=1

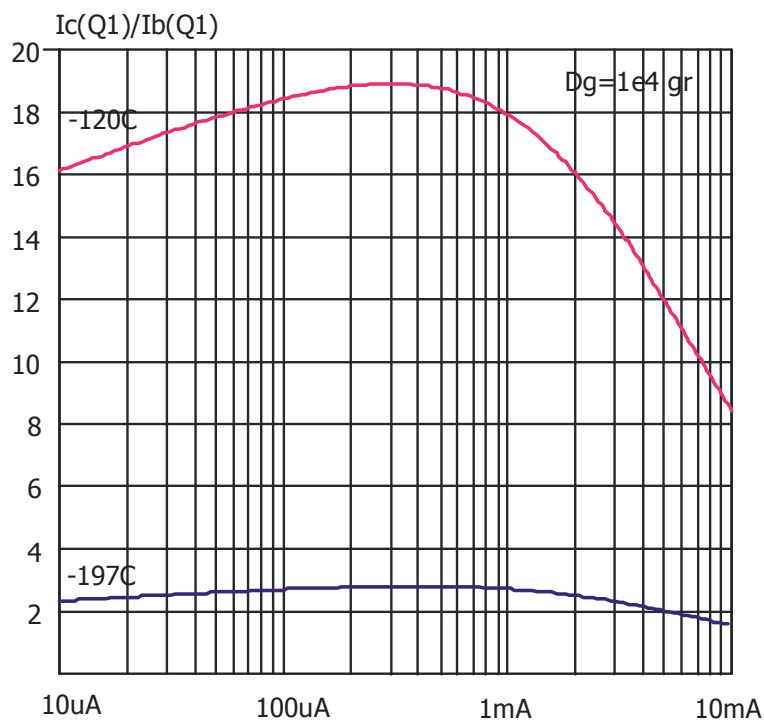


Рис. 4. Результаты моделирования зависимости β от I_E при $V_{CB}=1V$ n-p-n БТ и поглощенной дозе гамма- облучения $D_G=1$ Мрад

Директивы управления: .step param LT list -197 -120; .dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}; .param LT=30; .param Fn=1; .param Dg=1e4; .param fit=410.913

Моделирование воздействия гамма облучения могло быть выполнено только для некоторых значений поглощенной дозы с размерностью грэй (1 грэй = 100 рад), для которых известна эмпирическая зависимость скорости поверхностной рекомбинации (параметр fit в модели) от поглощенной дозы облучения D (табл. 2).

Таблица 2

Эмпирическая зависимость скорости поверхностной рекомбинации от поглощенной дозы облучения [22]

D, гр	10^3	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$	10^4	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
fit, см/с	31.333	50.31	125.288	129.122	410.913	1095.19	1627.15

2.2.2 Компьютерные модели биполярных и полевых транзисторов при комплексных воздействиях

Для моделирования при любой величине поглощенной дозы эмпирический коэффициент fit, приведенный в табл. 2, был задан полиномом:

$$fit = 308,08 * [\lambda \gamma \Delta_T]^3 - 2773,7 * [\lambda \gamma \Delta_T]^2 + 8374,1 * \lambda \gamma \Delta_T - 8444,3. \quad (13)$$

Известен эффект «самоотжига» (восстановления параметров) горизонтальных p-n-p- транзисторов при больших дозах облучения [21]. Увеличение положительного заряда в окисле при больших дозах облучения вызывает усиление отталкивания неосновных зарядов в базе p-n-p- транзисторов от границы раздела Si-SiO₂, что обуславливает уменьшение рекомбинации на поверхности и частичное восстановление основных параметров p-n-p- транзисторов. Это эффект может быть просто учтен в применяемой модели изменением математического выражения (13) таким образом, чтобы эмпирический коэффициент fit начал уменьшаться при больших поглощенных дозах.

Типовая модель Шихмана-Ходжеса ПТП не описывает экспериментальное изменение его характеристик при низких температурах, а именно увеличение начального тока стока и крутизны при уменьшении температуры ориентировочно до -110°C...-130°C, а затем уменьшение тока стока и крутизны при дальнейшем спаде температуры [23, 24]. Пример такой немонотонной зависимости крутизны g_m от температуры иллюстрирует рисунок 5 для ПТП с каналом p-типа (p-ПТП), изготовленного по технологии DMILL.

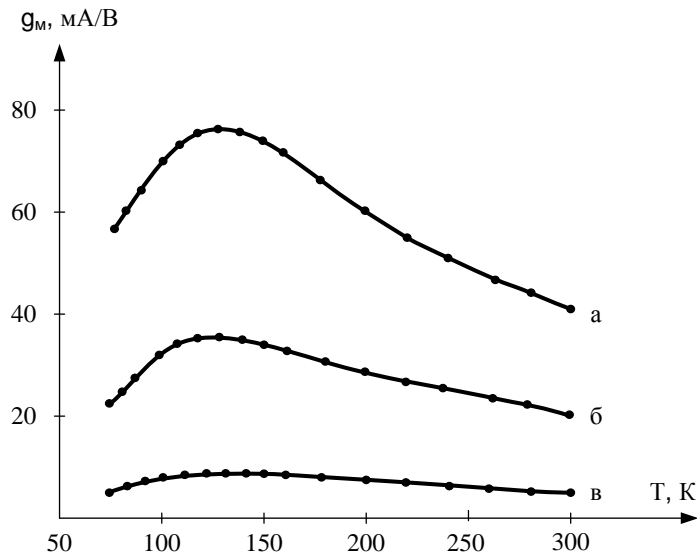


Рис. 5. Температурная зависимость крутизны g_m p-ПТП, сформированных по техмаршруту DMILL [21] с различной шириной канала W : а) крутизна ПТП при $W = 50\ 000$ мкм, $I_D = 4$ мА; б) крутизна p-ПТП при $W = 5\ 000$ мкм, $I_D = 4$ мА; в) крутизна p-ПТП при $W = 5\ 000$ мкм, $I_D = 0,4$ мА

Для учета этого эффекта во встроенной в LTspice модели Шихмана-Ходжеса исключена зависимость параметра $BETA=f(T)$ за счет введения коэффициента $betaTCE=-1e-6$, а зависимость параметра $BETA=f(T)$ описана выражением

$$BETA = -3,1571E-12T^4 + 3,4164E-10T^3 + 1,1255E-07T^2 - 1,3408E-05T + 2,9107E-03. \quad (14)$$

Выражение (14) получено при аппроксимации измеренных в диапазоне температур от -197°C до 30°C значений $BETA$, определенных по методике описанной в [18]. Совпадение измеренных величин $BETA$ и аппроксимации (14) показано на рисунке 6.

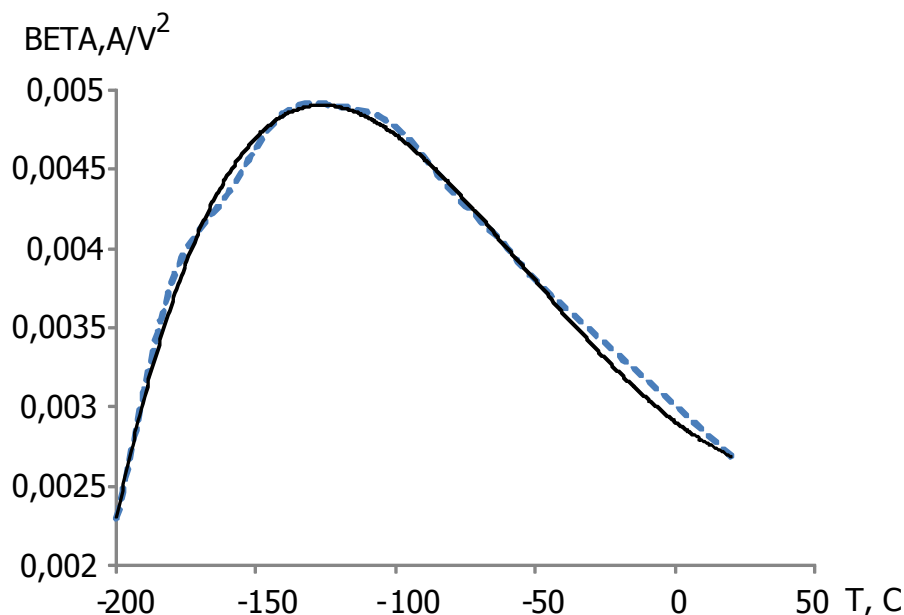


Рис. 6. Зависимость измеренного параметра $BETA$ (пунктирная линия) и рассчитанного по выражению (14) (сплошная линия) от температуры

В то же время температурная зависимость параметра V_{TO} оставлена без изменений и описывается встроенными в LTspice математическими выражениями.

Фрагмент модели p-ПТП, учитывающий температурное и радиационное изменение статических ВАХ имеет вид:

```
.param bL={-3.16p*pow(LT,4)+0.342n*pow(LT,3)+0.113u*pow(LT,2)-
13.4u*LT+2.91m}
+Vto={-2*Nsumpch}
+beta={bL*Msumpch}
+lambdа={0.015*pwr(Nsumpch,-0.5)}
+Rd={10/Nsumpb}
+Rs={10/Nsumpb}
```

Таким образом, при моделировании температурных зависимостей ВАХ ПТП необходимо задавать температуру с использованием параметрического анализа и глобального параметра LT :

```
.step param LT list -197 -120 -60 30
.dc Vgs 0 3 10m temp list {LT}.
```

Результаты моделирования $I_D=f(V_{GS})$ в диапазоне температур показаны на рисунке 7.

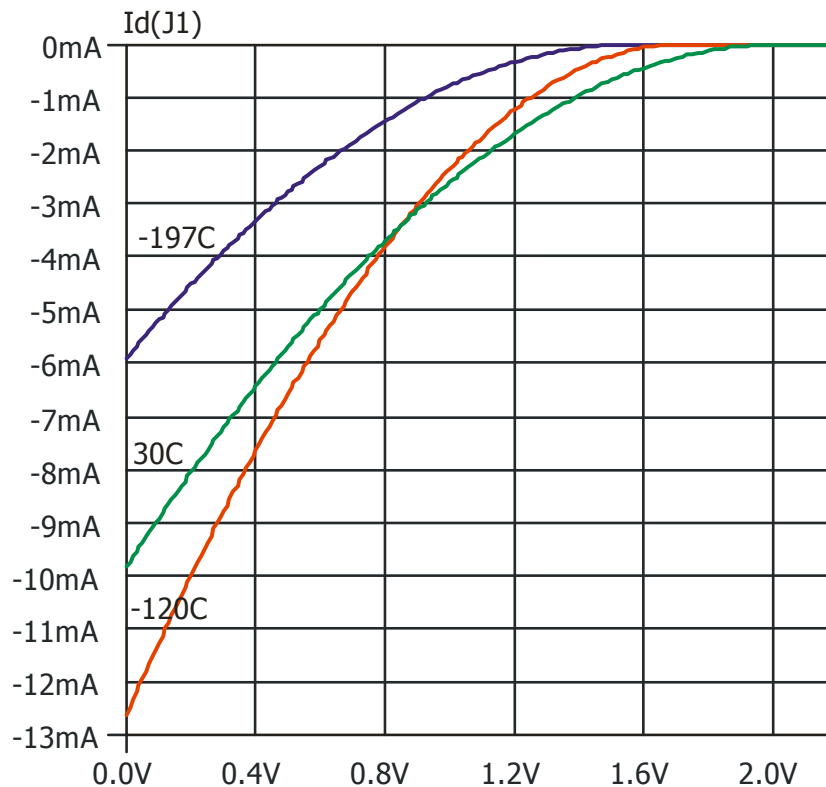


Рис. 7. Результаты моделирования зависимости I_D от V_{GS} при $V_{SD}=3V$ p-ПТТ в диапазоне температур

Директивы управления: `.step param LT list -197 -120 30; .dc Vgs 0 3 10m temp list {LT}; .param LT=30; .param Fn=1; .param Dg=1; .param fit=1`

Заметим, что возможна некоторая неадекватность моделей т.к. измерения параметров при радиационном воздействии проводились в нормальных условиях, ориентировочно от 25°C до 30°C, а полученные коэффициенты радиационных изменений использованы в диапазоне температур. Провести облучение транзисторов при низких температурах не позволяют возможности существующих экспериментальных установок. Допустимым способом увеличения адекватности моделей является идентификация параметров из результатов низкотемпературных измерений, выполненных непосредственно после воздействия ПР.

[В начало к оглавлению](#)

3. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИС В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ LTSPICEXVII

В настоящем разделе приведены результаты исследований npn- и pnp- транзисторов технологического процесса 3КБТ (АВМК_1.7) и их соответствующие модели в диапазоне температур от минус 200°C до плюс

- 4 – ввод резистора;
- 5 – ввод конденсатора;
- 6 – ввод индуктивности;
- 7 – ввод диода;
- 8 – ввод схемных элементов;
- 9 – задание режима перемещения отдельных объектов схемы;
- 10 – задание режима перемещения схемных элементов;
- 11 – отмена/восстановление последней команды;
- 13 – зеркальное отображение элемента (Ctrl+R/Ctrl+E);
- 15 – ввод комментария;
- 16 – текстовый ввод Spice-директивы.

Для удобства пользования в дополнение этой панели есть набор «горячих» клавиш (рис. 9), который расположен **Tools=>Control Panel=>Drafting Options=>Hot Keys**. Их можно настраивать индивидуально, а можно пользоваться готовыми настройками.

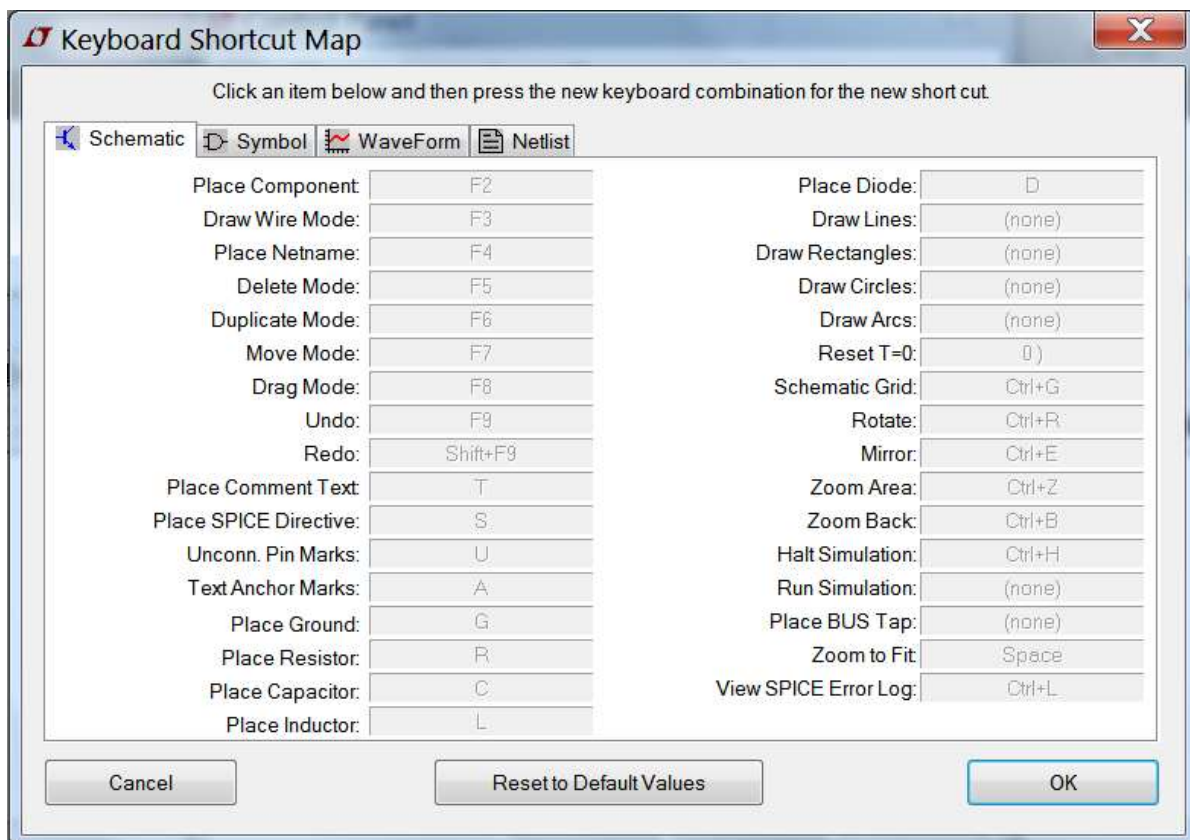


Рис. 9. Окно редактора «горячих» клавиш при проектировании схем, символов, графиков и списка соединений (netlist)

3.2.1.1 Меню Control Panel

Меню **Control Panel** (Панель управления) (рис. 10), активизируется при помощи команды Tools=>Control Panel. Меню предназначено для конфигурирования программы LTspice.

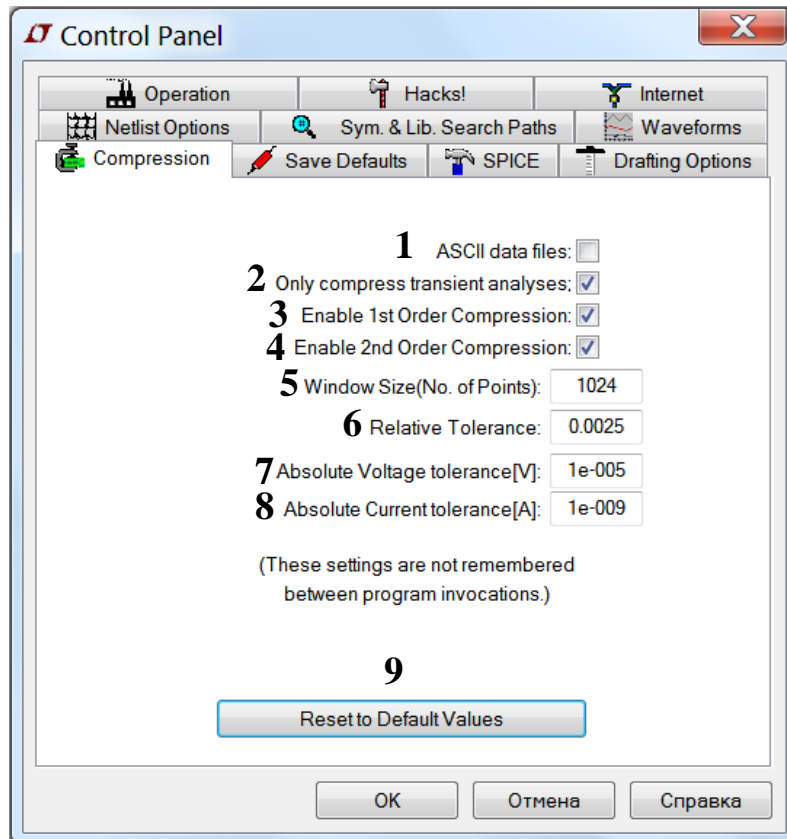


Рис. 10. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Compression** (Сжатие)

Оптимальная настройка вкладки **Compression** (Сжатие) (рис. 10) позволяет сжимать данные моделирования перед сохранением в файл. Сжатие – уменьшает дисковое пространство, но ведет к потере информативности проведенного моделирования. Пользователь может найти для себя баланс между потерей информативности и экономией места на диске.

Вкладка содержит следующие опции и поля настройки:

- 1 – опция позволяет создавать выходной читабельный ASCII-файл данных. Для такого типа файлов сжатие не производится;
- 2 – сжатие только для результатов TRAN-анализа;
- 3 – разрешить первый порядок сжатия;
- 4 – разрешить второй порядок сжатия;

5 – максимальное число точек, которые могут быть сжаты в две конечные точки;

6 – относительная ошибка, разрешенная между сжатыми и несжатыми данными;

7 – абсолютная ошибка напряжения, которую может допустить алгоритм сжатия;

8 – абсолютная ошибка тока, которую может допустить алгоритм сжатия;

9 – настройки по умолчанию.

Настройки **Save Default** (Сохранять по умолчанию), изображенные на рисунке 11, используются, если пользователь явно не указывает, какие узловые напряжения должны быть сохранены в процессе моделирования.

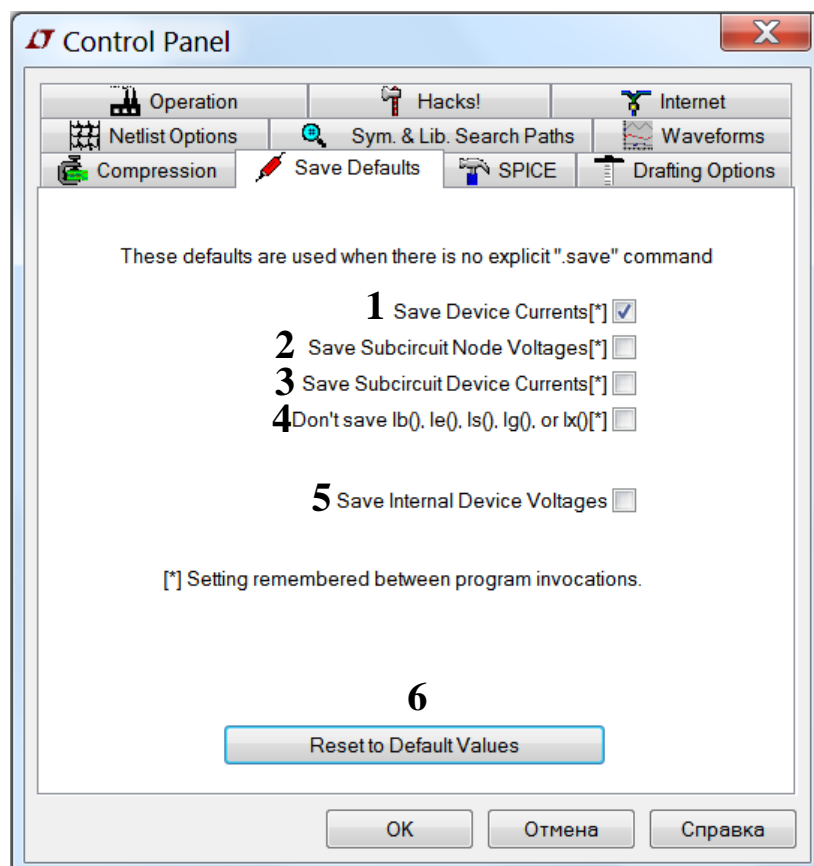


Рис. 11. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Save Default** (Сохранять по умолчанию)

Вкладка **Save Default** (Сохранять по умолчанию) содержит следующие настройки:

1 – сохранять токи устройств: позволяет строить диаграммы токов. Выбор опции также необходим, если предполагается строить диаграммы потерь;

2 – сохранять узловые напряжения подсхем: позволяет строить диаграммы узловых напряжений в подсхеме. Выбор этой опции позволяет контролировать узловые потенциалы в иерархических схемах;

3 – сохранять токи устройств подсхем: позволяет строить диаграммы токов в подсхемах. Выбор этой опции позволяет контролировать токи в иерархических схемах;

4 – позволяет сохранять только коллекторные токи транзисторов, что способствует снижению размера файла данных.

5 – позволяет строить диаграммы напряжений внутренних устройств. Для пользователей эта опция не имеет особого смысла, т. к. в основном используется разработчиками программы;

6 – настройки по умолчанию.

Вкладка **SPICE** (настройка параметров моделирования) (рис. 12) позволяет настраивать различные установки симулятора LTspice.

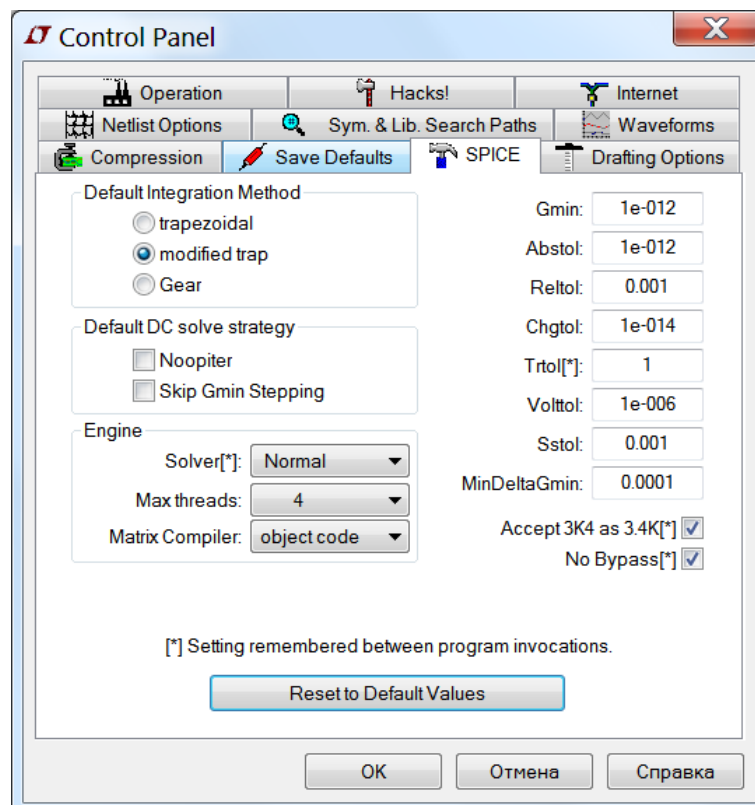


Рис. 12. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **SPICE** (настройка параметров моделирования)

Параметры Gmin, Abstol, Keltol, Chgtol, Volltol, Sstol и MinDeltaGmin не запоминаются при перезапуске программы, но могут быть изменены пользователем при помощи директивы .options для каждого конкретного моделирования.

Область Default Integration Method (Метод интегрирования, принятый по умолчанию) дает возможность выбрать метод

интегрирования, который будет использоваться вычислителем симулятора LTspice:

- trapezoidal – трапецеидальный;
- modified trap – модифицированный трапецеидальный;
- Gear – метод Гира.

Default DC solve strategy (Стратегия поиска рабочей точки, принятая по умолчанию) – область, где можно выбрать стратегию поиска рабочей точки для текущего запуска программы:

- Noopiter – перейти напрямую к подбору Gmin,
- Skip Gmin Stepping – пропустить пошаговый подбор Gmin

LTspice содержит две версии SPICE, одна из которых содержит нормальный вычислитель (Normal), а другая – альтернативный (Alternate). Alternate – это вычислитель, который обеспечивает меньшую ошибку округления. Он работает в два раза медленнее, чем Normal, но обеспечивает лучшую устойчивость и в тысячу раз большую внутреннюю точность вычисления. Пользователь может выбрать тип вычислителя в области Solver (Вычислитель) вкладки SPICE.

В LTspice есть настройка Accept 3K4 as 3.4K, которая позволяет понимать десятичную запись величин, где множитель заменяет десятичную точку (5к6=5.6к).

На рисунке 13 показана вкладка **Drafting Options** (Опции рисования).

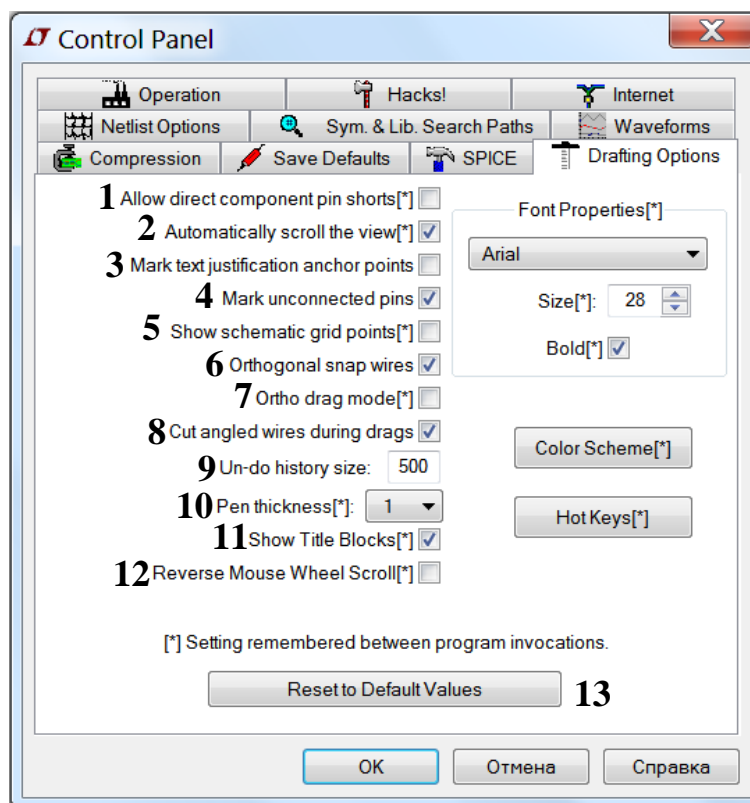


Рис. 13. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Drafting Options** (Опции рисования)

Данная вкладка используется для настройки рисования и ввода текста. Содержит следующие настройки:

1 – позволять напрямую закорачивать выводы компонента, т.е. не удалять связь, проходящую через компонент и закорачивающую его выводы;

2 – автоматически прокручивать изображение во время редактирования проектируемой схемы, если курсор приближается к его краю;

3 – отмечать точки привязки текста, а именно маленький кружок для индикации точки привязки текстового блока;

4 – отмечать неподключенные ножки, а именно маленький квадрат для индикации неподключенных выводов компонентов;

5 – показывать точки сетки на схеме;

6 – прямоугольные изломы связей, данная опция позволяет связям тянуться только в вертикальном или горизонтальном направлениях. Начинаться, заканчиваться и менять направление они могут только в узлах сетки. Если нажать и удерживать клавишу <Ctrl>, то связи можно «тянуть» в любом направлении;

7 – режим произвольного рисования. При выборе этой опции – связи могут «тянуться» в любом направлении. Начинаться, заканчиваться и менять направление они могут только в узлах сетки. При нажатии и удерживании клавиши <Ctrl> связи можно «тянуть» только в горизонтальном или вертикальном направлениях;

8 – резать угловые связи в течение рисования. При использовании команды **Drag** (Тащить) перпендикулярную связь можно «сломать», щелкнув по ней левой кнопкой мышки;

9 – установить размер буфера редактирования/восстановления;

10 – рисовать толстыми линиями, увеличить ширину всех линий схемы;

11 – показать титульный блок (опция для внутреннего использования);

13 – настройки по умолчанию.

Область Font Properties дает возможность определить свойство отображаемого шрифта, где:

- Font Size — размер шрифта;
- Bold Font — жирный шрифт;
- Sans Serif — гротесковый шрифт.

Опция Color Schemes (Цвета редактора схем) - настройка цветов редактора, а Hot Keys (Горячие клавиши) позволяет вызвать окно Keyboard Shortcut Map (Карта быстрых клавиш) (рис. 9) и программировать клавиатурные сокращения.

Изображенная на рисунке 14 вкладка **Netlist Options** (Опции списка соединений) панели управления позволяет настраивать список соединений моделируемой схемы.

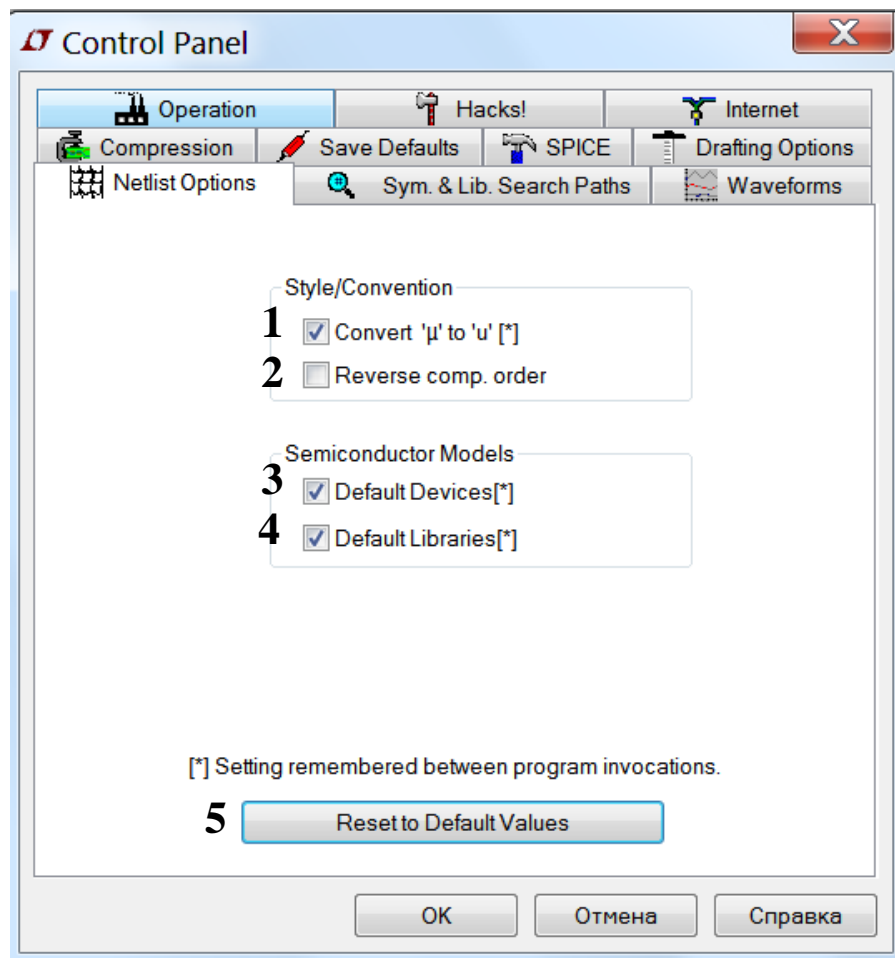


Рис. 14. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Netlist Options** (Опции списка соединений)

Настройка области **Style/Convention** (Стиль/Соглашение):

1 – заменяет все символы "μ" на "u";

2 – обратный порядок схемных компонентов в списке связей.

Настройка области **Semiconductor Models** (Модели полупроводников):

3 – устройства, принятые по умолчанию, т.е. для диодов и транзисторов включение по умолчанию в список соединений строки `.model D D`, `.model NMOS NMOS`, `.model NPN NPN` и т.п.;

4 – библиотеки, принятые по умолчанию, т.е. для диодов и транзисторов включает в список соединений директивы `.lib`, указывающие на библиотеки, принятые по умолчанию;

5 – настройки по умолчанию.

Во вкладке **Sym. & Lib. Search Paths**, которая находится в окне редактирования, возможно прописывать путь к библиотекам с клавиатуры, скопировав его из открытого окна Windows [27].

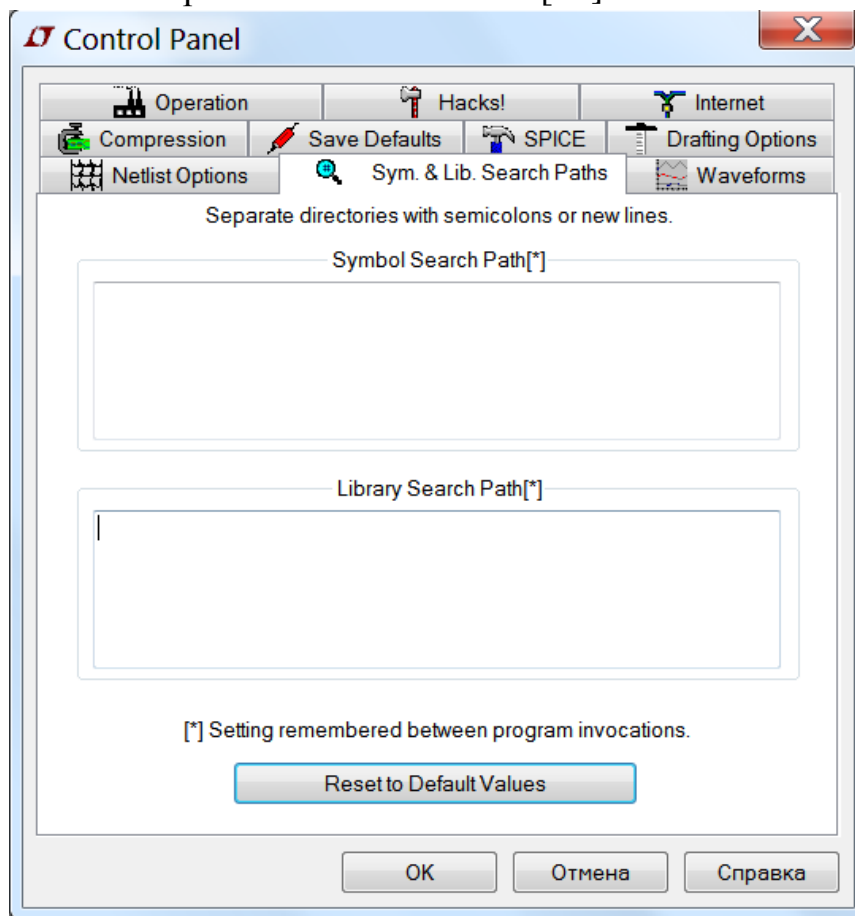


Рис. 15. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Sym. & Lib. Search Paths** (Путь поиска моделей и библиотек)

Вкладка **Waveforms** (Диаграммы) показана на рисунке 16.

Данная вкладка позволяет настраивать параметры графической информации, которая выводится в окне плоттера. В ней содержатся следующие настройки:

1 – ширина трассировки данных позволяет чертить диаграммы толстой линией;

2 – ширина курсора;

3 – использовать радианы в выражениях для диаграмм;

4 – использование курсора «XOR»: курсор становится видно независимо от того, какой цвет экрана находится за курсором. Т.е. курсор находится в высоком контрасте с фоном, но не обязательно с графиком. Например, если фон черный, курсор белый и наоборот. Использование курсора «XOR» крайне желательно, но не всё оборудование и драйверы поддерживают данную функцию.

5 – выбор стиля, размера и жирности шрифта для плоттера;

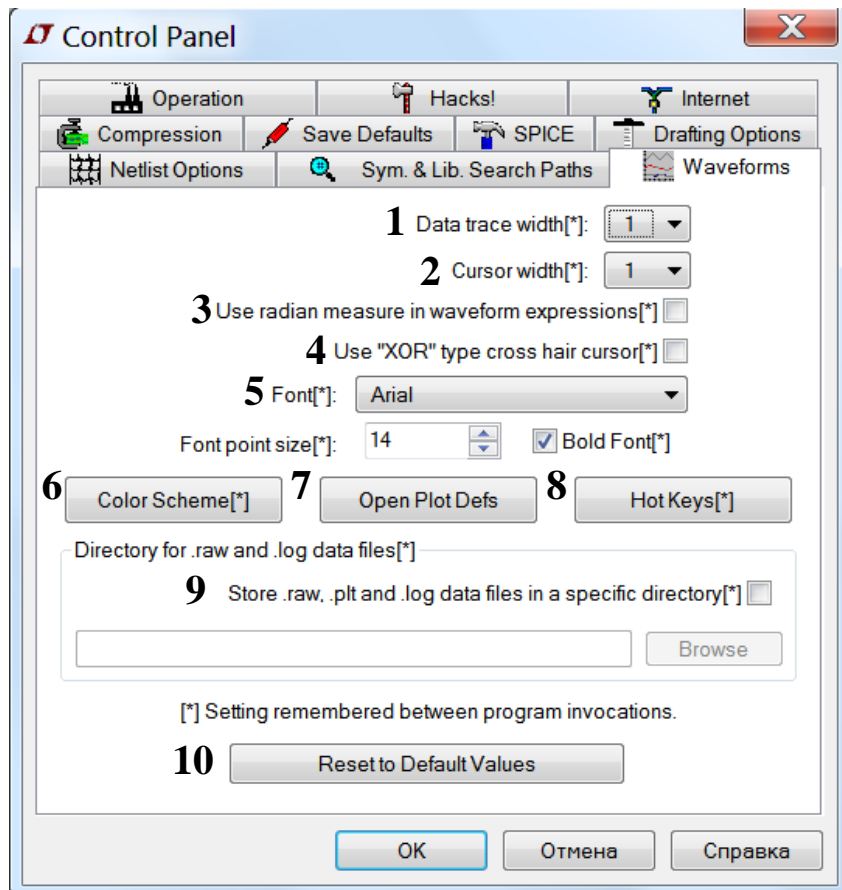


Рис. 16. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Waveforms** (Диаграммы)

6 – редактора цветовой палитры графиков, схем и списка соединений (рис. 17).

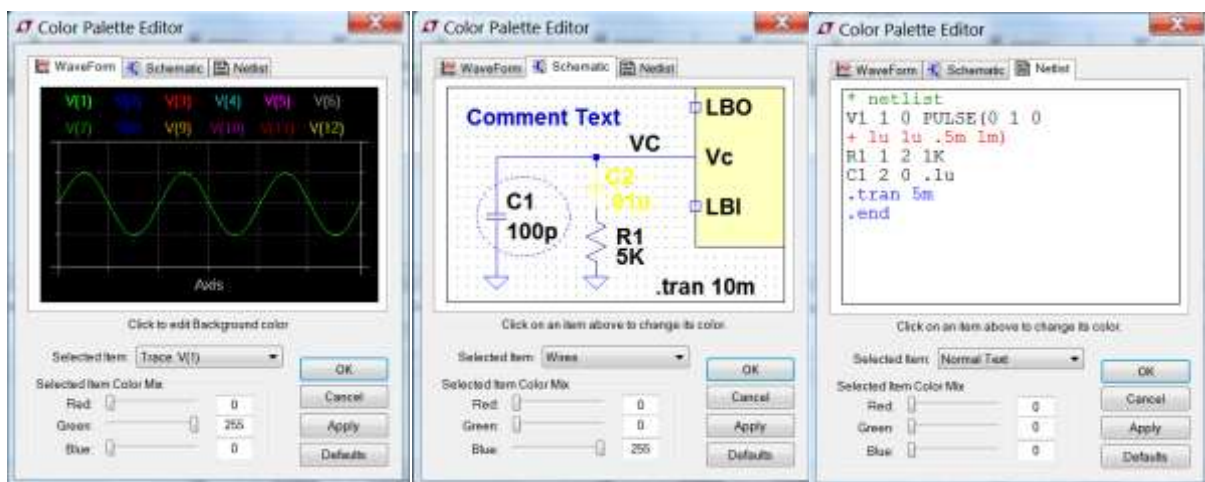


Рис. 17. Редактирование цветовой палитры графиков (а), схем (б) и списка соединений (в)

7 – пользователь может создавать свои (помимо уже существующих в LTSpice) функции и константы с тем, чтобы использовать их для

обработки данных в окне плоттера. Данные функции и константы сохраняются в файле plot.defs, который находится в корневом каталоге программы LTspice;

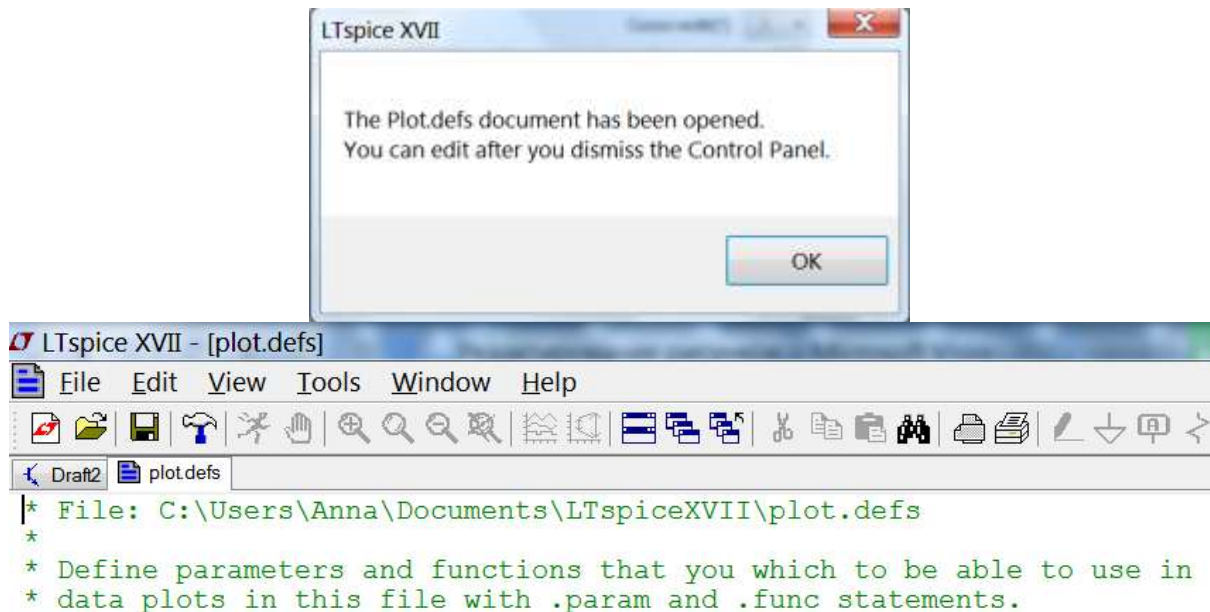


Рис. 18. Пользовательский редактор функций и констант

8 – кнопка Hot Keys (Горячие клавиши) позволяет вызвать окно Keyboard Shortcut Map (Карта быстрых клавиш) (рис. 9);

9 – выбор места хранения .raw .pit и .log файлов;

10 – настройки по умолчанию.

Вкладка **Operation** (Функционирование) изображена на рисунке 19. Позволяет настраивать некоторые параметры функционирования программного пакета LTspice. Она содержит следующие настройки:

1 – образец укладки окон, принятый по умолчанию: горизонтальная (Horz) и вертикальная (Vert) ориентация;

2 – вычерчивание диаграмм. Данная настройка позволяет вычеркивать результаты моделирования в течение самого процесса моделирования;

3 – генерация расширенного списка настроек. Выводит полный список связей, расширенный подсхемами, в файл отчета с расширением log;

4 – автоматическое сохранение открытых файлов при запуске моделирования;

5 – автоматическое удаление необработанных .raw файлов;

6 – выбор изображения на заднем плане при запуске программы LTSpiceXVII;

7 – настройка позволяет выбрать размер значков;

8 – возможность выбрать процентный объем памяти для быстрого доступа к преобразованиям;

9 – каталог для временного хранения данных моделирования и файлов изменений;

10 – настройки по умолчанию.

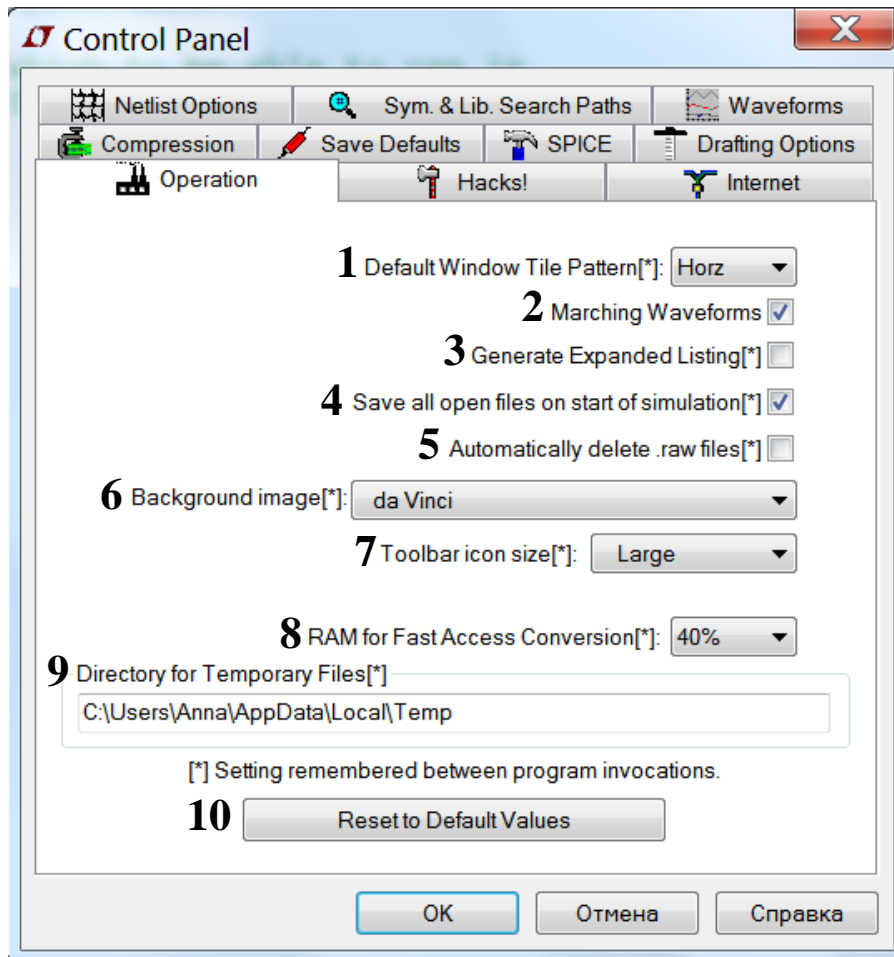


Рис. 19. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Operation** (Функционирование)

На рисунке 20 приведена вкладка **Hacks** ("Хакерские штучки").

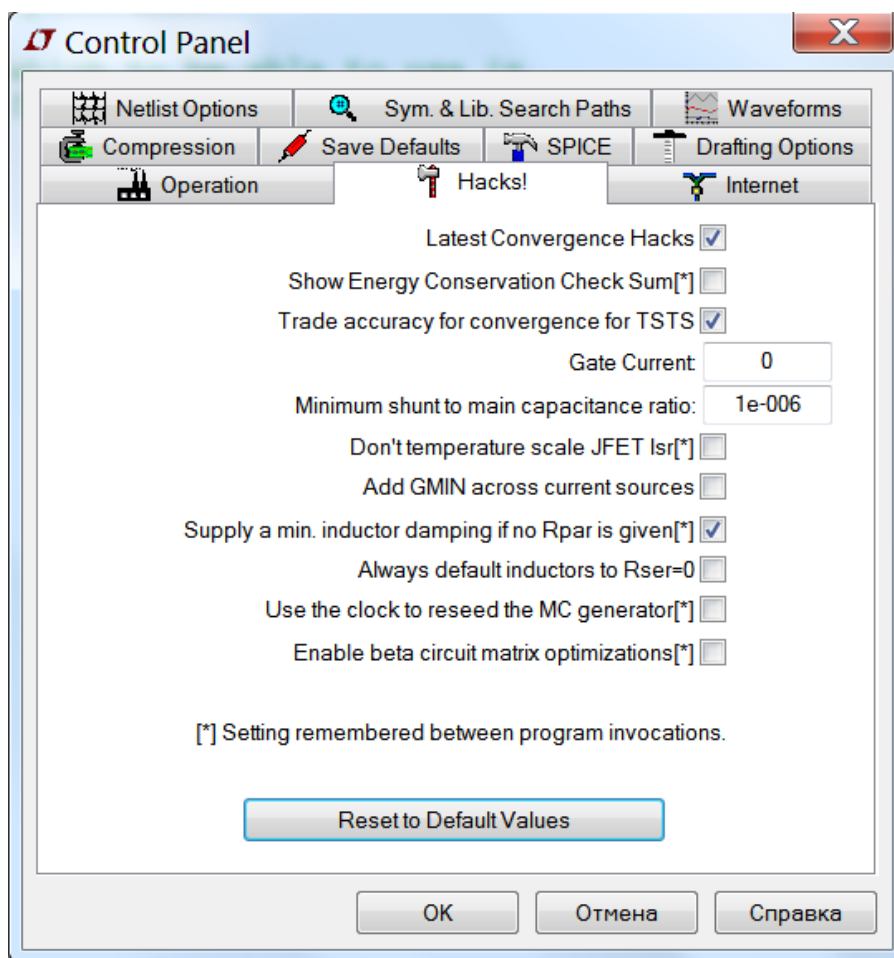


Рис. 20. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Hacks** («Хакерские штучки»)

Ранее она использовалась для внутренней разработки программы, но, по признанию разработчиков, к настоящему времени устарела. Опции в этой вкладке рекомендуется не трогать. С помощью кнопки **Reset to Default Values** можно восстановить значение этих опций, принятое по умолчанию [25].

Вкладка **Internet** (Интернет) (рис. 21) позволяет пользователю регулировать обновление программного пакета LTSpiceXVII. Она содержит:

1 – данная опция позволяет запретить использование кэширования файлов для обновления;

2 – в целях безопасности LTSpice использует свой и конфиденциальный 128-битный алгоритм проверки суммы, подтверждающий успешное завершение приема файлов обновления из Интернета. С помощью данной опции идентификация может быть заблокирована в случае ошибки этого алгоритма. Однако за длительное время эксплуатации программы не было зарегистрированных случаев сбоя

этого алгоритма и поэтому не рекомендуется нарушать эту характеристику безопасности. [25]

3 – в поле указан интернет-адрес сайта корпорации Linear Technology.

4 – в поле Connection Type можно выбрать тип соединения;

5 – настройки по умолчанию.

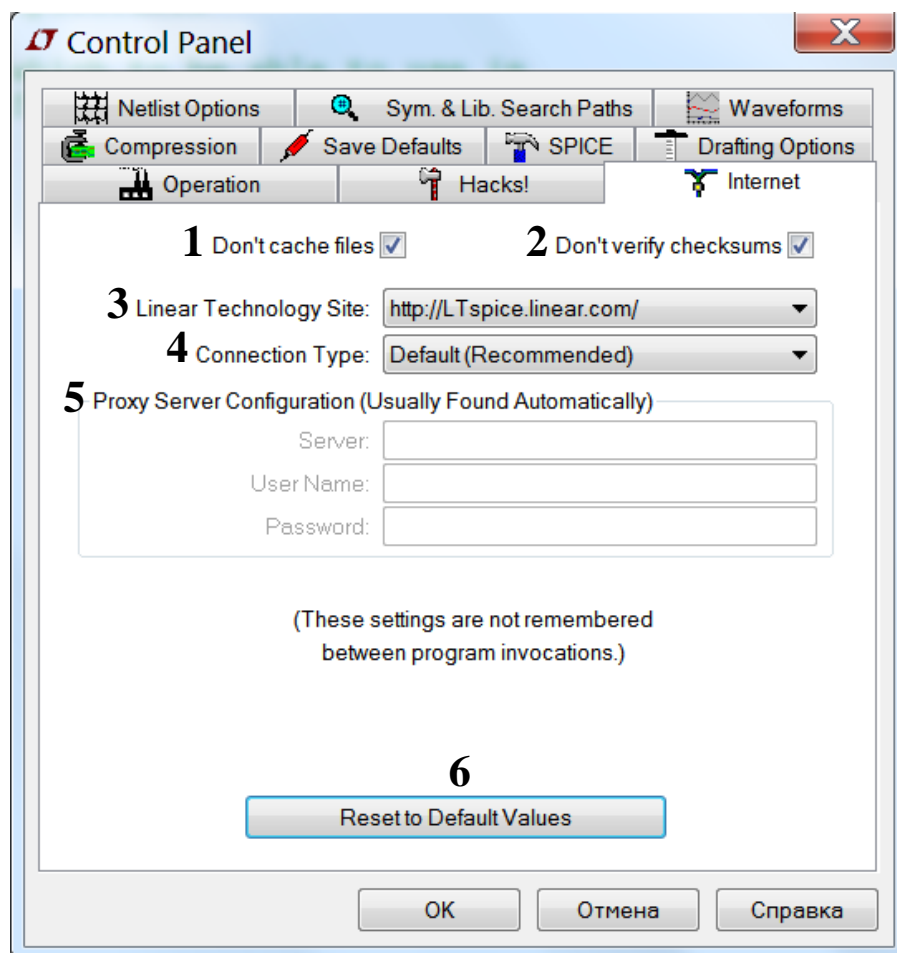


Рис. 21. Окно **Control Panel** (Панель управления), вкладка **Internet** (Интернет)

3.2.1.2 Директивы моделирования

Директивы моделирования программного пакета LTSpice XVII позволяют использовать разнообразные методы исследования интегральных схем устройств. С их помощью пользователь может определять режимы моделирования схем, задать начальные условия и различные параметры моделирования, запуска и остановки моделирования, управлять выдачей результатов моделирования, а также создавать модели устройств и функций [25,28]. Ниже кратко представлены директивы моделирования LTSpice XVII:

.lib – подключение библиотеки моделей или подсхем;
.op – выведение статического режима схемы (определение рабочей точки);
.ac – анализ частотных характеристик;
.dc – анализ режима по постоянному току при изменении постоянного напряжения или тока;
.tran – анализ переходных процессов (включая Фурье-анализ) в линейных и нелинейных электрических цепях;
.step – анализ схемы с использованием вариации какого-либо параметра;
.temp – температурный анализ схемы;
.noise – анализ шума;
.options – установка параметров моделирования;
.param – создание переменных, которые определяет сам пользователь;
.backanno – связывание имен выводов с токами;
.four – анализ Фурье;
.func – функция, определяемая пользователем;
.ferret – загрузка файла из интернета;
.global – создание глобальных узлов в схеме;
.ic – задание начальных условий для анализа переходных процессов;
.include – включение в файл текстового описания содержания другого файла (полезно для включения описаний библиотечных моделей или подсхем);
.savebias – на диск записывается текстовый файл состояния, который можно загрузить директивой .loadbias при последующей симуляции;
.loadbias – загрузка из файла состояние схемы. Данная директива используется совместно с директивой .savebias с помощью которой узловые потенциалы, вычисленные в результате моделирования, сохраняются в файл;
.measure – измерение при определенных пользователем условиях. Первый тип директивы обращается к отдельной точке на оси абсцисс (независимой переменной, откладываемой по горизонтальной оси), а другой тип – к области оси абсцисс.
.model – описание модели схемного элемента;
.net – расчет параметров входной и выходной проводимости двухполюсника или четырехполюсника;
.nodeset – позволяет задать начальное значение узловых потенциалов на нулевой итерации при расчете режима по постоянному току;
.save – ограничение количества сохраненных данных. Сохраняет только интересующие узловые напряжения и токи в выводах схемных элементов;
.tf – расчет передаточной функции по постоянному току;

.wave – вывод сигналов из различных точек схемы в аудиофайл формата WAV;

.subckt – создание подсхемы и вызов её по имени;

.ends – завершение описания подсхемы;

.end – автоматическая служебная директива, включенная в каждое текстовое описание схемы (netlist). Означает конец задания.

Ввод директив осуществляется с помощью функций запуска моделирования, ввода текста и Spice-директивы, которые можно найти на панели управления программы LTSpiceXVII (рис. 22).

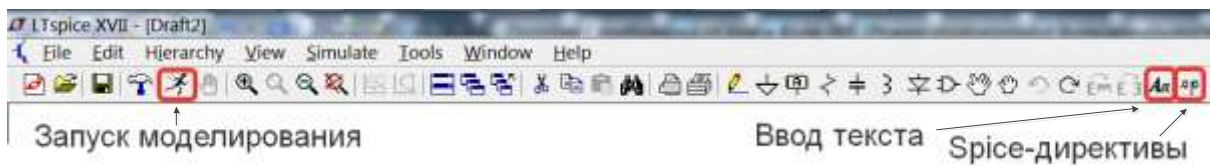


Рис. 22. Панель управления LTSpiceXVII

Пример создания директивы для анализа частотных характеристик во вкладке Run=>Edit Simulation Command (Редактирование команды моделирования) представлен на рисунке 23.

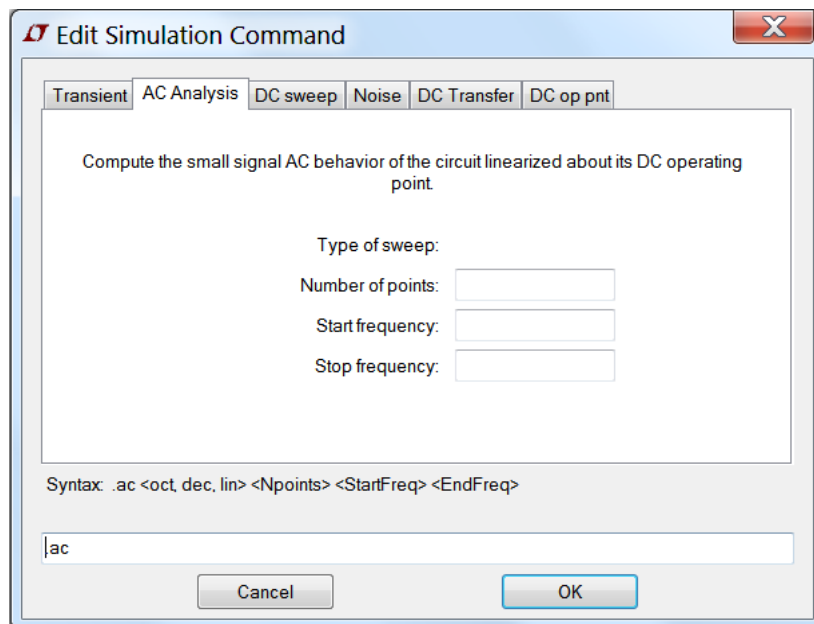


Рис. 23. Панель управления LTSpiceXVII

Если директива вводится в текстовом редакторе, то она должна начинаться с точки и выделяться как Spice-directive, а не Comment. В ином случае она будет читаться как текст, а не как директива (рис. 24).



Рис. 24. Вкладка Edit Simulation Command (Редактирование команды моделирования)

3.2.2 Пример моделирования аналоговой схемы

На рисунке 25 представлен схемный редактор LTSpice XVII, в котором была создана схема тестирования npn- и pnp- транзисторов технологического процесса 3КБТ (АВМК_1.7).

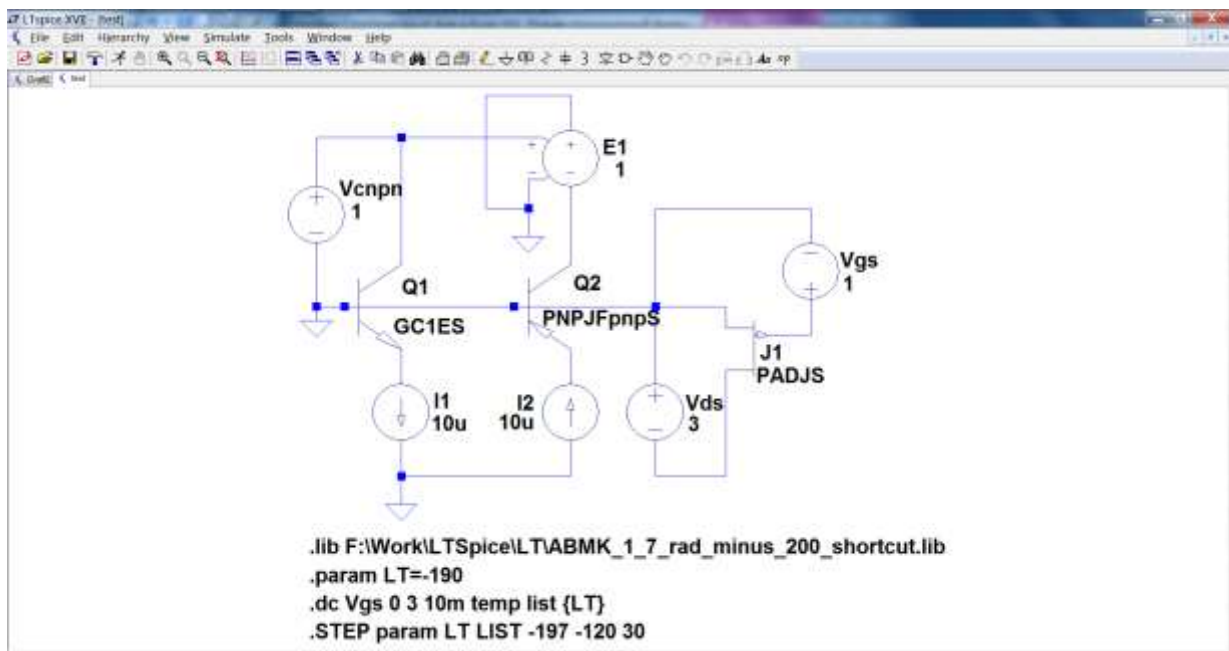


Рис. 25. Окно схемного редактора LTspice

Выбор библиотек и элементов (рис. 26) можно осуществить, нажав быструю клавишу F2, либо Component (рис. 8).

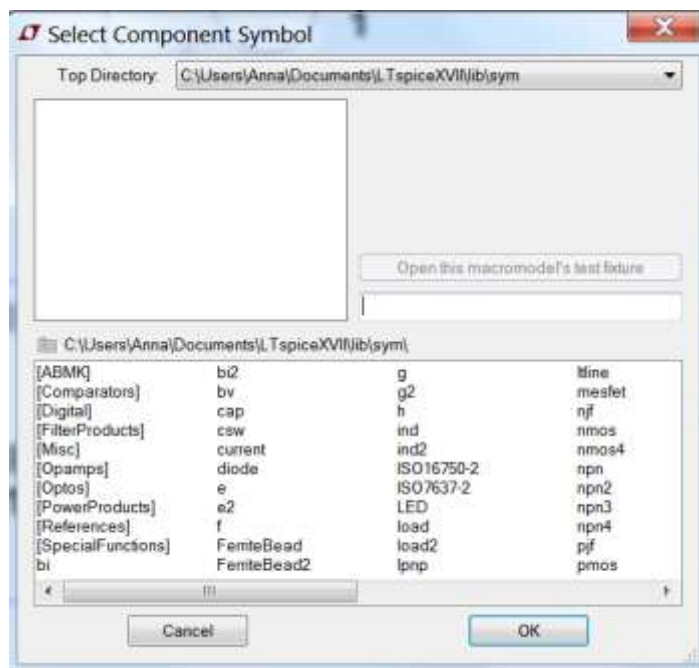
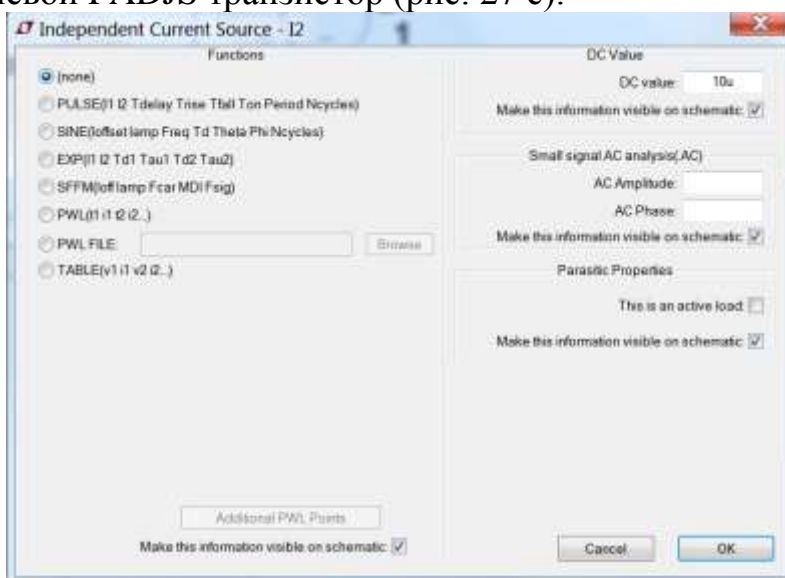


Рис. 26. Вкладка Component (Выбор элементов)

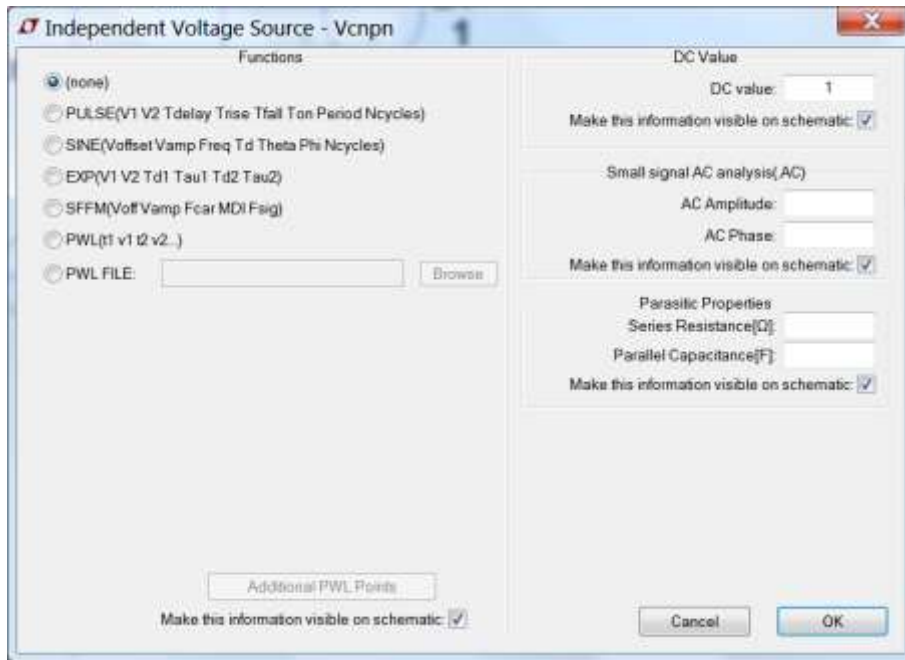
Для создания данной схемы были введены следующие элементы:

- источник тока (рис. 27 а);
- источник напряжения (рис. 27 б);
- источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН, рис. 27 в);
- биполярный GC1ES npn-транзистор (рис. 27 г);
- биполярный PNPJFnpnS – npn-транзистор (рис. 27 д);
- полевой PADJS транзистор (рис. 27 е).

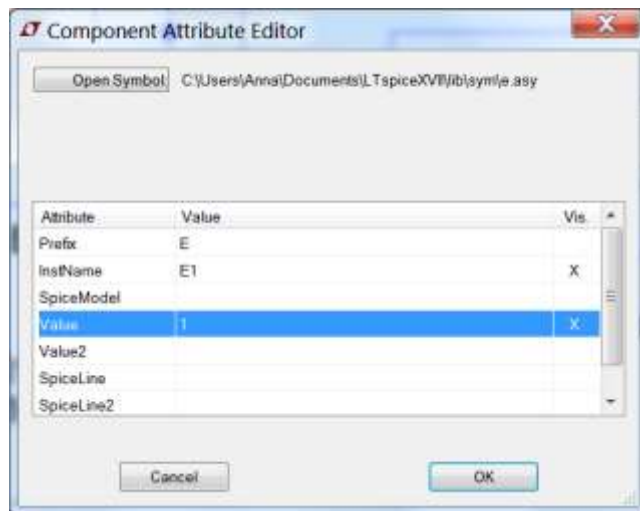


(а)

Рис. 27. Выбор параметров элементов (начало)



(б)



(в)



(г)



(д)

Рис. 27. Выбор параметров элементов (продолжение)



(e)

Рис. 27. Выбор параметров элементов (окончание)

Для изменения моделей транзисторов можно нажать клавишу Pick New Transistor/JFET (рис. 27 г, д, е) после чего появится список моделей биполярных (рис. 28 а), либо полевых (рис. 28 б) транзисторов.

Part No.	Manufacturer	Polarity	Vceo[V]	Ic[mA]	SPICE Model
2N2907	NXP	pnp	40.0	600	.model 2N2907 PNP(Is=1E-14 VAF=120
2N3906	NXP	pnp	40.0	200	.model 2N3906 PNP(Is=1E-14 VAF=10C
2N4126	Fairchild	pnp	25.0	200	.model 2N4126 PNP(Is=1.41fXti=3 Eg=1
2N5087	Fairchild	pnp	50.0	100	.model 2N5087 PNP(Is=6.734fXti=3 Eg=
2N2905A	NXP	pnp	60.0	600	.model 2N2905A PNP(Is=650.6E-18 Xti=
2N4403	Fairchild	pnp	40.0	600	.model 2N4403 PNP(Is=650.6E-18 Xti=3
2N5401	Fairchild	pnp	150.0	600	.model 2N5401 PNP(Is=21.48fXti=3 Eg=
2NE771	Fairchild	pnp	15.0	200	.model 2NE771 PNP(Is=5.4E-18 Vbe=2

(a)

Part No.	Manufacturer	Polarity	SPICE Model
LSJ689A	Linear Systems	pjf	.model LSJ689A PJF(Beta=3.5m Vto=-1.40 Lambda=1.1m Is=0.4
LSJ689B	Linear Systems	pjf	.model LSJ689B PJF(Beta=3.0m Vto=-1.75 Lambda=2.0m Is=0.4
LSJ689C	Linear Systems	pjf	.model LSJ689C PJF(Beta=2.5m Vto=-3.05 Lambda=2.0m Is=0.4
2N5114	Fairchild	pjf	.model 2N5114 PJF(Beta=510.2u Betatc=-5 Rd=1 Rs=1 Lamb
2N5460	Siliconix	pjf	.model 2N5460 PJF(Is=1.5p Alpha=1e-4 Vt=300 Vto=-3.4 Vt=
2N5461	Siliconix	pjf	.model 2N5461 PJF(Is=1.5p Alpha=1e-4 Vt=300 Vto=-4.3 Vt=
2N5462	Siliconix	pjf	.model 2N5462 PJF(Is=1.5p Alpha=1e-4 Vt=300 Vto=-5.4 Vt=

(б)

Рис. 28. Списки моделей биполярных (а) и полевых (б) транзисторов

После создания схемы необходимо подключить требуемую библиотеку. В данном случае она будет расположена по пути `.lib F:\Work\LTSpice\LT\ABMK_1_7_rad_minus_200_shortcut.lib` (рис. 29).

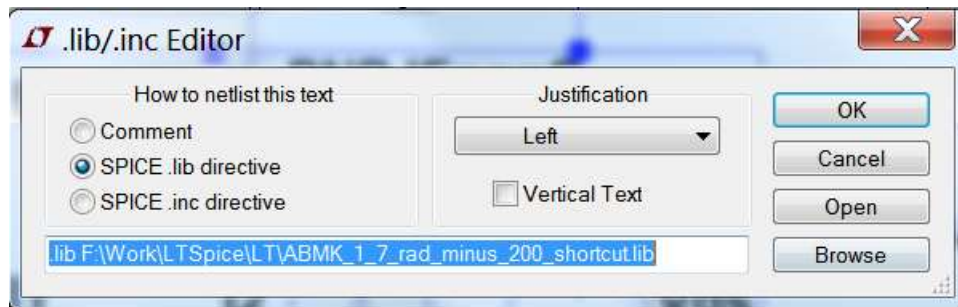


Рис. 29. Привязка библиотеке к проекту

Следующим шагом будет создание необходимых параметров работы схем – `.param LT=-190`. Данная директива задает температурный параметр, непосредственно используемый в библиотеке `ABMK_1_7_rad_minus_200_shortcut` (в данном случае мы задавали его не через директиву `.temp`) (рис. 30).

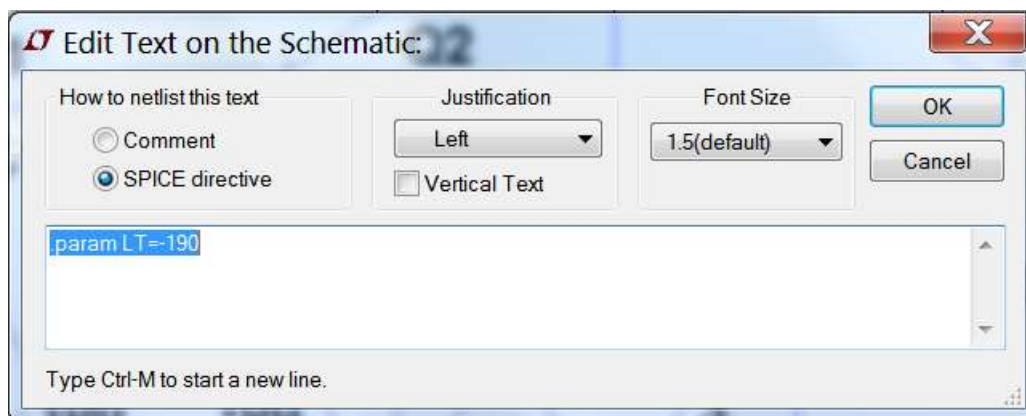


Рис. 30. Создание директивы `.param`

Через директиву `.dc Vgs 0 3 10m temp list {LT}` был задан анализ режима схемы при изменении постоянного напряжения V_{gs} , а температура была выражена через параметр `LT` (рис. 31).

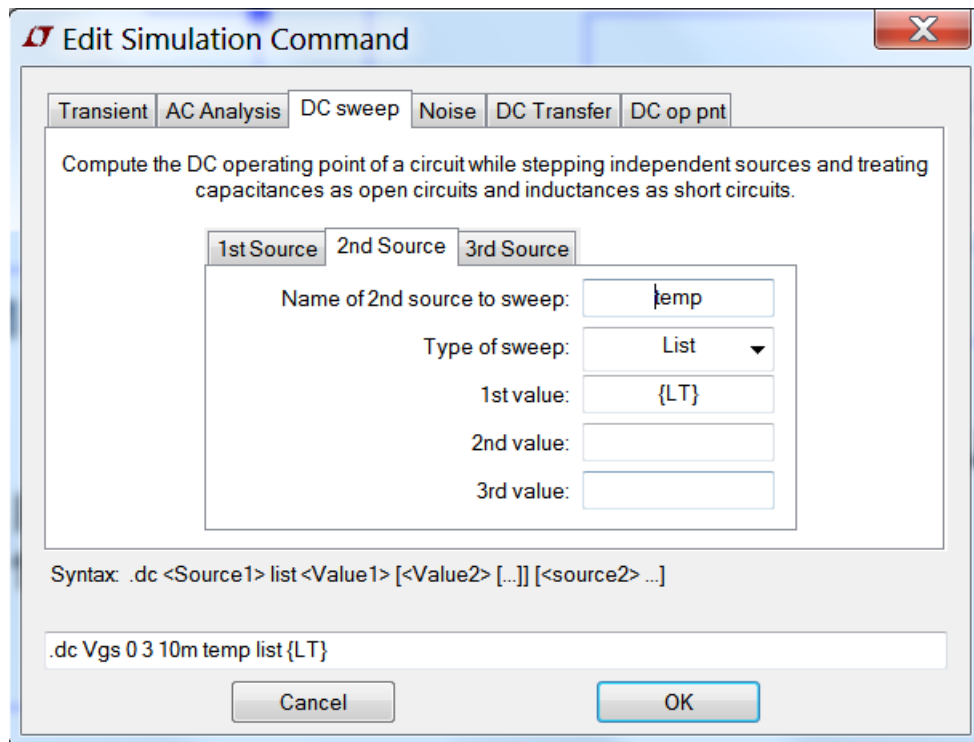


Рис. 31. Создание директивы .dc

Директива `.STEP param LT LIST -197 -120 30` позволила выразить вариацию температурного параметра LT (рис. 32).

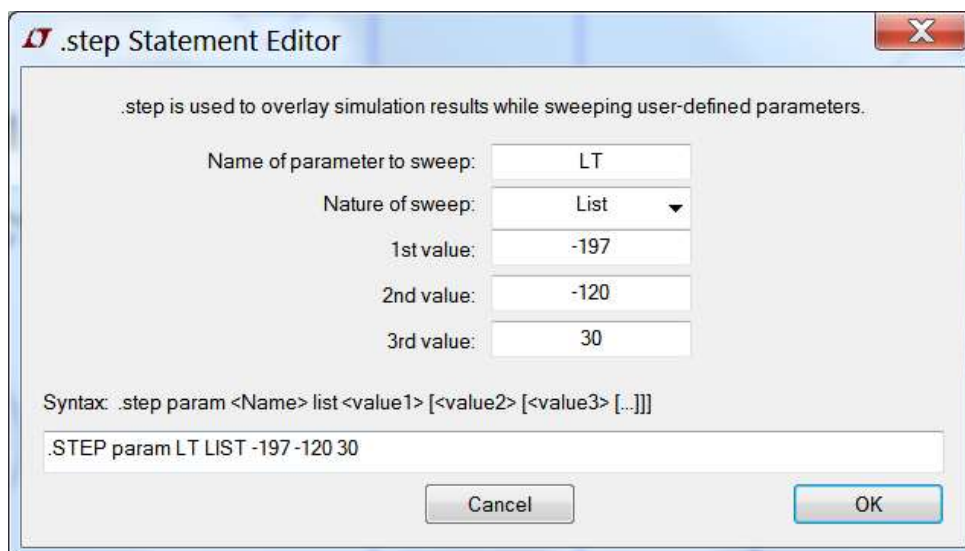


Рис. 32. Создание директивы .step

LTspice, как и все симуляторы Spice, работает с использованием текстового файла списка соединений (netlist). В нем перечислены схемные элементы, узлы соединений, описание моделей и директивы. Список соединений возможно создавать вручную в любом текстовом редакторе. Если в дальнейшем поставить файлу расширение net, cir или sp, то они распознаются LTspice как списки соединений.

Рассмотрим структуру тестового файла списка соединений (netlist) [25,28].

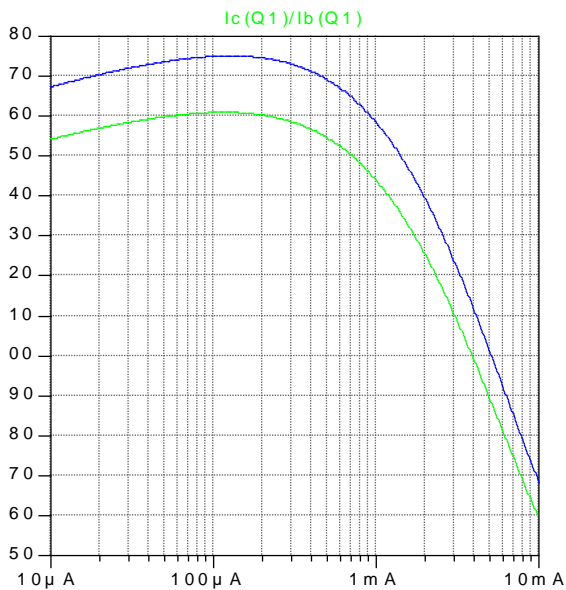
Первая строка списка игнорируется, т. к. предполагается, что это заглавие файла. В последнюю строку обычно вписывается директива .end, которая, впрочем, может быть опущена. Любые строки после строки .end игнорируются. Ниже представлен список соединений (netlist) для данной схемы.

```
* (расположение папки с файлами)\LTSpice\LT\test.asc
I1 N004 0 10u
E1 0 N002 N001 0 1
Q1 N001 0 N004 0 GC1ES
J1 N006 N003 0 PADJS
Q2 N002 0 N005 0 PNPJFpnpS
Vcnpn N001 0 1
Vds 0 N006 3
Vgs N003 0 1
I2 0 N005 10u
.model NPN NPN
.model PNP PNP
.lib C:\Users\Anna\Documents\LTSpiceXVII\lib\cmp\standard.bjt
.model NJF NJF
.model PJF PJF
.lib C:\Users\Anna\Documents\LTSpiceXVII\lib\cmp\standard.jft
.dc Vgs 0 3 10m temp list {LT}
.lib F:\Work\LTSpice\LT\ABMK_1_7_rad_minus_200_shortcut.lib
.param LT=-190
.STEP param LT LIST -197 -120 30
.backanno
.end
```

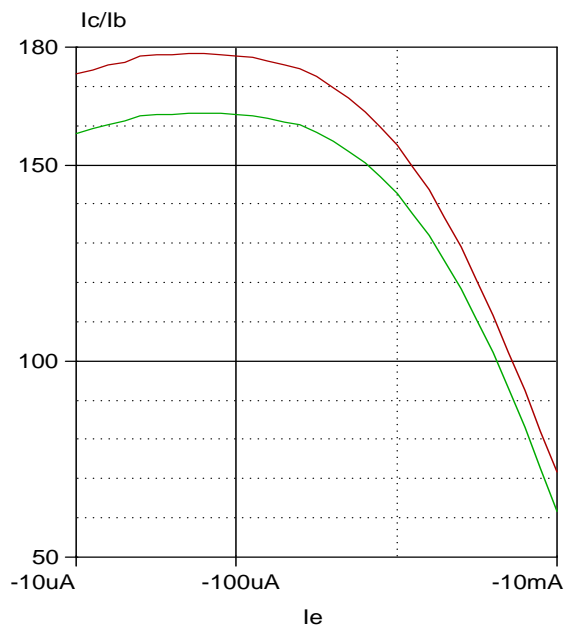
Далее будут описаны результаты проведённых исследований в программном пакете LTSpice XVII. Модели биполярных транзисторов АБМК-1.3 GC1ES и PNPJFpnpS подстроены для совпадения результатов измерений и моделирования в нормальных условиях. Для pnp-транзисторов (рис. 33) совпадение – хорошее, для pnp (рис. 34) – удовлетворительное.

В температурном диапазоне проверялось совпадение результатов измерений и моделирования:

- прямого падения напряжения на эмиттерном переходе V_{be} от тока коллектора I_c ;
- статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером β при заданном I_c .

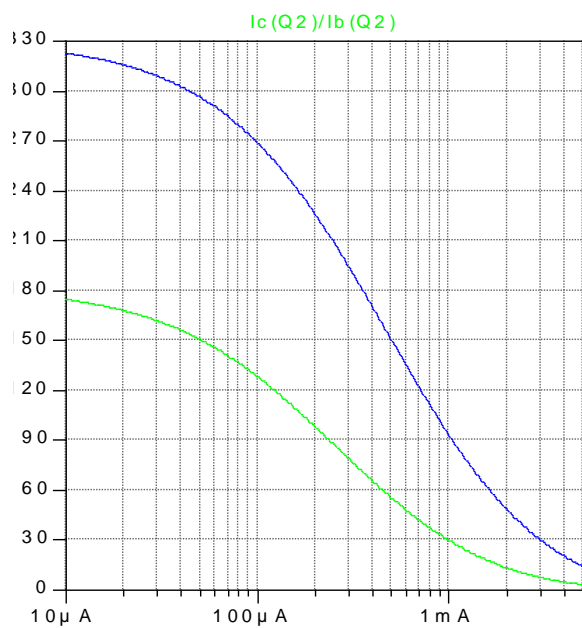


Моделирование GC1ES

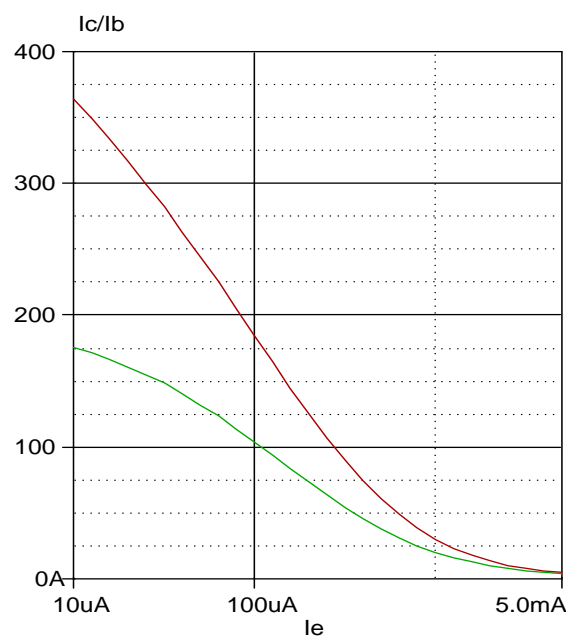


Измерения GC1E

Рис. 33. Зависимость β от тока эмиттера и напряжения коллектор-база (нижняя кривая $V_{cb}=1V$, верхняя - $V_{cb}=3V$ для транзистора GC1E, модель GC1ES)



Моделирование PNPJFnpS



Измерения PNPJFnp

Рис. 34. Зависимость β от тока эмиттера и напряжения коллектор-база (нижняя кривая $V_{cb}=1V$, верхняя - $V_{cb}=3V$ для транзистора PNPJFnp, модель PNPJFnpS)

В таблице 3 приведены данные $\beta=f(T)$ и выделены жирным области, в которых не рекомендуется применение модели.

Таблица 3

Сравнение β транзисторов GC1ES и PNPJFnpS при различных температурах

Имя модели		Температура, °C								
		-197	-160	-120	-80	-50	-10	30	70	110
GC1ES, β	Измер.	3,54	14,07	33,38	61,24	84,6	108,14	158,3	200,84	239,87
	Модел.	3,57	10,7	24,60	46,56	68,28	107,27	158,4	223,0	302,47
PNPJFnpS, β	Измер.	2,48	10,47	28,99	53,14	68,14	88,66	103,82	119,3	130,24
	Модел.	2,44	7,37	17,51	34,31	52,25	84,64	128,18	184,52	255,33

Исходная встроенная модель p-ПТП с температурными параметрами $V_{toTC}=-0.00242$, $\beta_{TCSE}=-0.504$ хорошо описывает ВАХ транзисторов в нормальных условиях и ограниченном температурном диапазоне (до минус 120°C) и качественно не характеризует уменьшение тока стока при температурах ниже минус 120°C (см. табл.4).

Таблица 4

Сравнение I_{dmax} и V_{TO} исходных моделей транзисторов PADJS при различных температурах

Имя модели		Температура, °C								
		-197	-160	-120	-80	-50	-10	30	70	110
Исходная модель PADJS $I_{dmax}@V_{gs}=0, V_{sd}=3V$	Измер.	5,21м	11,68м	14,50м	14,03 м	12,87 м	11,26 м	9,83 м	8,48 м	7,51 м
	Модел.	14,62м	13,97 м	13,18м	12,32м	11,65 м	10,75 м	9,85 м	8,97 м	8,12 м
Исходная модель PADJS $V_{TO}\approx V_{gs} @ I_d=5\mu, V_{sd}=3V$	Измер.	1,54	1,67	1,74	1,82	1,85	1,91	1,98	2,04	2,11

Для криогенных температур модель p-ПТП модернизирована, а именно:

- уточнен коэффициент $V_{toTC}=-0.002$;
- исключена встроенная зависимость параметра $\beta=f(T)$ за счет введения коэффициента $\beta_{TCSE}=-1e-6$;
- зависимость параметра $\beta=f(T)$ описана новым выражением с использованием глобального параметра LT

$$- \text{beta} = \{-3.16p * \text{pow}(\text{LT}, 4) + 0.342n * \text{pow}(\text{LT}, 3) + 0.113u * \text{pow}(\text{LT}, 2) - 13.4u * \text{LT} + 2.91m\}.$$

Таблица 5

Сравнение Idmax и VTO транзисторов PADJS при различных температурах

PADJS Idmax@ Vgs=0, Vsd=3V	Измер.	5,21м	11,68м	14,50м	14,03м	12,87м	11,26м	9,83м	8,48м	7,51м
	Модел.	6,08м	10,97м	12,96м	12,86м	12,03м	10,73м	10,08м	10,67м	12,35м
PADJS VTO≈Vgs @ Id=5u, Vsd=3V	Измер.	1,54	1,67	1,74	1,82	1,85	1,91	1,98	2,04	2,11
	Модел.	1,53	1,61	1,69	1,77	1,83	1,90	1,98	2,06	2,14

Следует обратить внимание, что при моделировании температурных зависимостей р-ПТП температуру необходимо задавать с использованием параметрического анализа и глобального параметра LT, как указано на схеме включения красным цветом. Результаты моделирования для директив управления, приведенных на схеме включения, иллюстрирует рисунок 35.

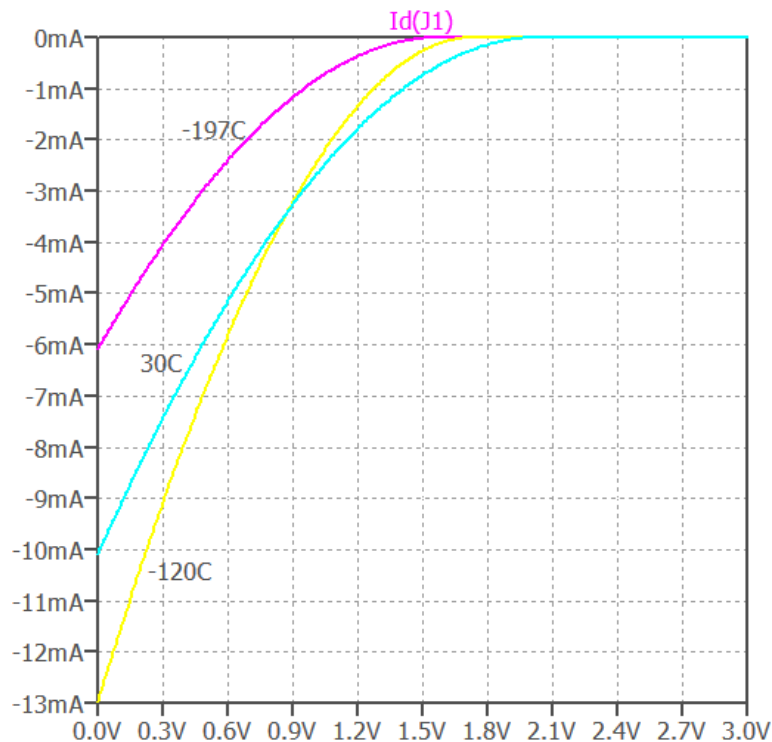


Рис. 35. Зависимость тока стока Id от напряжения Vgs при Vsd=3V для разных температур, полученная при моделировании PADJS по приведенной схеме включения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Низкотемпературные микросхемы находят применение в разных областях: космической аппаратуре, ядерной электронике, научном приборостроении, криогенных измерительных и медицинских приборах, приборах для исследований Арктики и Антарктики;

2. Не все коммерческие САПР и фирменные библиотеки SPICE-параметров моделей транзисторов пригодны для схемотехнического моделирования влияния проникающей радиации и криогенной температуры на параметры аналоговых микросхем. Необходимо их совершенствование для конкретных технологических процессов;

3. Для одновременного учета влияния радиации и низких температур в БТ и ПТП целесообразно применение САПР LTSPICE, встроенных в LTSPICE типовых моделей Гуммеля-Пуна, Шихмана-Ходжеса и приведенных в настоящем разделе математических выражений, которые устанавливают взаимосвязь параметров моделей, полупроводника и радиационного облучения. При этом, необходимо также учитывать усредненные температурные коэффициенты параметров моделей и соотношения, описывающие зависимость скорости поверхностной рекомбинации от поглощенной дозы облучения и немонотонное изменение параметра β_{ETA} в диапазоне температур от -200°C до 30°C ;

4. Возможна некоторая неадекватность моделирования ВАХ транзисторов, т.к. коэффициенты радиационных изменений параметров моделей получены из измерений, выполненных в нормальных условиях (ориентировочно от 25°C до 30°C), а применены для описания характеристик в диапазоне температур от -200°C до 30°C ;

5. Модернизированные модели GC1ES, PNPJFnpS, PADJS рекомендуется использовать при исследовании BiJFet аналоговых схем (АС) в диапазоне температур от минус 200 до плюс 30С (с ограничениями до 70С);

6. Выделенные в настоящем учебно-методическом пособии научные проблемы компьютерного моделирования элементов и устройств автоматики при низких температурах могут быть предметом специальных исследований аспирантов по дисциплине «Научно-исследовательская деятельность» (специальность 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»).

[В начало к оглавлению](#)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. Угрюмов, Е.П. Цифровая схемотехника : учеб. пособие для вузов / Е.П. Угрюмов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 790 с.
2. Лаврентьев, Б.Ф. Схемотехника электронных средств : учеб. пособие для вузов / Б.Ф. Лаврентьев. – М. : Академия, 2010. – 336 с.
3. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств : учеб. пособие для вузов / Г.И. Волович. – 3-е изд. – М. : Додэка-XXI, 2011. – 528 с.
4. Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей : моногр. / Н.Н. Прокопенко, А.С. Будяков. – Шахты : Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 231 с.
5. Прокопенко, Н.Н. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем : моногр. / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, С.Г. Крутччинский ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Н.Н. Прокопенко ; ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС». – Шахты : ЮРГУЭС, 2011. – 208 с.
6. Прокопенко, Н.Н. Нелинейная коррекция на основе управляемых коммутаторов тока и напряжения в аналоговых микросхемах : моногр. / Н.Н. Прокопенко, Н.Н. Никуличев. – Шахты : Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 115 с.
7. Интегральные индуктивности и трансформаторы аналоговых микросхем СВЧ-диапазона : моногр. / В.Г. Сапогин, С.Г. Крутччинский, Н.Н. Прокопенко [и др.] ; ГОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса». – Шахты : ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – 273 с.
8. Goryachev, M. Cryogenic transistor measurement and modeling for engineering applications / M. Goryachev, S.Galliou, P. Abbé // Cryogenics. – 2010. – Vol. 50, N6–7. – P. 381–389.
9. Ferrari, G. Measurement currents below 4K. Cryogenic electronics / G. Ferrari. – Milano, November 22, 2012 – 14 p.
10. Мокеев, А.С.. Компактная SPICE-модель КНИ МОП-транзистора для проектирования спецстойких СБИС с проектными нормами 0.35 мкм / А.С. Мокеев, С.В. Карачкин // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2014. – № 3. – С. 155–158.
11. Петросянц, К.О. Компактная макромоделль КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты / К.О. Петросянц, Л.М. Самбурский, И.А. Харитонов, А.П. Ятманов // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. – 2011. – № 1(87). – С. 20-28.

- 12.Абрамов, И.И. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем / И.И. Абрамов, О.В. Дворников. – Минск: Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006. – 286 с.
- 13.Петросянец, К.О. Схемотехнические SPICE-модели биполярных и МОП-транзисторов для автоматизации проектирования радиационно стойких БИС / К.О. Петросянец, И.А. Харитонов, М.В. Кожухов, Л.М. Самбурский // Информационные технологии. – 2015. – Том: 21, № 12. – С. 916-922.
- 14.Володин, Э.Н. Учет воздействия нейтронного облучения на биполярные ИМС ОУ при их схемотехническом моделировании / Э.Н. Володин, П.А. Дюканов, Д.С. Смирнов, Г.П. Сурков // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 2 (233). – С. 27-32.
- 15.Дворников, О.В. Комплексный подход к проектированию радиационностойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей ПР в “Spice-подобных” программах / О.В. Дворников, В.Н. Гришков // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 301-306.
- 16.Дворников, О. В. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1. Расчет «SPICE-параметров» биполярных транзисторов с использованием конструктивно-технологических и электрофизических параметров / О. Дворников, Ю. Шульгевич // Современная электроника. – 2009. – № 5. – С. 48–53.
- 17.Петросянец, К.О. Подсистемы электро-теплового моделирования СБИС и печатных плат, расширяющие возможности коммерческих САПР / К.О. Петросянец, П.А. Козылко, Н.И. Рябов, И.А. Харитонов // В сб. «Микроэлектроника -2015», М., Техносфера, 2016, стр. 439-448.
- 18.Дворников, О. В. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 4. Идентификация параметров модели Шихмана–Ходжеса полевого транзистора с р-п-переходом / О. Дворников, Ю. Шульгевич // Современная электроника. – 2009. – № 8. – С. 50–57.
- 19.Вологдин, Э.Н. Интегральное радиационное изменение параметров полупроводниковых материалов: учеб. пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств» / Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. – М., 1998. – 94 с. – Режим доступа: <http://foet.miem.edu.ru>.
- 20.Дворников, О.В. Влияние быстрых электронов на аналоговые интегральные элементы и схемы / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2012. – Выпуск 3. – С. 54-59.

21. Дворников, О.В. Влияние гамма-излучения на элементы аналоговых интегральных схем / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Доклады БГУИР. - 2012. - №3 (65). - С. 56-62.
22. Кулаков, В.М. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В.М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцов, Э.Н. Вологдин, Ю.Н. Андреев. - М.: Сов. ра-дио, 1980. - 224 с.
23. Дворников, О.В. Создание низкотемпературных аналоговых ИС для обработки импульсных сигналов датчиков. Часть 3 / О.В. Дворников, В.А.Чеховский, В.Л. Дятлов, Н.Н. Прокопенко // Современная электроника. - 2015. - № 6. - С. 34–39.
24. Ardelean, J. Preamplifiers for room temperature and cryogenic calorimetry applications based on DMILL technology / J. Ardelean, A. Hrisoho, K. Truong, P.F. Manfredi, V. Speziali, F. Svelto, M. Citterio // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1996. - Vol. A376. - P. 217-224.
25. Володин В. Я. LTSpice: компьютерное моделирование электронных схем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 400 с.: ил. + Видеоуроки (на ЭУО) — (Электроника) ISBN 978-5-9775-0543-7
26. Официальный сайт корпорации Linear Technology. URL: <http://www.linear.com> (дата посещения: 16.11.2016г.)
27. 渋谷 道雄 著. 回路シミュレータLTspiceで学ぶ電子回路 // 第2版 2016. - 504с. ISBN 978-4-274-21967-2
28. Сохор Ю.Н. Моделирование устройств в LTSpice. Учебно-методическое пособие. Псковск. гос. политехн. ин-т. - Псков: Издательство ППИ, 2008. - 165 с. - ISBN 978-5-91116-055-6.

Дополнительная литература

1. Дворников, О. Двухканальная аналоговая ИС с программируемыми параметрами / О. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов, Н. Прокопенко // Современная электроника. - 2015. - № 7. - С. 34–37.
2. Дворников, О.В. Микросхема многоканального операционного усилителя и электрометрического повторителя на радиационно-стойком базовом матричном кристалле «АБМК-1.3» / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Н.Н. Прокопенко, Е.И. Старченко // Инженерный вестник Дона. - 2013. - № 1. - URL : <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1557>.
3. Крутчинский, С.Г. Собственная компенсация в радиационно-стойких микросхемах на основе базового матричного кристалла АБМК_1_3» / С.Г. Крутчинский, Н.Н. Прокопенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика, Телекоммуникации. Управление. - СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2012. - № 2(145). - С. 137–144.

4. Дворников, О.В. Радиационно-стойкие аналоговые микросхемы для датчиков / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Е.И. Старченко // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2(3). – С. 41–50.
5. Новиков, Ю.В. Основы цифровой схемотехники. Базовые элементы и схемы. Методы проектирования / Ю.В. Новиков. – М. : Мир, 2001. – 384 с.
6. Дворников, О.В. Универсальная аналоговая микросхема для датчиков космической аппаратуры / О.В. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов // Современная электроника. – 2011. – № 3. – С. 56–65.
7. Мышляева, И.М. Цифровая схемотехника : учеб. для сред. проф. образования / И.М. Мышляева. – М. : Академия, 2005. – 400 с.
8. Основы компьютерного проектирования РЭС : учеб.-метод. пособие по проведению практ. занятий для студентов вузов / Н.Н. Прокопенко [и др.] ; ЮГБОУ ВПО «ЮРГУЭС». – Шахты : ЮРГУЭС, 2012. – 79 с.

[В начало к оглавлению](#)

Регистрационная карта

1. Автор

Серебряков А.И.

2. Заглавие

Низкотемпературные микросхемы

3. Сведения о носителе информации

- Самостоятельное электронное издание
 Электронная копия (на правах рукописи)
 Аналог издания ИСОиП (фил.) ДГТУ
 Аналог издания сторонних организаций

4. Вид документа

<input type="checkbox"/> Автореферат диссертации	<input type="checkbox"/> Прикладная программа
<input type="checkbox"/> Диссертация	<input type="checkbox"/> Рабочая программа дисциплины для ЗФО
<input type="checkbox"/> Задания (темы) для выпускной квалификационной работы	<input type="checkbox"/> Рабочая программа дисциплины для ОФО
<input type="checkbox"/> Задания (темы) для контрольных работ	<input type="checkbox"/> Сборник научных трудов
<input type="checkbox"/> Задания (темы) для курсовой работы (проекта)	<input type="checkbox"/> Словарь
<input type="checkbox"/> Задания (темы) для практических работ	<input type="checkbox"/> Справочник
<input type="checkbox"/> Задания (темы) для расчетно-графических работ	<input type="checkbox"/> Стандарт
<input type="checkbox"/> Задания (темы) рефератов	<input type="checkbox"/> Тезисы докладов (сообщений) научной конференции
<input type="checkbox"/> Задания (темы, планы) для семинарских занятий	<input type="checkbox"/> Титульный лист УМК
<input type="checkbox"/> Задчник	<input type="checkbox"/> Уставное издание
<input type="checkbox"/> Конспект лекций	<input type="checkbox"/> Учебная программа
<input type="checkbox"/> Материалы конференции	<input type="checkbox"/> Учебник
<input type="checkbox"/> Методические указания (рекомендации) для выполнения выпускных квалификационных работ	<input type="checkbox"/> Учебное пособие
<input type="checkbox"/> Методические указания (рекомендации) для выполнения контрольных работ	<input checked="" type="checkbox"/> Учебно-методическое пособие
<input type="checkbox"/> Методические указания (рекомендации) для выполнения курсовых работ	<input type="checkbox"/> Учебный комплект
<input type="checkbox"/> Методические указания (рекомендации) для выполнения лабораторных работ	<input type="checkbox"/> Формуляр УМК
<input type="checkbox"/> Методические указания (рекомендации) для выполнения практических работ	<input type="checkbox"/> ФОС для проведения промежуточной аттестации
<input type="checkbox"/> Методические указания (рекомендации) для организации и проведения практик	<input type="checkbox"/> ФОС для проведения итоговой аттестации
<input type="checkbox"/> Методические указания по освоению дисциплины	<input type="checkbox"/> Хрестоматия
<input type="checkbox"/> Монография	<input type="checkbox"/> Энциклопедия
<input type="checkbox"/> Практикум	
<input type="checkbox"/> Препринт	

5. Дисциплина, кафедра, за которой закреплена дисциплина.

Научно-исследовательская деятельность	Информационные системы и радиотехника
---------------------------------------	---------------------------------------

6. Факультет, курс, семестр, специальность/направление

ОПКВКиОНИ	1,2,3 курс	1-6 семестр
09.06.01 Информатика и вычислительная техника (профиль «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»)		

7. Аннотация

В учебно-методическом пособии рассматриваются теоретические вопросы проектирования и компьютерного моделирования аналоговых микросхем для устройств автоматики, работающих в тяжелых условиях эксплуатации (отрицательные температуры, проникающая радиация)

8. Ключевые слова

АНАЛОГОВАЯ МИКРОСХЕМА, УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ, ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА, ПРОНИКАЮЩАЯ РАДИАЦИЯ, SPICE МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРА, КМОП-ТРАНЗИСТОР, КРИОГЕННАЯ МИКРОСХЕМА, БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР, ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР

9. Характеристика электронного документа

Формат	pdf
Размер	1,7 Мб
Имя файла	Низкотемпературные микросхемы
Примечание	

10. Технические требования

Операционная система	MS Windows
Приложение	Adobe Acrobat Reader
Компьютер	IBM PC
Другое	

11. Электронные адреса

Кафедра	Информационные системы и радиотехника
Библиотека	http://www.lib.sssu.ru
Сайт ИСОиП (фил.) ДГТУ	http://www.sssu.ru
База электронных методических материалов ИСОиП (фил.) ДГТУ	http://www.libdb.sssu.ru
Интернет-портал ЭО и ДОТ ИСОиП (фил.) ДГТУ	http://www.do.sssu.ru

12. Уровень использования документа

- Предоставление преподавателям и студентам бесплатного доступа к электронным копиям документа для просмотра и копирования в локальной сети ИСОиП (фил.) ДГТУ Интернет
 - Предоставление физическим или юридическим лицам бесплатного доступа к электронным копиям документа для просмотра в локальной сети ИСОиП (фил.) ДГТУ Интернет.
 - Предоставление физическим или юридическим лицам платного доступа к электронным копиям документа для просмотра в локальной сети ИСОиП (фил.) ДГТУ Интернет.
- Предоставление доступа к электронным копиям документа только сотрудникам подразделений, обслуживающих электронную библиотеку ИСОиП (фил.) ДГТУ.
- Предоставление электронных копий документа физическим или юридическим лицам по заказам на платной основе.
- Предоставление копий документа на бумажном носителе физическим или юридическим лицам по заказам на платной основе.

13. Информация об авторах и их авторских правах

Серебряков Александр Игоревич		12.01.17
<small>Фамилия, Имя, Отчество</small>	<small>подпись</small>	<small>дата</small>
Знак охраны авторского права	© ИСОиП (фил.) ДГТУ	
Телефон	E-mail	
	sashaag@mail.ru	
<small>Фамилия, Имя, Отчество</small>	<small>подпись</small>	<small>дата</small>
Знак охраны авторского права	© ИСОиП (фил.) ДГТУ	
Телефон	E-mail	
<small>Фамилия, Имя, Отчество</small>	<small>подпись</small>	<small>дата</small>
Знак охраны авторского права	© ИСОиП (фил.) ДГТУ	
Телефон	E-mail	

Зав. каф.

должность руководителя

Информационные системы и радиотехника

название структурного подразделения



подпись

Прокопенко Н.Н.

Фамилия, инициалы

19.01.2017

дата

Принял:



подпись

Фасинов Е.С.

Фамилия, инициалы

19.01.2017

дата

14.Сведения о владельце

Название организации	
Полное	Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Донской государственный технический университет" в г. Шахты Ростовской области
Сокращенное	ИСОиП (фил.) ДГТУ
Ведомство	МИНОБРНАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Организационно-правовая форма	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Адрес	346500, Ростовская обл., г. Шахты, ул. Шевченко, д.147
Телефон	(8636) 22-30-70
Факс	(8636) 22-54-91
E-mail	mail@sssu.ru
Дополнительные сведения	
