

УДК 621.382:621.311.6

ББК 32.853

X21

**Харрисон, Линден Т.**

X21 Источники опорного напряжения и тока / Л. Т. Харрисон ; пер. с англ. С. К. Старовойта. — 2-е изд., эл. — 1 файл pdf : 576 с. — Москва : ДМК Пресс, Додэка-XXI, 2023. — (Схемотехника). — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-438-4

Источники тока (ИТ) и источники опорного напряжения (ИОН) являются неотъемлемыми элементами многих аналоговых схем, поскольку обеспечивают фиксированные и высокостабильные уровни токов или напряжений.

Настоящая книга представляет собой исчерпывающее руководство по разработке источников тока и опорного напряжения. В ней рассматриваются теоретические основы работы, схемотехника и методика применения этих устройств, реализованных как в виде монолитных ИС, так и на дискретных компонентах, а также показано, как ИОН и ИТ дополняют друг друга при проектировании аналоговых схем. Особое внимание уделено таким компонентам, как полевые транзисторы и стабилитроны, которые широко используются при построении дискретных схем ИОН и ИТ. Параметры этих приборов во многом определяют качество работы схемы, именно поэтому в книге приводится большое количество информации, необходимой для правильного их выбора с учетом требований конкретного применения.

Книга содержит большое количество примеров, типовых схем включения тех или иных компонентов, так и различных схемотехнических решений, рекомендуемых при построении ИОН и ИТ. Благодаря этому, читатель имеет возможность реализовать полученные теоретические знания на практике; не исключено, что многие из этих примеров послужат читателю хорошей «отправной точкой» при разработке его собственных схем источников тока и опорного напряжения.

Книга предназначена и начинающим, и опытным инженерам-разработчикам аналоговых схем, а также студентам технических вузов. Она наверняка будет интересна широкому кругу читателей, которые хотят разобраться в принципах работы ИТ и ИОН и понять, что же происходит «внутри» их корпуса.

УДК 621.382:621.311.6

ББК 32.853

**Электронное издание на основе печатного издания:** Источники опорного напряжения и тока / Л. Т. Харрисон ; пер. с англ. С. К. Старовойта. — Москва : ДМК Пресс, Додэка-XXI, 2015. — 576 с. — (Схемотехника). — ISBN 978-5-97060-313-0. — Текст : непосредственный.

Книга «Источники опорного напряжения и тока» Линдена Харрисона подготовлена и издана по договору с Elsevier Inc. of 200 Wheeler Road, 6th Floor, Burlington, MA01803, USA.

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-438-4

© Elsevier Inc.

© Перевод, Издательский дом «Додэка-XXI»

© Издание, ДМК Пресс, 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Благодарности .....	8
<b>Глава 1. Краткая историческая справка .....</b>	<b>14</b>
1.1. Введение .....	14
1.2. Первые полевые транзисторы и операционные усилители. ....	17
1.3. Первые «бэндгапы» .....	20
1.4. Появление стабилитронов со скрытым пробоем .....	21
1.5. Совершенствование технологий .....	22
1.6. Появление других топологий .....	24
<b>Глава 2. Общие сведения об источниках тока .....</b>	<b>28</b>
2.1. Обзор .....	28
2.2. Прецизионные резисторы, наборы резисторов и подстроечные резисторы .....	38
2.3. Базовая оснастка проектной лаборатории. ....	46
2.3.1. Лабораторный блок питания .....	46
2.3.2. Печь с терморегулятором .....	47
2.3.3. Калиброванный, прецизионный амперметр .....	47
<b>Глава 3. Полупроводники и <i>p-n</i>-переход. ....</b>	<b>48</b>
<b>Глава 4. Применение биполярных транзисторов в источниках тока .....</b>	<b>65</b>
4.1. Характеристики БТ .....	67
4.2. Использование БТ в качестве источника тока .....	85
4.3. Источники тока Видлара .....	92
4.4. Токовые зеркала Уилсона .....	99
4.5. Источник тока Уайта .....	105
4.6. Многоканальные токовые зеркала .....	108
4.7. Каскодные токовые зеркала .....	110
4.8. Масштабирование токов .....	114
4.9. Модифицированные источники тока и примеры их применения .....	121
4.9.1. Работа источников тока от нескольких источников питания .....	122
4.9.2. Улучшенное подавление влияния источника питания .....	123
4.9.3. Альтернативный делитель тока .....	124
4.9.4. Модифицированное трехтранзисторное токовое зеркало вытекающего тока .....	125
4.9.5. Линейный заряд конденсатора источником тока в ГУН .....	126
4.9.6. Источник тока в высокочастотном лазерном передатчике .....	128
4.9.7. Температурно-компенсированный источник втекающего тока .....	128
4.9.8. Комбинированные токовые зеркала .....	129
4.9.9. Токовые зеркала в схеме ЦАП-управления частотой генератора и коэффициентом заполнения импульсов .....	129
4.9.10. Использование источников тока в качестве активных нагрузок. ....	130
4.9.11. Модифицированный источник тока, возводящий опорный ток в квадрат .....	133
4.9.12. Регулируемый источник тока с цифровым управлением .....	135
4.9.13. Применение комбинированных токовых зеркал при задании характеристик фильтра высоких частот .....	136
4.9.14. Простые светодиодные источники тока .....	138

4.9.15.	Использование источника тока на светодиоде в схеме смещения малошумящего усилителя переменного напряжения . . . . .	140
4.9.16.	Составной источник тока на биполярных и полевых с очень высоким выходным полным сопротивлением . . . . .	140
4.9.17.	Составной источник тока высокой мощности на БТ и МОП-транзисторах . . . . .	142
4.9.18.	Схема токовой накачки на основе источника тока Уилсона и с цифровым управлением. . . . .	143
<b>Глава 5. Использование согласованных пар, двояных и счетверенных транзисторов . . . .</b>		<b>145</b>
5.1.	Прецизионные согласованные пары БТ . . . . .	145
5.2.	Высококачественные двояные транзисторы . . . . .	150
5.3.	Сдвоенные и счетверенные БТ общего назначения. . . . .	156
<b>Глава 6. Использование ПТ и ТСД в источниках тока . . . . .</b>		<b>160</b>
6.1.	Общие сведения о полевых транзисторах . . . . .	160
6.2.	Характеристики ПТ . . . . .	162
6.3.	Использование ПТ в качестве источника тока . . . . .	176
6.4.	Каскодный источник тока на ПТ . . . . .	186
6.5.	Токостабилизирующие диоды на основе ПТ . . . . .	191
6.5.1.	Характеристики ТСД. . . . .	192
6.5.2.	Рекомендации по проектированию схем на ТСД. . . . .	201
6.5.3.	Обзор популярных серий ТСД. . . . .	202
6.6.	Использование ПТ для создания диодов со сверхмалыми утечками . . . . .	205
<b>Глава 7. Создание источников тока средней мощности на основе ДМОП-транзисторов . . . .</b>		<b>209</b>
7.1.	ДМОП-транзисторы со встроенным каналом . . . . .	211
7.2.	Технология кремниевого затвора. . . . .	213
7.3.	Характеристики ДМОП-транзисторов со встроенным каналом. . . . .	215
7.4.	Источники тока на ДМОП-транзисторах со встроенным каналом . . . . .	221
7.5.	Каскодный источник тока на ДМОП-транзисторах . . . . .	224
7.6.	Каскодный источник тока на ПТ и ДМОП-транзисторе . . . . .	226
7.7.	ДМОП-транзисторы со встроенным каналом и горизонтальной структурой. . . . .	226
<b>Глава 8. Проектирование источников тока на основе мощных МОП-транзисторов . . . . .</b>		<b>229</b>
8.1.	Характеристики МОП-транзисторов с индуцированным каналом . . . . .	231
8.2.	Применение МОП-транзистора с индуцированным каналом в качестве источника тока . . . . .	246
8.3.	Применение мощных МОП-транзисторов «интеллектуальной» серии Smart . . . . .	258
8.4.	Мощные источники тока компании IXYS . . . . .	259
8.5.	МОП-транзисторы с индуцированным каналом и горизонтальной структурой . . . . .	261
<b>Глава 9. Создание источников тока на основе интегральных наборов МОП-транзисторов . . . .</b>		<b>262</b>
9.1.	RCA — родоначальник КМОП-технологии . . . . .	262
9.2.	Характеристики полевых КМОП-транзисторов. . . . .	267
9.3.	Использование линейных КМОП-транзисторных наборов при построении схем источников тока . . . . .	276
9.4.	Каскодные КМОП-транзисторные источники тока . . . . .	281
9.5.	Применение программируемых приборов EPAD® компании ALD при построении прецизионных источников тока. . . . .	287
9.6.	Транзисторные наборы компании ALD с рекордно малым пороговым напряжением затвора . . . . .	290
<b>Глава 10. Использование интегральных ИС источников тока и токовых зеркал . . . . .</b>		<b>296</b>
10.1.	LM134 компании National Semiconductor — монолитная ИС источника тока . . . . .	296
10.2.	Применение источников тока на ИС LM134 . . . . .	301
10.3.	Использование LM134 в качестве датчика температуры. . . . .	308
10.4.	Монолитный источник тока REF-200 производства компании TI/Burr-Brown. . . . .	311
<b>Глава 11. Использование прецизионных источников тока совместно с ОУ и ИОН. . . . .</b>		<b>319</b>
11.1.	История развития операционных усилителей. . . . .	319
11.2.	Некоторые характеристики ОУ . . . . .	324
11.3.	Фильтрация в цепи питания и защита входов ОУ. . . . .	335
11.4.	Построение источников тока на основе ОУ . . . . .	337
11.5.	Проектирование прецизионных стабилизаторов тока на ОУ. . . . .	353
<b>Глава 12. Введение в источники опорных напряжений . . . . .</b>		<b>360</b>
12.1.	Общие сведения и история развития . . . . .	360
12.2.	Характеристики источников опорного напряжения . . . . .	365
12.2.1.	Начальное отклонение. . . . .	367
12.2.2.	Температурный дрейф или температурный коэффициент, ТК . . . . .	368
12.2.3.	Долговременный дрейф. . . . .	374
12.2.4.	Выходной уровень шумов . . . . .	374

12.2.5. Тепловой гистерезис . . . . .	377
12.2.6. Нестабильность по входу . . . . .	377
12.2.7. Нестабильность по нагрузке . . . . .	378
12.2.8. Максимальный выходной ток $I_{OUT}$ , мА . . . . .	378
12.2.9. Диапазон напряжения питания . . . . .	379
12.2.10. Ток потребления . . . . .	379
12.2.11. Падение напряжения . . . . .	380
12.2.12. Время установления после подачи питания $t_{on}$ , мкс . . . . .	380
12.2.13. Дрейф при подаче питания $\Delta V/T$ . . . . .	380
12.2.14. Переходная характеристика . . . . .	380
12.2.15. Отключение/включение . . . . .	381
12.2.16. Рассеиваемая мощность . . . . .	381
12.3. Усовершенствованные схемотехнические решения ИОН . . . . .	382
12.3.1. Установка блокировочных конденсаторов на входе и выходе схемы с ИОН . . . . .	382
12.3.2. Снижение шума . . . . .	384
12.3.3. Корректировка выходного напряжения . . . . .	391
12.4. Неиспользуемые выводы в корпусе . . . . .	399
12.5. Типы корпусов . . . . .	399
12.6. Разработка печатной платы . . . . .	400
12.7. Почему бы не сделать ИОН самому? . . . . .	402
12.8. Точность, обеспечиваемая различными типами ИОН . . . . .	406
<b>Глава 13. ИОН на стабилизаторах и термокомпенсированных стабилизаторах . . . . .</b>	<b>409</b>
13.1. Введение . . . . .	409
13.2. Характеристики стабилизатора . . . . .	412
13.3. Простые примеры использования стабилизаторов . . . . .	430
13.4. Термокомпенсированные стабилизаторы . . . . .	441
<b>Глава 14. Характеристики монолитных ИОН . . . . .</b>	<b>452</b>
14.1. ИОН типа «бэндгап» . . . . .	453
14.2. ИОН на стабилизаторе со скрытым пробоем . . . . .	465
14.3. Источники опорного напряжения типа XFET® . . . . .	471
14.4. Источник опорного напряжения FGA™ компании Intersil/Xicor . . . . .	475
14.5. Низковольтные ИОН . . . . .	479
14.6. Сравнение архитектур ИОН . . . . .	485
<b>Глава 15. Обзор некоторых наиболее популярных монолитных ИОН и их применений . . . . .</b>	<b>489</b>
15.1. Использование бэндгап-ИОН параллельного типа . . . . .	491
15.2. Применение нерегулируемых бэндгап-ИОН последовательного типа . . . . .	505
15.3. Применение регулируемых бэндгап-ИОН последовательного типа . . . . .	522
15.4. Применение ИОН XFET® компании Analog Devices . . . . .	535
15.5. Применение ИОН на стабилизаторе со скрытым пробоем . . . . .	540
15.6. Применение X60008 типа FGA™ компании Intersil/Xicor . . . . .	
15.7. Многоканальные ИОН и ИОН с несколькими нагрузками . . . . .	
15.8. Взгляд в будущее . . . . .	