

# СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

## РАСЧЕТЫ И СХЕМОТЕХНИКА

Штерн М. И.



### В книге и на виртуальном диске:

- расчеты схем и их элементов
- реальные конструкции
- элементная база
- секреты специалистов



Штерн М. И.

# СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

## РАСЧЕТЫ И СХЕМОТЕХНИКА



---

Наука и Техника, Санкт-Петербург  
2017

УДК 621.314:621.311.6

Штерн М. И.

**СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. Расчеты и схемотехника.** — СПб.: Наука и Техника, 2017. — 400 с.: ил.

**ISBN 978-5-94387-870-1**

Силовая электроника прочно вошла в нашу повседневную жизнь. Эта книга позволит детально с этим разделом электроники познакомиться. Начинается знакомство с расчетов, основы любого конструирования. А далее рассматривается практическая схемотехника устройств силовой электроники (источников питания, стабилизаторов, преобразователей напряжения, регуляторов напряжения, сварочных инверторов и др.). Импульсные схемы отличаются высокой производительностью, улучшенная стабилизация напряжения и малые габариты. Поэтому они заслуженно сменяют, в ряде случаев, своих линейных собратьев.

Каждой группе устройств посвящены отдельные главы. Представленные схемные решения не повторяют друг друга, интересны, содержат определенные элементы оригинальности. Рассмотренные в книге схемы устройств силовой электроники построены на недорогих компонентах, ко многим из них указаны доступные аналоги. Для удобства восприятия информации описание устройств силовой электроники идет по единой схеме. Будут полезны ссылки на первоисточники лучших конструкций.

В книге имеются как сложные, так и простые схемы для широкого применения в самых разнообразных радиолюбительских конструкциях. Все устройства, рассмотренные в книге, были проверены их авторами на практике, демонстрировались на выставках, были отмечены призами и дипломами.

Книга предназначена для широкого круга радиолюбителей, позволяет освоить основы силовой электроники, выбрать для самостоятельного изготовления и рассчитать подходящую схему источника питания, стабилизатора, преобразователя напряжения практически для любых устройств.

К книге прилагается виртуальный обновляемый диск, размещенный на облачном сервере. Адрес указан на сайте издательства [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru) на странице данной книги. На диске размещена обширная информация по радиоэлектронным компонентам, используемым в силовой электронике (о диодах, транзисторах, микросхемах, пассивных компонентах и др.). Приведены каталоги зарубежных производителей элементов РЭА, программы по электротехнике и электронике для Android, другая полезная справочная информация.



**ISBN 978-5-94387-870-1**

Автор и издательство не несут ответственности за возможный ущерб, причиненный в ходе использования материалов данной книги.

Контактные телефоны издательства  
(812) 412-70-25, 412-70-26

Официальные сайты: [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru)  
[www.nit-kiiev.com](http://www.nit-kiiev.com)

© Штерн М. И.

© Наука и Техника (оригинал-макет), 2017

ООО «Наука и Техника».

Лицензия № 000350 от 23 декабря 1999 года.

180907, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 29.

Подписано в печать 9.11.2016. Формат 70×100 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная. Объем 25 п. л.

Тираж 1000 экз. Заказ № 8461.

Отпечатано с готовых файлов заказчика  
в АО «Первая Образцовая типография»  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»  
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Глава 1. Силовая электроника: расчеты от А до Я</b> .....	<b>9</b>
1.1. Расчет простых элементов электрической защиты .....	9
Расчет необходимого предела срабатывания защиты цепи .....	9
Условия выбора предохранителя в трехфазных цепях (нагрузки) .....	10
Табличный способ определения необходимого диаметра проволоки для защиты цепи .....	10
Расчет диаметра медной проволоки для защиты цепи .....	11
Определение диаметра проволоки без использования микрометра .....	12
1.2. Определение емкости гасящих конденсаторов и расчеты стабилизирующих транзисторных каскадов источников питания .....	13
Расчет емкости конденсатора при последовательном включении с нагрузкой .....	13
Расчет емкости балансного конденсатора в бестрансформаторном источнике питания .....	15
Расчет гасящего конденсатора, применяемого вместо резистора .....	17
Расчет стабилизирующего транзисторного каскада .....	21
1.3. Расчеты катушек индуктивности .....	23
Магнитные материалы и их свойства .....	23
Типоразмеры сердечников и их характеристики .....	26
Расчет индуктивности с использованием табличных данных .....	28
Расчет индуктивности без использования табличных данных .....	29
1.4. Расчеты трансформаторов .....	32
Габаритная мощность магнитопровода .....	32
Принудительное перемагничивание магнитопровода .....	33
Увеличение индуктивности рассеяния .....	35
1.5. Расчеты дросселей .....	35
1.6. Расчеты силовых трансформаторов .....	37
Принцип действия трансформатора .....	37
Конструкция силового трансформатора .....	39
Расчет силового трансформатора .....	40
1.7. Расчет понижающего сетевого трансформатора источника питания .....	42
Этапы расчета трансформатора .....	42
Выбор магнитопровода .....	43
Размеры магнитопроводов .....	44
Варианты размещения катушек на магнитопроводе .....	46
Материалы магнитопроводов .....	49
Исходные данные для расчета трансформатора .....	51
Расчет магнитопровода трансформатора .....	52
Расчет обмоток трансформатора .....	53
Расчет мощности потерь .....	57
Изготовление трансформатора .....	58
Проверка трансформатора .....	59
1.8. Расчет автотрансформатора .....	59
1.9. Расчеты силовых трансформаторов и автотрансформаторов .....	61
1.10. Расчет трансформаторов импульсных источников питания .....	66
Принцип действия импульсных источников питания .....	66
Исходные данными для расчета .....	74
Порядок расчета .....	75
1.11. Компьютерный расчет трансформатора .....	80
Факторы, влияющие на расчет трансформатора .....	80
Бесплатная программа расчета трансформатора Transformer 2.0.0.0 .....	80

1.12. Расчет схем выпрямителей .....	81
1.13. Упрощенный расчет выпрямителя .....	85
1.14. Расчет фильтров высоких и низких частот .....	89
Назначение фильтров .....	89
Характеристики частотных фильтров .....	89
Расчет фильтров в Microsoft Excel .....	90
Разновидности фильтров .....	90
Расчет RC Г-образных фильтров .....	90
Расчет RL Г-образных фильтров .....	92
Расчет LC Г-образных фильтров .....	94
Расчет Т-образных фильтров .....	95
Расчет П-образных фильтров .....	96
Расчет полосовых резонансных фильтров .....	98
1.15. Расчет стабилизаторов напряжения .....	99
Схема стабилизатора напряжения: принцип действия .....	99
Порядок расчета стабилизатора напряжения .....	102
Подбор транзистора для стабилизатора .....	105
Пример расчета стабилизатора напряжения .....	105
1.16. Компенсационный стабилизатор напряжения и его расчет .....	107
Причины неустойчивости питания и меры борьбы с ними .....	107
Расчет компенсационного стабилизатора последовательного типа .....	107
1.17. Расчет стабилизированного источника питания .....	111
Принципиальная схема и ее работа .....	111
Расчет стабилизатора напряжения .....	113
Полезные дополнения к разделу .....	116
1.18. Расчет радиатора для стабилизаторов напряжения .....	117
Методика выбора радиатора .....	117
Пример расчета радиатора для ИМС LM7805 (КР142ЕН5В) .....	118
Определение площади ребристого радиатора .....	119
1.19. Характеристики электродвигателей и простейшие расчеты .....	120
Постоянная момента электродвигателя .....	120
Вращающий момент электродвигателя .....	120
Начальный пусковой момент – момент электродвигателя при пуске .....	120
Постоянная ЭДС .....	121
Постоянная электродвигателя .....	121
Жесткость механической характеристики двигателя .....	122
Частота вращения .....	122
Механическая характеристика .....	122
Момент инерции ротора .....	122
Механическая постоянная времени .....	123
Электрическая постоянная времени .....	123
Напряжение электродвигателя .....	123
Мощность электродвигателя постоянного тока .....	124
Баланс мощностей для электродвигателей постоянного тока .....	124
Потери в электродвигателе .....	125
Кэффициент полезного действия электродвигателя .....	125
1.20. Указатель журнальных статей по расчетам элементов силовой электроники .....	126
<b>Глава 2. Схемотехника стабилизированных трансформаторных источников питания .....</b>	<b>131</b>
2.1. Принцип действия трансформаторных источников питания .....	131
2.2. Лучшие конструкции трансформаторных источников питания .....	136
Стабилизированный источник питания +3,4...6 В /3...5 В 100 мА (DC-DC Step-Down +3,4...6 /3...5 V) .....	136
Стабилизированный источник питания с регулирующим транзистором в минусовом проводнике +3,4...6 В /3...5 В 100 мА (DC-DC Step-Down+3,4...6 /3...5 V) .....	138

Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /3; 4; 5; 6; 7,5; 9; 12 В 250 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/3$ ; 4; 5; 6; 7,5; 9; 12 В) .....	139
Стабилизированный источник питания на ИМС 142ЕН1Г +9 В /5 В 500 мА (DC-DC Step-Down +9/5 В) .....	141
Стабилизированный источник питания 14...20 В /12 В 500 мА (DC-DC Step-Down $\sim 220/12$ В) .....	142
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /0...12 В 500 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/0$ ...12 В) .....	144
Стабилизированный источник питания +7...30 В /5 В 500 мА (DC-DC Step-Down +7...30/5 В) .....	148
Стабилизированный источник питания с плавной инверсией выходного напряжения +12...15 В / $\pm 5$ В 500 мА (DC-DC Step-Down +12...15/ $\pm 5$ В) .....	148
Стабилизированный источник питания +9...25 В /5 В 700 мА (DC-DC Step-Down +9...25/5 В) .....	150
Стабилизированный источник питания +6...8 В /5 В 1000 мА (DC-DC Step-Down +6...8/5 В) .....	151
Стабилизированный источник питания +16...20 В /12 В 1000 мА ( DC-DC Step-Down +16...20/12 В) .....	152
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /+9...25 В 1000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/+9$ ...25 В) .....	154
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /+ 5; 9; 12 В 1000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/+ 5$ ; 9; 12 В) .....	157
Стабилизированный источник питания с плавной регуляцией $\sim 220$ В / $\pm 12$ В 1000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/\pm 12$ В) .....	158
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /4...12 В 1500 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/4$ ...12 В) .....	160
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /11,5...14 В 4000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/11,5$ ...14 В) .....	163
Стабилизированный источник питания +60 В /5...30 В 5000 мА (DC-DC Step-Down +60/5...30 В) .....	164
Стабилизированный источник питания +60 В /3...50 В 5000 мА (AC-DC Step-Down +60/3...50 В) .....	165
Мощный источник питания 12 В и током нагрузки до 6000 мА .....	168
Стабилизатор напряжения 20 В и током нагрузки до 7000 мА .....	169
Стабилизированный источник питания +24 В /14 В 10 000 мА (DC-DC Step-Down +24/14 В) .....	170
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /14 В 20 000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/14$ В) .....	171
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /12 В 20 000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/12$ В) .....	173
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /0...15 В 20 000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/0$ ...15 В) .....	174
Стабилизированный источник питания на ИМС КР142ЕН19 $\sim 220$ В /13 В 20 000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/13$ В) .....	175
Стабилизированный источник питания на дискретных элементах $\sim 220$ В /13,5 В 20 000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/13,5$ В) .....	177
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /14 В 200 000 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/14$ В) .....	178
<b>Глава 3. Схемотехника бестрансформаторных источников питания и преобразователей напряжения .....</b>	<b>184</b>
3.1. Принцип действия бестрансформаторных источников питания .....	184
3.2. Лучшие конструкции бестрансформаторных источников питания .....	184
Стабилизированный источник питания $\sim 220$ В /3 В 500 мА (AC-DC Step-Down $\sim 220/3$ В) .....	184
Конденсаторно-стабилитронный выпрямитель $\sim 220$ В /3...5 В (AC-DC Step-Down $\sim 220/3$ ...5 В) .....	186

Бестрансформаторный источник питания ~220 В /5 В 300 мА (AC-DC Step-Down ~220/5 V) .....	187
Бестрансформаторный источник бесперебойного питания ~220 В /1,4 В 1 мА (AC-DC Step-Down ~220/1,4 V) .....	188
Бестрансформаторный стабилизированный источник питания ~220 В /7...8,5 В (AC-DC Step-Down ~220/7...8,5 V) .....	189
Бестрансформаторное зарядное устройство ~220 В /14 В 7 000 мА (AC-DC Step-Down ~220/14 V) .....	190
Бестрансформаторный регулируемый стабилизированный источник питания ~220 В /16...26 В 100 мА (AC-DC Step-Down ~220/16...26 V) .....	195
Бестрансформаторные мощные источники питания с ШИМ стабилизатором ~220 В /11,6 В (AC-DC Step-Down ~220/11,6 V) .....	197
Бестрансформаторные источники питания с симметричным динистором ~220 В /9 В 60 мА (AC-DC Step-Down ~220/9 V) .....	199
Бестрансформаторный высоковольтный преобразователь ~220 В /1500 В 60 мА (AC-DC Step-Up ~220/1500 V) .....	201
<b>Глава 4. Схемотехника импульсных источников питания .....</b>	<b>202</b>
4.1. Принцип действия импульсных источников питания .....	202
Достоинства и недостатки .....	202
Структурные схемы импульсных источников питания .....	204
4.2. Лучшие конструкции импульсных источников питания .....	207
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 5 В 6 000 мА (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 5 V) ...	207
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 5 В 100 мА (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 5 V) ...	213
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 9 В 3 000 мА (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 9 V) ...	216
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 5 В 4 000 мА (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 5 V) ...	218
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 12, $\pm$ 50 В 800 Вт (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 12, $\pm$ 50 V) .....	221
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 15 В регулируемое (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 15 V var) .....	226
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 25, $\approx$ 20, $\approx$ 10 В (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 25, $\approx$ 20, $\approx$ 10 V) .....	230
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 25 В 280 Вт (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 25 V) ...	232
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 30 В 200 Вт (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 30 V) ...	234
Импульсный источник питания ~220 В / $\approx$ 60 В (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 60 V) ...	236
Импульсные источник и питания ~220 В / $\approx$ 18 В ( $\approx$ 5 В) (AC-DC Step-Down ~220/ $\approx$ 18 V ( $\approx$ 5 V)) .....	239
<b>Глава 5. Схемотехника преобразователей постоянного напряжения в постоянное .....</b>	<b>245</b>
5.1. Принцип действия преобразователей постоянного напряжения в постоянное .....	245
5.2. Лучшие конструкции преобразователей постоянного напряжения в постоянное .....	248
Преобразователь напряжения 2 В в 5 В (DC-DC Step-Up 2/5 V) .....	248
Преобразователь напряжения 9 В в 400 В (DC-DC Step-Up 9/400 V) .....	249
Преобразователь напряжения 3–12 В в 9 В (DC-DC Step-Up/Down 3–12/9 V) ...	249
Преобразователь напряжения 5–15 В в 10–30 В (DC-DC Step-Up 5–15 /10–30 V) .....	251
Преобразователь напряжения 6–9 В в 20 В (DC-DC Step-Up 6–9/20 V) .....	252
Преобразователь напряжения с 9 В до 16 В (DC-DC Step-Up 9/16 V) .....	253
Преобразователь напряжения с 12 В до 30 В (DC-DC Step-Up 12/30 V) .....	254
Преобразователь напряжения 4,5–9 В в 18–27 В (DC-DC Step-Up 4,5–9 /18–27 V) ..	255
Преобразователь напряжения 12 В в $\approx$ 12 В (DC-DC Step-Inverter 12 В / $\approx$ 12 V) ...	260
Преобразователь напряжения 1,5 В в 9 В (DC-DC Step-Up 1,5/9 V) .....	261
Преобразователь напряжения 5 В в $\approx$ 8,5 В (DC-DC Step-Up/Inverter 5/ $\approx$ 8,5 V) ...	263
Преобразователь напряжения 3,6 В в 10,8 В (DC-DC Step-Up 3,6/10,8 V) .....	264
Преобразователь напряжения 12 В в 15–50 В (DC-DC Step-Up 12/15–50 V) .....	266

Преобразователь напряжения 12 В в $\pm 30$ В (DC-DC Step-Up/Inverter 12/ $\pm(25-30)$ В)...	269
Преобразователь напряжения 12 В в 350 В (DC-DC Step-Up 12/350 В).....	269
Преобразователь напряжения 12 В в 15–27 В (DC-DC Step-Up 12/15–27 В).....	271
<b>Глава 6. Схемотехника преобразователей постоянного напряжения в переменное.....</b>	<b>273</b>
6.1. Принцип действия преобразователей постоянного напряжения в переменное (DC-AC конвертеров).....	273
6.2. Лучшие конструкции преобразователей постоянного напряжения в переменное.....	274
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	274
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	276
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	278
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	279
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	280
Преобразователь напряжения =12 В в ~220–500 В 50–400 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220–500 В 50–400 Hz).....	281
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	282
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 80 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 80 Hz) ...	285
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	288
Преобразователь напряжения =12 В в ~220 В 50 Гц (DC-AC Step-Up =12/~220 В 50 Hz) ...	289
Преобразователь напряжения =13,6 В в ~36, ~127, ~220 В (DC-AC Step-Up =12/~36, ~127, ~220 В).....	290
<b>Глава 7. Схемотехника преобразователей переменного напряжения в импульсное.....</b>	<b>293</b>
7.1. Принцип действия преобразователей переменного напряжения в импульсное.....	293
7.2. Лучшие схемы преобразователей переменного напряжения в импульсное.....	297
Источник питания для ионизатора.....	297
Мощный преобразователь напряжения 12 В – 350 В с генератором импульсов ..	298
<b>Глава 8. Схемотехника стабилизаторов напряжения.....</b>	<b>301</b>
8.1. Особенности схем, построенных на интегральных стабилизаторах напряжения.....	301
8.2. Лучшие конструкции на интегральных стабилизаторах напряжения.....	302
Стабилизатор напряжения на ИМС КР142, защищенный от повреждения разрядным током конденсаторов.....	302
Стабилизатор напряжения на ИМС КР142 со ступенчатым включением.....	303
Стабилизатор напряжения на ИМС КР142 с выходным напряжением повышенной стабильности.....	304
Стабилизатор напряжения на ИМС КР142 с регулируемым выходным напряжением от 0 до 10 В.....	304
Стабилизаторы напряжения на ИМС КР142 с внешними регулирующими транзисторами.....	305
Стабилизатор напряжения на ИМС КР142 с высоким коэффициентом стабилизации.....	308
Двуполярный стабилизатор напряжения на основе однополярной микросхемы ..	308
Стабилизатор напряжения на ИМС КР142 с регулируемым выходным напряжением ..	309
Импульсный стабилизатор напряжения на ИМС КР142.....	310
Стабилизатор тока на ИМС КР142 для зарядки аккумуляторной батареи напряжением 12 В.....	311
Стабилизатор тока на ИМС КР142 для зарядки аккумуляторной батареи напряжением 6 В.....	311
8.3. Принцип действия импульсных стабилизаторов напряжения.....	312
8.4. Лучшие конструкции стабилизаторов напряжения на различной элементной базе ..	312
Релейный стабилизатор напряжения.....	312
Ключевой стабилизатор напряжения 5 В 2 А.....	316
Широтно-импульсный стабилизатор 5 В 3 А.....	316
Импульсный понижающий стабилизатор 5 В 5 А, 10 В 2 А.....	321
Импульсный стабилизатор 12 В 4,5 А.....	321



<b>Глава 9. Схемотехника трансформаторных источников сварочного тока</b> .....	<b>327</b>
9.1. Принцип действия трансформаторных источников сварочного тока .....	327
9.2. Лучшие конструкции трансформаторных источников сварочного тока .....	331
Сварочный трансформатор со ступенчатой регулировкой тока .....	331
Сварочный источник с резонансным конденсатором .....	336
Сварочный источник переменного тока с плавной регулировкой .....	338
Сварочный источник постоянного тока с электронной регулировкой .....	342
<b>Глава 10. Схемотехника инверторных источников сварочного тока</b> .....	<b>348</b>
10.1. Принцип действия инверторных сварочных источников .....	348
10.2. Лучшие конструкции инверторных источников сварочного тока .....	349
Однотактный прямоходовый преобразователь .....	349
Двухтактный мостовой преобразователь .....	353
Простой самодельный инверторный сварочный источник .....	355
Сварочный инвертор на одном транзисторе .....	371
Сварочный источник Большакова .....	383
<b>Список литературы и Интернет-ресурсов</b> .....	<b>394</b>
<b>Описание виртуального диска «Силовая электроника»</b> .....	<b>399</b>