СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 9

1

Введение 11
1.1. Существо проблемы выбора электронных компонентов . . . 12
1.2. Основные физические величины и зависимости 12
Зависимости 12
Константы 14

2

Выбор радиаторов 15
2.1. Теория 16
Тепловые потери в компонентах 16
Тепловое сопротивление 16
Тепловая емкость 16
Термоэлектрическая аналогия 17
2.2. Примеры тепловых задач 17
Стабилизатор напряжения в интегральном исполнении 17
Усилитель мощностью 70 Вт на интегральной микросхеме . . 19
Транзисторный усилитель мощностью 35 Вт 21
2.3. Виды используемых радиаторов 24
Радиаторы очень малой мощности 24
Радиаторы малой мощности (4°C/Вт < R_T < 10°C/Вт) 27
Радиаторы средней мощности (2°C/Вт < R_T < 4°C/Вт) 28
Радиаторы большой мощности (1°C/Вт < R_T < 2°C/Вт) 32
Радиаторы очень большой мощности (R_T < 1°C/Вт) 35
2.4. Дополнительная оснастка 39
Изолирующие держатели радиаторов 39
Термопроводники с изоляционными свойствами 40
Изоляторы из полиэфира 44

3

Выбор резисторов 47
3.1. Теория 48
Общие понятия 48
Соединение резисторов 48
3.2. Критерии выбора 50
Номинальное значение и допуск 50
Номинальная мощность 53
Предельное напряжение 54

Температурный коэффициент 55
Коэффициент напряжения 57
Надежность 57
3.3. Маркировка резисторов 57
Буквенно-цифровая маркировка 57
Маркировка цифровым кодом 57
Маркировка цветовым кодом 58
3.4. Технология изготовления 58
Композиционные угольные резисторы 58
Тонкопленочные угольные резисторы 59
Металлопленочные резисторы 60
Прецизионные металлопленочные резисторы 61
Толстослойные резисторы 61
Проволочные резисторы 62
3.5. Примеры применения 63
Делитель напряжения 63
Измерительный мост 66
Согласующий резистор 67
Измерение тока 69

4

Выбор конденсаторов 71
4.1. Теория 72
Физические величины 72
Соединение конденсаторов 72
Заряд конденсатора от источника тока 73
Заряд конденсатора от источника напряжения 73
Разряд конденсатора через резистор 74
Схема замещения конденсатора по переменному току 75
4.2. Критерии выбора 76
Номинальная емкость и допуск 76
Номинальное напряжение 76
Пиковое напряжение 77
Температурный коэффициент емкости 77
Рассеиваемая мощность 77
Срок службы и надежность 77
4.3. Технология изготовления 80
Конденсаторы из металлизированной бумаги 80
Электролитические алюминиевые конденсаторы 80
Танталовые электролитические конденсаторы 81

Пластиковые конденсаторы из полиэфира, поликарбоната, полистирола 82
Конденсаторы из полипропилена 83
Слюдяные конденсаторы 84
Керамические конденсаторы 84
4.4. Примеры применения 85
Развязка цифровой интегральной схемы 85
Фильтры блока питания 12 В/5 А для КВ-передатчика 88
Фильтрация сигналов помехи 89
Конденсатор связи 91

5

Выбор трансформаторов 93
5.1. Силовые трансформаторы 94
Теория 94
Передаваемая мощность 94
5.2. Согласующие трансформаторы 96
Теория 96
Передача мощности 97
5.3. Импульсные трансформаторы 98
Теория 98
5.4. Некоторые типы трансформаторов, выпускаемых промышленностью 99
Силовые трансформаторы 99
Согласующие трансформаторы 102
Импульсные трансформаторы 106
5.5. Примеры применения 108
Трансформатор для стабилизированного блока питания ±20 В/1.5 А 108
Трансформатор для питания усилителя мощностью 70 Вт/8 Ом 109
Выходной трансформатор для лампового усилителя мощностью 100 Вт 110

6

Выбор диодов 113
6.1. Критерии выбора 114
Теория 114
Вольт-амперная характеристика диода 114
Эквивалентные схемы диода 114
Прямые напряжение и ток 115

Обратные напряжение и ток 115
6.2. Различные типы диодов 119
Детекторные диоды 119
Выпрямительные диоды 119
Стабилитроны 119
Диоды Шотки 120
6.3. Некоторые типы диодов, выпускаемых промышленностью 120
6.4. Наиболее часто используемые корпуса диодов 126
6.5. Примеры применения 129
Стабилизатор напряжения 129
Блок питания 12 В/5 А для КВ-передатчика 132
Диодные ограничители 133
Стабилизированный блок питания с регулируемым выходным напряжением 134
Диодные логические элементы «И» и «ИЛИ» 136

7

Выбор биполярных транзисторов 141
7.1. Критерии выбора 142
Теория 142
Допустимые токи и напряжения 142
Характеристики транзистора 142
Рассеиваемая мощность 144
Линия нагрузки и рабочая точка 145
Транзистор Дарлингтона 146
7.2. Некоторые типы биполярных транзисторов, выпускаемых промышленностью 146
7.3. Наиболее часто используемые корпуса транзисторов и их цоколевки 151
7.4. Примеры применения 152
Транзисторный каскад, управляющий включением реле ..152
Транзисторный усилитель напряжения 154
Усилитель класса АВ мощностью 100 Вт 156
Усилитель класса АВ мощностью 20 Вт 158

8

Выбор МОП-транзисторов 159
8.1. Критерии выбора 160
Теория 160
МОП-транзистор с обедненным *n*-каналом 160

МОП-транзистор с обедненным *p*-каналом 161
МОП-транзистор с обогащенным *n*-каналом 161
МОП-транзистор с обогащенным *p*-каналом 162
Крутизна 163
Границы диапазона токов 163
Допустимые напряжения 163
Рассеиваемая мощность 163
8.2. Некоторые типы МОП-транзисторов,
выпускаемых промышленностью 165
8.3. Наиболее часто используемые корпуса и их цоколевки . .167
8.4. Примеры применения 168
Схема управления шаговым двигателем 168
Усилитель напряжения на МОП-транзисторе 170
Усилитель класса А мощностью 25 Вт 172

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практическая реализация электронной схемы доступна каждому. Компоненты, продающиеся в магазинах, позволяют осуществить довольно сложные устройства, для чего зачастую достаточно обладать навыками чтения схемы и пайки.

Автор преследует двоякую цель: дать читателю не только теоретические, но и практические знания и предоставить информацию о рынке компонентов и приборов. Книга учит читателя выбирать схему и ее элементы (каждый тип элементов является объектом отдельной главы).

Уделено внимание и анализу взаимодействий компонентов между собой. Отдельно рассматривается отвод тепла от компонентов схемы, являющийся общей проблемой схемотехники. Именно поэтому автор начинает изложение материала с анализа проблемы выбора теплоотвода.

Обсуждаются свойства электрических цепей, структурные схемы электронных устройств и приборов.

Издание предназначено желающим создать электронное устройство и пройти все этапы, начиная с разработки структурной схемы и кончая ее практической реализацией. Кроме того, книга адресована учащимся, получающим образование в области электроники — от воспитанников технических училищ до студентов.

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1. Существо проблемы выбора электронных компонентов 12
1.2. Основные физические величины и зависимости 12

2 Выбор радиаторов 15
3 Выбор резисторов 47
4 Выбор конденсаторов 71
5 Выбор трансформаторов 93
6 Выбор диодов 113
7 Выбор биполярных транзисторов 141
8 Выбор МОП-транзисторов 159

1.1. СУЩЕСТВО ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Переход от принципиальной схемы к ее практической реализации непрост. Объясняется это столь большим разнообразием типов элементов и их модификаций, что человек, не знакомый с их особенностями, зачастую может стать в тупик. Простой пример: резистор сопротивлением 100 кОм и мощностью 10 Вт может быть угольным, металлопленочным, проволочным или объемным.

Цель данной книги состоит именно в том, чтобы помочь читателю решить проблему выбора электронных компонентов.

1.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЗАВИСИМОСТИ

Таблица 1.1. Физические величины

Физическая величина	Единица	Физическая величина	Единица
Сопротивление	Ом [Ом]	Мощность	Ватт [Вт]
Емкость	Фарад [Ф]	Заряд	Кулон [Кл]
Индуктивность	Генри [Гн]	Магнитное поле	Тесла [Тл]
Напряжение	Вольт [В]	Магнитный поток	Вебер [Вб]
Ток	Ампер [А]	Температура	[°C] или [K]
Энергия	Джоуль [Дж]	Давление	Паскаль [Па]

Таблица 1.2. Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка	Обозначение	Множитель	Приставка	Обозначение
10^{-15}	фемто	ф	10^{1}	дека	да
10^{-12}	пико	п	10^{2}	гекто	г
10^{-9}	нано	н	10^{3}	кило	к
10^{-6}	микро	мк	10^{6}	мега	М
10^{-3}	милли	м	10^{9}	гига	Г
10^{-2}	санти	с	10^{12}	тера	Т
10^{-1}	деци	д	10^{15}	пета	П

Зависимости

- Сопротивление проводника R зависит от его удельного сопротивления ρ, поперечного сечения S и длины L:

$$R = \frac{\rho L}{S}.$$

- Закон Ома показывает зависимость между напряжением V, током I и сопротивлением резистора R:

  $$V = RI.$$

- Мощность P, выделяемую на резисторе, можно выразить через произведение напряжения V и тока I:

  $$P = V_R I_R.$$

- Емкость C конденсатора зависит от электрической постоянной (диэлектрической проницаемости) вакуума ε_0, относительной диэлектрической проницаемости материала ε_R, площади пластины S и толщины диэлектрика d:

  $$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_R S}{d}.$$

- Напряжение на зажимах конденсатора зависит от величины заряда на нем Q_C и его емкости:

  $$V_C = \frac{Q_C}{C}.$$

- Постоянная времени τ электрической цепи определяется как произведение ее сопротивления R и емкости C:

  $$\tau = RC.$$

- Энергия E, запасенная в конденсаторе, зависит от его емкости C и напряжения V_C:

  $$E = \frac{CV_C^2}{2}.$$

- Напряжение на обкладках конденсатора при его заряде от источника V через резистор R изменяется по экспоненте:

  $$V_C = V(1 - e^{-t/(RC)}).$$

- Аналогично происходит разряд конденсатора, идущий через резистор R:

  $$V_C = Ve^{-t/(RC)}.$$

- Напряжение на зажимах индуктивности L зависит от скорости изменения протекающего по ней тока:

  $$V = L\frac{di}{dt}.$$

- Энергия, запасенная в индуктивности, зависит от величины индуктивности и протекающего по ней тока:

$$E = \frac{LI_L^2}{2}.$$

- Напряжение самоиндукции:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

- Постоянная времени τ электрической цепи, содержащей индуктивность, определяется как произведение величины индуктивности на ее сопротивление постоянному току:

$$\tau = \frac{L}{R}.$$

- Период колебаний идеального *RLC* колебательного контура определяется величинами его индуктивности и емкости:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

- Связь частоты и периода колебаний отражает их физическую взаимозависимость:

$$F = \frac{1}{T}.$$

- Частота отсечки F_0 цепи *RC* зависит от ее постоянной времени:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Константы

Диэлектрическая проницаемость вакуума $\varepsilon_0 = 8.84\times10^{-12}$.
Магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}$.

Таблица 1.3. Относительная диэлектрическая проницаемость ε_R некоторых материалов

Материал	ε_R	Материал	ε_R
Сухой воздух	~ 1	Бумага	~ 4
Тефлон	~ 2	Слюда	~ 7

Таблица 1.4. Удельное сопротивление металлов

Металл	ρ [Ом·м]	Металл	ρ [Ом·м]
Золото	1.5×10^{-8}	Алюминий	2.8×10^{-8}
Техническая медь	1.6×10^{-8}	Железо	8.5×10^{-8}

2 ВЫБОР РАДИАТОРОВ

2.1. Теория 16
2.2. Примеры тепловых задач 17
2.3. Виды используемых радиаторов 24
2.4. Дополнительная оснастка 39

3 Выбор резисторов 47
4 Выбор конденсаторов 71
5 Выбор трансформаторов 93
6 Выбор диодов 113
7 Выбор биполярных транзисторов 141
8 Выбор МОП-транзисторов 159

2.1. ТЕОРИЯ

Тепловые потери в компонентах

Под тепловой мощностью понимается тепловая энергия *P*, выделенная за единицу времени. Ее можно выразить через сопротивление электрической цепи *R* и действующее значение тока *I:*

$$P = RI^2.$$

Для некоторых компонентов активное сопротивление является паразитной составляющей, приводящей к нагреву (в качестве примера можно привести сопротивление диэлектрика конденсатора или катушки индуктивности). Расчет мощности, рассеиваемой тем или иным компонентом, приводится в соответствующих главах.

Существуют три способа отвода тепла: естественная конвекция, принудительное охлаждение с помощью теплоотвода и тепловое излучение.

При естественной конвекции горячий воздух поднимается вверх и замещается более холодным.

Принудительное охлаждение осуществляется с помощью вентилятора, подающего свежий воздух (в некоторых случаях применяются и другие теплоносители). Условием интенсивного отвода тепла является хороший контакт охлаждаемого компонента с теплоотводом.

Тепловое излучение происходит за счет тепловых колебаний, аналогичных солнечному излучению. Темные предметы излучают тепло более интенсивно, чем светлые, а излучаемая тепловая мощность пропорциональна четвертой степени температуры.

Тепловое сопротивление

Значение теплового сопротивления тела обратно пропорционально его возможности проводить тепло. Таким образом, тело, имеющее малое тепловое сопротивление, способно к эффективному отводу тепла (аналогично тому, как малое сопротивление хорошо проводит ток). С другой стороны, материал с большим тепловым сопротивлением отличается низкой теплопроводностью, что используется для термоизоляции.

Тепловая емкость

Тепловую емкость можно сравнить с емкостью электрического конденсатора или с резервуаром, который можно наполнить или освободить с помощью электрических зарядов или энергии. Чем меньше теплоемкость,

тем быстрее нагревается тело (маленький резервуар), чем больше теплоемкость и больше объем тела, тем больше время его нагрева.

Термоэлектрическая аналогия

Термоэлектрическая аналогия, которую мы приводим, позволяет решать тепловые задачи, используя общеизвестные методы расчета электрических схем (Табл. 2.1).

Таблица 2.1. Аналоги тепловых и электрических понятий

Тепловой термин	Электрический термин	Тепловой термин	Электрический термин
Источник тепла	Генератор тока	Тепловое сопротивление R_T	Сопротивление
Тепловой поток Φ_T	Ток		
Разность температур ΔT	Напряжение	Теплоемкость C_T	Конденсатор

Для расчетов можно использовать тепловой закон Ома $\Delta T = R_T\Phi_T$, закон узловых потенциалов, закон контурных токов, теоремы Тевенена, Нортона и Кеннели, а также формулы заряда и разряда конденсатора. Кроме того, можно говорить о постоянной времени изменения температуры радиатора.

2.2. ПРИМЕРЫ ТЕПЛОВЫХ ЗАДАЧ

Стабилизатор напряжения в интегральном исполнении

Стабилизатор напряжения на микросхеме типа 78M12 подключен к источнику постоянного напряжения величиной 18 В и обеспечивает выходное напряжение 12 В. Сопротивление нагрузки равно 50 Ом (Рис. 2.1).

Проверим необходимость применения радиатора для стабилизатора напряжения и уточним его характеристики.

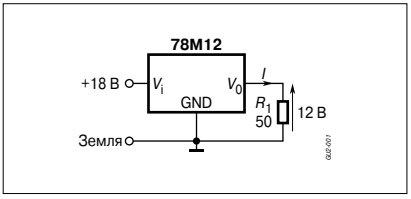

Рис. 2.1
Стабилизатор напряжения

Вначале необходимо определить мощность, рассеиваемую стабилизатором напряжения. В первом приближении мощность, выделяемая прибором, соответствует произведению падения напряжения на ток, проходящий через него:

$$P = VI = (18 - 12)\times(12/50) = 1.44 \text{ Вт}.$$

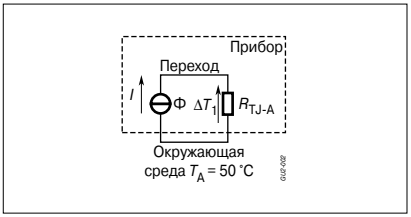

Рис. 2.2
Эквивалентная тепловая схема замещения

Теперь, когда мы знаем величину теплового потока, создадим тепловую эквивалентную схему замещения (Рис. 2.2). Из справочных данных на микросхему типа 78M12 мы узнаем, что тепловое сопротивление переход—корпус R_{TJ-C} равно 4°C/Вт, тепловое сопротивление переход—воздух R_{TJ-A} равно 35°C/Вт, максимальная рассеиваемая мощность составляет 20 Вт, а температура перехода T_J не должна превышать 150°C.

Мы должны убедиться в том, что мощность рассеяния стабилизатора намного меньше максимально допустимой (в нашем случае она равна 1.44 Вт при максимально допустимой мощности 20 Вт).

Затем, зная величины теплового сопротивления и теплового потока, рассчитаем температуру перехода (зададимся температурой окружающей среды, равной 50°C):

$$\Delta T_1 = T_J - T_A = \Phi_T R_{TJ-A},$$

откуда $T_J = T_A + \Phi_T R_{TJ-A} = 50 + (1.44 \times 35) = 100.4°C$.

Эта температура намного меньше, чем предельные 150°C, которые может выдержать микросхема. Следовательно, дополнительный охладитель здесь не нужен.

Если сопротивление нагрузки изменить с 50 Ом на 10 Ом, то ток, протекающий через стабилизатор, изменится с 0.24 А до 1.2 А, а рассеиваемая мощность увеличится с 1.44 Вт до 7.2 Вт. Выполнив необходимые расчеты, мы увидим, что температура перехода повысится до 302°C, — следовательно, необходимо использовать радиатор. Для этого случая эквивалентная тепловая схема замещения будет иметь вид, показанный на Рис. 2.3.

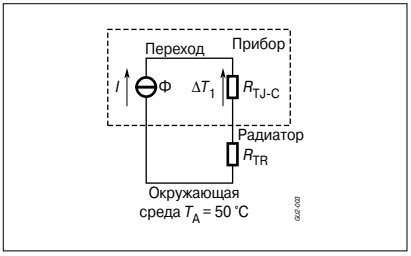

Рис. 2.3
Эквивалентная тепловая схема замещения с радиатором

Теперь рассчитаем новую температуру перехода, зависящую от теплового сопротивления радиатора R_{TR}:

$$T_J = T_A + (R_{TJ-C} + R_{TR})\ \Phi_T.$$

Если мы хотим, чтобы температура перехода не превышала 120°C (в данном случае уместно задаться запасом в 30°C), то формула расчета теплового сопротивления радиатора R_{TR} будет выглядеть так:

$$R_{TR} = [(T_J - T_A)/\Phi_T] - R_{TJ\text{-}C}.$$

Отсюда R_{TR} = 5.7°C/Вт.

Усилитель мощностью 70 Вт на интегральной микросхеме

Ниже показана схема усилителя 70 Вт с сопротивлением нагрузки 8 Ом, в котором применена интегральная схема TDA7294. Используя данные справочника «SGS-Thomson» (Рис. 2.4, Рис. 2.5, Рис. 2.6 и Табл. 2.2 и Табл. 2.3), рассчитаем тепловой радиатор, необходимый для усилителя.

Интегральная схема TDA7294 выполнена в корпусе большой мощности с 15 выводами. Она используется как Hi-Fi усилитель аудиосигналов класса AB. Благодаря большому выходному току усилитель способен обеспечить максимальную мощность в нагрузке от 4 до 8 Ом. Он имеет

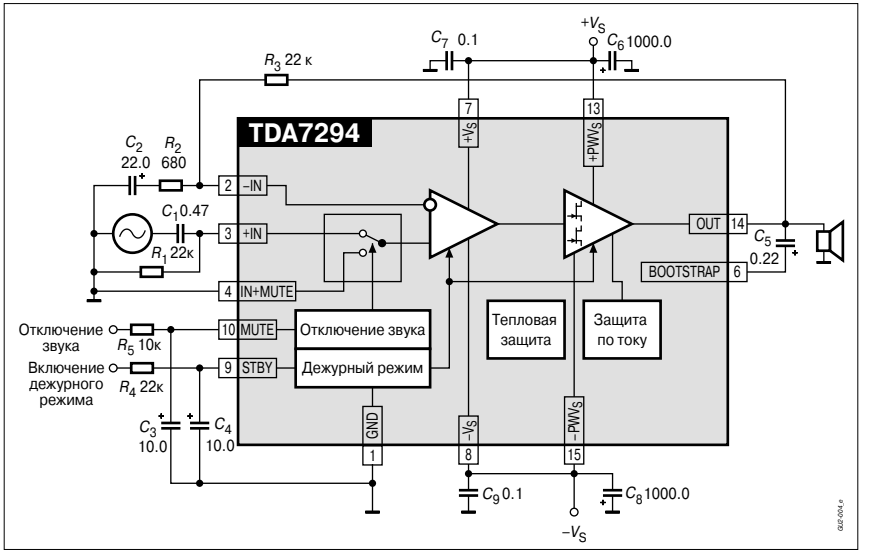

Рис. 2.4
Схема включения микросхемы TDA7294

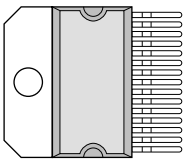

Рис. 2.5
Цоколевка микросхемы TDA7294 (вид сверху)

высокий коэффициент режекции помех, приходящих по питанию, что позволяет использовать его даже при плохой фильтрации питающего напряжения. Наличие функции «отключение звука», выполняемой с задержкой включения напряжения, упрощает дистанционное управление, исключает коммутационные шумы.

Таблица 2.2. Температурные характеристики

Обозначение	Параметр	Величина	Единица измерения
R_{TJ-C}	Максимальное тепловое сопротивление переход—корпус	1.5	°C/Вт

Таблица 2.3. Предельно допустимые величины

Обозначение	Параметр	Величина	Единица измерения
V_S	Напряжение питания	±50	В
I_{OUT}	Выходной ток	10	А
P_D	Рассеиваемая мощность (при температуре корпуса 70°C)	50	Вт
P_{OP}	Допустимый диапазон температур окружающей среды	0...70	°C
T_J	Допустимая температура перехода	150	°C

Воспользовавшись графиками, показанными на Рис. 2.6, можно увидеть, что при необходимости получить на нагрузке 8 Ом выходную мощность в 70 Вт напряжение обоих источников питания усилителя должно быть выше 30 В.

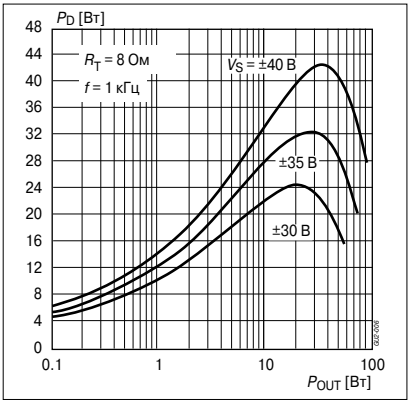

Рис. 2.6
Зависимость между выходной мощностью, напряжением питания и мощностью рассеяния

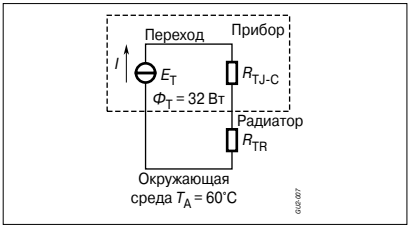

Рис. 2.7
Эквивалентная тепловая схема усилителя на 70 Вт

Кроме того, нельзя забывать, что чем больше напряжение источника питания, тем большую мощность должен рассеять прибор. Итак, выбираем напряжение источников питания ± 35 В, что позволит нам приблизиться к 80 Вт выходной мощности.

Кривая, соответствующая выбранному напряжению питания, позволяет определить мощность, рассеиваемую интегральной схемой. В данном случае максимальная мощность равна 32 Вт.

Теперь можно определить эквивалентную тепловую схему замещения, приведенную на Рис. 2.7.

Чтобы узнать другие необходимые нам параметры, необходимо обратиться к Табл. 2.2 и Табл. 2.3. Максимально допустимая температура перехода равна 150°C, а тепловое сопротивление переход—корпус — 1.5°C/Вт. Предположим, что температура окружающей среды равна 60°C, после чего зададимся запасом по температуре (ΔT) в 10°C. Имеем:

$$E_T = T_J - T_A - \Delta T = (R_{TJ-C} + R_{TR})\ \Phi_T,$$

откуда $R_{TR} = (T_J - T_A - \Delta T)/\ \Phi_T - R_{TJ-C} = (150 - 60 - 10)/32 - 1.5$. Окончательно $R_{TR} = 1$ °C/Вт.

Итак, необходимо выбрать радиатор, у которого тепловое сопротивление меньше 1°C/Вт. При использовании электроизолятора (например, слюды), монтируемого между корпусом и радиатором, сумма всех термосопротивлений не должна превышать 1°C/Вт.

Транзисторный усилитель мощностью 35 Вт

Структурная схема приведена на Рис. 2.8. Как и в предыдущем примере, окончательной целью расчета является определение необходимости в