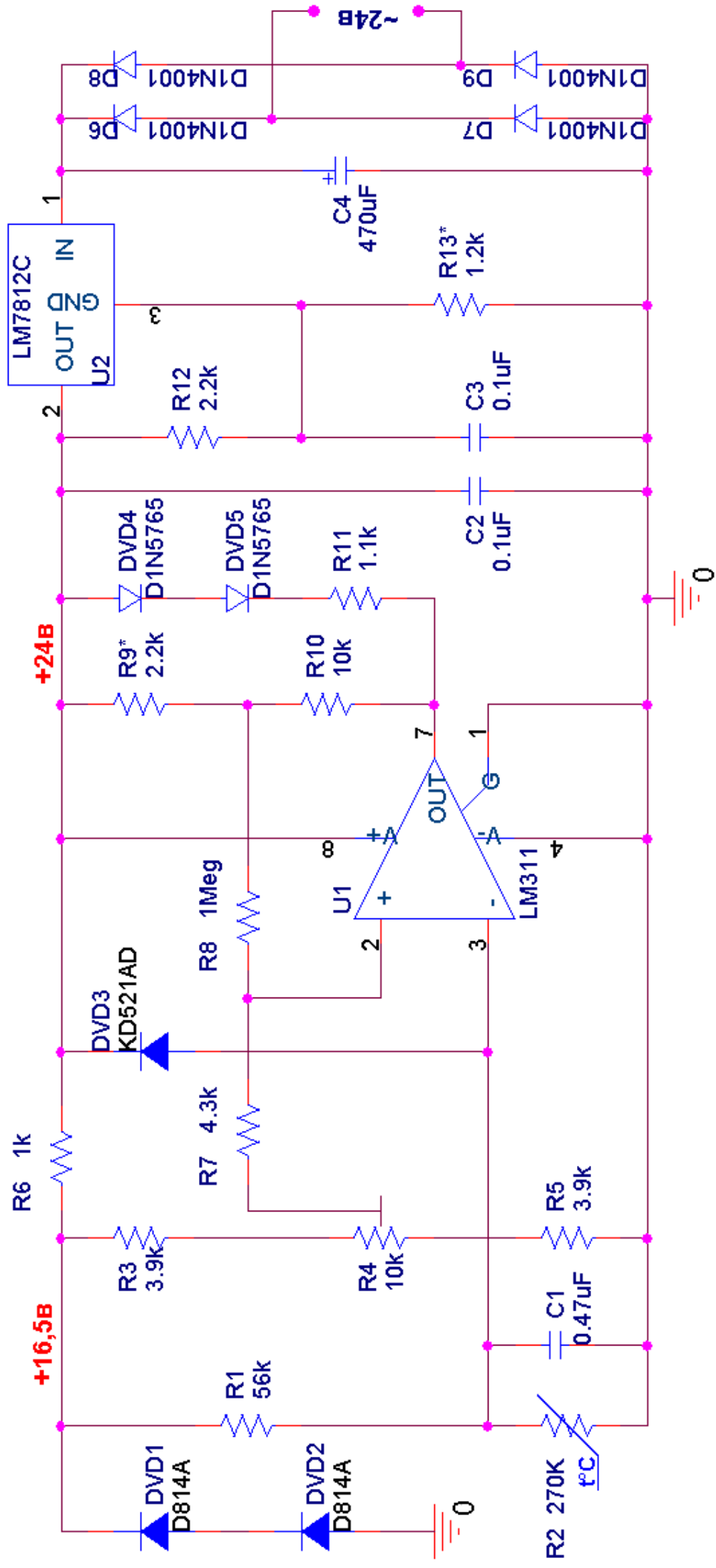




Расчет номиналов резисторов для терморегулятора

1. Выбираем минимальную температуру, которую должен стабилизировать терморегулятор равной **30°C** (можно любую другую).
2. Выбираем максимальную температуру, которую должен стабилизировать терморегулятор равной **95°C** (можно любую другую).
3. Выбираем терморезистор на **270кОм**. По градуировочной таблице для выбранного терморезистора находим сопротивления, которые он будет иметь при минимальной и максимальной температурах. **Rtmin=192530ом, Rtmax=16323ом**.
4. Чтобы обеспечить максимально резкое изменение напряжения на терморезисторе при изменении температуры, сопротивление добавочного резистора должно быть равно среднему геометрическому значению сопротивлений Rtmin и Rtmax. Этот результат получен при решении экстремальной задачи на максимум изменения коэффициента передачи резистивного делителя. В нашем случае

$$R1 = \sqrt{Rt\ min \cdot Rt\ max} = \sqrt{192530 \cdot 16323} = 56059\text{ом}.$$

Выбираем стандартный номинал **R1=56кОм**. Нет особой нужды точно подбирать номинал этого резистора. Схема будет прекрасно работать даже в том случае, если его номинал будет отличаться от расчетного на $\pm 15...20\%$. Лучше в сторону понижения, смотри следующий абзац. Однако номинал резистора R1 определяет номиналы всех последующих элементов схемы. Поэтому нужно сразу и четко сделать выбор.

5. **Просто к сведению.** Сопротивление терморезистора зависит от температуры весьма нелинейно. В конечном счете, это приведет к тому, что метки на шкале переменного резистора будут расположены неравномерно. В области низких температур редко, а в области высоких температур – часто. Можно заранее подобрать такой номинал сопротивления резистора R1, который обеспечит наилучшую линейность регулировочной характеристики переменного резистора. Однако ценой небольшого снижения температурной чувствительности. Приближенная методика расчета приведена в РАДИО 1997год, №11, стр.59. Увы, в статье есть опечатки. Расчет по исправленным формулам дает номинал R1=37531ом, и ошибку линеаризации 1,547°C. В действительности, при правильном расположении линии интерполяции ошибка составляет 0,959°C. Если же решить задачу точными численными методами, то получится номинал R1=37944ом и максимальная ошибка линеаризации 0,937°C. Все это я написал лишь для того, чтобы было понятно, какой дополнительный бонус можно получить при снижении номинала R1.

6. **Зависимость напряжения на терморезисторе от температуры.** В схеме установлены стабилитроны Д814А. Напряжение на них составит около **16,5в**. Вообще говоря, стабилитроны могут быть любыми, а напряжение на них от 10в до 20в. Работа терморегулятора мало зависит от этого напряжения. Стабилитроны нужны лишь для того, чтобы устранить дребезг терморегулятора при колебаниях сетевого напряжения. От напряжения на стабилитронах будет зависеть лишь гистерезис терморегулятора.

При минимальной температуре напряжение на терморезисторе составит

$$Ut\ min = \frac{Ucm \cdot Rt\ min}{R1 + Rt\ min} = \frac{16,5в \cdot 192,53к}{56к + 192,53к} = 12,782в.$$

При максимальной температуре напряжение на терморезисторе составит

$$Ut\ max = \frac{Ucm \cdot Rt\ max}{R1 + Rt\ max} = \frac{16,5в \cdot 16,323к}{56к + 16,323к} = 3,724в.$$

Средняя температурная чувствительность понадобится при расчете гистерезиса. Она для данного терморегулятора составит.

$$Kt = \frac{Ut\ min - Ut\ max}{t\ min - t\ max} = \frac{12,782 - 3,724}{30 - 95} = -0,1394\text{вольт/градус}.$$

7. **Выбор R4 и расчет R3 и R5.** Сопротивление переменного резистора R4 может быть почти любым. Главное, чтобы он имел линейную зависимость сопротивления от угла

поворота. Менее 4,7кОм номинал выбирать не нужно во избежание разогрева резистора. При сопротивлении свыше 47кОм могут возникнуть проблемы с помехами, а также потребуется резистор с очень большим сопротивлением в цепи гистерезиса. Выбираю наиболее распространенный номинал **10к**. Реальное сопротивление переменного резистора может отличаться от указанного на маркировке до $\pm 20\%$. Поэтому у выбранного резистора R4 номинал нужно измерить. Дальнейшие расчеты номиналов R3 и R5 вести по результатам измерений.

Сначала находим ток через переменный резистор.

$$I_{\text{пер}} = \frac{U_{\text{т min}} - U_{\text{т max}}}{R_4} = \frac{12,782\text{в} - 3,724\text{в}}{10000\text{ом}} = \mathbf{0,9058\text{мА}}.$$

Затем находим номинал R5.

$$R_5 = \frac{U_{\text{т min}}}{I_{\text{пер}}} = \frac{3,724\text{в}}{0,0009058\text{А}} = 4111\text{ом}. \text{ Выбираем } \mathbf{R_5=3,9\text{кОм}}$$
 в сторону уменьшения,

чтобы с гарантией охватить весь диапазон регулировки.

Далее находим номинал R4.

$$R_3 = \frac{U_{\text{см}} - U_{\text{т max}}}{I_{\text{пер}}} = \frac{16,5\text{в} - 12,782\text{в}}{0,0009058\text{А}} = 4104\text{ом}. \text{ Выбираем } \mathbf{R_3=3,9\text{кОм}}$$
 в сторону

уменьшения, чтобы с гарантией охватить весь диапазон регулировки.

8. **Определение выходного сопротивления цепи делителя задания температуры.** Это подготовительный этап для расчета гистерезиса. Цепь делителя задания температуры состоит из резисторов R3, R4 и R5. Для упрощения расчет проводится только для одной точки – среднего положения движка переменного резистора R4.

Сначала находим сопротивление R_H, верхнего плеча делителя.

$$R_H = R_3 + \frac{R_4}{2} = 3,9\text{к} + \frac{10\text{к}}{2} = \mathbf{8,9\text{кОм}}.$$

Затем находим сопротивление R_L, нижнего плеча делителя.

$$R_L = R_5 + \frac{R_4}{2} = 3,9\text{к} + \frac{10\text{к}}{2} = \mathbf{8,9\text{кОм}}.$$

Выходное сопротивление цепи делителя задания температуры определяется как сопротивление параллельно соединенных резисторов R_H и R_L. Вообще говоря, в это сопротивление входит еще и дифференциальное сопротивление последовательно соединенных стабилитронов. Но оно невелико, порядка 10...50ом и им можно пренебречь.

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_H \cdot R_L}{R_H + R_L} = \frac{8,9\text{к} \cdot 8,9\text{к}}{8,9\text{к} + 8,9\text{к}} = \mathbf{4,45\text{кОм}}.$$

Тут можно было бы сразу перейти к следующему пункту. Однако я решил добавить в схему резистор R7 и расписать выбор элементов более детально. Попутно объясню, зачем нужен резистор R7, который мало кем ставится.

Просто к сведению. Выходное сопротивление делителя может сильно изменяться при вращении движка переменного резистора R4. Вслед за этим выходным сопротивлением будет изменяться и гистерезис. Для стабилизации гистерезиса в диапазоне регулирования в схему вводится резистор R7. Сопротивление этого резистора добавляется к выходному сопротивлению цепи делителя R3, R4, R5.

Расчет усложняется немного. Он сводится к нахождению трех выходных сопротивлений R_{вых1}, R_{вых2} и R_{вых3}.

$$R_{\text{вых1}} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4 + R_5}}, \quad R_{\text{вых2}} = \frac{1}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_3 + R_4}}.$$

В нашем случае в крайних положениях движка R4 выходные сопротивления будут

$$R_{\text{вых1}} = \frac{1}{\frac{1}{3,9\kappa} + \frac{1}{10\kappa + 3,9\kappa}} = 3,046\text{кОм}, \quad R_{\text{вых2}} = \frac{1}{\frac{1}{3,9\kappa} + \frac{1}{10\kappa + 3,9\kappa}} = 3,046\text{кОм}.$$

$R_{\text{вых3}}$ это максимальное выходное сопротивление делителя. Оно достигается либо при некотором неизвестном положении движка переменного резистора, либо совпадает с $R_{\text{вых1}}$ или $R_{\text{вых2}}$. Расчет $R_{\text{вых3}}$ ведется в два этапа.

Этап 1. Находим сопротивления плечей $R_{\text{пл}}$, при которых выходное сопротивление становится максимально возможным

$$R_{\text{пл}} = \frac{R3 + R4 + R5}{2} = \frac{3,9\kappa + 10\kappa + 3,9\kappa}{2} = 8,9\text{кОм}.$$

Этап 2. Выясняем, достижимо ли такое положение движка переменного резистора, при котором обеспечивается равенство сопротивлений плечей. Формально должны одновременно выполняться следующие условия

$$\begin{cases} R4 + R5 \geq R_{\text{пл}} \\ R3 + R4 \geq R_{\text{пл}} \end{cases} \quad \text{или} \quad R4 \geq |R3 - R5|$$

Согласно последней записи модуль разности постоянных сопротивлений делителя не должен быть больше сопротивления переменного резистора.

Если неравенство $R4 \geq |R3 - R5|$ не выполняется, то $R_{\text{вых3}}$ совпадает с $R_{\text{вых1}}$ или $R_{\text{вых2}}$, и искать его не нужно.

Если неравенство $R4 \geq |R3 - R5|$ выполняется, то $R_{\text{вых3}}$ существует и находится следующим образом

$$R_{\text{вых3}} = \frac{R_{\text{пл}}}{2}.$$

В нашем случае неравенство $10\kappa \geq |3,9\kappa - 3,9\kappa|$ выполняется. Максимальное выходное сопротивление делителя достигается при некотором промежуточном положении переменного резистора.

$$R_{\text{вых3}} = \frac{8,9\kappa}{2} = 4,45\text{кОм}.$$

Итак, $R_{\text{вых1}}=3,046\text{кОм}$, $R_{\text{вых2}}=3,046\text{кОм}$, $R_{\text{вых3}}=4,45\text{кОм}$. Из трех номиналов $R_{\text{вых}}$ выбираем наибольшее значение и делим на выбранное наименьшее значение. Получаем коэффициент неустойчивости

$$K_{\text{нест}} = \frac{R_{\text{вых max}}}{R_{\text{вых min}}} = \frac{4,45\kappa}{3,046\kappa} = 1,46.$$

При вращении движка переменного резистора гистерезис изменяется на 46%. Зададимся коэффициентом неустойчивости 1,2 и найдем номинал резистора $R7$, при котором она будет получена.

$$R7 = \frac{R_{\text{вых max}} - K_{\text{нест}} \cdot R_{\text{вых min}}}{K_{\text{нест}} - 1} = \frac{4,45\kappa - 1,2 \cdot 3,046\kappa}{1,2 - 1} = 3,974\text{кОм}.$$

Выбираем **$R7=4,3\text{кОм}$** , ближайший номинал в сторону увеличения. Получаем теперь коэффициент неустойчивости.

$$K_{\text{нест}} = \frac{R7 + R_{\text{вых max}}}{R7 + R_{\text{вых min}}} = \frac{4,3\kappa + 4,45\kappa}{4,3\kappa + 3,046\kappa} = \frac{8,75\kappa}{7,346\kappa} = 1,191$$

Оценим среднее значение выходного сопротивления делителя задания температуры как среднее арифметическое $R_{\text{вых min}}$ и $R_{\text{вых max}}$ с учетом $R7$.

$$R_{\text{вых средн}} = \frac{R_{\text{вых max}} + R_{\text{вых min}}}{2} + R7 = \frac{4,45\kappa + 3,046\kappa}{2} + 4,3\kappa = 8,048\text{кОм}.$$

9. **Выбор номинала R8 в цепи гистерезиса.** Резистор R8 не должен оказывать заметного влияния на делитель задания температуры. Поэтому его сопротивление должно быть хотя бы в 100 раз больше сопротивления R_{выхсредн}.

$$R8 \geq 100 \cdot R_{\text{выхсредн}} = 100 \cdot 8,048\text{к} = 804,8\text{кОм}.$$

Выбираем **R8=1Мом**, ближайший доступный номинал в сторону увеличения.

10. **Оценка напряжения на резисторе R9 делителя R9, R10.** Выше температурная чувствительность K_t терморегулятора оценивалась на уровне 0,1394вольт/градус. Зададим гистерезис терморегулятора (разницу температур включения и отключения нагревателя) равным **0,25°C**. Скачок напряжения гистерезиса на входе компаратора при этом составит

$$U_{\text{г}} = 0,25^{\circ}\text{C} \cdot 0,1394 = \mathbf{0,03485\text{в}}.$$

На резисторе R9 делителя R9, R10 при этом должен быть скачок напряжения

$$U_{R9} = U_2 \cdot \frac{R_{\text{выхсредн}} + R8}{R_{\text{выхсредн}}} = 0,03485\text{в} \cdot \frac{8,048\text{к} + 1000\text{к}}{8,048\text{к}} = \mathbf{4,365\text{в}}.$$

Это вполне нормальное значение напряжения. U_{R9} примерно в 5 раз меньше напряжения питания компаратора. Это означает, что можно либо в 5 раз увеличить гистерезис (с 0,25°C до 1,25°C), либо в 5 раз увеличить сопротивление резистора R8 в случае необходимости.

Если бы U_{R9} было близко к напряжению питания, то нужно было бы уменьшить номинал резистора R8.

Если бы U_{R9} было менее 1в, то нужно было бы увеличить номинал резистора R8.

11. **Расчет номиналов резисторов R9 и R10.** Чтобы делитель R9, R10 не нагружал сильно выход компаратора, выбираем номинал **R10=10кОм**. Выходное напряжение компаратора примем равным 24в. Найдем ток делителя R9, R10.

$$I_{R10} = \frac{24 - U_{R9}}{R10} = \frac{24\text{в} - 4,365\text{в}}{10000\text{ом}} = 0,001964\text{А}.$$

Теперь можно найти номинал резистора R9.

$$R9 = \frac{U_{R9}}{I_{R10}} = \frac{4,365\text{в}}{0,001964\text{А}} = 2223\text{ом}.$$

Выбираем **R9=2,2кОм**, ближайший широко распространенный стандартный номинал.

Резистор R9 может быть подстроечным на 3,3кОм. В этом случае можно получить регулируемый от 0°C до 0,37°C гистерезис. Отмечу, что при вращении движка R9 будет изменяться только верхний температурный порог переключения регулятора (температура отключения нагревателя). При этом останется неизменным нижний температурный порог переключения регулятора (температура включения нагревателя). Иными словами, при вращении движка резистора R9 пороги переключения терморегулятора будут меняться от 87,00°C ...87,01°C до 87,00°C ...87,37°C.

12. **Назначение прочих элементов.**

Резистор **R6** задает ток около **5мА** через стабилитроны VD1, VD2.

Конденсатор **C1** выполняет две функции. Во-первых, устраняет помехи, которые наводятся на кабель от терморезистора. Во-вторых, гарантированно устраняет кратковременное включение нагревателя при подаче питания на терморегулятор. Его емкость подбирается экспериментально и может быть в пределах от 1000пФ до 1мкФ. Применять оксидные конденсаторы нельзя из-за больших утечек.

Диод **VD3** защищает вход компаратора от тока разряда конденсатора C1 при отключении питания. Можно применить любой импульсный диод с прямым током 50мА или выше. При емкости конденсатора C1 более 10000пФ (0,01мкФ) установка диода строго обязательна.

Диоды **VD4, VD5** имитируют светодиоды индикатора и оптопары.