

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 543.27.-8:543.42

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157

ГРНТИ 47.29.33

Специальность ВАК 2.2.13

Научная статья

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ АНАЛИЗАТОРА ВЛАЖНОСТИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Хаджийская Е. Ю.

*Институт радиоэлектроники и информатики Российского технологического университета
МИРЭА (Москва, Троицк, Россия)*

Аннотация Влажность является важным параметром природного газа при его добыче, транспортировке и переработке. Анализаторы влажности природного газа применяются для управления процессом осушки природного газа и на узлах учёта газа для контроля согласованных спецификаций. При транспортировке газа под высоким давлением или при низких температурах важна высокая точность измерений, так как глубокая осушка является весьма дорогостоящим мероприятием, а транспортировка газа с высоким содержанием воды может привести ещё и к преждевременному износу труб и арматуры. Также временное прекращение поставок наиболее часто используемых анализаторов влажности вызвало необходимость разработки отечественных аналогов. В работе была разработана схема электрическая структурная, были проработаны электро-схемные решения и подобраны номиналы электронных компонентов для изготовления плат и блоков прототипа устройства для оценки влажности природного газа. В частности, был разработан преобразователь напряжения в ток диодного лазера, преобразователь сопротивления терморезистора в напряжения, датчик давления и температуры аналитической кюветы, были подобраны усилители фотодиодов, стабилизаторы напряжения, была разработана система регулировки и стабилизации температуры реперной кюветы.

Ключевые слова: анализатор влажности, природный газ, электронные блоки

Для цитирования: Хаджийская Е. Ю. Разработка электронных блоков анализатора влажности природного газа // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 146-157. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157

Research Article

DEVELOPMENT OF ELECTRONIC UNITS OF THE NATURAL GAS HUMIDITY ANALYZER

Khadzhiyskaya E. Yu.

*Institute of Radio Electronics and Informatic, Russian Technological University MIREA
(Moscow, Troitsk, Russia)*

Abstract Moisture content is an important parameter of natural gas during its extraction, transportation and processing. Natural gas moisture analyzers are used to monitor the natural gas drying process and in gas metering units to monitor agreed specifications. When transporting gas under high pressure or at low temperatures, high measurement accuracy is important, since deep dehydration is quite expensive, and transporting gas with a high-water content can also lead to premature wear of pipes and fittings. The temporary cessation of supplies of the most commonly used moisture analyzers caused the need to develop domestic analogues. In the work, an electrical block diagram was developed, electrical circuit solutions were worked out and nominal values of electronic components for the manufacture of printed circuit boards and blocks of a prototype device for assessing the moisture of natural gas were selected. In particular, a voltage converter to diode laser current, a thermistor resistance converter to voltage and a pressure and temperature sensor for an analytical cell were developed, photodiode amplifiers and voltage stabilizers were selected, and a system for adjusting and stabilizing the temperature of the reference cell was developed.

Keywords: moisture analyzer, natural gas, electronic blocks

For citation: Khadziyskaya E. Yu. Development of electronic units of the natural gas humidity analyzer // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 146-157. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157

Введение

Разрабатываемый анализатор влажности природного газа основан на технологии TDLAS – перестраиваемой диодной лазерной спектроскопии.

Диодная лазерная спектроскопия — это метод измерения концентрации веществ (например, водяного пара или метана) в среде (чаще газовой смеси) с учётом абсорбционных свойств самого вещества. При этом используются так называемые перестраиваемые диодные лазеры [1].

Сокращенное название технологии TDLAS пошло от английского определения: «Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy». Буква «Т» («Tunable», то есть перестраиваемый) подчёркивает значение этой особенности диодных лазеров в абсорбционной спектроскопии, то есть в спектроскопии поглощения.

Данная технология имеет следующие преимущества:

- высокая точность;
- работа в непрерывном режиме;
- быстрый отклик;
- бесконтактность.

Помимо технологии TDLAS существуют альтернативные технологии, такие как охлаждаемые зеркала («chilled mirrors»), ёмкостные датчики, кварцевые датчики («quartz crystal microbalance») [2].

Схема электрическая структурная

Общая структурная схема электронной части устройства для оценки влажности природного газа показана на рисунке 1. Прототип устройства будет собран на плате сбора данных National Instruments с интерфейсом на LabView.



Рисунок 1. Структурная схема электронной части устройства

Разберём подробно представленную структурную схему. На структурной схеме цифрами обозначены следующие части и блоки:

- 1-3 – фотодиоды для регистрации излучения;
- 4 – терморезистор лазерного модуля;
- 5 – элемент системы охлаждения лазера;
- 6 – диодный лазер;
- 7 – нагревательный элемент системы стабилизации температуры реперной кюветы;
- 8 – терморезистор системы стабилизации температуры реперной кюветы;
- 16-18 – усилители фотодиодов;
- 19 – преобразователь сопротивления терморезистора в напряжение;
- 20 – усилитель для термоэлектрического элемента Пельтье;
- 21 – преобразователь напряжения в ток диодного лазера;
- 22 – система регулировки и стабилизации температуры реперной кюветы;
- 23 – преобразователь сопротивления терморезистора реперной кюветы;
- 24 – многофункциональная плата ввода-вывода (рисунок 2).



Рисунок 2. Многофункциональная плата ввода-вывода

Блоки 9-15 на структурной схеме электронной части устройства для оценки влажности природного газа (рисунок 1) являются блоками питания, а именно:

- 9-11 – блоки питания усилителей фотодиодов, ± 7 В, 50 мА;
- 12 – блок питания преобразователя сопротивления терморезистора, 12 В, 20 мА;
- 13 – блок питания системы охлаждения лазера;
- 14 – блок питания для преобразователя тока диодного лазера, 12 В, 250 мА;
- 15 – блок питания для системы стабилизации температуры реперной кюветы, 7 В, 1 А.

Преобразователь напряжения в ток диодного лазера

Диодный лазер является токовым устройством, поэтому для его питания требуется преобразователь входного напряжения в выходной ток. Упрощённая схема такого преобразователя приведена на рисунке 3.

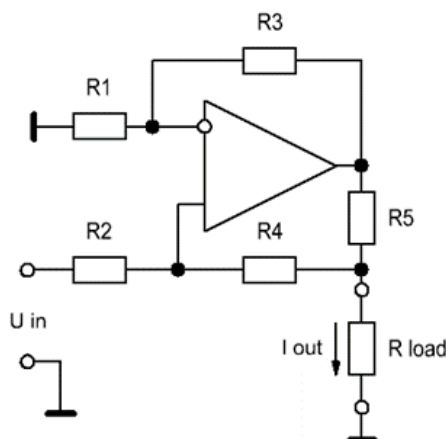


Рисунок 3. Преобразователь напряжения в ток

В этой схеме выходной ток (формула 1) не зависит от сопротивления нагрузки R_{load} при условии $R1=R2$ и $R3=R4+R5$.

$$I_{out} = \frac{U_{in}}{R5} \cdot \frac{R3}{R1} \quad (1)$$

К преобразователю тока предъявляются следующие требования:

- выходной ток 0...130 мА;
- входное управляющее напряжение 0...10 В;
- полоса частот 0...10 кГц (при работе без модуляции); 0...1 МГц (при использовании модуляции);
- шумы выходного тока < 200 нА.

Полная схема источника тока представлена на рисунке 4.

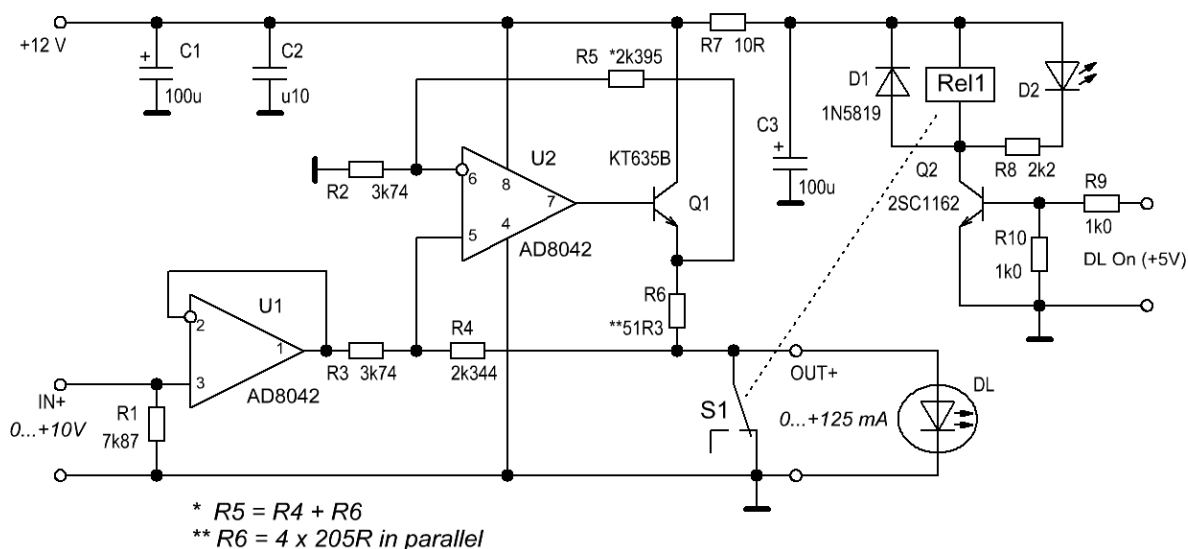


Рисунок 4. Схема источника тока для питания лазера

В схеме использованы rail-to-rail операционные усилители, питающиеся от однополярного источника. По входу эта схема управляется напряжением от ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) многофункциональной платы ввода-вывода (16 бит, напряжение 0...10 В), при этом форма выходного тока повторяет форму входного напряжения. Включение лазера производится путём подачи высокого логического уровня с цифрового выхода платы ввода-вывода.

Резисторы R2, R3, R4, R5 и R6 должны иметь высокую точность (0,25%), низкий температурный коэффициент сопротивления и низкий уровень избыточных шумов. В прототипе устройства для оценки влажности планируется использовать металлопленочные резисторы C2-29B (рисунок 5).

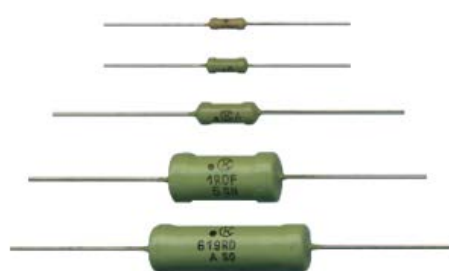


Рисунок 5. Металлопленочные резисторы типа C2-29B

Преобразователь сопротивления терморезистора в напряжение

Преобразователь состоит из источника опорного напряжения REF02, токозадающего резистора R3, фильтра нижних частот R4, R7, C6 и усилителя с коэффициентом передачи 3 (AD820). Схема преобразователя приведена на рисунке 6.

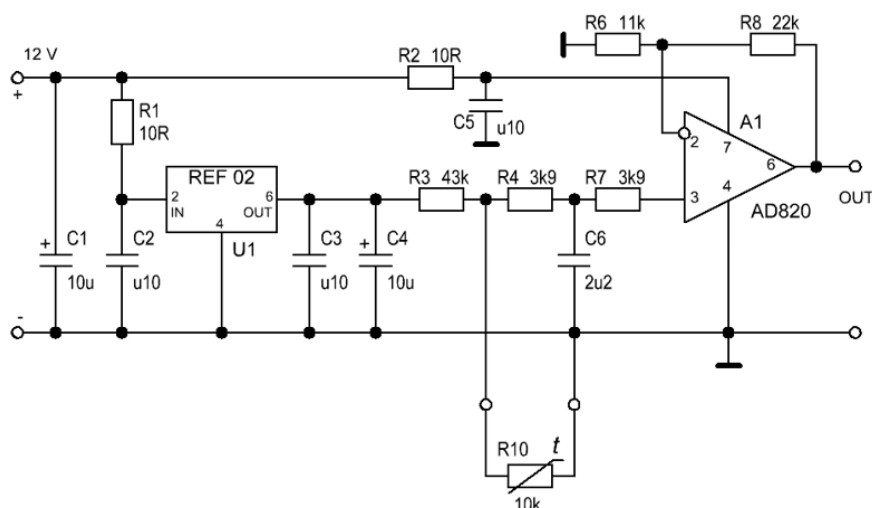


Рисунок 6. Преобразователь сопротивления терморезистора в напряжение

Резисторы R3, R6, и R8 должны иметь высокую точность и низкий температурный коэффициент сопротивления, пойдут металлопленочные резисторы C2-29B.

Терморезистор R10 должен быть вмонтирован в лазерный модуль и иметь сопротивление 10 кОм при температуре, равной 25 °С. Температурная зависимость сопротивления терморезистора нелинейная, и температура вычисляется по формуле Стейнхарт-Харта (Steinhart-Hart) (формула 2) [4]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right), \quad (2)$$

где T – температура в кельвинах (°K), R_0 – сопротивление терморезистора при $T = T_0$ (обычно $T_0 = 298,15$ °K = 25 °C), B – параметр данного терморезистора (для планируемого к использованию приводится значение $B = 3892$).

Линеаризация температурной шкалы и вычисление температуры будут производиться по этой формуле программой в компьютере.

Усилители фотодиодов

Одной из наиболее существенных частей газоанализаторов на основе диодных лазеров является усилитель тока фотодиода, поскольку сигналы на выбранной полосе поглощения ожидаются слабые.

Эти усилители должны обеспечивать высокую линейность, плоскую амплитудно-частотную характеристику в заданной полосе частот и минимальный уровень шумов.

Обычно такие усилители делают по схеме трансимпедансного усилителя, то есть преобразователя входного тока в выходное напряжение [3]. Упрощённая схема такого усилителя показана на рисунке 7.

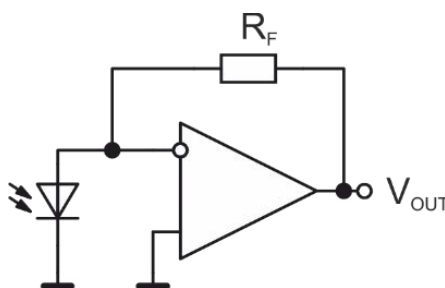


Рисунок 7. Трансимпедансный усилитель

При включении фотодиода по такой схеме напряжение на нём всегда постоянно и равно нулю, что обеспечивает высокую линейность и широкую полосу частот. Передаточная функция идеального трансимпедансного усилителя равна:

$$V_{out} = -I_D \cdot R_F, \quad (3)$$

где I_D – ток фотодиода, R_F – сопротивление в цепи обратной связи.

То есть коэффициент передачи такого усилителя зависит только от сопротивления в цепи обратной связи.

При практическом использовании формула усложняется, поскольку фотодиод имеет собственную ёмкость, часто весьма существенную, а операционный усилитель

неидеален. Это может приводить к высокому уровню шумов и неустойчивости усилителя, поэтому требуется его расчёт для каждого конкретного применения.

Стандартная схема реального трансимпедансного усилителя показана на рисунке 8.

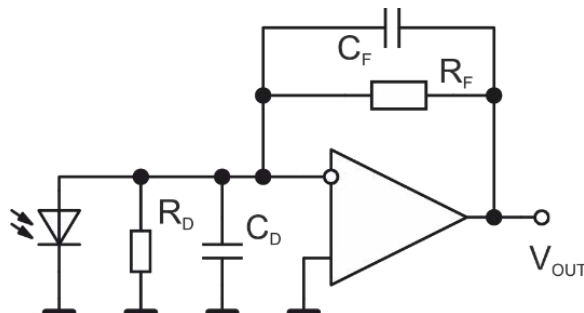


Рисунок 8. Стандартная схемы трансимпедансного усилителя с фотодиодом

На приведенной схеме R_D – эквивалентное сопротивление фотодиода (для фотодиодов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов это сопротивление обычно много больше, чем сопротивление в цепи обратной связи R_F и может не учитываться); C_D – ёмкость фотодиода; C_F – корректирующая емкость в цепи обратной связи.

При расчёте схемы нужно, прежде всего, определиться с выбором подходящего фотодиода, операционного усилителя и требуемой полосы пропускания F_P . После этого можно рассчитать максимально-допустимое значение сопротивления в цепи обратной связи R_F :

$$R_F = \frac{GBW}{2\pi \cdot C_D \cdot F_P^2}, \quad (4)$$

где GBW (gain bandwidth product) – произведение коэффициента усиления на полосу пропускания операционного усилителя. Этот параметр всегда приводится в технических данных на ОУ (операционный усилитель). Если полученное значение R_F слишком велико (то есть приводит к большему чем нужно коэффициенту передачи усилителя), то его можно уменьшить до необходимого значения.

Затем по формуле (5) рассчитывается минимальная ёмкость корректирующего конденсатора C_F , обеспечивающая устойчивую работу усилителя.

$$C_F = \frac{1}{4\pi \cdot R_F \cdot GBW} (1 + \sqrt{1 + 8\pi \cdot R_F \cdot C_D \cdot GBW}) \quad (5)$$

$$8\pi \cdot R_F \cdot C_D \cdot GBW \gg 1 \quad (6)$$

$$8\pi \cdot R_F \cdot C_D \cdot GBW \ll 1 \quad (7)$$

Если выполняется условие (6), то выражение (5) существенно упрощается:

$$C_F = \sqrt{\frac{C_D}{2\pi \cdot R_F \cdot GBW}} \quad (8)$$

В том случае, когда выполняется условие (7), выражение (5) принимает вид:

$$C_F = \frac{C_D}{2\pi \cdot R_F \cdot GBW} \quad (9)$$

Приведённые выше формулы (4) – (9) подходят для расчёта реальных параметров трансимпедансного усилителя, за исключением одного нюанса. Если полученное значение R_F слишком мало, чтобы обеспечить необходимый коэффициент передачи усилителя, то требуется дополнительный каскад усиления по напряжению, который может быть сделан по схеме инвертирующего усилителя, приводящейся в любом учебнике.

При регистрации слабых сигналов не стоит злоупотреблять усилением во втором каскаде, наоборот, нужно максимально использовать усиление трансимпедансного каскада (то есть значение R_F должно быть максимально возможным). Это связано с тем, что тепловые шумы сопротивления R_F (10) пропорциональны квадратному корню из этого сопротивления, в то время как коэффициент передачи трансимпедансного каскада пропорционален R_F . Таким образом, при уменьшении R_F в n раз отношение сигнал/шум, связанное с тепловыми шумами ухудшится в $\sqrt{n}$ раз.

$$\bar{U}_N = \sqrt{4kTR\Delta F} \quad (10)$$

Полная схема трансимпедансного усилителя, разработанная для использования в прототипе анализатора влажности природного газа, показана на рисунке 9.

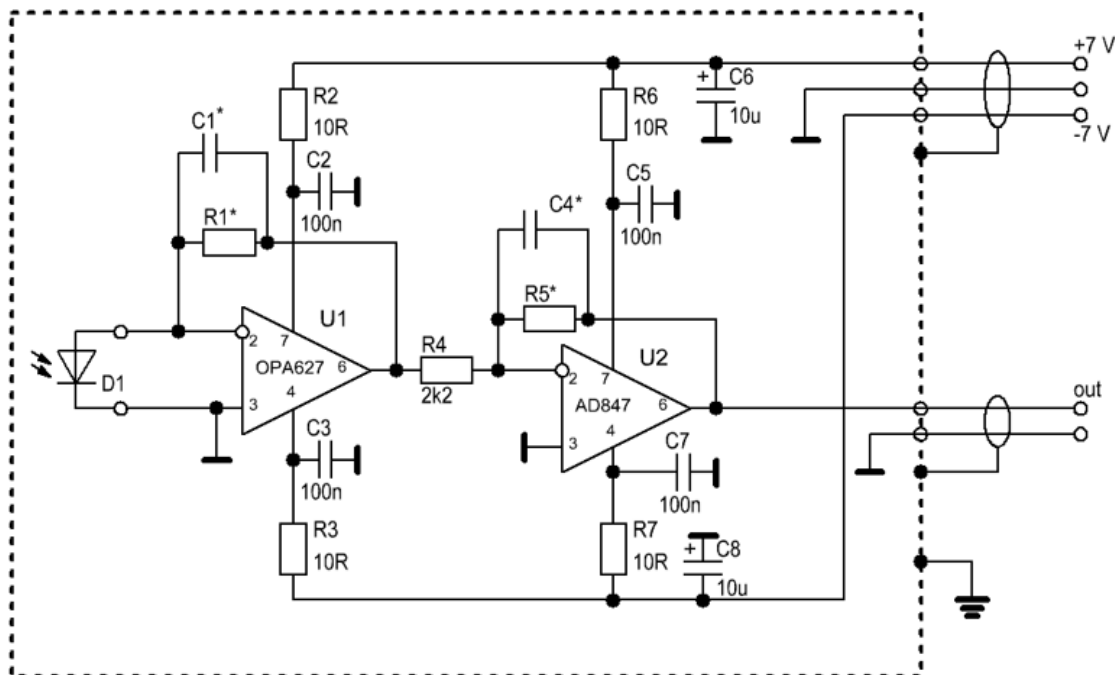


Рисунок 9. Полная схема трансимпедансного усилителя (компоненты, отмеченные (*), рассчитываются индивидуально для каждого канала)

В трансимпедансном каскаде необходимо будет использовать ОУ ОРА627 (Texas Instruments), поскольку он обладает низким уровнем шумов и достаточной

полосой пропускания. В дополнительном каскаде усиления по напряжению будет установлен ОУ AD847 (Analog Devices). Этот ОУ имеет широкую полосу пропускания и хорошо работает в качестве буфера, поскольку он способен устойчиво работать при большой ёмкостной нагрузке. Во втором каскаде также предпочтительно использовать фильтр низких частот первого порядка, который подавляет высокочастотные шумы трансимпедансного усилителя, находящиеся за пределами его полосы пропускания.

Для усилителя в основном аналитическом канале требуется несколько иная схема выходного каскада, поскольку к выходу этого усилителя будет подключен длинный кабель и к выходному буферному каскаду предъявляются повышенные требования. Разработанная схема усилителя показана на рисунке 10.

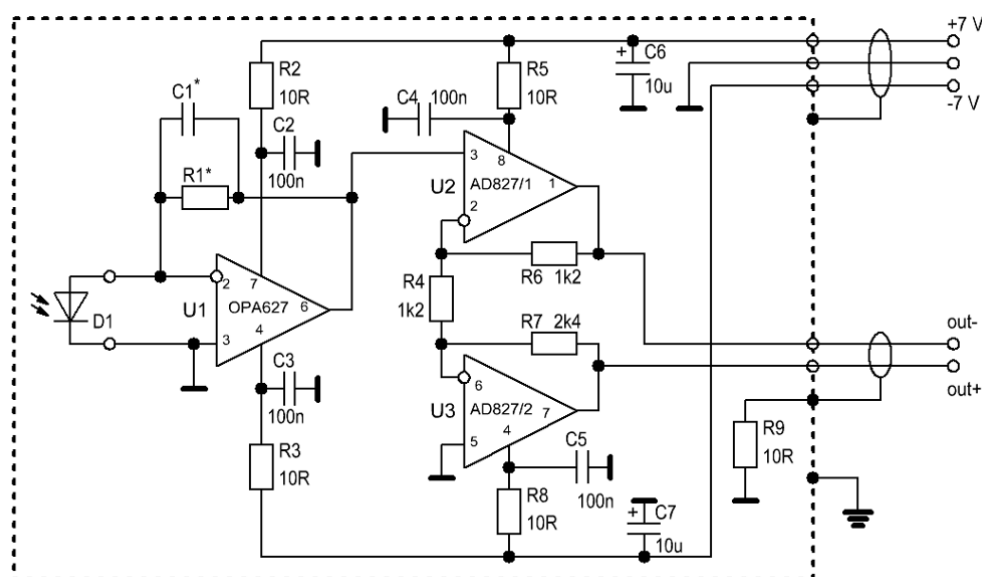


Рисунок 10. Схема усилителя для аналитического канала

Усилитель на рисунке 10 отличается от усилителя на рисунке 9 тем, что его выходной каскад выполнен по симметричной парафазной дифференциальной схеме, что обеспечивает лучшую работу при использовании соединительного кабеля типа «витая пара в экране». Для правильной работы выходного каскада должно выполняться условие $R7 = R6 + R4$. При этом коэффициент усиления выходного каскада равен $2 \cdot R7/R4$.

Для реализации схемы подойдет ОУ AD827 (Analog Devices), который является вдвоенной версией ОУ AD847.

Система регулировки и стабилизации температуры реперной кюветы

Как показали предварительные испытания выбранной реперной кюветы, для исключения конденсации воды на окнах необходим её подогрев до температуры 30–35 °С. Ниже приведена разработанная схема регулятора температуры (рисунок 11).

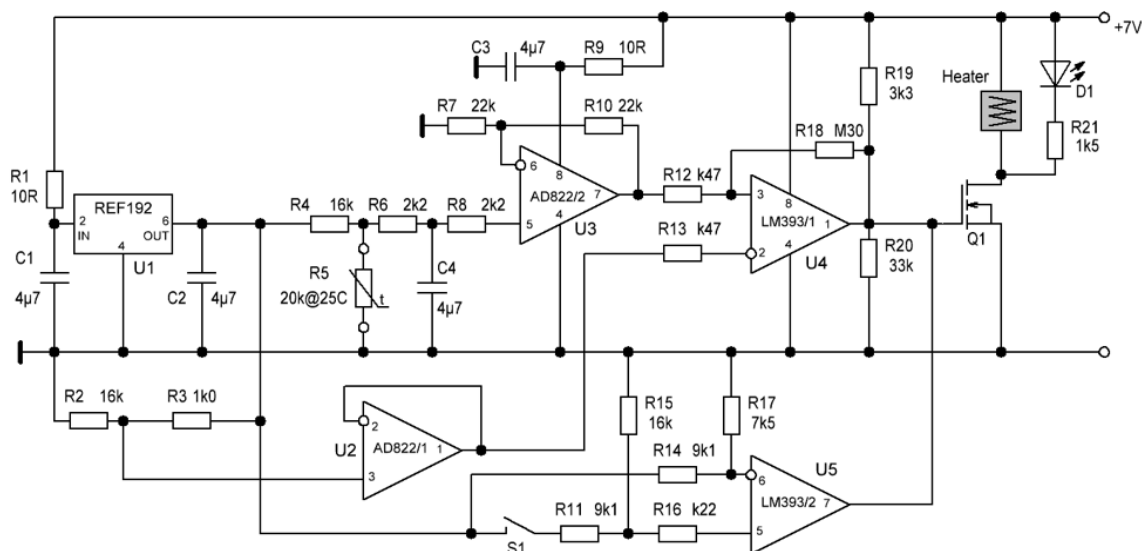


Рисунок 11. Регулятор температуры для реперной кюветы

В данном случае не требуется высокая стабильность температуры кюветы, поэтому возможна реализация «релейной» схемы регулирования температуры. В качестве датчика температуры служат последовательно соединенные NTC (negative temperature coefficient) термисторы 10+10 кОм (R5), которые необходимо установить на кювете. NTC термисторы – это термисторы с отрицательным температурным коэффициентом. Для нагрева достаточно использовать намотанный на кювету константановый провод с сопротивлением около 8 Ом. Источник питания системы является нестабилизированным с выходным током до 1 А.

Стабилизаторы напряжения

В качестве стабилизаторов напряжения блоков питания диодного лазера и термистора возможно использование известных схем на линейных регуляторах типа LM317, отличающихся друг от друга номиналами элементов и размерами радиаторов.

Для примера на рисунке 12 показана схема стабилизатора напряжения для питания преобразователя напряжения в ток диодного лазера.

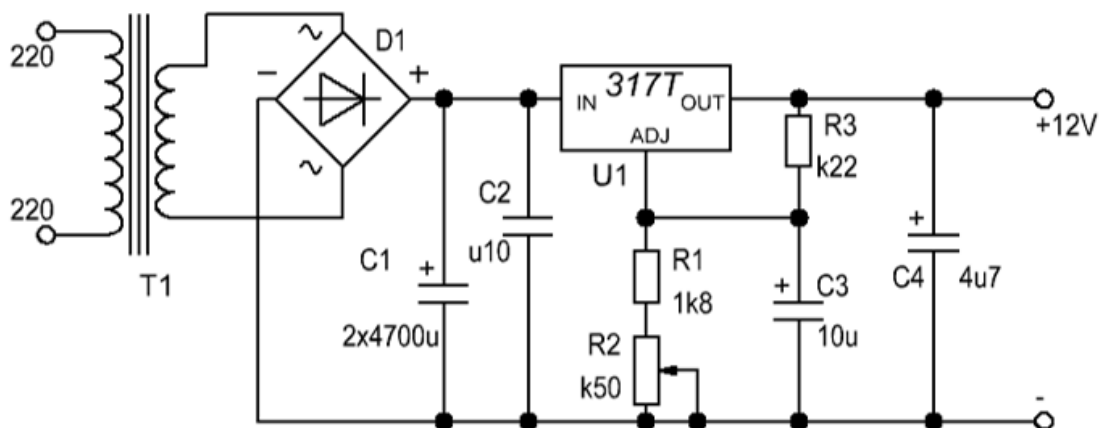


Рисунок 12. Стабилизатор напряжения для питания преобразователя напряжения в ток диодного лазера

Стабилизаторы напряжения для питания усилителя и для питания преобразователя термистора собраны по аналогичным схемам.

Для трансимпедансных усилителей требуются двухполярные стабилизированные блоки питания с напряжением ± 7 В и с током нагрузки до 50 мА. Эти блоки питания возможно собрать на линейных регуляторах LM317L и LM337L.

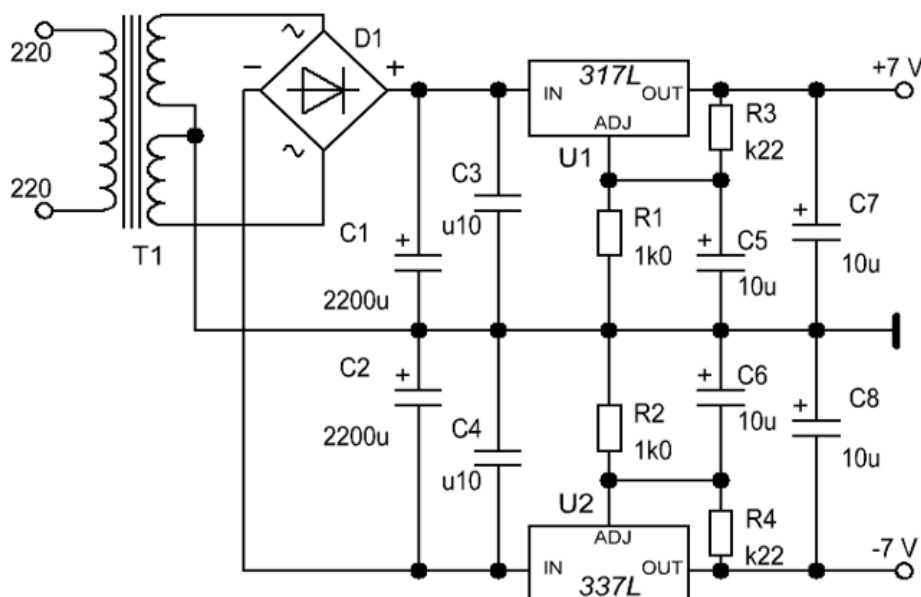


Рисунок 13. Стабилизатор напряжения для трансимпедансных усилителей

Для исключения взаимного влияния трансимпедансных усилителей по цепям питания каждый усилитель должен питаться от отдельного блока. Схема стабилизатора напряжения для трансимпедансных усилителей показана на рисунке 13.

Датчик давления и температуры аналитической кюветы

Для применения разработанного алгоритма обработки спектров поглощения и определения концентрации водяного пара необходимо с высокой точностью знать температуру и давление анализируемого газа. Более конкретные требования к точности будут сформулированы в процессе дальнейшей работы с собранным прототипом анализатора влажности.

Для прототипа анализатора влажности будет использован датчик давления и температуры BMP280 фирмы Bosh (рисунок 14).



Рисунок 14. Датчик давления и температуры BMP280

Данный индикатор имеет следующие характеристики:

- диапазон измеряемых давлений – 30-110 кПа;
- абсолютная точность – 0,1 кПа;
- диапазон измеряемых температур: –40 ... +85 °С;
- абсолютная точность – 0,5 °С;
- размеры датчика – 2.5×2×1 мм.

Датчик работает по протоколу I²C (Inter-Integrated Circuit) и, поскольку предполагается использование на этапе разработки прототипа устройства для оценки влажности природного газа платы сбора данных, то данный тип платы не позволяет реализовать этот протокол. Поэтому в качестве интерфейса к датчику придется использовать микроконтроллер Arduino Uno.

Список литературы

1. Cassidy D. T., Reid J. Atmospheric pressure monitoring of trace gases using tunable diode // *Applied Optics*. 1982. 21(7). 1185-1190. DOI: 10.1364/AO.21.001185
2. Khadzhinskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V. TDLAS technology in the design of a device for assessing the humidity of natural gas // *Information Innovative Technologies (Information Innovative Technologies, I2T): materials of the International Scientific and Practical Conference, April 15-29, 2022, Prague. Prague, 2022. P. 202-206.*
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: в 3 т. / перевод с англ. И. И. Короткевич, М. Н. Микшиса [и др.]. Т. 3. Москва, Мир, 1993. С. 178-180.
4. Steinhart J. S., Hart S. R. Calibration curves for thermistors // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1968. 15(4). 497-503. DOI:10.1016/0011-7471(68)90057-0

References

1. Cassidy D. T., Reid J. Atmospheric pressure monitoring of trace gases using tunable diode lasers // *Applied Optics*. 1982. 21(7). 1185-1190. DOI: 10.1364/AO.21.001185
2. Khadzhinskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V. TDLAS technology in the design of a device for assessing the humidity of natural gas // *Information Innovative Technologies (Information Innovative Technologies, I2T): materials of the International Scientific and Practical Conference, April 15-29, 2022, Prague. Prague, 2022. P. 202-206.*
3. Khorovits P., Hill W. *Iskusstvo skhemotekhniki: v 3 t. T. 3. Moscow, Mir Publ., 1993. P. 178-180.*
4. Steinhart J. S., Hart S. R. Calibration curves for thermistors // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1968. 15(4). 497-503. DOI:10.1016/0011-7471(68)90057-0

Информация об авторе

Хаджийская Елизавета Юрьевна – ассистент, Российский технологический университет МИРЭА (Москва, Троицк, Россия), ORCID: 0000-0002-9115-9871, hadzhinskaya@mirea.ru