

Измерение параметров фоторезисторов на основе природного алмаза

Бараночников М.Л.

г. Москва

E-mail: baranochnikov@mail.ru

В 90-х годах XX века специалистами Государственного института алмаза и золота Скрипником Ф.В. и Плотниковой С.П. были разработаны и изготовлены опытные партии, т.н. алмазных фоторезисторов (АФР), чувствительных в ультрафиолетовой области спектра.

Один из вариантов конструкция алмазного фоторезистора приведена на рис. 1. В металлостеклянном цилиндрическом корпусе, имеющем отверстие для входного окна, на специальной подложке из стекла размещался фоточувствительный элемент (ф.ч.э). ФЧЭ изготавливался из предварительно отобранных кристаллов, т.н. «околоювелирного сырья». После стандартной механической обработки (резка, шлифование, полирование и т.д.) из кристаллов неправильной формы выделялись элементы прямоугольной формы. Толщина элемента составляла от 0,1 до 1,9 мм, при расстоянии между электродами от 1,1 до 3 мм. Площадь кристалла составляла от 2 до 12 мм², при массе от 0,006 до 0,08 г.

Электроды (омические контакты) выполнялись при помощи серебросодержащей пасты, которая вжигалась при температуре 600°C. Проволочные выводы присоединялись к электродам при помощи пайки.

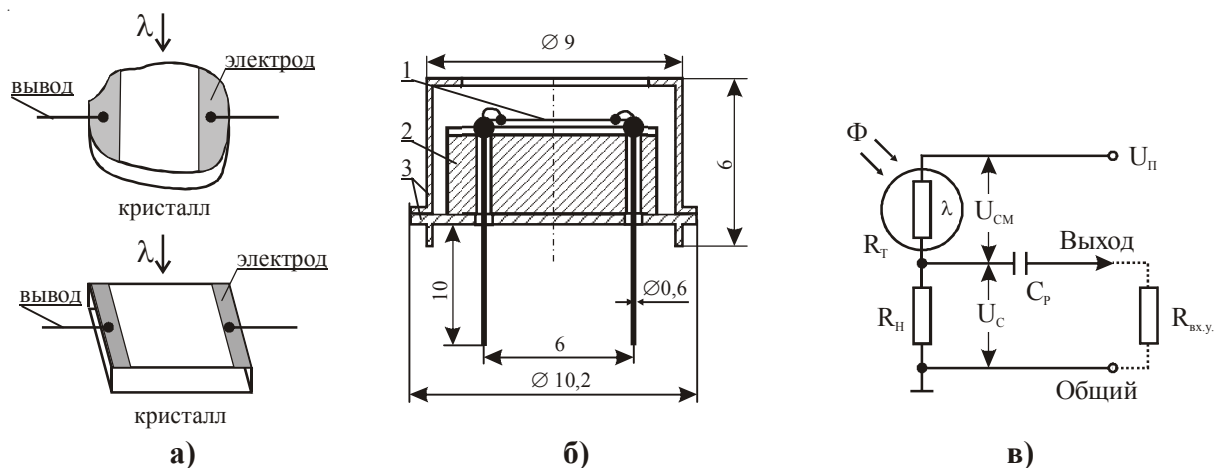


Рис. 1. Конструкции: фоточувствительного элемента; б - фоторезистора: 1 - фоточувствительный элемент; 2 - подложка; 3 - корпус; в - типовая схема включения.

Конструкция фоторезистора предусматривала два варианта использования: без входного окна и с окном, изготовленным из материала, прозрачного в УФ-диапазоне спектра. В качестве таких материалов использовались кварцевое стекло (КУ или КИ) или увиолевое стекло типа УВС1.

Практически все фоторезисторы обладали индивидуальной спектральной чувствительностью, которая находилась в диапазоне от 200-235 нм до 200-280 нм при максимуме спектральной характеристики 220 – 260 нм. Величина интегральной токовой чувствительности (S_I) АФР составляла от 10 до 200 мкА/Вт [1,2,3].

С практической точки зрения наиболее сложной задачей оказалась оценка фотоэлектрических параметров изготовленных АФР. Эта сложность определялась следующими особенностями фоторезисторов:

- 1 - «левым» рабочим спектральным рабочим диапазоном от 0,15 до 0,3 мкм;
- 2 - высоким темновым сопротивлением ф.ч.э., которое достигает 100 и более МОм;
- 3 - высоким рабочим напряжением на цепочке ($R_T + R_H$), достигающим 500-1000В.

Наличие вышеуказанных факторов не позволяло напрямую использовать все методы измерений, предложенные в ГОСТ 17772-88. [4]

При оценке параметров АФР были использованы следующие два способа, которые, в основном, отличались схемой измерительного тракта.

Структурная схема I-го варианта стенда для измерения параметров АФР приведена на рис. 2.

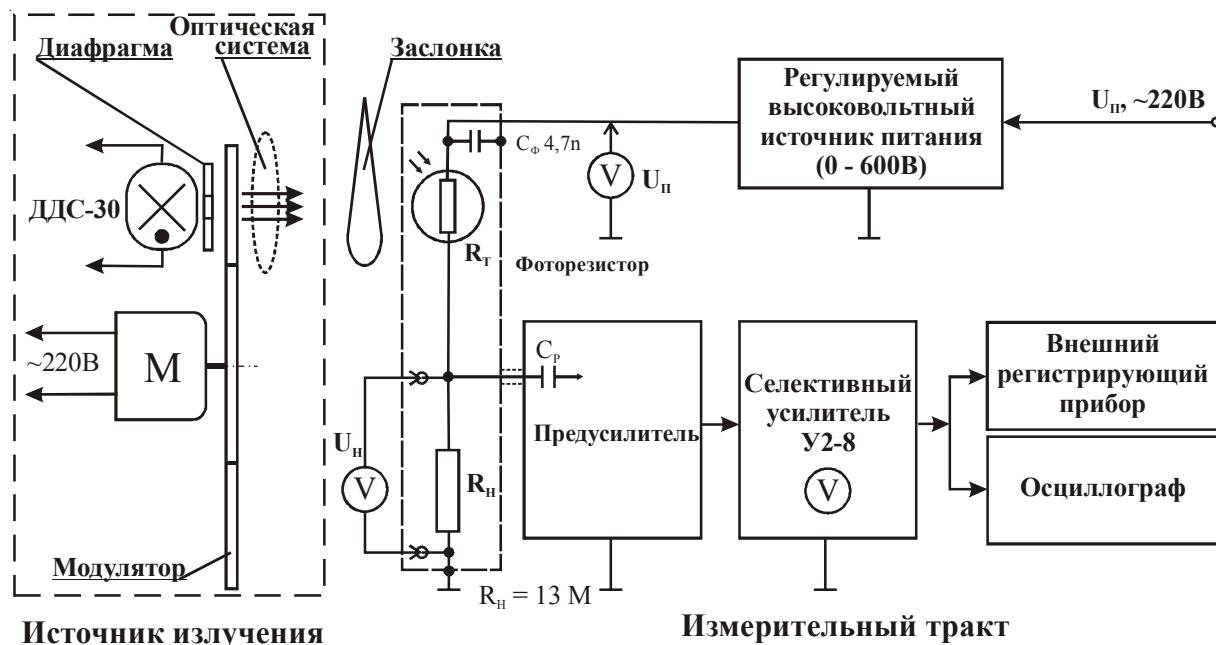


Рис. 2. Структурная схема I-го варианта стенда для измерения параметров АФР.

Схема, приведенная на рис.2 не требует особых пояснений. Она состоит из источника УФ-излучения и измерительного тракта.

В качестве источника УФ-излучения использовалась спектральная дуговая дейтериевая лампа типа ДДС-30, работающая в области длин волн 186—360 нм. Спектральная характеристика лампы приведена на рис. 3. Схема включения лампы ДДС-30 приведена в Приложении 1.

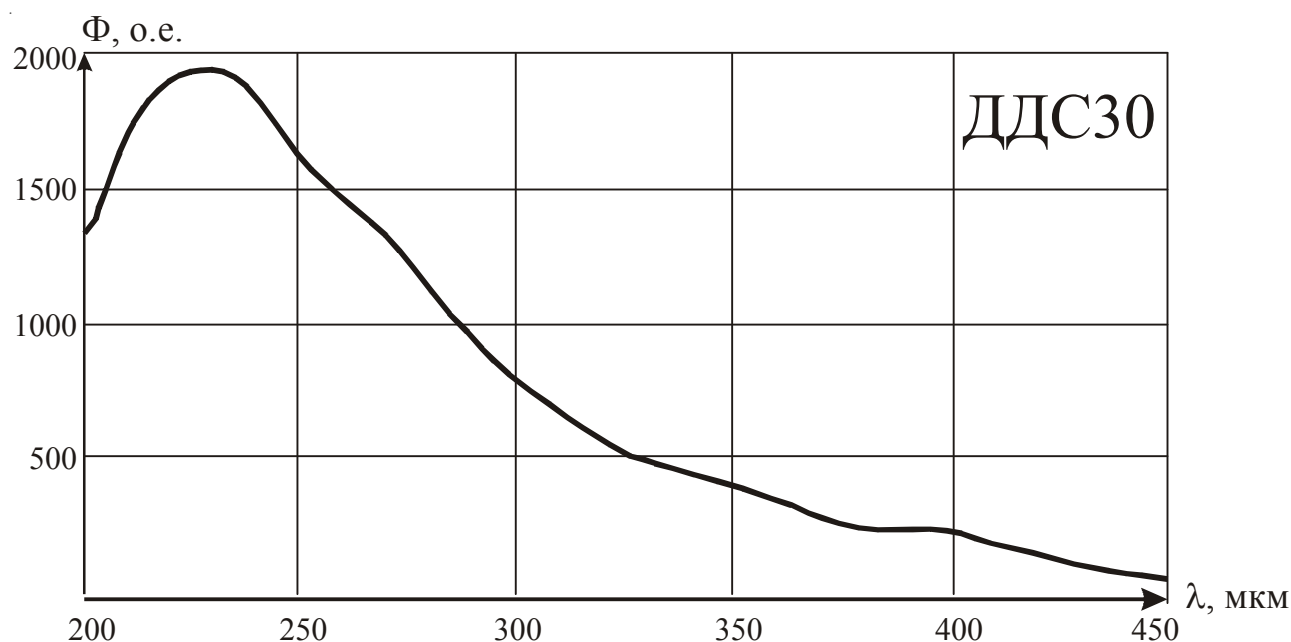


Рис. 3. Спектральная характеристика лампы ДДС-30.

Модулятор предназначен для модуляции потока излучения, и представляет собой дюралевый диск с пазами, размещаемый между источником излучения и фоточувствительным элементом. Количество пазов определяется из расчета необходимой частоты модуляции потока излучения.

При использовании в качестве привода диска электродвигателя с частотой вращения 3000 об/мин, при количестве пазов 20, частота модуляции потока излучения будет, равной 1000 Гц.

Фоторезистор (R_T) размещался в специальной оправке, изготовленной из органического стекла. В той же оправке размещался резистор нагрузки (R_H) и конденсатор фильтра (C_F). С усилительным трактом и источником питания оправка соединялась при помощи двух коаксиальных кабелей **ПК50-3-15** с разъемами PC50 на конце.

Фоторезистор (R_T) включался последовательно с сопротивлением нагрузки (R_H), образуя, т.н. цепочку $R_T + R_H$ (см. рис.1в). Цепочка питалась от регулируемого импульсного источника питания с напряжением до 600 В. Напряжение сигнала (U_C) (и шума $U_{ш}$) снималось со средней точки цепочки и через разделительный конденсатор C_P и подавалось на вход измерительного усилителя. Напряжение питания (U_H) фоторезистора устанавливалось по максимальному отношению сигнал/шум.

В качестве сопротивления нагрузки (R_H) использовался резистор типа МЛТ-2, которые обладают наименьшим уровнем собственных шумов при напряжении 500В. Резистор предварительно отбирался по минимальному уровню собственных шумов.

(Из отечественных типов высокоомных высоковольтных постоянных резисторов в качестве (R_H) могут рассматриваться композиционные резисторы типа СЗ-6 и СЗ-14, работающие при напряжении более 500 В. Однако, уровень собственных шумов указанных типов резисторов составляет около 60 - 100 мкВ/Гц^{1/2}). [5].

В качестве конденсатора фильтра использован высоковольтный конденсатор типа К15-5.

Оправка помещалась в стальной экран с отверстием, необходимым для ввода оптического излучения.

Заслонка, изготовленная из алюминия, служила для перекрытия модулированного потока излучения при измерении напряжения собственных шумов ($U_{ш}$) фоторезистора.

Оптическая система, использовалась при необходимости. Она могла включать в себя некоторые оптические элементы: диафрагмы, щели, ослабители, фильтры, линзы, объективы и др. (Конструкция оптических элементов должна исключала попадание на фоточувствительный элемент бликов, рассеянного света и других посторонних потоков излучения).

Измерительный тракт стенда состоял из предусилителя и селективного усилителя. Принципиальная схема предусилителя приведена на рис. 4.

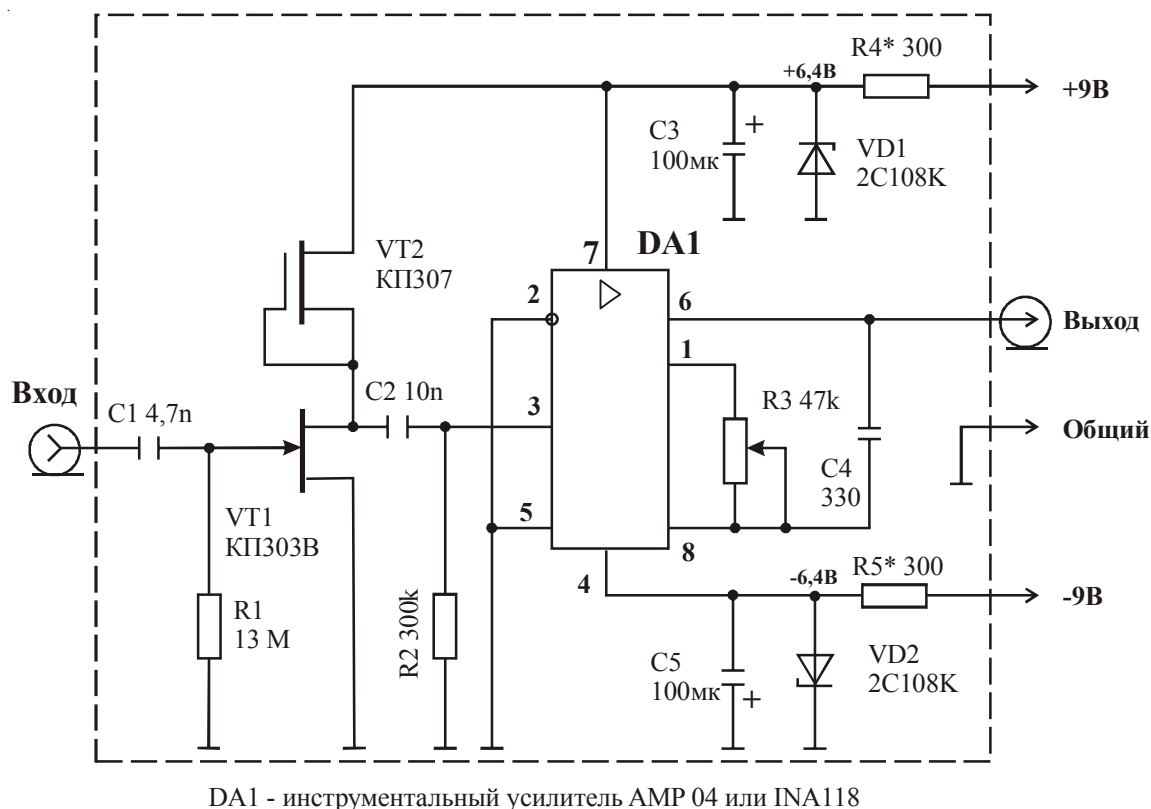


Рис. 4. Принципиальная схема предусилителя.

Предусилитель состоит из входного (согласующего) каскада и усилителя. Входной каскад реализован на полевом транзисторе КП308 (VT1), нагрузкой которого служит полевой транзистор КП307 (VT2). Резистор R1 в цепи затвора транзистора VT1 предварительно отбирался по минимальному напряжению уровня собственных шумов.

Сигнал с согласующего каскада поступает на вход усилителя DA1. В качестве DA1 использовалась интегральная схема инструментального усилителя типа AMP-04 фирмы Analog Devices. Коэффициент усиления предусилителя устанавливался многооборотным подстроечным резистором R4 (типа СП5-3), равным 50. Питание предусилителя осуществлялось от стандартного двухполярного источника с напряжением $\pm 12...15$ В.

Предусилитель смонтирован на печатной плате, которая размещалась в небольшом алюминиевом прямоугольном корпусе. На корпусе установлены два разъема типа СР50.

В качестве селективного усилителя был использован отечественный прибор типа У2-8. Однако наиболее оптимальным является применение селективных вольтметров типа Unipan-237 (или Unipan-233).

Величина потока излучения (Φ) определялась при помощи калиброванного фотоприемника (специального кремниевое фотодиода или фотоумножителя).

Темновое сопротивление фоторезисторов (R_T) в зависимости от типа алмаза составляет от 10^7 до 10^9 Ом. При измерении параметров фоторезистора, как правило, реальное сопротивление нагрузки (R_H) составляет порядка 10 – 15 МОм, т.е. измерение напряжения сигнала выполняется в несогласованном режиме, когда R_T не равно R_H .

Использование сопротивления нагрузки большего номинала затрудняется его сравнительно большими размерами и значительным уровнем собственных шумов, значительно превышающим уровень собственных шумов АФР.

Для данной партии АФР оптимальным оказалось сопротивление нагрузки, равное 30 МОм.

При использовании типовой схемы включения (см. рис. 1в) напряжение смещения фоторезистора определялось, как

$$U_{CM} = \frac{U_{\Pi}}{R_T + R_H} \times R_T, B \quad (1)$$

Где – U_{Π} – напряжение питания цепочки ($R_T + R_H$), В

Напряжение на цепочке (U_{Π}) устанавливалось в пределах от 100 до 600В. Для чего использовался импульсный источник питания. Напряжения U_{Π} и U_H измерялись при помощи мультиметров с входным сопротивлением более 20 МОм, (например, типа Fluke 77).

Темновой ток определялся выражением:

$$I_T = \frac{U_{\Pi}}{R_T + R_H}, A \quad (2)$$

Фототок определялся, как

$$I_P = \frac{U_C}{R_H}, A \quad (3)$$

Интегральная токовая чувствительность определялась, как

$$S_I = \frac{I_P}{\Phi}, A/Bm \quad (4)$$

Где, S_I – токовая чувствительность, А/Вт;

I_P – фототок, А;

Φ – поток излучения, Вт.

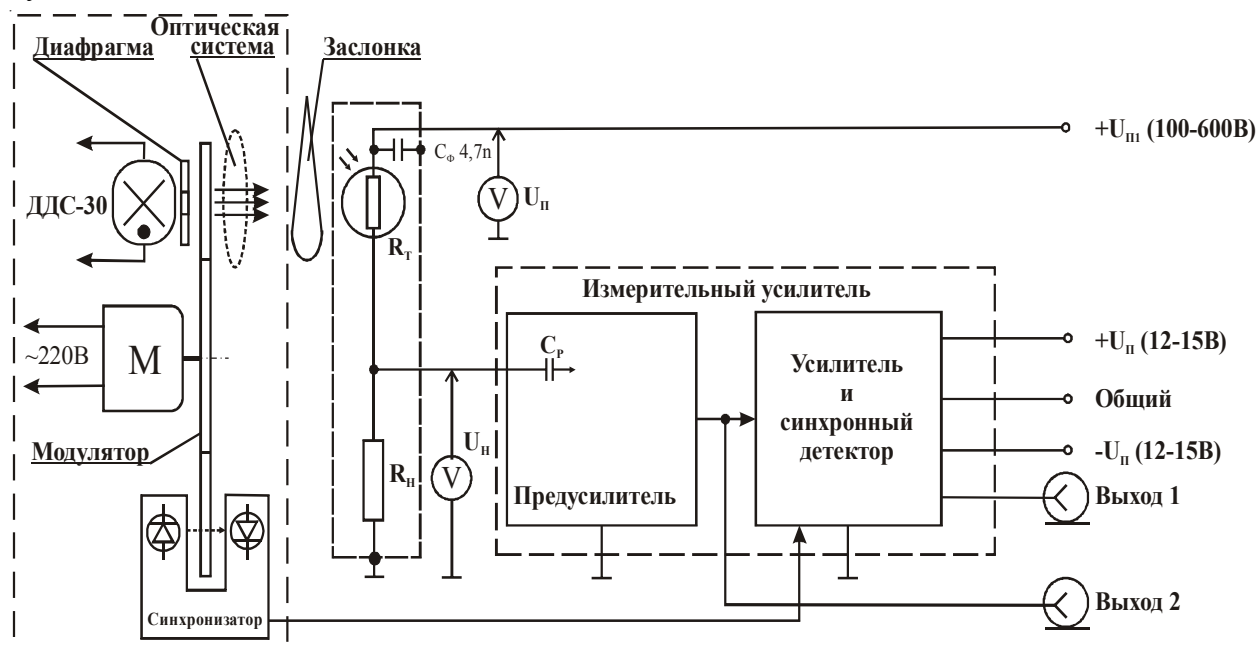
При использовании модулированного потока излучения S_I определялась формулой:

$$S_I = \frac{I_P}{\Phi_1}, A/Bm, \text{ где } \Phi_1 - \text{действующее значение потока излучения, определяемое,}$$

как $\Phi_1 = \Phi \times \beta$, где β – коэффициент формы модуляции. (См. Приложение 1)

Расчет интегральной (S_U) и пороговой чувствительности (Φ_{Π}) АФР производился по формулам, изложенным в ГОСТ 17772-88 [4].

Структурная схема II-го варианта стенда для измерения параметров АФР приведена на рис. 5. Эта схема, в основном, использовалась для измерения интегральной чувствительности АФР.



Источник излучения

Рис. 5. Структурная схема II-го варианта стенда для измерения параметров АФР.

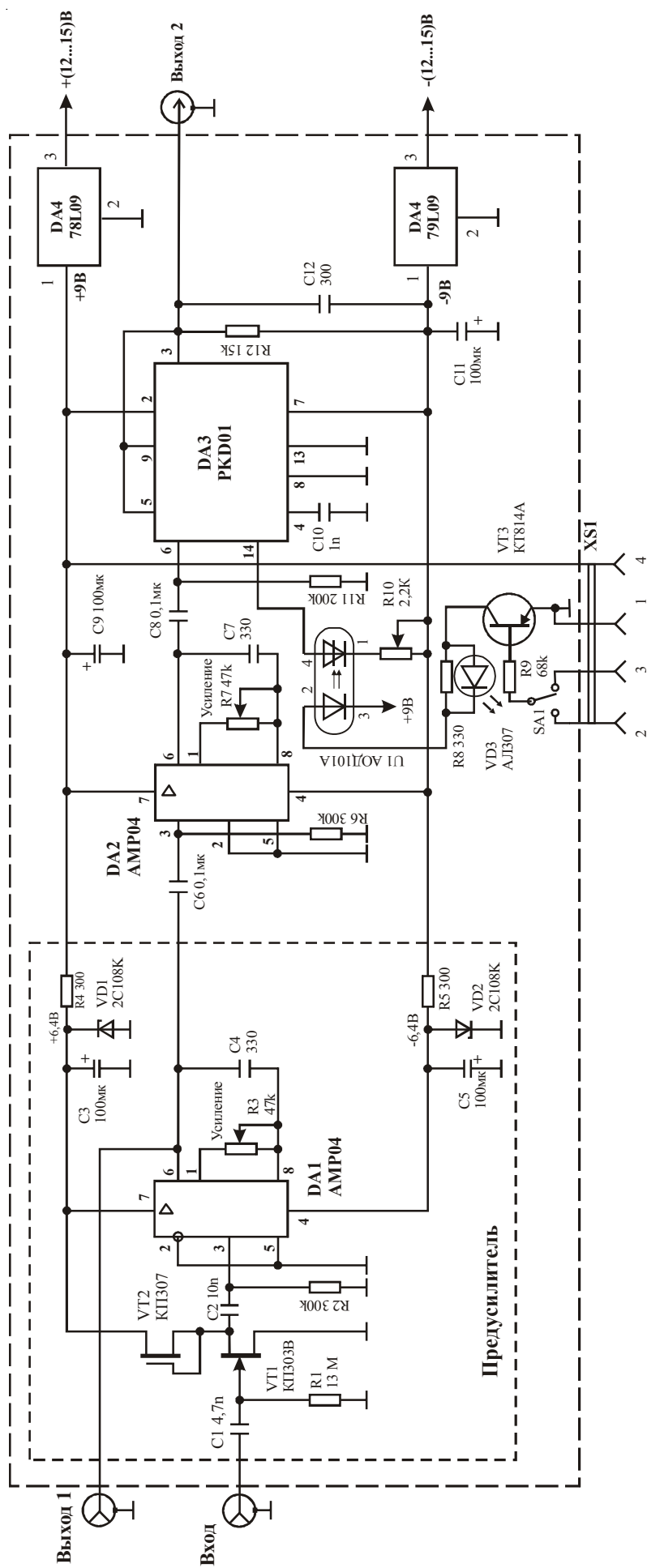


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема измерительного усилителя.

Структурная схема, приведенная на рис. 5, отличается от схемы приведенной на рис. 3 тем, что в блоке источника излучения установлен дополнительный узел, названный синхронизатором. Схема также имеет иной вариант измерительного тракта. В данном варианте стенда используется нестандартный измерительный усилитель с синхронным детектированием. Принципиальная схема измерительного усилителя приведена на рис.6.

Схема измерительного усилителя (рис. 6) состоит из трех электронных узлов: предусилителя, усилителя и синхронного детектора.

Предусилитель выполнен на полевом транзисторе КП308 (VT1), нагрузкой которого служит полевой транзистор КП307 (VT2). Сигнал с транзистора VT1 поступает на вход усилителя DA1. В качестве усилителя используется интегральная схема инструментального усилителя типа AMP-04 фирмы Analog Devices. Коэффициент усиления предусилителя устанавливается многооборотным подстроечным резистором R4, равным 50.

С выхода микросхемы DA1 сигнал поступает на вход микросхемы DA2, в качестве которой также используется микросхема типа AMP-04. Усиленный микросхемами DA1 и DA2 сигнал поступает на вход микросхемы DA3, выполняющей роль синхронного детектора. В качестве DA3 используется интегральная схема пикового детектора типа PKD-01 фирмы Analog Devices. Синхронизация работы детектора осуществляется сигналом, поступающим от синхронизатора на базу транзистора VT3 и через оптрон U1 на вывод 14 микросхемы DA3. Микросхемы DA3 и DA4 выполняют роль стабилизаторов напряжения питания.

Сквозной коэффициент усиления устанавливается многооборотным подстроечным резистором R8. Сквозной коэффициент усиления измерительного усилителя устанавливается по эталонному приемнику излучения ($U_{\text{вх}} = 1 \text{ мВ}$), равным 1000.

С выхода 2 измерительного усилителя сигнал поступает на вход стандартного милливольтметра, в качестве которого могут использоваться приборы типа В3-38, В3-39, В3-57 (или аналогичные).

Принципиальная схема синхронизатора приведена на рис. 7.

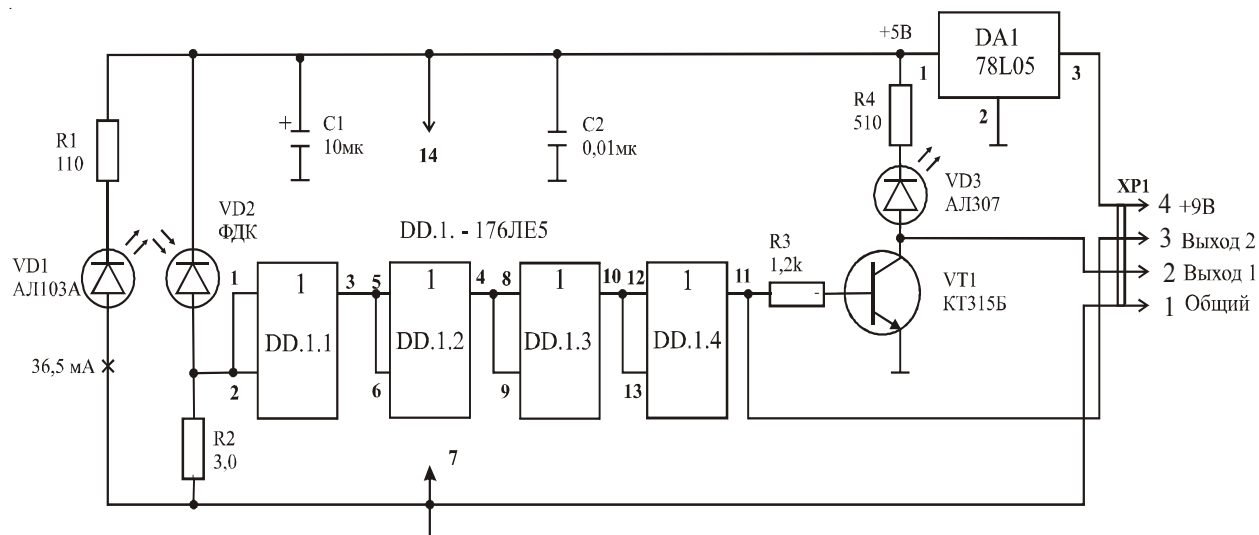


Рис. 7. Принципиальная схема синхронизатора.

Схема (рис. 7) работает следующим образом. Сигнал ИК-диода АЛ103 (VD1), прерываемый модулятором, поступает на фотодиод ФДК (VD2) и на вход микросхемы 176ЛЕ5 (DD1). С выхода микросхемы DD1 сигнал поступает на базу транзистора КТ315 (VT1). Усиленный сигнал с коллектора транзистора VT1, через разъем XP1 поступает на базу транзистора VT3 усилителя, и через оптрон U1 на вывод 14 микросхемы DA3.

Микросхема DA1 выполняет роль стабилизатора напряжения питания.

Питание предусилителя осуществлялось от стандартного двухполярного источника. При напряжении питания $\pm 12 \dots 15 \text{ В}$, ток потребления измерительного усилителя составляет, не более 70 мА от источника отрицательного напряжения, и не более 10 мА от источника положительного напряжения. Напряжение шума усилителя при к.з. на входе составляет, не более $0,1 \text{ мВ}$.

Конструкция измерительного усилителя.

Усилитель выполнен в виде двух основных блоков: блока синхронизатора и собственно измерительного усилителя.

Конструкция блока синхронизатора приведена на рис. 8. Синхронизатор размещен в П-образном алюминиевом корпусе. С одной стороны корпуса размещается излучатель (ИК-диод), а с другой фотоприемник со схемой усиления и обработки сигнала. Диск модулятора излучения вращается в промежутке между излучателем и фотоприемником. Блок синхронизатора соединяется с измерительным усилителем 4-х проводным кабелем, снабженным разъемом типа РПМ4.

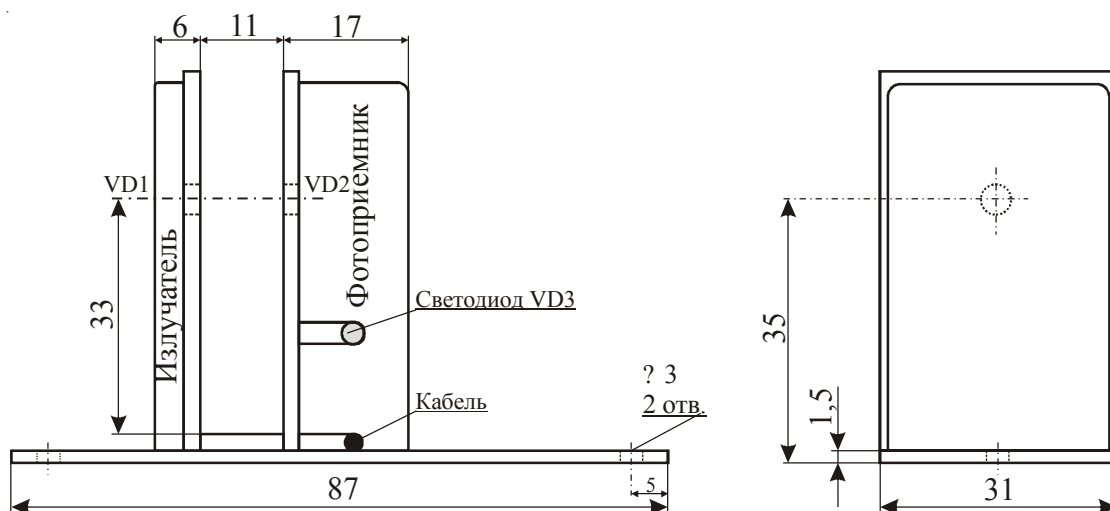


Рис. 8. Конструкция блока синхронизатора.

Конструкция блока измерительного усилителя приведена на рис. 9. Блок усилителя размещался на печатной плате, установленной в прямоугольном алюминиевом корпусе. На той же плате, в отдельном стальном корпусе размещался предусилитель, а также разъем, необходимый для подключения синхронизатора. На корпусе предусилителя устанавливались два высокочастотных разъема типа СР50, которые использовались при его калибровке. Для передачи выходного сигнала на внешние измерительные приборы использовался кабель РК50-3-15 длиной до 1,5 метров, снабженный разъемом СР50. Сигнал с фоторезистора также передавался по кабелю РК50-3-15. К источнику питания усилитель подключается 3-х проводным кабелем, снабженным 3 вилками.

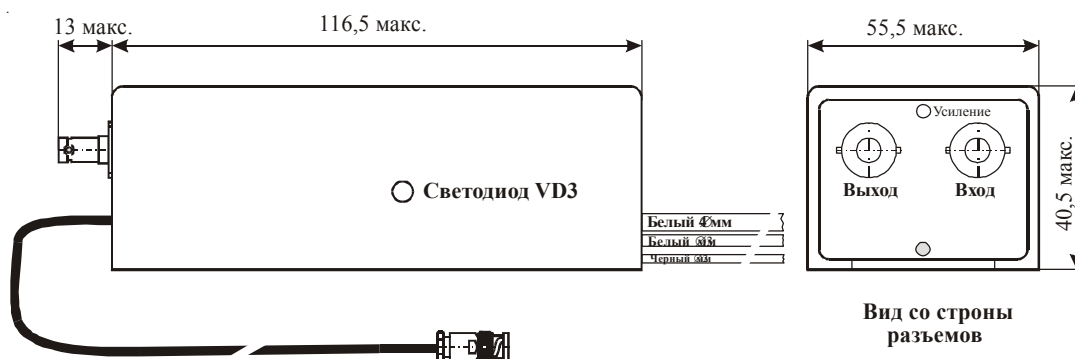


Рис. 9. Конструкция блока измерительного усилителя.

Измерение спектральной чувствительности АФР проводились области ближнего УФ-излучения (ГОСТ 8552-86) при помощи монохроматора типа ВМР-9. Входная щель монохроматора освещалась лампой ДДС30. Поток монохроматического излучения измерялся эталонным кремниевым фотодиодом, предварительно прокалиброванным по спектральной чувствительности. Поток излучения на ФЧЭ составлял порядка 3 – 5 нВт.

Приложение 1

Основные параметры и эксплуатационные характеристики лампы ДДС-30

Лампа спектральная дуговая дейтериевая ДДС 30 представляет собой цилиндрическую колбу с боковым окном из оптического кварца и имеет октальный цоколь. Источником излучения лампы ДДС30 является дуговой разряд смеси дейтерия с неоном, закаченный в узкий промежуток. Основные параметры лампы ДДС-30 приведены в табл. П1. Спектральная характеристика лампы ДДС-30 приведена на рис. П1, внешний вид и габаритные размеры лампы - на рис. П2, а схема включения лампы - на рис. П3.

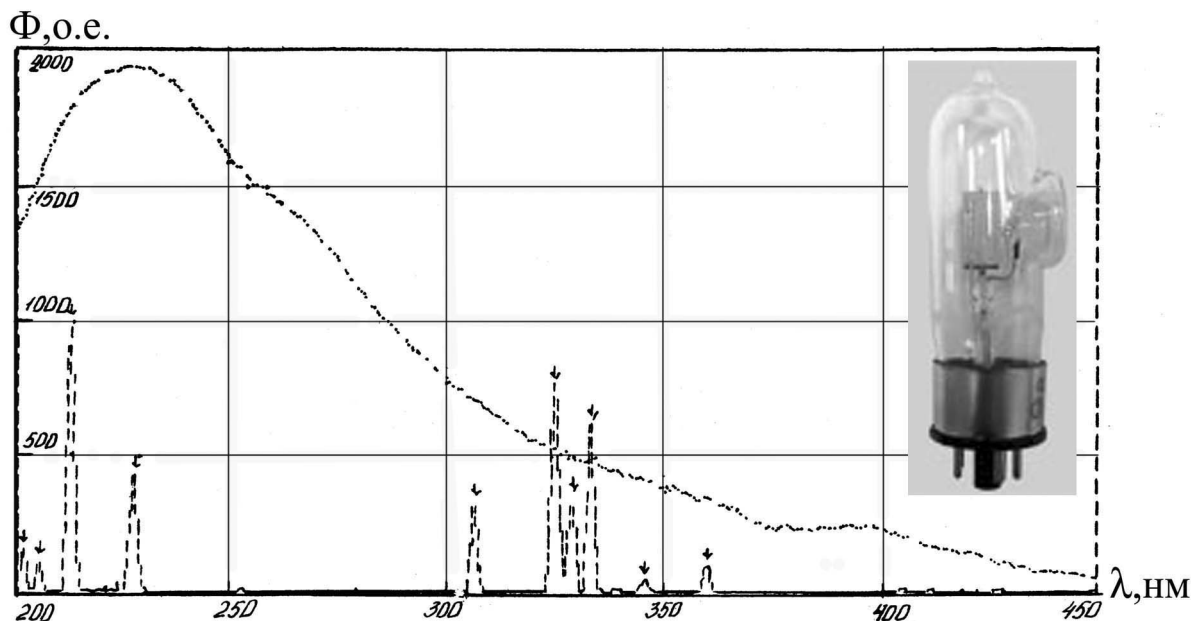


Рис.П1. Спектральная характеристика лампы ДДС-30.

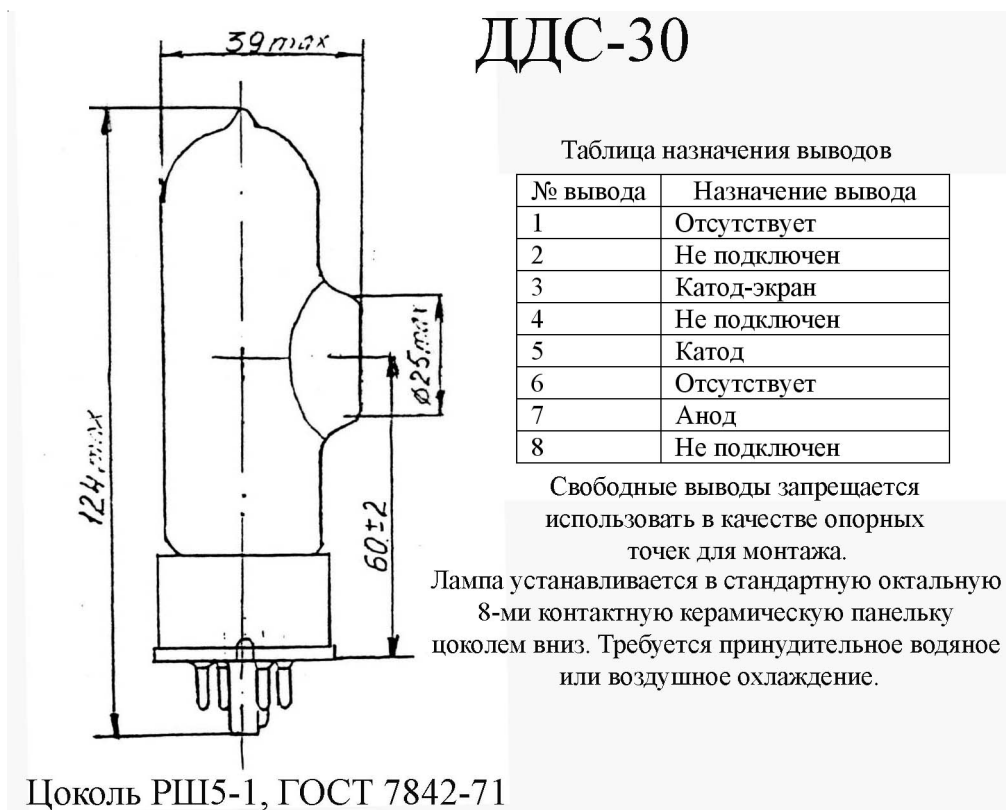


Рис.П2. Внешний вид и габаритные размеры лампы ДДС-30.

Таблица П1. Основные параметры лампы ДДС-30.

Наименование параметра, единица измерения.	Значение параметра
Длина волны излучения, нм	186—360
Площадь светящегося пятна, мм ²	3,75
Сила света энергетическая в спектральном диапазоне 215—300 нм, не менее, мВт/ср	1,8
Напряжение источника питания, не менее, В	300
Напряжение горения лампы, В	50—100
Ток лампы, А	0,3
Высота светового центра, мм	60±2
Время подогрева, мин	1—20
Наработка новой лампы, ч	750
Длина габаритная, не более, мм	124
Ширина габаритная, не более, мм	39
Масса, не более, г	50

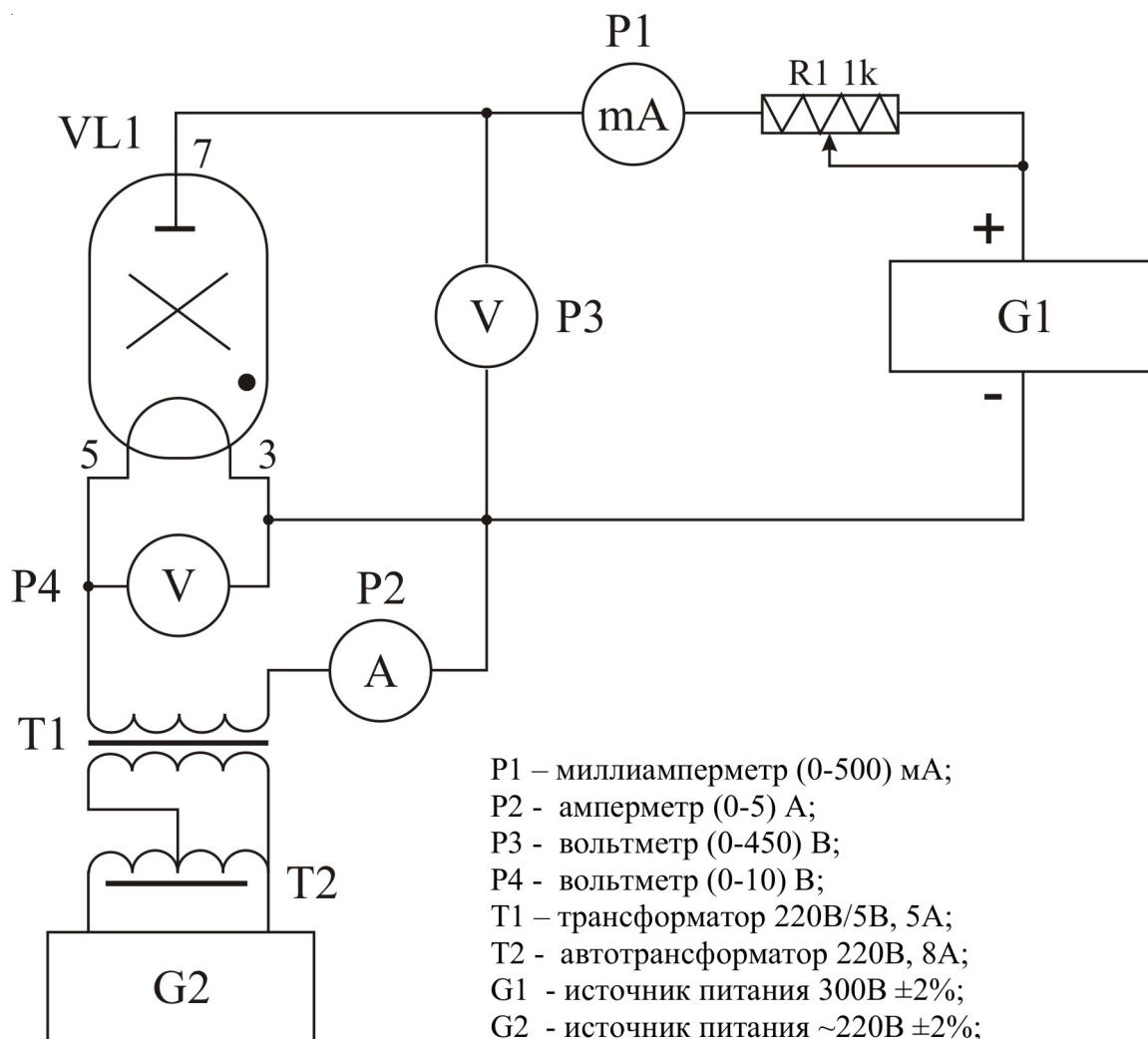


Рис. П3. Схема включения лампы ДДС-30.

При использовании лампы ДДС-30 необходимо соблюдать определенные условия подогрева, выводящего лампу на рабочий режим. Параметры подогрева лампы приведены в таб. П2.

Таблица П2. Параметры подогрева лампы ДДС-30.

Категория режима подогрева	Режим подогрева		
	Ток накала, А	Ток лампы (анода), А	Время подогрева, мин
А	3,5	-	1
Б	3,5	0,3	-
В	2	0,3	20

При использовании лампы ДДС-30 для измерения фотоэлектрических параметров АФР необходимо поддерживать рабочий ток источника излучения с погрешностью $\pm 2\%$.

Лампа ДДС-30, как правило, должна размещаться в специальном корпусе-радиаторе, охлаждаемом проточной водой.

Примечание 1. При работе с включённой лампой ДДС-30 следует надевать защитные очки для предохранения глаз от ультрафиолетового излучения. Запрещается вынимать горячую лампу из осветителя. При смене лампы, последнюю следует брать руками только за цоколь. Перед включением рекомендуется протереть окно лампы ватой, смоченной спиртом, для очистки поверхности окна от загрязнения.

Приложение 2

Основные элементы модуляторов потока излучения

Диск-модулятор

Электромеханический модулятор, предназначенный для 100-% модуляции потока излучения, представляет собой дюралевый диск толщиной 1 – 1,5 мм с пазами, который приводится в движение электродвигателем с определенной скоростью вращения.

Модулятор размещается между источником излучения и фоточувствительным элементом. Количество пазов (N) определяется из расчета необходимой частоты модуляции (F_{MOD}) потока излучения по следующей формуле:

$$N = \frac{F_{MOD}}{n/60} \quad (П1)$$

Где n – число оборотов вала электродвигателя, об/мин;

F_{MOD} – частота модуляции, Гц.

При использовании электромеханического модулятора с вращающимися дисками и 100%-ной глубиной модуляции частота модуляции потока излучения f_{MOD} обычно выбирается из ряда: 800, 1000 или 1200 Гц с точностью поддержания частоты в пределах ± 20 Гц. Конструкцию модулятора выбирают таким образом, чтобы форма модуляции приближалась к синусоидальной ($\beta=0,353$). Результаты расчета количества пазов диска при использовании электродвигателя с частотой вращения вала 3000 об/мин приведены в табл. ПЗ.

Таблица ПЗ. Количество пазов диска-модулятора при использовании в качестве привода диска электродвигателя с частотой вращения 3000 об/мин.

Частота вращения вала электродвигателя, об/мин	Частота модуляции, Гц	Количество пазов диска
3000	800	16
3000	1000	20
3000	1200	24

При применении электромеханических модуляторов с вращающимися дисками и селективных усилителей, настроенных в резонанс с частотой модуляции, коэффициент формы модуляции β определяется в соответствии с рис. П4 и табл. П4.[4]

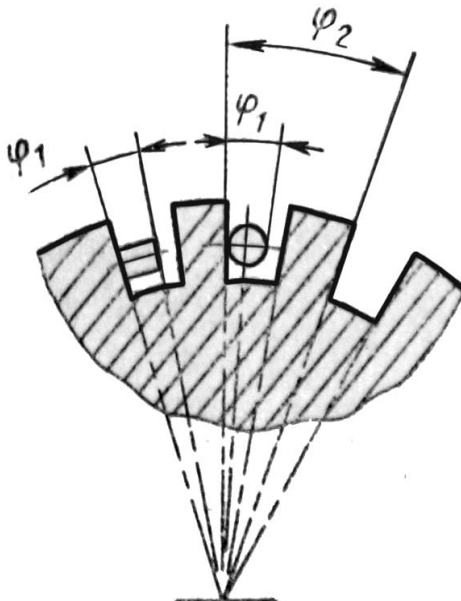


Рис. П4. К расчету коэффициента формы модуляции β .

Таблица П4. Результаты расчета коэффициента формы β .

Отношение ϕ_1/ϕ_2	Коэффициент формы модуляции, β	
	При круглой диафрагме источника излучения	При прямоугольной диафрагме источника излучения
0,00°	0,450	0,450
0,05	0,449	0,448
0,08	0,446	0,445
0,10	0,444	0,442
0,15	0,438	0,433
0,20	0,428	0,421
0,25	0,416	0,405
0,30	0,402	0,386
0,35	0,385	0,365
0,40	0,367	0,341
0,45	0,347	0,314
0,50	0,325	0,286

Электродвигатель привода диска-модулятора

При разработке конструкции модуляторов потока излучения важное значение имеет выбор электропривода. Наибольшее распространение при реализации конструкции модуляторов для измерительного оборудования, используемого при оценке параметров фотоэлектрических приемников излучения получили однофазные синхронные гистерезисные электродвигатели типов Г-31.

Габаритные, установочные и присоединительные размеры электродвигателя приведены на рис. П5. Основные параметры и эксплуатационные характеристики электродвигателя Г31 приведены в табл. П5, а схема включения на рис. П6.

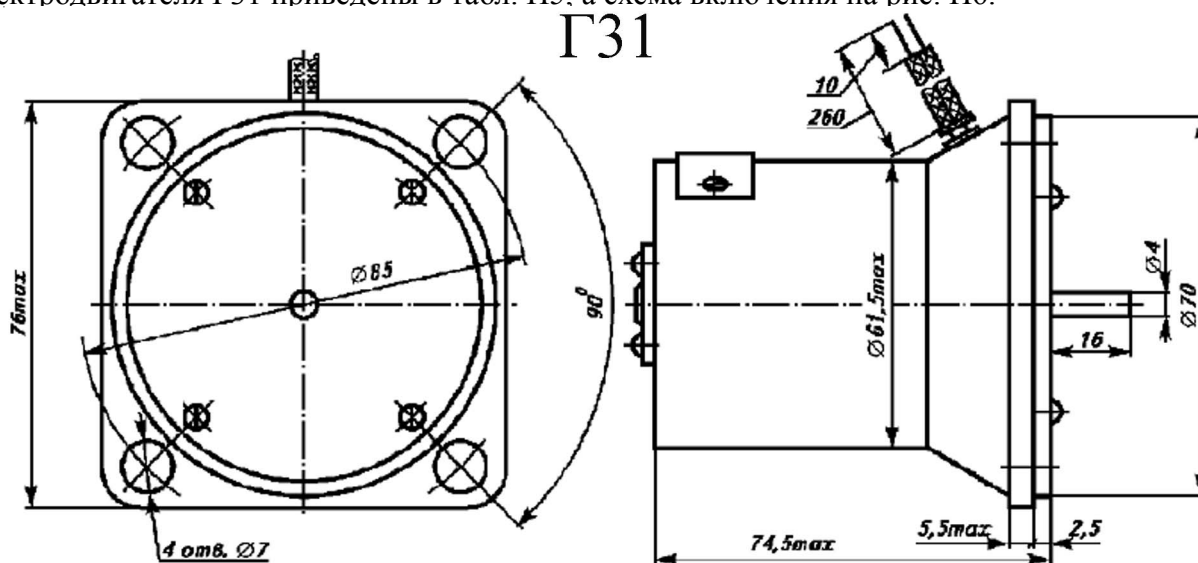


Рис. П5. Габаритные, установочные и присоединительные размеры синхронных гистерезисных электродвигателей типов Г-31, Г-31А., исполнения I

Таблица П5. Основные параметры гистерезисного электродвигателя типа ГЗ УХЛ4.

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
1	Число фаз питающей сети	1
2	Номинальная мощность на валу, Вт	4
3	Номинальная частота сети, Гц	50
4	Номинальное напряжение, В	220
5	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	3000
6	Номинальный вращающий момент, сН·м	1,275
7	КПД, %	18,5
8	cosφ	0,8
9	Потребляемая мощность, Вт, не более:	
	при номинальном моменте	25
	в режиме холостого хода	22
10	Потребляемый ток, А, не более:	
	при номинальном моменте	0,15
	при заторможенном роторе	0,17
	на холостом ходу	0,15
11	Емкость конденсатора, мкФ	1,5
12	Напряжение на конденсаторе, В	300
13	Масса, кг	0,75

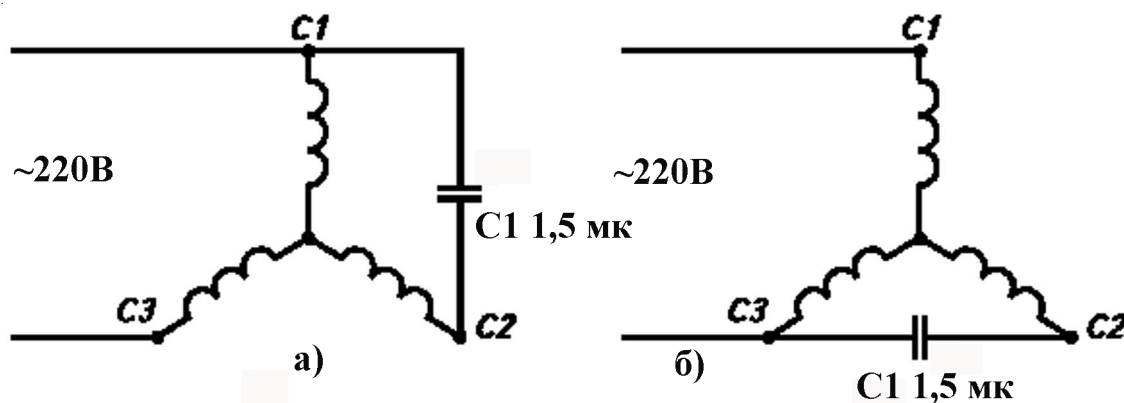


Рис. П6. Схемы включения и обозначение выходных концов однофазных синхронных гистерезисных электродвигателей типов Г-31, Г-31А: а - правое вращение; б - левое вращение

Предельные отклонения напряжения и частоты питания при номинальном вращающем моменте составляют соответственно ± 10 и $\pm 2\%$, а емкости конденсатора для однофазных двигателей - $\pm 5\%$. При этом кратности моментов при питании двигателей от сети 50 Гц равны:

- начального пускового - 1,0;
- входа в синхронизм - 1,2;
- максимального - 1,3.

Время вхождения в синхронизм на холостом ходу при нормальных климатических условиях 2 с.

Литература

1. Бараночников М.Л., Гладкова Н.А., Скрипник Ф.В. Фотоприемные устройства на основе фоторезисторов из природного алмаза. В сборнике «Алмаз в электронной технике», - М.,: Энергоатомиздат, 1990 г., с. 128 -139.
2. Квасков В.Б., Скрипник Ф.В. и др. Спектральная характеристика фоторезисторов на основе природного алмаза. В сборнике «Перспективы применения алмазов в электронике и электронной технике». Тезисы докладов Всесоюзной конференции. – М.,: Энергоатомиздат. 1991. с. 65 – 66.
3. Бараночников М.Л. УФ-излучение, применение и обнаружение. Размещен на сайте Публичная Библиотека (Электронные книжные полки Вадима Ершова и К°), www.publ.lib.ru.)
4. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения основных фотоэлектрических параметров и определения характеристик.
5. Резисторы. Справочник. Дубровский В.В, Иванов Д.М. и др. –М., Радио и связь. 1991. – 528 с.