

**Аппаратурные способы повышения точности и достоверности
 астрофотометрических наблюдений**
А.К. Магницкий

Рассмотрены возможные пути повышения точности и достоверности астрофотометрических наблюдений аппаратурными способами. Таковыми являются охлаждение, термостатирование и термокомпенсация элементов фотометрического тракта, многофункциональное использование ЭВМ, повышение быстродействия аппаратуры счета фотонов, выбор оптимального режима работы ФЭУ, а также мероприятия по повышению помехозащищенности и надежности астрофотометрической аппаратуры. Приведены конкретные схемные решения.

**The Apparatus Ways of the Improvement of the Astrophotometric
 Observations Precision and Authenticity**
by A.K. Magnitsky

The possible ways of the improvement of the astrophotometric observations precision and authenticity are considered by the apparatus means. These means are the cooling, the thermostating and the temperature compensation of the photometric channel components, the multifunction use of the computer, the increase of the photon counter frequency response, the determination of the optimum photomultiplier regime and also the improvement of the photometric electronic anticountermeasures and reliability. The particular circuit achievements are given.

1. Введение.

Высокая точность и достоверность астрофотометрических наблюдений может быть достигнута последовательными разработками на трех этапах: при выборе конструктивных решений, совершенствованием аппаратуры, а также совершенствованием методов наблюдений и обработки данных.

Аппаратурные способы повышения точности и достоверности астрофотометрических наблюдений находятся в тесной связи с конструктивными решениями и предполагают уменьшение влияния внешних факторов на характеристики фотометрического тракта, максимально полное использование полезных качеств фотоприемника при минимальном проявлении нежелательных его характеристик, а также возможно более полную компьютеризацию фотометрической и вспомогательной аппаратуры. Конкретные аппаратурные решения проиллюстрируем на примере синхронного двухзвездного UBVR-фотометра.

2. Использование ЭВМ.

Преимущества применения ЭВМ многочисленны и очевидны. Например, одно из них: при наблюдениях микропеременности блеска требуется высокая точность фотометрии, однако, повышению ее за счет увеличения длительности экспозиций имеет естественные ограничения, которые, кроме прочих, определяются апертурой телескопа и положением звезды на небесной сфере (Юнг, 1967а, Юнг, 1974, с.133). Поэтому выбор оптимальной длительности экспозиции в наших наблюдениях осуществляется с помощью ЭВМ, что повысило эффективность наблюдений.

Функциональная схема взаимодействия синхронного двухзвездного UBV_R фотометра с электронной частью и ЭВМ представлена на рис. 1. Подача команд фотометру с пульта управления осуществляется через дешифратор команд. Команды управления фотометром от ЭВМ формируются интерфейсом и затем реализуются с помощью дешифратора команд включением или выключением соответствующих электромагнитов. Уровни напряжений всех принимаемых и передаваемых сигналов дешифратора команд фотометра соответствуют стандартным уровням, что обеспечивает совместимость электроники фотометра по уровням с любой ЭВМ.

С помощью интерфейса осуществляется побайтный прием восьмиразрядных десятичных чисел с двух счетчиков и электронных часов в оперативную память ЭВМ ДЗ-28. Каждому принятому байту соответствует один разряд числа. Управление интерфейсом программное по команде INTOd (1400d), где во втором байте команды указывается номер передатчика информации и номер коммутируемого разряда. Чтение введенного числа осуществляется по команде ATOId (1003 B2A2). Максимальное число подключаемых к интерфейсу восьмиразрядных цифровых приборов равно восьми, то есть, кроме двух, счетчиков и электронных часов, можно подключить еще пять источников информации.

Кроме этого интерфейс по программе ЭВМ формирует следующие команды.

1. Ввести или вывести соответствующий светофильтр.
 2. Сместить диафрагму для измерения фона или вернуть ее в исходное состояние.
 3. Открыть или закрыть затвор.
 4. Включить или выключить радиолюминисцентный излучатель света.
 5. Запустить счетчики (начало экспозиции).
 6. Принять информацию (конец экспозиции).
 7. Отметить момент времени середины экспозиции.
 8. Включить или выключить электродвигатель вращения купола.
- ### 3. Влияние температуры.

Основным и постоянно действующим источником ошибок астрофотометрических наблюдений является зависимость от температуры спектральных характеристик и чувствительности фотометрического тракта путями предотвращения которых являются:

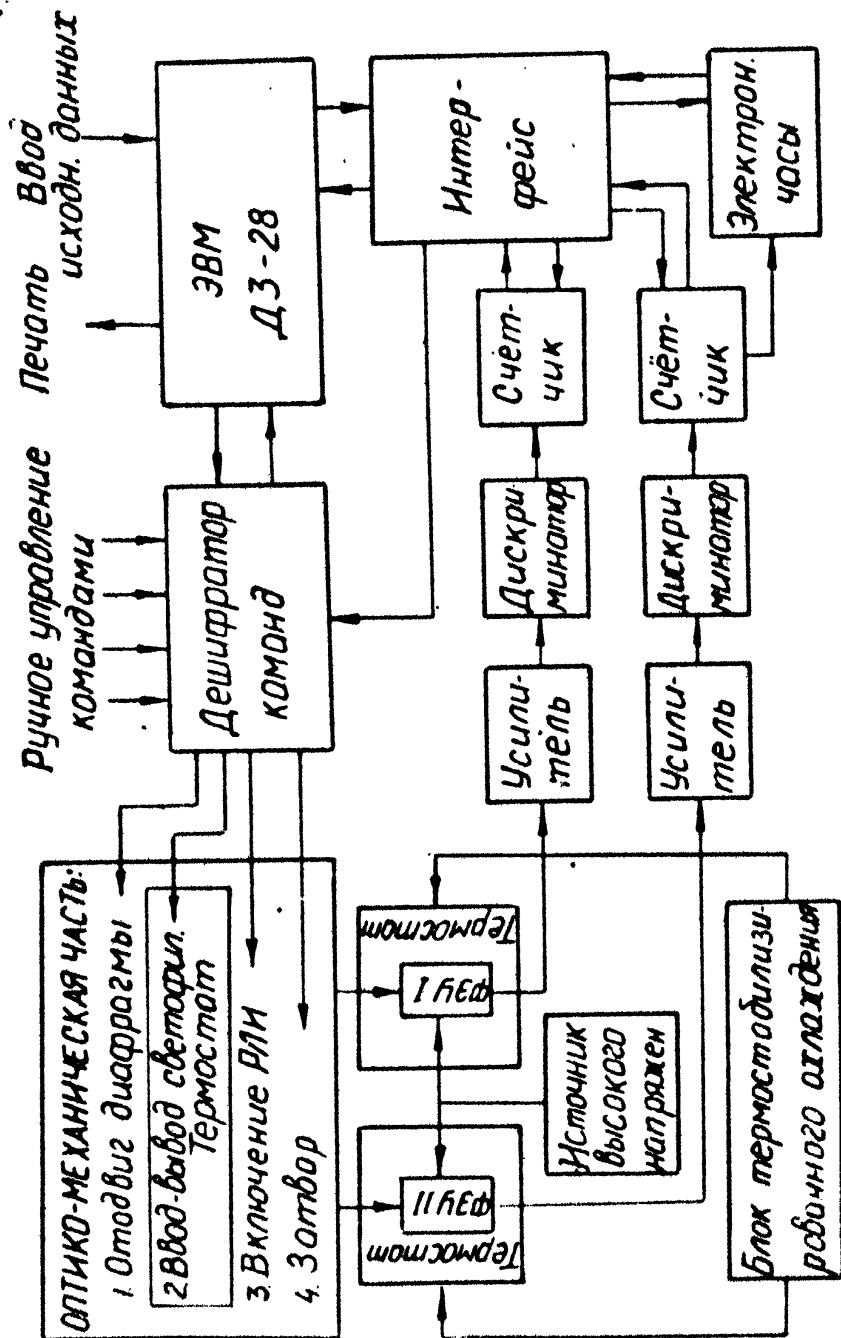


Рис. 1. Функциональная схема синхронного двухзвездного UBVR-фотометра.

1) учет температурных изменений в результатах наблюдений (Майлен и Хаук, 1981), что не всегда успешно удается сделать из-за частотного смещения кривых пропускания светофильтров при изменениях температуры (Юнг, 19676),

2) термокомпенсация элементов фоторегистрирующей аппаратуры, параметры которых зависят от температуры,

3) термостатирование.

В синхронном двухзвездном UBV_R фотометре отдельные элементы фотометрического тракта термокомпенсированы и термостатированы. Так температурные колебания не вызывают изменений чувствительности усилителя - дискриминатора счетчиков фотонов, поскольку компенсация температурной зависимости радиоэлементов предусмотрена в электронных схемах, а светофильтры, радиolumинисцентные излучатели света и фотоумножители помещены в термостаты.

Для термостатирования светофильтров и радиolumинисцентного излучателя света используется схема непрерывного терморегулирования с подогревом и независимым датчиком R_9 (рис. 2). Дифференциальный усилитель с эмиттерной связью на транзисторах V_1 и V_2 непосредственно включен в термочувствительный мост, образованный резисторами R_1 , R_5 , R_6 , R_7 и R_9 . Эта схема обеспечивает малый дрейф нуля и малочувствительна к колебаниям питающего напряжения (Пингерман и др., 1979, с. 71). Выходной транзистор V_4 , регулирующий ток подогрева спирали B_1 , закреплен непосредственно на корпусе фотометра. Температура термостатирования составляет $+25^\circ\text{C}$ в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$.

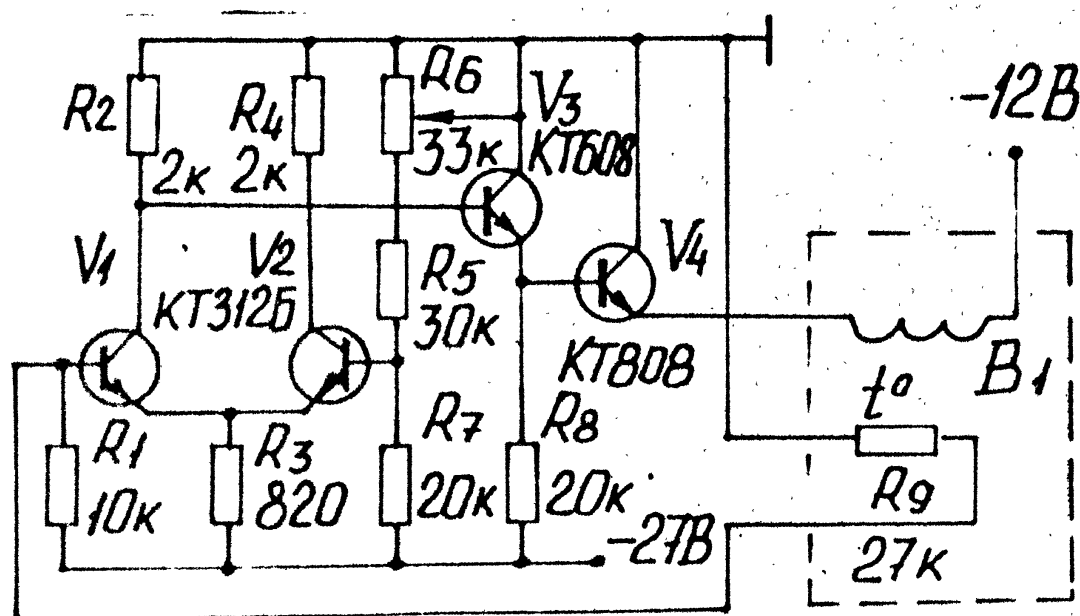


Рис. 2. Схема автоматического регулирования температуры термостата светофильтров и радиolumинисцентного излучателя света.

В схемах термостатированного охлаждения фотоумножителей, отдельных для каждого ФЭУ, осуществляется непрерывное терморегулирование. В качестве исполнительных термоэлектрических элементов применены микроохладители, использующие эффект Пельтье (Ингерман и др., 1979, с.18), которые для улучшения холодильной эффективности питаются постоянным током с малыми пульсациями (там же, с. 65). В случае перегрева микроохладителей из-за недостаточного теплосброса, схема блокировки автоматически отключает их и извещает наблюдателя о случившемся инциденте.

4. Счетчик фотонов.

Счетчики фотонов синхронного двухзвездного UBVR фотометра имеют традиционную структуру: одноэлектронные импульсы ФЭУ усиливаются усилителем, дискриминатор реагирует только на те импульсы, амплитуда которых превышает порог дискриминации, число импульсов подсчитывается частотометром.

Динамический диапазон измеряемых световых потоков, точность и стабильность фоторегистрирующей аппаратуры зависят от параметров усилителя и дискриминатора, от характеристик ФЭУ, способа его включения и выбранных режимов работы. Способность ФЭУ измерять предельно слабые световые потоки определяется квантовой эффективностью, оптимальным выбором наиболее чувствительного места на фотокатоде, темновыми шумами, режимом питания и порогом дискриминации. Быстродействие электроники счета фотонов определяет верхнюю границу измеряемых световых потоков и проявляется при больших скоростях счета как ошибка, вызванная просчетом некоторого числа импульсов из-за мертвого времени аппаратуры.

В качестве фотоприемника в синхронном двухзвездном UBVR фотометре использован фотоумножитель ФЭУ-79, включенный по схеме "общий катод", которая имеет ряд преимуществ по сравнению со схемой "общий анод" (Берковский и др., 1976, с.161). Для уменьшения нелинейности при больших световых потоках, ток высоковольтного усилителя ФЭУ был выбран больше рекомендуемого паспортными данными (Джаш, 1965), все сопротивления делителя равны 120 Ком, кроме одного между анодом и последним динодом, которое уменьшено в 8 раз для улучшения одноэлектронных характеристик ФЭУ-79 (Кватер и др., 1970, Калитис и Спераускас, 1975).

При определении сопротивления анодной нагрузки ФЭУ были учтены следующие факторы. Лавина электронов, пришедшая с последнего динода представляет собой импульс тока, прохождение которого через сопротивление анодной нагрузки создает на нем импульс напряжения с амплитудой, пропорциональной величине сопротивления. Стремление увеличить амплитуду импульса увеличением сопротивления анодной нагрузки ограничивается частотными свойствами счетчика фотонов, которые определяются соотношением $\tau = R_a C$, где R_a — сопротивление анодной нагрузки ФЭУ, C — суммарная емкость анодного вывода и емко-

стей монтажа, τ — постоянная времени счетчика фотонов. Если частотные свойства усилителя и дискриминатора выше, чем у ФЭУ, то для расчета можно принять значение постоянной времени переходных процессов, полученное для ФЭУ-79 Субботиным и Шубниковым (1974).

Оптимальное значение R_a определялось экспериментально по ухудшению линейности световых характеристик, то есть, по нарушению пропорциональности между интенсивностью измеряемого светового потока и числом регистрируемых импульсов, снятых с различными R_a . Для счетчика фотонов с усилителем-дискриминатором Колпакова и Магницкого (1974), схема которого будет рассматриваться дальше, значение R_a не должно превышать 700 ом, нелинейность световой характеристики в этом случае не более 1% при скорости счета $2 \cdot 10^5$ имп/сек, а максимальная скорость счета, соответствующая насыщению ФЭУ светом, составит $9 \cdot 10^6$ имп/сек.

Туннельные диоды, выполняющие функцию дискриминатора одноэлектронных импульсов ФЭУ, обнаруживают зависимость от температуры основного их параметра — порога дискриминации. Например, для арсенидгаллиевых диодов она составляет 0.05% на градус Цельсия (Иванов и др., 1967), что подтвердилось измерениями, проведенными с туннельными диодами 3И306К и 3И306Ж, температурный коэффициент порога которых оказался в пределах $-0.03 \div -0.09\%$ на $^{\circ}\text{C}$, а дрейф порога дискриминации при постоянной температуре за 6 часов составил 0.2%. По амплитудному распределению импульсов для ФЭУ-79 порог дискриминации одноэлектронных импульсов на аноде ФЭУ должен составлять приблизительно 1 мВ. Для того, чтобы дискриминировать импульсы на анодной нагрузке ФЭУ пороговым устройством на туннельном диоде, необходимо примерно в 1000 раз уменьшить порог дискриминации путем подачи соответствующего смещения, однако, тогда в 1000 раз увеличатся температурная нестабильность и дрейф порога дискриминации. Этим вызвана необходимость усиления одноэлектронных импульсов ФЭУ.

Схема усилителя-дискриминатора (Колпаков и Магницкий, 1974) с некоторыми изменениями, внесенными после ее длительной эксплуатации, представлена на рис. 3. Дискриминатор выполнен на туннельном диоде с линией задержки в виде короткозамкнутого кабеля с волновым сопротивлением 50 ом. При хорошем согласовании кабеля с динамическим сопротивлением туннельного диода, эта схема имеет в 10–20 раз меньшее мертвое время по сравнению с аналогичными схемами с задержкой на индуктивности (Тейлор, 1980). Для термокомпенсации порога дискриминации туннельного диода используются стабилитроны Д814А, температурный коэффициент которых при обратном их включении $-0.06 \div -0.08\%$ на $^{\circ}\text{C}$, и $+0.06 \div +0.08\%$ на $^{\circ}\text{C}$ при последовательном включении трех стабилитронов в прямом направлении. Коэффициент усиления усилителя около 800. Соединение разнополярных

транзисторов по каскодной схеме с номиналами сопротивлений, указанными на рис. 3, делает усиление независимым от изменений температуры.

Питание двух ФЭУ-79 обеспечивает источник питания, разработанный Колпаковым и Магницким (1977), с более мощным преобразователем напряжения (рис.4), размещенным на корпусе фотометра. Для этой схемы были опробованы 10 типов транзисторов, и наилучшими оказались П215, имеющие наиболее подходящие параметры: малое напряжение насыщения между эмиттером и коллектором, высокие предельно допустимые напряжения и низкую граничную частоту усиления. Хорошая форма колебаний преобразователя обеспечивается использованием транзисторов с низкой граничной частотой усиления, поскольку частота паразитных затухающих колебаний, вызванных индукцией трансформатора при переключении транзисторов лежит за пределами полосы усиления (Вересов и Смураков, 1978). В качестве сердечника для трансформатора использован Ш-образный феррит М2000НМ Ш 10×10. Обмотки намотаны на секционированном каркасе из оргстекла и пропитаны горячим компаундом, составленным из равных частей парафина и канифоли.

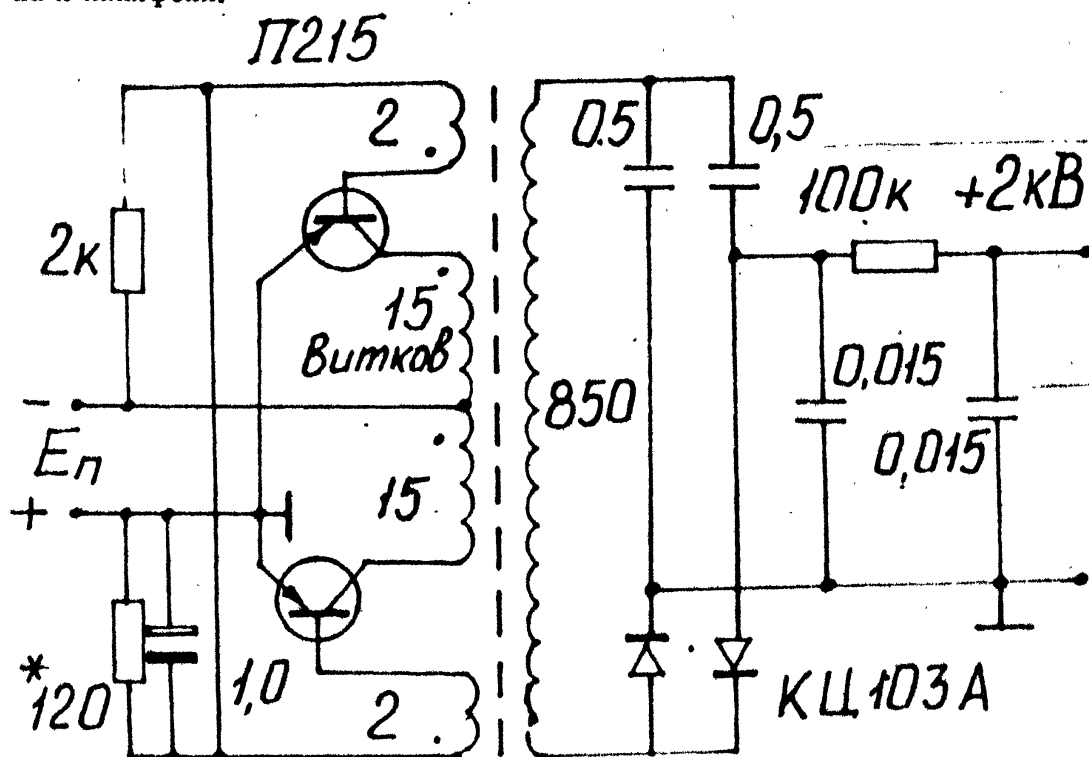


Рис. 4. Преобразователь напряжения питания ФЭУ. Провод первичной обмотки ПЭВ 0.85, вторичной — ПЭЛТО 0.1.

При отборе ФЭУ мы контролировали уровень темнового тока, квантовую эффективность в пределах реализуемой спектральной полосы, наличие плато на счетной характеристике и стабильность работы ФЭУ.

Оптимальный режим работы ФЭУ определяется напряжением питания и порогом дискриминации одноэлектронных импульсов, которые определялись по семейству счетных характеристик для различных порогов дискриминации (рис. 5) и по амплитудному распределению одноэлектронных импульсов. Напряжение питания ФЭУ для конкретного порога дискриминации выбиралось на середине плато счетной характеристики, поскольку на его краях увеличивается зависимость выходного сигнала ФЭУ от изменений питающего напряжения и ухудшаются статистические характеристики фотоумножителя (Калитис, 1980). На рис. 5 видно, что загробление чувствительности счетной аппаратуры (увеличение порога дискриминации) ухудшает одноэлектронные характеристики счетчика фотонов, то есть уменьшает протяженность плато и увеличивает его наклон вплоть до полного исчезновения. Чувствительность счетной аппаратуры можно повысить, подняв напряжение питания ФЭУ, но при этом одноэлектронные характеристики устройства неминуемо ухудшатся из-за появления послеимпульсов (Скибарко и Ярошенко, 1975).

Б. Защита аппаратуры от помех.

Одним из обязательных условий получения надежных результатов астрофотометрических наблюдений является хорошая помехозащищенность аппаратуры. Методы защиты от помех являются специфическими при эксплуатации в условиях астрономических наблюдений.

Специальные меры по повышению надежности аппаратуры и по защите ее от помех имели комплексный характер и проводились по трем направлениям: локализация или полное устранение источников помех в местах их возникновения, индивидуальная защита от помех и взаимных паразитных взаимосвязей отдельных узлов аппаратуры, а также выявление слабых мест путем искусственного создания сильных помех. Устройства и схемные решения, обеспечивающие такую защиту от большинства известных воздействий, были заложены при конструировании аппаратуры синхронного двухзвездного UBVR фотометра.

Фотоумножитель, самый чувствительный к различного рода помехам элемент, защищен толстым пермалловым экраном. Усилитель и дискриминатор заключены в секционированный посеребренный экран. Экран одновременно служит общей шиной, к которой во многих точках подсоединены отдельные радиоэлементы, что на практике уже ранее подтвердило правильность сделанного решения вопреки рекомендациям, встречающимся в литературе (обсуждение этой проблемы см. в кн. Волина, 1976, с. 50). Вся аппаратура фотометра отдельными функциональными группами помещена в металлические корпуса, которые также являются электрическими экранами. Для ослабления паразитных связей по питанию и общему проводу при длине кабеля 20 метров потребовалась раздельная подача напряжений к отдельным потребителям, и применение шин питания с большим сечением, например, суммарное сечение шин с потенциалом корпуса превышает 10 мм². Все соеди-

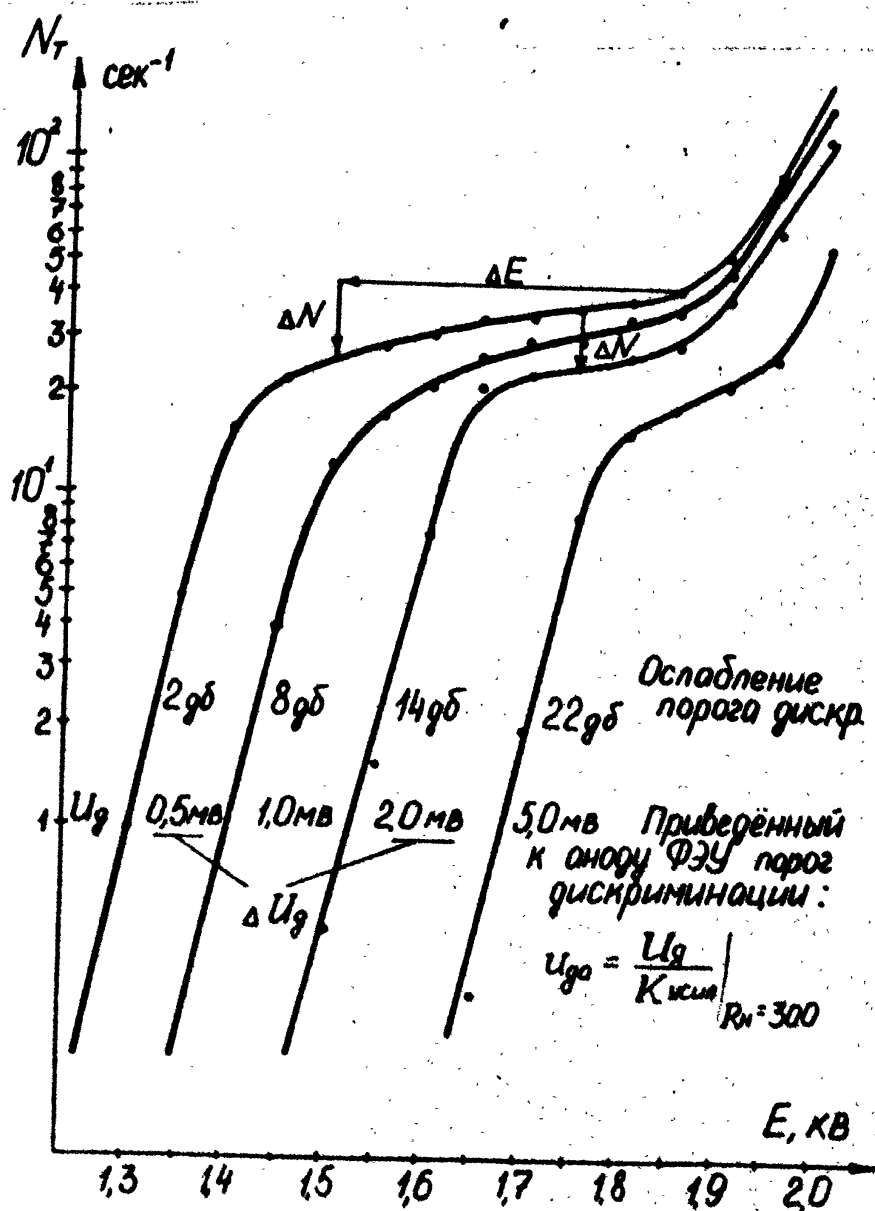


Рис. 5. Семейство счетных характеристик ФЭУ-79.

нительные кабели между аппаратными блоками, фотометром и отдельными узлами фотометра имеют общую экранирующую оплетку и отдельные экранированные провода. Питание на преобразователь ФЭУ и усилитель с дискриминатором подается витыми парами проводников, заключенными в экранирующую оплетку (Венгеровский и Вайштейн, 1974). Для уменьшения взаимных помех по заземлению все экранирующие оплетки заземлены только с одной стороны (там же, с. 43). Переменное напряжение 220 В также подается по экранированным проводникам.

Для предотвращения помех по сети питание радиоаппаратуры фотометра осуществляется от отдельных стабилизированных источников

питания, имеющих большой запас по напряжению. Так, уменьшение напряжения сети с 220 В до 165 В не вызывает падения напряжений источников питания. Все источники питания имеют хорошую фильтрацию по частоте 50 гц, а в цепях питания ФЭУ и усилителей с дискриминаторами имеются многоступенчатые высокочастотные индуктивно-емкостные развязки (Волин, 1976, с. 22).

В аппаратуре фотометра использованы наиболее надежные типы радиокомпонентов в оптимальных для их работы режимах. Отдельные не очень надежно работающие элементы выявлены при больших изменениях температуры и при искусственных изменениях напряжений источников питания в больших пределах, а также с помощью искусственной помехи, путем многократного подключения и отключения большой емкостной и индуктивной нагрузок к сети.

6. Основные результаты.

При создании двухзвездного UBVR фотометра были приняты меры, повышающие точность и надежность астротометрии, которые состоят в следующем:

1) использование ЭВМ для автоматизации и выбора оптимальных условий наблюдений;

2) защита элементов фотометрического тракта от внешних воздействий окружающей среды, главным образом, от изменений температуры, путем термостатированного охлаждения и герметизации ФЭУ, термостатирования светофильтров и термокомпенсацией фоторегистрирующей аппаратуры;

3) расширение динамического диапазона измеряемых световых потоков за счет увеличения быстродействия аппаратуры счета фотонов и повышение ее чувствительности для успешной реализации одноэлектронных характеристик ФЭУ;

4) выбор оптимальных режимов питания ФЭУ;

5) комплексные меры по защите от помех, такие как электрическое и электромагнитное экранирование, использование шин заземления и питания с большим сечением, глубокая стабилизация и фильтрация источников питания, принцип раздельного питания;

6) выявление слабых мест в аппаратуре путем создания сильных искусственных помех.

7. Заключение.

В качестве иллюстрации работы синхронного двухзвездного UBVR фотометра на рис. 6 представлены результаты наблюдений переменной звезды, члена скопления Плеяды Hz II- 625 (V 811 Tau). Кривая блеска Hz II- 625 дана относительно звезды сравнения Hz II- 1284. Нижние кривые — значения потоков в инструментальных звездных величинах во втором канале для звезды Hz II- 804, в первом — для Hz II- 625. Как видно на рис. 6 способ синхронных двухзвездных наблюдений гарантирует получение надежных результатов, в данном случае с точностью 1σ не хуже $0^m.015$.

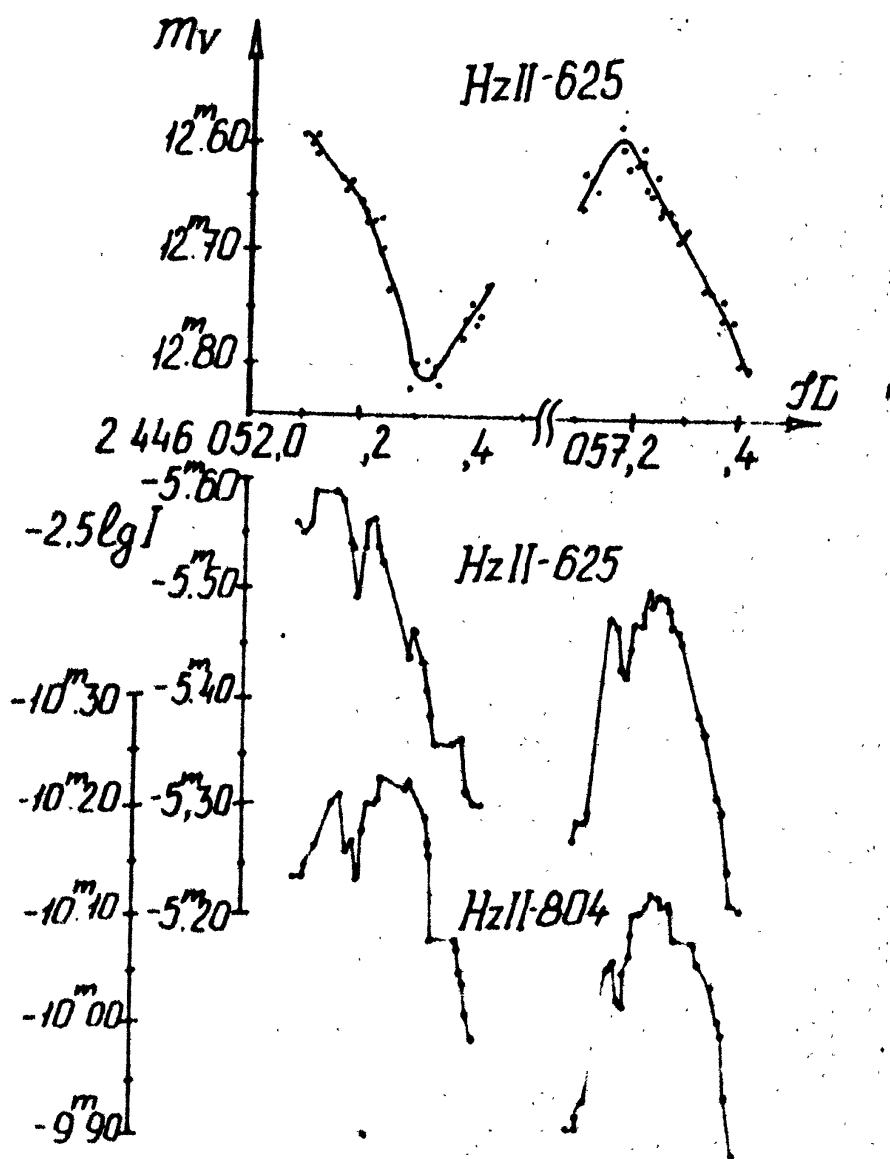


Рис. 6. Наблюдения переменной звезды, члена скопления Плеяды Hz II-625 (V811 Тау) на 0.5-м телескопе АЗТ-14 с помощью синхронного двухзвездного $UBVR$ -фотометра.

Литература.

- Берковский и др., 1976 — Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н., "Вакуумные фотозлектронные приборы", М., Энергия.
 Венгеровский Л.В., Вайнштейн А.Х., 1974, "Прецизионные полупроводниковые стабилизаторы", Т., с. 42-43.
 Чересов Г.П., Смураков Ю.Т., 1978, "Стабилизированные источники питания радиоаппаратуры", М., Энергия, с. 140.
 Волин М.Л., 1976, "Подавление внешних паразитных связей в усилителях", Энергия, М.
 Джаш, 1965 — Jush H.J., Journal of Scientific Instruments 42, No.7, 597.

1988PZ22-797M

Иванов и др., 1967 — Иванов А.А., Колпаков И.Ф., Тимохин Л.А.,
"Применение туннельных диодов в приборах ядерной физики",
М., Атомиздат.

Ингберман и др., 1979 — Ингберман М.И., Фломберг Э.М., Грабой
Л.П., "Термостатирование в технике связи", М., Связь.

Калитис Р., Спераускас Ю., 1975, в сб. "Новая техника в астро-
номии", Л., Наука, с. 72—76.

Калитис Р., 1980, Вильнюс бюл. 53, 22.

Кватер и др., 1970 — Кватер Р.С., Коншин В.М., Линдберг Е.Г., Ми-
щенко Е.Д., Смирнов В.В., Приборы и техника эксперимента 3,
212.

Колпаков Ю.К., Магницкий А.К., 1974, Приборы и техника экспе-
римента 4, 161.

Колпаков Ю.К., Магницкий А.К., 1977, Сообщения ГАИШ 199, 31.

Мейлен, Хаук, 1981 — Meylan G., Hauck B., A&A Suppl 46, No. 2,
281.

Скибарко А.К., Ярошенко И.Ф., 1975, Радиотехника и электрони-
ка 20, № 5, 1061.

Субботин Ф.М., Шубников Е.И., 1974, Приборы и техника экспери-
мента 8, 151.

Тейлор, 1980 — Taylor D.J., PASP 92, No. 545, 108.

Юнг, 1967a — Young A.T., AJ 72, 747.

Юнг, 1967b — Young A.T., MN 135, 175.

Юнг, 1974 — Young A.T., Methods Exp. Phys. (New York, London) 12,
123.

Государственный астрономический
ин-т им. П.К.Штернберга,
г. Москва

Поступила в редакцию
16 января 1987 г.