

**Утверждаю**  
Директор САО РАН

\_\_\_\_\_ Власюк В.В.

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

## **Технический отчет № 340**

ММРР — многорежимный фотометр–поляриметр  
телескопа Цейсс–1000.

Емельянов Э.В.      Фатхуллин Т.А.      Москвитин А.С.

6 августа 2019 г.

# Содержание

<b>1 Описание прибора</b>	<b>3</b>
<b>2 Оптические характеристики</b>	<b>4</b>
2.1 Состав прибора . . . . .	4
2.2 Характеристики ПЗС-светоприемника . . . . .	4
<b>3 Механика</b>	<b>5</b>
3.1 Элементы механики ММРР . . . . .	5
3.2 Система управления . . . . .	6
3.2.1 Турели . . . . .	7
3.2.2 Управление шаговыми двигателями . . . . .	8
<b>4 Интерфейс системы управления</b>	<b>10</b>
4.1 Графический интерфейс . . . . .	10
4.2 Конфигурационные файлы . . . . .	11
<b>5 Опытная эксплуатация прибора</b>	<b>13</b>
<b>6 Приложения</b>	<b>14</b>
6.1 Замена колес с фильтрами . . . . .	14
6.2 Методика установки нуль-пунктов . . . . .	16
6.3 Порядок сборки и замены узлов прибора . . . . .	18
6.4 Система управления линейными трансляторами и поворотными платформами прибора . . . . .	25
6.4.1 Принципиальная схема . . . . .	25
6.4.2 Протокол управления . . . . .	27
6.4.3 Состояние устройства и базовые настройки . . . . .	33
6.5 Описание интерфейса СУ ММРР . . . . .	35
6.5.1 Подключение к управляющему ММРР компьютеру zphot . . . . .	35
6.5.2 Получение изображений и работа в фотометрическом режиме ММРР .	36
6.5.3 Фокусировка . . . . .	37
6.5.4 Работа в поляриметрических режимах ММРР . . . . .	38
6.5.5 Работа пакетном режиме . . . . .	40
6.5.6 Работа сервисном режиме . . . . .	41
6.5.7 Завершение работы . . . . .	41

# 1 Описание прибора

В САО РАН более полутора десятилетий на 1-метровом оптическом телескопе Цейсс–1000 фотометрические методы были представлены ПЗС-фотометром, оснащенным низкоэффективными стеклянными фильтрами системы UBVRI Джонсона-Казинса, а также в интегральном свете в диапазоне чувствительности ПЗС 360–1000 нм. По сути, данный фотометр представлял собой комбинацию из ПЗС EEV  $2k \times 2k$  пикселей и двух турелей с оптическими светофильтрами. Эффективность фотометра в фотометрических полосах не превышает 50% (в полосе U она ниже 4%). Реализация поляриметрических методов на телескопе полностью отсутствовала. Для расширения доступных методик и увеличения эффективности фотометрии в 2017 г. было принято решение разработать новый прибор, сочетающий в себе фотометр и поляриметр с возможностью измерения как линейной, так и эллиптической поляризации с точностью не хуже 0.1%.

ММРР (Multi-Mode Photometer-Polarimeter) — многорежимный фотометр-поляриметр телескопа Цейсс–1000 предназначен для проведения фотометрических и поляриметрических исследований. Прибор оснащен двумя турелями USB-HSFW (Edmund Optics) с пятью позициями для 50-мм фильтров, анализатором линейной поляризации и четвертьвольновой пластиной. Основным светоприемником фотометра является ПЗС Eagle V ( $2048 \times 2048$  пикс), позволяющий проводить научные исследования в диапазонах от 300 до 1050 нм с максимумом чувствительности около 600 нм. Данный ПЗС оснащен водяным охлаждением. Также прибор рассчитан на использование с быстрым КМОП-светоприемником Andor NEO 5.5 ( $2560 \times 2160$  пикс) в режиме «быстрой фотометрии» и «lucky imaging».

В фотометрическом режиме в течение ночи без переоснащения прибора возможна работа в восьми фотометрических полосах. Изменение рабочего набора фильтров выполняется посредством замены колес в турелях (пять наборов колес описаны в конфигурации интерфейса управления прибором; нестандартные наборы потребуют изменения конфигурации).

На рис. 1 приведена схема расположения узлов ММРР. Непосредственно на входном фланце закреплен транслятор поворотной платформы фазовой пластины диаметром 25 мм. Далее располагается транслятор поворотной платформы анализатора поляризации диаметром 50 мм. Последними в корпусе установлены турели фотометрических фильтров. К задней стенке прибора крепится фланец светоприемника: ПЗС или КМОП.

Исходные коды встроенного программного обеспечения системы управления, утилит командной строки для работы с узлами прибора, библиотеки для разработки системы управления фотометром, принципиальные схемы и pdf-файлы с чертежами прибора размещены в отдельном репозитории [github<sup>1</sup>](https://github.com/eddyem/mmpp).

Управление прибором осуществляется при помощи компьютера на основе операционной системы Gentoo Linux. Дистанционное управление реализовано как посредством утилит командной строки (позволяющих автоматизировать рутинные наблюдения при помощи bash-скриптов), так и при помощи графического интерфейса. Для удобства создания специализированных утилит управления прибором на языках C/C++ разработана разделяемая библиотека на языке C, формализующая протоколы управления узлами прибора и турелями Edmund Optics.

---

<sup>1</sup><https://github.com/eddyem/mmpp>

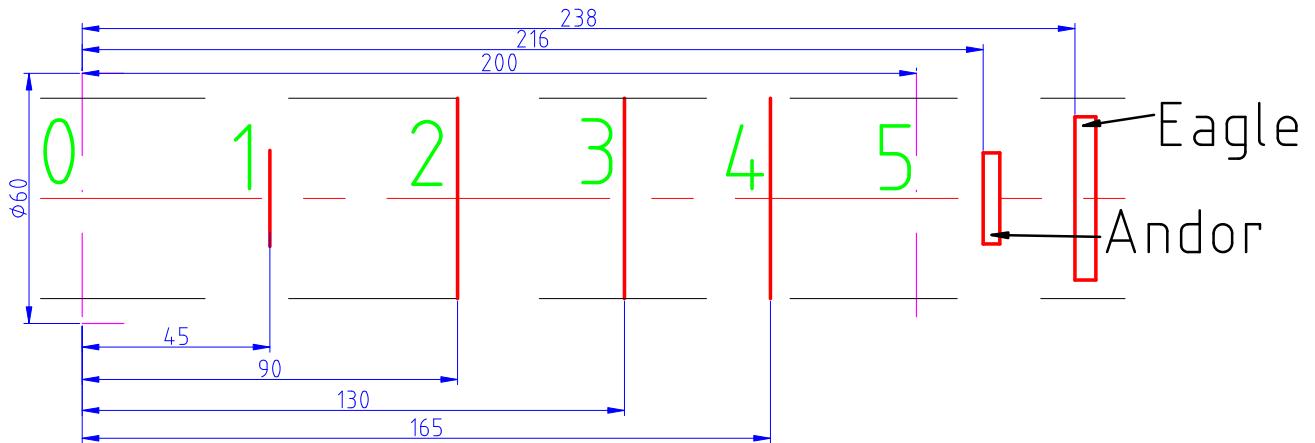


Рис. 1: Расположение элементов прибора. Обозначения: 0 – входное окно (плоскость фланца телескопа), 1 – четвертьволновая пластина, 2 – анализатор поляризации, 3 и 4 – интерференционные фильтры, 5 – выходное окно. Eagle, Andor – плоскости расположения соответствующих светоприемников.

## 2 Оптические характеристики

### 2.1 Состав прибора

- Фотометрические фильтры системы Джонсона–Казинса фирмы Astrodon Photometrics на полосы U, B, V, R и I;
- узкополосные фотометрические фильтры, заменяемые в соответствии с наблюдательными программами;
- блокирующие ИК-избыток в полосах U и B фильтры Schott BG39 толщиной 1 мм (установлены в паре с фильтрами U и B);
- анализатор линейной поляризации;
- четвертьволновая пластина.

Световой диаметр фотометрических фильтров и анализатора линейной поляризации составляет 48 мм. Световой диаметр фазовой пластины – 23.5 мм. Теоретическое невиньетированное поле светоприемников составляет 11.4' в режиме фотометрии, 10.9' в режиме линейной поляризации (оба размера – диагонали ПЗС-светоприемника), 2.6' в режиме циркулярной поляризации. Диагональ светоприемников: ПЗС – 10.3', КМОП – 5.6'.

### 2.2 Характеристики ПЗС-светоприемника

Камера Eagle V фирмы Raptor Photonics оборудована ПЗС-чипом E2V CCD42-40 обратной засветки (back illuminated). Полный формат кадра составляет  $2048 \times 2048$  элементов, размер элемента – 13.5 микрон. Охлаждение чипа реализовано на термоэлектрическом преобразователе (элемент Пельтье) с внешним жидкостным охлаждением. Оцифровка получаемого сигнала производится PCI Express платой видеозахвата фирмы Epix Inc.

Согласно данным производителя, светоприемник имеет две штатных скорости считывания: 75 кГц («медленная») и 2 МГц («быстрая»). Темновой ток по данным производителя составляет 0.47 е<sup>-</sup> на пиксель за час при температуре чипа  $-99.5^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент усиле-

ния имеет два возможных значения. В режиме «high gain» коэффициент преобразования ( $\bar{e}/\text{ADU}$ ) для низкой скорости считывания имеет значение 1.13, для высокой – 1.15; шум считывания составляет 2.4 и 9.0 электрон соответственно. В режиме «low gain» коэффициенты преобразования имеют значения 6.36 и 6.44 соответственно; шум считывания — 4.1 и 14.7 электрон соответственно.

В лаборатории обеспечения наблюдений САО РАН были проведены измерения реальных значений характеристик светоприемника при температуре  $-99^{\circ}\text{C}$ . Значение темнового тока составляет  $0.95 \bar{e}$  на пиксель за час экспозиции. В режиме «high gain» шум считывания составляет  $2.3 \bar{e}$  на низкой скорости считывания и  $9.0 \bar{e}$  на высокой скорости считывания; коэффициент преобразования  $\bar{e}/\text{ADU}$  имеет значения  $1.09 \pm 0.01$  и  $1.11 \pm 0.01$  соответственно. В режиме «low gain» шум считывания составляет  $3.6 \bar{e}$  и  $13.2 \bar{e}$  соответственно; коэффициент преобразования —  $5.70 \pm 0.05$  и  $5.80 \pm 0.05$  соответственно.

На рис. 2 представлен дрейф «электронного нуля» светоприемника со временем. На рис. 3 изображена паспортная кривая квантовой эффективности светоприемника (кривая «Basic Midband»).

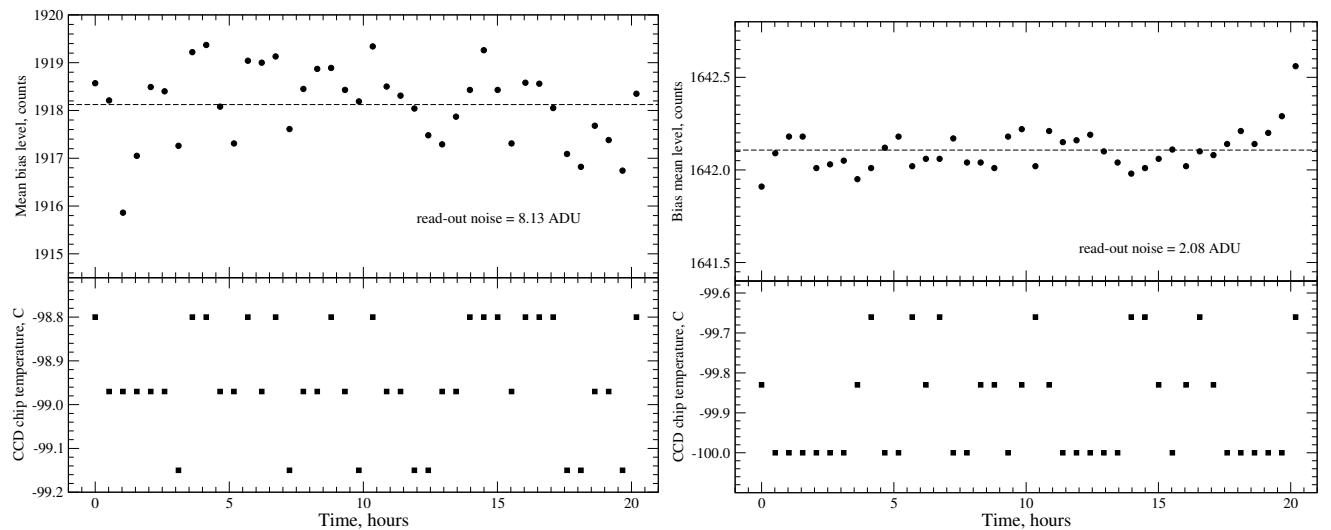


Рис. 2: Изменения среднего значения смещения «электронного нуля» (bias) со временем. Слева – на скорости считывания 75 кГц, справа – на скорости 2 МГц. Режим усиления «high gain».

### 3 Механика

#### 3.1 Элементы механики ММРР

Поворотные платформы фазовой пластины и анализатора поляризации установлены на цилиндрических направляющих, позволяющих при помощи соединения винт-гайка вводить и выводить их из пучка посредством шаговых двигателей. Шаг винтового соединения составляет 1 мм, т.е. поворот шаговых двигателей на один шаг приводит к перемещению трансляторов на 5 мкм. Ограничение перемещения трансляторов реализовано на датчиках Холла A1101. Точность установки нуль-пункта трансляторов составляет  $\pm 0.13$  мм. В положении «0» оба транслятора полностью выведены из пучка. Полный ход транслятора фазовой пластины составляет 67.5 мм (13500 шагов), транслятора анализатора поляризации — 145 мм (29000 шагов).

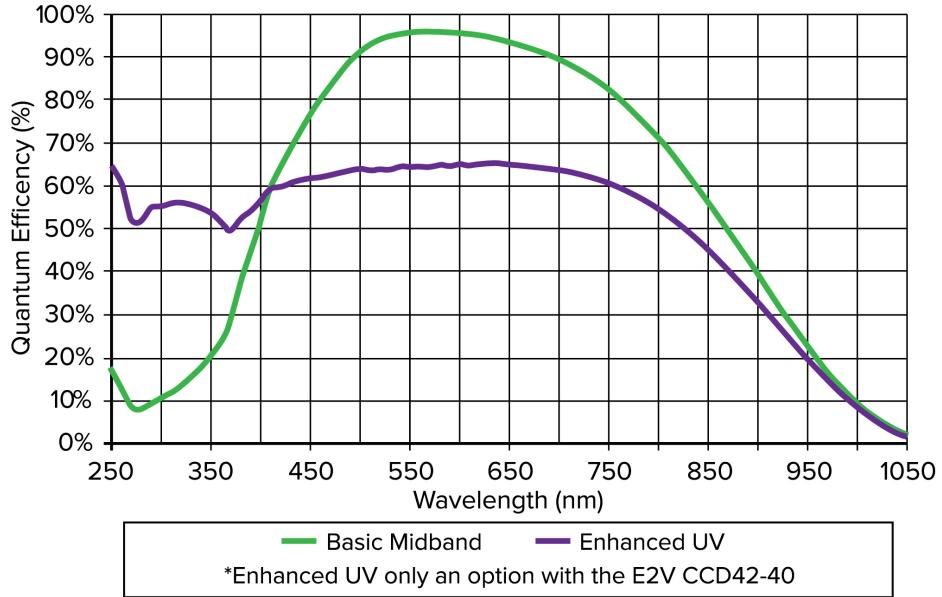


Рис. 3: Квантовая эффективность светоприемника Eagle (зеленая кривая).

гов). Положение «в пучке» определяется юстировкой прибора, которую необходимо производить каждый раз после вмешательства в положение трансляторов или концевых датчиков. В среднем для транслятора фазовой пластины оно составляет 11400 шагов, а для транслятора анализатора поляризации – 16400 шагов.

Четвертьволновая фазовая пластина приводится во вращение при помощи поворотной платформы 8MPR16-1 фирмы Standa, в которой аналоговый датчик Холла (служащий для определения нуль-пункта) заменен на A1101 (с встроенным компаратором и триггером Шмидта). Для вращения анализатора поляризации используется поворотная платформа 8MR190-2-4233 фирмы Standa. В ней в качестве нуль-пункта используется концевой выключатель. Конструктивные изменения данной платформы заключаются в удалении разъема типа DS9 и подключения проводки напрямую (при помощи пайки).

Точность установки нуль-пунктов обеих поворотных платформ составляет  $\pm 5'$ . Дискрет поворотной платформы фазовой пластины составляет  $0.75'$  (80 шагов на  $1^\circ$ ), дискрет анализатора поляризации –  $0.6'$  (100 шагов на  $1^\circ$ ).

Монтаж фотометра на фланце телескопа Цейсс–1000 выполняется в соответствии с положением меток на фланцах телескопа и прибора. Аналогично по расположению меток устанавливаются светоприемники. Для удобства визуализации позиционный угол фланца телескопа должен быть установлен в положение  $337.5^\circ$ .

### 3.2 Система управления

Так как турели Edmund Optics представляют собой самостоятельные USB устройства, система управления прибором имеет модульную структуру. В приборе размещен USB-концентратор, к которому подключены обе турели с фильтрами, а также преобразователь интерфейсов USB $\leftrightarrow$ TTL для работы с модулями управления парой шаговых двигателей.

### 3.2.1 Турели

Протокол управления турелями HSFW Edmund Optics не был документирован фирмой-изготовителем, поэтому был восстановлен методом обратной разработки. Устройство работает через HID-интерфейс и не нуждается для работы в правах суперпользователя. Для управления устройством разработана утилита `HSFW_management`<sup>2</sup> (см. листинг 1), полностью реализующая возможности турелей: поиск среди устройств по идентификатору, названию колеса или названию фильтра; перемещение заданного колеса в требуемую позицию; ренинициализация с перемещением в стартовую позицию; сохранение сведений о фильтрах в различных колесах в EEPROM устройства.

Турели поддерживают до пяти разных колес с фильтрами. Маркировка колес выполняется при помощи постоянного магнита, вклеиваемого в соответствующее отверстие на колесе. При подготовке нового колеса необходимо убедиться, что маркирующий магнит вклеен в соответствии с полярностью остальных магнитов (см. рис. 4). Буквой «P» на рисунке обозначено положение магнита, отмечающее нахождение одного из фильтров «в пучке»; «A», «B» и «C» — магниты, маркирующие колесо (магниты «D» и «E» расположены дальше и в кадр не вошли). Магнит «A» всегда должен присутствовать, маркируя положение нуль-пункта, позиции с «B» по «E» могут быть свободными (в этом случае колесо определяется как «A»), либо в одной из них может находиться магнит для соответствующей маркировки.

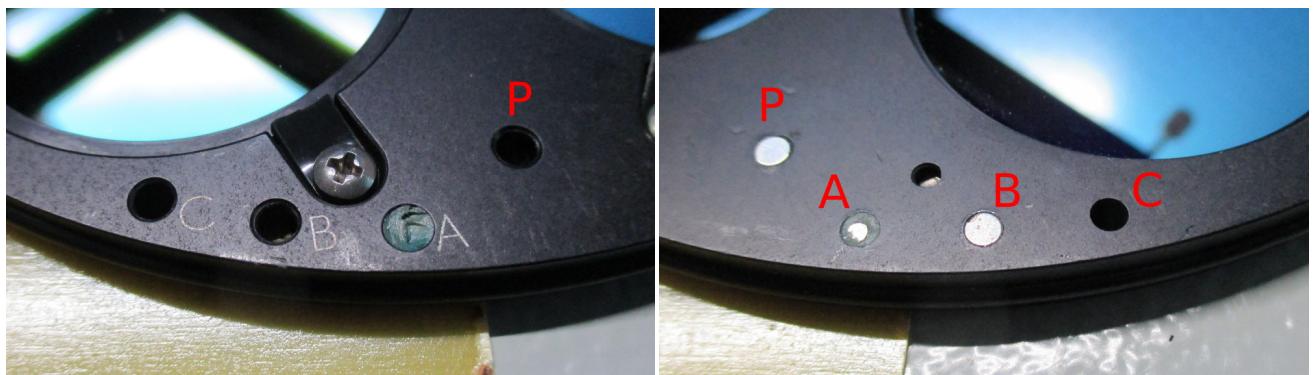


Рис. 4: Маркировка колес с фотометрическими фильтрами.

Листинг 1: Краткая справка по параметрам утилиты `HSFW_manage`

<code>-H, --home</code>	переместиться в стартовую позицию
<code>-N, --wheel-name=arg</code>	название колеса
<code>-W, --wheel-id=arg</code>	буквенный идентификатор колеса
<code>-h, --help</code>	отобразить эту справку
<code>-i, --filter-id=arg</code>	идентификатор фильтра, например, "A3"
<code>-n, --filter-name=arg</code>	название фильтра
<code>-p, --f-position=arg</code>	номер позиции фильтра
<code>-s, --serial=arg</code>	серийный номер турели (с начальными нулями)
<code>--list</code>	список имен только присутствующих устройств
<code>--list-all</code>	список всех сохраненных имен
<code>--rename</code>	переименовать сохраненные имена
	колес/фильтров

<sup>2</sup>[https://github.com/eddyem/eddys\\_snippets/tree/master/HSFW\\_management](https://github.com/eddyem/eddys_snippets/tree/master/HSFW_management), там же — примеры работы с утилитой

```
--resetnames
```

```
сбросить все названия в значения по умолчанию
```

### 3.2.2 Управление шаговыми двигателями

Каждый линейный транслятор в совокупности с соответствующей поворотной платформой и управляющим контроллером оформлен как отдельное устройство. Протокол управления приведен в приложении 6.4.

Все управляющие контроллеры размещаются на одной сигнальной шине UART (протокол: 8N1). Сигналы Tx контроллеров подключаются по схеме «открытый сток» с использованием внешней или слабой внутренней подтяжки. Скорость интерфейса задается в настройках контроллера, по умолчанию это 9600 бод.

Система управления построена на основе микроконтроллера STM32F030 (см. рис. 32). Запись микропрограммы выполняется посредством встроенного в микроконтроллер бутлоадера (для его активации на плате размещены кнопки «boot» и «reset»). При помощи датчика тока MAX471 возможно измерение потребляемого двигателями в процессе работы тока. Микроконтроллер формирует сигналы STEP/DIR, которые преобразуются в силовые сигналы для шаговых двигателей при помощи модулей на основе драйверов DRV8825. В случае замены драйверов, до подключения шаговых двигателей требуется выставить предельный потребляемый ток в соответствии с таблицей 6.4.3 в приложении. Драйверы работают в режиме дробления шага на 16, однако, система управления не позволит переместить шаговый двигатель на дробное количество шагов, т.к. после окончания движения двигатель обесточивается.

Система обеспечивает плавный разгон и торможение двигателей (кроме ситуаций наезда на концевик). Интерфейсы подключения концевых выключателей различаются: для двигателя 1 концевики подключаются к аналоговым входам МК, что позволяет параллельно им установить дополнительные кнопки управления со слабой подтяжкой (резисторы сопротивлением 47 кОм) к земле. Данные кнопки выведены на лицевую панель прибора и позволяют управлять перемещением трансляторов без компьютера (для проверки работоспособности системы и перемещения транслятора анализатора поляризации при замене нижней турели светофильтров).

Номер контроллера (по умолчанию – 0) хранится во внутренней флеш-памяти МК. Контроллер анализатора поляризации имеет номер 1, контроллер фазовой пластины – 2. В случае замены контроллера до установки его в прибор необходимо провести базовые настройки в соответствии со списком на стр. 34.

Сразу после включения питания контроллеры находятся в неинициализированном состоянии. Для их инициализации в ручном режиме необходимо сместить все позиционные устройства в положительном направлении на небольшую величину (для гарантированного съезда с нулевого концевика), а затем двигать их в отрицательном направлении на количество шагов, превышающее рабочий диапазон – для установки на нулевые концевики. Далее до следующего отключения питания эту процедуру проводить не нужно.

Для удобства управления устройствами MMPP разработана утилиты MMPP\_control<sup>3</sup>. Краткий перечень параметров утилиты:

-A, -absmove — абсолютное движение, данный параметр используется для задания абсолютной величины количества шагов (аргументы -L и -l) или угла в градусной мере (аргументы -R или -r), без этого параметра подразумевается задание аргумента относительно текущего положения;

<sup>3</sup>[https://github.com/eddyem/mmpp/tree/master/MMPP\\_control](https://github.com/eddyem/mmpp/tree/master/MMPP_control)

**E**, **-reset** — выполнить программный сброс заданного контроллера, для сброса обоих контроллеров необходимо указать: **-E1 -E2**;

**-L**, **-lin1=arg** — переместить линейный транслятор поляроида на заданное количество шагов;

**-R**, **-rot1=arg** — повернуть поляроид на заданный угол (в градусной мере);

**-S**, **-stop** — прекратить движение (оба контроллера получают сигнал остановить любое движение);

**-a**, **-sendraw=arg** — отправить неформатированные «сырые» данные в порт, например, для передачи команд или получения значений, выходящих за рамки стандартных аргументов утилиты;

**-b**, **-baudrate=arg** — скорость связи (например, 115200), по умолчанию ее значение — 9600;

**-d**, **-comdev=arg** — название устройства последовательного порта, **/dev/ttyUSB0** по умолчанию;

**-h**, **-help** — отображение справки по параметрам;

**-l**, **-lin2=arg** — переместить линейный транслятор волновой пластины на заданное количество шагов;

**-p**, **-pidfile=arg** — название pid-файла (по умолчанию — **/tmp/MMPP\_control.pid**);

**-q**, **-quiet** — «тихий» режим для вызова из внешних программ (на стандартный вывод отображается лишь необходимый минимум информации в виде «параметр=значение», стандартный поток ошибок отображается без изменений);

**-r**, **-rot2=arg** — повернуть волновую пластину на заданный угол (в градусной мере);

**-s**, **-status** — отображение текущего состояния фотометра;

**-t**, **-temp** — отображение примерной температуры обоих микроконтроллеров;

**-w**, **-wait** — ожидание завершения всех движений, заданных в предыдущих запусках утилиты с «асинхронным» параметром **-y**;

**-y**, **-async** — «асинхронное» движение: сразу после передачи команды движения утилита завершается, не ожидая окончания движения.

Коды возврата утилиты заданы в начале файла **main.c**. Они имеют следующее значение:

- 0, RET\_ALLOK** нормальное завершение работы;
- 1, RET\_NOTFOUND** при запуске утилиты не найдено ни одного отвечающего контроллера, либо не получен ответ от искомого контроллера при передаче команды;
- 2, RET\_ONLYONE** при запуске обнаружен лишь один контроллер;
- 3, RET\_COMMERR** ошибка связи или формата передаваемых /принимаемых данных;

- 4, **RET\_CANTINIT** невозможно инициализировать контроллер установкой на нулевой концевик;
- 5, **RET\_WAITERR** ошибка, возникшая во время ожидания завершения выполнения предыдущих передвижений;
- 9, **RET\_ERROR** прочая ошибка (из libsnippets);
- 255, **RET\_HELPCELL** запуск утилиты с параметром -h.

## 4 Интерфейс системы управления

### 4.1 Графический интерфейс

Временный интерфейс системы управления запускается в ssh-сессии на управляющем компьютере zphot.sao.ru. Если утилита запускается вне директории, содержащей конфигурационные файлы, необходимо явно указать путь к файлу конфигурации, например:

```
ZPhot -c ~/MMPP_config/ZPhot.ini
```

Внешний вид интерфейса изображен на рис. 5. Основное окно интерфейса разбито на три блока. В верхней левой части располагается блок настройки параметров светоприемника и выходных файлов. Здесь указывается тип данных, длительность экспозиций и их количество, коэффициент усиления, скорость считывания, биннинг, геометрия подызображения при экспозиции части кадра, дата наблюдения, номера куба данных и файла, итоговое имя файла и выходная директория. В нижней части блока расположены кнопки запуска и прерывания экспозиции, а также кнопка повторной инициализации контроллера ПЗС в случае возникновения проблем.

В правой верхней части располагаются поля для заполнения ключевых слов FITS-файлов: имени объекта, качества изображений, облачности, комментария и программы наблюдения (с авторами). Ниже расположено окно вывода лог-файла наблюдательной ночи, под которым находятся вспомогательные элементы управления: кнопка сохранения лог-файла под определенным именем, кнопка вызова диалога фокусировки, кнопка редактирования заголовка последнего сохраненного файла, кнопка вызова диалога астрометрии (в разработке), кнопка вызова просмотрщика FITS-файлов.

Нижняя часть окна содержит элементы управления узлами фотометра. Во вкладке „Photometry“ находятся выпадающие списки, позволяющие выбрать тот или иной фильтр из двух турелей. В автоматическом режиме при выборе фильтра в одной турели вторая перемещается в позицию „Hole“, в ручном режиме управления это ограничение снимается.

Следующая вкладка — „Polarimetry“ (см. рис.6) — служит для работы в поляриметрической моде. Помимо диалога выбора фотометрических полос она содержит две вкладки — для работы в режиме линейной или же циркулярной поляризации. Вкладки режимов поляризации позволяют задавать угол вращения анализатора поляризации и волновой пластины, а также выбирать количество циклов полуавтоматического измерения поляризации.

Вкладка „Batch mode“ (в состоянии разработки) содержит интерфейс для заполнения файла-сценария наблюдений, задающего последовательность изменения конфигурации MMPP и параметров экспозиции. Вкладка „Service Mode“ (в режиме разработке) предназначена для проведения калибровок и прочих технических работ с прибором.

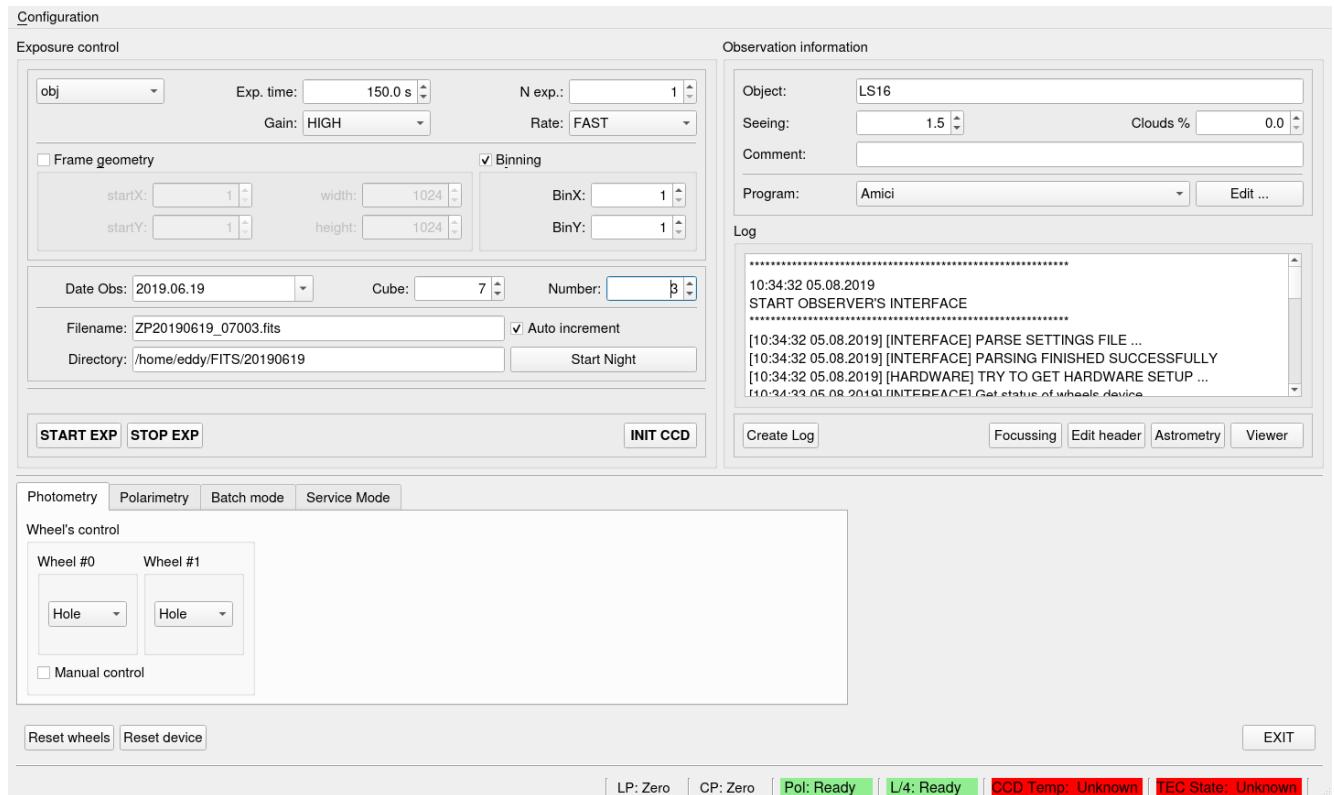


Рис. 5: Интерфейс системы управления ММПР.

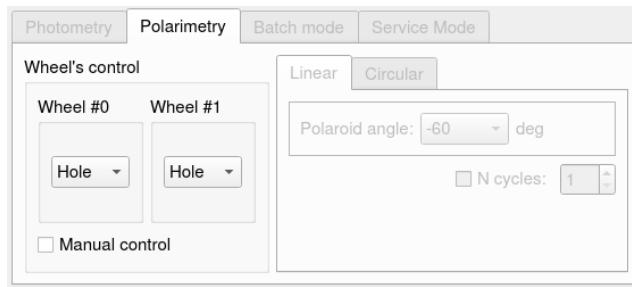


Рис. 6: Вкладка „Polarimetry“ СУ ММПР.

В статусной строке окна СУ ММПР расположена информация о состоянии линейных трансляторов и поворотных платформ анализатора поляризации и волновой пластины, текущая температура ПЗС и состояние термоэлектрической системы охлаждения. Последние два поля позволяют задавать требуемую температуру чипа ПЗС, а также включать или выключать охлаждение.

Более полное описание работы с интерфейсом системы управления ММПР приведено в приложении 6.5 (стр. 35).

## 4.2 Конфигурационные файлы

В конфигурационном файле (по умолчанию – ZPhot.ini) расположены настройки путей к прочим файлам конфигурации и их имена:

```
config_path = /home/eddy/MMPP_config
```

```
wheels_database = wheels_db.dat
filters_database = filters_db.dat
edit_fits_kwds = editable_FITS_KWD.dat
```

Файл `wheels_database` содержит описание фильтров, установленных во все конфигурируемые пять колес турелей фотометра:

```
# [WHEEL HW NAME] [WHEEL HUMAN-READABLE NAME] [FILTER NAMES]
#
C SED-1 Hole SED625 SED650 SED700 SED725
D SED-2 Hole SED775 SED800 SED875 SED900
A Johnsons-Cousins Hole B V R I
B Polars Hole U 470 540 656
```

Первая колонка – имя колеса (A, B, C, D или E), вторая колонка – человеко-читаемое имя колеса, далее следует список названий каждой из пяти позиций соответствующего колеса.

Список используемых фильтров содержится в файле `filters_database`:

```
# [FILTER NAME] [FOCUS CORRECTION] <OPTIONAL COMMENT>
#
U 0.0 Johnson's U
B 0.0 Johnson's B
V 0.0 Johnson's V
R 0.0 Cousins Rc
I 0.0 Cousins Ic
u' 0.0
g' 0.0
r' 0.0
i' 0.0
z' 0.0
CIV 0.0
SIII 0.0
Ha 0.0
470 0.0 HeII
540 0.0
656 0.0 Halpha
```

В первом столбце значится обозначение фильтра для `wheels_database`, во втором столбце — поправка на фокусное расстояние (в случае, если телескоп Цейсс–1000 будет оснащен автоматическим фокусером). Третий столбец — человеко-читаемое обозначение названий фильтров.

Список ключевых слов FITS для возможности ручного редактирования в среде СУ ММРР задается в файле `edit_fits_kwds`:

```
# FITS keywords for "EDIT HEADER" dialog
```

```
#  
# [KWD TYPE] [KWD NAME]  
#  
2 EXPTIME  
2 CCDTEMP  
2 FOCUS  
2 OBSCOMM
```

## 5 Опытная эксплуатация прибора

С декабря 2018 года ММРР работает в режиме опытной эксплуатации на телескопе Цейсс–1000. Основная проблема, не позволяющая ввести прибор в штатную эксплуатацию — отсутствие надежной системы стабилизации температуры охлаждающей жидкости. Лабораторный чиллер (ООО «Завод Кристалл»), применяемый для этих целей, не способен достаточно охлаждать жидкость в летний и нагревать в зимний периоды. Максимальный перепад температуры рабочей жидкости и окружающей среды, которого удалось добиться от этой системы, не превышает 6°C. Ведется разработка компактной штатной системы термостабилизации охлаждающей жидкости с короткими шлангами, которую предполагается разместить прямо на трубе телескопа.

Использование интерференционных светофильтров имеет определенный недостаток при комбинировании их с ПЗС Eagle. Из-за расширенного в ИК-область рабочего диапазона светоприемника в полосах U и V возникает ИК-избыток<sup>4</sup>: интерференционные светофильтры не подавляют в достаточной степени высшие гармоники, что приводит к «утечке» на длине волны свыше 1000 нм. Избавиться от этого эффекта удалось лишь с применением блокирующих фильтров BG32, в результате чего несколько снизилась эффективность прибора в полосах U и V, а также изменилась форма кривых пропускания этих фильтров.

В условиях перепадов температуры в течение наблюдательной ночи отсутствие надежной системы стабилизации температуры рабочей жидкости системы охлаждения светоприемника приводит к нестабильности температуры кристалла ПЗС, что делает невозможным проведение высокоточных измерений. Кроме того, во время наблюдений обнаружено возникновение рассеянного света в трубе телескопа Цейсс–1000, до устранения этой проблемы измерение линейной поляризации на метровом телескопе нецелесообразно.

Опытная эксплуатация прибора позволила разработать и усовершенствовать методики проведения на нем абсолютных и относительных фотометрических измерений, измерений линейной и эллиптической поляризации. Для изучения спектральных характеристик прибора разработана насадка с призмой прямого зрения (призма Амичи), которая позволит получать бесщелевые спектры низкого разрешения. Дисперсия разработанной призмы в красной области оказалась слишком малой для надежной калибровки по естественным объектам, разрабатывается стенд для снятия спектральных характеристик ММРР в лабораторных условиях.

---

<sup>4</sup>U. Munari, S. Moretti. // Baltic Astronomy, 2012, vol. 21, pp. 22-31.

## 6 Приложения

### 6.1 Замена колес с фильтрами

Доступ к колесам турелей осуществляется через лицевую панель фотометра (см. рис. 7). Для замены соответствующего колеса необходимо ослабить винт, фиксирующий колесо в турели, открыть крышку турели, поменять колеса, затянуть фиксирующий винт и закрыть крышку турели.

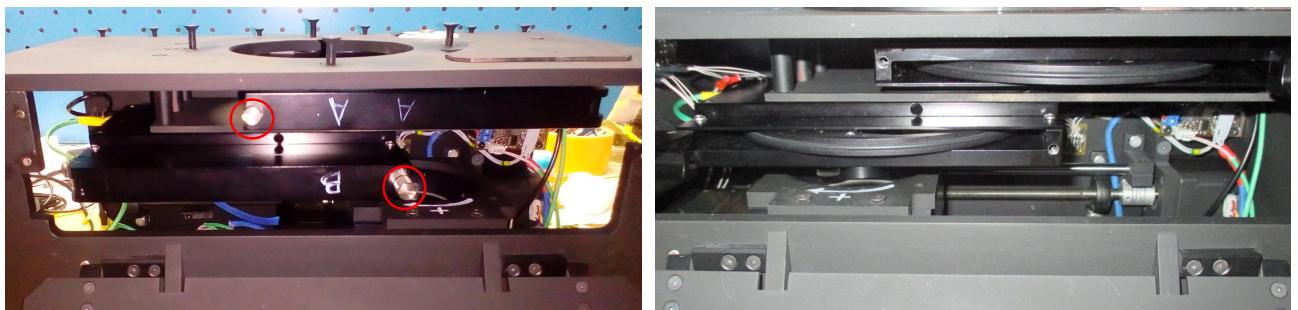


Рис. 7: Крышки турелей. На рис. слева отмечено положение винтов, фиксирующих крышки. На рис. справа — турели с открытыми крышками.



Рис. 8: Кнопки ручного управления механизмом линейных трансляторов: 1 и 2 – перемещение транслятора анализатора поляризации в отрицательном и положительном направлении, соответственно; 3 и 4 – аналогичные перемещения транслятора фазовой пластины.

Доступ к фиксирующему винту нижней турели осуществляется через боковую крышку (см. рис. 9 справа). Чтобы ослабить этот винт, необходимо сначала переместить транслятор анализатора поляризации (контроллер №1) на концевик 1. Это реализуется либо через интерфейс управления прибором, либо посредством сервисных кнопок, расположенных над боковой крышкой. Первая и вторая кнопки управляют транслятором анализатора поляризации, третья и четвертая — транслятором фазовой пластины. В каждой группе нажатие левой

кнопки вызывает движение транслятора в сторону концевика 0, нажатие правой — в сторону концевика 1 (см. рис. 8).

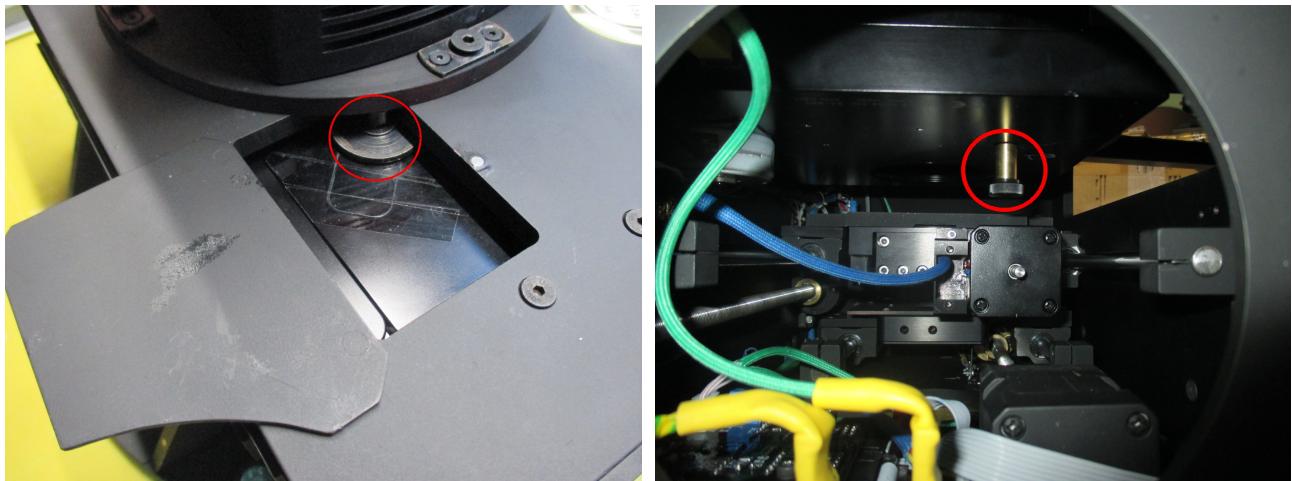


Рис. 9: Расположение винтов, фиксирующих колеса в турелях. Слева – винт верхней турели, справа – нижней.

Фиксирующий винт верхней турели находится под закрепленной посредством магнитов крышке вблизи фланца светоприемника (см. рис. 9 слева). Чтобы не потерять крышку во время замены колеса верхней турели, рекомендуется закрепить ее так, как указано на рисунке. Вращением отмеченной на рисунке шайбы можно ослабить или затянуть фиксатор колеса верхней турели.

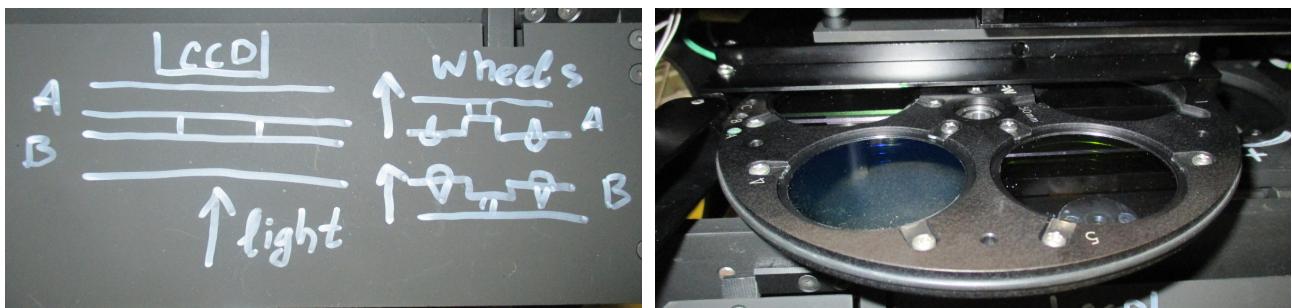


Рис. 10: Схема расположения колес в турелях (слева) и частично извлеченное из нижней турели колесо с фильтрами.

На внутренней поверхности крышки лицевой панели прибора нанесена схема расположения колес в турелях по отношению к падающему свету (см. рис. 10). Колеса располагаются встречно друг к другу. Следует размещать колеса в соответствии со схемой в случае, когда установленные фильтры имеют рабочее направление. В колесе нижней турели (т.е. первой со стороны фланца прибора) свет падает **на заднюю поверхность** колеса (противоположную маркировке и крепежу фильтров). В колесе же верхней турели свет падает **на переднюю поверхность** колеса.

Расположение фильтров в колесе должно быть указано в соответствующем конфигурационном файле интерфейса системы управления прибором (см. стр. 12).

После окончания замены колес турели находятся в неинициализированном состоянии. Для их инициализации необходимо выполнить одну из процедур: либо проводить замену

с отключенным питанием контроллера (в этом случае инициализация турелей произойдет автоматически, однако, необходимо будет выполнить инициализацию подвижных элементов MMPP), либо при помощи интерфейса системы управления или утилиты `HSFW_manage` установить оба колеса в положение «home».

## 6.2 Методика установки нуль-пунктов

Для установки нуль-пунктов линейных трансляторов используются вспомогательные рамки с натянутыми на них нитяными крестами (см. рис. 11). Рамки устанавливаются вместо оптических узлов: фазовой пластины, анализатора поляризации и двух фильтров. Контрольный выходной крест натягивается также на фланец ПЗС-светоприемника. Для контрольной засветки оптического тракта используется крестообразный лазерный осветитель, устанавливаемый на специальном фланце во входном окне прибора. Регулировочными винтами необходимо добиться совмещения центра изображения креста осветителя с центром нитяного креста на фланце ПЗС. Дальнейшая юстировка производится визуально, либо при помощи вспомогательной видеокамеры с объективом-трансфокатором.

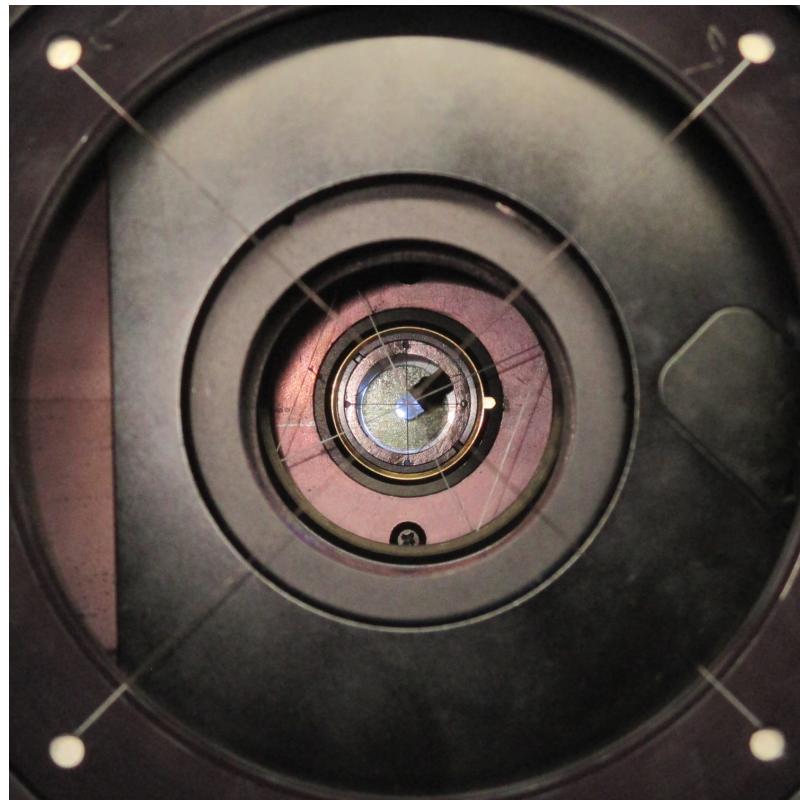


Рис. 11: Вспомогательные юстировочные рамки.

Юстировка турелей фильтров производится следующим образом. При помощи интерфейса системы управления либо утилиты `HSFW_manage` в обеих турелях выставляются позиции с нитяными крестами. Далее путем регулировки трех фиксирующих винтов турель центруется относительно удерживающего цилиндра. После центровки турелей оба колеса необходимо установить в положение «hole», чтобы освободить оптический тракт для установки нуль-пунктов линейных трансляторов.

Для определения нуль-пунктов трансляторов можно использовать кнопки на боковой панели прибора, при помощи которых необходимо грубо совместить перекрестье нити в соответствующем оптическом узле с изображением креста осветителя. Точное совмещение выполняется при помощи интерфейса системы управления или утилиты MMPP\_control. По данным MMPP\_control определяются положения нуль-пунктов (см. листинг 2) транслятора анализатора поляризации (Pol: M0POS) и фазовой пластины (L/4: M0POS).

Листинг 2: (MMPP\_control -s)

```
Pol: MOST MOLEFT M0POS - M1ST M1LEFT M1POS || L/4: MOST MOLEFT M0POS ↵
    ↵ - M1ST M1LEFT M1POS
Pol: STOP      0   16400 - STOP      0       0 || L/4: STOP      0   11400 ↵
    ↵ - STOP      0       0
ESW00 ESW01 ESW10 ESW11 || ESW00 ESW01 ESW10 ESW11
RLSD  RLSD  HALL  RLSD || RLSD  RLSD  HALL  RLSD
```

Для определения положений нуль-пунктов анализатора поляризации и четвертьволновой пластины необходимо использовать дополнительное оборудование (см. рис. 12): осветитель, оснащенный поляризатором с известным направлением поляризации, а также формирователь круговой поляризации с известным направлением вращения (поляризатор и четвертьволновая пластина). Возможно также определение нуль-пунктов поляризационной оптики при помощи наблюдения стандартов с линейной и круговой поляризацией.

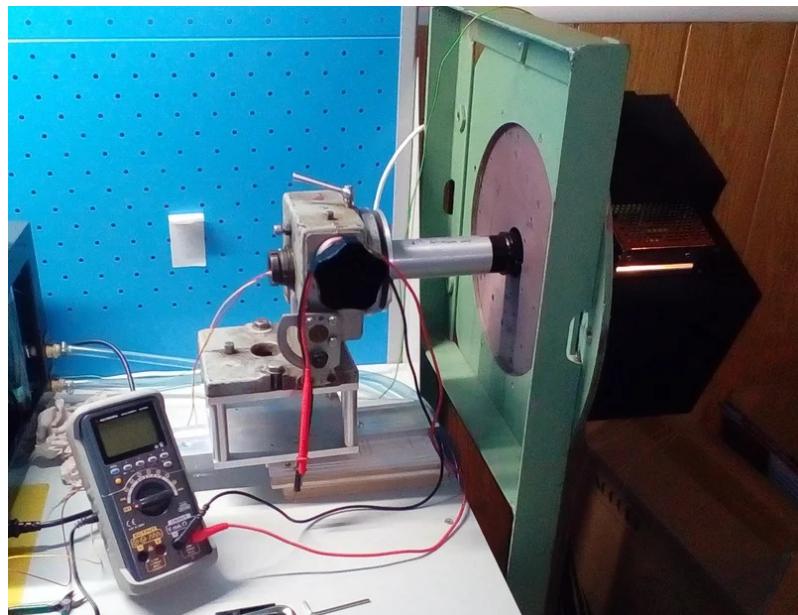


Рис. 12: Осветитель для калибровки нуль-пунктов поляризационной моды.

Определение нуль-пункта анализатора поляризации производится при помощи вспомогательного поляроида, осветителя с объективом и светоприемника (при достаточной яркости осветителя в качестве светоприемника возможно использовать фотодиод). Получить поляризованный в данной плоскости свет можно при помощи куска поляризующей пленки из жидкокристаллических мониторов. Юстировка плоскости поляризатора производится при помощи поляризационной стопы, поляризационной призмы (например, призмы Грана) или поляризатора с известным направлением плоскости поляризации.

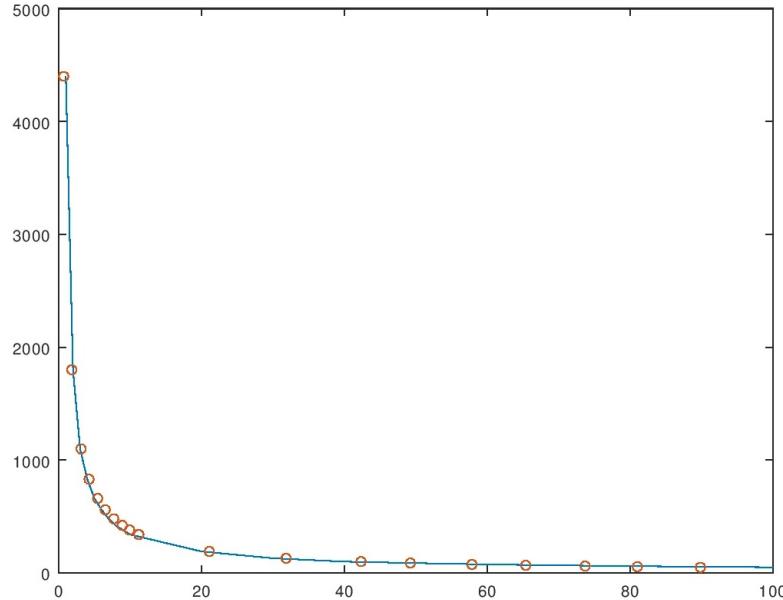


Рис. 13: Пример графика зависимости сопротивления фотодиода от интенсивности освещения. Окружностями отмечены измеренные данные, линией – степенная аппроксимация.

После юстировки осветителя необходимо осветить им оптический тракт прибора и сфокусировать на светоприемнике. Далее требуется линеаризовать показания светоприемника. Это можно сделать, изменяя степень заполнения ШИМ источника питания осветителя (осветителем может выступать светодиод, для минимизации влияния импульсного характера осветителя на точность измерений рекомендуется задавать максимальную частоту ШИМ, от 100 кГц и выше). В случае использования фотодиода освещенность хорошо аппроксимируется функцией  $I = a \cdot \exp(b - \ln R)$  (см. рис. 13). Далее строится зависимость освещенности светоприемника от угла вращения и по аппроксимации параболой областей вблизи минимумов освещенности определяется положение скрещенных поляризатора и анализатора, откуда можно определить положение нуль-пункта поляризации.

После определения нуль-пункта анализатора он выставляется в положение 90° по отношению к осветителю, и в пучок вводится фазовая пластина. Измеряя интенсивность прошедшего света в зависимости от угла вращения четвертьвольновой пластины определяются положения плоскостей ее экстремальных скоростей. Точные значения углов определяются аналогично — из аппроксимации участков вблизи минимумов освещенности. Определить, какая из плоскостей соответствует максимальной фазовой скорости, можно при помощи источника циркулярно поляризованного света с известным направлением вращения плоскости поляризации.

### 6.3 Порядок сборки и замены узлов прибора

В случае замены блока питания прибора проверить наличие внутреннего соединения корпуса и минусовой шины. Если сопротивление между ними превышает несколько сотен килоом, соединить минусовую шину и корпус резистором мощностью 0.25 Вт и сопротивлением 220 кОм.

Подключение проводов UART: Rx/Tx преобразователя UART-USB к Tx/Rx контроллеров; дополнительно можно установить сильную (около 4.7 кОм) подтяжку между +3.3 В и Rx преобразователя.

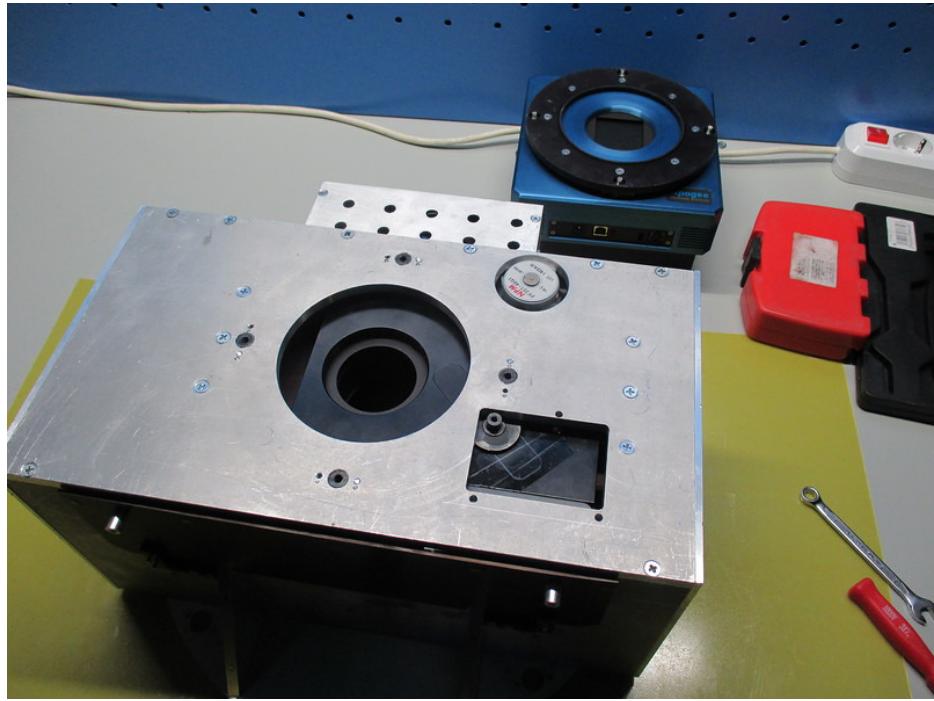


Рис. 14: Фотометр со снятым фланцем светоприемника.

Порядок разборки прибора следующий (соответственно, порядок сборки — обратный).

**1.** Снять фланец светоприемника (см. рис. 14).

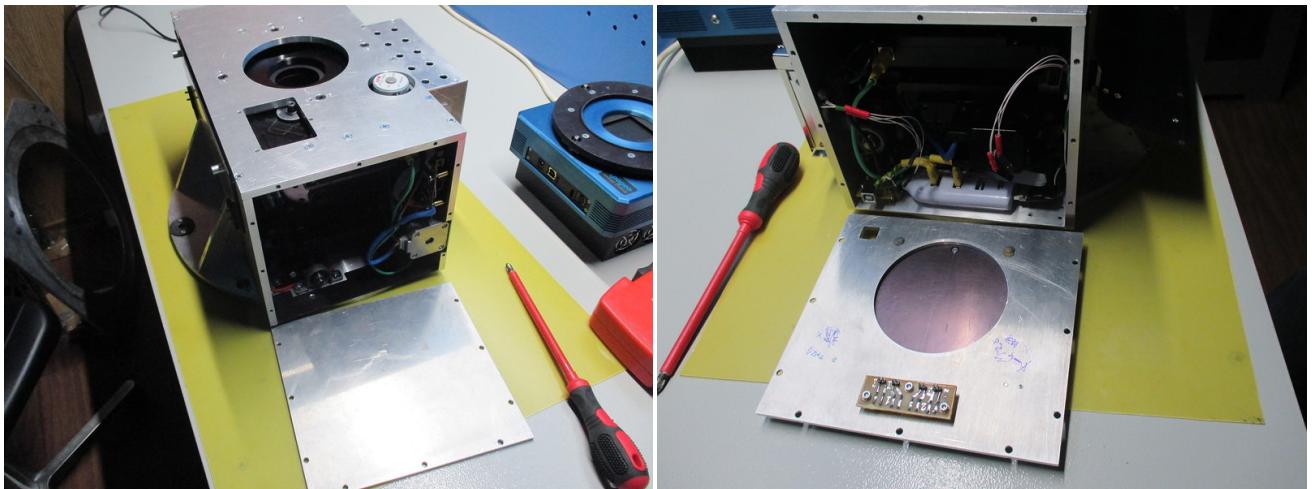


Рис. 15: Боковые крышки сняты.

**2.** Снять боковые крышки (см. рис. 15). Во время съема левой крышки (с боковым люком) отключить провода управления линейными трансляторами от панели с кнопками.

**3.** Отсоединить проводники USB и питания турелей, снять верхнюю плиту ММРР, на которой размещен узел крепления турелей (см. рис. 16).

**4.** Открутить шесть винтов, крепящих панель турелей к верхней плате фотометра. При сборке удостовериться, что находящееся вблизи прямоугольного окна резьбовое соединение крепления фланца светоприемника соответствует изображенному на рис. 17 слева (у данного экземпляра подрезана сторона вблизи винта фиксации колеса верхней турели).

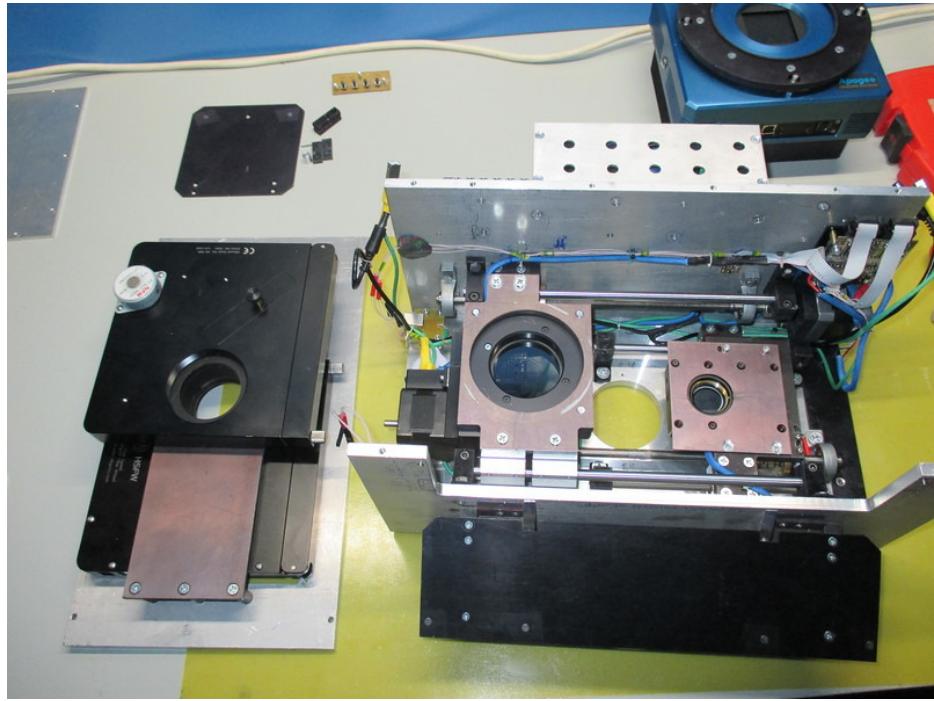


Рис. 16: Отделена панель с креплением турелей.

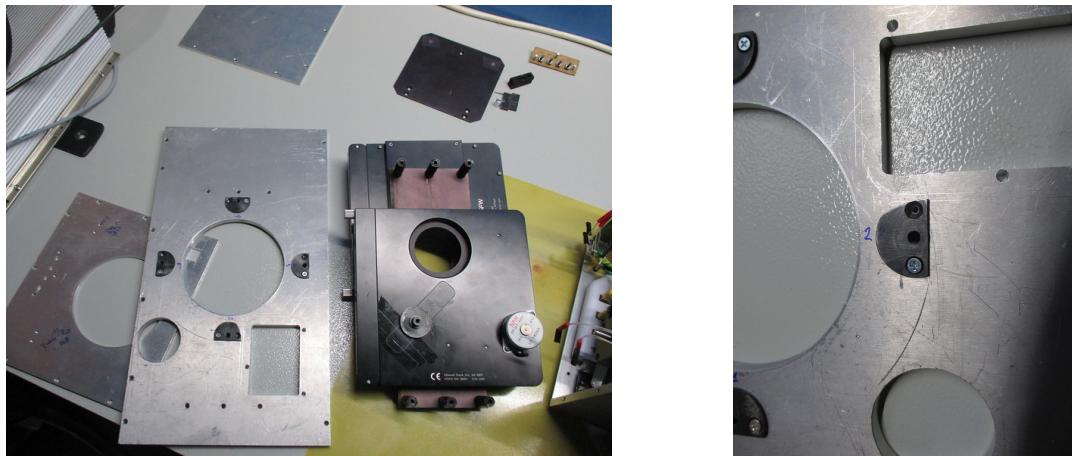


Рис. 17: Снятие панели крепления турелей.

**5.** При помощи шестигранника на тонкой длинной рукоятке (либо длинной плоской отвертки) ослабить винты, фиксирующие турели на центрующем кольце (рис. 18 слева). Снять с кольца турели, вынуть кольцо из панели турелей и открутить от панели крепежные стойки.

**6.** Отсоединить от задней стенки фотометра электрическую проводку (см. рис. 19).

**7.** Отключить от контроллера анализатора поляризации шлейфы двигателей ротатора и линейного транслятора. Раскрутить винты, крепящие платформу анализатора поляризации к линейному транслятору (рис. 20 слева). Отделить ротатор анализатора поляризации от платформы. На задней стороне ротатора раскрутить винты, удерживающие накладку поляроида. Извлечь поляроид.

**8.** Снять крышки, закрывающие силовые соединения блока питания и крышку с силовым разъемом и тумблером питания. Открутить винты крепления блока питания к корпусу фотометру. Обратить внимание на то, что при сборке указанный на рисунке 21 справа винт

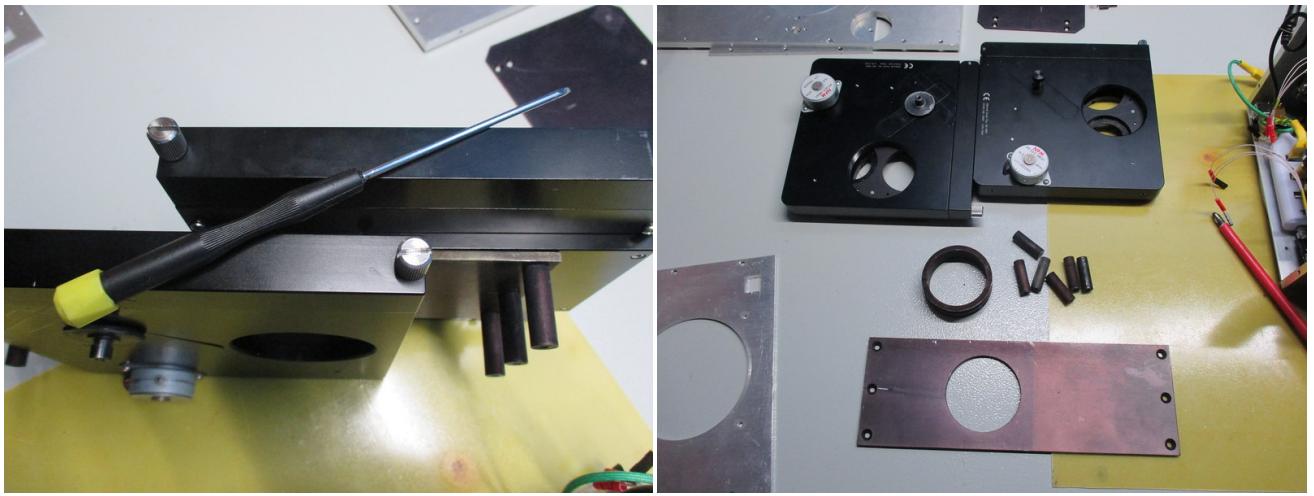


Рис. 18: Отсоединение турелей.

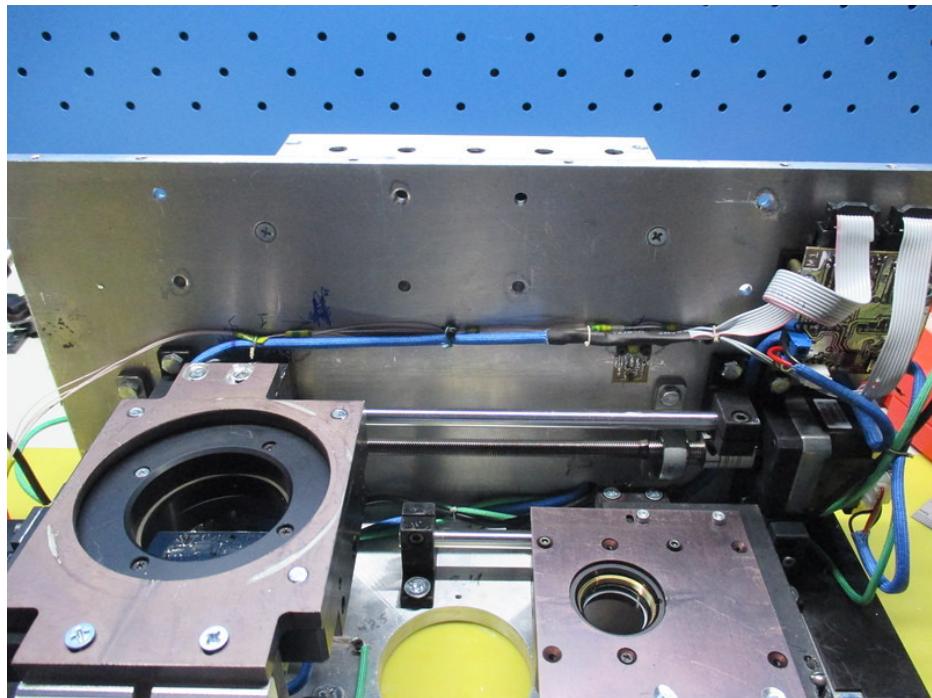


Рис. 19: Проводка, прикрепленная к задней стенке ММРР.

должен быть вкручен до установки блока питания.

**9.** Ослабить винты на клеммнике блока питания. Отсоединить проводку и вынуть блок питания. На рис. 22 справа изображена крышка тумблера и разъема питания. Конфигурация разъема питания следующая: контакт 1 – заземление, 2 – нуль, 3 – фаза. Фазовый контакт посредством плавкого цилиндрического предохранителя на  $0.5 \div 1$  А соединяется с тумблером питания.

**10.** Отсоединить всю доступную проводку. Открутить винты, крепящие боковые накладки к фланцу прибора (см. рис. 23). С левой накладки снять USB-концентратор и входной разъем USB.

**11.** Перевернуть прибор вверх фланцем, открутить все винты крепления стоек, кроме пары для каждой стойки. Оставшиеся винты открутить, сдвинув прибор к краю стола

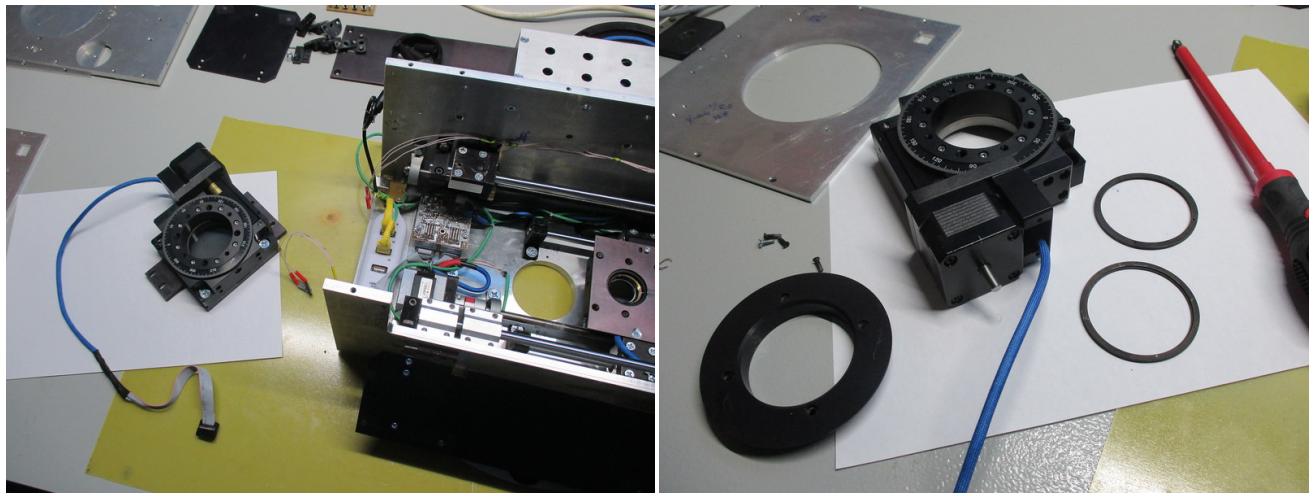


Рис. 20: Отсоединение платформы анализатора поляризации.

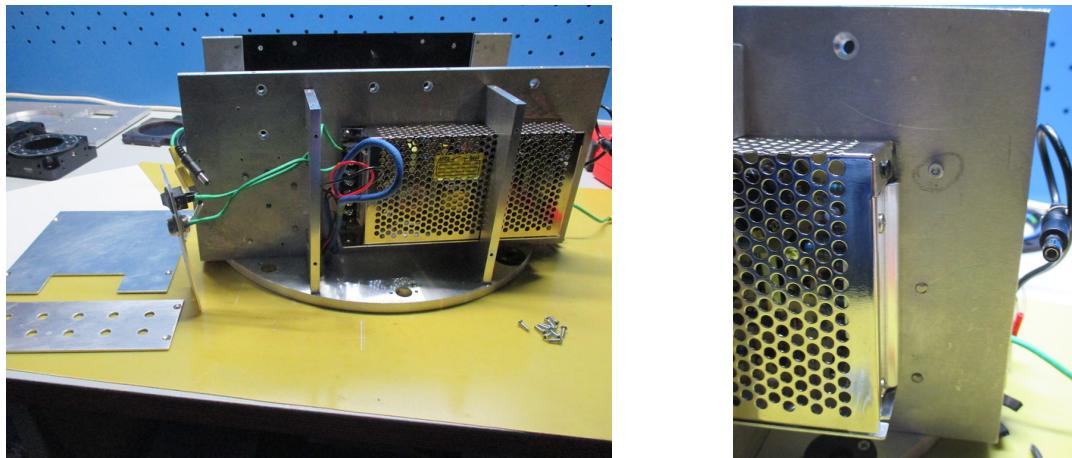


Рис. 21: Снятие крышек блока питания.

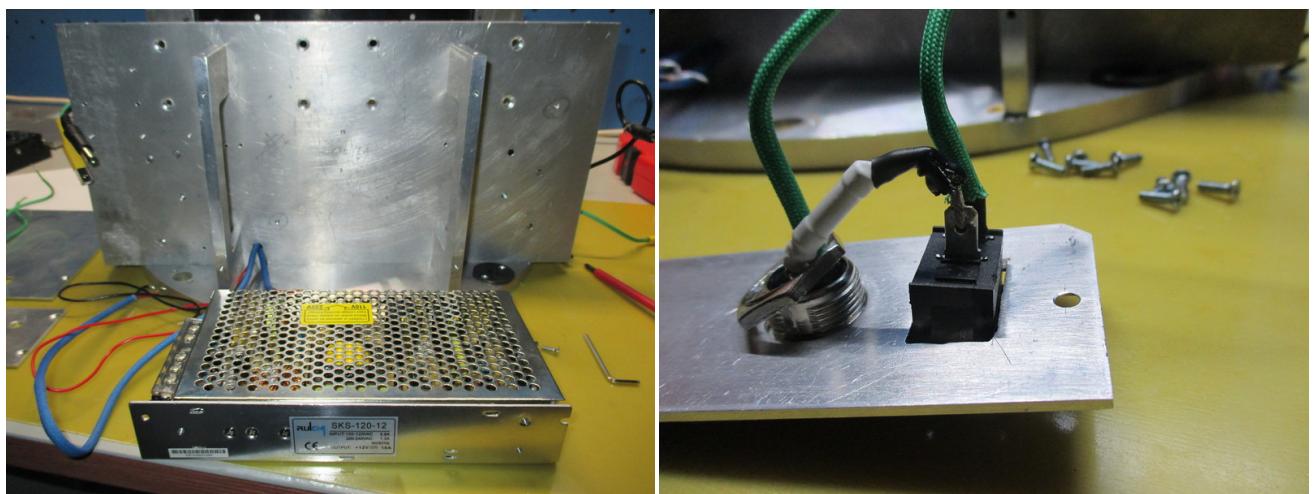


Рис. 22: Отсоединение блока питания и силовых элементов.

(см. рис. 24).

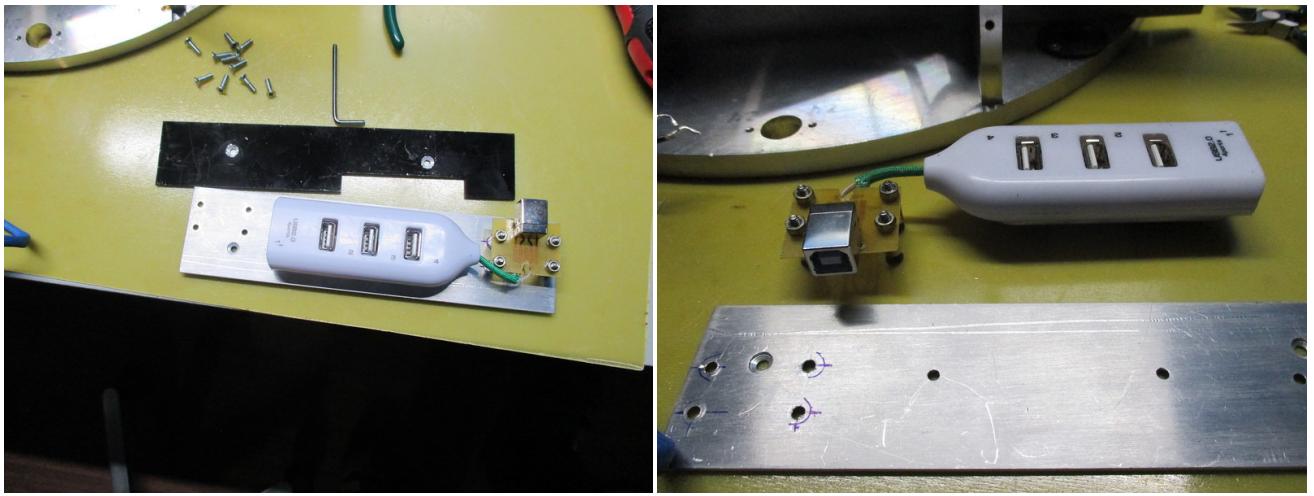


Рис. 23: Снятие боковых накладок и отключение USB-концентратора.

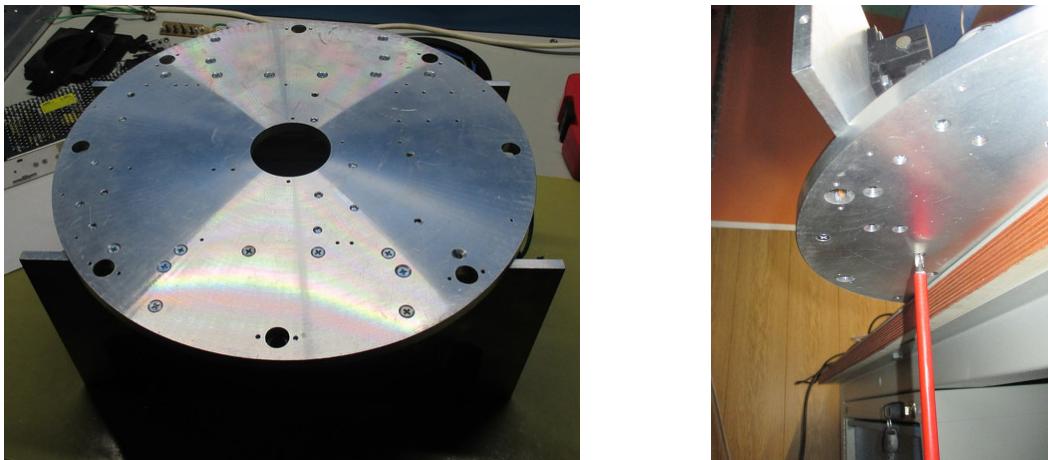


Рис. 24: Снятие стоек с креплением элементов линейного транслятора анализатора поляризации.

**12.** Отсоединить от фланца прибора стойки с элементами линейного транслятора анализатора поляризации и управляющего контроллера (см. рис. 25).

**13.** Отсоединить с фланца прибора всю проводку. Открутить винты, крепящие пластину ротора фазовой пластины к С-образному кронштейну и снять пластину с ротором (см. рис. 26).

**14.** Открутить винты, стягивающие пластину и ротор. Снять ротор фазовой пластины. Открутить фиксатор и извлечь фазовую пластину. Выкрутить винты, крепящие С-образный кронштейн к подшипниковым узлам транслятора и отделить кронштейн (см. рис. 27).

**15.** Снять направляющие линейного транслятора фазовой пластины. Ослабить крепление винта подачи в соединительной муфте шагового двигателя. Снять винтовой узел. Снять шаговый двигатель. Отсоединить от скоб и снять узлы концевиков. Снять с фланца скобы крепления концевиков (см. рис. 28).

**16.** Со стойки с диагональными откосами ребер жесткости снять крышку доступа к турелям. Открутить откосы и элементы транслятора анализатора поляризации (см. рис. 29 слева). Со второй стойки снять цилиндрическую направляющую с узлами ее крепления и отсоединить проводку.

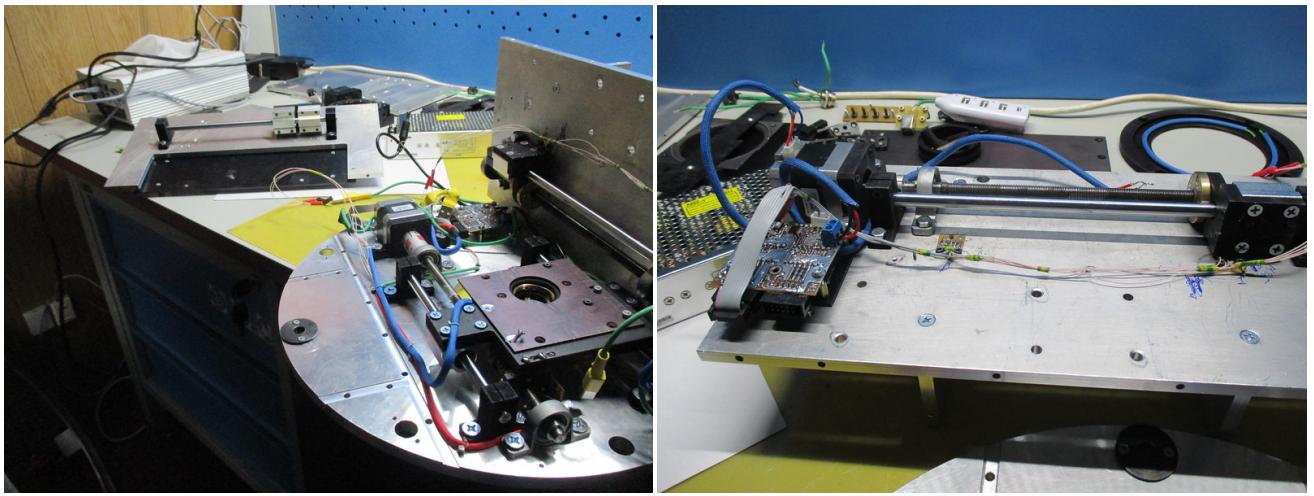


Рис. 25: Отсоединение стоек.

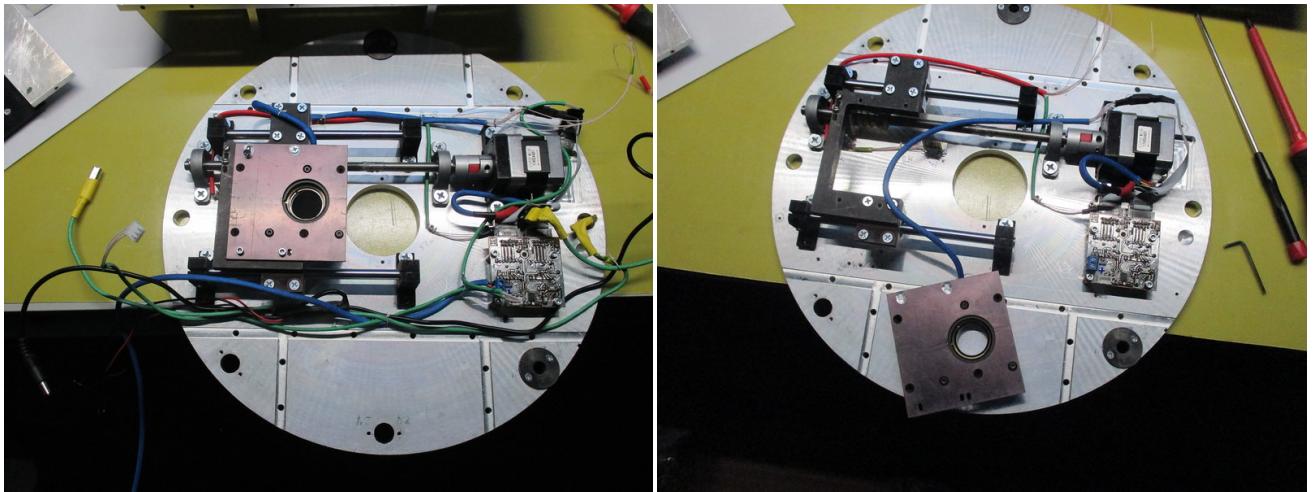


Рис. 26: Снятие ротатора четвертьволновой пластины.

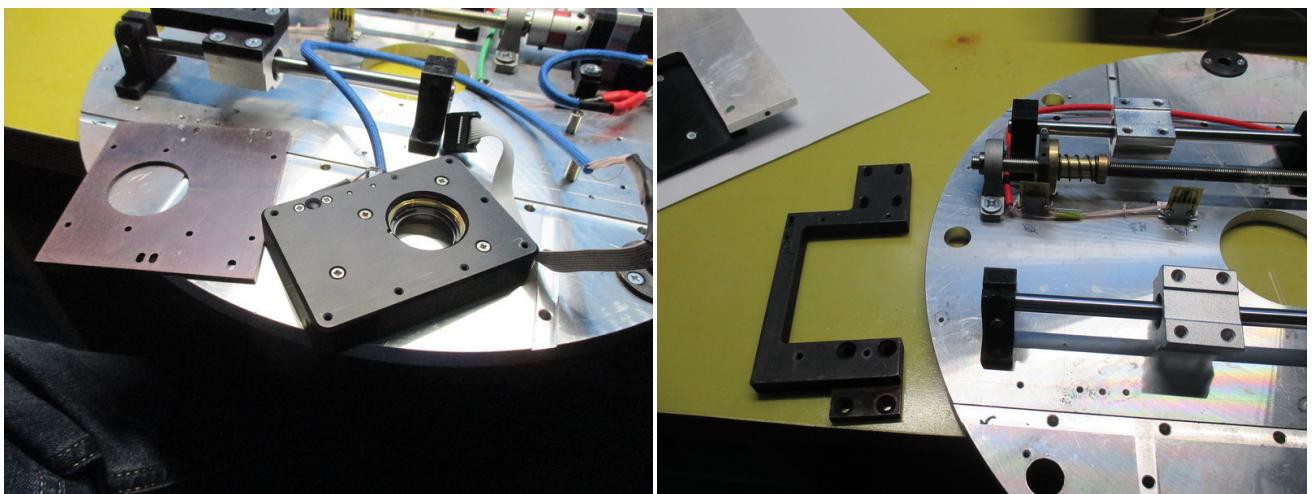


Рис. 27: Отсоединение ротатора от пластины, съем кронштейна.

**17.** Ослабить в муфте шагового двигателя крепление винта подачи. Снять винт с крепле-

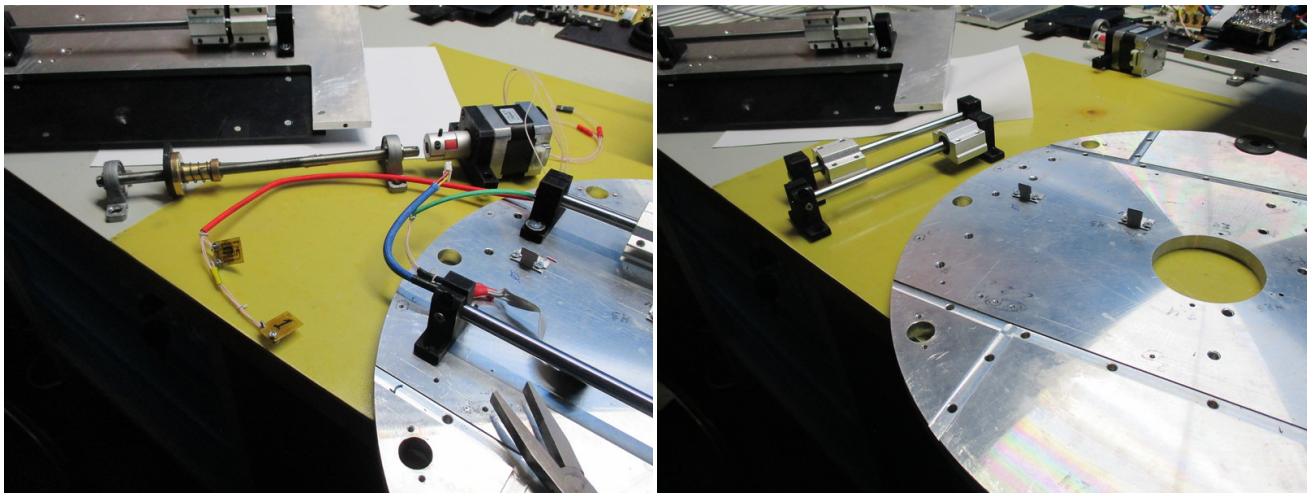


Рис. 28: Освобождение поверхности фланца.

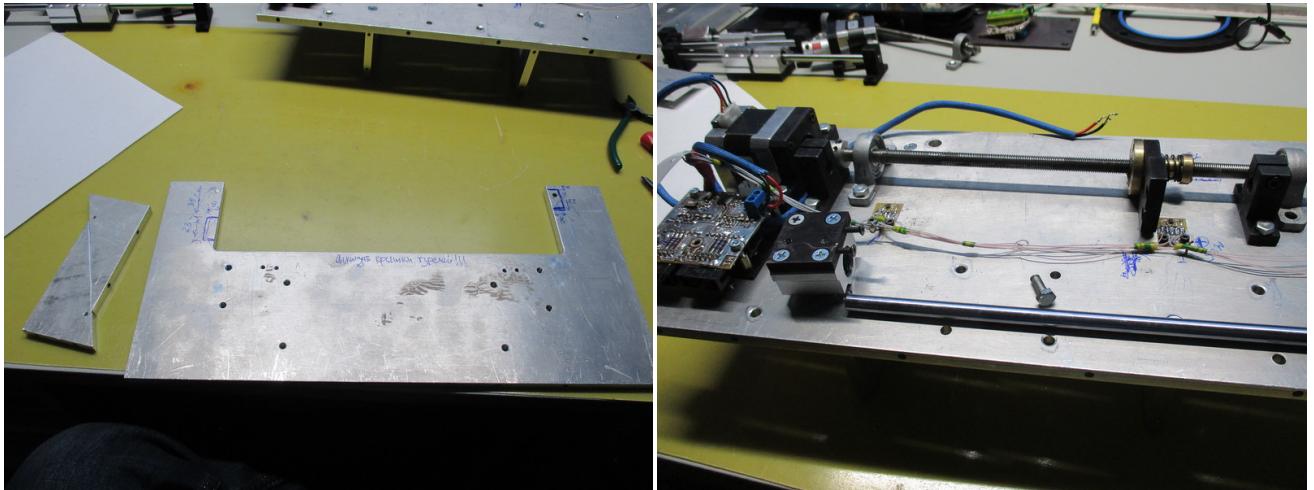


Рис. 29: Разборка узлов линейного транслятора анализатора поляризации.

ниями. Снять контроллер шаговых двигателей и узлы концевиков. Снять шаговый двигатель (см. рис. 30).

**18.** Отсоединить от панели ребра жесткости (см. рис. 31). При необходимости разобрать оставшиеся мелкие узлы прибора.

## 6.4 Система управления линейными трансляторами и поворотными платформами прибора

### 6.4.1 Принципиальная схема

Разработанная на основе микроконтроллера STM32F030F4P6 система управления шаговыми двигателями имеет модульную структуру. Один модуль управляет двумя биполярными шаговыми двигателями (напряжение питания 12 В) с опросом пары аналоговых и пары цифровых (активны при замыкании на нуль) концевиков. На рис. 32 приведена принципиальная схема одного модуля.

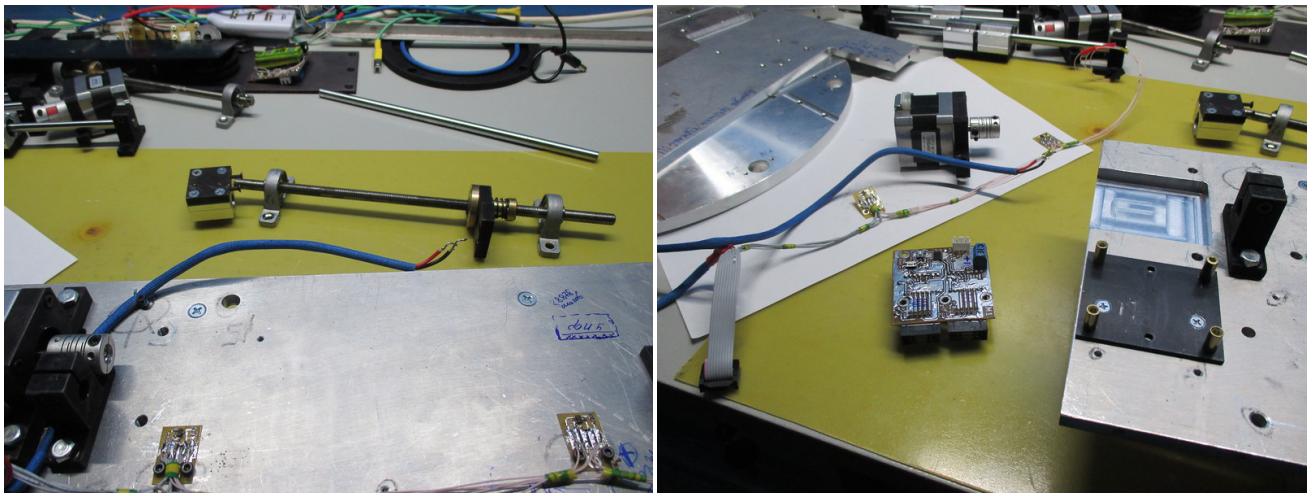


Рис. 30: Разборка узлов линейного транслятора анализатора поляризации.

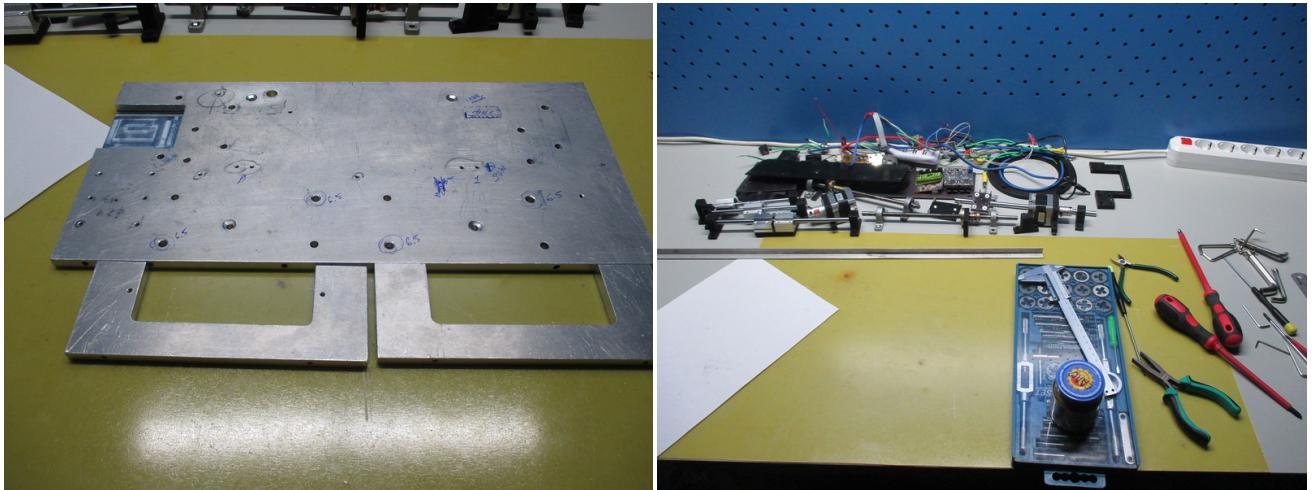


Рис. 31: Прибор в разобранном виде.

Супрессор D1 совместно с резисторами R3 и R4 (допустимо уменьшить при необходимости сопротивление резисторов до  $68 \div 100$  Ом) обеспечивает антистатическую защиту входов микроконтроллера по линии UART.

Кнопки SW1 («reset») и SW2 («boot») обеспечивают выбор режима загрузки микроконтроллера и аппаратный сброс при отладке (для перехода в режим встроенного загрузчика по UART необходимо нажать кнопку «boot», затем, удерживая ее, нажать и отпустить кнопку «reset», после чего отпустить кнопку «boot»; далее при помощи утилиты `stm32flash` или команды `make boot` можно записать файл прошивки во флеш-память микроконтроллера).

Транзистор Q1 на входе цепи питания обеспечивает защиту от переполюсовки (при подаче питания в правильной полярности р-канальный MOSFET находится в открытом состоянии, при переполюсовке он закрыт).

Датчик U2 (MAX471) служит для измерения тока, потребляемого шаговыми двигателями во время работы. Выход датчика является источником тока (500 мА на каждый Ампер измеряемого тока). Резистор R6 выступает в качестве его нагрузки, в результате чего напряжение на выходе RC-фильтра на R7 и C8 изменяется по закону 0.75 В на каждый Ампер измеряемого тока.

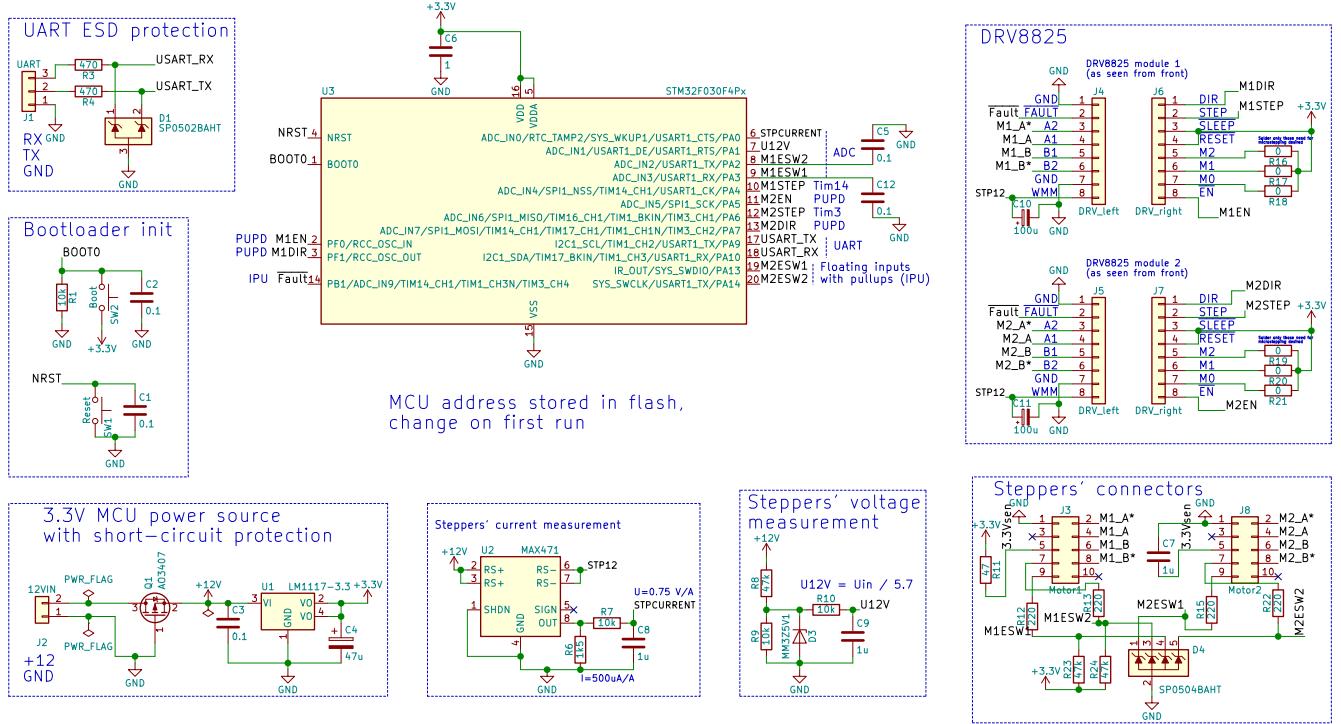


Рис. 32: Принципиальная схема модуля управления шаговыми двигателями.

Делитель на резисторах R8 и R9 позволяет измерять напряжение в цепи питания прибора. Стабилитрон D3 ограничивает напряжение, подаваемое на вход АЦП микроконтроллера, величиной менее 3.5 В. Фильтр на R10 и C9 обеспечивает сглаживание пульсаций и быстрых изменений напряжения. Выходное напряжение примерно в 5.7 раз меньше входного.

Драйверы шаговых двигателей DRV8825 в виде чип-модулей устанавливаются в соответствующие гнезда. Подтяжка контактов модуля M0÷M2 к питанию задает требуемый микрощаговый режим. Конденсаторы C10 и C11 (low ESR, минимум 100 мкФ) обеспечивают сглаживание пульсаций напряжения питания во время работы драйверов.

Разъемы J3 и J8 служат для подключения шаговых двигателей и концевых выключателей. Напряжение питания на датчики Холла для защиты LDO U1 подается через резистор R11. Конденсатор C7 обеспечивает потребление датчика Холла во время переходных процессов. Антистатическая защита выходов концевых выключателей обеспечивается резисторами R12, R13, R15 и R22 и суппрессором. Резисторы R23 и R24 обеспечивают подтяжку к питанию аналоговых концевиков, имеющих три градации: 0, Vdd/2 и Vdd. Таким образом, кнопки управления линейными транзисторами необходимо тоже подтянуть к земле резисторами сопротивлением 47 кОм.

Отдельно назначение каждого вывода микроконтроллера рассмотрено в таблице 1.

#### 6.4.2 Протокол управления

Управление контроллерами производится по шине UART (8N1, скорость задана в конфигурации, по умолчанию 9600 бод). Команды передаются в строковом режиме: признаком окончания команды является символ новой строки. Микроконтроллер не обрабатывает принимаемые данные до формирования валидной строки. Символы пробела или табуляции внутри строки игнорируются. Первым в строке следует номер контроллера (16-битное беззнаковое

Таблица 1: Назначение выводов микроконтроллера. Тип: AIN – аналоговый вход, PUPD – выход push/pull, OD – выход open drain, FIN – плавающий вход, FINPU – вход с подтяжкой к Vdd.

Pin	Тип	Назначение
PA0	AIN	Ток шагового двигателя
PA1	AIN	Напряжение питания (12 В)
PA2	AIN	Концевик 1 двигателя 0
PA3	AIN	Концевик 0 двигателя 0
PA4	PUPD	Такты драйвера двигателя 0 (TIM14_CH1)
PA5	PUPD	Подача питания на двигатель 1
PA6	PUPD	Такты драйвера двигателя 1 (TIM3_CH1)
PA7	PUPD	Направление вращения двигателя 1
PA9	OD	USART1 Tx
PA10	FIN	USART1 Rx
PA13	FINPU	Концевик 0 двигателя 1
PA14	FINPU	Концевик 1 двигателя 1
PB1	PUPD	Управление питанием датчика тока
PF0	PUPD	Подача питания на двигатель 0
PF1	PUPD	Направление вращения двигателя 0

целое). Данный номер сохраняется во флеш памяти МК во время его инициализации. Каждый модуль обрабатывает лишь те команды, которые адресованы ему, либо же имеют широковещательную адресацию (в этом случае в качестве адреса указывается -1). Так как вывод данных микроконтроллером при получении широковещательного идентификатора не блокируется, не рекомендуется использовать широковещательные посылки при наличии более одного устройства на линии связи (кроме посылок экстренного останова, сброса и т.п.).

После идентификатора контроллера следует текст команды и (опционально) ее аргументы. В случае, если команда валидна, контроллер возвращает строку «ALLOK». Если команда не распознана, возвращается маркер ошибки «BADCMD». В случае же ошибок в аргументах команды возвращается маркер ошибки «ERR». Если команда возвращает какую-либо информацию, она следует сразу за маркером «ALLOK». Данные, занимающие более одной строки текста, завершаются маркером «DATAEND». Если команда лишь требует выполнения определенного действия, маркер «ALLOK» возвращается после установления возможности выполнения данного действия. В силу синхронного характера интерфейса связи, команды, требующие длительного времени на исполнение (например, перемещение объекта) не выводят в случае ошибки или достижения заданного положения никаких данных, процесс их исполнения необходимо контролировать периодическим запросом состояния модуля.

Первым символом в строке команды должен быть один из следующих:

- (ничего) команда «ping», в ответ на которую устройство выдает сообщение «ALIVE»;
- G** команда-геттер;
- M** работа с двигателями;
- R** программная перезагрузка микроконтроллера (первый после перезагрузки геттер «status» вернет значение «SOFTRESET=1»);

**S** команда-сеттер;

**W** команда записи во флеш-память значений конфигурации из оперативной памяти.

Программная перезагрузка контроллера может использоваться для повторной инициализации счетчиков положения двигателей (по опорным концевикам нуль-пунктов). Команду записи данных во флеш-память необходимо вызывать после изменения конфигурации параметров контроллера и проверки геттером «configuration» их значения (за исключением скорости интерфейса UART все изменения конфигурационных данных сразу отражаются на поведении контроллера).

**Команды-геттеры.** Данные команды предназначены для вывода в терминал определенной информации. Данные выводятся сразу за маркером «ALL OK». В случае, если они занимают лишь одну строку (возвращается только один параметр), маркер конца данных не выводится, при выводе же более одного параметра конец вывода обозначается маркером «DATAEND».

**A** запрос результатов измерения АЦП:

**D** значение  $V_{dd} \cdot 100$  В, например, VDD=330 ( $V_{dd} = 3.3$  В);

**I** потребляемый обоими моторами ток  $I \cdot 100$  А, например, IMOT=70 ( $I = 0.7$  А);

**M** напряжение питания  $U \cdot 100$  В, например, VMOT=1193 ( $U = 11.93$  В);

**C** получение текущих значений параметров конфигурации, например,

```
CONFSZ=36
DEVID=2
V12NUM=605
V12DEN=94
I12NUM=3
I12DEN=4
V33NUM=1
V33DEN=1
ESWTHR=500
MOTOSPD=3
MOT1SPD=2
MAXSTEPS0=50000
MAXSTEPS1=50000
USARTSPD=9600
INTPULLUP=1
REVERSE0=0
REVERSE1=1
USTEPS=16
ACCDECSTEPS=50
DATAEND
```

**R** получение «сырых» данных с АЦП:

- 0** ток ШД;
- 1** напряжение 12 В;
- 2** концевик 1 двигателя 0;
- 3** концевик 0 двигателя 0;
- 4** внутренняя температура;
- 5** Vdd.

например,

```
ADC[0]=189
ADC[1]=2317
ADC[2]=4088
ADC[3]=4090
ADC[4]=1703
ADC[5]=1525
DATAEND
```

- S** состояние двигателей (возвращает описанные ниже переменные MOTORx, ESWxy, POSx и STEPSLEFTx).
- T** условная температура микроконтроллера, например, TEMP=365.

**Геттеры состояния.** В переменных MOTORx (x — номер двигателя, 0 или 1) хранится текущее состояние конечного автомата шаговых двигателей. Ее значение может быть одним из следующих:

- |                 |  |
|-----------------|--|
| <b>ACCEL</b>    | состояние разгона — начало движения;   |
| <b>DECEL</b>    | состояние торможения — окончание движения;   |
| <b>MOVE</b>     | движение с постоянной скоростью;   |
| <b>MOVETO0</b>  | бесконечное движение до достижения концевика 0;  |
| <b>MOVETO1</b>  | бесконечное движение до достижения концевика 1;  |
| <b>MVSLOW</b>   | движение с наименьшей постоянной скоростью (в случае перемещения на малое количество шагов); |
| <b>SLEEP</b>    | ожидание команд, движение отсутствует;   |
| <b>STOP</b>     | окончание движения (по запросу);   |
| <b>STOPZERO</b> | окончание движения с обнулением положения;   |
| <b>UNKNOWN</b>  | неизвестное состояние — ошибка.  |

Переменные ESWxy, где у — номер концевика (0 или 1), x — номер двигателя (0 или 1) отражают состояние концевых выключателей и кнопок.

**BTN** (только для концевиков двигателя 0) нажата кнопка;

**ERR** (только для концевиков двигателя 0) уровень вне допустимых диапазонов;

**HALL** активен датчик Холла (логический 0);

**RLSD** концевик неактивен (логическая 1).

Текущее положение (в шагах) двигателя характеризуется переменной **POSx** (**x** – номер мотора, 0 или 1). Если ее значение отрицательно, требуется инициализация данного двигателя (движение до концевика 0).

Во время движения геттер состояния возвращает также значение переменной **STEPSLEFTx** — оставшееся количество шагов.

В случае, если до вызова геттера состояния контроллера произошел его сброс (программный сброс, инициированный пользователем, либо сброс, инициированный watchdog'ом), геттер вернет дополнительно одну из двух переменных: **SOFTREST=1** или **WDGRESET=1**.

Внимание! После вызова данного геттера переменные не завершаются маркером «DATAEND»!  
Пример:

```
SOFTREST=1
MOTOR0=SLEEP
POS0=-1
ESW00=ERR
ESW01=BTN
MOTOR1=SLEEP
POS1=-1
ESW10=HALL
ESW11=HALL
```

**Команды работы с двигателями.** Следующим символом после этой команды должен быть номер двигателя (0 или 1), в случае ошибки будет возвращен ответ **Num>1**. В данной группе всего две команды:

**Mnum** перемещение двигателя на **num** (положительное или отрицательное целое) шагов, в случае ошибки возможны следующие варианты ответа:

**BadSteps** **num** не является числом;

**IsMoving** двигатель находится в состоянии движения;

**OnEndSwitch** двигатель находится на концевике, запрещающем движение в заданном направлении;

**ZeroMove** **num** равно нулю;

**TooBigNumber** значение **num** превышает системное **MAXSTEPSx**;

**S** остановить двигатель.

**Команды-сеттеры.** При нормальном завершении команда-сеттер изменяет значение соответствующей переменной в оперативной памяти и (за исключением скорости интерфейса UART) данные изменения сразу же отражаются на поведении контроллера. Для постоянно сохранения изменений во флеш-памяти МК необходимо дать команду записи во флеш-память после всех проведенных изменений и их проверки.

**A num** установка количества шагов (ACCDECSTEPS), в течение которого движение будет производиться с ускорением (на старте) или замедлением (на финише); в случае, если требуется переместить двигатель на меньшее количество шагов, движение будет производиться с минимальной скоростью (равной произведению MOTxSPD на значение макроса LOWEST\_SPEED\_DIV);

**C#num** изменение значения текущей скорости двигателя с номером # на num (данное изменение действует лишь до окончания движения двигателя);

**Dvnum** установка знаменателя (denominator, xxxDEN) величины v (D, I или M – в соответствии с геттером значения измерений АЦП) в num;

**Evnum** установка числителя (numerator, xxxNUM) (аналогично Dvnum);

**I num** изменение значения идентификатора (DEVID, целое число) контроллера;

**M#num** установка максимального диапазона (MAXSTEPS#, num от 1 до 65535) шагового двигателя #;

**P num** (INTPULLUP) включение (num равно нулю) или отключение (num отсутствует или любое, кроме нуля) внутренней подтяжки на UART Tx;

**R#num** (REVERSE#) реверсивное движение двигателя # (num равное нулю отключает реверс), в режиме реверса меняется только направление вращения двигателя, но не обрабатываемые концевики;

**S#num** изменение значения максимальной скорости (MOT#SPD) двигателя с номером # на num (максимальная скорость устанавливается после окончания движения с ускорением и не зависит от текущей скорости, C#num);

**T num** изменение пороговых величин (ESWTHR, num в ADU) для градации состояний концевика двигателя 0 (0..num – датчик Холла, 2048+num..2048+num – пользовательская кнопка, 4096+num..4095 – свободное состояние);

**U num** изменение скорости UART (USARTSPD);

**u num** установка количества микрошагов (USTEPS) в одном шаге; это число должно быть степенью двойки (до 32 включительно).

**Сеттеры скорости двигателей.** Для установки значения скорости в N шагов в секунду, используются сеттеры С или S. Их аргумент имеет значение  $3000/N$ . Например, чтобы дать команду контроллеру с идентификатором «0» изменить текущую скорость вращения двигателя 0 на 50 шагов в секунду, необходимо передать команду **OSC060** (0 – номер контроллера, S – сеттер, С – текущая скорость, 0 – двигатель 0,  $60 = 3000/50$ ).

**Сеттеры числителя и знаменателя.** Сеттеры **Dxnum** (знаменатель) и **Exnum** (числитель) устанавливают величины соответствующих аппроксимаций к коэффициентам перевода измеренных АЦП величин из ADU в физические величины. Следует учитывать, что при расчетах используется беззнаковая целочисленная 32-битная математика, поэтому во избежание переполнения не следует задавать слишком большие величины. В качестве параметра **x** используется мнемоника из соответствующего геттера (**D** – Vdd, **I** – потребляемый ток, **M** – напряжение питания). Для преобразования числа с плавающей точкой в несократимую арифметическую дробь можно использовать функцию Octave **rat()**. Например, для преобразования коэффициента 1.23 в несократимую дробь с точностью 0.1:

```
[N D] = rat(1.23, 0.01)
N = 16
D = 13
```

Полученное приближение  $16/13 = 1.2308$  лежит в заданных точностных рамках.

**Сеттер идентификатора устройства.** Сразу после получения нового идентификатора, устройство перестает откликаться на команды со старым идентификатором. Поэтому в случае проблем (устройство «потеряно») необходимо произвести перезагрузку устройства кратковременным нажатием на кнопку «reset» или кратковременным отключением питания. Если же устройство является единственным на линии связи, можно обратиться к нему по «широковещательному» идентификатору «-1».

#### 6.4.3 Состояние устройства и базовые настройки

Состояние устройства в **MMPP\_control** отображается четырьмя строками, например:

```
Pol: MOST MOLEFT M0POS - M1ST M1LEFT M1POS || L/4: MOST MOLEFT M0POS ↵
      ↵ - M1ST M1LEFT M1POS
Pol: STOP      0 16400 - STOP      0      0 || L/4: STOP      0 11400 ↵
      ↵ - STOP      0      0
ESW00 ESW01 ESW10 ESW11 || ESW00 ESW01 ESW10 ESW11
RLSD  RLSD  HALL  RLSD || RLSD  RLSD  HALL  RLSD
```

Нечетные строки — название полей в четных строках. Две вертикальные линии разделяют поля первого и второго контроллера (в первой группе они имеют соответствующие пометки: «**Pol**» и «**L/4**»).

**MxST** — состояние двигателей 0 и 1;

**MxLEFT** — количество оставшихся шагов;

**MxPOS** — текущее положение двигателей;

**ESWxy** — состояние концевика **y** двигателя **x**.

Значение полей описано в пункте «Геттеры состояния» на стр. 30.

В «тихом» режиме, задаваемом флагом **-q**, состояние устройства отображается как перечень параметров и их значений. Например,

```

POLMOTOR0=MOVE
POLSTEPSLEFT0=742
POLPOS0=4558
POLESW00=RLSD
POLESW01=RLSD
POLMOTOR1=MOVE
POLSTEPSLEFT1=7289
POLPOS1=32411
POLESW10=RLSD
POLESW11=RLSD
L4MOTOR0=MOVE
L4STEPSLEFT0=642
L4POS0=4358
L4ESW00=RLSD
L4ESW01=RLSD
L4MOTOR1=MOVE
L4STEPSLEFT1=1542
L4POS1=6458
L4ESW10=RLSD
L4ESW11=RLSD

```

Т.е. в данном случае просто копируются значения всех переменных, выдаваемых контроллерами по запросу текущего состояния, с добавлением префикса POL для контроллера полярода и L4 для контроллера фазовой пластины.

**Базовые настройки.** Параметры текущей конфигурации контроллера можно получить при помощи геттера конфигурации. Например,

Листинг 3: Базовые настройки контроллеров

```

./MMPP_control -a 1GC
Send raw string: 1GC
Receive: CONFSZ=36
DEVID=1
V12NUM=605
V12DEN=94
I12NUM=3
I12DEN=4
V33NUM=1
V33DEN=1
ESWTHR=500
MOTOSPD=3
MOT1SPD=5
MAXSTEPS0=50000
MAXSTEPS1=50000
USARTSPD=9600
INTPULLUP=1
REVERSE0=1
REVERSE1=0
USTEPS=16
ACCDECSTEPS=50

```

```

DATAEND

./MMPP_control -a 2GC
Send raw string: 2GC
Receive: CONFSZ=36
DEVID=2
V12NUM=605
V12DEN=94
I12NUM=3
I12DEN=4
V33NUM=1
V33DEN=1
ESWTHR=500
MOTOSPD=3
MOT1SPD=2
MAXSTEPS0=50000
MAXSTEPS1=50000
USARTSPD=9600
INTPULLUP=1
REVERSE0=0
REVERSE1=1
USTEPS=16
ACCDECSTEPS=50
DATAEND

```

В случае замены контроллера необходимо записать в новый чип конфигурацию, соответствующую заменяемому. Важными параметрами являются DEVID (идентификатор устройства), ESWTHR (порог реакции на изменение уровня на концевиках двигателя 0, MOTxSPD (предельные скорости соответствующих двигателей), MAXSTEPSx (максимальное количество шагов данного двигателя), INTPULLUP (при отсутствии внешней подтяжки шины Tx контроллеров отключенная подтяжка приведет к неработоспособности), USARTSPD (скорость шины UART), REVERSEx (направление вращения двигателя) и ACCDECSTEPS (количество шагов для ускорения/замедления движения).

**Значения предельных токов DRV8825.** Предельные токи определяются по уровню напряжения на подстроечных резисторах DRV8825. Анализатор поляризации: M0 (подвижка) 0.5 В, M1 (ротор) 3.1 В. Фазовая пластина: M0 (подвижка) 0.9 В, M1 (ротор) 0.25 В.

## 6.5 Описание интерфейса СУ ММРР

### 6.5.1 Подключение к управляющему ММРР компьютеру zphot

1. Подготовка к наблюдениям на ММРР проводится аналогично работе со старым ПЗС-фотометром Цейсс-1000.
2. Для запуска интерфейса системы управления ММРР при работе из среды windows необходимо активировать ssh-соединение при помощи putty (рис. 33).
3. В открывшемся окне „Putty Configuration“ в правом нижнем поле „Saved Session“ выбрать машину zphot, либо выделить одиночным щелчком и нажать кнопку „Open“.
4. В открывшемся окне терминала авторизоваться на Linux-машине zphot.

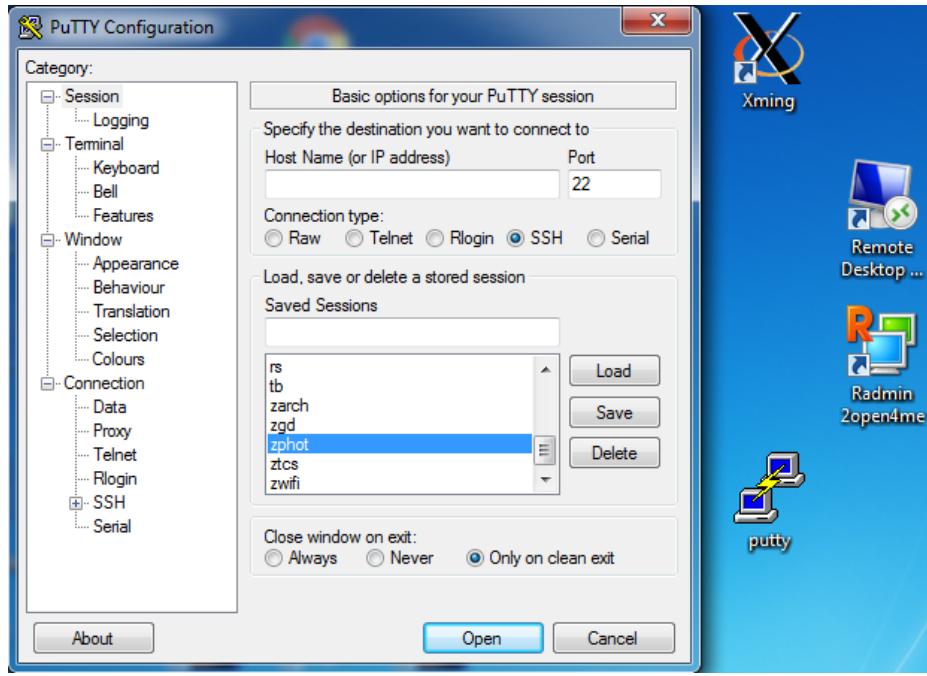


Рис. 33: Иконка Putty и окно выбора подключения к удалённой машине zphot.

5. Если наблюдатель работает из системы Linux, выполните ssh-соединение из эмулятора терминала в X-сессии:

```
$ ssh -Y username@zphot.sao.ru
```

6. Запустить оболочку управления MMPP:

```
$ cd ~/MMPP_config  
$ ZPhot &
```

Или: ZPhot -c ~/MMPP\_config/Zphot.ini.

### 6.5.2 Получение изображений и работа в фотометрическом режиме MMPP

1. **Работа в ZPhot.** В открывшемся окне оболочки MMPP observer's interface выбрать в выпадающем календаре дату начала ночи Date Obs, проверить, что путь к директории в поле „Directory“ оканчивается выбранной ночью, и нажать „Start Night“ (рис. ??).
2. Заполнить диалог выбора наблюдательных программ, вызвав его в поле „Program“ кнопкой „Edit“ (рис. 34): ввести названия и авторов программ и наблюдателей, нажать кнопку „Ok“; выбрать программу из только что сохранённого выпадающего списка.
3. Начиная с левого верхнего угла окна выбрать параметры будущего кадра.

**В поле „Exposure Control“ выбираются:**

- тип кадра (obj, flat, bias, dark, ...);
- время экспозиции в секундах, „Exp. time“;
- количество кадров в серии, „N. exp.“;
- квант преобразования, Gain (HIGH, LOW);
- скорость считывания, Rate (FAST, SLOW);
- включается и настраивается режим бинирования матрицы (BinX, BinY).

**В „Date Obs.“ выбираются:**

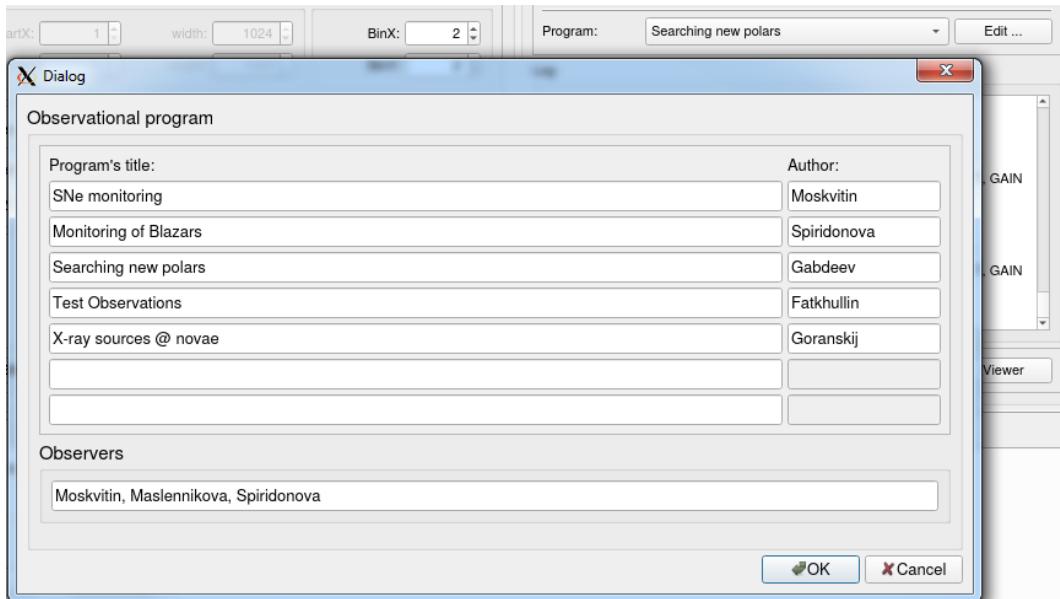


Рис. 34: Диалог выбора наблюдательных программ.

- дата начала наблюдений;
  - номер куба (блока с данными для одного объекта) в поле Cube;
  - номер файла устанавливается в поле Number.
  - коррекция имени файла: /home/obs/FITS/20190109/ZP20190109\_01001.fits
  - галочка в поле „Auto increment“ для автоматической нумерации следующего файла.
4. В нижней вкладке „Photometry“ выбрать требуемый фильтр. Если не стоит галочка в боксе „Manual Control“, турели будут автоматически согласованы: при перемещении колеса одной из турелей в позицию «фильтр», второе колесо займет позицию «окно».
  5. Нажать кнопку начала экспозиции **START EXP**, после чего начнется отсчет времени до конца экспозиции. Кнопка **STOP EXP** останавливает как отдельный кадр, так и серию.
  6. В момент начала экспозиции оболочки управления MMPP сразу создаёт fits-файл, а затем записывает в него “шапку” файла с ключевыми словами и изображение. **Не открывать этот файл до окончания записи, чтобы избежать его повреждения!** Если открыта программа просмотра FITS-файлов из оболочки системы управления MMPP (вызывается кнопкой „Viewer“ из основного окна оболочки MMPP), полученное изображение автоматически загрузится и будет доступно для анализа (см. рис. 35).
  7. Визуализация и быстрый анализ получаемых кадров может проводиться с помощью утилиты просмотра, либо во внешних программах (ds9, MaximDL и т.п.).

### 6.5.3 Фокусировка

На телескопе в настоящее время (август 2019 года) применяется фокусировочный узел с сельсинами, поэтому процесс фокусировки аналогичен применяемому на старом ПЗС-фотометре. Начальное значение фокуса для MMPP по грубой (левой) шкале должно быть около отметки 16 (вместо 27 у старого ПЗС-фотометра).

Согласно показаниям датчиков фокуса и соответствующим оценкам качества изображений звездообразных объектов (FWHM) строится кривая, минимум которой соответствует

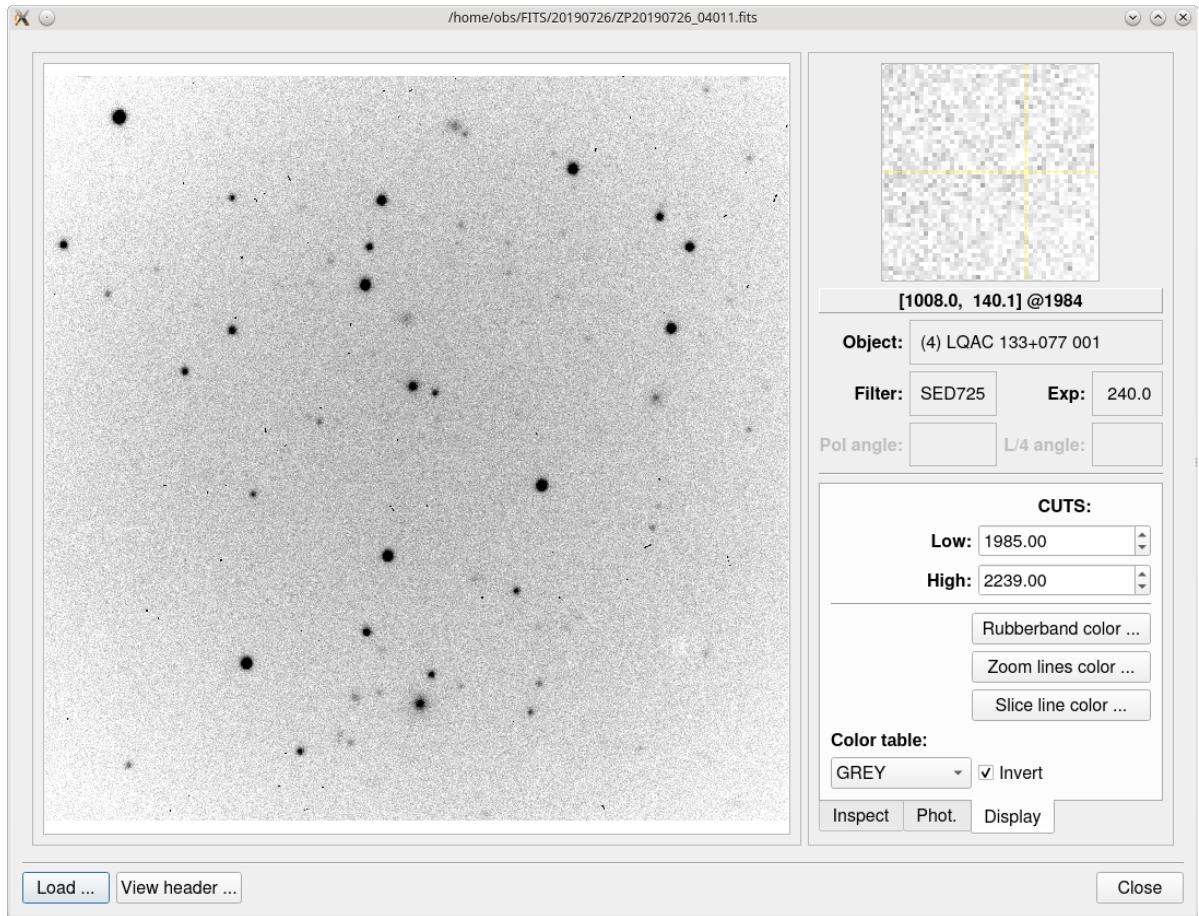


Рис. 35: Утилита просмотра FITS-файлов оболочки СУ ММРР. Позволяет посмотреть изображение и описание файла, получить статистику по кадру, построить профили объектов, оценить качество изображений, провести быструю фотометрию интересующих объектов.

оптимальному фокусу. Для этого необходимо получить последовательность кадров с короткими экспозициями, изменяя значение фокуса. Перед построением кривой необходимо вручную заполнить отсчеты фокуса в FITS-шапках файлов последовательности (кнопка **Edit header** оболочки управления прибором).

После заполнения этой информации необходимо нажать кнопку „Focussing“, в открывшемся окне ApogeeFocus нажать кнопку **Run**, выбрать файлы фокусировочной последовательности (минимум 3 изображения), выбрать интересующий объект на изображении, выбрать модель вписываемой кривой (Moffat2D или Gauss2D) и нажать кнопку **Focussing**.

В открывшемся окне Focussing curve будет построена фокусировочная кривая и отображены отсчеты оптимального фокуса, которые следует установить на шкале фокусировочного узла. Для выхода из программы нажать кнопку **Quit**.

#### 6.5.4 Работа в поляриметрических режимах ММРР

При переключении ММРР в поляриметрический режим (вкладка „Polarimetry“ оболочки ZPhot), программа дополнительно спрашивает, действительно ли вы хотите переключиться в другой режим: “You have requested a mode changing! Are you sure?”, нужно нажать “OK”.

Полный переход между режимами занимает несколько десятков секунд. В это время в пучок вводятся (или выводятся) анализаторы поляризации. Во время движения их статус

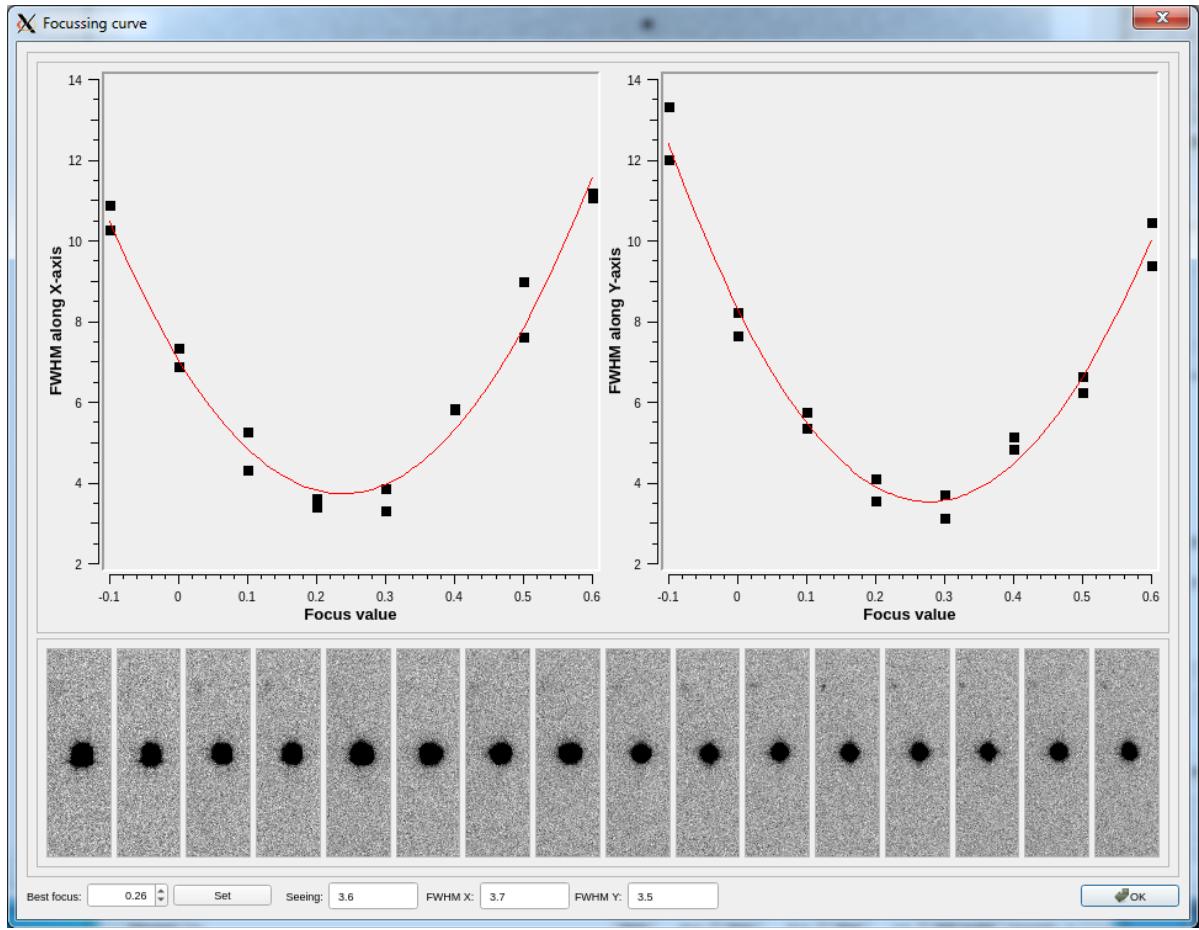


Рис. 36: Фокусировка в ApogeeFocus, построение фокусировочной кривой.

в строке состояния отображается красным цветом (LP, CP, Pol, L/4). Зелёный цвет этих параметров говорит о готовности прибора к наблюдениям.

Для работы в режимах линейной и круговой поляризации в основной вкладке Polarimetry имеется две дополнительные: „Linear“ и „Circular“ (см. рис. 37).

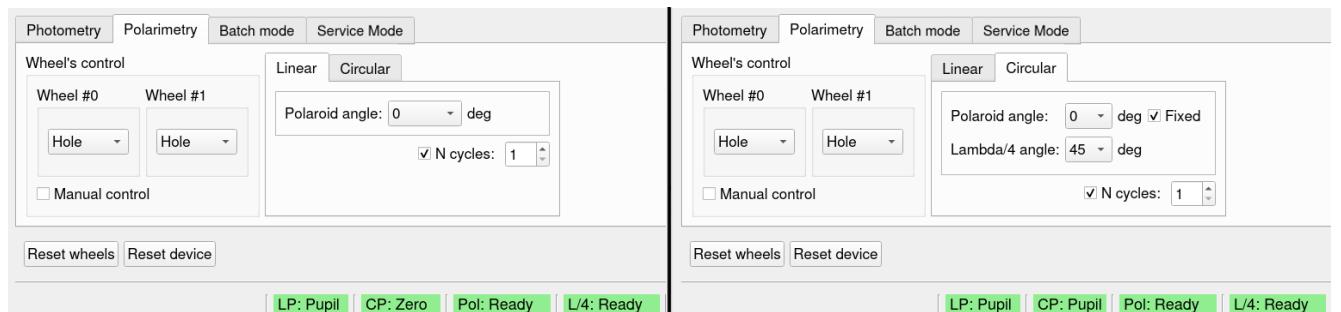


Рис. 37: Вкладка поляриметрических наблюдений с режимами линейной и круговой поляризации.

**Режим линейной поляризации.** В этом режиме доступны следующие возможности:

- получение одиночных кадров с определенным положением поляроида ( $-60^\circ, 0^\circ, +60^\circ$ , в боксе „N cycles“ нет галочки);
- циклический режим (в боксе „N cycles“ стоит галочка и указано количество циклов, по-умолчанию — 1). В этом случае при нажатии кнопки **START EXP** автоматически снимаются три кадра с углами  $-60^\circ, 0^\circ, +60^\circ$ . Если количество циклов более одного, порядок установки углов следующий:  $-60^\circ, 0^\circ, 60^\circ; 60^\circ, 0^\circ, -60^\circ; -60^\circ, 0^\circ, 60^\circ$  и т.д.

Кнопка **STOP EXP**, как и в фотометрическом режиме, останавливает всю серию кадров.

**Режим круговой поляризации.** Данный режим предоставляет следующие возможности:

- получение кадров с фиксированным углом поляроида (Polaroid angle): выбирается необходимое значение угла ( $-60^\circ, 0^\circ$  или  $+60^\circ$ ), ставится галочка в боксе „Fixed“, при нажатии кнопки **START EXP** автоматически снимаются два кадра с положениями пластины  $\lambda/4$ :  $-45^\circ, +45^\circ$ ;
- при отсутствии галочки в боксе „Fixed“, автоматически снимается полный набор из 6 кадров: для каждого из положений поляроида ( $-60^\circ, 0^\circ, +60^\circ$ ) снимается два положения  $\lambda/4$ :  $-45^\circ, +45^\circ$ ;
- одиночные кадры (нет галочки в боксе „N cycles“),
- режим цикла (в боксе „N cycles“ стоит галочка, указано количество циклов, по умолчанию — 1). Порядок положений волновой пластины:  $-45^\circ, +45^\circ; +45^\circ, -45^\circ; -45^\circ, +45^\circ$  и т.д.

### 6.5.5 Работа пакетном режиме

Для получения последовательности кадров в нескольких фильтрах применяется пакетный режим (вкладка „Batch mode“), где выбирается имя шаблона („Current“), а также количество циклов („N cycles“). В окне создания/редактирования шаблона задаётся необходимый порядок смены фильтров, анализаторов поляризации и времена экспозиций (см. рис. 38).

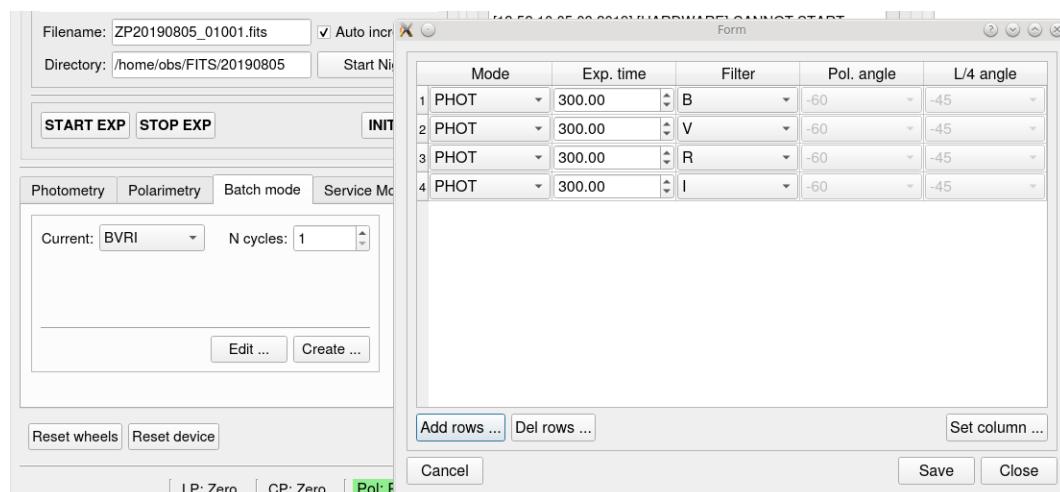


Рис. 38: Вкладка пакетного режима и окно создания/редактирования шаблона.

### **6.5.6 Работа сервисном режиме**

В отличие от стандартного режима поляризации, в сервисном режиме можно выставить произвольные углы анализаторов поляризации.

### **6.5.7 Завершение работы**

Процесс завершения работы с телескопом и куполом аналогичен соответствующим операциям при работе с ПЗС-фотометром. Для создания лога ММРР необходимо нажать кнопку **Create log**. Данные с zphot.sao.ru скопировать на tb.sao.ru, заполнить электронный и бумажный журнал.