

УДК 520.2.072

Применение PMSM-сервопривода при модернизации системы наведения и часового ведения телескопа МТМ-500

А.С. Кривенко , С.В. Назаров, М.С. Бутузова

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
krivenko86@yandex.ru

Поступила в редакцию 13 января 2026 г.

Аннотация. В работе представлен опыт модернизации системы наведения и часового ведения телескопа МТМ-500 путем замены традиционного привода оси прямого восхождения на сервопривод с синхронным электродвигателем с ротором из постоянных магнитов и с высокоразрешающим энкодером. Рассмотрены вопросы выбора параметров сервопривода (скорость, крутящий момент, разрешение), расчета передаточных отношений, а также методики калибровки и синхронизации с небесной системой координат. Для обеспечения детерминированной генерации управляющих импульсов использован программируемый логический контроллер (ПЛК) с аппаратной поддержкой управления движением. Приведены алгоритмы позиционирования, учитывающие непрерывное движение небесных объектов, и методика калибровки коэффициентов часового ведения на основе анализа гидирования. По результатам испытаний ошибка часового ведения составила не более $2''$ за 40 минут, абсолютная ошибка наведения по звездным координатам – $15.71''$, а относительная ошибка коррекции – $0.118''$. Показано, что применение сервоприводов позволяет реализовать одномоторную схему управления, упростить механическую конструкцию и обеспечить высокую точность позиционирования.

Ключевые слова: часовое ведение, позиционирование, гидирование, система управления, звездное время, PMSM

1 Введение

Современное телескопостроение предъявляет все более строгие требования к системам наведения и сопровождения, поскольку повышение разрешающей способности оптических и радиоастрономических инструментов напрямую зависит от точности позиционирования и стабильности движения телескопа. В условиях наблюдений за быстро движущимися объектами, при частом перенаведении и длительной экспозиции слабых астрономических объектов приводы телескопов должны обеспечивать высокую точность позиционирования и обладать широким динамическим диапазоном скоростей вращения.

Традиционные приводные системы, разработанные в советский период, основывались на многомоторных схемах с использованием щеточных двигателей постоянного тока и шаговых двигателей. Обратная связь по положению оси телескопа, как правило, осуществлялась с помощью датчиков-селисинов (Назаров, Харченко, 2022). В отдельных случаях, преимущественно в небольших астрономических инструментах, применялись синхронные и асинхронные электродвигатели (Михельсон, 1976).

Ограниченный динамический диапазон скоростей и недостаточная точность регулирования частоты вращения двигателей вынуждали конструкторов прибегать к многомоторным схемам, в которых для грубого и точного позиционирования использовались разные двигатели. Подобная архитектура существенно усложняла механическую часть системы, вносила дополнительные погрешности в позиционирование и сопровождение объектов, а также усложняла алгоритмы управления.

Переход к сервоприводам PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) с широким диапазоном рабочих скоростей позволяет реализовать одномоторную схему управления монтировкой. Это не

только упрощает механическую конструкцию, но и повышает точность позиционирования, стабильность сопровождения и общую надежность системы.

В настоящей работе раскрыты особенности, связанные с применением PMSM-сервоприводов для позиционирования экваториальной монтировки.

2 Сервопривод. Краткое описание

Рассматриваемые в статье сервоприводы представляют собой сочетание серводвигателя (синхронного электродвигателя с индуктором из постоянных магнитов – СДПМ, PMSM – со встроенным высокоточным энкодером положения) и серводрайвера (блока системы управления серводвигателем).

Ключевым отличием сервопривода от шагового двигателя является практически полное сохранение крутящего момента при скоростях от минимальных и до максимальных оборотов. Благодаря применению энкодера в замкнутой обратной связи достигается более точное позиционирование как в статическом, так и в динамическом режиме работы.

Одним из основных интерфейсов управления сервопривода является интерфейс Step/Dir (или PUL/DIR). Step/Dir (от англ. Step – шаг, Direction – направление) представляет собой стандартный цифровой протокол управления позиционированием приводов, широко применяемый в системах с числовым программным управлением (ЧПУ). Управление осуществляется подачей последовательности импульсов на вход Step: каждый импульс соответствует заданному приращению угла поворота выходного вала (шагу), величина которого программируется в настройках привода. Направление вращения определяется логическим уровнем на входе Dir (обычно HIGH – вперед, LOW – назад).

Применение интерфейса Step/Dir позволяет в режиме реального времени управлять как скоростью движения, так и абсолютным положением оси телескопа. Однако это предъявляет повышенные требования к управляющей системе: она должна обеспечивать непрерывный подсчет и контроль количества поданных шаговых импульсов, а также строгую стабилизацию частоты их следования. Нестабильность частоты импульсов будет приводить к ошибкам гидирования, а пропуск или потеря импульсов – к накоплению систематической погрешности позиционирования. Более подробное описание применения сервопривода можно найти в [Гусев, Букреев \(2007\)](#)

В качестве управляющей системы монтировки телескопа МТМ-500 был выбран ПЛК CoolmayL02. Независимо от пользовательской управляющей программы, контроллер поддерживает программные функции позиционирования приводами благодаря наличию специализированных функций подсчета и генерации импульсов движения. Это исключает риск потери импульсов или неравномерности их следования, которые могут возникнуть вследствие непостоянного времени цикла выполнения пользовательского кода.

Такая архитектура обеспечивает детерминированное поведение системы и гарантирует стабильность частоты Step-импульсов, что критически важно для длительного сопровождения астрономических объектов.

3 Модернизация кинематики телескопа

Ранее на телескопе МТМ-500 главная червячная передача использовалась только для часового ведения, а грубое наведение осуществлялось с помощью отдельного приводного штурвала, соединенного с осью телескопа через зубчатую передачу. Во время грубого наведения главная червячная передача расцеплялась от оси телескопа тормозом. Нагрузка на червячную пару оси Ra зависит от дисбаланса монтировки и момента инерции. Применение плавного разгона и торможения позволяет минимизировать нагрузку на червячной паре. Серводрайвер передает значение усилия на валу сервопривода, что позволяет контролировать величину нагрузки на червячной паре. Поэтому в ходе модернизации для позиционирования по оси прямого восхождения было решено использовать главную червячную передачу. Для центрирования главного червячного вала в продольном направлении был изготовлен упорный подшипниковый узел, установленный на одном конце червячного вала. Другой конец червячного вала подключен к приводу через дисковую муфту.

В качестве привода используется серводвигатель с планетарным прецизионным редуктором с коэффициентом понижения 10. Редуктор необходим для повышения рабочих оборотов двигателя и мо-

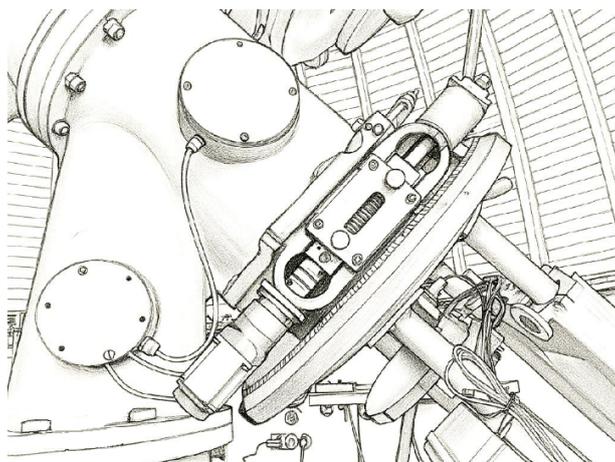


Рис. 1. Внешний вид узла привода оси Ra после модернизации¹

мента усилия на валу. Представленные ниже расчеты подтверждают правильность выбора редуктора. Итоговый вид привода оси Ra представлен на рис. 1. Главная червячная пара имеет естественный люфт, который невозможно скомпенсировать прижимом червячного вала. Поэтому в сборку телескопа введен небольшой дисбаланс по оси Ra с целью постоянного зацепления червячной пары. При переключении сборки возникает необходимость повторной процедуры синхронизации для компенсации ошибки наведения. Планируется установка специального компенсирующего привода, поджимающего главную червячную шестерню.

Чтобы корректно выбрать и применить сервопривод, необходимо проанализировать его основные характеристики:

- Рабочую скорость (необходимо, чтобы рабочий диапазон скоростей сервопривода соответствовал требованиям механики сборки).
- Необходимое крутящее усилие, создаваемое сервоприводом.
- Разрешающую способность позиционирования (позволяет достичь требуемой точности позиционирования телескопа).

Ниже представлена подробная оценка указанных параметров и характеристик, а также приведены результаты испытаний после модернизации.

3.1 Оценка рабочих скоростей сервопривода

Для оценки рабочих скоростей сервопривода устанавливаются рабочие параметры сборки:

- угловая скорость движения оси при часовом ведении $\omega_t = 0.004178$ град/с;
- угловая скорость движения оси при грубом наведении $\omega_f = 1$ град/с.

Текущие передаточные коэффициенты (справочные данные):

- главная червячная пара $i_{wf} = 338$;
- редуктор на сервоприводе $i_g = 10$.

Найдем скорость вращения вала сервопривода по заданной угловой скорости по оси и передаточным коэффициентам:

$$n = \frac{\omega \cdot i_{wf}^* \cdot i_g^*}{360^\circ}, \quad (1)$$

где n – скорость вращения на валу сервопривода (об/с); ω – угловая скорость движения сборки (град/сек); i_{wf} , i_g – передаточные числа редуктора и червячной пары.

Таким образом, получаем следующие скорости вращения вала сервопривода на разных режимах:

¹ Изображение создано с помощью ИИ-инструмента Fotor с последующей доработкой автором.

- скорость при часовом ведении $n_t = 0.039$ об/с;
- скорость при грубом движении $n_f = 9.4$ об/с.

Номинальный диапазон скорости вращения вала сервопривода составляет 0–3000 об/мин или 0–50 об/с. Из полученных значений видно, что они укладываются в рабочий диапазон с запасом.

3.2 Оценка крутящего момента и требуемой минимальной мощности сервопривода

Требуемый крутящий момент на валу сервопривода зависит от двух основных факторов: момента инерции и момента дисбаланса.

Момент инерции зависит от массы, которую перемещает привод, и ускорения перемещения. Поскольку нет требований к ускорению перемещения монтировки, а также данных о весе монтировки, момент инерции не рассчитывался, но учитывался в экспериментальной отладке при испытаниях. Сервопривод имеет индикацию текущего крутящего момента на валу серводвигателя. Отладка позволила обеспечить плавное изменение крутящего момента при разгоне и торможении. При таком режиме работы происходит минимальное воздействие момента инерции телескопа на механику привода.

Момент дисбаланса – это крутящий момент сопротивления привода, возникающий вследствие дисбаланса монтировки. Для его оценки был проведен эксперимент по измерению усилия на червячном валу по оси альфа при движении разбалансированной монтировки. Максимальное значение наблюдалось в момент начала поворота вала и составило 12 Нм. В рабочем режиме момент дисбаланса можно косвенно оценить по разнице крутящего момента, возвращаемого сервоприводом при движении в разных направлениях.

Максимально рабочее значение усилия на валу серводвигателя было взято из состояния предельно допустимого дисбаланса монтировки. Несмотря на то что это не является рабочим режимом, сервопривод должен иметь способность проворачивать вал. В случае превышения усилия на валу сервопривод должен сообщать об ошибке, ограничивать усилие или отключаться.

Исходя из имеющихся данных, определим максимально рабочий крутящий момент на валу серводвигателя и требования по мощности. Усилие на валу сервопривода можно найти в [Сервоприводы \(2000\)](#):

$$M_{sh} = \frac{M_{wg}}{\eta i}, \quad (2)$$

где M_{sh} – крутящий момент на валу сервопривода (Н·м); M_{wg} – крутящий момент на червячном валу (Н·м); i – передаточное отношение редуктора (n вход/ n вых); η – КПД редуктора.

Для выбранного планетарного редуктора $i = 10$, $n = 0.98$ в итоге получаем $M_{sh} = 1.22$ Нм. Требуемая мощность серводвигателя P взаимосвязана с крутящим моментом на валу серводвигателя через соотношение

$$P = \frac{2\pi M n}{60 \text{ мин}}, \quad (3)$$

где M – крутящий момент (Н·м); n – частота вращения, измеряемая в оборотах в минуту.

Подставив значение момента на валу сервопривода $M = 1.22$ Нм, а также значение скорости вращения вала сервопривода при грубом движении $n = 9.4 \cdot 60$, получаем

$$P = (2\pi \cdot 1.22 \text{ Нм} \cdot 564 \text{ об} \cdot \text{мин}) / 60 \text{ мин} = 72 \text{ Вт}.$$

Средний КПД двигателя сервопривода составляет 90%, значит требуемая минимальная мощность $72 \text{ Вт} / 0.9 = 80 \text{ Вт}$. Полученная величина является оценочной, поскольку балансировка, вязкость смазки и другие факторы могут изменять усилие, поэтому на практике рекомендуется выбирать мощность с запасом. На основании рассчитанной мощности и крутящего момента на валу выбран сервопривод HANPOSE 60SS40. Основные параметры перечислены в таблице 1.

Данный сервопривод имеет функцию измерения текущего крутящего момента на валу с отображением значения на экране, что можно учитывать в процессе настройки и анализе работы механики.

Таблица 1. Параметры сервопривода HANPOSE 60SS40

Параметр	Значение
Рабочий ток	2.5 А
Номинальный крутящий момент	2.3 Нм
Номинальная скорость вращения	3000 об/мин
Разрешение энкодера	17 бит

3.3 Оценка требуемой точности часового гидирования

Телескоп МТМ-500 имеет фокусное расстояние 6520 мм. В качестве приемника используется ПЗС-матрица Arogee Alta U6, которая имеет следующие характеристики:

- разрешение 1024×1024 пикселей,
- размер рабочего поля 24×24 мм,
- размер пикселя 24 мкм.

В качестве кандидата на замену приемника мы рассматриваем камеру GreatEyes с размером пикселя 13.5 мкм, поэтому для расчетов точности с запасом будем использовать размер пикселя 10 мкм. Пиксельный масштаб изображения найдем по формуле

$$M = \frac{180}{\pi} 3600'' \frac{p}{F}, \quad (4)$$

где p – размер пикселя в миллиметрах, F – фокусное расстояние телескопа в миллиметрах.

Получаем $M = 0.3163$ угл. сек/пиксель. На практике это значение избыточно. Критерий Найквиста для астрофотографии рекомендует, чтобы пиксельный масштаб был в 2–3 раза мельче, чем FWHM (полная ширина на половине максимума) звездного изображения, обусловленного дифракцией и атмосферным пределом. Последний в идеале определяет минимально возможное FWHM и для хороших условий равен $1''$.

Отметим, что реальный выходной FWHM будет больше чем $1''$, так как присутствуют еще другие факторы искажения изображения. Типичное время экспозиции составляет 120 сек, поэтому допустимую величину ошибки часового ведения принимаем равной $1''$ за 120 секунд. Возьмем это значение как скорость смещения и выразим его

$$\omega_{\text{err}} = \frac{1''}{120} (1/\text{с})$$

или

$$\omega_{\text{err}} = 0.00833 (''/\text{с}).$$

Найдем процентное соотношение скорости смещения ω_{err} к рабочей скорости часового ведения $\omega_t = 0.004178^\circ/\text{с}$, учитывая размерность величин:

$$\Delta = \frac{100\% \omega_{\text{err}}}{3600 (''/^\circ) \omega_t} = 0.055\%.$$

Это значение показывает требуемую погрешность скорости ведения, а значит, и погрешность скорости вращения сервопривода.

3.4 Оценка разрешающей способности позиционирования

С учетом поля зрения телескопа $15'$ допустимая ошибка позиционирования может составлять $1'$. Проанализируем, сколько приходится отсчетов на энкодере сервопривода при перемещении оси Ra на один шаг позиционного разрешения. Согласно теореме Котельникова (теорема Найквиста – Шеннона, теорема отсчетов), чтобы точно позиционировать объект с точностью $\pm\Delta$, шаг позиционирования (минимальное приращение) должен быть в 2–3 раза меньше, чем Δ . Для обеспечения устойчивости к механическим люфтам и динамическим возмущениям в практических системах рекомендуется запас по разрешению не менее 10:1. Запас по позиционному разрешению позволяет более точно обсчитывать погрешности, вызванные люфтом в механизмах или атмосферной рефракцией. Таким образом, примем соотношение позиционного разрешения оси Ra к количеству отсчетов энкодера при движении на один шаг позиционного разрешения:

- для статического режима – не менее 10,
- для динамического (при гидировании) – не менее 100.

Данный серводвигатель оборудован 17-битным энкодером, а это значит, что на один оборот вала приходится $N_{\text{ppr}} = 131072$ отсчетов энкодера. В одном полном обороте 1296000 угловых секунд, отсюда получаем, что на один отсчет энкодера приходится 9.88 угловых секунд. Учитывая коэффициенты редукции механики $i = 3386.13$, получаем $9.88/(3386.13) = 0.00292$, т. е. на один отсчет энкодера приходится 0.00292'' оси Ra (или на одну угловую секунду оси телескопа приходится 342.6 отсчетов энкодера). Таким образом, получаем $D = 342.6$.

Это условная оценка, которая показывает, что позиционирование с заданной точностью возможно, однако на реальную точность влияет большое количество обстоятельств.

4 Позиционирование оси Ra

4.1 Система машинных координат

Для точного определения положения телескопа по оси Ra применяется система машинных координат, которые определяются количеством шагов привода от нулевой точки отсчета. Точка отсчета выбрана в положении $t = 18$ часов, и подразумевается, что монтаж не может ее пересечь. Это связано с ограничениями кабельных линий камеры в поворотном фокусе куде, а также кабельной линии оси склонения. Для предотвращения прохождения через точку отсчета установлены концевые датчики. Перерасчет между машинными и звездными координатами можно выполнить как на управляющем компьютере, так и непосредственно на ПЛК. В последнем случае на ПЛК поступают команды в звездных координатах. Именно такой подход реализован при модернизации МТМ-500.

Поскольку система координат находится в непрерывном движении, а также есть необходимость в сопровождении движущихся объектов, авторы разработали специализированную методику позиционирования телескопа, отличную от типовых программных средств позиционирования, применяемых в машинах с ЧПУ.

Исходными данными для позиционирования объекта примем следующие параметры:

- X_t – положение объекта на текущий момент времени,
- V_t – скорость объекта.

Для позиционирования инструмента, примем следующие параметры:

- X_c – положение инструмента на текущий момент времени,
- V_c – скорость инструмента на текущий момент времени,
- V_m – рабочая скорость движения при наведении.

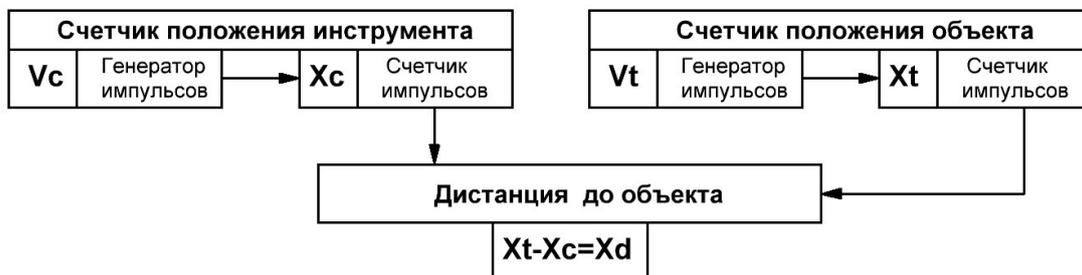


Рис. 2. Блок-схема счетчика углового положения оси Ra

Для работы алгоритмов позиционирования необходимо вычислить расстояние от объекта до инструмента. На основе этой величины рассчитывается требуемая скорость движения инструмента, которая затем в виде частоты импульсов передается в сервопривод.

Текущее положение инструмента по t фиксируется аппаратным счетчиком импульсов (машинные координаты). Положение объекта отслеживается программным счетчиком (рис. 2).

На момент начала позиционирования задаются скорость объекта и его текущее положение. Затем запускается счетчик положения объекта, и его значение X_t будет отображать расчетное положение объекта. Вычислив разницу между счетчиком положения инструмента и счетчиком расчетного положения объекта, получим расчетную дистанцию X_d от инструмента до объекта. На основе значения этой дистанции строятся алгоритмы регулирования скорости движения инструмента.

Необходимо, чтобы счетчики положения инструмента и объекта работали синхронно. На момент разработки проводилась тестовая проверка: при одновременном запуске на одинаковой частоте их значения после нескольких минут работы должны совпадать или отличаться не более чем на ± 1 отсчет. В противном случае возникает дополнительная погрешность позиционирования.

4.2 Управление скоростью движения

Важно учитывать, что монтаж не может мгновенно разогнаться и остановиться из-за момента инерции, однако, обеспечивая разгон и торможение монтажа, необходимо соблюсти критерий точности позиционирования.

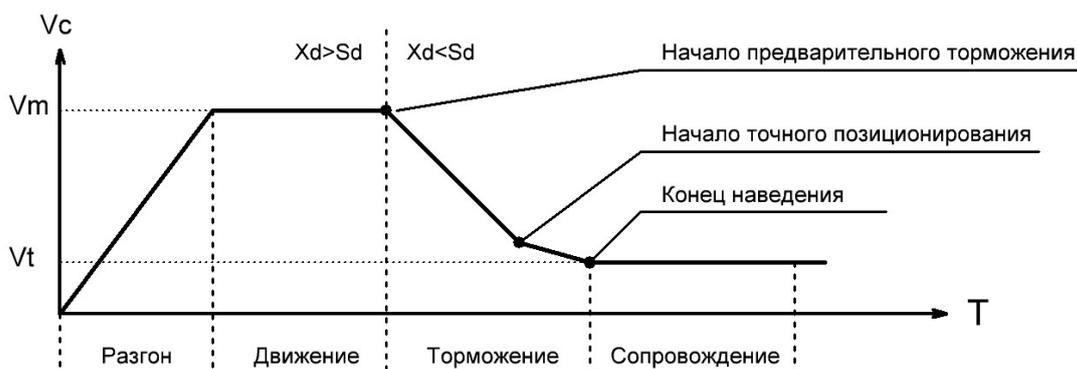


Рис. 3. Профиль скорости движения при позиционировании

На рис. 3 приведен типовой профиль скорости движения инструмента V_c . На момент начала движения рабочая скорость V_m достигается не сразу, а постепенно. При движении непрерывно вычисляется дистанция до объекта X_d , а также дистанция торможения S_d , исходя из текущей скорости инструмента, скорости объекта и параметров торможения.

При ускорениях и замедлениях изменение скорости во времени имеет линейный характер. Были предприняты попытки расчета точки начала торможения таким образом, чтобы торможение завершилось точно в точке наведения на объект. Однако непостоянство циклов работы программы и инерционность подпрограммы изменения частоты импульсов управления не дали возможности получить желаемый результат и требуют алгоритмов регулирования.

Для упрощения задачи управления зона торможения разделена на два участка: предварительного торможения и точного позиционирования. На начальном участке снижение скорости осуществляется линейно с максимально допустимым замедлением. На конечном участке, который характеризуется малым расстоянием между объектом и инструментом и малой разностью скоростей, замедление происходит плавно для обеспечения высокой точности позиционирования. Такой подход является более эффективным по сравнению с обеспечением высокой точности на всей траектории торможения.

Опишем методику вычисления момента начала линейного торможения при наведении. Условимся, что ускорение и замедление инструмента будут одинаковыми и задаются следующими величинами:

- V_{\max} – максимальная скорость инструмента,
- T_{\max} – максимальное время торможения инструмента от V_{\max} до 0.

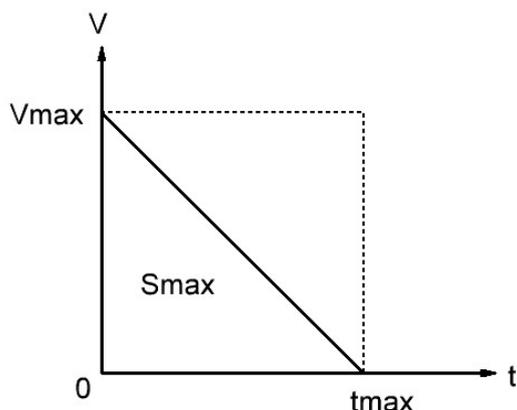


Рис. 4. График скорости при торможении от V_{\max} до нуля

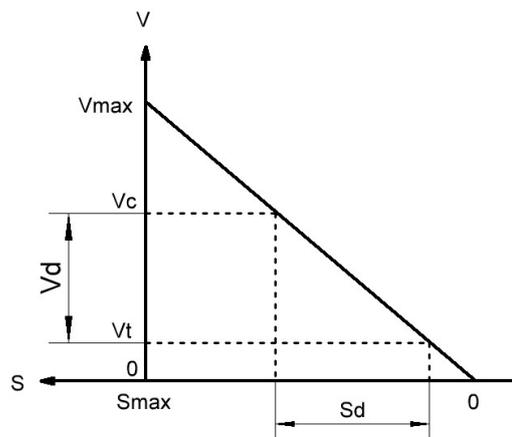


Рис. 5. График зависимости скорости и расстояния при торможении

График скорости при торможении от V_{\max} до нуля представлен на рис. 4.

Из графика следует, что расстояние, пройденное при торможении, S_{\max} , можно найти как площадь фигуры, а именно:

$$S_{\max} = \frac{V_{\max} t_{\max}}{2}. \quad (5)$$

Линейный график зависимости скорости и расстояния при торможении представлен на рис. 5.

При максимальной скорости V_{\max} до полной остановки инструменту потребуется пройти расстояние S_{\max} . Аналогично, при снижении текущей скорости V_c до скорости объекта V_t пройденный путь составит S_d . Рассмотрен тот случай, когда текущая скорость не равна максимальной скорости перемещения инструмента. Это происходит при малых расстояниях до объекта, когда инструмент не успевает разогнаться до максимальной скорости перемещения.

Из полученного графика выразим соотношения

$$\frac{S_d}{V_d} = \frac{S_{\max}}{V_{\max}}. \quad (6)$$

Подставив формулу (5) в (6), выразим S_d . В итоге получим

$$S_d = \frac{t_{\max}(V_c - V_t)}{2}. \quad (7)$$

Добавим в формулу (7) поправочный коэффициент K , чтобы заложить запас расстояния для алгоритма регулирования в ближней зоне. Таким образом, формула для вычисления расстояния начала торможения для заданного ускорения имеет вид

$$S_d = \frac{t_{\max}(V_c - V_t)}{2} + K. \quad (8)$$

Когда значение S_d оказывается меньше значения текущего расстояния от инструмента до объекта X_d , начинается момент начала торможения.

4.3 Вычисление небесных координат

Вычисление небесных координат может производиться как на управляющем компьютере, так и в ПЛК монтажки. В настоящей модернизации телескопа МТМ-500 учтены оба варианта. Ввиду ограниченной вычислительной мощности ПЛК применен упрощенный алгоритм вычисления звездного

времени и координат, без учета рефракции. На рис. 6 показана блок-схема системы позиционирования телескопа по оси Ra. Вал сервопривода поворачивается на угол, кратный количеству импульсов, поступающих на вход STEP. Импульсы генерирует исполняемая программа в ПЛК, к которому подключен привод. В программе имеется реверсивный счетчик импульсов (X). Значения этого счетчика соответствуют углу t , на который повернут телескоп по оси Ra. Другими словами, значение этого счетчика – машинные координаты по t .

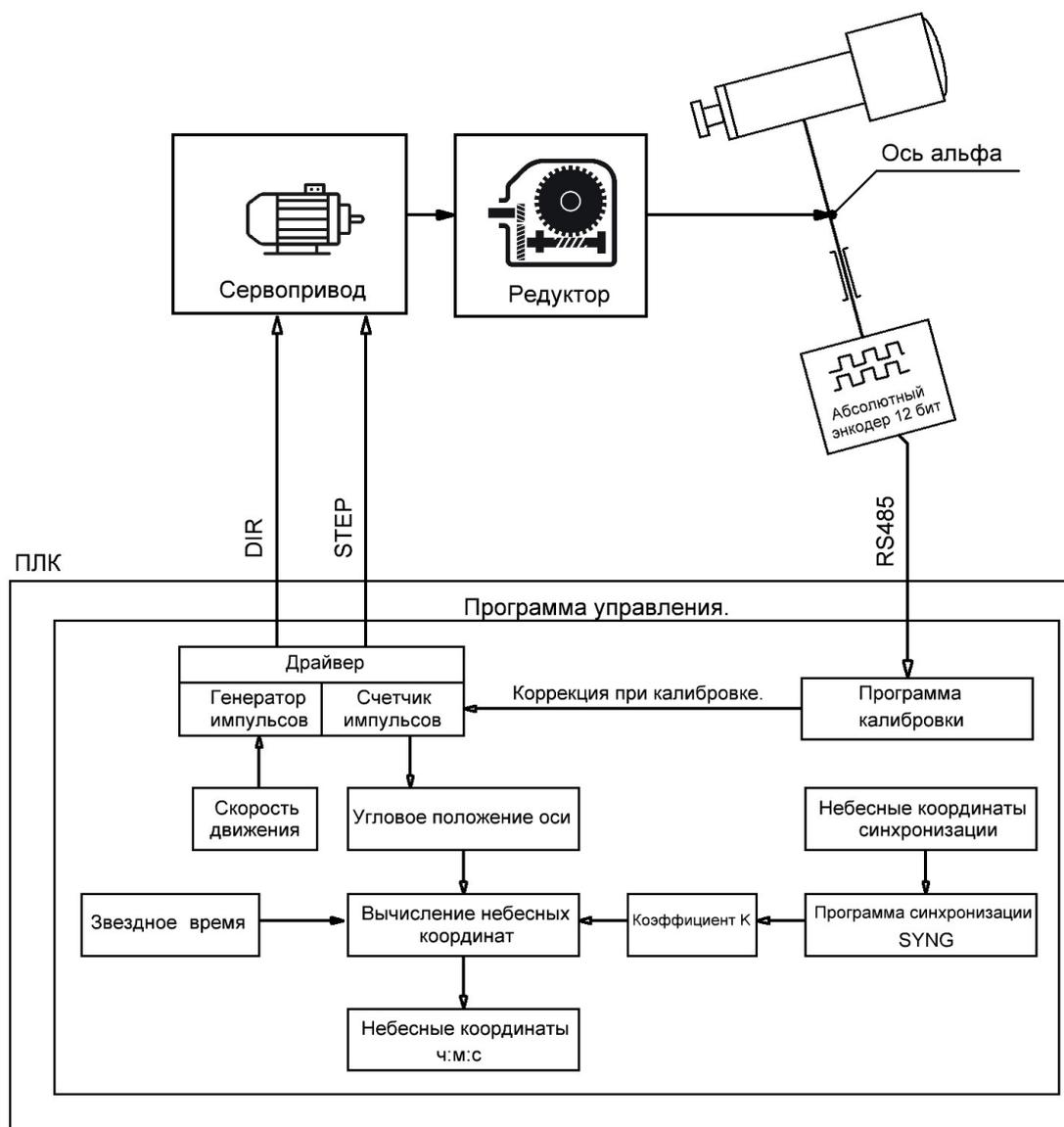


Рис. 6. Блок-схема позиционирования оси Ra

При первом включении телескопа выполняется программа калибровки оси, целью которой является определение положения оси телескопа и присвоение значения счетчика машинных координат. Калибровка может быть выполнена из любого рабочего положения оси Ra. Программа считывает значение с отдельного абсолютного энкодера, сопряженного с осью телескопа, и пересчитывает его в машинные координаты углового положения. Из-за большой разницы разрешения абсолютного энкодера (12 бит, один отсчет соответствует 5.27' оси) и счетчика машинных координат оси (один отсчет соответствует 0.00292'' оси) калибровка производится на граничных значениях отсчетов эн-

кодера для снижения погрешности. Для этого включается медленное вращение оси Ra, и в момент смены значения энкодера выполняется расчет положения оси. Это позволяет добиться от энкодера точности выше, чем его позиционное разрешение. На практике эта величина составила в среднем 1–2'. Такой точности вполне достаточно для безопасного перемещения монтировки и первого наведения телескопа на объект. Далее выполняется процедура привязки машинных координат телескопа к небу – синхронизация (Sync). После этого становится возможным точное наведение телескопа по звездным координатам.

Прямое восхождение Ra зависит от часового угла t следующим образом (Михельсон, 1976):

$$S = t + Ra, \quad (9)$$

где S – звездное время. В данной работе используется упрощенный расчет звездного времени. Оно вычисляется на основе солнечного времени, которое отсчитывается таймером RTC внутри ПЛК. Полученное значение умножается на коэффициент K_{st} , после чего прибавляется постоянная составляющая S_{ad} :

$$S = R_t \cdot K_{st} + S_{ad}, \quad (10)$$

где K_{st} – коэффициент, S_{ad} – постоянная составляющая.

Перерасчет машинных координат положения X в часовой угол t выполняется следующим образом:

$$t = \frac{X}{K_x} + t_{ad}, \quad (11)$$

где K_x – коэффициент пересчета счетчика импульсов в угловое положение t ; t_{ad} – добавочный коэффициент пересчета.

Объединив формулы (9), (10) и (11), а также добавочные коэффициенты S_{ad} и t_{ad} в коэффициент S_{add} , получим

$$R_t \cdot K_{st} + S_{add} = Ra + \frac{X}{K_x}, \quad (12)$$

где Ra – небесные координаты объекта, выраженные в секундах дуги; K_{st} , K_x – коэффициенты, вычисляемые один раз при калибровочных испытаниях; S_{add} – коэффициент, вычисляемый во время процедуры синхронизации (Sync).

В процессе синхронизации телескоп наводится на произвольную точку на небе и выполняется астрометрирование ее положения. Далее в формулу (12) подставляются полученные координаты Ra, выраженные в секундах дуги, мгновенное значение текущего звездного времени и положения. Вычисленный коэффициент S_{add} в дальнейшем используется для наведения.

Перед процедурой синхронизации необходимо выполнить калибровку абсолютного положения телескопа по t согласно методике, описанной выше, и полученное значение записать в счетчик положения X .

4.4 Режим автогидирования

В ходе модернизации телескопа МТМ-500 предусматривается коррекция положения оси с помощью дополнительного гида. Предполагается использовать общедоступные программные средства автогидирования, такие как PHD Guiding, которые хорошо себя зарекомендовали в других работах (Назаров, Харченко, 2022). Для использования этих средств необходим ASCOM-драйвер монтировки, запускаемый на персональном компьютере. Стандарт ASCOM предусматривает автогидирование в импульсном режиме. Программа PHD Guiding формирует программные гидирующие импульсы коррекции, характеризующиеся величиной изменения частоты и временем воздействия. Параметры импульсов гидирования поступают в ПЛК от управляющего компьютера, где они обрабатываются контроллером. Обработка гидирующего импульса в ПЛК позволяет сформировать корректирующее воздействие максимально точно.

5 Практические испытания, калибровки и результаты

5.1 Калибровка коэффициентов скорости часового ведения

Целью данной методики является поиск оптимальных значений частот управления серводрайвером и его программируемых коэффициентов деления для обеспечения максимально точного звездного гидирования и необходимых скоростей для наведения инструмента. Скорость вала сервопривода для выбранной модели может задаваться двумя методами:

$$n = \frac{F}{D} = \frac{F j}{C k}, \quad (13)$$

где n – скорость вращения вала сервопривода (об/с); D – коэффициент количества импульсов на оборот (допустимые значения в пределах 1..3000); F – входная частота управления (Гц); C – коэффициент энкодера 112000; j, k – коэффициенты в пределах 1..32765. Напомним, что угловую скорость по оси можно вычислить из скорости вращения вала сервопривода n по формуле

$$\omega_t = \frac{360^\circ n}{i_g}, \quad (14)$$

где $\omega_t = 0.004178$ град/с – угловая скорость при звездном гидировании; $i_g = 3380$ – общий передаточный коэффициент.

Учитывая формулы (13) и (14), получаем систему уравнений с тремя неизвестными F, j, k , которая имеет множество решений. Ниже представлена методика решения данной задачи методом последовательных приближений при испытаниях с алгебраическим подбором значений. Шаги методики следующие:

1. **Определим область допустимых значений для частоты управления сервоприводом F при часовом гидировании.** Поскольку сервопривод используется как для гидирования, так и для грубого наведения без перенастройки коэффициентов, необходимо, чтобы управляющая частота не выходила за пределы рабочего диапазона.

Максимальное рабочее значение управляющей частоты на входе сервопривода составляет 200 кГц, для выхода управляющего контроллера – 65535 Гц ввиду ограничения разрядности управляющей команды. Возьмем максимальную скорость серводвигателя при грубом наведении, сопоставим ее с 75 % верхнего предела частоты управления и выразим управляющую частоту для часового ведения. Получим:

- скорость при грубом движении – 9.4 об/с (49151 Гц);
- скорость при часовом ведении – 0.039 об/с (205 Гц).

Отсюда следует, что управляющая частота при часовом гидировании не должна превышать 205 Гц.

2. **Выполним подбор скорости часового ведения экспериментальным путем для точного определения требуемого коэффициента передачи.** Воспользуемся режимом деления входной частоты сервопривода по одному коэффициенту. Расчетное значение скорости вращения вала сервопривода должно составлять $n = 0.039166$ об/с. В качестве начального значения частоты управления возьмем значение вдвое меньшее от верхнего предела, $F = 100$ Гц. Из формулы (13) получаем коэффициент $D = 2553$, который может быть занесен в сервопривод только в целочисленном виде. Однако из-за погрешностей управления полученные значения не гарантируют стабильного гидирования при эксперименте с ними. Это связано с погрешностью частоты F , выдаваемой ПЛК, а также с погрешностью коэффициента деления входной частоты D в серводрайвере. Данные ошибки обусловлены погрешностью кварцевых резонаторов, примененных в ПЛК и серводрайвере, а также задержками в схемах и программах управления. Повлиять на эти факторы или точно их предопределить не представляется возможным, поэтому подбирается экспериментальное значение D , которое компенсирует уход. При проведении эксперимента телескоп устанавливается в положение, близкое к зениту, для минимизации рефракционного эффекта. Для грубой подстройки рекомендуется менять частоту управления F , для более точной – коэффициент D . Для оценки качества гидирования использовалась программа PHD Guiding, в которой отображается график гидирования.

В результате были получены новые значения $F_e = 100$ Гц и $D_e = 2556$. Из формул (13) и (14) выразим коэффициент передачи i_g и подставим полученные значения F_e и D_e . Тем самым найдем экспериментальный коэффициент передачи i_{ge} , компенсирующий погрешности управления:

$$i_{ge} = \frac{360^\circ F_e}{\omega_t D_e}. \quad (15)$$

В нашем случае значение i_{ge} составило 3371.11.

3. **Выполним предварительные расчеты для первого точного подбора скорости гидирования.** Объединив формулы (13) и (14), получим

$$\omega_t = 360^\circ \frac{F j}{C i_g k}, \quad (16)$$

где ω_t, C, i_g – константы, а F, j, k – искомые переменные. Обозначив все константы переменной W , в результате получим

$$\frac{\omega_t C i_g}{360^\circ} = F \frac{j}{k} = W, \quad (17)$$

где W – переменная, введенная для краткости записи.

К формуле (14) применим экспериментальный коэффициент передачи i_{ge} и вычислим экспериментальное значение W_e . В нашем случае $W_e = 4381.84$.

4. **Выполним алгебраический подбор значений F, j, k для заданного значения числа W_e .** В математической среде Wolfram Mathematica была написана программа перебора значений F, j, k по формуле (16) со следующими условиями:

- значения F должны быть целочисленными в пределах 50–200 Гц;
- значения j, k должны быть целочисленными в пределах 1..32765.

Программа поочередно подставляет значения в выражение (15), вычисляет W , и, если значение W соответствует заданному значению W_e в пределах расчетной погрешности 0.055 %, выводит на экран найденные значения F, j, k .

5. **Применим полученные значения на практике.** Значения запрограммируем в сервопривод и ПЛК, запустим телескоп и в программе PHD Guiding построим график гидирования. При одной частоте F подбираются два значения коэффициента k , чтобы кривая отклонения гидирования уходила вниз (см. рис. 7) для одного значения и вверх – для другого (см. рис. 8).
6. **Найдем экспериментальное отклонение графика гидирования.** По графикам рис. 7 находим величину отклонения Q кривой в пикселях за одно и то же время. Далее получаем значения Q_1 и Q_2 для двух случаев. Подставив использованные при этом коэффициенты F, j, k в формулу (17), находим значения W_1 и W_2 .
7. Вычислим новое экспериментальное значение W_3 из полученных значений для $Q = 0$:

$$W_3 = W_2 - Q_2 \frac{W_1 - W_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (18)$$

Согласно формуле (18) находим коэффициент W_3 , при котором значение Q равно нулю или стремится к минимальному отклонению на графике гидирования. Полученное значение W_3 принимаем за новое экспериментальное значение W_e и возвращаемся к новому алгебраическому подбору в пункте 4. Далее аналогично повторяются шаги 4–7, но по мере более точного подбора значений увеличивается время отсчета погрешности на графике гидирования. В нашем случае понадобилось 2–3 итерации, чтобы прийти к стабильному результату – график гидирования оставался ровным на протяжении 20 минут!

Помимо постоянного отклонения на графике рис. 7 можно заметить периодическую ошибку гидирования, которая свидетельствует о неравномерности хода механики, возможных заеданиях или дефектах движущихся частей. Замерив период колебаний на графике и сопоставив его с периодом вращения движущихся частей, можно найти элемент, вносящий погрешность. В нашем случае была выявлена неточность сопряжения редуктора с червячным валом, что потребовало более точной подгонки конструкции и применения дисковой муфты сопряжения валов.

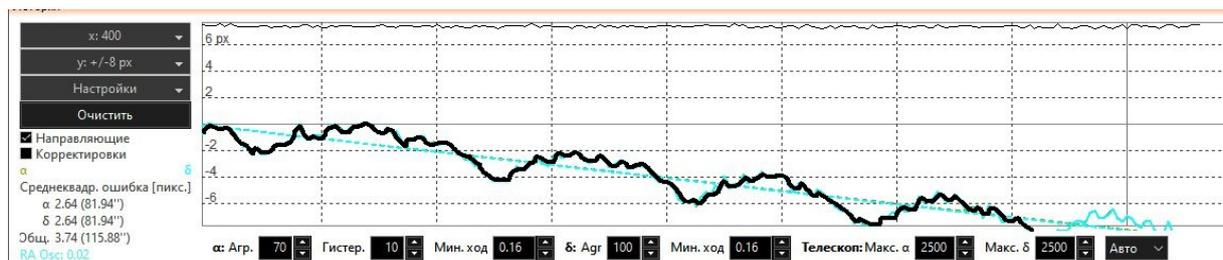


Рис. 7. Отклонение графика гидирования вниз

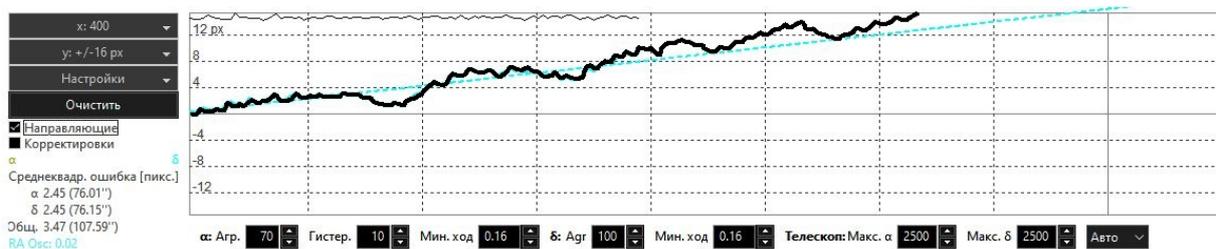


Рис. 8. Отклонение графика гидирования вверх

5.2 Методика калибровки коэффициента позиционирования K_x

Коэффициент позиционирования K_x необходим для пересчета из машинной системы координат (счетчик X) в значение угла по t . Фактически коэффициент указывает на соотношение угла по t , пройденного при повороте, к количеству пройденных шагов счетчика X , а именно:

$$K_x = \frac{\Delta t}{\Delta X}. \tag{19}$$

Перед проведением данной калибровки необходимо, чтобы уже была выполнена калибровка коэффициентов скорости часового ведения и обеспечивалась возможность перемещения телескопа из одной точки в другую без выключения часового ведения.

Для калибровки выбираются две точки на часовой оси t_1 и t_2 , отстоящие от зенита примерно на 30° по разные стороны. Балансировка монтировки должна быть такой, чтобы при прохождении от t_1 к t_2 не возникало точек дисбаланса по оси Ra. Прижим главной шестерни к червячному валу должен быть равномерным.

Во время проведения калибровки ось склонения должна быть жестко закреплена.

Калибровка выполняется следующим образом:

1. Телескоп устанавливается в положение t_1 , записывается значение счетчика положения X_1 . Затем телескоп переводится в положение t_2 и записывается значение X_2 . Далее вычисляется $\Delta X = X_2 - X_1$.
2. Телескоп снова устанавливается в положение t_1 , включается часовое ведение, и с помощью средств астрометрирования определяются координаты текущего положения. Полученные координаты по Ra переводятся в секунды и записываются как t_1 .
3. Затем телескоп перемещается на расстояние ΔX в сторону точки t_2 с включенным часовым ведением. В конечной точке t_2 выполняется астрометрирование. Полученные координаты по Ra переводятся в секунды и записываются как t_2 .
4. Вычисляется $\Delta t = t_2 - t_1$. Замеры производятся несколько раз (пп. 2–4) для получения устойчивой повторяемости Δt с одинаковым отклонением при движении на одно и то же расстояние ΔX .
5. Усредненные значения Δt и ΔX подставляются в формулу (19), и таким образом мы получаем конечное значение коэффициента позиционирования K_x .

5.3 Методика оценки погрешности наведения по оси Ra

Чтобы объективно говорить о погрешности наведения, приведем используемую методику определения ошибок наведения. Авторы выделяют следующие основные типы ошибок:

Абсолютная ошибка. Характеризует ошибку наведения по координатам при движении от зенита к горизонту, когда синхронизация небесных координат проводилась в зените. Телескоп устанавливается в положение, близкое к зениту, выполняется астрометрия и синхронизация текущих небесных координат (процедура *Sync*). Затем по оси Ra труба опускается к горизонту с шагом в один час. На каждом шаге измеряется разница между показаниями координат Ra телескопа и координатами, полученными при астрометрировании в данном положении. Процедура выполняется в двух направлениях: от зенита к горизонту – прямой ход, от горизонта к зениту – обратный ход. Задаваемые координаты шагов в прямом и обратном направлении должны совпадать. Данная ошибка позволяет оценить погрешность наведения, вызываемую рефракцией и гнутием трубы.

Таблица 2. Абсолютная ошибка наведения в зависимости от угла t

Абсолютная ошибка	7''	14''	16''	18''	15''	18''	19''	17''	14''
Положение по t	0 ^h	23 ^h	22 ^h	21 ^h	20 ^h	21 ^h	22 ^h	23 ^h	0 ^h

Экспериментальное усредненное распределение абсолютной ошибки наведения в зависимости от часового угла t приведено в таблице 2 (число итераций – 3). Измерения проводились как в прямом направлении (от 0 до 20 ч), так и в обратном (от 20 до 1 ч). Минимальная величина ошибки составила 6'' (положение, близкое к зениту), максимальная – 19'' (положение, близкое к горизонту). Среднеквадратичная величина абсолютной ошибки наведения составила 15.71''.

Относительная ошибка. Характеризует ошибку при фиксированном сдвиге (одна минута) по координатам для различных положений трубы от зенита к горизонту. Относительная ошибка оценивает точность коррекции ошибки наведения монтировки в зависимости от положения трубы относительно горизонта. Ниже приведена методика нахождения данной ошибки:

1. Телескоп устанавливается в начальное положение, близкое к зениту.
2. Выполняется астрометрия и синхронизация небесных координат (процедура *Sync*).
3. По оси Ra труба опускается к горизонту с шагом в одну минуту.
4. Проводится астрометрия и вычисляется разница между текущими координатами и координатами, полученными при астрометрировании.
5. По оси Ra труба опускается к горизонту с шагом в один час, затем повторяется п. 2.

В таблице 3 приведены усредненные экспериментальные значения относительной ошибки, которая не имеет корреляции с углом t . Ее среднеквадратичное значение составило 0.118''.

Таблица 3. Относительная ошибка наведения в зависимости от угла t

Относительная ошибка	0.1''	0.2''	0.1''	0''	0.1''
Положение по t	0 ^h	23 ^h	22 ^h	21 ^h	20 ^h

Ошибка при перекладке монтировки. Возникает вследствие люфта в червячной передаче и опорно-шарнирных механизмах монтировки при ее перекладке на 12 ч по оси Ra. Данная ошибка определяется следующим образом:

1. Установить трубу телескопа в положение, близкое к зениту.
2. Произвести астрометрирование положения и синхронизацию небесных координат (процедура *Sync*).
3. Переместить трубу телескопа на противоположную сторону от колонны в положение, близкое к зениту.
4. Выполнить астрометрирование положения.

5. Найти разницу между текущим положением телескопа по оси Ra и данными астрометрирования. К полученной разнице прибавить 12 ч – если положение трубы изменено с восточной на западную сторону относительно колонны, или вычесть 12 ч – если с западной на восточную.
6. Для усреднения результата повторить вышеперечисленные пункты несколько раз.

При испытаниях ошибка при перекладке монтировки составила $2' 30''$ RMS.

5.4 Методика коррекции погрешности наведения

На текущий момент используется методика коррекции погрешности наведения по данным астрометрирования после наведения в ручном режиме. Коррекция производится следующим образом:

1. После наведения телескопа выполняется астрометрия кадра.
2. Из полученных таким образом координат и текущих координат телескопа вычисляется разница – текущая ошибка наведения.
3. Затем телескоп подводится на величину полученной ошибки.

Данный способ также можно реализовать другим методом: после наведения и получения координат повторно выполнить процедуру синхронизации (Sync), а затем снова следовать целевым координатам. Основное требование к данной методике – низкая относительная ошибка наведения. В других проектах авторами были успешно испытаны программы для астрометрии в офлайн-режиме с автоматической подводкой телескопа.

6 Выводы

Одним из главных результатов применения сервопривода в модернизации оси прямого восхождения стало появление возможности автоматизированного управления наведением, значительное сокращение времени и повышение точности наведения. После модернизации была проведена оценка работы монтировки с измерением основных показателей качества. В испытаниях участвовала только ось Ra, ось Dec была зафиксирована. Измерения проводились без перекладки монтировки. Получены следующие результаты:

- Ошибка часового ведения составила $2''$ на протяжении 40 минут. Периодическая ошибка часового ведения – $1''$, время периода ошибки – 55 секунд.
- Абсолютная ошибка наведения по звездным координатам составляет $15.71''$ RMS.
- Относительная ошибка составляет $0.118''$ RMS на дистанции не более $1'$.
- Ошибка при перекладке монтировки – $2' 30''$ RMS.
- Момент усилия на сервоприводе при часовом ведении – 0.09 Нм.
- Момент усилия на сервоприводе при средней коррекции – 0.11 Нм.
- Момент усилия на сервоприводе при грубой коррекции и наведении – 0.14 Нм.

Несмотря на то что ось Dec была жестко закреплена, при движении телескопа по оси Ra по результатам астрометрирования также наблюдалось изменение координат по оси Dec. Для телескопа с рабочим полем $15 \times 15'$ полученная точность наведения удовлетворительна – объект гарантировано попадает в поле зрения. Автоматическая коррекция по данным астрометрирования может значительно снизить ошибку позиционирования до $0.118''$ RMS.

Применение сервопривода с двигателем типа PMSM позволяет упростить механику монтировки и достигнуть хороших эксплуатационных показателей несмотря на возраст инструмента.

В итоге модернизация обеих осей монтировки позволила перейти к проведению регулярных наблюдений удаленно, в полуавтоматическом режиме. Следующим этапом авторы планируют автоматизировать синхронизацию купола с положением монтировки.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН “КрАО РАН” и при поддержке ООО “АРТЕЛАБ”.

Литература

- Гусев Н.В., Букреев В.Г., 2007. Системы цифрового управления многокоординатными следящими системами. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. [Gusev N.V., Bukreev V.G., 2007. Digital control systems for multi-coordinate tracking systems. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. (In Russ.)]
- Михельсон Н.Н., 1976. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М: Наука. [Michelson N.N., 1976. Optical telescopes. Theory and construction. Moscow: Nauka. (In Russ.)]
- Назаров С.В., Харченко А.В., 2022. Ученые записки физического факультета Московского университета. № 4. С. 2240204. [Nazarov S.V., Kharchenko A.V., 2022. Uchenye Zapiski Fizicheskogo Fakulteta Moskovskogo Universiteta, no. 4, p. 2240204. (In Russ.)]
- Сервоприводы. Основы, характеристики, проектирование, 2000. Серия “Практика приводной техники”. Т. 7. СПб.: ЗАО СЕВ-ЕВРОДРАЙФ. [Servo drives. Basics, characteristics, design, 2000. Drive Engineering – Practical Implementation, vol. 7. St. Petersburg: ZAO SEW-EURODRIVE. (In Russ.)]

Applying a PMSM servo drive in the modernization of pointing and sidereal tracking system of the MTM-500 telescope

A.S. Krivenko , *S.V. Nazarov*, *M.S. Butuzova*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
krivenko86@yandex.ru

Abstract. This paper presents the experience of modernizing the pointing and sidereal tracking system of the MTM-500 telescope by replacing the conventional right ascension axis drive with a servo drive based on a permanent-magnet synchronous motor (PMSM) equipped with a high-resolution encoder. We consider the key parameters in selecting a servo drive (such as speed, torque, and resolution), gear ratio calculation, and procedures of calibration and synchronization with the celestial coordinate system. A programmable logic controller featuring the hardware support for motion control was used to ensure the deterministic generation of control pulses. Positioning algorithms accounting for the continuous motion of celestial objects are described, along with a method for calibrating sidereal tracking coefficients based on the analysis of guiding. Test results demonstrate a sidereal tracking error of no more than 2'' over 40 minutes, an absolute error of coordinate pointing of 15.71'', and a relative correction error of 0.118''. It is shown that applying servo drives makes it possible to implement a single-motor control architecture, facilitate the mechanical design, and ensure high positioning accuracy.

Key words: sidereal tracking, positioning, guiding, control system, sidereal time, PMSM