

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 520.272.28

СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-32

© 2012 г. М. Н. Кайдановский, Н. Ю. Белоусов, В. Ю. Быков,
Г. Н. Ильин, И. Г. Рубин, В. Г. Стэмповский, А. М. Шишкин

Институт прикладной астрономии РАН

Россия, 191187, С.-Петербург, наб. Кутузова, 10

Поступила в редакцию 20.07.2011 г.

Радиотелескопы РТ-32 радиоинтерферометрического комплекса Российской академии наук “Квазар-КВО” оснащены уникальными антеннами $\varnothing 32$ м. Они обеспечивают проведение радиоастрономических наблюдений в сантиметровом диапазоне волн как в составе сети радиотелескопов, так и в режиме одиночного телескопа. Конструкция антенной системы обладает значительными размерами и весом, что определяет технические трудности по управлению движением РТ-32. Электропривод антенной системы должен обеспечивать два сильно различающихся режима использования: с одной стороны, режим быстрой смены положения, а с другой — прецизионное отслеживание заданной траектории космического источника радиосигнала. Высокая эксплуатационная нагрузка и требования по использованию радиотелескопов в составе радиоинтерферометрических сетей накладывают на электропривод и систему управления жесткие требования по надежности. Система наведения состоит из подсистем, содержащих двигатели постоянного тока, силовое электрооборудование для управления двигателями, датчики положения на основе вращающихся трансформаторов и другие элементы. Интеграция всех подсистем осуществляется с помощью устройств коммутации управляющих сигналов и устройств преобразования координат. Работа системы подчинена рабочей станции контроля и управления, основу которой составляет промышленный компьютер со специально разработанным программным обеспечением.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Многоволновой прецизионный радиотелескоп нового поколения с \varnothing зеркала 32 м был разработан и изготовлен в рамках проекта по созданию национальной радиоинтерферометрической сети “Квазар-КВО” [1–4]. В настоящее время построены и активно работают три радиотелескопа в обсерваториях “Светлое” в Ленинградской области, “Зеленчукская” на Северном Кавказе и “Бадары” вблизи озера Байкал. Радиотелескоп обсерватории “Бадары” представлен на рис. 1.

Радиотелескоп предназначен для фундаментальных исследований небесных объектов различной природы в диапазонах волн от 1.35 до 21 см [5–8]. Основным элементом радиотелескопа является рефлекторная антенная система (а.с.). Антенная система построена по модифицированной схеме Кассегрена с квазипараболическим основным зеркалом и квазигиперболическим вторичным зеркалом (контррефлектором) $\varnothing 4$ м. Важной особенностью фокусирующей системы является небольшое отклонение фокальной оси вторичного зеркала от оси вращения квазипараболоида основного зеркала. Такая схема ориентации осей позволяет разместить первичные облучатели приемных устройств радиотелескопа [9, 10] на окруж-

ности диаметром около 3 м и обеспечить оперативное переключение диапазонов принимаемых сигналов за счет настройки положения контррефлектора [3].

Опорно-поворотное устройство антенной системы обеспечивает вращение по азимуту и углу места. Электропривод главного зеркала обеспечивает перемещения а.с. в пределах углов $\pm 270^\circ$ по азимуту и $0-90^\circ$ по углу места.

Азимутальное движение а.с. осуществляется по круговому рельсовому пути $\varnothing 40$ м. Азимутальный привод состоит из четырех спаренных тележек, каждая из которых оснащена двумя парами двигателей постоянного тока разной мощности.

Значительный вес конструкции РТ-32 (более 600 т) и требования, предъявляемые к динамическим характеристикам движения радиотелескопа, определяют параметры электропривода антенной системы и системы управления.

Электропривод обеспечивает высокую скорость перемещения по азимутальной (до 1.5 град/с) и угломестной (до 1 град/с) координатам с ускорением до 0.8 град/с² на этапе разгона [3]. При этом система управления а.с. должна контролировать динамику движения радиотелескопа таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность, отсутствие колебаний, динамичный, но плавный разгон и такое же торможение, а также исключить



Рис. 1. Антенная система радиотелескопа РТ-32 комплекса “Квазар-КВО”.

ударные нагрузки на конструкцию радиотелескопа. При возникновении нештатных ситуаций должно быть обеспечено выполнение безопасной остановки радиотелескопа.

Электропривод а.с. работает в двух режимах. Переброс а.с. в заданную область происходит с помощью более мощных двигателей большой скорости и используется для максимально быстрой смены ориентации главного зеркала антенны при переходе к следующему объекту наблюдения. Режим сопровождения источника обеспечивается двигателями малой скорости, которые включаются после достижения антенной системой расчетной окрестности координат радиоисточника в пределах $\pm 2'$. С помощью двигателей радиотелескоп выходит на требуемую траекторию и сопровождает источник радиосигнала.

Требования к точности сопровождения определяются, как $1/20$ ширины диаграммы направленности радиотелескопа по половинной мощности $\theta_{0,5} = k\lambda/D$, где k – коэффициент порядка единицы, зависящий от эффективности облучения зеркала, λ – длина волны, D – диаметр антенны. Для самой короткой волны $\lambda = 1.35$ см величина $\theta_{0,5}$ составляет $1.5'$, и таким образом требуемая погрешность сопровождения не должна превышать $\pm 5''$.

Обе скорости движения а.с. радиотелескопа – большая и малая – реализованы в электроприводе с помощью разнотипных двигателей постоянного тока, подключенных через редукторы с соответствующими передаточными числами. Переключе-

ние скоростей осуществляется системой планетарных муфт и дисковых тормозов.

Электропривод контррефлектора построен по односкоростной схеме и позволяет перемещать вторичное зеркало на расстояние ± 75 мм по трем линейным координатам и вращать вокруг оси на 360° . Требования по точности установки контррефлектора также весьма высоки и составляют ± 0.01 мм по линейным координатам X , Y и Z и $\pm 1'$ по угловой координате γ .

Структура системы управления электроприводом а.с. представлена на рис. 2. Управление электроприводом радиотелескопа происходит в следующем порядке. Команды от центрального компьютера радиотелескопа [11–13] передаются на рабочую станцию контроля и управления (РСКУ), далее на аппаратуру автоматики системы наведения, которая обеспечивает управление силовыми устройствами электропривода. В состав аппаратуры автоматики системы наведения входят блоки коммутации сигналов управления, блоки возбуждения двигателей (БВД) и тиристорные преобразователи (ТП) для питания якорных цепей двигателей электропривода а.с. радиотелескопа. Коммутирующие устройства автоматики системы наведения сосредоточены в соответствующих блоках управления и коммутации БУК-М электропривода главного зеркала, БУК-КР для контррефлектора радиотелескопа.

В управляющем компьютере РСКУ формируется последовательность команд, которая передается на аппаратуру системы наведения [14], и вычисляется разность между заданным и текущим

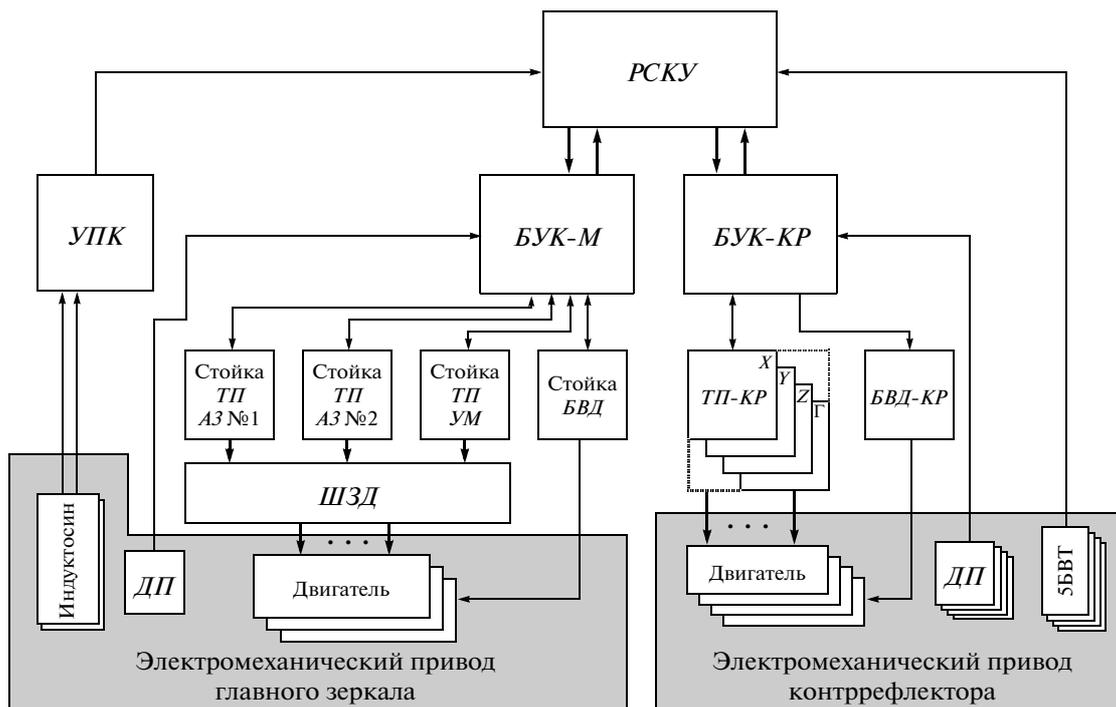


Рис. 2. Функциональная схема системы контроля и управления электроприводом а.с. радиотелескопа РТ-32. РСКУ – рабочая станция контроля и управления; УПК – устройство преобразования координат; БУК-М – блок управления и коммутации модернизированный; БУК-КР – блок управления и коммутации контррефлектора; ТП – тиристорные преобразователи; БВД – блоки возбуждения двигателей; АЗ – азимут; УМ – угол места; ШЗД – шкаф защиты двигателей; ДП – датчики положения.

положениями а.с. радиотелескопа, получаемыми от датчиков и устройства преобразования координат (УПК). По результатам вычислений задается требуемая динамика движения а.с. радиотелескопа и формируется соответствующее управляющее напряжение, определяющее скорость движения а.с.

Получив команду от РСКУ, коммутационный блок БУК-М включает в соответствии с заданным алгоритмом необходимые исполнительные устройства и коммутирует управляющие напряжения в зависимости от скоростного диапазона и положения антенны. Исполнительные устройства, в свою очередь, подают питание на двигатели и тормозные устройства а.с., а также сообщают в блок коммутации о своей исправности и о факте выполнения команды.

2. СОСТАВ И НАЗНАЧЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Аппаратура электропривода а.с. радиотелескопа смонтирована в семи стандартных стойках и размещается в помещении кабельной петли в основании опорно-поворотного устройства антенны радиотелескопа РТ-32.

2.1. Электропривод главного зеркала

Состав аппаратуры электропривода главного зеркала а.с. радиотелескопа во многом определяется типом используемых электродвигателей.

В приводе большой скорости использованы восемь двигателей постоянного тока ДПМ-42 по азимутальной координате и четыре аналогичных двигателя по угломестной координате. В приводе малой скорости работают двигатели постоянного тока ДПМ-11: восемь по азимуту и два по углу места.

Питание якорей электродвигателей обеспечивают тиристорные преобразователи двух типов (различающихся по мощности). Для защиты электродвигателей от перегрузок в якорные цепи включены автоматические выключатели. Питание обмоток возбуждения электродвигателей осуществляется от блоков возбуждения БВД, которые обеспечивают также управление планетарными муфтами и тормозами малой скорости, срабатывающими при переключении диапазона скоростей движения а.с. радиотелескопа.

2.2. Электропривод контррефлектора

Контррефлектор радиотелескопа перемещается по четырем координатам для обеспечения фокусировки а.с. на разных диапазонах длин волн.

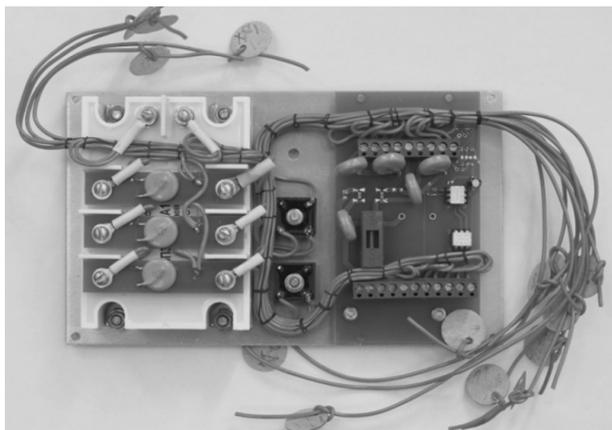


Рис. 3. Базовый модуль возбуждения двигателей.

Все четыре электропривода построены по одной схеме и состоят из двигателя с редуктором, датчика угла поворота, определяющего положение контррефлектора, и датчика предельных перемещений, задающего максимальный диапазон перемещения контррефлектора по линейной координате.

Силовая схема включения электропривода в целом аналогична схеме включения привода главного зеркала: якорные цепи двигателей питаются от блоков тиристорных преобразователей, а цепи возбуждения от специального блока возбуждения *БВД-КР*. Для управления автоматической работой силовых компонентов служит коммутационный блок *БУК-КР*.

2.3. Тиристорные преобразователи

Схема силовой части *ТП* состоит из двух групп мостовых схем на тиристорах. Управление обеими группами тиристоров осуществляется от одной системы импульсно-фазового управления. Переключение выпрямителей, обеспечивающее реверс выходного напряжения *ТП*, осуществляется от логического устройства и переключателя характеристик. Помимо перечисленных функциональных узлов в состав *ТП* входят устройство ограничения тока, нелинейное звено (линеаризирующее статическую характеристику *ТП* в режиме работы с прерывистыми токами), блок защит и регулятор скорости, а также другие устройства [15].

Сигнал обратной связи по скорости поступает в *ТП* от четырех соединенных последовательно (по якорной цепи) тахогенераторов ТГ-102. В *ТП* малой скорости использованы силовые оптотиристорные модули, а в *ТП* большой скорости — таблеточные тиристоры с трансформаторной схемой управления. Питание *ТП* осуществляется от трехфазной сети с напряжением 380 В и частотой 50 Гц.

2.4. Стойка возбуждения двигателей

В электроприводе РТ-32 использованы три блока возбуждения двигателей *БВД*, размещенных в одной стойке. В корпусе каждого блока находятся силовые питающие трансформаторы, модули включения магнитных пускателей и субблоки трех типов: БИТ-2, БИТ-1 и БУТ. Первые два являются источниками постоянного тока для питания обмоток возбуждения двигателей соответственно большой и малой скорости, а также управления дисковыми тормозами малой скорости. Субблок БУТ является коммутатором трехфазного питающего напряжения и предназначен для управления планетарными муфтами посредством гидротолкателей, приводимых в движение асинхронными двигателями.

Изначально субблоки были построены на основе оптотиристоров, включенных по схеме трехфазных однополупериодных выпрямителей (БИТ-1 и БИТ-2) и коммутаторов силовых цепей (БУТ).

Вследствие того, что тиристоры работают на индуктивную нагрузку — обмотку возбуждения двигателей, при включении тиристора возникают значительные импульсные броски напряжения (до нескольких киловольт), приводящие к постепенной деградации тиристора и выходу его из строя. Поэтому при модернизации *БВД* были разработаны новые субблоки возбуждения двигателей и управления тормозами с использованием современных силовых трехфазных оптореле с контролем перехода фазы через ноль. Таким образом, удалось решить проблему надежности блока возбуждения, за счет более длительного срока службы оптореле, составляющего до 50–100 тыс. часов, а также установки дополнительных защитных устройств на основе варисторов.

Все субблоки, входящие в состав *БВД*, построены на основе базового модуля возбуждения двигателя (б.м.в.д.), внешний вид которого показан на рис. 3. Такое решение стало возможным, поскольку субблоки выполняют схожие по алгоритму функции и близки по параметрам.

Схема б.м.в.д. состоит из оптореле переменного тока, выпрямителя, схемы защиты модуля, схемы индикации и выдачи квитанции обратной связи.

Требуемая конфигурация субблока достигается установкой нужных электронных компонентов и коммутацией составных частей б.м.в.д. Модуль устанавливается в существующий конструктив субблока непосредственно в обсерваториях и сразу же готов к эксплуатации в составе *БВД*. Такой подход позволил выполнить модернизацию аппаратуры стоек возбуждения в короткие сроки (не более недели) без остановки регулярных наблюдений.

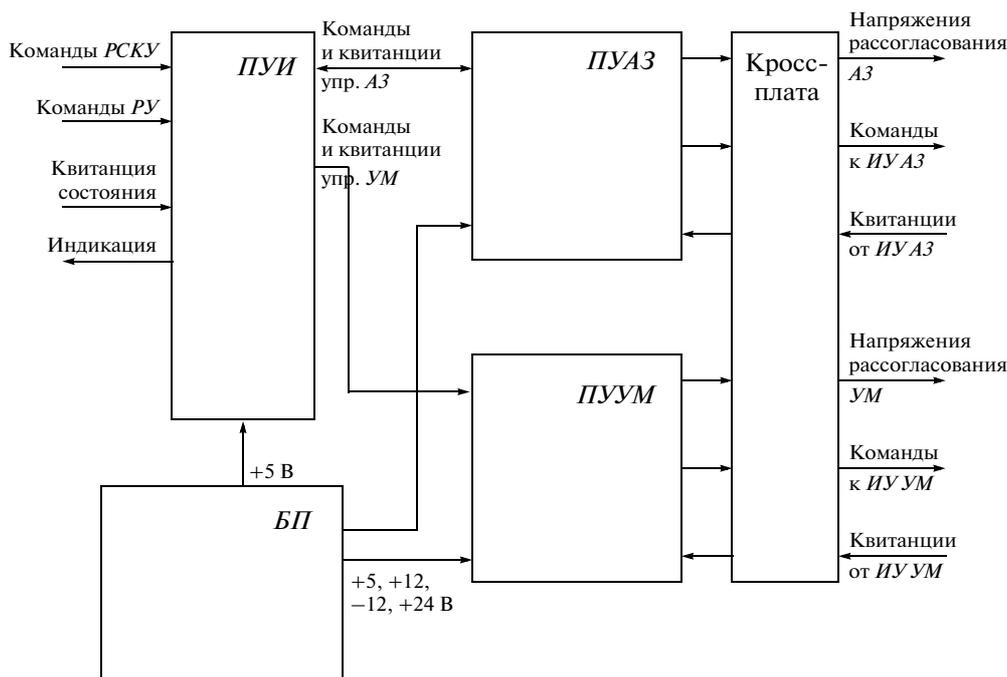


Рис. 4. Функциональная схема блока БУК-М. ПУАЗ, ПУУМ – платы управления электроприводом соответственно по азимуту и углу места; ПУИ – плата управления и индикации; РУ – ручное управление; ИУ – исполнительные устройства; БП – блок питания.

3. КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ

В соответствии с проектом аппаратура системы наведения а.с. радиотелескопа была размещена в стойке АСН-02 в виде нескольких блоков. Каждый из блоков выполнял отдельный набор функций. Элементной базой этих блоков служили микросхемы двоичной логики малой степени интеграции, а также электромагнитные реле в большом количестве. Все это являлось причиной громоздких схемотехнических решений, вследствие чего система обладала сравнительно низкой надежностью и ремонтпригодностью.

Увеличение количества и интенсивности радиоастрономических наблюдений предъявило повышенные требования к надежности системы наведения. В результате было принято решение разработать новый блок управления коммутацией БУК-М, функциональная схема которого представлена на рис. 4. Основой устройства нового блока стало использование микроконтроллеров ATmega, реализующих алгоритмы управления, а также твердотельных оптореле нового поколения (КР293КП отечественного производства) в качестве исполнительных устройств узлов коммутации.

Модернизированный блок управления коммутацией выполнен в 19-дюймовом корпусе, на лицевой панели которого расположены органы

управления и индикации. Внешний вид блока показан на рис. 5.

Аппаратура блока принимает команды управления от РСКУ, перерабатывает их и поочередно выдает на приборы и устройства электропривода. По мере срабатывания этих устройств приходят квитанции об исполнении команд, и на этом основании принимается решение о продолжении процесса включения электропривода. Алгоритмы включения заложены в программе микроконтроллеров, расположенных на платах управления электроприводом по азимуту (ПУАЗ) и углу места (ПУУМ). Плата управления и индикации (ПУИ) служит для коммутации управляющих сигналов от РСКУ, приема и индикации квитанций положения антенны, а также контроля блокировок безопасности и концевых ограничений.

Конструкция блока обеспечивает легкий доступ к электронным узлам, что существенно облегчает проведение ремонтных и профилактических работ при необходимости. Оптоэлектронные элементы и микроконтроллеры установлены на dip-панелях с целью упрощения и ускорения их замены.

4. УСТРОЙСТВО СЪЕМА УГЛОВЫХ КООРДИНАТ

Устройство съема угловых координат (у.с.у.к.) в совокупности с датчиками положения а.с. по угловым координатам в значительной степени

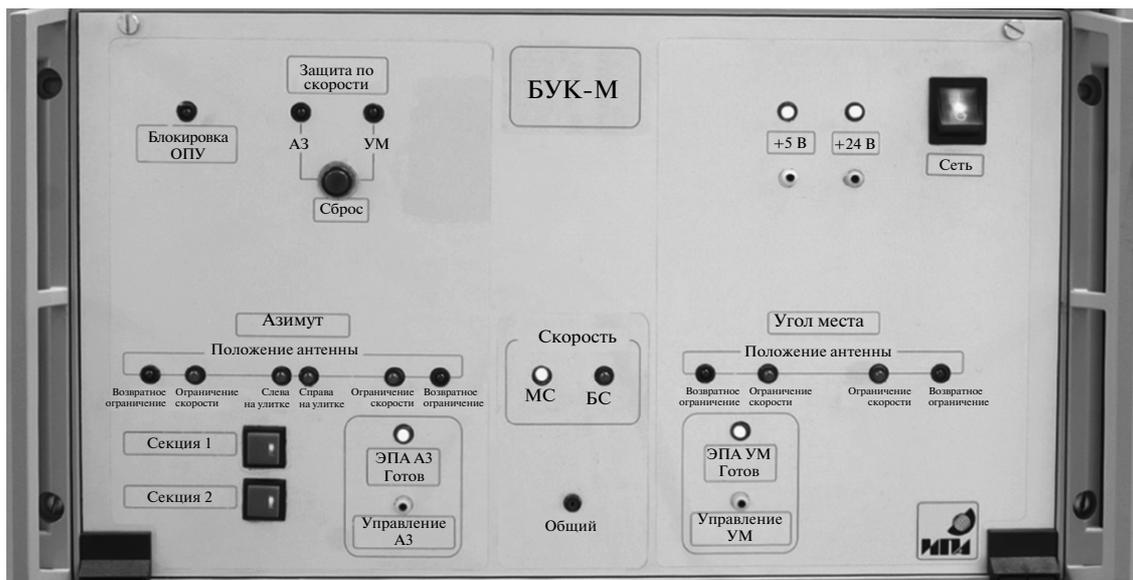


Рис. 5. Передняя панель блока БУК-М со средствами индикации состояния электропривода (ЭПА – электропривод; ОПУ – опорно-поворотное устройство; МС и БС – малая и большая скорости).

определяет точностные характеристики наведения радиотелескопа на источник космического излучения и его последующего сопровождения. У.с.у.к. представляет собой совокупность датчиков углового положения а.с. и устройства, преобразующего сигналы датчиков по азимутальной и угломестной координатам в цифровой код (устройство преобразования координат УПК).

Для того чтобы сопровождать источник с точностью 5", необходимо преобразовывать информацию датчиков положения а.с. с разрешением не хуже 1" дуги, или 20 бит в двоичном коде.

Для реализации измерений координат а.с. радиотелескопа с секундным угловым разрешением отсчетные устройства построены по двухканальной схеме, состоящей из датчиков грубого отсчета и точного отсчета. При этом с помощью датчика грубого отсчета формируется 8 старших разрядов кода положения антенны, а с помощью точного – 12 младших разрядов кода.

Датчиком точного отсчета положения а.с. радиотелескопа РТ-32 служит многополюсный (256 полюсов) вращающийся трансформатор с плоскими обмотками – так называемый индуктосин. По принципу работы датчики грубого и точного отсчета не отличаются друг от друга. В результате для формирования цифрового кода углового положения датчиков стало возможным применить однотипные микросхемы обработки аналоговых сигналов датчиков, что существенно упростило разработку преобразователя [16] и одновременно позволило унифицировать элементную базу УПК для этих датчиков. В разработанных УПК использована современная элементная база фирмы Analog Devices, отличающаяся малыми га-

баритами и оптимальным соотношением цена/качество. Применение указанной элементной базы, а также использование встроенных средств цифровой обработки сигналов позволили придать у.с.у.к. ряд дополнительных качеств.

Разработанное у.с.у.к. выполняет следующие функции:

- преобразует сигналы от датчиков углового положения главного зеркала по азимутальной и угломестной координате в 20-разрядный цифровой код;
- проводит аппаратный расчет скорости по обеим координатам;
- измеряет температуру блоков;
- обеспечивает передачу данных по двухпроводному интерфейсу RS-485 с гальванической развязкой;
- обеспечивает ввод угловых координат в РСКУ на плату P10-D96 в 20-разрядном параллельном коде;
- отображает координаты в двоичном и десятичном виде на знаковинтезирующих жидкокристаллических и светодиодном индикаторах;
- отображает скорость, температуру на жидкокристаллическом индикаторе.

Устройство несложно в производстве и имеет высокую надежность, малые габариты и энергопотребление. Период обновления данных о координате составляет 28 мс.

5. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ

Система управления радиотелескопом включает ряд подсистем для обеспечения совместного согласованного функционирования сложного измерительного инструмента. Работа всех подсистем координируется со стороны центрального компьютера управления радиотелескопом. Система контроля и управления антенной (с.к.у.а.) обеспечивает целенаправленное движение антенны в соответствии с решаемыми задачами при подготовке к наблюдениям и в ходе самих наблюдений. Подсистема управления движением а.с. представляет собой трехуровневую систему формирования, передачи и приема управляющей информации. На верхнем уровне находится центральный компьютер, затем с.к.у.а. и далее исполнительная часть электропривода а.с.

Центральный компьютер осуществляет жестко привязанное ко времени целеуказание для с.к.у.а. заданием координат источника радиосигнала, на который производится перенацеливание, и заданием кусочно-линейной аппроксимации траектории сопровождения источника. Наиболее сложные требования к наведению радиотелескопа предъявляются в случае работы в составе национальных или международных сетей радиоинтерферометров со сверхдлинными базами [17]. В таких сетях большое число радиотелескопов (до 30), разнесенных на тысячи километров, одновременно наблюдают одни и те же источники. Наблюдения длятся сутками и состоят из непрерывных циклов выхода на источник, его сопровождения и перехода к следующему источнику. Среднее число таких циклов составляет 400 за сутки наблюдений.

Основными функциями с.к.у.а. при сопровождении источника являются интерполяция заданной траектории, анализ разности между заданным и реальным положениями а.с. и минимизация этой разности за счет изменения скорости движения а.с. Обратная связь в контуре центральный компьютер—с.к.у.а. обеспечивается регулярными сообщениями о состоянии а.с. и сообщениями о действиях с.к.у.а., формируемых по ходу выполнения заданий центрального компьютера. Обратная связь от электропривода к с.к.у.а. обеспечивается регулярным опросом датчиков положения а.с. и датчиков состояния отдельных элементов электропривода (квитанции). Подсистема управления а.с. функционирует преимущественно в автоматическом режиме, но также допускает вмешательство оператора на всех уровнях.

5.1. Программно-аппаратная интерпретация команд с.к.у.а.

Нижний уровень системы управления а.с. представляет электропривод антенной системы, который имеет аппаратный интерфейс с *РСКУ* и реализует собственную систему команд *РСКУ*—электропривод. Программное обеспечение (ПО) *РСКУ* осуществляет трансляцию команд, поступающих от консоли оператора наведения (*КОН*), и вывод управляющих данных в устройства ввода-вывода данных промышленного компьютера. Цифровой ввод используется для получения данных от датчиков квитанций, а вывод — для подачи команд включения-выключения отдельных элементов электропривода. Цифровой ввод используется также для получения данных от датчиков положения главного зеркала и контррефлектора и для ввода кода времени. Аналоговый вывод позволяет формировать управляющее напряжение для исполнительных устройств электропривода.

5.2. Выполнение заданий

Получив задание от центрального компьютера, *РСКУ* обрабатывает его и формирует в требуемой для исполнительных механизмов электропривода форме команды, обеспечивающие выполнение задания. Исполнительный механизм подтверждает выполнение команды соответствующей квитанцией. *РСКУ* до 1000 раз в секунду опрашивает исполнительные механизмы и устройства измерения-преобразования координат радиотелескопа. По полученным квитанциям и координатам управляющий компьютер *РСКУ* формирует слово состояния антенны и слово состояния контррефлектора, которые отправляются по линии связи в *КОН* и далее в центральный компьютер.

РСКУ формирует и вырабатывает аналоговые управляющие напряжения, которые с помощью плат ввода-вывода данных подаются непосредственно на исполнительные устройства электропривода через блок модулей сопряжения. Взаимодействие *РСКУ* и электропривода представлено на рис. 6.

5.3. Аппаратные решения в с.к.у.а.

Команды и целеуказания кодируются в соответствии с протоколом обмена центрального компьютера с *РСКУ* и по локальной Ethernet-сети серверной передаются на консоль оператора наведения по протоколу TCP/IP.

Компьютер консоли оператора наведения (*КОН*) ретранслирует полученные данные на COM-порт, к которому подключена линия связи *КОН* — *РСКУ*. Для обеспечения надежной передачи сигналов на большие расстояния используются стандартные интерфейсные модули ADAM 4520, преобразующие сигналы протокола RS-232 к RS-422 и обес-

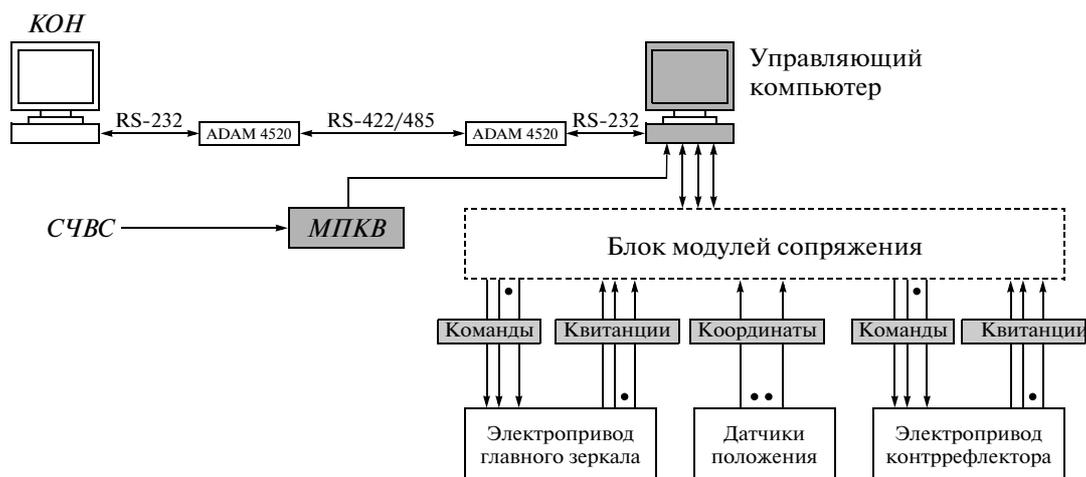


Рис. 6. Схема взаимодействия РСКУ и электропривода а.с. в системе управления движением радиотелескопа РТ-32. КОН – консоль оператора наведения; МПКВ – модуль преобразования кода времени; СЧВС – стандарт службы частоты и времени.

печивающие гальваническую развязку линии передачи сигнала.

Сигналы точного времени, к которым привязана работа с.к.у.а., поступают в РСКУ от водородного стандарта службы частоты и времени (СЧВС) через модуль преобразования кода времени (МПКВ). Модуль предназначен для аппаратного преобразования последовательного импульсного кода времени, поступающего от СЧВС в параллельный цифровой код. Параллельный код на выходе модуля МПКВ формируется один раз в секунду, совпадая с секундной маркой, которая генерируется в системе единого времени обсерватории.

Данные о координатах главного и вторичных зеркал радиотелескопа РТ-32 в виде параллельного кода вырабатываются устройствами преобразования координат [16] и далее вводятся наряду с сигналами квитанций в РСКУ через блок модулей сопряжения. В последнем осуществляется электрическая коммутация линий связи, по которым передаются сигналы управления от РСКУ к исполнительным устройствам электропривода.

В качестве управляющего компьютера в РСКУ используется одноплатный промышленный компьютер серии Rocky 6161E/EG (chipset – Intel 945GV + ICH6) с комбинированной шиной PICMG (PCI/ISA). Компьютер собран на пассивной кросс-плате, имеющей 14 слотов (5 – ISA, 7 – PCI, 2 – ISA/PCI). На системной плате расположены процессор – Pentium-IV с тактовой частотой 3.2 ГГц, оперативная память объемом 2 Гбайт, видеокарта – Intel 945G и контроллеры внешних устройств, к которым подключаются жесткий диск SATA объемом 160 Гбайт, устройство считывания оптических дисков SATA DVD-ROM, привод гибких магнитных дисков 1.44 Мбайт и прочие аксессуары.

5.4. Программные решения в с.к.у.а.

Программное обеспечение управления электроприводом антенны включает в себя ПО РСКУ и ПО КОН.

5.4.1. Организация режима квазиреального времени. РСКУ управляет а.с. в режиме квазиреального времени. Все компоненты программной системы РСКУ иницируются программным таймером, срабатывающим 1000 раз в секунду. Некоторые срабатывания таймера могут блокироваться прерываниями с большим приоритетом, однако это не мешает работе алгоритмов управления, так как выработка управляющего воздействия успевает за изменениями состояния объекта управления.

5.4.2. Операционная среда для ПО КОН и ПО РСКУ. В качестве целевой операционной системы КОН и РСКУ выбрана ОС Linux с ядром 2.6.18, собираемая из дистрибутива Scientific Linux 5.2 [http://www.scientificlinux.org], а в качестве средств разработки прикладного ПО – семейство компиляторов для языков высокого уровня GCC (GNU Compiler Collection) [http://gcc.gnu.org] и библиотека Qt3 классов C++ для разработки приложений с развитым интерфейсом пользователя [http://www.trolltech.com].

5.4.3. Технология разработки и отладки ПО. Разработка и первичная отладка системы наведения РТ-32 как составной части системы управления осуществлены с использованием математической модели объекта управления – а.с., включающей в себя модель привода главного зеркала и модель привода контррефлектора [18].

Многомашинный комплекс на этапе разработки и отладки также был смоделирован с использованием средств виртуализации вычислительных ресурсов. Для этого была применена технология

отладки многомашинной системы управления радиотелескопа РТ-32, включающей три компьютера: центральный, *КОН* и *РСКУ*. Технология отладки основана на использовании средства виртуализации вычислительных ресурсов VMware Workstation компании VMware, Inc. [<http://www.vmware.com>] [19]. Средства виртуализации VMware Workstation позволяют эмулировать межмашинный обмен данными по протоколу TCP/IP и по последовательному интерфейсу, оставляя необходимой разработку программной эмуляции только для специального оборудования, такого как платы ввода-вывода серии PIO производства компании ICP DAS [<http://www.icpdas.com>], используемые для связи с электроприводом.

5.4.4. Организация интерфейса пользователя. Средства организации интерфейса пользователя предоставляют набор классов C++, с помощью которых создается рамочная часть графического интерфейса пользователя, обеспечивается справочная служба, служба ведения протокола и вызов вспомогательной службы, функциональность которой регламентируется только в части организации диалога с пользователем. Рамочная часть графического интерфейса пользователя предоставляет информацию о текущих дате и времени, вводит понятие сеанса как периода времени между запуском программного приложения и его завершением.

При использовании указанных средств справочную службу остается только доукомплектовать html-файлом, содержащим руководство пользователя.

Программное средство для организации интерфейса пользователя написано по стандарту разработки приложений с использованием библиотеки классов Qt, согласно которому все тексты пишутся на английском языке, а приложение снабжается файлом-словарем, с помощью которого система интернационализации приложений обеспечивает интерфейс пользователя на языке, соответствующем установкам операционной системы.

5.5. Функциональность ПО РСКУ

Для разработки ПО с.к.у.а. была создана модель а.с. радиотелескопа, учитывающая некоторые динамические характеристики а.с. радиотелескопа и реальную структуру контура управления. Такой подход был применен с целью сведения к минимуму возможности возникновения нештатных ситуаций при испытании ПО на объекте управления и полностью оправдал себя в процессе отладки.

Модель а.с. абстрагируется от деталей реализации самой а.с. и ее электропривода в той степени, в которой это удобно для формирования управления а.с., т.е. управляющих дискретных сигналов и напряжений. Главное и вторичное зеркала рас-

сматриваются как цельные неупругие объекты, т.е. деформации не учитываются. Принимается допущение, что скорость перемещения по азимуту или углу места прямо пропорциональна подаваемому на двигатели управляющему напряжению.

Внешние факторы, такие как ветровая нагрузка, температурное воздействие на элементы привода (подмораживание), также не принимаются в расчет.

Полностью отказаться от учета массы а.с. все-таки нецелесообразно, так как при аварийной остановке а.с. наложение тормозов сразу после сброса управляющего напряжения до нуля в силу инерции объекта может привести к нежелательным ударным нагрузкам. Для предотвращения таких последствий после сброса управляющего напряжения до наложения тормозов выдерживается экспериментально подобранная пауза. Более того, для режима большой скорости также обеспечивается плавное нарастание и плавное уменьшение скорости движения, при которых не возникают ударные нагрузки. Для режима малой скорости таких ограничений не предусматривается.

Основной режим функционирования ПО РСКУ автоматический, без участия оператора. Вместе с тем этапы подготовки а.с. к наблюдениям так же обязательны, как и собственно наблюдения. Для подготовки и тем более для проведения регламентных работ удобнее локальное управление, непосредственно с пульта РСКУ. Для предоставления такой возможности РСКУ обладает развитым интерфейсом пользователя. С его помощью можно осуществлять все движения а.с., причем РСКУ предоставляет возможность независимого движения по отдельным координатам как главного зеркала, так и контррефлектора. ПО РСКУ обеспечивает три режима работы: ручной, автоматический и с внешним управлением.

Автоматический режим РСКУ избавляет оператора от необходимости контролировать весь процесс перемещения, обеспечивает более плавное движение а.с. и более точное выполнение перемещения. В этом режиме задание определяется с помощью макрокоманд переброса а.с. в заданную точку и установки контррефлектора в заданное положение.

Режим внешнего управления – основной режим функционирования РСКУ. При внешнем управлении все целеуказания в РСКУ поступают от центрального компьютера через КОН. Оператору предоставляется возможность визуально контролировать работу а.с. и, если потребуется, просмотреть файлы протокола: как ранее завершившихся сеансов работы РСКУ, так и текущего. В режиме внешнего управления все команды центрального компьютера отображаются на экране (рис. 7).

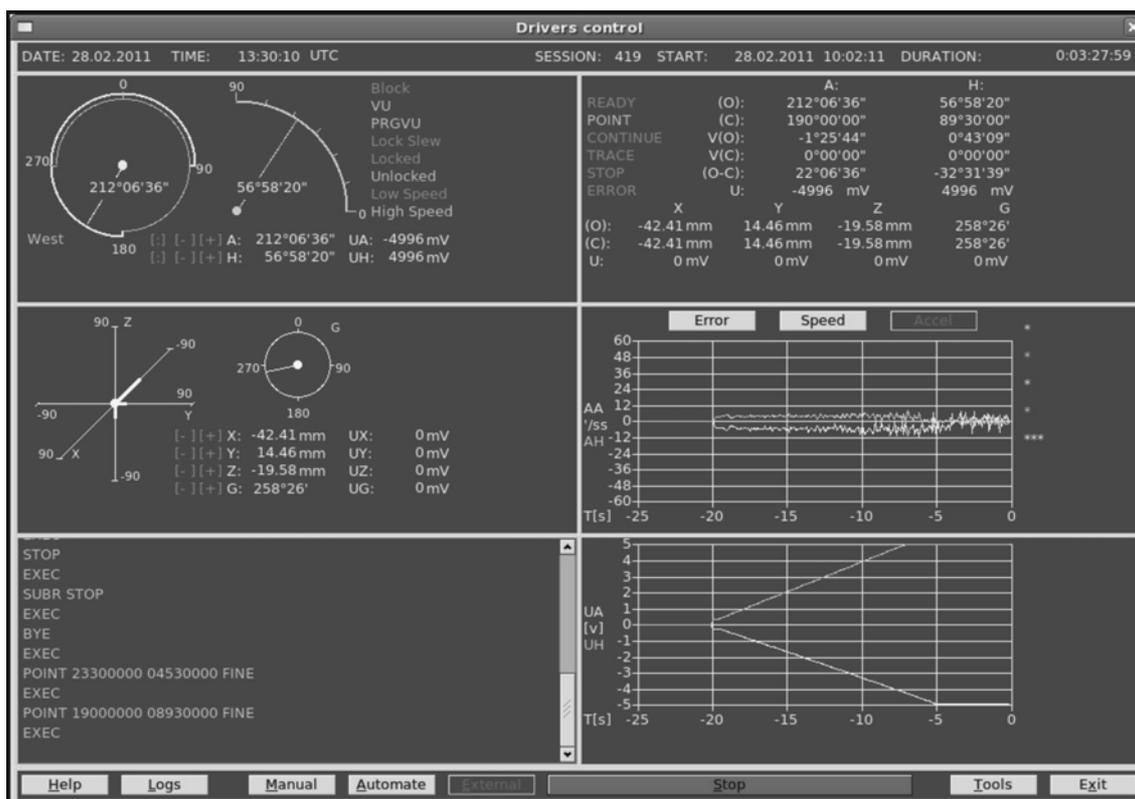


Рис. 7. Главное окно приложения *РСКУ* в режиме внешнего управления.

5.6. Алгоритмическое обеспечение автоматического управления а.с.

ПО *РСКУ* реализует три алгоритма движения главного и вторичного зеркал а.с.: переброса (перенацеливания), сопровождения и установки контррефлектора. Реализации всех алгоритмов имеют особенности, отличающие их от ранее использованных.

Алгоритм переброса обеспечивает плавный разгон и плавную остановку а.с. Плавность регулируется двумя параметрами — максимальной расчетной скоростью по азимуту и углу места.

Алгоритм выхода на источник и сопровождения источника предусматривает сглаживание заданной центральным компьютером траектории. Сглаживание приводит к дроблению исходной кусочно-линейной аппроксимации траектории источника и уменьшению скачков значений расчетных скоростей движения на смежных отрезках траектории. Это уменьшает нагрузки на электропривод и смягчает возможные рывки при движении антенны.

Алгоритм управления контррефлектором использует обратную связь по значению настраиваемой координаты контррефлектора, причем его установка по всем четырем координатам проводится независимо. Алгоритм основан на тех же принципах, что и алгоритм переброса по азимуту

и углу места, а наличие обратной связи позволяет позиционировать контррефлектор в пределах погрешности датчиков положения (для линейных координат — 0.01 мм, для угловой — 1–2').

5.6.1. Алгоритм переброса а.с. Переброс определяется исходной точкой, целевой точкой, максимальной скоростью движения, временем остановки антенны после сброса управляющего напряжения до нуля. Для обеспечения плавных разгона и торможения вся траектория движения делится на три участка: разгон, равномерное движение и торможение. Переброс осуществляется одновременно и асинхронно по азимуту и углу места.

Участок равномерного движения а.с. может отсутствовать, если расстояния между исходной и целевой точками недостаточно для разгона до максимальной скорости с учетом обеспечения плавного торможения

5.6.2. Алгоритм сглаживания траектории. Потребность в сглаживании траектории возникает в специальных случаях движения антенны, когда требуется резкое изменение скорости движения: при отводе по одной или обеим координатам, при сканировании [20]. Потребность в сглаживании определяется вычислением расчетных скоростей движения на смежных линейных участках траек-

тории. Если изменение скорости превышает заданный порог, то два участка траектории преобразуются в три.

5.6.3. Алгоритм сопровождения источника. Для обеспечения режима сопровождения а.с. источника используется модификация широко известного пропорционально-интегрального алгоритма. Алгоритм использует обратную связь по положению объекта управления для выработки управляющего воздействия. Для электропривода а.с. управляющим воздействием является управляющее напряжение, подаваемое на элементы привода.

Задача системы управления при сопровождении источника удерживать а.с. на требуемой траектории, заданной кусочно-линейной аппроксимацией, не превышая фиксированного значения ошибки сопровождения. Рассмотрим участок траектории $[P_0(A_0, H_0, T_0), P_1(A_1, H_1, T_1)]$, где P_0 и P_1 – соседние точки траектории с координатами A (азимут), H (угол места), T (время).

Для всего интервала времени $T_0 < t < T_1$ вычисляется расчетная скорость движения:

$$CV_A = \frac{A_1 - A_0}{T_1 - T_0} \quad \text{и} \quad CV_H = \frac{H_1 - H_0}{T_1 - T_0}.$$

В момент времени t антенна находится в точке $P_0(A_0, H_0)$, а должна находиться в точке $P_c(A_c, H_c)$, где $A_c = A_0 + CV_A(t - T_0)$ и $H_c = H_0 + CV_H(t - T_0)$. Ошибка сопровождения, определяемая как разность $E_A = A_0 - A_c$ и $E_H = H_0 - H_c$, используется для определения управляющего напряжения таким образом, чтобы устранить возникшую ошибку. Управление по азимуту (A) и углу места (H) осуществляется независимо.

Управляющее воздействие в пропорционально-интегральном алгоритме определяется на основании двух параметров: ошибки сопровождения (E_A и E_H) и интегральной ошибки сопровождения (IE_A и IE_H), где $IE_A = E_A[1] + E_A[2] + \dots + E_A[n]$ и $IE_H = E_H[1] + E_H[2] + \dots + E_H[n]$. Правила накопления интегральной ошибки и моменты ее обнуления очень сильно влияют на работоспособность алгоритма. В используемой реализации алгоритма интегральная ошибка обнуляется при превышении моментальной ошибкой E_A или E_H заданного порога, т.е. для момента времени k :

$$\text{если } E_A[k] < E_{A_{\max}}, \text{ то } IE_A[k] = IE_A[k-1] + E_A[k], \\ \text{иначе } IE_A[k] = 0,$$

$$\text{если } E_H[k] < E_{H_{\max}}, \text{ то } IE_H[k] = IE_H[k-1] + E_H[k], \\ \text{иначе } IE_H[k] = 0,$$

где $IE_A[k]$ и $IE_H[k]$ – интегральные ошибки на момент времени k .

Порог обнуления интегральной ошибки является настраиваемым параметром в целом, но фиксированным для отдельного сеанса наблюдений.

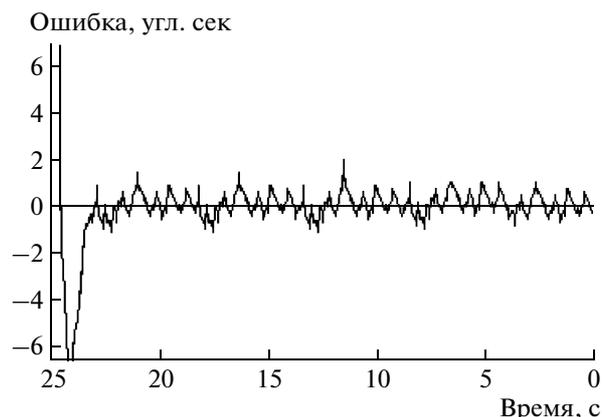


Рис. 8. Сопровождение источника радиосигнала по азимуту.

$$U_A = -Kp_A E_A - Ki_A IE_A, \quad U_H = -Kp_H E_H - Ki_H IE_H.$$

Результирующие напряжения U_A и U_H проверяются на допустимость для существующего электропривода а.с. и уменьшаются по абсолютной величине до максимально (минимально) возможного, если требуется.

Представленный алгоритм сопровождения обеспечивает работоспособность системы управления во всем диапазоне изменения координат а.с. с требуемой скоростью выхода на источник сопровождения. На рис. 8 представлен график движения а.с. при сопровождении космического источника. По горизонтальной оси располагается шкала времени в секундах, по вертикали – текущее значение ошибки сопровождения в угловых секундах. На графике представлена 25-секундная история ошибок с момента начала сопровождения источника радиосигнала, т.е. выход на источник производился примерно в течение 3 с, далее осуществлялось сопровождение. Видно, что случайные ошибки не превышают 2".

5.6.4. Алгоритм установки контррефлектора. Алгоритм установки контррефлектора в целом соответствует алгоритму переброса. Отличие заключается в том, что для привода контррефлектора не используется принцип аппаратного ограничения скорости вблизи возвратных концевых ограничителей. Более существенное отличие состоит в том, что по окончании переброса (по любой из координат) проверяется положение контррефлектора и, если разность между фактическим положением и расчетным больше заданной величины, выполняется движение в направлении уменьшения ошибки позиционирования. Движение осуществляется подачей напряжения трогания, определенного и зафиксированного для каждой координаты контррефлектора. Из-за ограниченной разрядности датчика положения возможен переезд целевого положения. Для того чтобы колебательный процесс вокруг целевого положения не

был бесконечным, ограничивается количество итераций.

5.7. Обеспечение безопасности эксплуатации

Меры по обеспечению безопасной эксплуатации а.с. на уровне с.к.у.а. основываются на анализе показаний датчиков положения.

При достижении возвратных концевых ограничителей главного и вторичного зеркал в РСКУ поступают соответствующие квитанции. Поступление такой квитанции блокирует дальнейшее движение в направлении за возвратный ограничитель в сторону невозвратного ограничителя движения.

Наиболее опасна ситуация, когда происходит отказ датчиков положения. Отказ может проявляться в выработке значения, невозможного для текущего положения а.с., например изменение на градусы за доли секунды. Такие показания отфильтровываются и не принимаются для выработки управления.

Другой вариант отказа заключается в том, что значения “замирают”, т.е. не меняются в течение промежутка времени, значительно большего времени формирования параллельного кода на преобразователе угол—код. Для диагностирования такой ситуации используется координатная история. Все показания датчиков положения за некоторый промежуток времени (в текущей реализации это 1 с) сохраняются. Новые показания сравниваются с тем, что было получено на непосредственно предшествующем считывании показаний. Если показания совпадают, то проводится сравнение со всей координатной историей. Наличие во всей истории одинаковых показаний при управляющем напряжении, превышающем заданный порог (в текущей реализации это 3.5 В), свидетельствует о том, что датчик положения не работает, и производится аварийная остановка с выдачей уведомления оператору на РСКУ, КОИ и центральный компьютер.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задач автоматического наведения а.с. радиотелескопа разработана новая аппаратура автоматики и управления, выполненная с широким применением оптоэлектронных коммутирующих устройств и микроконтроллеров, а также создано принципиально новое программное обеспечение, построенное по модульному принципу. В результате проделанной работы значительно повысилась надежность антенной системы, улучшились ее динамические характеристики и безопасность работы.

Аппаратно-программный комплекс построен таким образом, что обеспечена его открытость и легкость дальнейшей модернизации. Обширные средства визуализации, протоколирования и встроенного контроля обеспечивают высокие эксплуатационные качества системы.

Данная система может иметь широкое применение на других радиотелескопах, как действующих, так и разрабатываемых, в силу универсальности и возможности адаптации под новые задачи и новую технику.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.518.11.7098).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лаверов Н.П., Финкельштейн А.М.* // Вестник РАН. 2009. № 10. С. 944.
2. *Finkelstain A.M., Grachev V.G., Gubanov V.S. et al.* // Turkish J. of Phys. 1995. № 19. P. 1445.
3. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Кайдановский М.Н. и др.* // Труды ИПА РАН, 2005. Вып. 13. С. 104.
4. *Финкельштейн А.М.* // Вестник РАН. 2007. Т. 77. № 7. С. 608.
5. *Гаязов И.С., Финкельштейн А.М., Ипатов А.В.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 20. С. 157.
6. *Иванов В.П., Ипатов А.В., Смоленцев С.Г. и др.* // Труды ИПА РАН. 2006. Вып. 14. С. 20.
7. *Иванов В.П., Ипатов А.В., Финкельштейн А.М. и др.* // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 12. С. 12.
8. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Безруков И.А. и др.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 33.
9. *Ипатов А.В., Кольцов Н.Е., Крохалев А.В.* // ПТЭ. 2005. № 4. С. 66.
10. *Ипатов А.В., Кольцов Н.Е., Федотов Л.В.* // ПТЭ. 2009. № 1. С. 67.
11. *Михайлов А.Г.* // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 12. С. 68.
12. *Иванов Д.В., Ипатов А.В., Ипатова И.И. и др.* // Труды ИПА РАН. 2005. Вып. 12. С. 93.
13. *Михайлов А.Г.* // Труды ИПА РАН, 2006. Вып. 15, С. 38–59.
14. *Сыровой С.С., Шегров И.Л.* // Труды ИПА РАН. 1997. Вып. 2. С. 134.
15. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Кайдановский М.Н. и др.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 270.
16. *Быков В.Ю., Ильин Г.Н.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 294.
17. *Скурихина Е.А., Финкельштейн А.М., Дьяков А.А. и др.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 191.
18. *Белоусов Н.Ю., Стэмповский В.Г.* // Труды ИПА РАН. 2010. Вып. 21. С. 248.
19. *Стэмповский В.Г., Гаязов И.С.* // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 314.
20. *Ипатова И.А., Мардышкин В.В., Михайлов А.Г., Харин М.А.* // Астрон. вестн. 2006. Т. 40. № 2. С. 187.