

# **Способ и результаты модернизации кинематических узлов, механизмов и электро- приводов отражающего элемента радиотелескопа РАТАН-600 в рамках программы ЦКП (2009-2011 гг)**

## **Введение**

Модернизация кинематических узлов, механизмов и электроприводов отражающего элемента (ОЭ) (в дальнейшем модернизация ОЭ) РАТАН-600 необходима для повышения точности позиционирования, уменьшения люфтов кинематических механизмов, повышения быстродействия, гибкости и надежности работы АСУ, реализации перспективных режимов работы, включая режим сопровождения. Режим длительного сопровождения на антенной системе “Юг+Плоский” особенно остро востребован для изучения динамики быстропеременных процессов и вспышечной активности Солнца. Модернизация ОЭ обеспечит многократное повышение ресурса ОЭ, снижение эксплуатационных затрат и потерь наблюдательного времени, вызванных ремонтно-профилактическими работами. Кроме повышения точностных и кинематических характеристик радиотелескопа модернизация ОЭ решает и ряд серьезных эксплуатационных проблем, являющихся неразрешимыми в существующей кинематической схеме.

Модернизация периферийных элементов АСУ не выполнялась выполняется с момента сооружения радиотелескопа. Проводившиеся до настоящего времени усовершенствования АСУ касались в основном верхнего уровня и узлов управления. Модернизация ОЭ отражает как потребности совершенствования инструмента для решения актуальных наблюдательных задач так и значительный прогресс в развитии высокоточной механики и приводной техники за последние 50 лет, прошедшие с времен проектирования радиотелескопа.

Поисковая работа в CAO РАН по модернизации ОЭ была поддержана в 2010-2011 гг в рамках программы ЦКП и отражена в отчетах по ЦКП.

## **1.Состояние кинематики радиотелескопа**

ОЭ радиотелескопа РАТАН-600 состоит из радиальной каретки, движущейся на роликах по направляющим рельсам. На каретке

смонтированы радиальный и угломестный приводы, ферма и азимутальный привод привязаны к крестовине щита.

Одной из серьезных проблем эксплуатации подвижных узлов ОЭ радиотелескопа РАТАН-600 является соединение винт-гайка (СВГ). Бронзовая гайка достаточно быстро изнашивается в соприкосновении со стальным винтом. В результате даже частичного (менее 50%) износа резьбы гайка “срывается” и щит неуправляемо движется до упора под действием своего веса или веса контр-груза. Срок эксплуатации наиболее изнашиваемых гаек по углу места на Северном секторе и Плоском отражателе радиотелескопа, как правило, не превышает 10 лет. Кроме



*Рис. 1. Изношенная (сломанная) и новая гайки СВГ*

систематического выхода из строя отдельных щитов и постоянных затрат на изготовление и замену гаек проблема имеет другую сторону, а именно, по мере износа гаек люфты кинематических механизмов увеличиваются и приводят к уменьшению точности установки ОЭ. В СЭК РАТАН-600 замечено, что выходящая из строя гайка начинает заметно “золотить” винт за три месяца до окончательного выхода ее из строя, но и до этой стадии люфт и связанная с ним ошибка позиционирования могут возрасти по мере износа гайки. Существенные изменения в местах автоколлимационных (АК) нулей в процессе износа гаек были замечены во время выполнения АК юстировок радиотелескопа и в последнее время в ряде случаев позволяют выявлять изношенные гайки у таких “выпадающих” ОЭ еще до возникновения аварийной ситуации, вызванной срывом гайки. Таким

образом, проблема достаточно быстрого износа гаек является аварийной и нерешенной с момента пуска радиотелескопа.

Сломанная и новая гайки СВГ представлены на рис.1. Проблема также состоит в высокой трудозатратности обслуживания СВГ и необходимости проводить регулярные регламентные работы по очистке винтов от абразивной пыли, возникающей в процессе эксплуатации винта для уменьшения темпа износа гаек. Это включает разборку кинематического соединения, съем винта и его дальнейшую очистку от абразива под стапелем. Практически на место снятого устанавливался другой винт, что приводит к изменению мест АК-нулей и кинематических поправок до момента их коррекции. Процесс разборки винтов на антенне требует выполнения крановых и такелажных работ (Рис.2).



*Рис.2. Процесс разборки винтов для выполнения регламентных работ*

Другой менее сложной, но также весьма острой проблемой эксплуатации ОЭ является износ шарниров карданных механизмов, гибко соединяющих винт с редуктором особенно по углу места, где они используются наиболее активно. Кроме того существующие карданные узлы не являются шарнирами равноугловых скоростей что вносит свою кинематическую ошибку при установке щита в заданное положение. Еще одну известную проблему вызывает необходимость периодического “отстоя” щитов в неподвижном вертикальном положении для слива конденсата с существующих планетарных и конических редукторов разработки 60-х годов. Наконец, наличие значительных люфтов в механических механизмах требует для их выборки отлаженной работы система выборки люфта с контр-грузами, тросами, блоками, пружинами и пр. а также смазки, периодической замены тросов и ряда других регламентных работ. Тем не менее, из-за неизбежного трения в этих узлах, находящихся в открытых атмосферных условиях эксплуатации выборка люфта далеко не

всегда выполняется эффективно и люфт серьезно ограничивает точность работы АСУ. Применение современных безлюфтовых (низколюфтовых) механизмов существенно повысит достижимую точность отражающей поверхности многоэлементного радиотелескопа, исключит необходимость введения и регулярного измерения большинства кинематических поправок.

## **2.Предложенный способ модернизации и поставщики современных кинематических узлов и приводов**

В целях модернизации было предложено заменить наиболее важные кинематические узлы и механизмы ОЭ: соединение винт-гайка скольжения на шарико-винтовую пару (ШВП), карданные узлы на высокоточные шарниры равно-угловых скоростей (ШРУСы), устаревшие и требующие обслуживания планетарные и конические редукторы на высокоточные герметичные гибридные редукторы АРЕХ, асинхронные неуправляемые по скорости привода с блоками аналоговых двухотсчетных датчиков-сельсинов на шаговые или синхронные сервопривода на постоянных магнитах с встроенными абсолютными многооборотистыми энкодерами. Выполнено обоснование предложенной схемы модернизации кинематических узлов и механизмов щита РАТАН-600 и необходимые расчеты требуемых нагрузок, включая ветровых. Концепция проекта модернизации, а также результаты реализации кинематических узлов и механизмов щита приведены в ряде отчетов и публикаций. Ниже представлены основные результаты выполненной работы, в том числе полученных в рамках программы ЦКП.

В разработке, изготовлении, поставке новых кинематических узлов и механизмов а также в их наладке на РАТАН-600 принимали активное участие:

ЗАО “Технический Центр Н” (г.Ярославль) - ШВП

Завод Мехатронных изделий - ЗМИ (Москва) - вариант антикоррозийного покрытия ШВП и эластомерные муфты

ООО “Арттех” (Санкт-Петербург) - разработка ШРУСа, оснастка для крепления гибридного редуктора и нового привода

ЗАО “Сервотехника”, Москва - Интегрированный шаговый сервопривод с абсолютным энкодером (СПШ-34-100)

Гибридные редукторы АРЕХ и упорно-радиальные подшипники (ЗАО “Сервотехника-Нева”, Санкт-Петербург)

Синхронный сервопривод с абсолютным энкодером и контроллером (ЗАО “Фесто”, Москва. В выполненной работе был использован сервопривод немецкой сборки, однако с 2015 г аналогичные сервоприводы и

контроллеры к ним собираются на новом заводе в г.Симферополе из компонентов, получаемых из Германии с степенью локализации до 70%.

### 3. Моделирование и реализация кинематических узлов и механизмов ОЭ РАТАН-600

В процессе поисковых работ 2010-2011 гг был выполнен большой объем работ по конструкторской проработке кинематических узлов и механизмов ОЭ РАТАН-600 в 3D САПР. Необходимость выполнения этого этапа работ вызвана требованиями современной технологии изготовления новых узлов на станках ЧПУ а также нынешним состоянием проектной документации в КБ РАТАН-600 неизменном с 70-х годов прошлого века. В результате работы по 3D моделированию и разработке новых узлов удалось выявить и исправить ряд ошибок, которые не были скорректированы проектировщиками в существующей в КБ РАТАН-600 версии чертежей.

Моделирование кинематических узлов и механизмов было выполнено с учетом новой концепции приводов, которая включает элементы кинематической схемы с высоким КПД такие как ШВП, высокоточные гибридные редукторы, ШРУСы и другие элементы конструкции, что существенно снижает требуемую нагрузочную способность приводов из-за значительного уменьшения потерь на трение качения в сравнении с трением скольжения. Тем не менее, остаются внешние статические и динамические нагрузки, которые необходимо преодолевать как в рабочих условиях установки антенны так и в экстремальных во избежание выхода из строя кинематических узлов и механизмов. Речь идет о различных статических и динамических нагрузках (весовых, инерционных, ветровых и др.), которые были учтены в расчетах. Ниже приведены исходные данные и результаты расчета с учетом характеристик передаточных элементов а также максимальных ветровых и инерционных нагрузок (таблица 1) и характеристик старого привода (таблица 2):

**Таблица 1**

**Исходные данные**

|               |                  |                                         |
|---------------|------------------|-----------------------------------------|
| $F$           | <b>15.69</b> кН  | <i>Усилие</i>                           |
| $V$           | <b>4.50</b> мм/с | <i>Скорость</i>                         |
| $P$           | <b>10.00</b> Мм  | <i>шаг винта</i>                        |
| КПД винта     | <b>85.00</b> %   | <i>КПД винта</i>                        |
| КПД редуктора | <b>95.00</b> %   | <i>КПД редуктора</i>                    |
| $i$           | <b>10.00</b> -   | <i>передаточное отношение редуктора</i> |
| $M_s$         | <b>0.00</b> Нм   | <i>момент статический редуктора</i>     |
| $k$           | <b>1.00</b> -    | <i>коэффициент запаса</i>               |

**Результат расчета**

|       |                      |                              |
|-------|----------------------|------------------------------|
| $M_2$ | <b>29.38 Нм</b>      | <i>момент на редукторе</i>   |
| $M_1$ | <b>3.09 Нм</b>       | <i>момент на двигателе</i>   |
| $n_1$ | <b>270.00 об/мин</b> | <i>скорость на двигателе</i> |
| $P_1$ | <b>87.43 Вт</b>      | <i>мощность двигателя</i>    |

Таблица 2

**Исходные данные**

|               |                  |                                         |
|---------------|------------------|-----------------------------------------|
| $F =$         | <b>83.08 кН</b>  | <i>Усилие</i>                           |
| $V =$         | <b>1.38 мм/с</b> | <i>Скорость</i>                         |
| $p =$         | <b>10.00 Мм</b>  | <i>шаг винта</i>                        |
| КПД винта     | <b>85.00 %</b>   | <i>КПД винта</i>                        |
| КПД редуктора | <b>95.00 %</b>   | <i>КПД редуктора</i>                    |
| $i$           | <b>10.00 -</b>   | <i>передаточное отношение редуктора</i> |
| $M_s$         | <b>0.00 Нм</b>   | <i>момент статический редуктора</i>     |
| $k$           | <b>1.00 -</b>    | <i>коэффициент запаса</i>               |

**Результат расчета**

|       |                     |                              |
|-------|---------------------|------------------------------|
| $M_2$ | <b>155.56 Нм</b>    | <i>момент на редукторе</i>   |
| $M_1$ | <b>16.37 Нм</b>     | <i>момент на двигателе</i>   |
| $n_1$ | <b>82.80 об/мин</b> | <i>скорость на двигателе</i> |
| $P_1$ | <b>141.97 Вт</b>    | <i>мощность двигателя</i>    |

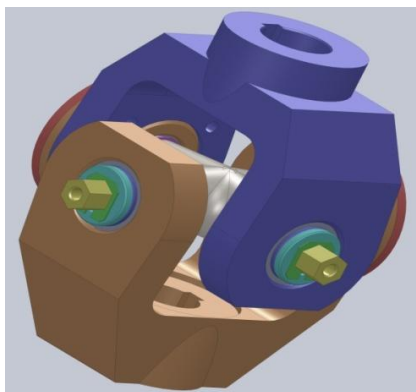
Практически были выбраны для окончательных испытаний два вида серво-приводов – шаговый с мягкой характеристикой зависимости момента от скорости и максимальным статическим моментом удержания 10 Нм и моментом вращения не менее 3 Нм что соответствовало таблице 1 и синхронный привод с жесткой характеристикой момента от скорости и интегральным моментом вращения не менее 15 Нм, что соответствовало таблице 2. Оба сервопривода успешно прошли испытания, но второй позволил развить в два раза большую скорость и при этом сохранял значительный запас по увеличению скорости не менее 30%.

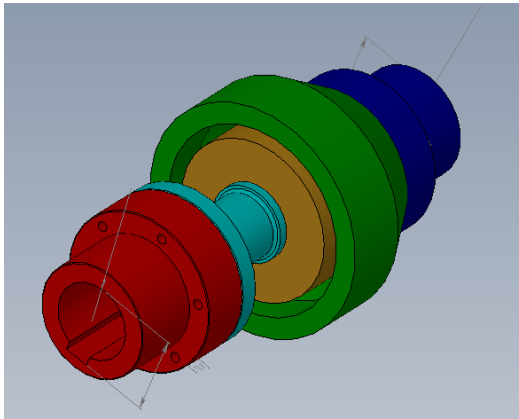
На рис.3 представлены старые привода и кинематические узлы ОЭ.



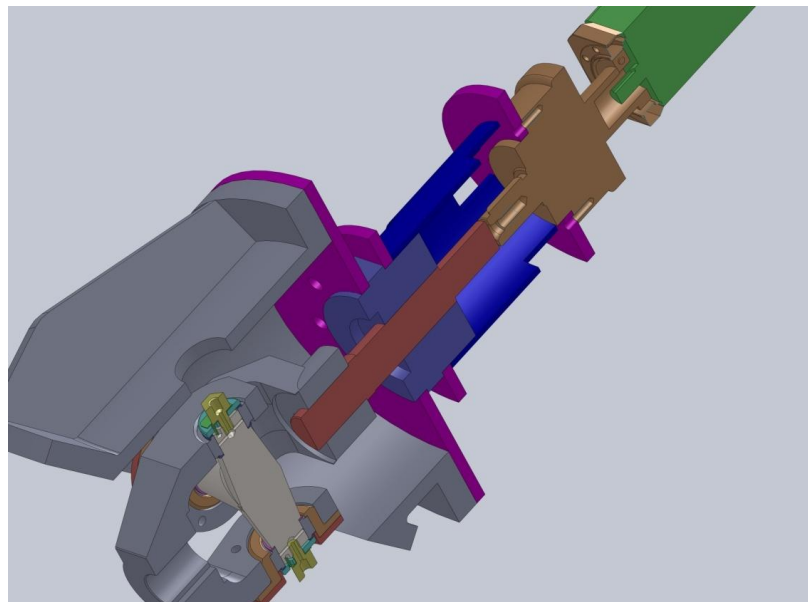
*Рис.3. Старые привода по трем координатам (вверху слева и справа, внизу слева) и кинематические узлы (угломестный винт – внизу справа)*

На рис.4. показаны старые карданные механизмы и новые ШРУСы. На рис.5-12 показаны результаты 3D моделирования новых узлов и сборки ОЭ с ними. На рис.13. показаны новые узлы и механизмы, а также электро-привода, установленные на ОЭ вместо существующих.

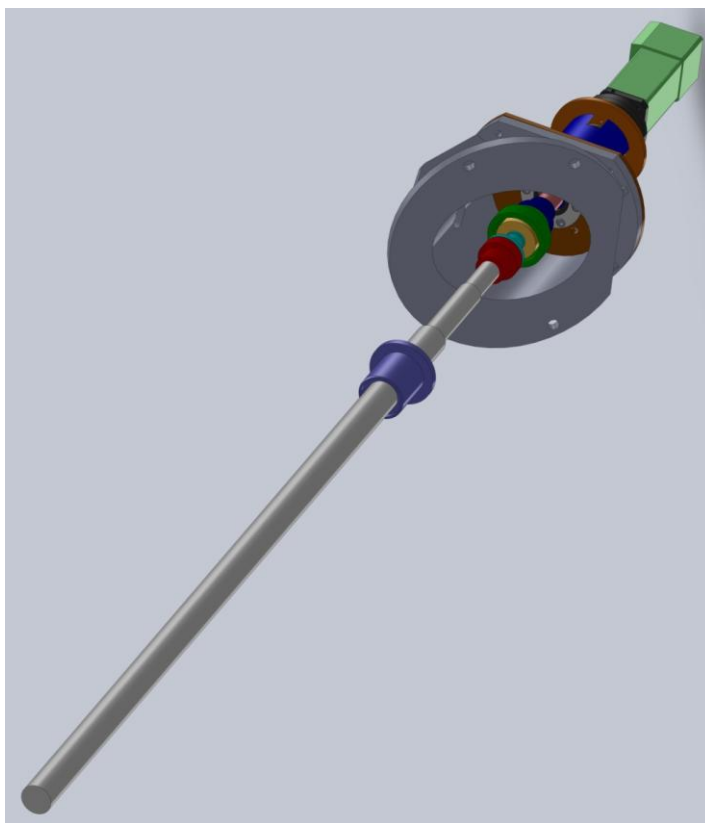




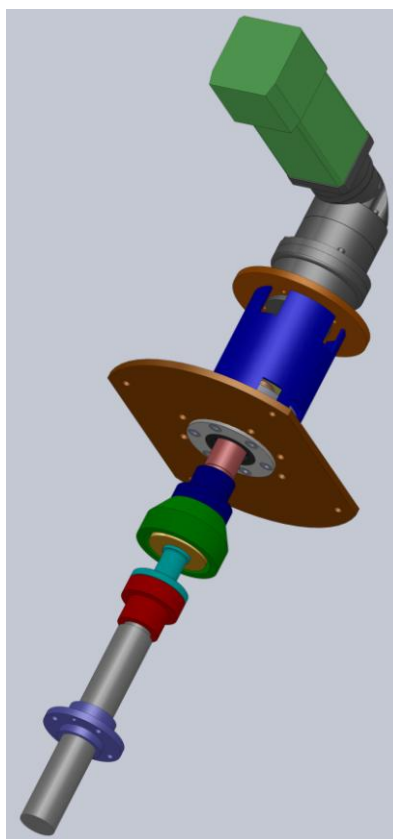
*Рис.4. Существующий карданный узел (вверху справа) и его 3D модель(вверху слева), 3D модель ШРУСа (внизу слева) и изготовленные образцы ШРУСов (внизу справа)*



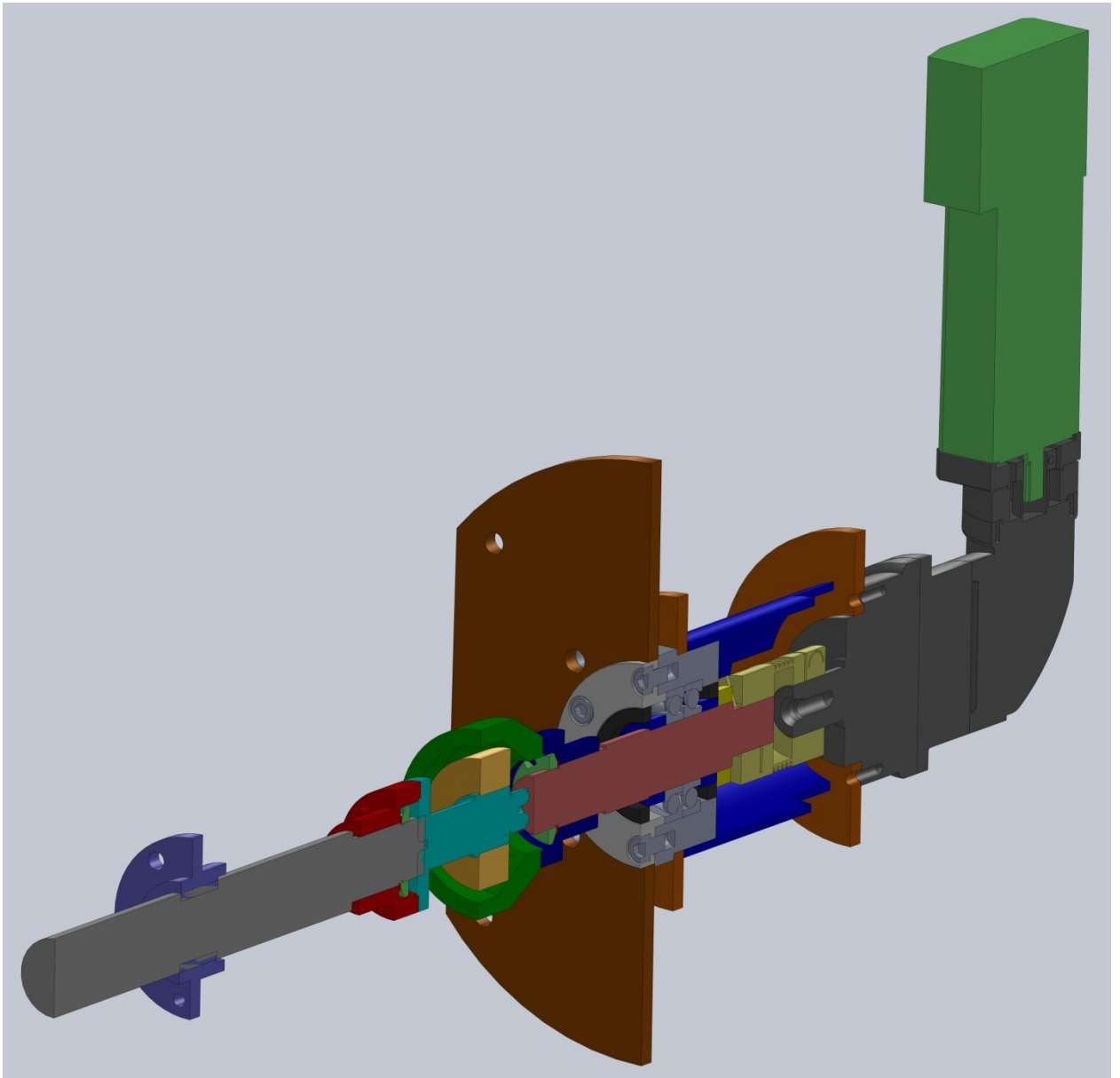
*Рис.5. Новый привод с старым карданным узлом*



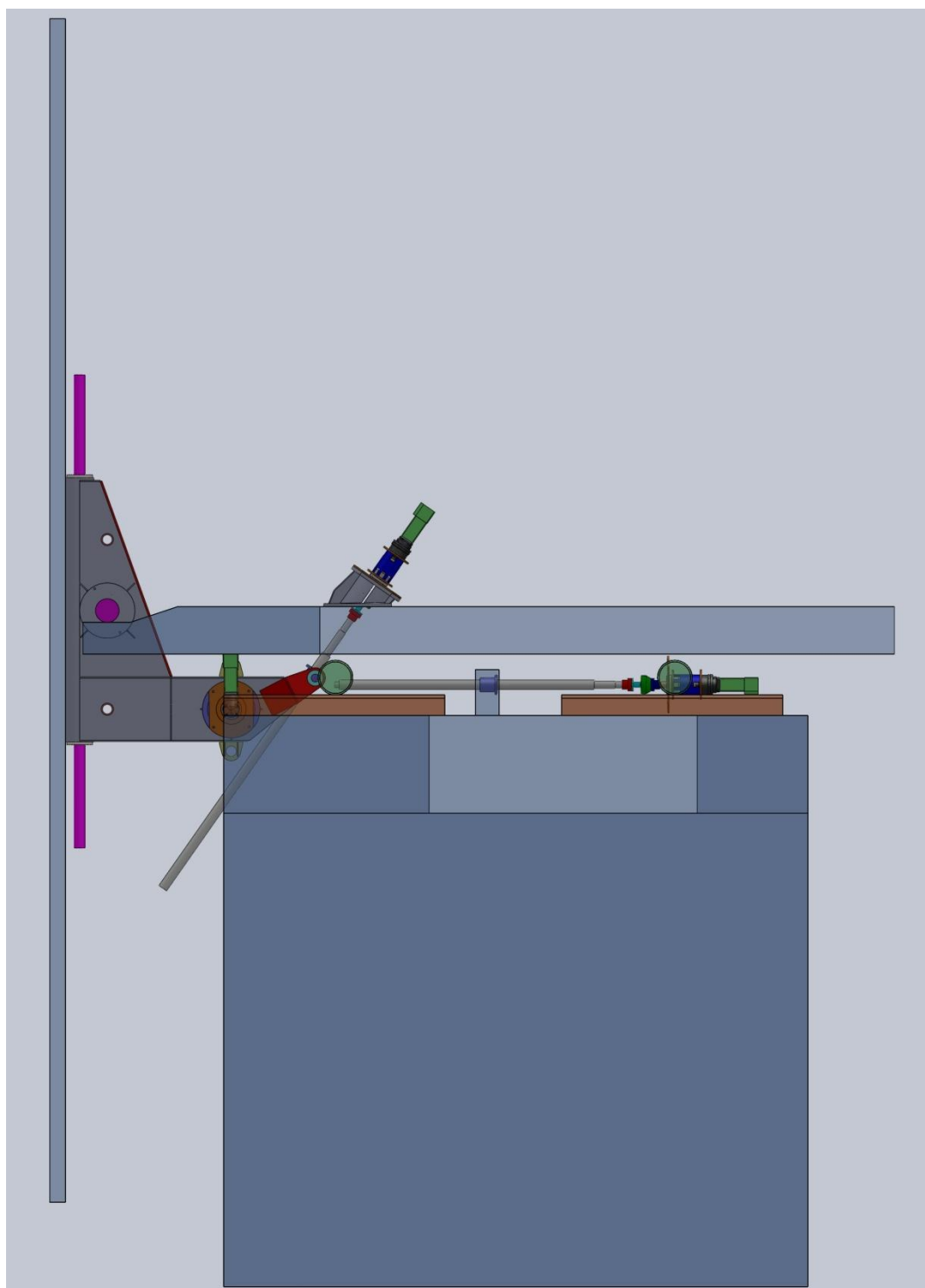
*Рис.6. Новый угломестный привод с ШРУСом (сборка)*



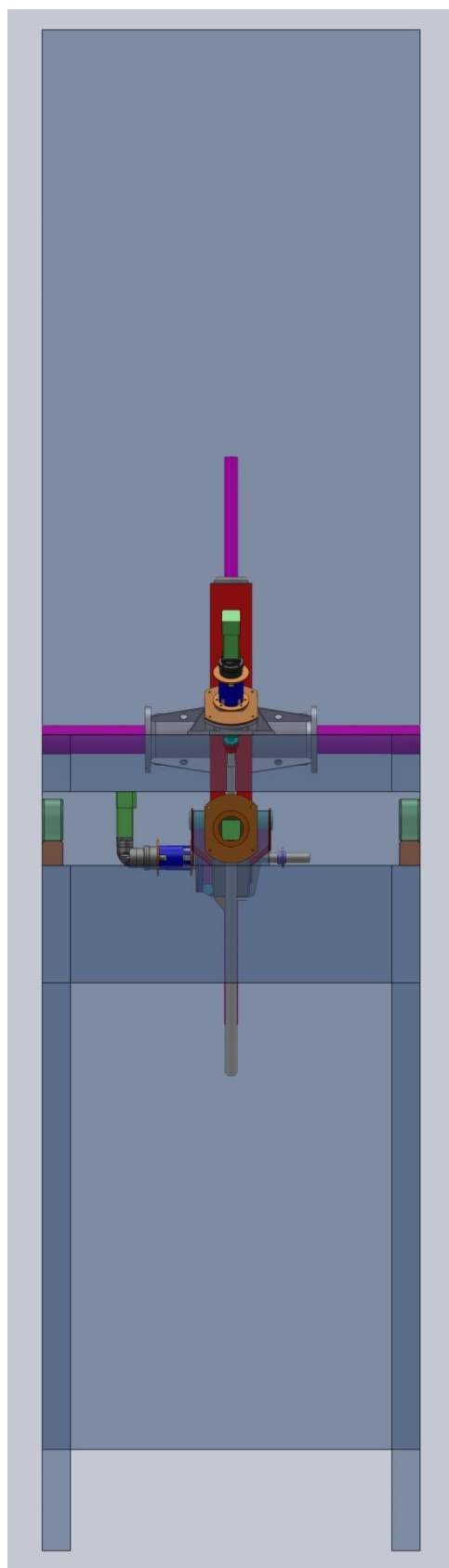
*Рис.7. Новый азимутальный привод (сборка)*



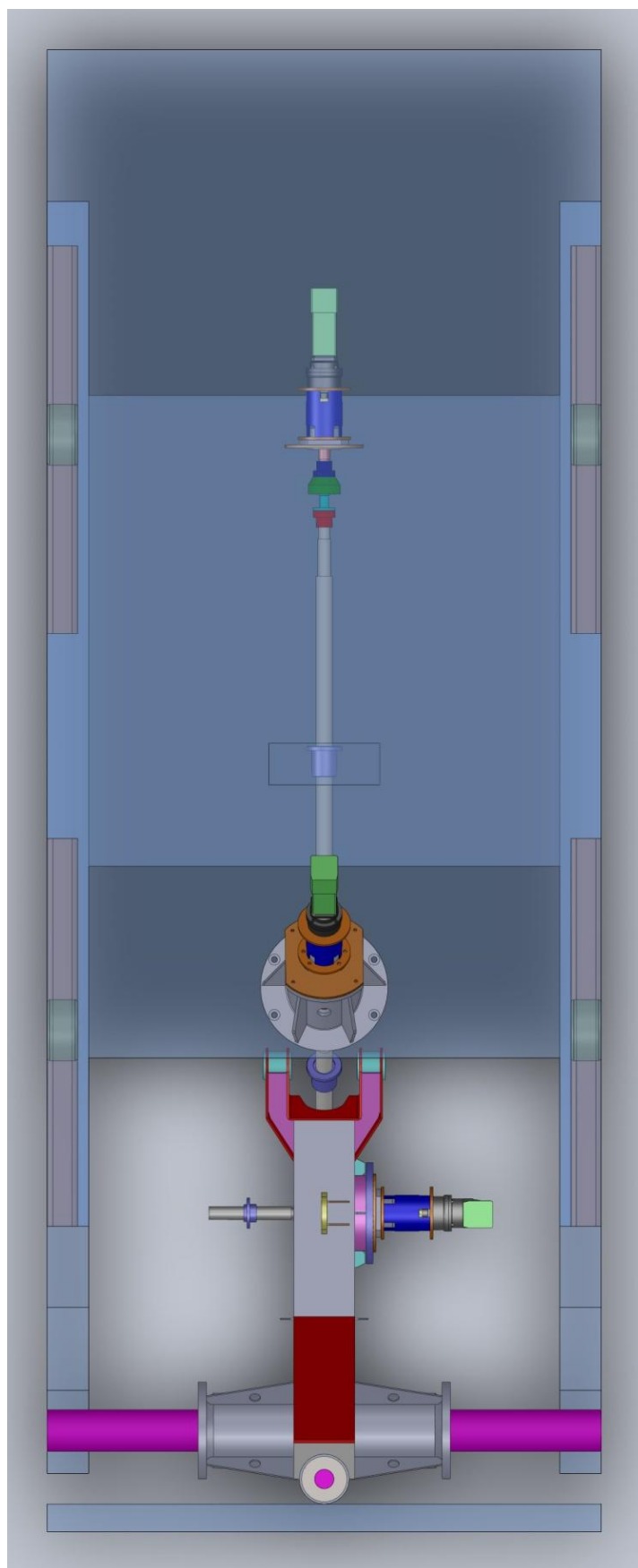
*Рис.8. Новый азимутальный привод (разрез)*



*Рис.9. Щит РАТАН-600 с новыми приводами, вид сбоку*



*Рис.10. Щит РАТАН-600 с новыми приводами, вид сзади*



*Рис.11. Щит РАТАН-600 с новыми приводами, вид сверху*

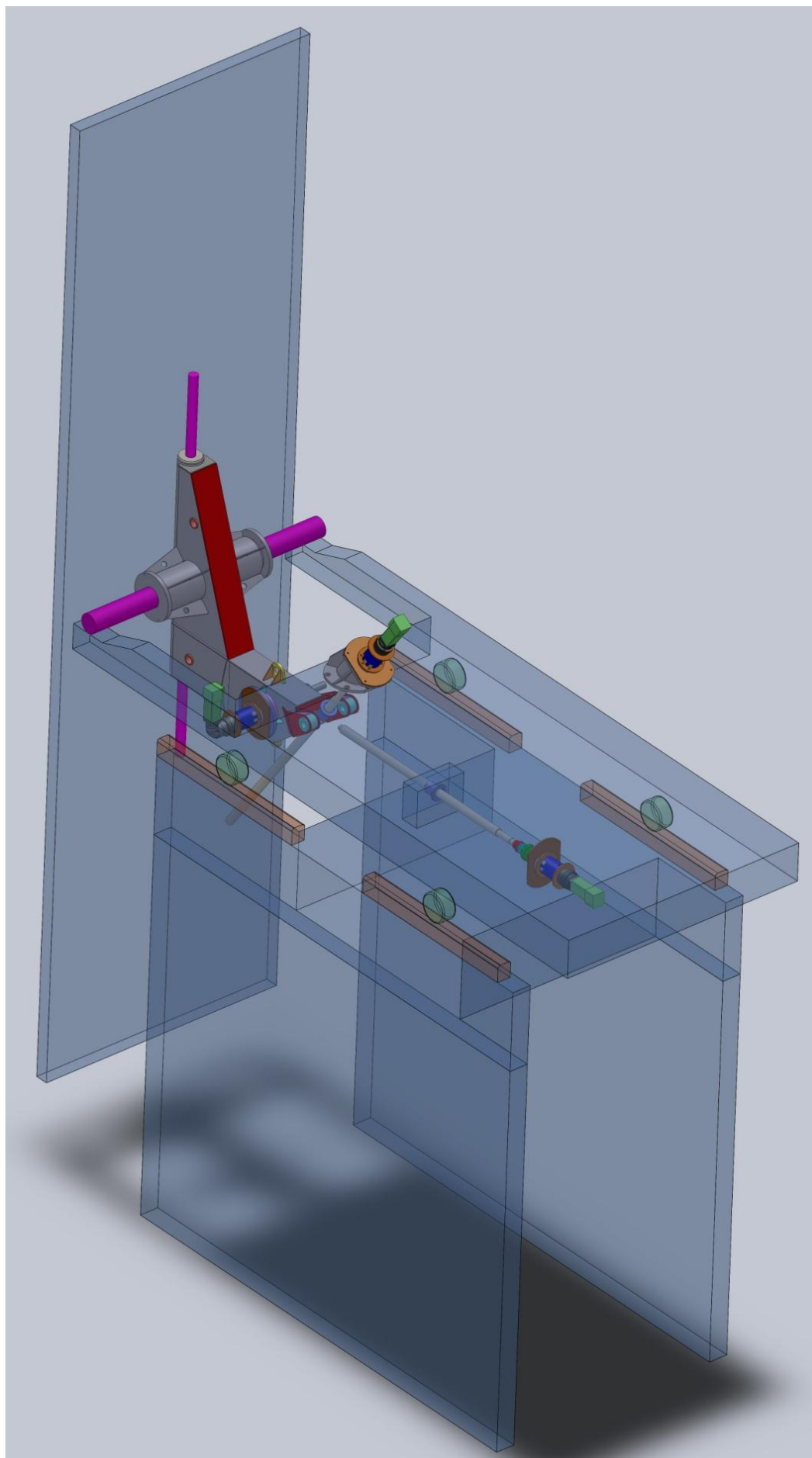


Рис.12. Щит РАТАН-600 с новыми приводами, вид 3D



*Рис.13. ШВП (вверху слева), проставка с редуктором АРЕХ, муфтой и упорным подшипником (вверху справа), привода с редукторами СПШ-34-100 (радиальный -середина слева, азимутальный - середина справа, угломестный - внизу слева), синхронный серводвигатель ФЕСТО угломестный с дополнительным редуктором 1:3 EMGA (внизу справа)*

#### **4. Способ и схема управления модернизированным ОЭ в режиме испытаний**

Для испытаний новых приводов в безлюдном режиме была разработана и запущена в работу система автоматического управления ОЭ главного зеркала. Привода СПШ-34-100 и FESTO оборудованы бортовой микропроцессорной системой управления способной выполнять сложные

алгоритмы управления приводом самостоятельно, в соответствии с программой пользователя. Уже на данном этапе оптимальным решением было применение двух уровневой системы управления, позволяющей дальнейшее расширение числа управляемых элементов. На нижнем уровне иерархии системы располагается бортовая микропроцессорная система электрического привода, обеспечивающая сбор данных с датчиков системы позиционирования — абсолютный энкодер, концевые переключатели, в буферной памяти - действующие параметры электрического привода и, затем, дальнейшую их передачу на верхний уровень системы управления, а также прием управляющих команд от системы верхнего уровня. В качестве среды передачи между верхним и нижним уровнем системы использовалась цифровая помехозащищенная шина передачи данных CAN. В качестве автоматизированного рабочего места оператора использовался x86 — совместимый компьютер под управлением ОС семейства Linux, оснащенный интерфейсом CAN.

Диапазоны перемещения щитов задавались программно с учетом показаний абсолютного энкодера, защита электроприводов по току была подобрана с учетом максимально допустимых нагрузок в процессе движения щита, у привода Фесто был задействован электротормоз, по всем координатам были задействованы концевые выключатели для исключения аварийных ситуаций. Закон управления движением щита по положению включал плавный набор и сброс скорости в режимах разгона и торможения щита по заданной траектории с учетом характера инерционной нагрузки, оптимальные параметры регулирования подбирались на каждом приводе для достижения постоянства заданной скорости и отсутствия вибраций щита. В результате с шаговым сервоприводом удалось достичь скорости позиционирования щита в 8-10 раз выше нынешней, с синхронным - в 20 раз выше. При этом достигнута высокая плавность, отсутствие вибраций и практически беззвучное движение щита по всем координатам.

На Рис.14-15 представлены схемы управления шаговым сервоприводом и синхронным сервоприводом Фесто. На схемах не указаны блоки питания, автоматы, концевые выключатели. Практически блоки питания, автоматы и управляющие контроллеры новых приводов были установлены в старом щиту АСУ на верхней галерее в 3-5 метрах от приводов.

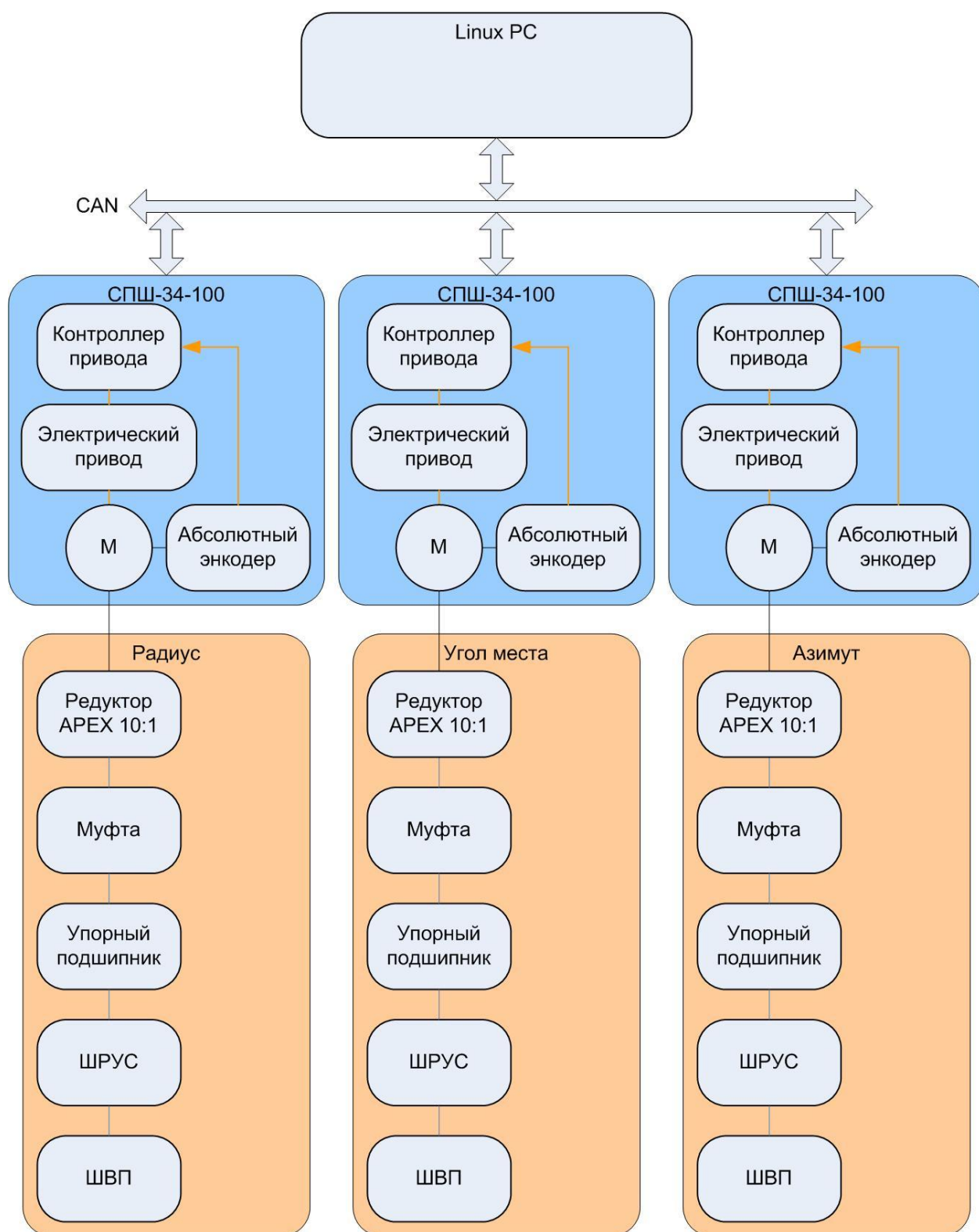


Рис.14. Схема управления шаговыми сервоприводами СПШ

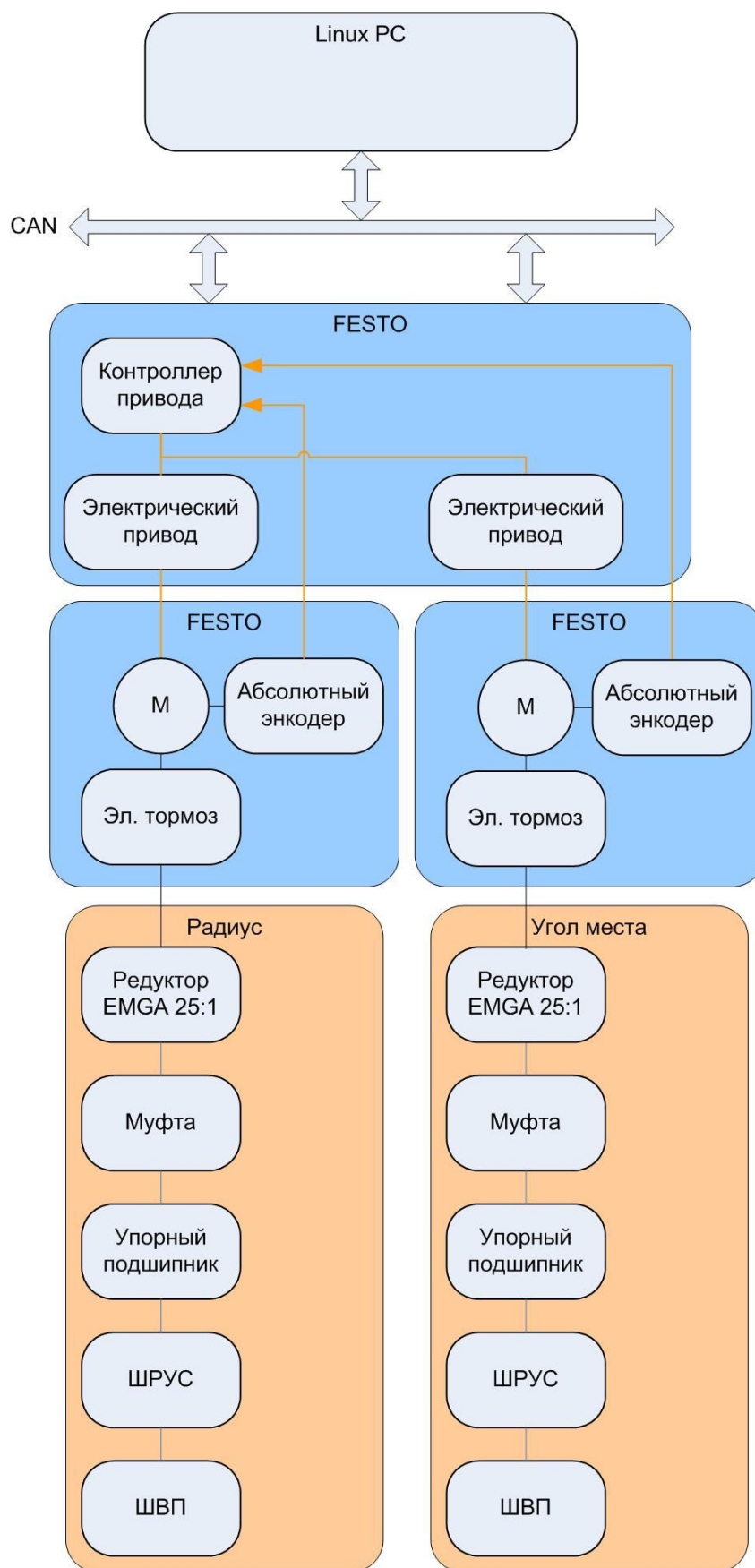


Рис.15. Схема управления шаговым синхронным сервоприводом Фесто.

## 5. Результаты испытаний щита с модернизированной кинематикой

ОЭ РАТАН-600 во время испытаний новых приводов показан на Рис.16.



*Рис.16.Модернизированный ОЭ РАТАН-600 во время испытаний*

Испытания модернизированного щита длились пол года с июля по декабрь 2012 г. В день щит совершал от 1000 до 2000 проходов по радиусу или по углу в зависимости от используемого привода. В результате щит совершил 200 тыс. проходов (60 тыс. проходов по радиусу с приводом СПШ и 140 тыс. проходов по углу с приводом ФЕСТО). Испытания движения щита сразу по трем координатам (радиус, угол места, азимут) проводились разными приводами (СПШ и ФЕСТО) в присутствии специалистов, в дальнейшем предполагается провести испытания одновременного движения щита по трем координатам в автоматическом (безлюдном) режиме, что требует дополнительного кинематического моделирования процесса с учетом быстрого перекрытия диапазонов движения по трем координатам. Исходя из среднего объема наблюдений Северного сектора 10000-12000 установок источников в год можно говорить о выполненном количестве установок модернизированного щита по одной координате эквивалентном 15-20 годам работы в нынешнем темпе наблюдений Северного сектора радиотелескопа. В начале процесса испытаний щита по углу места на

двадцатикратной скорости и при соответствующих инерционных нагрузках в момент реверса произошел выход из строя сильфонной муфты, которая была заменена на жесткую соединительную муфту, изготовленную в СЭК РАТАН-600. В дальнейшем решено заменить сильфонную муфту на эластомерную производства ЗМИ. За пол года непрерывной работы в различных погодных условиях (грозы, сильный ветер, обильный снег, мороз до -15 град) практически не отмечено ни одного сбоя в работе модернизированного щита даже при разрыве троса и срыве контр-груза, который давно требовал замены.

Измерения точности позиционирования щита выполнены методами высокоточной лазерной геодезии с использованием лазерного трекера API 3 (Рис.17) сразу после модернизации щитов N720, 721. Аналогичные измерения после завершения длительных испытаний не проводились, проверялось только механическое состояние ШВП, редукторов и ШРУСов, которое не вызвало замечаний. После длительной работы модернизированного щита отмечен только незначительный износ прижимных роликов радиальной каретки, которые и при обычной скорости движения щита имеют заметную выработку после 20 лет интенсивной работы. Для уменьшения износа прижимных роликов радиальной каретки требуется более тщательное выставление (с использованием средств геодезии) продольной оси радиальной каретки параллельно направляющим рельсам. Также необходимо обеспечить равномерный прижим разных роликов с подбором прижимных пружин, что будет способствовать уменьшению гистерезиса прямого и возвратного движения и повышению точности позиционирования щита.

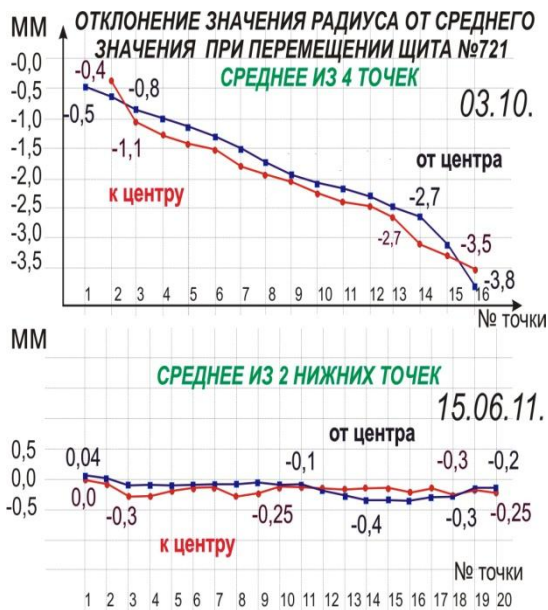


*Рис.17. Лазерный трекер API 3 с установленным уголковым отражателем на поверхности щита*

Ниже приведена методика и результаты измерений (Рис.18-19)

### **Методика измерений точности позиционирования ОЭ с лазерным трекером API.**

- *Измерения проводились после захода солнца, чтобы избежать неравномерного прогрева прибора и щитов прямыми солнечными лучами.*
- *Прибор устанавливался на асфальтовой дорожке. Ножки штатива для устойчивости приклеивались к асфальту клеевым пистолетом.*
- *Измерения производились на стандартный угловой отражатель (CCR) на магнитной подставке.*
- *Для компенсации влияния ошибок, связанных с изменением температуры окружающей среды, в процессе измерений производился непрерывный мониторинг температуры окружающего воздуха и давления, и вводились соответствующие поправки в измеренные расстояния (в автоматическом режиме).*
- *Для компенсации ошибок измерений, связанных с возможным смещением прибора во время работы, была установлена временная реперная точка на бетонном основании телескопа, координаты которой периодически измерялись в процессе замеров. Поправки за смещение прибора по направлению радиуса вводились в координаты каждой измеренной точки в пост-обработке*



15.03.2010. С.к.о. разности между значениями прямо и обратно 0,23 мм.

15.06.2011. Шаг перемещения щита 50 мм. С.к.о. разности между значениями прямо и обратно 0,12 мм.



15.03.2010. С.к.о. отклонения от среднего значения перемещения 0,3', наклон  $\pm 0,5'$

15.06.2011. С.к. о. отклонения от среднего значения 0,2' наклон  $\pm 0,2'$



15.03.10 С.к.о. разности прямо и обратно 0,18'

14.06.11. С.к.о. разности прямо и обратно 0,04'.



С.к.о. точки при возвращении 0,04 мм; если исключить значения отклонений в точках 3 и 18 (как выходящие за 3 сигма), то с.к.о. точки при возвращении 0,015 мм. Эта оценка включает в себя величину невозвращения щита на старое место после смещения и ошибку измерения трекером.

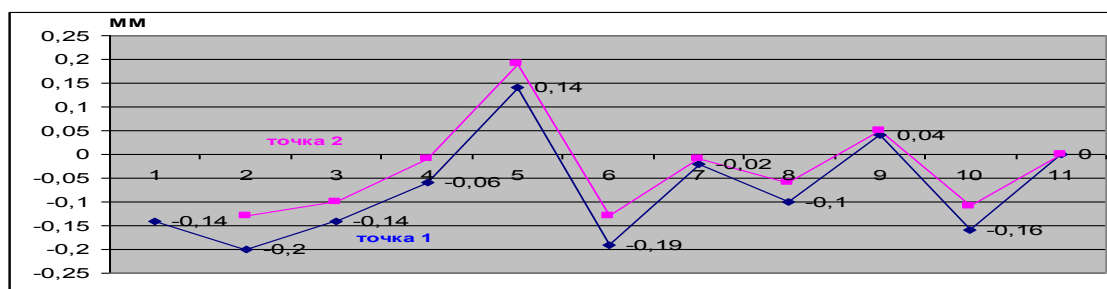


Рис.19. График величин невозвращения модернизированного щита № 721 в исходную точку при перемещении щита вперед-назад по радиусу  $\pm 10$  см по двум точкам замера (16.06.11),  $СКО=0.15$ мм (вверху). График величин невозвращения типового щита № 152 в исходную точку при перемещении щита вперед-назад по радиусу  $\pm 10$  см относительно исходной точки (11.04.12),  $СКО=0.04$  мм. (внизу)

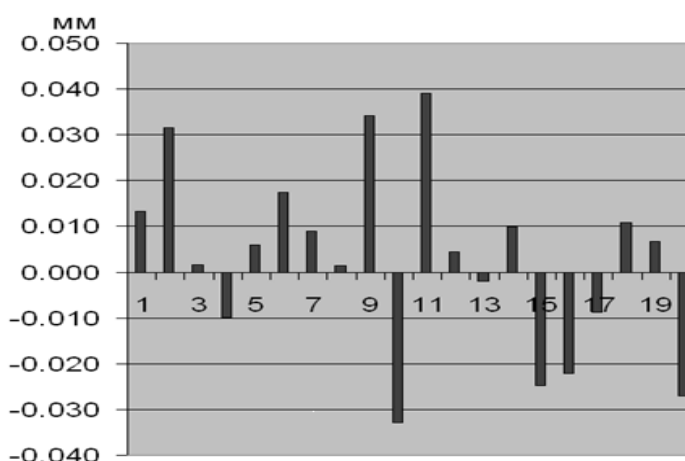


Рис.20. Пример измерения точности наведения щита N720 на заданную точку по радиусу трекером API 3 после модернизации кинематики и привода щита.  $СКО= 18$  мкм, включая ошибку измерений самого прибора в данном режиме не менее 10 мкм

По результатам геодезических измерений точность позиционирования щитов по радиусу/углу места/ азимуту возросла после модернизации в 6/4/2, однако периодический характер азимутальной ошибки до и после смены привода говорит о неудовлетворительном состоянии пружины

азимутального механизма выборки люфта щита N721, что подтвердила служба эксплуатации.

СКО повторяемости наведения щита на заданную точку выросла в 10 раз (рис.19-20).

Кроме существенного повышения точности наведения щита и скорости позиционирования (в 10-20 раз) в несколько раз уменьшилось мгновенное энергопотребление щита и более чем на порядок энергозатраты на установку щита в заданное положение.

В июне 2011 г разработанные для ОЭ РАТАН-600 новые кинематические механизмы (ШВП и ШРУСы) установлены на двух щитах Северного и двух щитах Южного сектора РАТАН-600 и с тех пор участвуют в режиме штатных наблюдений.

## **6.Способы реализации проекта**

Процесс модернизации радиотелескопа может быть щадящим для наблюдательных программ, поскольку новая идеология и модель управления антенной может отлаживаться на неработающих частях инструмента (например, на группе 18 АС “Юг+Плоский” практически неиспользуемой в в режиме многоазимутальных наблюдений) и только после завершения испытаний и пробных наблюдений, а также тщательной предварительной подготовки можно быстро провести модернизацию одного из работающих секторов. Сделать это целесообразно в три этапа, первый этап – постепенная замена в течение года винтов и карданов ОЭ одного сектора с сохранением старых приводов с сельсинами и АСУ в целом без остановки наблюдений с периодической автоматической автоколлимационной юстировкой ОЭ с новыми винтами, второй этап – монтаж шкафов управления (ШУ) на нижней галерее сектора с прокладкой необходимых кабелей от ШУ к каждому щиту сектора и от ШУ к управляющему компьютеру что займет пол-года, третий этап - быстрая замена приводов с энкодерами и переходом на новую отлаженную идеологию АСУ с остановкой наблюдений. Как показали поисковые работы замена (демонтаж) старого привода на новый выполняется бригадой слесарей (2-3 человека) за полтора-два часа и темп замены приводов пятью бригадами может быть не менее 20 приводов в день. Поэтому для замены приводов всего сектора потребуется 35 рабочих дней после чего ОЭ становятся элементами новой отлаженной АСУ. Затем за 2-3 недели выполняется привязка в автоколлимационном положении шкал всех абсолютных многооборотистых энкодеров с помощью лазерного трекера API за чем следует быстрая автоматическая автоколлимационная юстировка антенны и пробные наблюдения. В результате через 3-4 месяца после остановки наблюдений можно будет их продолжить на

модернизированном секторе с новой по качеству и возможностям антенной. Напомним, что прошлая модернизация АСУ во второй половине 80-х годов касалась в основном верхнего уровня, узлов управления, а также замены пускателей асинхронных приводов, длилась несколько лет и сопровождалась полной остановкой всех работающих секторов.

## **7.Заключения и выводы**

Результаты испытаний модернизированных кинематических узлов и механизмов свидетельствуют о правильности выбранной кинематической схемы и способов ее реализации.

Модернизация кинематических узлов и механизмов ОЭ РАТАН-600 и на этой базе АСУ РАТАН-600 в целом открывает возможность преобразования радиотелескопа РАТАН-600 в высокоточный инструмент с гибкой управляемой поверхностью, с функциями длительного сопровождения и быстрого сканирования быстропеременных космических объектов. Для режима сопровождения/сканирования и повышения эффективности в режиме прохождения и обзора также необходимо повысить точность установки и перемещения вторичного зеркала на дуговом и радиальном рельсовом пути (проект М.А.Великотного).

### Выводы из проделанной работы:

- Реализация проекта позволит остановить прогрессирующий износ существующих кинематических узлов и неизбежный рост расходов на эксплуатацию инструмента.
- Выполнение проекта многократно повысит надежность и ресурс инструмента, благодаря применению режима безударного регулирования скорости, плавным разгонным и тормозным характеристикам современных сервоприводов.
- За счет повышения КПД кинематических механизмов и скоростей перемещения ОЭ на порядок и более снизятся энергозатраты инструмента на выполнение фиксированного объема наблюдений и потери наблюдательного времени на проведение регламентных работ.
- Проект позволит существенно повысить точность позиционирования ОЭ РАТАН-600. Повышение точности позиционирования модернизированных ОЭ происходит за счет уменьшения собственных погрешностей кинематических механизмов, уменьшения гистерезиса в

траекториях движения ОЭ, вызванного зазорами и люфтами кинематических соединений, а также за счет перехода от аналоговой к цифровой технике, измерительным устройствам и каналам связи.

- Проект позволит в будущем создать единую АСУ, управляющую ОЭ, каретками, облучателями и поворотным кругом с отображением текущего положения всех объектов управления и в дальнейшем перейти к режиму безлюдных наблюдений.
- Повышение точности формирования поверхности радиотелескопа и установки (движения) облучателей позволит расширить диапазон наблюдения слабых источников в коротковолновую область с 1 см до 7 мм, а по ряду задач (Солнце) и короче (до 3-4 мм).
- Выполнение проекта позволит приступить к освоению режимов “Бегущая парабола” на АС “Юг+Плоский”, режимов длительного сопровождения и сканирования объектов в первую очередь быстропеременных (Солнце).
- В режимах сопровождения и сканирования откроются принципиально новые возможности для исследования физики Солнца, включая вспышечную, предвспышечную активность, микровсплески в ДЦМ диапазоне, для изучения динамических процессов и картографирования с высоким пространственным, частотным и временным разрешением.
- Выполнение проекта многократно повысит эффективность радиотелескопа для работы по быстропеременным и вспыхивающим источникам.
- Реализация высокой точности и длительного сопровождения сделает возможным наблюдение в коротковолновом диапазоне слабых молекулярных линий галактических и внегалактических объектов, включая области звездообразования с усиливающим мазерным эффектом.

### **Состояние проекта**

В настоящее время проект полностью подготовлен концептуально с проработкой и обоснованием основных вопросов модернизации ОЭ. Выполнены необходимые расчеты и большой объем 3D моделирования. По многим вопросам модернизации ОЭ были выполнены не только НИРы, но и НИОКРы. Проведены длительные испытания модернизированного ОЭ а также оценка точности его позиционирования методами лазерной геодезии. Последующая работа по проекту модернизации ОЭ должна включать:

1. Испытание режима одновременного управления ОЭ по трем координатам по трехпроводному интерфейсу CAN-open.

2. Демонстрацию возможности динамического управления модернизированным ОЭ (3 сервопривода) в режиме наведения.

3. Проведение динамических наблюдений Солнца в режиме сопровождения и сканирования одним ОЭ и независимую оценку точности динамического управления ОЭ с помощью лазерных трекеров АРІ в динамическом режиме их работы.

4. Завершение подготовки схемы управления группой щитов (25 элементов) и сектором (225 элементов).

5. Уточнение и оптимизацию стоимости и возможных сроков реализации проекта в целом.

После выполнения поисковых работ оценка затрат на модернизацию одного ОЭ по оптимальному варианту с использованием ШВП и шагового сервопривода СПШ и синхронного сервопривода ФЕСТО на трех осях находилась на уровне 250 т.р. и 330 т.р. на щит соответственно в ценах 2011 г. Оба привода прошли успешные испытания на модернизированном ОЭ РАТАН-600 однако привод ФЕСТО показал лучшие динамические и эксплуатационные характеристики и может быть в нынешнем виде рекомендован для модернизации ОЭ, сервопривод СПШ нуждается в доработке в плане повышения эксплуатационных характеристик и климатости. Поэтому разница в стоимости способов модернизации щита с приводами СПШ и ФЕСТО должна снизиться из-за замены бюджетных элементов привода СПШ на более надежные и дорогие. В то же время в последние годы появился более бюджетный синхронный привод ФЕСТО российской сборки в г. Симферополь. Важным положительным моментом в пользу использования привода ФЕСТО является наличие широкой сети наладки и обслуживания, включая представительства ЗАО “ФЕСТО” в Пятигорске и Ростове-на-Дону. Специалисты ФЕСТО приняли активное участие в испытаниях привода ФЕСТО на РАТАН-600. Совместно с ними была подготовлена схема подключения группы щитов радиотелескопа (рис. 21), ими также подготовлен пример устройства шкафа управления на 4 щита (рис. 22).

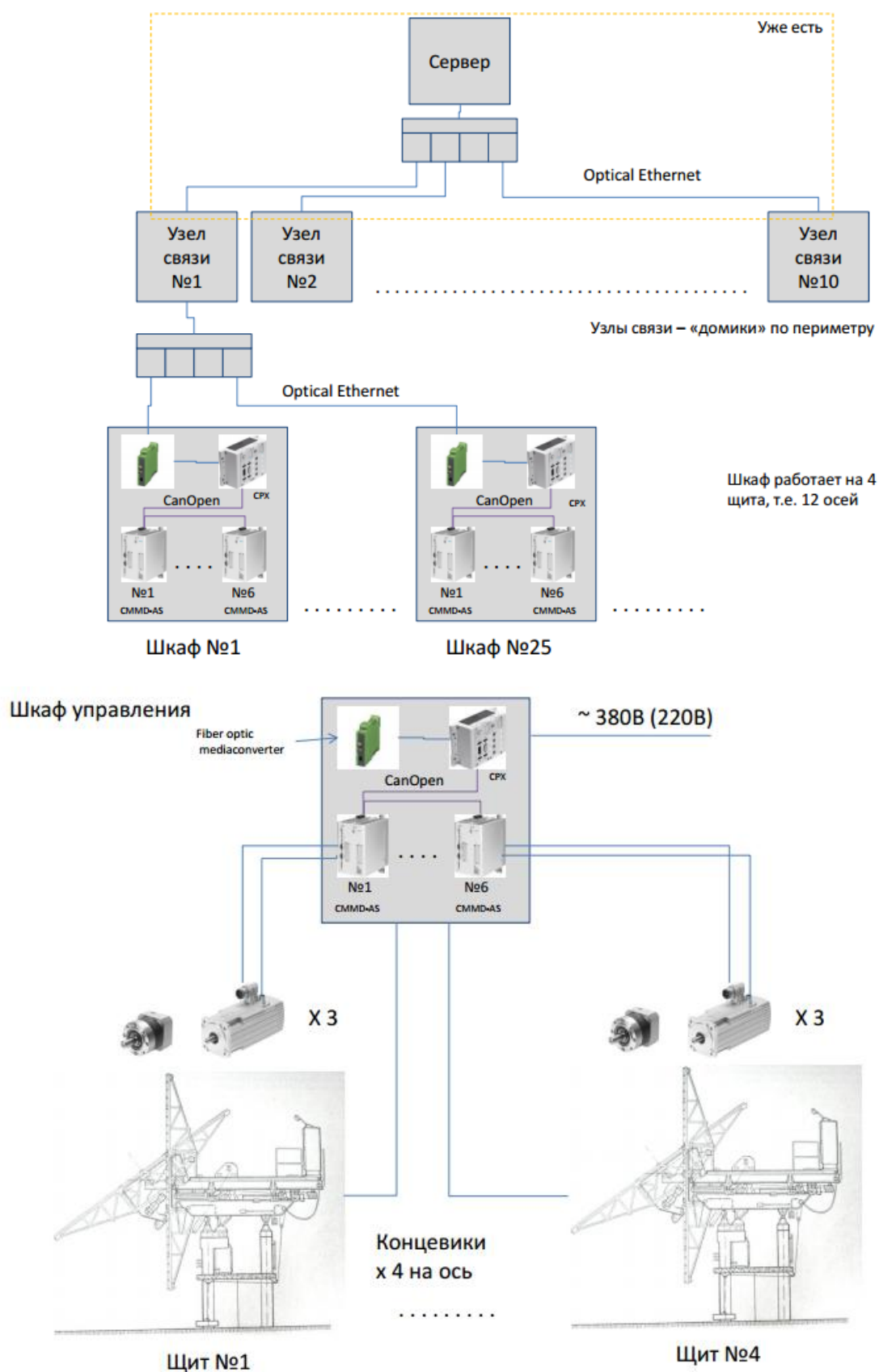


Рис.21. Схема подключения групп щитов радиотелескопа РАТАН-600



*Рис.22. Пример устройства шкафа управления на 4 щита радиотелескопа РАТАН-600*

В заключение заметим, что несмотря на значительные в целом ожидаемые затраты на реализацию проекта они составят не более 10 % от начальной (базовой) стоимости инструмента.