

---

---

# ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

---

---

УДК 62.83.621.3

М. А. САДОВНИКОВ, В. С. ТОМАСОВ, В. А. ТОЛМАЧЕВ

## ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Приведены требования к точностным характеристикам систем наведения современных высокоточных оптических комплексов космического контроля и изложены основные проблемы, возникающие при реализации следящих электроприводов, их обеспечивающих. Освещены подходы к построению энергетических и информационных подсистем электроприводов.

*Ключевые слова:* оптические комплексы космического контроля, следящий электропривод, опорно-поворотное устройство телескопа.

Околоземное космическое пространство последние несколько десятков лет является областью активной космической деятельности России, США и Китая. Влияние этой деятельности на научный, технический, промышленный и военный потенциал государств непрерывно возрастает. Космические аппараты и обслуживающая их наземная инфраструктура обеспечивают космическую связь и предоставляют информацию для таких отраслей, как навигация, геодезия, метеоразведка, дистанционное зондирование Земли, картография, оптико-электронная и радиотехническая разведка наземных, морских, воздушных и космических объектов, а также для различных научных исследований. Информация о космической деятельности, в том числе в военных целях, о текущей и прогнозируемой обстановке в околоземном космическом пространстве представляет все большую ценность для принятия стратегических решений и проведения различных мероприятий военными и гражданскими организациями Российской Федерации.

Технической информационной системой, обеспечивающей получение объективных оперативных данных в интересах различных потребителей, является система контроля космического пространства РФ, привлекающая радиотехнические и оптико-электронные средства (принадлежащие различным ведомствам), в том числе оптико-электронные и лазерные средства из состава наземного комплекса управления отечественными космическими аппаратами.

Объектами наблюдения для системы контроля являются находящиеся в околоземном космическом пространстве искусственные спутники Земли, в том числе действующие иностранные и отечественные космические аппараты, выводящие ракетные блоки и транспортные космические корабли, а также находящийся в околоземном пространстве „космический мусор“.

Задачами контроля являются обнаружение космических объектов, контроль и прогнозирование их движения, распознавание типа и принадлежности обнаруженных объектов, оперативное выявление опасных событий в околоземном космическом пространстве, в том числе опасных сближений с объектами „космического мусора“.

Сложность решения подобного рода задач обусловлена большим количеством подлежащих контролю объектов (ориентировочно более 100 000 объектов с учетом малоразмерного „космического мусора“), большими размерами подлежащего контролю космического пространства (высоты полета от 120 до 120 000 км и наклона от 0 до 180°), разнообразием параметров объектов (размеры от долей сантиметра до десятков метров), сложностью движения объектов в околоземном космическом пространстве (вследствие влияния гравитационного поля Земли, торможения в верхних слоях атмосферы, маневрирования и т.п.) и высокими требованиями к точности и достоверности информации.

Исторически первыми средствами наблюдения за искусственными спутниками Земли являлись оптические (астрономические) инструменты. И в настоящее время наземные оптико-электронные средства (по традиции их часто называют оптическими телескопами) играют первостепенную роль при обнаружении и контроле космических объектов, особенно на больших удалениях. Несомненными и уникальными достоинствами оптических телескопов являются: возможность обнаружения удаленных объектов при солнечном или лазерном подсвете на фоне ночного или сумеречного неба, включая возможность их обнаружения в инфракрасном диапазоне длин волн; высокая точность определения угловых координат; возможность получения оптических изображений космических объектов и высокоточных фотометрических и спектрофотометрических измерений их оптического блеска [1].

Анализ [2] развития оптических телескопов показывает, что длительный период линейного роста суммарной площади зеркал действующих телескопов в начале 90-х годов прошлого столетия сменился ее экспоненциальным ростом. Новые поколения широкопольных и узкопольных телескопов с размерами зеркал от 10—20 см до 3 м и более обеспечивают гораздо лучшее качество изображений даже при обычных наблюдениях, не связанных с коррекцией влияния атмосферной турбулентности. В настоящее время качественными признаются наблюдения с угловым разрешением менее 0,5". Использование систем адаптивной оптики позволяет преодолеть „атмосферный барьер“ качества изображений и наблюдений.

Для управления угловым положением оптической оси в пространстве оптический телескоп устанавливается в опорно-поворотное устройство (ОПУ), имеющее, как правило, несколько осей вращения. Создание таких ОПУ и систем управления ими — одна из самых сложных задач современного прецизионного приборостроения. Дело в том, что ОПУ и системы электромеханического управления, решающие задачу совмещения оптической оси телескопа с линией визирования наблюдаемого движущегося объекта или задачу пространственной стабилизации поля зрения телескопа и оптического изображения в его фокальной плоскости, должны обеспечивать уникально высокое качество наведения.

В задачах, требующих обнаружения объектов с предельно слабым блеском, для обеспечения длительных экспозиций (от единиц секунд до нескольких минут) точность удержания оптической оси в пространстве должна превышать 0,5" в течение времени экспозиции. В задачах сопровождения движущихся космических объектов часто требуется, чтобы динамическая погрешность сопровождения не превышала 1" при скоростях смещения объекта от единиц угловых секунд в секунду до 10 °/с и более. В задачах наведения предельно узких лазерных пучков (при локациях навигационных и геодезических космических аппаратов, а также Луны и дальних космических аппаратов) требуется абсолютная, по отношению к используемой системе координат, точность наведения не хуже нескольких угловых секунд, поддерживаемая в течение всего сеанса наблюдения (от нескольких сотен секунд до нескольких десятков минут). В задачах получения высокоразрешающих оптических изображений требуется достаточно длительное удержание объекта наблюдения в пределах изопланатического угла, величина которого в видимом диапазоне длин волн обычно не превышает 5".

Указанное качество наведения должно быть обеспечено при вращающихся массах, составляющих от нескольких десятков килограмм до нескольких десятков тонн, при наличии

возмущающих неравномерных моментов от сил вязкого и сухого трения, в том числе в подшипниковых узлах и кабельном переходе, переменных (зубцовых) моментов электродвигателя, ветровых и динамических нагрузок и с учетом конечной жесткости конструкции ОПУ и его резонансных частот.

В связи с вышеизложенным к основным проблемам, возникающим при создании следящих электроприводов комплексов высокоточных оптических измерений, относятся:

— необходимость обеспечения широкого диапазона (до 18 000) скоростей слежения при малых значениях среднеквадратичных ошибок (1—2");

— необходимость обеспечения плавного движения оптической оси комплекса при инфранизких скоростях слежения (до единиц угловых секунд в секунду) в условиях нежесткости конструкции ОПУ и возможности возникновения механического резонанса на частотах от единиц до нескольких десятков герц;

— неполное соответствие реальных параметров механики осей ОПУ расчетным значениям (которые представляются разработчиками устройства), что не позволяет оперировать достоверной моделью ОПУ на этапе проектирования системы управления.

Таким образом, основные функциональные характеристики комплексов в значительной степени определяются необходимой точностью слежения за наблюдаемыми объектами. Как было отмечено выше, в решении подобных задач важную роль играет конструктивное исполнение всех элементов измерительного телескопа и, в первую очередь, его опорно-поворотного устройства, которое представляется в процессе моделирования и проектирования электроприводов, как правило, двухмассовым механизмом. Угловая частота резонанса этого механизма, вызванная крутильными деформациями [3], в конечном итоге определяет полосу пропускания частот контуров регулирования системы управления и, как следствие, ее быстродействие.

В этих условиях именно на цифровой следящий электропривод возлагается задача компенсировать все возможные несовершенства конструкции механических узлов телескопа и его кабельного перехода, а также обеспечить заданную точность при относительно невысоком быстродействии системы, обусловленном низкой резонансной частотой осей ОПУ. При этом силовые приводы измерительных телескопов таких комплексов необходимо проектировать с учетом дискретности протекания электромагнитных и электромеханических процессов, нелинейностей, упругих связей, сил трения, возмущающих воздействий со стороны подшипников и кабельного перехода, значительно усложняющих процессы управления [4].

Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем (ЭТ и ПЭМС) Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) более 25 лет по заказу предприятий и организаций Российского космического агентства занимается исследованиями, проектированием и вводом в эксплуатацию систем прецизионного электропривода для информационно-измерительных систем ракетно-космической техники, уникальных оптических комплексов наблюдения космического пространства и Российской сети лазерных станций.

Структурно комплексы высокоточных оптических измерений содержат двухканальные (по азимуту и углу места) энергетические и информационные подсистемы [4—6].

*Энергетическая подсистема* (ЭП) включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового и электромеханического преобразователей и обеспечивает протекание процессов электромеханического преобразования энергии. ЭП определяет предельно достижимые динамические характеристики электроприводов комплекса (максимальные скорости и ускорения следящих осей) и, в значительной степени, массогабаритные показатели систем управления [5]. При этом следует иметь в виду, что в электроприводах, работающих на нагрузку с упругими связями, к энергоподсистеме предъявляются требования по достижению больших значений ускорения в целях демпфирования колебаний [3, 6].

В качестве электромеханического преобразователя в последних разработках кафедры используются синхронные машины с постоянными магнитами на роторе, которые характеризуются большим значением отношения вращающего момента к моменту инерции ротора, определяющего предельное быстродействие машины.

Для управления вентильными двигателями во всех проектах кафедры применяются автономные инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией [4—6] на интеллектуальных силовых модулях, которые представляют собой интегрированные силовые устройства со схемами управления и защиты.

*Информационная подсистема* обеспечивает сбор информации, поступающей от датчиков обратных связей, реализацию цифровых контуров регулирования переменных координат системы, выработку сигналов управления силовыми преобразователями, оперативную диагностику и обработку аварийных ситуаций, связь с компьютером верхнего уровня иерархии.

В качестве датчиков положения оси инструмента в современных системах чаще всего используются высокоточные оптические энкодеры, обеспечивающие точность определения положения на уровне 0,01—0,05". Ведущие фирмы-производители подобных датчиков оснащают свои изделия специализированными высокоскоростными последовательными интерфейсами. В качестве примера можно привести интерфейс EnDat (фирма "Heidenhain", Германия) и интерфейс BISS (фирма "Renishaw", Великобритания), обеспечивающие передачу информации со скоростью до 10 Мбит/с с аппаратной реализацией командного протокола обмена информацией и контроля ее достоверности. Однако на сегодняшний день не существует серийно выпускаемых микроконтроллеров со встроенными интерфейсами подобного типа. Поэтому данные интерфейсы приходится реализовывать с использованием программируемых логических матриц

При создании крупногабаритных прецизионных систем стандартной практикой является установка нескольких (от двух до четырех) датчиков положения на каждой оси инструмента. Это позволяет учесть механическую нежесткость конструкции и скомпенсировать геометрические погрешности установки датчиков и других элементов системы. В этом случае информационная подсистема должна обладать соответствующим количеством интерфейсов для параллельной обработки информации со всех датчиков.

Для обеспечения требуемых точностных и динамических характеристик в подобных системах реализуются прямые цифровые регуляторы и цифровые фильтры до 10-го порядка. При этом частота дискретизации составляет десятки кГц. Указанные условия требуют применения в качестве вычислительных устройств высокопроизводительных сигнальных процессоров с плавающей точкой, обладающих вычислительной производительностью до 300 млн инструкций в секунду. В особо критических случаях, где требуется распараллеливание вычислений, часть вычислительного алгоритма приходится реализовывать аппаратно с помощью программируемых логических матриц.

Процедуры настройки и подбора параметров регуляторов в сложных прецизионных системах управления без предварительного детального моделирования системы затруднены. Существующие в настоящее время программные пакеты (такие, как MatLab) позволяют построить детальные модели механической и электрической частей системы, выбрать оптимальную структуру и настройку регуляторов. Однако при переходе от модели к реальной системе зачастую возникают проблемы, связанные с неполной идентичностью модели реальному объекту регулирования и различной точностью реализации вычислительных алгоритмов на модели и в реальном управляющем устройстве. Для решения данных проблем была разработана специальная технология отладки и настройки реальных объектов с помощью пакета MatLab, включающего процедуру экспресс-идентификации [7], созданы специальный драйвер и протокол, позволяющие непосредственно в пакете MatLab осуществлять управление реальным оборудованием. Были также разработаны вычислительные алгоритмы базовых

управляющих функций, позволяющие осуществлять перенос параметров регуляторов из модели в реальную систему, при котором обеспечивается повторяемость результатов работы модели и реального объекта.

Для связи с компьютером верхнего уровня оптимальным представляется использование CAN-интерфейса, который адаптирован для работы в системах реального времени и гарантирует минимальное время доставки пакета информации в отличие от других последовательных многоточечных интерфейсов. С помощью такого интерфейса удастся обеспечить выдачу целеуказаний по траектории движения космического аппарата с частотой дискретизации до нескольких килогерц, которая является вполне достаточной с учетом полосы пропускания современных оптических систем слежения (от единиц до десятков герц).

Для управления силовыми преобразователями энергии информационная подсистема должна вырабатывать многофазные широтно-модулированные сигналы, подаваемые на управляющие входы энергетической подсистемы. Для этого в информационной подсистеме должны присутствовать многофазные широтно-импульсные модуляторы. В некоторых прецизионных оптических системах в целях повышения надежности для управления осями используются секционированные двигатели, что обуславливает необходимость управления каждой секцией двигателя от отдельного силового преобразователя [8, 9]. Для обеспечения этой возможности требуется параллельная реализация контуров регулирования токов отдельных секций с выработкой широтно-импульсных сигналов управления силовыми преобразователями каждой из секций. Это накладывает дополнительные требования к вычислительной производительности информационной подсистемы и, соответственно, к выбору количества интегрированных в нее многофазных широтно-импульсных модуляторов.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод, что реализация информационной подсистемы целесообразна на основе комбинации высокопроизводительного цифрового сигнального процессора с плавающей точкой и программируемой логической матрицы объемом до 10 000 логических ячеек. При этом цифровой сигнальный процессор выполняет основные функции цифрового регулирования, тогда как на программируемой логической матрице реализуются вычислительные функции, специфические интерфейсы с датчиками положения и широтно-импульсные модуляторы.

На базе вышеизложенных решений по проектированию энергетических и информационных подсистем в последние годы на кафедре ЭТ и ПЭМС СПбГУ ИТМО были разработаны и сданы в эксплуатацию десятки прецизионных следящих систем с максимальными моментами на исполнительных осях от 5 до 5000 Нм с точностью наведения и сопровождения объектов не хуже 1—2".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаргородский В. Д., Новиков С. Б., Гришин Е. А. и др. Новая аппаратура для высокоточных наблюдений космических объектов: первые результаты измерений и перспективы развития Алтайского оптико-лазерного центра // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. № 7.
2. Терещиж В. Ю. Современные оптические телескопы. М.: Физматлит, 2005.
3. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб: Энергоатомиздат, 1992.
4. Сеницын В. А., Толмачев В. А., Томасов В. С. Системы управления комплексом позиционирования и слежения // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39, № 3. С. 22—27.
5. Глазко Т. А., Томасов В. С. Состояние и перспективы применения полупроводниковых преобразователей в приборостроении // Там же. 1996. Т. 39, № 3. С. 5—10.
6. Сеницын В. А., Томасов В. С. Энергоподсистемы следящих электроприводов измерительных телескопов // Там же. 2008. Т. 51, № 6. С. 12—17.

7. Ильина А. Г. Параметрическая идентификация вентильного электропривода азимутальной оси телескопа траекторных измерений // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. Вып. 68. С. 33—38.
8. Томасов В. С., Овчинников И. Е., Егоров А. В. Энергоподсистема большого алтайского телескопа траекторных измерений // Изв. Тульского гос. ун-та. 2010. Вып. 3; Ч. 3. С. 216—222.
9. Овчинников И. Е., Егоров А. В. Компенсация радиальных электромагнитных сил вентильного двигателя, вызванных несимметрией статорной обмотки // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. Вып. 5. С. 52—58.

**Сведения об авторах**

- Михаил Алексеевич Садовников** — д-р техн. наук; ОАО «Научно-производственная корпорация „Системы прецизионного приборостроения“», Москва; зам генерального конструктора; E-mail: msadovnikov@gmail.com
- Валентин Сергеевич Томасов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: tomasov@ets.ifmo.ru
- Валерий Александрович Толмачев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
электротехники и прецизионных  
электромеханических систем

Поступила в редакцию  
18.01.11 г.