

УПРАВЛЕНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ РАДИОТЕЛЕСКОПА *Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю., Шишлаков В.Ф., Корнюшин А.М.*

Ключевые слова: радиотелескоп, параметрическая оптимизация, Matlab, Simulink, ЛАХ, ПИД регулятор.

Аннотация. В структуре нейронных сетей основной их элемент нейрон выполняет функцию, носящую название "функция активации". Эта функция имеет линейную зону и насыщение, при положительном и отрицательном значениях аргумента. (Saturation). То есть, эта функция имеет явно нелинейный характер зависимости от значения аргумента, или длины линейной зоны. При малой длине линейной зоны, функция активации приобретает релейные свойства. Свойства, подобные функциям активации нейронов, имеют усилители в прямой цепи передачи действия в приводах различных устройств, и эти свойства нужно учитывать при настройке регуляторов приводов. В статье исследуются такие настройки. Они похожи на процедуры обучения нейронных сетей. Другой отличительной особенностью статьи является оригинальное изложение методики построения желаемой логарифмической амплитудной характеристики привода как объекта управления и определение параметров регулятора с учетом ограничений. Методика может быть полезна при реализации системы управления приводами наведения радиотелескопа rt70 с регулируемой поверхностью главного зеркала на плато Суффа, (Узбекистан), предназначенного для исследования фундаментальных астрономических проблем дальнего космоса в миллиметровом диапазоне радиоизлучения.

RADIO TELESCOPE DISH SYSTEM CONTROL

Dubarenko V.V., Kuchmin A.Yu., Shishlakov V.F., Korniyushin A.M.

Keywords: radio telescope, parametric optimization, Matlab, Simulink, Bode plot, PID controller.

Abstract. In the structure of neural networks, their main element, the neuron, performs a function called the "activation function". This function has a linear zone and saturation, with positive and negative argument values (Saturation). That is, this function has a clearly non-linear character depending on the value of the argument, or the length of the linear zone. With a small length of the linear zone, the activation function acquires relay properties. Properties similar to the activation functions of neurons have amplifiers in the direct action transmission circuit in the drives of various devices, and these properties must be taken into account when configuring the drive controllers. The paper explores such settings. They are similar to neural network training procedures. Another distinctive feature of the paper is the original presentation of the methodology for constructing the desired logarithmic amplitude characteristic of the drive as a control object and determining the parameters of the controller taking into account the limitations. The technique can be useful in the implementation of the control system for the guidance drives of the rt70 radio telescope with an adjustable surface of the main mirror on the Suffa plateau, (Uzbekistan), designed to study fundamental astronomical problems of deep space in the millimeter range of radio emission.

Список сокращений и обозначений:

- РТ – радиотелескоп (radio telescope);
- КИР – космический источник радиоизлучения (cosmic radio source);
- РИ – радиоизлучение (radio emission);
- САУ – система автоматического управления (automatic control system);
- ОУ – объект управления (control object);
- ДО – динамический объект (dynamic object);
- ПМК – пространственная металлоконструкция (spatial metalwork);
- ГЗ – главное зеркало (primary reflector);
- ВС – вектор состояния (state vector);

ЗС – зеркальная система (reflector system);
ДУС – датчик угловых скоростей (angular velocity sensor);
АП – адаптивная поверхность (adaptive surface);
ОК – опорное кольцо (rim);
КР – контррефлектор (sub reflector);
ПЗ – перескопическое зеркало (periscopic mirror);
СК – система координат (coordinate system);
ИС – инерциальная система (inertial system);
ЦДОС – цифровой датчик углового перемещения главной обратной связи (digital angular displacement sensor of the main feedback);
ГО – горизонтальная исполнительная ось (horizontal control axis);
ВО – вертикальная исполнительная ось (vertical control axis);
ЦТ – центральная труба основания ГЗ (central base tube of the main mirror);
ФО – фокальная ось (focal axis);
ЛВ – линия визирования удаленного КИР (remote line of cosmic radio source sight);
АЛЧХ – асимптотическая логарифмическая частотная характеристика (asymptotic logarithmic frequency response);
ЖЛАХ – желаемая логарифмическая частотная характеристика (desired logarithmic frequency response);
ДНА – диаграмма направленности зеркальной системы по удаленному КИР при приеме на точечный приемник (radiation pattern of a dish system based on a remote space source when received by a point receiver).

Введение

Можно отметить два альтернативных подхода построения радиотелескопов, предназначенных для решения основных задач радиоастрономии. Первый подход связан с построением одиночных крупных антенных установок. Другой подход основан на использовании в составе радиотелескопа нескольких антенных установок, меньших размеров, связанных в систему интерферометра.

Теоретически, при равенстве площади апертуры зеркала одиночной антенны суммарной площади апертур антенн интерферометра, количество принимаемой энергии от наблюдаемого источника радиоизлучения в том и другом случае должно быть равным. Однако, количество энергии полезного радиоизлучения, снимаемой с антенны с меньшей площадью апертуры, при наблюдении удаленных космических объектов миллиметрового диапазона с очень низкими значениями уровня сигнала (отношения сигнал/шум), может быть недостаточно для преодоления порога чувствительности приемника. В этом случае одиночная антенна, с равной суммарной площадью апертуры, имеет преимущество по чувствительности, и именно по этой причине в мировой практике строительство крупных полноповоротных антенн радиотелескопов оправдано и актуально. Приблизительно можно дать такую оценку: крупные радиотелескопы «лучше видят» удаленные космические источники радиоизлучения на краю Вселенной [1].

Одним из основных препятствий создания крупных полноповоротных антенн радиотелескопов является то, что элементы поддерживающей конструкции таких радиотелескопов обладают значительной податливостью, а движущиеся части – огромными моментами инерции. Радиотелескоп как

механическая система находится под действием весовых, ветровых и тепловых возмущений. Совокупность этих факторов приводит к возникновению низкочастотных нелинейных нестационарных процессов, сопровождающихся слабым демпфированием, что отрицательно сказывается на качестве приема и влияет на точность управления.

Линейные размеры полноповоротных наземных антенн радиотелескопов достигают в настоящее время более 100м, а веса вращающихся частей более 5000т, при динамической ошибке наведения 3угл.с. При этом, среднеквадратическое отклонение отражающей поверхности главного зеркала от ее теоретического положения может быть обеспечено в пределах 30мкм [2].

Процесс наведения оси зеркальной системы радиотелескопа на космический источник радиоизлучения представляет в этом случае высокоточное (прецизионное) перемещение крупногабаритных конструкций в пространстве по определенному закону. При этом, в первом приближении, качество наведения на заданной несущей частоте РИ оценивается по величине ошибки наведения.

Несмотря на разнообразие форм, размеров и конструкций РТ, системы их управления функционально имеют много общего. Поэтому с методической точки зрения мы придерживаемся понятия «стационарная точка» - временное сечение процесса управления, в котором система дифференциальных уравнений объекта управления принимается линейной, с постоянными параметрами. Стационарная точка имеет временной интервал, на котором для постоянных параметров допускается «линейная зона». Выход из линейной зоны переводит привод антенны в разряд нелинейных объектов управления. Методы синтеза оптимальных систем автоматического управления для линейных и нелинейных объектов принципиально разные. Линейные оптимальные объекты нами рассматриваются как системы синтеза оператора обратной связи по вектору состояния относительно квадратичного критерия качества. Такая задача теоретически хорошо изучена и нами рассматривается для учета прикладной направленности. Оптимальное управление нелинейными объектами нами определяется как задача нелинейного программирования и в настоящей работе не рассматриваются.

Целью настоящей работы является: теоретическое обоснование процесса оптимизации параметров регулятора в любой выбранной стационарной точке во временной и частотной областях объекта управления с применением прикладного инструментального средства оптимизации Check Step Response Characteristics среде MatLab Simulink [3]. Указанное инструментальное средство позволяет иллюстрировать эффективность управления приводом наведения зеркальной системы радиотелескопа РТ-70 по результатам его имитационного моделирования.

Методы: нелинейной оптимизации, метод имитационного моделирования. **Результаты:** Проведена параметрическая оптимизация регулятора привода наведения РТ-70 по заданным ограничениям на переходной процесс и на управляющее воздействие. **Практическая**

значимость: в настоящее время в эксплуатации находятся два радиотелескопа типа РТ-70 с диаметром главного зеркала 70 м. в Евпатории и Уссурийске (Россия), и третий строится в Суффе (Узбекистан). Все приводы радиотелескопов могут быть оптимально параметрически настроены по описанной в статье методике.

Основное содержание

СН РТ состоит из натурального объекта (НО) и его компьютерной параметрической модели (ПМ), способной имитировать поведение этого объекта. В то время как НО выполняет свою основную функцию наведения антенны РТ под действием приводов наведения, ПМ параллельно или автономно осуществляет настройку параметров коэффициентов регулятора. Регулятор обычно включает в себя два корректирующих звена: звено последовательной коррекции (так называемый, PID-регулятор по ошибке наведения), обеспечивающий заданное качество в низкочастотном участке частотной характеристики САУ; звено коэффициентов обратной связи по вектору состояния (КОС ВС), обеспечивающий заданное качество в среднечастотном и высокочастотном участках частотной характеристики САУ. Настройка PID-регулятора и КОС ВС может осуществляться различными оптимизационными методами (нейронными сетями, эволюционными алгоритмами, Fuzzy-сетями, методами линейного и нелинейного программирования, а также методами случайного поиска) путем минимизации выбранных целевых функций при заданных ограничениях. [28]

Эффективность принимаемых от КИР сигналов оценивается разными показателями, важнейшим из которых является отношение мощности S полезного РИ к мощности N шума. Мощность S принимаемого полезного РИ пропорциональна точности наведения антенны РТ на КИР. Вот почему проблемы точности являются по-прежнему актуальными.

На рисунке 1 изображена структурная схема системы наведения антенны РТ на источник радиоизлучения, включающая в себя типичные элементы, которые можно отнести ко многим полноповоротным наземным радиотелескопам.

Численное исследование привода наведения по азимуту ЗС РТ-70 показало несколько существенных особенностей при синтезе системы управления и интерпретации результатов имитационного моделирования в среде MatLab Simulink. К таким особенностям относятся:

Необходимость применения гироскопических датчиков угловых скоростей для демпфирования собственных низкочастотных колебаний ЗС [4].

Введение в критерий качества управления новой целевой функции - желаемого вектора состояния (ВС) [8].

Синтез идентификатора (Наблюдателя) неизмеряемых координат ВС с применением желаемого ВС [10].

Применение оптимизационной процедуры отыскания параметров регулятора с использованием параметрической модели ОУ для его текущего

состояния и внешних воздействий [1].

Подобно нелинейным звеньям активации в нейронных сетях, усилительное звено исполнительного двигателя имеет линейный участок и участки насыщения, что придает процессам, прошедшим через такое звено, нелинейный характер, и это нужно учитывать при синтезе системы управления [2].

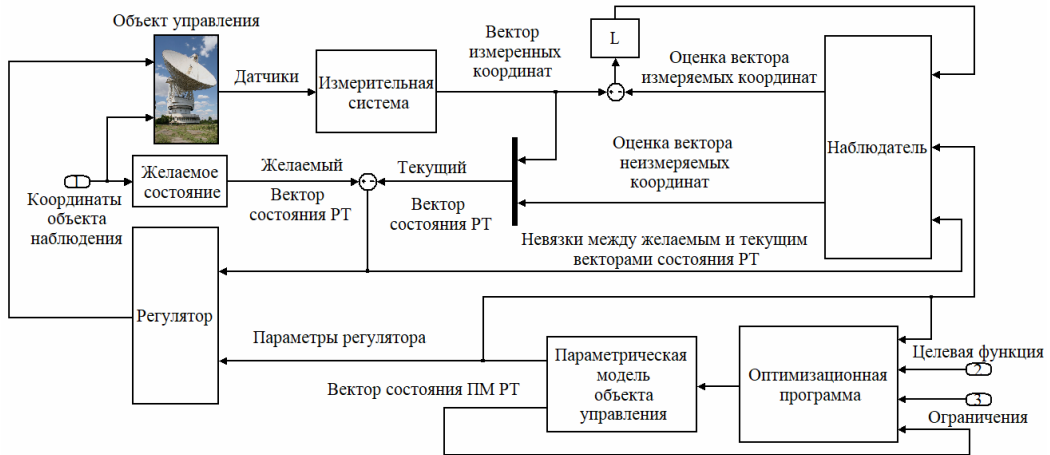


Рис. 1. Структурная схема системы управления зеркальной системой РТ с параметрической настройкой регулятора

1. Система автоматического управления радиотелескопа (рис. 1) Концепция построения измерительной системы

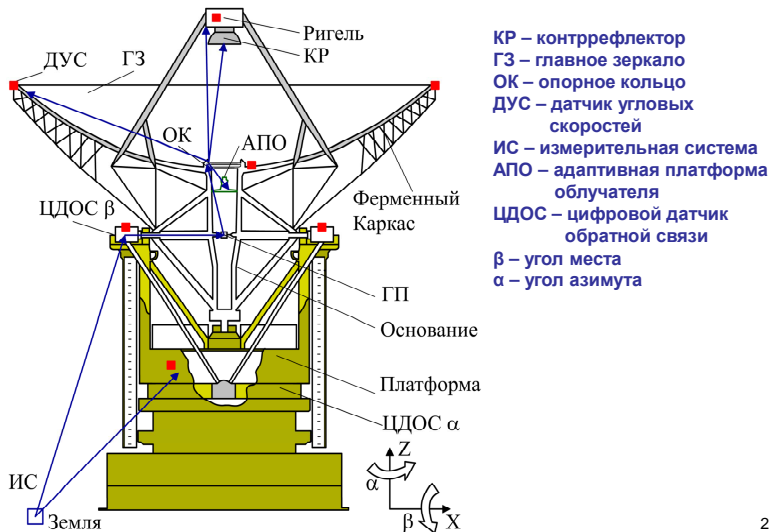


Рис. 2. Схема САУ наземного, полноповоротного РТ

Основным назначением САУ РТ является механическое перемещение элементов его зеркальной системы (ЗС) и радиоприемного устройства (облучателя) в такое положение, которое обеспечивает наилучшие условия приема радиоизлучения от его космического источника (КИР). [7]

Наилучшими условиями приема являются условия, при которых в процессе наведения:

- реальная геометрическая схема конструкции ЗС РТ совпадает с теоретической оптической схемой ЗС,
- направление фокальной оси (ФО) совпадает с направлением на КИР,
- отражающие поверхности зеркал конструкции ЗС РТ совпадают с теоретическими расчетными поверхностями этих зеркал.

Несовпадение указанных факторов приводит к ошибкам наведения РТ.

Основные контуры САУ РТ. Система управления большим РТ состоит из 4 основных контуров (рис. 3) [1].

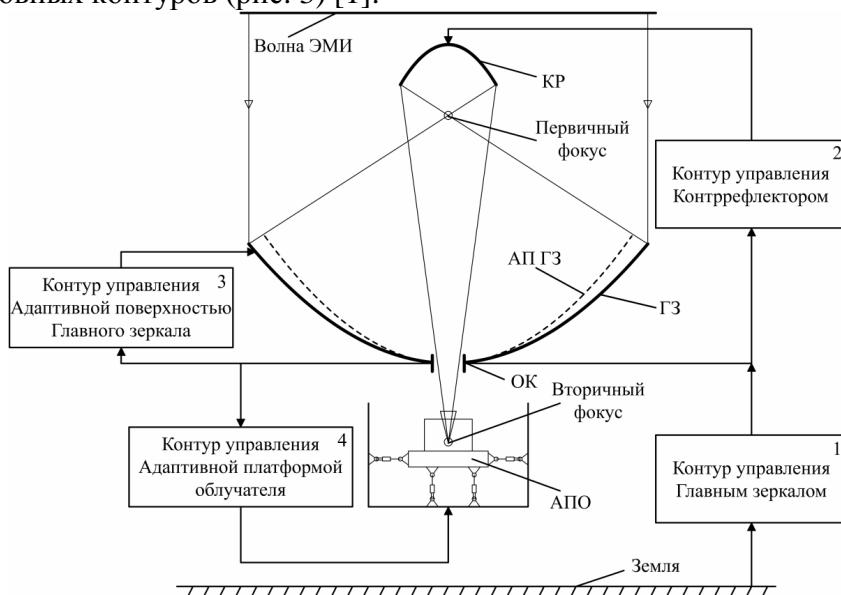


Рис. 3. Контуры управления ЗС РТ

1. Контур управления ГЗ. Наведение (рис. 4) ГЗ осуществляется по углу азимута и углу места так, чтобы фокальная ось АП, совместились с линией визирования КИР.

2. Контур управления КР. Положение КР изменяется так, чтобы фокус и фокальная ось АП ГЗ и фокус и фокальная ось КР совместились с минимальными ошибками.

3. Контур управления адаптивной поверхностью ГЗ. Положение щитов ГЗ меняется при помощи электромеханических актуаторов так, чтобы обеспечить минимальное среднеквадратическое отклонение (СКО) профиля поверхности от рассчитанного АП ГЗ.

4. Контур автофокусировки приёмника [9].

Наиболее жесткая часть ГЗ – верхняя часть центральной трубы, называемая опорным кольцом (ОК). На нем расположена система лазерных дальномеров (ЛазИС), с помощью которой измеряются координаты реперных точек КР, поверхности ГЗ и приемника. С ОК связана подвижная система координат (СК ОК), в которой производится расчет АП ГЗ и КР.



Рис.4. Основная расчетная схема системы наведения РТ

Качество управления линейных моделей можно оценивать методом асимптотических логарифмических частотных характеристик АЛЧХ [31]. Согласно этому методу для системы задается некоторое эквивалентное синусоидальное воздействие $\alpha_3(t) = A \sin(\omega_k t + \varphi)$, с которым связывается заданная максимальная угловая скорость системы $\Omega = A \omega_k$ и максимальное угловое ускорение $\varepsilon = A (\omega_k)^2$, по которым однозначно определяется частота колебаний ω_k , которая называется контрольной частотой. О качестве судят по тому, как система реагирует при подаче на нее $\alpha_3(t) = A \sin(\omega_k t + \varphi)$. Очевидно на выходе управляемой системы будет наблюдаться процесс $\alpha_{\text{вых}}(t) = A_{\text{вых}} \sin(\omega_k t + \varphi_{\text{вых}})$. Значение $\alpha_{\text{вых}}(t) - \alpha_3(t) = \theta$ определяет скалярную ошибку управления, отношение $K_k = A_{\text{вых}} / A$ определяет коэффициент усиления на контрольной частоте, а $\varphi_{\text{вых}} - \varphi = \Delta\varphi$ - фазовое запаздывание. При заданной ошибке управления, однозначно определяется K_k , который в качестве ординаты АЛЧХ, выраженной в децибеллах, называется контрольной точкой.

На рисунке 5 приведены частотные характеристики привода азимута РТ-70 (Уссурийск), полученные в результате натурных испытаний Ю.В. Постниковым (СПбЭТУ, ЛЭТИ) [4].

Входом гармонического воздействия был усилитель электропривода, а выходом были точки на ПМК, в которых устанавливались гироскопические датчики угловых скоростей (ДУС-ы) и с которых снимались сигналы, возбуждаемые этими гармоническими воздействиями.

При заданных θ , Ω , ε , контрольная точка K_k на оси частот фиксируется. С другой стороны на АЛЧХ фиксируется вертикальная асимптота,

соответствующая первой механической резонансной частоте ω_p , зависящей от свойств механической части ДО (рис. 6). Всплеск амплитуды на частоте ω_p достигает 20 Дб. Условия устойчивости системы управления требуют гарантированных запасов величин среднечастотного участка $(\omega_p - \omega_k)$, L_1 и L_2 . Поэтому стремление улучшить качество управления связано со сдвигом контрольной точки вправо и с уменьшением интервала $(\omega_p - \omega_k)$, но этому препятствуют условия устойчивости. Очевидно, сдвиг контрольной точки вправо возможен только за счет демпфирования резонансного всплеска на частоте ω_p . Демпфирование за счет управления может быть осуществлено только в определенных пределах, ограниченных линейной зоной (до насыщения) усилителя в прямой цепи передачи управляющего воздействия.

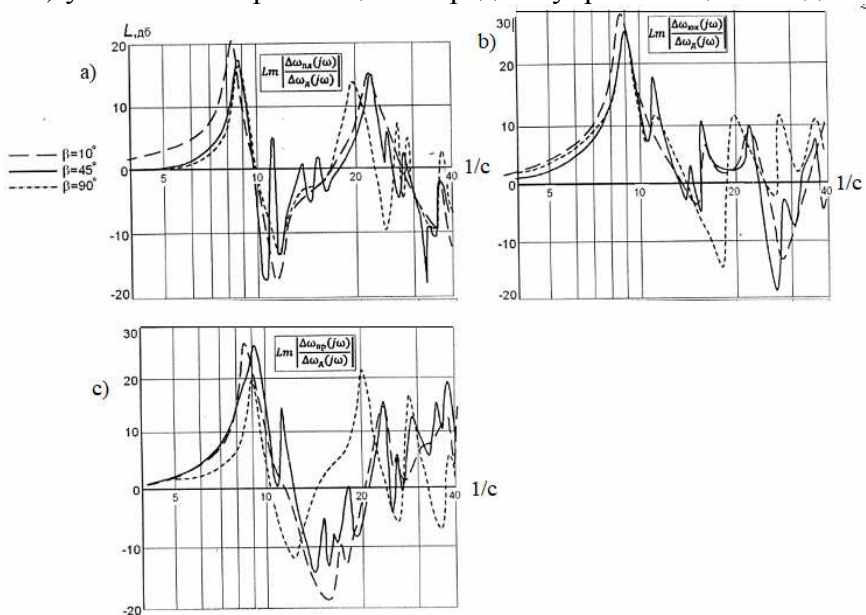


Рис. 5. Амплитудные логарифмические частотные характеристики привода наведения РТ-70 по азимуту, как $20 \lg$ отношения амплитуды частоты угловых колебаний элементов ПМК ($\omega_{пл}$ - платформы, $\omega_{юк}$ - основания и $\omega_{пр}$ - противовеса) к амплитуде частоты задающего колебательного воздействия $\omega_{дв}$.

Задачи управления РТ условно можно разделить на два класса: класс задач проектирования, в которых решаются принципиальные вопросы построения регуляторов в соответствии с принятыми критериями качества, и класс задач функционирования РТ в реальном времени.

Проблемы, стоящие в задачах проектирования и специфика принятия проектных решений при создании традиционных систем управления хорошо известны, сравнительно чётко обозначены и изучены. В итоге эти задачи сводятся к вариационным задачам и решаются с применением методов математического программирования. При этом трудоемкость задач проектных решений не имеет решающего значения.

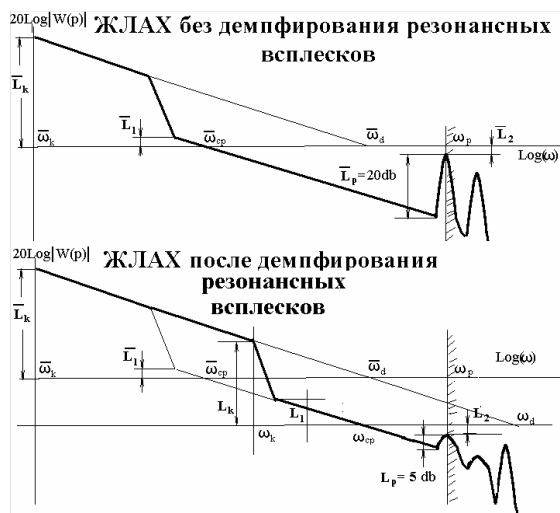


Рис. 6. Сравнительные характеристики ЖЛАХ до и после демпфирования собственной частоты колебаний первого тона механической конструкции ПМК

Специфика задач функционирования РТ в реальном времени состоит в том, чтобы периодически, за заданный, сравнительно малый интервал времени на вычислительном устройстве успеть провести вычисления определенного объема. Эти вычисления связаны с численным интегрированием систем дифференциальных уравнений, решением системы линейных неравенств, определением значений вещественных и логических функций и др. Результатом вычислений является вектор управляющих воздействий на РТ как объект управления, обеспечивающих получение требуемых динамических процессов с заданной точностью.

До сих пор регуляторы приводов РТ, в том числе с самонастройкой и адаптацией к внешним воздействиям, из-за жестких ограничений, связанных с производительностью вычислительных устройств, не содержали решателей, опирающихся на поисковые процедуры, характерные для неклассических методов управления

При управлении нелинейными нестационарными ДО, на фазовые координаты которых наложены произвольные ограничения типа неравенств, классические методы управления оказываются непригодными.

При физических ограничениях фазовых координат и управляющих воздействий, а также их квантования по уровню и времени, регуляторы, основанные на линейных законах управления, не обеспечивают возрастающих требований к динамической точности СН РТ. В [28] разработаны новые поисковые методы, названные методами логического управления, позволяющие обеспечить соответствие требуемого качества управления РТ техническим возможностям его реализации. Эти методы в данной работе не обсуждаются. Им посвящена монография, которая готовится к печати в 2021 году. Здесь рассматривается задача с разделением функций между моделью

реального ОУ и параметрической моделью того же ОУ, т.е. моделью и его копией. В модели реального ОУ оперативно изменяются коэффициенты регулятора в соответствии с результатами оптимального поиска на параметрической модели по выбранной оптимизационной процедуре и критерию качества.

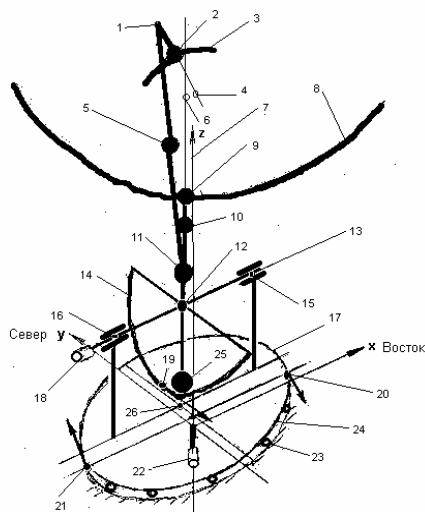
При численной реализации процесса оптимизации использовалась библиотечная процедура MatLab Simulink “Check Step Response Characteristics” [3], которая позволяет в интерактивном режиме, путем задания ограничений на переходный процесс по управляющему и возмущающему воздействиям, отыскивать коэффициенты регулятора, обеспечивающие требуемое качество.

2. Имитационная модель системы управления приводом наведения радиотелескопа РТ-70

Современные методы и средства моделирования динамических систем позволяют проводить численные исследования и получать количественные оценки эффективности функционирования моделей этих систем, по которым с большой достоверностью можно судить, как они будут вести себя в естественных условиях.

Основными методами исследования являются методы численного интегрирования линейных и нелинейных СДУ. Проиллюстрируем эти методы на примере модели азимутального привода системы наведения (СН) РТ-70.

Семимассовая схема привода изображена на рисунке 7. Параметры динамической модели пространственной металлической конструкции (ПМК) РТ-70 даны ниже.



1-ригель, 2-масса КР, 3-отражающая поверхность КР, 4-фокус КР, 5-масса стоек КР, 6-фокус ГЗ, 7- вертикальная ось, 8-отражающая поверхность ГЗ, 9-масса ГЗ, 10-масса ферменного каркаса, 11-масса основания, 12-точка пересечения фокальной оси ГЗ и горизонтальной оси, 13-горизонтальная ось, 14-коренной зубчатый обод вертикального наведения, 15,16-цапфы горизонтальной оси, 17-платформа, 18-ЦДОС угла места, 19-точка коренного зацепления привода угла места, 20,21-точки коренного зацепления приводов азимута, 22-ЦДОС азимута, 23-шаровой погон, 24-фундамент

Рис. 7. Условная схема, поясняющая принципы построения конструкции РТ

Вес вращающейся части – 4270т.

Вес качающейся части – 1400т.

Транспонированный вектор состояния ПМК в физическом базисе

$$X' = [\omega', \alpha'],$$

$\alpha' = [\alpha_{пл}, \alpha_{ос}, \alpha_{осз}, \alpha_3, \alpha_{окр}, \alpha_{кр}, \alpha_{пр}]$ – углы поворота относительно азимутальной оси соответственно: платформы, основания, основания зеркала, зеркала, основания контррефлектора, контррефлектора, противовесов зеркала относительно оси угла места (рад),

$$\omega' = d\alpha'/dt,$$

вектор моментов инерции (кгм*с²)/рад).

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(1) &= 0.21e+008; & \mathbf{J}(5) &= 0.32e+007; \\ \mathbf{J}(2) &= 0.4e+007; & \mathbf{J}(6) &= 0.106e+005; \\ \mathbf{J}(3) &= 0.9472e+007; & \mathbf{J}(7) &= 0.47e+007. \\ \mathbf{J}(4) &= 0.16e+008; \end{aligned}$$

Вектор жесткостей упругих элементов (кгм/рад)

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(1) &= 0.535e+010; & \mathbf{C}(4) &= 0.228e+010; \\ \mathbf{C}(2) &= 0.505e+010; & \mathbf{C}(5) &= 0.648e+007; \\ \mathbf{C}(3) &= 0.8395e+009; & \mathbf{C}(6) &= 0.2074e+010; \end{aligned}$$

$\mathbf{EE1}$ - топологическая матрица (определяет, как между собой связаны моменты инерции ПМК в схеме крутильных колебаний).

$$\mathbf{EE1} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$\mathbf{KK1} = -\mathbf{EE1}'$ - матрица преобразования координат $\Delta\alpha = \mathbf{KK1} * \alpha$,

$\Delta\alpha$ - вектор упругих деформаций элементов конструкции ПМК

$\mathbf{Bio} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ – транспонированная матрица в системе уравнений движения ПМК, определяющая точку приложения управляющего момента

$\mathbf{Fvv} = [0 \ 0 \ 0.02 \ 0.9 \ 0.02 \ 0.06 \ 0]$ – транспонированная матрица в системе уравнений движения ПМК, определяющая распределение ветрового момента на элементы конструкции.

\mathbf{V} – матрица форм колебаний, определяющая преобразования главных обобщенных координат в физические координаты $\omega = \mathbf{V} * z_1; \alpha = \mathbf{V} * z_2, \dot{z}_2 = z_1$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 0.0628 & -0.3780 & -0.3394 & 0.2688 & -0.0049 & -0.0243 & 0.0009 \\ -0.9598 & -0.3780 & -0.2571 & -0.1131 & 0.0085 & 0.0244 & -0.0011 \\ 0.1452 & -0.3780 & -0.1291 & -0.2194 & -0.0687 & 0.1078 & -0.0086 \\ -0.0019 & -0.3780 & 0.7304 & 0.0372 & 0.0056 & -0.0123 & 0.0009 \\ 0.1992 & -0.3780 & -0.2816 & -0.2322 & 0.2220 & 0.0947 & 0.0071 \\ -0.0315 & -0.3780 & -0.3161 & -0.6441 & -0.9725 & 0.9769 & 0.9999 \\ 0.1143 & -0.3780 & -0.2989 & -0.6297 & -0.0148 & -0.1543 & 0.0041 \end{pmatrix}.$$

$\delta = 0.1 * (1/\sqrt{-w(3,3)})$ коэффициент демпфирования колебаний.

Azp – матрица уравнений состояния ПМК в базисе главных обобщенных координат.

$$\mathbf{A}_{zp}(1:7,1:7)=\delta*\mathbf{w}; \mathbf{A}_{zp}(1:7,8:14)=\mathbf{w};$$

$$\mathbf{A}_{zp}(8:14,1:7)=\mathbf{eye}(7); \mathbf{A}_{zp}(8:14,8:14)=\mathbf{zeros}(7),$$

eye(7) – единичная диагональная матрица с размерами [7 на 7].

zeros(7) – нулевая матрица с размерами [7 на 7].

Bzp – матрица входа управляющего воздействия.

$$\mathbf{B}_{zp}(1:7,1)=(\mathbf{V}^{(-1)})*(\mathbf{J}_{pmk}^{(-1)})*\mathbf{B}_{io},$$

$$\mathbf{B}_{zp}(8:14,1)=\mathbf{zeros}(7,1),$$

Fzp – матрица входа ветрового воздействия.

$$\mathbf{F}_{zp}(1:7,1)=(\mathbf{V}^{(-1)})*(\mathbf{J}_{pmk}^{(-1)})*\mathbf{F}_{vv},$$

$$\mathbf{F}_{zp}(8:14,1)=\mathbf{zeros}(7,1),$$

Vzp – матрица преобразования вектора состояния главных координат,

$\mathbf{Z}'=[\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2]$ в вектор физических координат $\mathbf{X}'=[\omega', \alpha']$,

$$\mathbf{V}_{zp}=\mathbf{zeros}(14),$$

$$\mathbf{V}_{zp}(1:7,1:7)=\mathbf{V},$$

$$\mathbf{V}_{zp}(8:14,8:14)=\mathbf{V},$$

BFzp – объединенная матрица внешних воздействий.

$$\mathbf{BF}_{zp}=[\mathbf{B}_{zp}, \mathbf{F}_{zp}],$$

KD – матрица преобразований вектора перемещений в физическом базисе к вектору угловых деформаций.

$$\mathbf{KD}(1:6,1:14)=\mathbf{zeros}(6, 14),$$

$$\mathbf{KD}(1:6,8:14)=\mathbf{KK1},$$

C0 – матрица преобразований вектора перемещений в физическом базисе к скалярной величине перемещения электрической оси (радиооси) антенны.

$$\mathbf{C0}=[0 \ 0 \ 0 \ 0.89 \ 0 \ 0.11 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Параметры формирующего фильтра ветрового воздействия

$$\mathbf{dxv}/\mathbf{dt}=\mathbf{Av}*\mathbf{xv}+\mathbf{Bv}*\xi,$$

$$\mathbf{yv}=\mathbf{Cv}*\mathbf{xv},$$

где **xv** – вектор состояния формирующего фильтра ветровой нагрузки,

$$\mathbf{Av}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5652 & -0.2399 \\ 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Bv}=\begin{bmatrix} 0.2156 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3685 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Cv}=[1 \ 0 \ 1].$$

Параметры электропривода:

$ce = 1.4 \text{ В}^*$ – коэффициент противо-эдс (сек/рад),

$cm = 0.1$ – коэффициент момента (кгм/а),

$tj = 0.1$ – постоянная времени якорной цепи ЭД (с),

$rj = 0$ – сопротивление якорной цепи ЭД (ом),

$mi = 0.01$ – коэффициент вязкого трения ЭД (кгм*сек/рад),

$kr=206280$ коэффициент перевода рад в угл.сек (угл.сек/рад),

$k = 50$ – коэффициент усиления (В/угл.сек),
 $K_w = k * k_r * c_m / (i_r * (r_j * m_i + c_e * c_m))$ – добротность по скорости (% рад/с),
 $J_d = 0.03$ – массовый момент инерции ЭД (кгм*сек²)/рад),
 $h = 0.01$ – период квантования (с),
 $C_r = 2.1 * 10^4$ – жесткость редуктора (кгм/рад),
 $m_{jur} = C_r * 0.08$ – коэффициент демпфирования редуктора (кгм/(рад/с)),
 $luft = 5$ – люфт (угл.с),
 $C(1) = 2.3 * 10^9$ – эквивалентная жесткость зеркальной системы (кгм/рад),
 $m_{ju}(2) = 0.013 * C(1)$ эквивалентное демпфирование зеркальной системы (кгм/(рад/с)),
 $J(2) = 2.1 * 10^7$ – эквивалентный момент инерции платформы (кгм*сек²)/рад),
 $J(3) = 3.74 * 10^7$ – эквивалентный момент инерции зеркальной системы (кгм*сек²)/рад),
 $k_w = 0.5$ – коэффициент обратной связи по скорости ЭД (В/рад/с),
 $k_i = 0.4$ – коэффициент обратной связи по току ЭД (В/А),

Параметры эквивалентного синусного режима $A * \sin(w * t)$:

режим медленно:

максимальная скорость слежения $V = 30$ угл. с/с,

точность $\theta = 3$ угл. с,

максимальное ускорение слежения $E = 0.005$ град/с²,

максимальная угловая частота управляющего воздействия

(контрольная точка ЖЛАХ) $\omega_k = E/V = 0.6$ 1/с,

логарифмический коэффициент усиления системы в контрольной точке

$H\omega_k = 20 * \lg(V^2 / (E * \theta)) = 80$ Дб,

добротность по скорости

$D\omega_k = \sqrt{2} * V / \theta = \sqrt{2} * 30 / 3 = 14.1$ (рад/с)/угл.с.

Приведенные выше параметры легли в основу имитационных моделей, структурные схемы которых даны на рисунках 8-13.

В численных примерах соблюдаются размерности: ток – амперы, электрические напряжения – вольты, углы поворота – угловые секунды.

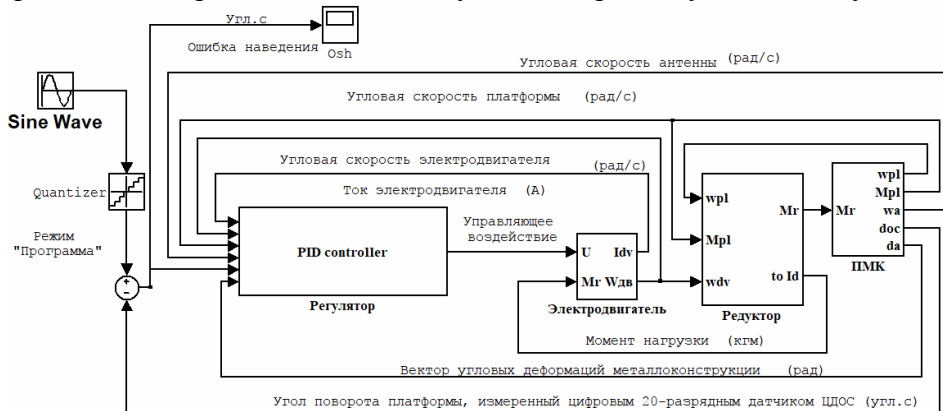


Рис. 8. Имитационная модель системы автоматического управления радиотелескопа РТ-70

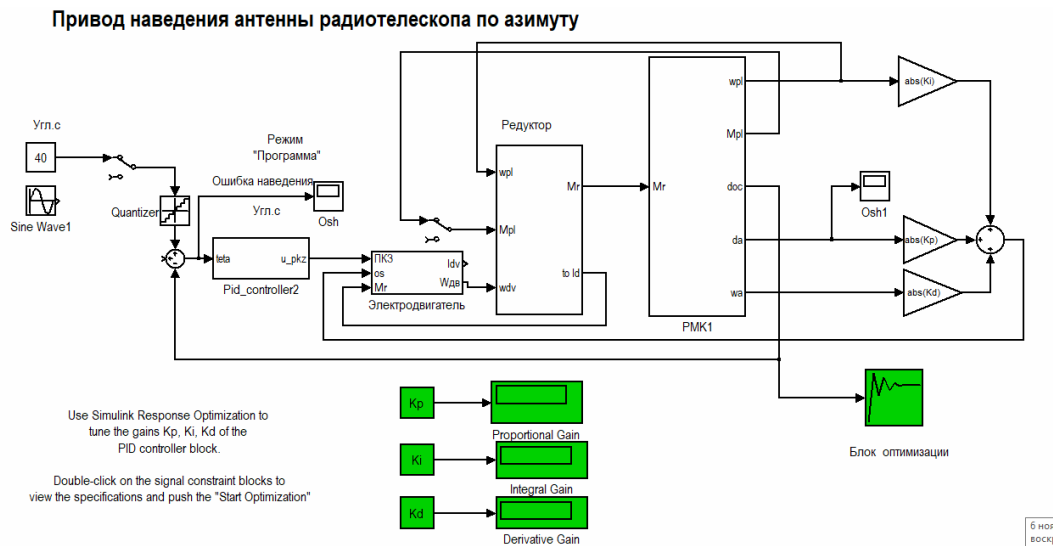


Рис. 9. Структурная схема параметрической настройки регулятора привода наведения радиотелескопа

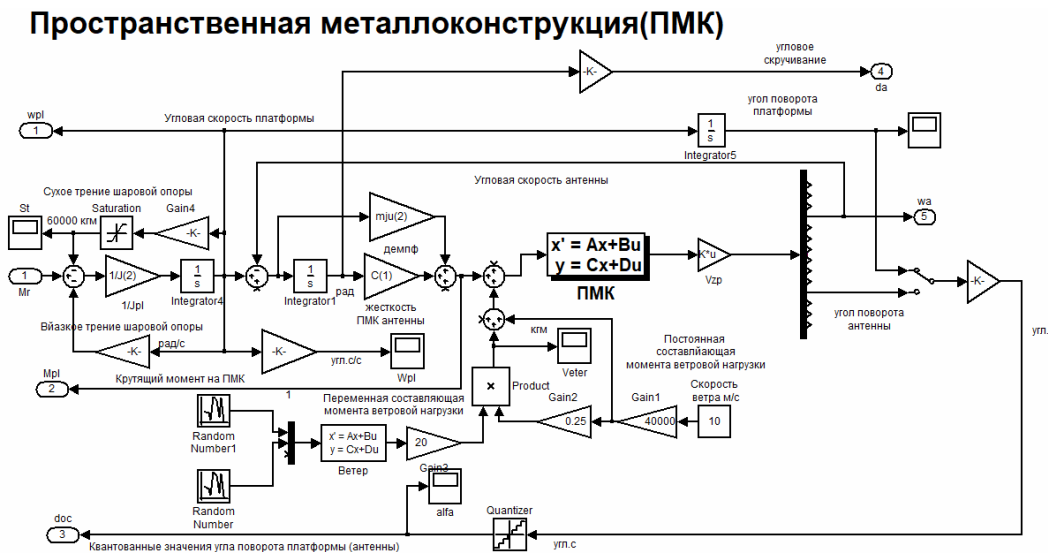


Рис. 10. Динамическая модель пространственной металлоконструкции радиотелескопа

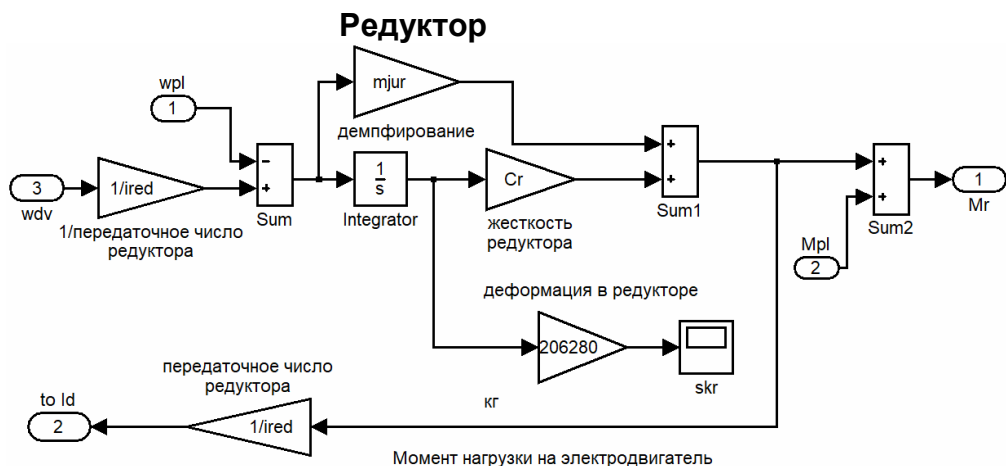


Рис. 11. Динамическая модель редуктора электропривода радиотелескопа

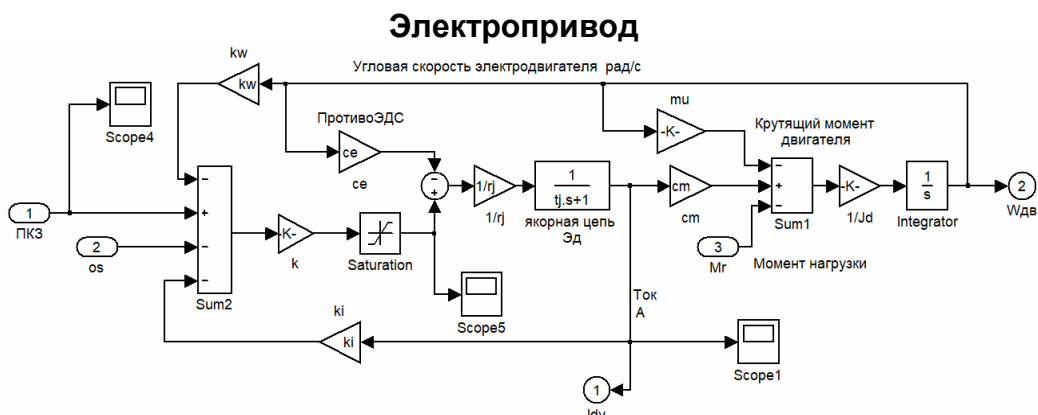


Рис. 12. Электропривод главного зеркала радиотелескопа

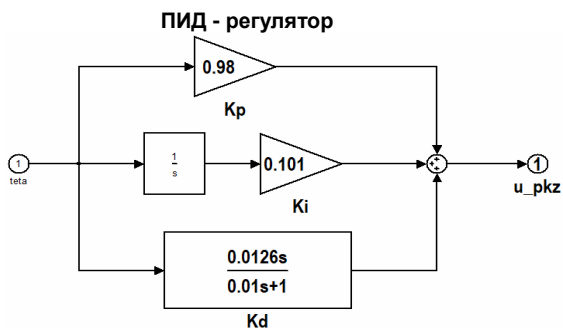


Рис. 13. ПИД – регулятор электропривода

3. Параметрическая настройка системы управления радиотелескопа с помощью пакета *simulink response optimization MatLab*

Пакет *Simulink Response Optimization (SRO)* предназначен для параметрической оптимизации линейных и нелинейных систем. Он интегрирован с приложением *SIMULINK* и по существу является его дополнением. Для решения задач оптимизации САУ (рис. 13) в пакете *SRO* используются алгоритмы нелинейного программирования [3].

Основным блоком SRO является блок Signal Constraint. Он имеет свое рабочее окно и позволяет в интерактивном режиме устанавливать необходимые ограничения во временной области на переходный процесс, устанавливать настраиваемые параметры, указывать неопределенные параметры, осуществлять параметрическую оптимизацию системы с заданными ограничениями.

На первом этапе в среде SIMULINK в интерактивном режиме, в формате mdl собирается схема моделирования динамической системы. При этом в качестве параметров исследуемых или настраиваемых звеньев используются их идентификаторы.

Блок Signal Constraint подключается обычно к выходу модели, а контролируемым сигналом, как правило, является переходная характеристика системы.

С помощью блока Signal Constraint численные значения коэффициентов в модели автоматически изменяются, и в результате целенаправленного поиска, посредством одной из выбранных оптимизационных программ из пакета MatLab, в соответствии с заданной целевой функцией, определяются оптимальные параметры настраиваемых блоков, т.е. осуществляется параметрическая настройка регулятора.

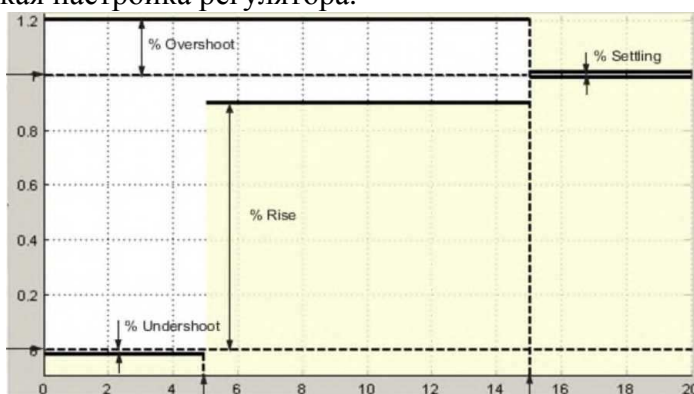


Рис. 13. Схема ограничений, накладываемых на переходную характеристику САУ, как реакцию на ступенчатое воздействие

При оптимизации параметров модели Simulink в соответствии с требованиями проектирования программное обеспечение Simulink Design Optimization автоматически преобразует требования в ограниченную задачу оптимизации, а затем решает ее с помощью методов оптимизации. Задача ограниченной оптимизации итеративно моделирует модель Simulink, сравнивает результаты моделирования с целями ограничения и использует методы оптимизации для корректировки настроенных параметров для лучшего достижения поставленных целей.

Для каждого алгоритма оптимизации программа формулирует один из следующих типов задач минимизации: Осуществимость и Отслеживание. Суть типов задач минимизации заключается в следующем.

Осуществимость означает, что алгоритм оптимизации находит значения параметров, удовлетворяющие всем ограничениям в пределах заданных допусков, но при этом не минимизирует какую-либо целевую или стоимостную функцию.

Отслеживание. Задается эталонный переходный процесс выходной координаты, синтезированный путем построения экстремали задачи максимального быстродействия ОУ при ограничении вектора его состояния. Посредством выбранной пользователем программы оптимизации отыскиваются значения параметров регулятора, обеспечивающие минимум суммы квадратов невязок между эталонным процессом ОУ и процессом выходной координаты модели.

Программное обеспечение вычисляет моделируемый отклик в виде последовательности пар время-амплитуда. Используя линейную интерполяцию, программное обеспечение вычисляет невязки в заданные моменты времени, а затем вычисляет масштабируемую ошибку.

Программное обеспечение Simulink Design Optimization по выбору использует один из следующих методов оптимизации: Градиентного Спуска, Симплексного Поиска, Поиска паттернов.

Метод градиентного спуска использует функцию Optimization Toolbox `fmincon` для оптимизации параметров модели в соответствии с требованиями проектирования. Алгоритм внутренней точки `fmincon` может принимать в качестве входных данных функцию Гессиаана. При поставке Гессиаана можно получить более быстрое и точное решение проблемы ограниченной минимизации.

Метод Симплексного поиска использует функции Optimization Toolbox `fminsearch` и `fminbnd`

Метод поиска паттернов использует функцию Global Optimization Toolbox `pattern search`.

В вычислительной среде MatLab Simulink исследованы динамические процессы управления приводами наведения РТ-70, полученные с использованием регуляторов, реализующих в реальном времени линейные законы управления относительно квадратичных критериев качества. Подбор коэффициентов обратных связей фазовых координат, коэффициентов ПИД-регуляторов и весовых коэффициентов квадратичного функционала Ляпунова осуществлялся посредством оптимизационной программы *Simulink Response Optimization (SRO)* [3] по заданным показателям переходного процесса на ступенчатое воздействие и среднего квадрата ошибки на случайное (ветровое) воздействие.

Во всех случаях управляющее воздействие ограничивалось введением нелинейного звена Saturation [33].

Система управления позволяет, путем автофокусировки элементов зеркальной системы РТ, с применением лазерных, гироскопических, оптических средств измерений и вычислений, обеспечить в режиме наблюдения КО на частоте 300 ГГц следующие параметры:

- точность наведения электрической оси ЗС – 3 угл.с;
- точность поверхности главного зеркала 0.02 мм.
- чувствительность радиоприемника к потоку радиоизлучения – 10^{-30} ват/м² Гц;

Ниже (рис. 14-24) приведены иллюстрации некоторых типовых процессов управления силовыми приводами РТ. Моделирование показывает, что наряду с такими важными характеристиками РТ как чувствительность, разрешающая способность по угловым координатам, особую роль играет точность наведения изображения источника радиоизлучения на многопиксельную матрицу чувствительного элемента радиоприемника и идентификация этого изображения. При однопиксельном варианте чувствительного элемента реализация радиоприема в мм-диапазоне возможна только за счет увеличения раскрытия (апертуры) облучателя, что приводит к потере чувствительности и разрешающей способности зеркальной системы РТ. Точность наведения неразрывно связана с качеством поверхности ЗС главного зеркала и его регулировкой. В этом смысле, для обеспечения наивысшего качества наведения, при реализации управления щитами посредством гексаподов, механически не связанных между собой, поверхность главного зеркала должна передвигаться как твердое тело без изменения параметров исходного параболоида, так как щиты считаются недеформируемыми. Управление таким объектом приобретает высшее качество радиопередачи в миллиметровом и ультра-миллиметровом диапазоне.

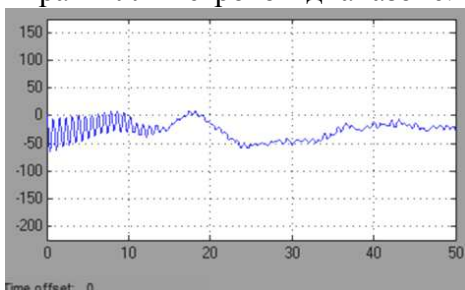


Рис. 14. Ток ЭД при обработке ветровой нагрузки

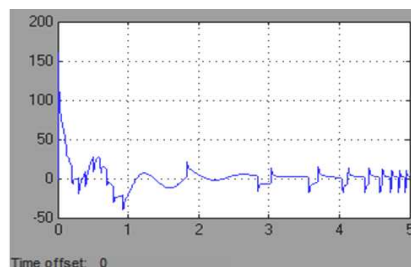


Рис. 15. Ток ЭД при обработке рассогласования

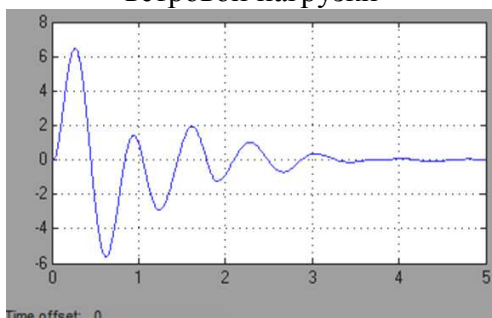


Рис. 16. Скручивание ГЗ относительно платформы

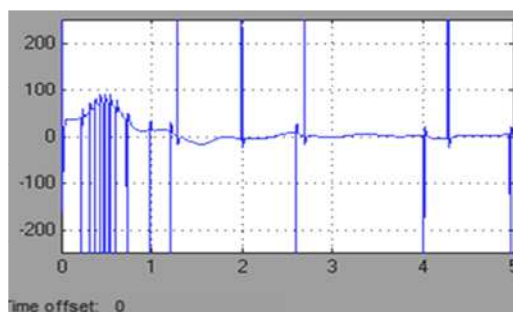


Рис. 17. Управляющий сигнал на ЭД

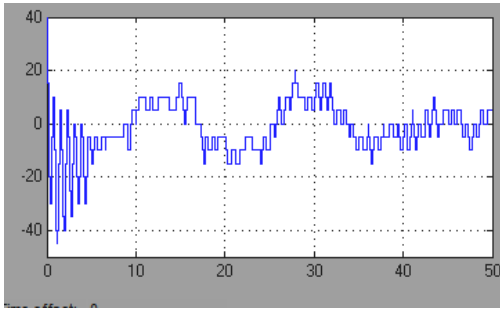


Рис. 18. Ошибка наведения при обработке ветровой нагрузки

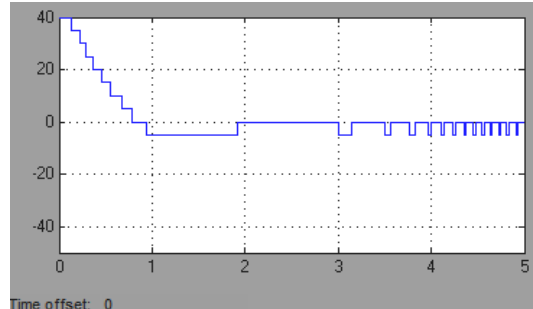


Рис. 19. Обработка рассогласования по углу

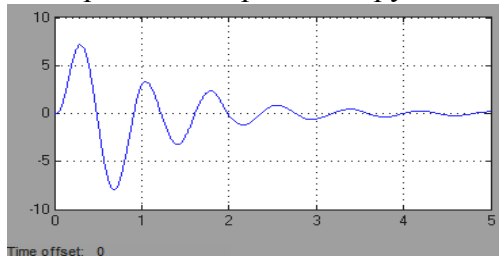


Рис. 20. Скручивание ГЗ относительно платформы

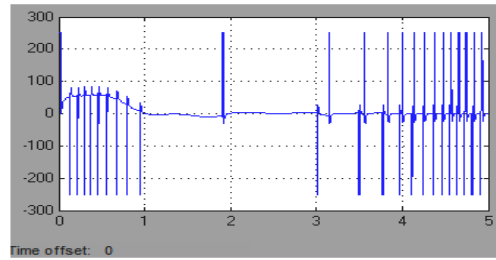


Рис. 21. Управляющий сигнал на ЭД

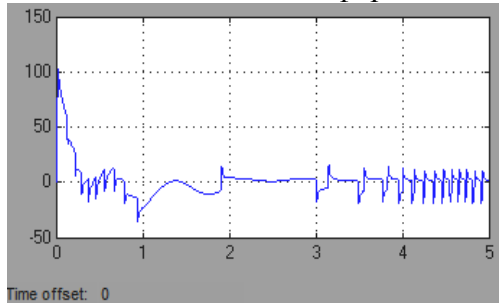


Рис. 22. Ток ЭД при обработке рассогласования

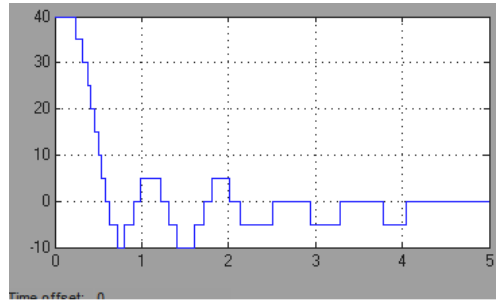


Рис. 23. Обработка рассогласования при 7-массовом ПМК

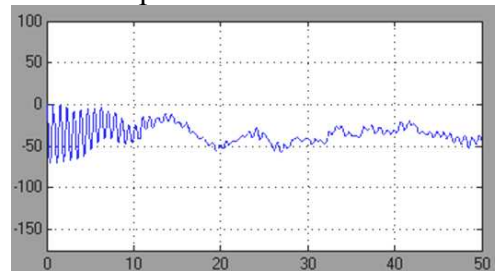


Рис. 24. Ток ЭД при обработке ветровой нагрузки при 7-массовом ПМК

Заключение

Зеркальная система РТ включает в себя сотни однотипных элементов, предназначенных для механического перемещения конструкций, пространственное расположение отражающих поверхностей которых

обеспечивает фокусировку принимаемого радиоизлучения на приемное устройство (приемную многопиксельную матрицу). Такими элементами являются электроприводы и актуаторы, оптимальный выбор параметров которых рассматривается в настоящей задаче.

Частотная характеристика (ЖЛАХ) привода (актуатора) формируется путем задания на его АЛЧХ двух граничных частот: нижней частоты, соответствующей так называемой «рабочей точке» или «эквивалентному синусу» [2]; и верхней частоте, соответствующей первому тону собственной механической частоты колебаний. Рабочая точка вычисляется по заданным проектным параметрам – максимальным: мощности, скорости и ошибке слежения, а частота первого тона по заданным по проекту жесткости и моменту инерции (массе). Для обеспечения допустимой колебательности переходного процесса на ступенчатое воздействие, разность между собственной частотой первого тона и частотой «рабочей точки» не должна быть меньше одной декады по логарифмической шкале частот. Если эта разность, при получении проектного задания, оказалась – меньше декады, то «рабочую точку» следует сдвинуть влево, в сторону меньших частот, и, следовательно, изменить проектные значения мощности, скорости и ошибки слежения.

Для формирования низкочастотного участка ЖЛАХ обычно в приводах используется ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальное последовательное корректирующее звено, представляющее собой передаточную функцию второго порядка) [3]. Подбор параметров ПИД-регулятора: k_p , k_i , k_d , (параметрическая настройка) проводится в соответствии с методикой, изложенной в настоящей статье, начинающейся с выбора коэффициента демпфирования на резонансной механической частоте первого тона. Желаемый коэффициент демпфирования обеспечивается за счет обратной связи по скорости инерционного элемента (массового момента инерции, или массы при поступательном движении). Измерение угловых скоростей осуществляется посредством ДУС (гироскопическими датчиками угловых скоростей), а линейных скоростей – посредством акселерометров. Коэффициент демпфирования (другими словами – добротность) определяет величину всплеска ЖЛАХ на резонансной частоте, а следовательно, начальную точку среднечастотного участка ЖЛАХ.

Выбор типа ЖЛАХ и точек слома асимптот не является однозначным и определяется ограничениями, накладываемыми на переходной процесс.

В MatLab была разработана система (пакет программ) Simulink Response Optimization (SRO) предназначенный для параметрической оптимизации линейных и нелинейных систем. Он интегрирован с приложением SIMULINK и по существу является его дополнением. Для решения задач оптимизации САУ в пакете SRO используются алгоритмы нелинейного программирования. Настоящая работа иллюстрирует применение SRO для параметрической оптимизации регулятора привода наведения РТ-70 по заданным ограничениям на переходной процесс и учетом ограничения на управляющее воздействие. Нелинейный характер процессов управления, который подтверждают приведенные иллюстрации графиков, свидетельствует о его нестационарности.

Поэтому параметрическая оптимизация, осуществляемая средствами MatLab Simulink Response Optimization может использоваться только в стационарных точках для целей проектирования. Для применения описанной процедуры оптимизационной параметрической настройки регулятора САУ в реальном времени, должны быть разработаны аппаратные средства, реализующие алгоритмы системы SRO в более быстром темпе, чем темп MatLab. Наличие в составе исполнительных элементов (актуаторов) ограничительных функций (saturation), выполняющих роль физической защиты объектов управления, подобно функциям активации в нейронных сетях, приводит к выводу, что линейные модели объектов и градиентные методы оптимизации имеют узкую зону применимости и не могут заменить в подавляющих случаях поисковые методы оптимизации и математическое программирование.

Список литературы

1. Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю., Артеменко Ю.Н. Радиотелескопы – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 546 с. – DOI 10.17513/np.397
2. Радиотелескопы миллиметрового диапазона с регулируемыми поверхностями зеркал: монография / В.В. Дубаренко, А.Ю. Кучмин, Ю.Н. Артеменко, В.Ф. Шишлаков – СПб.: ГУАП, 2019. – 240с. DOI 10.17513/np.368
3. Параметрическая настройка динамических систем с помощью пакета simulink response optimization [Электронный ресурс]: <https://infopedia.su/1x6513.html>
4. Туркин Д.Н. Повышение точности наведения радиотелескопа при действии ветрового момента Д.Н. Туркин, / Ю.В. Постников // II Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер. "Наука и образование". – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – Вып. 1. – С. 43-46.
5. АС СССР №18299577. Способ выставки и калибровки инерциальной навигационной системы / Егоров Ю.Г. – 1992. – 21с.
6. Дубаренко В.В., Городецкий А.Е., Кучмин А.Ю., Артеменко Ю.Н. Проблемы наведения радиотелескопов на источники радиоизлучений // Материалы Всероссийской астрономической конференции (ВАК – 2017), 17-22 сентября 2017, г. Ялта, Крым, Россия.
7. Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю., Артеменко Ю.Н. Автофокусировка зеркальной системы радиотелескопа: Материалы 10-ой Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2017), том 2, Дивноморское, Геленджик, Ростов-На-Дону, Тагонрог: Изд-во Южного Федерального Университета, 2017.
8. Дубаренко В.В., Коновалов А.С., Кучмин А.Ю. Математические модели механических систем как объектов управления / Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 2007. – 188 с.

9. Патент №2319171 РФ. Система автоматического наведения радиотелескопа / Артеменко Ю.Н., Городецкий А.Е., Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю. и др. – Оpubл. 10.03.2008, Бюл. №7.
10. Управление электроприводом радиотелескопа с использованием упрощенного наблюдателя / Г.Г. Соколовский и др. // Изв. ЛЭТИ. Сб. научн. трудов. – 1984. – Вып. 344. – С. 23-33.
11. Белянский П.В. Управление наземными антеннами и радиотелескопами / П.В. Белянский, Б.Г. Сергеев. – М.: Советское радио, 1980. – 279 с.
12. Поляк В.С. Эволюция разработки прецизионных конструкций радиотелескопов для радиоастрономии, дальней и спутниковой космической связи // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 5. – С. 14.
13. Дьяконов В.П. Справочник по применению системы PC MatLAB. – М.: Наука: Изд. фирма "Физ.-мат. лит.", 1993. – 109с.
14. Белов М.В. Синтез конструкции и закона юстировки управляемой составной поверхностью параболоида главного рефлектора большого радиотелескопа // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №5. – С. 1.
15. Белов М.В. Система управления составной поверхностью главного зеркала радиотелескопа, функционирующая на основе мультиагентных технологий // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №8. – С. 8.
16. Нечаев А.И., Иванов В.О., Гиммельман В.Г. Телеметрическая система контроля адаптивной поверхности главного зеркала радиотелескопа РТ-70 «СУФФА» // Всероссийская радиоастрономическая конференция, ВРК-2011 “Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии”, Санкт-Петербург, 17-21 октября 2011.
17. Нечаев А.И., Иванов В.О., Гиммельман В.Г. Телеметрическая система контроля адаптивной поверхности главного зеркала радиотелескопа РТ-70 (Суффа) // Труды ИПА РАН. – 2012. – Вып. 24. – С. 128-133.
18. Kuchmin A.Yu., Dubarenko V.V. Definition of a rigidity of a hexapod./ Smart Electromechanical Systems / Edited by A. Gorodetskiy // Springer, 2016.
19. Артеменко Ю.Н., Агапов В.А., Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 4. – С. 2-9.
20. Vladimir V. Dubarenko, Andrew M. Korniyushin, Vugar GA Kurbanov. Automatic Control Panel Module SEMS / Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Smart Electromechanical Systems. Group Interaction // Springer International Publishing. 2018.
21. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат литературы, 1981. – 448 с.
22. Дьяконов В.П., Абраменковой И.В.. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
23. Коняхин И.А., Усик А.А. Исследование многоматричной оптико-электронной системы контроля элементов радиотелескопа РТ-70 «СУФФА» // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, №12. – С. 70-73.

24. Система автоматического наведения на максимум радиосигнала / Дубаренко В.В. и др. Авторское свидетельство (заявка №1108884) Гос. Комитет СССР по делам изобретений и открытий, приоритет от 10 августа 1982.
25. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. Беспоисковые методы. – М.: Наука, 1990. – 292с.
26. Etter D. Solving engineering problems using MATLAB. – Prentice-Hall, 1993. – 434р.
27. Дубаренко В.В., Курбанов В.Г. Импликационное управление динамическими объектами // Информационно – измерительные и управляющие системы. – 2011. – № 4, т.9. – С. 56-61.
28. Громыко В.Д., Санковский Е.А. Самонастраивающиеся системы с моделью. – М.: Энергия, 1974. – 80 с.
29. Табак Д., Куо Б. Оптимальное управление и математическое программирование / пер. с англ. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975. – 280 с.
30. Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю. Метод повышения качества наведения большого радиотелескопа миллиметрового диапазона с адаптивной зеркальной системой // Информационно-управляющие системы. – 2007. – №5. – С. 14-19.
31. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления.– М.: Мир, 1977. – 650с.
32. Потемкин В. Г. Система MATLAB. Справочное пособие. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1997. – 350 с.
33. MATLAB. User's Guide. Reference Guide. The Math Works, Inc., 1994.
34. Туркин Д.Н. Разработка структуры и выбор параметров наблюдающего устройства для оценки момента нагрузки, действующего на радиотелескоп / Д.Н. Туркин, Ю.В. Постников // Электротехника. – М.: ЗАО "Знак", 2009. – Вып. 8. – С. 11-16.
35. Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю., Артеменко Ю.Н. Радиотелескопы с регулируемой поверхностью антенны // Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС, 2019. – №2. – С. 129-137. – doi.org/10.26160/2618-6810-2019-2-129-137.

References

1. Dubarenko V.V., Kuchmin A.Yu., Artemenko Yu.N. Radio Telescopes. – SPb.: Publ. house of Polytechnic un-ty, 2014. – 546 p. – DOI 10.17513/np.397
2. Radio telescopes of the millimeter range with adjustable mirror surfaces: monograph / V.V. Dubarenko, A.Yu. Kuchmin, Yu.N. Artemenko, V.F. Shishlakov. – St. Petersburg: GUAP, 2019. – 240 p. – DOI 10.17513/np.368
3. Parametric configuration of dynamic systems using the simulink response optimization package [Electronic resource]: <https://infopedia.su/1x6513.html> (accessed 20.10.2020)

4. Turkin D.N. Improving the accuracy of the radio telescope guidance under the action of the wind moment / D.N. Turkin, Yu.V. Postnikov // II Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University. "Science and Education". – St. Petersburg: Publ. house of Polytechnic un-ty, 2009. - Issue 1. – P. 43-46.
5. AS USSR No. 18299577 The method of measurement and calibration of the inertial navigation system / Egorov Yu.G. – 1992. – 21p.
6. Dubarenko V.V., Gorodetsky A.E., Kuchmin A.Yu., Artemenko Yu.N. Problems of pointing radio telescopes at radio sources // Proceedings of the All-Russian Astronomical Conference (VAK – 2017) September 17-22, 2017, Yalta, Crimea, Russia.
7. Dubarenko V.V., Kuchmin A.Yu., Artemenko Yu.N. Autofocusing the radio telescope mirror system // Materials of the 10th All-Russian Multi-Conference on Management Problems (MKPU-2017), volume 2, Divnomorskoe, Gelendzhik, Rostov-On-Don, Taganrog: Publ. of Southern Federal University, 2017.
8. Dubarenko V.V., Konovalov A. S., Kuchmin A.Yu. Mathematical models of mechanical systems as control objects. Training manual. – St. Petersburg: Publ. house of Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2007. – 188p.
9. Patent № 2319171 RU. System of automatic guidance of a radio telescope / Artemenko Yu.N., Gorodetsky A.E., Dubarenko V.V., Kuchmin A.Yu. – Publ. 10.03.2008, Bul. No. 7.
10. Control of the electric drive of a radio telescope using a simplified observer / G. G. Sokolovsky et al. // Izv. LETI. Sat. scientific. works. – L.: Publ. House of LETI, 1984. – Vol. 344. – P. 23-33.
11. Belyanskiy P.V. Management of terrestrial antennas and radio telescopes / P.V. Belyanskiy, B.G. Sergeev. – M.: Soviet radio, 1980. – 279 p.
12. Polyak V.S. Evolution of the development of precision structures telescopes for radio astronomy, long-range, satellite and space communications // Industrial and civil engineering. – 2005. – No. 5. – P. 14.
13. Dyakonov V.P. Handbook on the application of the RS system MatLAB. – M.: VO. Science, 1993. – 109p.
14. Belov M.V. Synthesis of the design and the law of adjustment of the controlled composite surface of the paraboloid of the main reflector of a large radio telescope // Journal of Radio Electronics. – 2011. – No. 5. – P. 1.
15. Belov M. V. Control system of the composite surface of the main mirror of the radio telescope, functioning on the basis of multi-agent technologies // Journal of Radio Electronics. – 2011. – No. 8. – P. 8.
16. Nechaev A.I., Ivanov V.O., Himmelman V.G. Telemetric system for monitoring the adaptive surface of the main mirror of the RT-70 SUFFA radio telescope // All-Russian Radio Astronomy Conference, VRK-2011 " Radio Telescopes, Equipment and Methods of Radio Astronomy", St. Petersburg, October 17-21, 2011

17. Nechaev A.I., Ivanov V.O., Himmelman V.G. Telemetric system for monitoring the adaptive surface of the main mirror of the RT-70 radio telescope (Suffa) // Proceedings IPA RAS. – 2012. – No. 24. – P. 128-133.
18. Kuchmin A.Yu., Dubarenko V.V. Definition of a rigidity of a hexapod./ Smart Electromechanical Systems / Edited by A. Gorodetskiy // Springer, 2016.
19. Artemenko Yu.N., Agapov V.A., Dubarenko V.V., Kuchmin A. Yu. Group control of radio telescope counterreflector actuators // Information and Control Systems. – 2012. – No. 4. – P. 2-9.
20. Vladimir V. Dubarenko, Andrew M. Korniyushin, Vugar GA Kurbanov. Automatic Control Panel Module SEMS / Andrey E. Gorodetskiy, Irina L. Tarasova. Smart Electromechanical Systems. Group Interaction // Springer International Publishing. 2018.
21. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. Adaptive control of dynamic objects. – M.: Science, Main ed. of physical and Mathematical Literature, 1981. – 448 p.
22. Dyakonov V.P., Abramenkova I.V. MATLAB. Signal and image processing. Special reference – SPb.: Piter, 2002. – 608 p.
23. Konyakhin I.A., Usyk A.A. Issledovanie mnogomatrixnoy optoelectronic control system elements of the RT-70 "SUFFA" radio telescope // Journal of optical. – 2013. – Vol. 80, no.12. – P. 70-73.
24. The system of automatic guidance to the maximum of the radio signal / Dubarenko V.V. et al. Author's certificate (application no. 1108884) of the State Registration Service. Committee for inventions and discoveries, priority of 10 August 1982.
25. Fradkov A.L. Adaptive control in complex systems. – M.: Science, 1990. – 292p.
26. Etter D. Solving engineering problems using MATLAB. – Prentice-Hall, 1993. – 434p.
27. Dubarenko V.V., Kurbanov V.G. Implicazioni control of dynamic objects // Information – measuring and control system. – 2011. – No. 4, vol. 9. – P. 56-61.
28. Gromyko V.D., Sankovsky E.A. Self-adjusting systems with a model. – M.: Energy, 1974. – 80 p.
29. Tabak D., Kuo B. Optimal control and mathematical programming / trans. from eng. – M.: Main edition of the physical and mathematical literature of the publishing house " Science ", 1975. – 280 p.
30. Dubarenko V.V., Kuchmin A.Yu. The method for improving the quality of guidance of a large millimeter-wave radio telescope with an adaptive mirror system // Information and Control Systems. – 2007. – No. 5 – P. 14-19.
31. Kvakernaak Kh., Sivan R. Linear optimal control systems. – M.: Mir, 1977. – 650p.
32. Potemkin V.G. MATLAB system. Reference manual. – M.: DIALOG-MEPHI, 1997. – 350 p.
33. MATLAB. User's Guide. Reference Guide. The Math Works, Inc., 1994.

34. Turkin D.N. Development of structure and the selection of parameters of the observing device for estimating the load torque acting on the telescope / D.N. Turkin, V.Yu. Postnikov // *Electrical Engineering*. – M.: ZAO Znak, 2009. – Iss. 8. – P. 11-16.
35. Dubarenko V.V., Kuchmin A.Yu., Artemenko Yu. N. Radio telescopes with an adjustable antenna surface // *Mechanical engineering: innovative aspects of development: Materials of the International scientific and practical conference*. – Saint-Petersburg: SPbB SRC MS, 2019. – No. 2. – P. 129-137. – doi.org/10.26160/2618-6810-2019-2-129-137.

<p>Дубаренко Владимир Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем (ЛИЭМС), Институт проблем машиноведения Российской академии наук, профессор кафедры «Управление и информатика в технических системах», Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия, vladimir.dubarenko@gmail.com</p>	<p>Dubarenko Vladimir Vasilyevich – doctor of technical sciences, chief researcher of the Laboratory of Intelligent Electromechanical Systems, Institute for Problems in Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences, Professor of the Department "Management and Informatics in Technical Systems" of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint-Petersburg, Russia, vladimir.dubarenko@gmail.com</p>
<p>Кучмин Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия</p>	<p>Kuchmin Andrey Yurievich – candidate of technical science, associate professor, leading researcher of the Laboratory of Intelligent Electromechanical Systems, Institute for Problems in Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia</p>
<p>Шишлаков Владислав Федорович – доктор технических наук, проректор по образовательным технологиям и инновационной деятельности, заведующий кафедрой «Управление и информатика в технических системах», заместитель декана факультета интеллектуальных систем управления и нанотехнологий, директор института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия</p>	<p>Shishlakov Vladislav Fedorovich – doctor of technical sciences, Vice-Rector for Educational Technologies and Innovation, Head of the Department "Management and Informatics in Technical Systems", Deputy Dean of the Faculty of Intelligent Control Systems and Nanotechnology, Director of the Institute of Innovative Technologies in Electromechanics and Robotics, State Educational Institution of Higher Professional Education St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint-Petersburg, Russia</p>
<p>Корнюшин Андрей Матвеевич – аспирант, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия</p>	<p>Kornyushin Andrey Matveyevich – postgraduate student, Institute for Problems in Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia</p>

Received 08.02.2021