

УДК 681.513.3 : 621.313.333

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫМ УСТРОЙСТВОМ
НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЧАСТОТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ**

© 2026 И.А. Данилушкин, С.А. Колпащиков, Е.В. Мельников

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.01.2026

В статье рассматривается система автоматического управления позиционированием опорно-поворотного устройства антенны, построенная на базе асинхронного электропривода с частотным преобразователем, реализующим векторное управление моментом. Система выполнена в виде двухконтурной структуры подчиненного регулирования. Внутренний контур управления по скорости вращения электропривода реализуется преобразователем частоты, внешний контур позиционирования реализуется программным обеспечением программируемого логического контроллера с обратной связью по углу поворота антенны. Предложен подход к формализации единой математической модели замкнутого контура управления, учитывающей динамические характеристики электропривода, редуктора и нагрузки, а также дискретный характер формирования управляющих воздействий для внутреннего контура, обусловленный передачей уставок по промышленному протоколу Modbus RTU. Показано, что задержки и период обновления управляющих сигналов оказывают существенное влияние на динамику системы и должны учитываться при синтезе регуляторов. Для азимутальной и угломестной осей разработаны специализированные модели, учитывающие изменение приведенного момента инерции при изменении пространственного положения антенны, а также воздействие возмущающих моментов, обусловленных ветровой нагрузкой и несбалансированным моментом силы тяжести. С использованием среды MATLAB/Simulink проведен вычислительный эксперимент, направленный на анализ работы системы в предельных режимах, включая разгон с максимальными угловыми ускорениями и одновременное действие возмущений. Выполнен расчет настроек ПИ-регуляторов внешнего контура позиционирования с учетом требований к точности, отсутствию колебаний и технической реализуемости системы. Результаты моделирования показали, что предложенная структура системы управления обеспечивает заданную точность позиционирования $\pm 0,03^\circ$ во всех рассмотренных режимах работы без выхода электропривода на ограничения по моменту и скорости. Отмечена необходимость уточнения параметров регуляторов на этапе пусконаладочных работ с учетом реальных динамических характеристик силового каскада.

Ключевые слова: опорно-поворотное устройство, позиционирование антенны, двухконтурная система управления, система подчиненного регулирования, математическое моделирование, асинхронный электропривод, преобразователь частоты, программируемый логический контроллер

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-43-52

EDN: QQUGIT

1. ВВЕДЕНИЕ

Опорно-поворотные устройства (ОПУ) широко применяются в системах слежения, позиционирования и наведения, используемых в радиолокационных станциях, оптико-электронных системах и антеннах спутниковой связи. Одной из ключевых задач при создании таких систем является обеспечение высокой точности и скорости позиционирования при ограниченных ресурсах исполнительных механизмов. Требования к системам управления ОПУ определяются необходимостью надежного отслеживания подвижных целей, а также компенсации внешних возмущений и механических ограничений конструкции. Подходы к проектированию систем управления ОПУ включают использование как классических методов автоматического регулирования, так и более сложных структур, учитывающих нелинейности, ограничения и взаимное влияние параметров азимута и угла места. Для обоснования выбора архитектуры системы управления и параметров регуляторов требуется проведение численного моделирования, учитывающего ограничения, обусловленные особенностями аппаратной реализации.

Задача построения высокоточного контура управления ОПУ остается актуальной ввиду растущих требований к скорости и точности слежения антенн в радиолокационных и спутниковых системах.

Данилушкин Иван Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах. E-mail: idanilushkin@mail.ru

Колпащиков Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и управления в технических системах. E-mail: skolpaschikov@mail.ru

Мельников Евгений Владиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-измерительной техники. E-mail: mev163@yandex.ru

В [1] приведена классификация управляемых ОПУ, рассматриваются требования, предъявляемые к системам управления ОПУ. Много исследований посвящено системам на базе двигателей постоянного тока (ДПТ) [2–7], также исследуются системы позиционирования, построенные с применением других типов электропривода: синхронного двигателя с постоянными магнитами [8], вентильного двигателя [9], двухфазного гибридного шагового двигателя [10]. Применение различных типов электропривода говорит о продолжающемся поиске эффективного аппаратного решения, с учетом развития технологий. Одним из перспективных направлений совершенствования систем позиционирования является применение асинхронного электродвигателя с векторным управлением. Такое решение обладает рядом преимуществ: высокая надежность, простота конструкции и отсутствие щеток, возможность управления скоростью в широком диапазоне.

Требования к точности позиционирования ОПУ зависят от задач, для решения которых предназначена антенна. В [11] исследуется эффективность применения ПИД-закона регулирования для решения задач позиционирования подвижной спутниковой антенны. В [3,6,10] авторы строят систему позиционирования на базе наблюдателя полного порядка и представления объекта управления в пространстве состояний. Авторы [6] исследуют представление системы в дискретном пространстве состояний. В [4] авторы сравнивают несколько способов построения систем позиционирования ОПУ: использование скользящего режима, применение ПИД-регулятора и ПИД-регулятора дробного порядка, управление на основе прогнозирующей модели (МРС-контроллер). Расчет оптимальных параметров для каждого из типов регуляторов осуществляется с помощью метода роя частиц. Применение МРС-контроллера рассматривается и в работе [2]. В [7] авторы исследуют применение нелинейного ПИД-регулятора, ограничивая диапазон изменения интегральной составляющей функцией арктангенса от интеграла ошибки. Оптимальные параметры нелинейного ПИД-регулятора авторы ищут с помощью метода роя частиц. В [5] исследуется применение ПИД-регулятора с адаптивным алгоритмом подстройки. В [9] рассматривается синтез системы управления с переменной структурой на базе системы подчиненного регулирования, обеспечивающей апериодический переходный процесс. Система содержит оптимальный и модальный регуляторы, что обеспечивает высокое быстродействие при отработке заданного перемещения и устойчивость при действии возмущения по моменту сопротивления. В [12] синтезируется дискретный регулятор на базе системы подчиненного регулирования, изначально синтезированной с применением ПИД-закона регулирования. Таким образом применение ПИД-закона регулирования в большинстве решаемых задач позиционирования ОПУ обеспечивает требуемые характеристики системы.

В данной статье исследуется возможность построения системы позиционирования ОПУ на базе асинхронного двигателя с преобразователем частоты, реализующим векторное управление с обратной связью по скорости вращения вала двигателя. При этом ключевыми задачами являются формализация единой математической модели замкнутого контура управления, учет специфики возмущений и нелинейностей при позиционировании по азимуту и углу места, а также экспериментальная проверка рабочих характеристик системы в условиях, близких к реальным нагрузкам.

Целью работы является моделирование и исследование системы автоматического управления ОПУ, предназначенной для обеспечения заданной точности позиционирования антенны при отслеживании программного задатчика. На основе результатов моделирования оценивается возможность реализации системы с требуемыми динамическими и точностными характеристиками в условиях, соответствующих реальным режимам эксплуатации.

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ АНТЕННЫ

Рассматриваемое ОПУ реализуется как двухосная система позиционирования антенны. Требования к диапазонам регулирования и точности позиционирования приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены физические характеристики оборудования.

Позиционирование по каждой из осей осуществляется независимо, с помощью электропривода (рис. 1), реализованного на базе асинхронного двигателя (М) с регулируемым преобразователем частоты ВЕСПЕР с обратной связью по скорости асинхронного электродвигателя и векторным управлением моментом [13]. В качестве датчика обратной связи по скорости (Д2) выступает инкрементальный энкодер. Перемещение антенны производится с помощью системы редукторов (Р). Положение антенны по каждой из осей измеряется с помощью датчика углового положения (Д1). Датчики угловых положений антенны подключены к ПЛК, на котором реализуется система автоматического управления позиционированием антенны. ПЛК формирует задания (уставки) по скорости вращения электропривода каждой из осей и передает их по протоколу Modbus-RTU.

Принято решение о реализации систем автоматического управления позиционированием антенны по каждой из осей в виде двухконтурной системы подчиненного регулирования [14]. Внутренний контур обеспечивает поддержание заданной скорости вращения электродвигателя и

Таблица 1. Требования к системам автоматического управления ОПУ

Характеристика	Азимутальная ось	Ось угла места
Диапазон позиционирования	от -270° до $+270^\circ$	от -90° до $+90^\circ$
Погрешность позиционирования	$\pm 0,03^\circ$	$\pm 0,03^\circ$
Максимальная угловая скорость	$9^\circ/\text{с}$	$6^\circ/\text{с}$
Максимальное угловое ускорение	$3^\circ/\text{с}^2$	$2^\circ/\text{с}^2$

Таблица 2. Параметры моделирования систем автоматического управления ОПУ

Характеристика	Азимутальная ось	Ось угла места
Передаточное число редуктора	457,6	1341
Максимальный момент на валу двигателя	30 Н·м	30 Н·м
Скорость вращения двигателя	1390 об/мин	1390 об/мин
Момент инерции на выходном валу редуктора	4281 кг·м ²	5018 кг·м ²
Коэффициент вязкого трения на выходном валу редуктора	1021 Н·м·с	8768 Н·м·с
Расчетный момент ветровой нагрузки (45° , ветер 25 м/с)	5270 Н·м	5270 Н·м
Несбалансированный момент силы тяжести	–	1750 Н·м

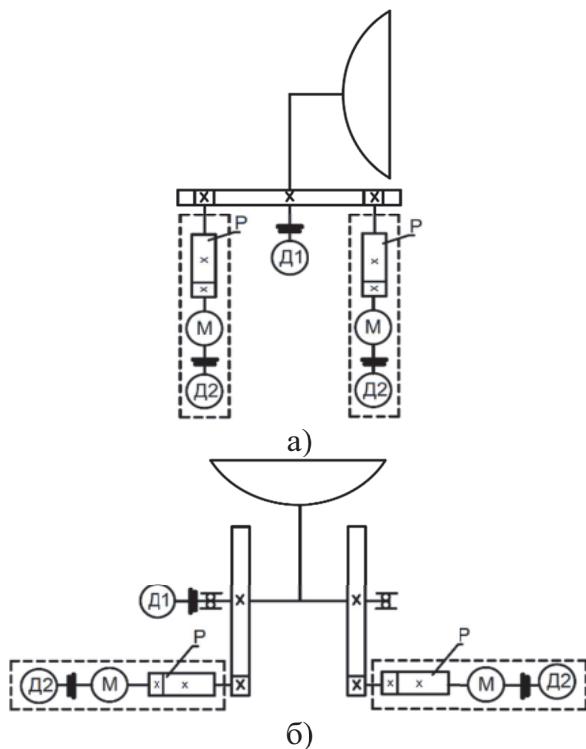


Рис. 1. Кинематическая схема осей вращения:
 а – азимутальная, б – угломестная;
 М – электропривод, Р – редуктор, Д1 – датчик углового положения антенны, Д2 – датчик скорости привода

реализуется встроенным регулятором преобразователя частоты. Внешний контур выполняет позиционирование антенны на заданный угол с помощью регулятора, реализуемого на ПЛК.

Разделение функции регулирования между двумя устройствами (ПЛК, ПЧ) и жесткие требования к точности позиционирования антенны требуют учитывать при выборе регуляторов и их настроечных параметров временные задержки, возникающие в реальной системе и связанные с:

- формированием измерительного сигнала на выходе датчика;
- временем выполнения алгоритма в управляющем контроллере;
- временем передачи данных по промышленной сети.

В рассматриваемой системе, быстродействие датчиков очень велико по сравнению с двумя другими факторами, поэтому задержки преобразования информации в них можно не учитывать. Цикл типового управляющего контроллера в настоящее время не превышает 1 мс и тоже может быть проигнорирован при синтезе систем управления.

Самым существенным звеном, определяющим дискретный характер поведения системы управления, выступает процесс передачи данных по промышленной сети. В качестве протокола промышленной сети, в системе выступает Modbus RTU [15] с максимальной скоростью передачи данных 19200 бит/с. Одна транзакция по протоколу Modbus RTU, позволяющая передать значение скорости вращения электропривода для преобразователя частоты ВЕСПЕР занимает 26 байтов:

- запрос (14,5 байтов): признак начала пакета – 3,5 байта; адрес устройства – 1 байт; код функции (10h) – 1 байт; адрес регистра – 2 байта; количество регистров – 2 байта; количество байт данных – 1 байт; данные – 2 байта; контрольная сумма CRC – 2 байта;
- ответ (11,5 байтов): признак начала пакета – 3,5 байта; адрес устройства – 1 байт; код функции (10h) – 1 байт; адрес регистра – 2 байта; количество регистров – 2 байта; контрольная сумма CRC – 2 байта.

Каждый байт в RTU-режиме представляется 11 битами (3 бита служебной информации и 8 битов данных). Поэтому длительность одной транзакции составляет: $26 \cdot 11 / 19200 = 0,014896 \text{ с} \gg 15 \text{ мс}$. Таким образом, для оценки поведения реальной системы, необходимо учесть дискретизацию по времени.

Процедура расчета систем управления по каждой из осей должна учитывать особенности объектов управления. Антенна не сбалансирована по оси угла места, поэтому при изменении угла места воздействие силы тяжести на антенну создает дополнительный момент на валу привода, который зависит от значения угла места. Изменение положения антенны по углу места также влияет на изменение момента инерции при вращении опорно-поворотного устройства вокруг азимутальной оси.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Момент $M(t)$ на валу электродвигателя описывается дифференциальным уравнением [16]

$$M(t) = J\dot{\omega}(t) + B\omega(t), \quad (1)$$

где J – момент инерции вокруг соответствующей оси, приведенный к валу двигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; B – коэффициент вязкого трения, приведенный к валу двигателя, $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$; $\omega(t)$ – угловая скорость вращения электродвигателя, $\text{рад} / \text{с}$.

Из (1) может быть получена передаточная функция для скорости двигателя в пространстве изображений по Лапласу:

$$W_{\text{ог}}(p) = \frac{i^2}{J_R p + B_R}. \quad (2)$$

Вращающий момент подается на ОПУ через редуктор, с передаточным числом i . Момент инерции ОПУ на выходном валу редуктора J_R и коэффициент вязкого трения ОПУ на выходном валу редуктора B_R связаны с соответствующими величинами на валу двигателя выражениями:

$$J = J_R / i^2, \quad (3)$$

$$B = B_R / i^2. \quad (4)$$

Подставив (3), (4) в (2) получили передаточную функцию двигателя с учетом параметров нагрузки:

$$W_{\text{ог}}(p) = \frac{i^2}{J_R p + B_R}. \quad (5)$$

Скорость вращения выходного вала редуктора связана со скоростью вращения электропривода соотношением

$$\omega_R = \omega / i. \quad (6)$$

Угол поворота антенны (выходного вала редуктора) по каждой из осей определяется как интеграл скорости ее перемещения:

$$\varphi_R(t) = \int_0^t \omega_R(\tau) d\tau = \frac{1}{i} \int_0^t \omega(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Момент на валу двигателя регулируется преобразователем частоты. Для учета его динамических характеристик, необходимо создать его динамическую модель. Преобразователь частоты оценивает рассогласование между заданной и фактической скоростью вращения и формирует такое управляющее воздействие, которое обеспечивает требуемый момент на валу двигателя с учетом ограничений на допустимый момент и силу тока. В качестве эквивалентной динамической модели по каналу «заданная скорость вращения – момент на валу двигателя» используется структура, реализованная в среде моделирования динамических систем MATLAB® Simulink® [17], рис. 2.

Вход SP – вход по заданной скорости вращения, PV – вход по текущей скорости вращения, рассогласование поступает на интегратор с коэффициентом усиления K_i , который представляет собой, по сути, модель реализуемого аппаратно-программным обеспечением преобразователя частоты регулятора момента. Блоки усиления J , B и блок дифференцирования служат для расчета момента в соответствии с (1). Блок ограничения сигнала Saturation служит для ограничения момента при слишком быстром росте уставки по скорости вращения. На выходе Mout формируется значение момента на выходе электродвигателя. Для удобства построения Simulink-модели системы управления позиционированием, Simulink-модель преобразователя частоты оформлена в виде подсистемы, со следующими настраиваемыми параметрами:

J_r – момент инерции на выходном валу редуктора;
 B_r – коэффициент вязкого трения на выходном валу редуктора;
 i_r – передаточное число редуктора;
 M_{max} – максимальное значение момента на валу двигателя (параметр блока Saturation).

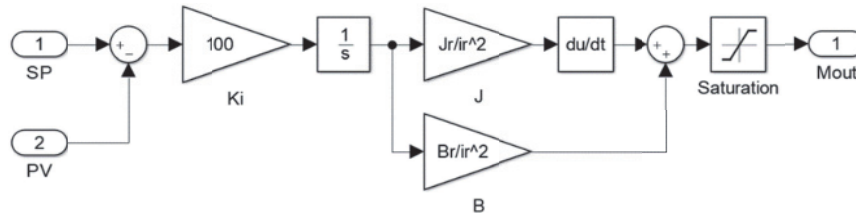


Рис. 2. Simulink-модель преобразователя частоты

Simulink-модель системы управления поворотом вокруг оси, с учетом (5), (7) представлена на рис. 3. Она представляет собой систему подчиненного регулирования, внутренний контур с обратной связью по угловой скорости, реализуется с помощью модели преобразователя частоты (блок FC). Внешний контур с обратной связью по углу поворота вала редуктора реализуется с помощью блока ПИД-регулятора (PID) с ограничением на максимальное значение выходной величины – уставки по скорости. Ограничение на скорость обмена данными по протоколу Modbus RTU реализуется с помощью блока экстраполятора нулевого порядка ЭПО, который каждые 15 мс фиксирует на своем выходе текущее значение входа. Это соответствует реальной ситуации, когда новое значение уставки с выхода ПИД-регулятора передается преобразователю частоты один раз в 15 мс.

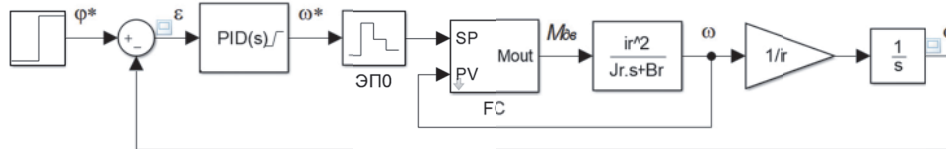


Рис. 3. Базовая Simulink-модель системы управления поворотом вокруг оси

Высокое быстродействие внутреннего контура по сравнению с внешним позволяет при расчете настроек регулятора внешнего контура, учитывать внутренний контур как апериодическое звено первого порядка с постоянной времени в десятые доли секунды.

Представленная на рис. 3 Simulink-модель является универсальной моделью, которая используется как базовая для систем управления позиционированием по азимуту и по углу места. Однако для анализа систем базовая модель требует модификации с учетом их функциональных особенностей.

4. СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО АЗИМУТУ

Модель позиционирования по азимуту должна учитывать изменение момента инерции ОПУ из-за изменения положения антенны по углу места. Зависимость момента инерции на выходном валу редуктора по азимутальной оси J_R^{az} от величины угла места φ_R^{el} будет описываться выражением

$$J_R^{az}(\varphi_R^{el}) = J_{R0}^{az} \cdot (1 + \sin^2 \varphi_R^{el}), \tag{8}$$

где J_{R0}^{az} – момент инерции при $\varphi_R^{el} = 0$. Зависимость (8) должна быть учтена в модели (рис. 3) передаточной функцией апериодического звена (5) с переменным параметром постоянной времени. Такое апериодическое звено может быть реализовано на базе интегрирующего звена $B_R / (J_R p)$, охваченного отрицательной обратной связью:

$$\begin{aligned} W_{OOC}(p) &= \frac{i^2}{B_R} \cdot \frac{\frac{B_R}{J_R p}}{1 + \frac{B_R}{J_R p}} = \frac{i^2}{B_R} \cdot \frac{B_R}{J_R p + B_R} = \\ &= \frac{i^2}{J_R p + B_R} \stackrel{(5)}{=} W_{\text{ог}}(p). \end{aligned} \tag{9}$$

При таком представлении появляется возможность изменять постоянную времени в процессе моделирования (рис. 4).

Возмущение моментом ветровой нагрузки $M^{\text{взм}}$ учитывается как прибавка к моменту на валу двигателя, с учетом передаточного числа редуктора (рис. 4):

$$M_R^{возм} = M^{возм} / i. \quad (10)$$

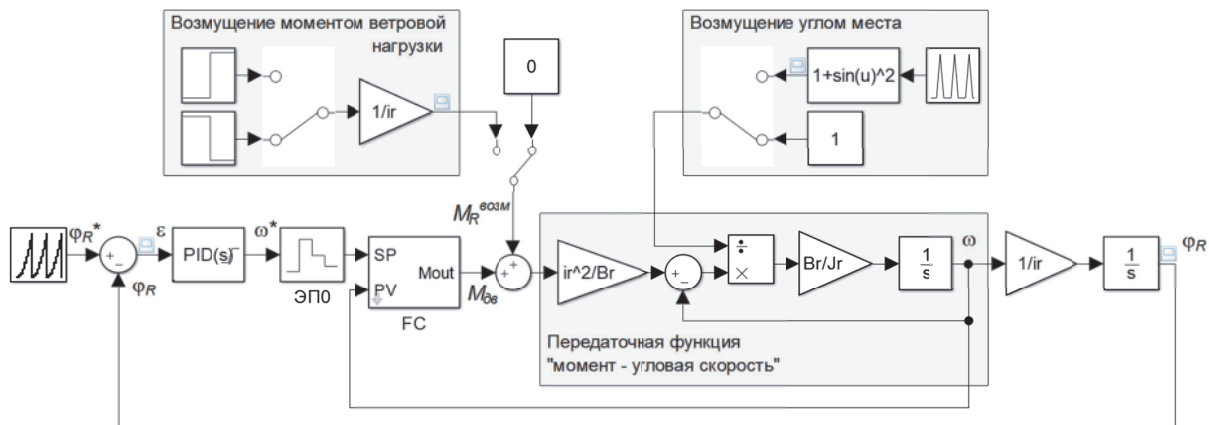


Рис. 4. Simulink-модель системы позиционирования по азимуту

Расчет настроек ПИ-регулятора осуществлялся исходя из требований к переходному процессу при отработке возмущения моментом ветровой нагрузки с последующей проверкой поведения системы при изменении уставки. Требования к переходному процессу по возмущению: отсутствие статической ошибки; максимальное отклонение должно лежать в пределах заданной погрешности позиционирования; отсутствие колебаний. Соответствие первому критерию обеспечено структурой регулятора. Последние два критерия находятся в противоречии друг с другом, поэтому, при расчете оптимальных настроек в качестве целевой функции выступает требование к отсутствию колебаний, а требование по максимальному отклонению является ограничением задачи оптимизации. На рис. 5.а представлен график отработки возмущения моментом ветровой нагрузки. Рассчитанные оптимальные настройки ПИ-регулятора с передаточной функцией

$$W_{ПИ}(p) = K(1 + I/p) \quad (11)$$

обеспечивают незначительное перерегулирование при значениях $K=18000$, $I=8$.

Исследование системы управления предполагает проверку нахождения контролируемого параметра в допустимых пределах отклонения при предельных изменениях значений управляющих и возмущающих воздействий. К таким относятся: воздействие ветровой нагрузки с максимальным значением момента (рис. 5.а); разгон с максимальным угловым ускорением (рис. 5.б); возмущение изменением момента инерции.

На рис. 5.б представлен профиль изменения уставки скорости с максимальным угловым ускорением до максимальной угловой скорости и движение с максимальной угловой скоростью. Ошибка управления при движении с максимальным угловым ускорением не превышает $0,01^\circ$. При движении с постоянной скоростью ошибка управления равна нулю.

Изменение момента инерции при изменении угла места достигает максимальной величины при положении в 45° и перемещении с максимальной угловой скоростью. Вычислительные эксперименты с моделью (рис. 4) показали, что это возмущение слишком незначительно и реакция системы практически не заметна: ошибка управления составляет десятитысячные доли градуса и соизмерима с погрешностью моделирования.

На рис. 5.в представлен график, соответствующий наихудшей ситуации: во время движения с предельным ускорением, на антенну действует ветровая нагрузка с максимальным моментом, направленная против направления движения. Анализ показал, что в наихудшей ситуации ошибка управления не превышает предельно установленной величины $0,03^\circ$.

5. СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО УГЛУ МЕСТА

Из-за наличия несбалансированного момента силы тяжести (табл. 1) модель позиционирования по углу места должна учитывать его влияние при изменении положения антенны по углу места (рис. 6)

$$M_G(\varphi_R^{el}) = M_G^{\max} \cdot \sin|\varphi_R^{el}|, \quad (12)$$

где M_G^{\max} – максимальное значение несбалансированного момента при $\varphi_R^{el} = \pm 90^\circ$.

Возмущение моментом ветровой нагрузки $M^{возм}$ учитывается аналогично модели поворота вокруг азимутальной оси (рис. 4).

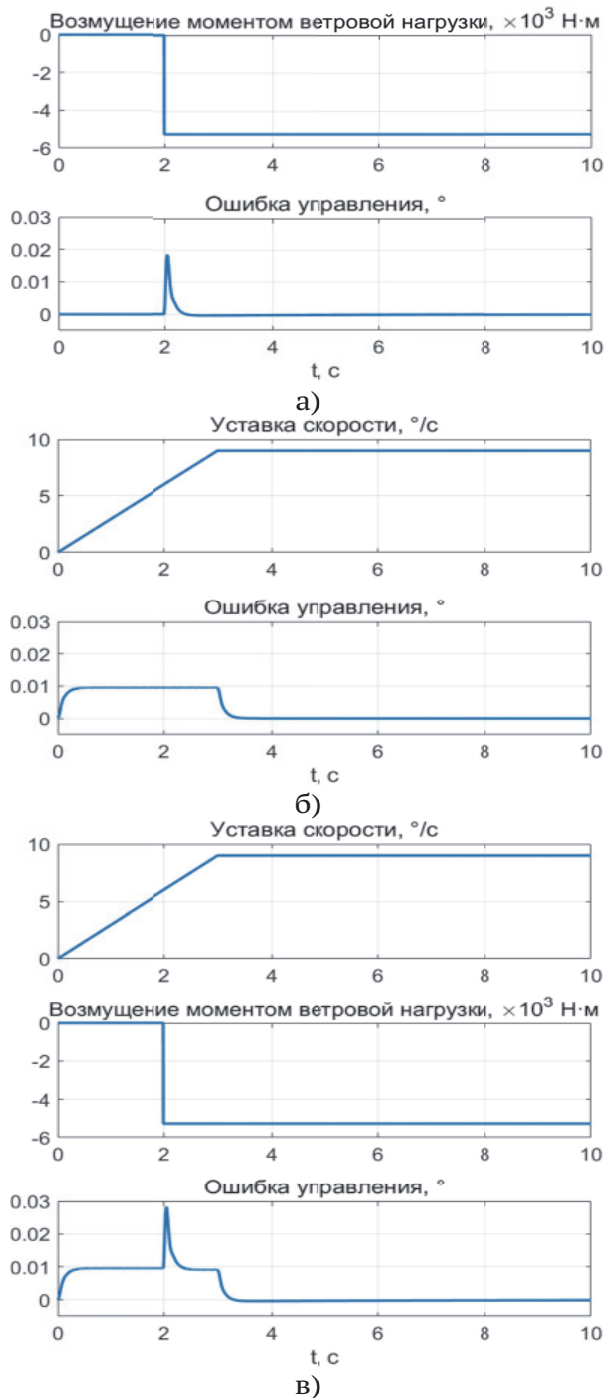


Рис. 5. Реакция системы позиционирования по азимутальной оси на изменение уставки и возмущающее воздействие

моменту и выход электродвигателя на ограничение по максимальной скорости вращения. Такой контроль продиктован проверкой технической реализуемости системы управления. В результате вычислительных экспериментов установлено, что выходов на ограничения нет, при выбранной технической реализации система позиционирования обеспечивает заданные требования.

В статье рассмотрен подход к построению и исследованию системы управления позиционированием антенны, основанный на использовании единой динамической модели замкнутого контура, учитывающей реальные ограничения аппаратной реализации, включая дискретный характер передачи управляющих воздействий по промышленной сети. Использование данной модели позволяет на этапе проектирования оценивать точность позиционирования и поведение системы в предельных режимах работы без упрощения структуры управления.

Необходимо отметить, что реальные динамические характеристики электроприводов и ограничения по быстродействию преобразователя частоты ВЕСПЕР могут потребовать коррекции настроек

Требования к переходному процессу и задача поиска оптимальных настроек регулятора со структурой (11) решалась для системы позиционирования по углу места аналогично решению для системы позиционирования по азимуту. Основное отличие заключается в том, что для системы позиционирования по углу места момент силы тяжести приносит дополнительное возмущение и перемещение антенны в крайних положениях ($\pm 90^\circ$) носит более показательный характер для оценки точности системы позиционирования.

На рис. 7 представлены результаты исследования Simulink-модели системы позиционирования по углу места. Движение начинается из положения -90° . На рис. 7.а представлен график отработки возмущения моментом ветровой нагрузки. В данном оптимальные настройки ПИ-регулятора ($K=60000$, $I=8$) обеспечивают поддержание заданной точности путем незначительного перерегулирования при отработке возмущения.

На рис. 7.б представлен профиль изменения уставки скорости с максимальным угловым ускорением до максимальной угловой скорости и движение с максимальной угловой скоростью. Ошибка управления при движении с максимальным угловым ускорением не превышает $0,006^\circ$. При движении с постоянной скоростью ошибка управления равна нулю.

На рис. 7.в представлена наихудшая ситуация: во время движения с предельным ускорением, на антенну действует ветровая нагрузка с максимальным моментом, направленная против направления движения. Ошибка управления не превышает предельно установленной величины $0,03^\circ$.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты моделирования показывают, что системы автоматического управления позиционированием антенны позволяют обеспечить требуемую точность позиционирования $\pm 0,03^\circ$ во всех режимах функционирования ОПУ.

При моделировании дополнительно проводился контроль выхода модели преобразователя частоты на ограничение по максимальному

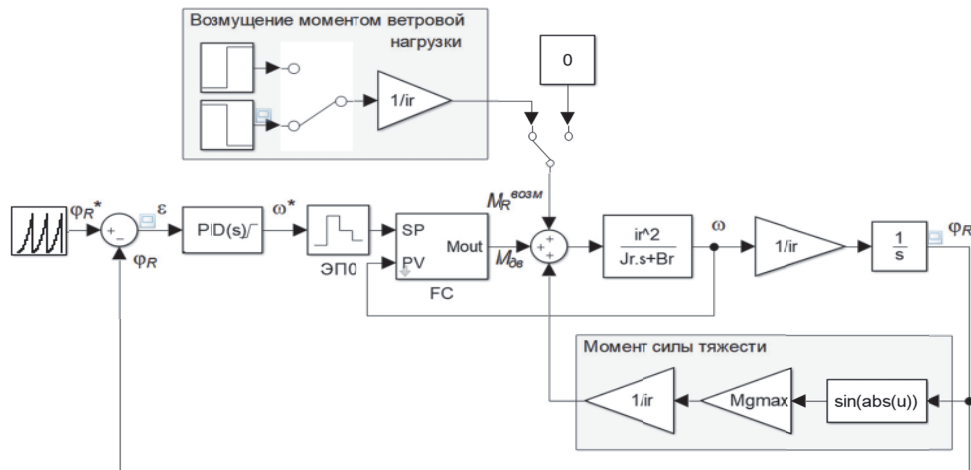


Рис. 6. Simulink-модель системы позиционирования по углу места

регуляторов на этапе пусконаладочных работ. Для гарантированного исключения автоколебаний антенной системы потребуется провести комплексное исследование динамических свойств силового каскада: преобразователя частоты в связке с асинхронным двигателем и энкодером, реализующим обратную связь по скорости вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баунин, В.Г. Проблемы проектирования и производства управляемых опорно-поворотных устройств антенн радиосвязи / В.Г. Баунин, Б.В. Новоселов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – № 5-1. – С. 21-30.
2. Ekengwu Bonaventure Onyeka, Muoghalu Chidiebere, & Achebe Patience Nkiruka. (2018). Performance Improvement of Antenna Positioning Control System Using Model Predictive Controller. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 5(9), 722-729. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10722808>.
3. Uthman, A., & Sudin, S. (2018). Antenna Azimuth Position Control System using PID Controller & State-Feedback Controller Approach. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(3), 1539-1550. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1539-1550>
4. Al-Mayyahi, A., Aldair, A., Khalaf, Z.A. et al. Control system design for azimuth position of earth station antennas (2024). *J. Eng. Appl. Sci.* 71, 199. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00532-5>.
5. Eze P. C., Ugoh C. A., Inaibo D. S. (2021). Positioning control of DC servomotor-based antenna using PID tuned compensator. *Journal of Engineering Sciences*, 8(1), E9–E16, [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(1\).e2](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(1).e2).
6. Njoku, D.O., Chioma, N.E., Okolie, S.A., & Asagba, P.O. (2019). Discrete-time state space analysis of satellite antenna system. In 2019 IEEE 1st International Conference on Mechatronics, Automation and Cyber-Physical Computer System (IEEE MAC 2019). pp. 333-338. IEEE.
7. Rasheed, L.T., Yousif, N.Q., Al-Wais, S. (2023). Performance of the optimal nonlinear pid controller for position control of antenna azimuth position system. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 10(1), 366-375. <https://doi.org/10.18280/mmep.100143>

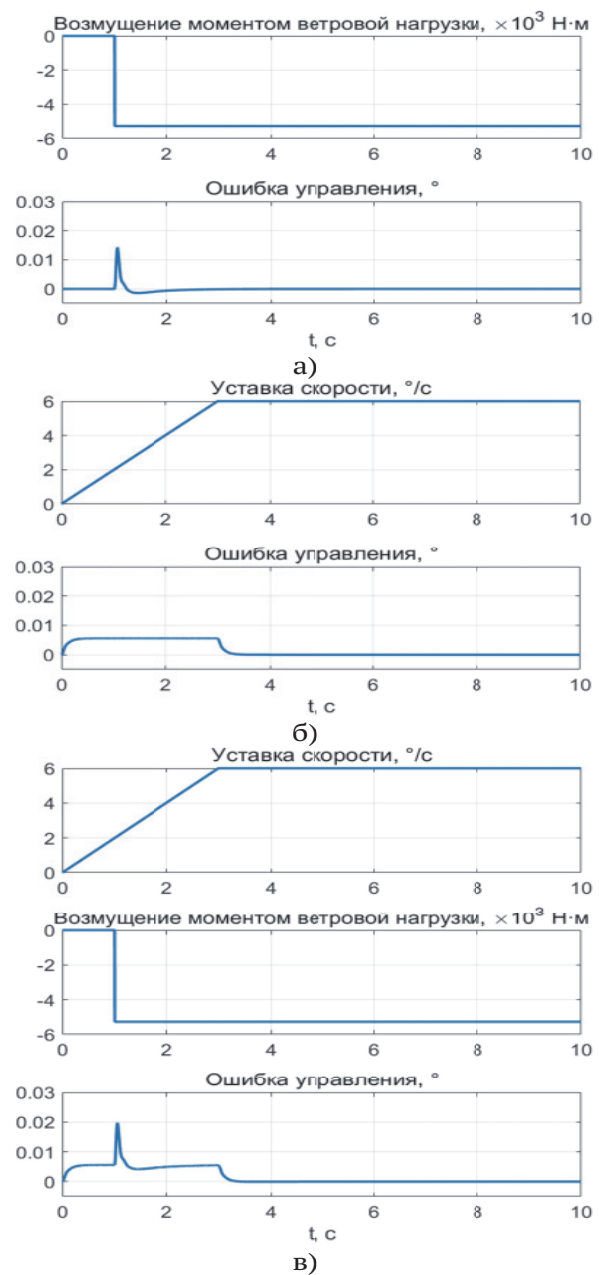


Рис. 7. Реакция системы позиционирования по угломестной оси на изменение уставки и возмущающее воздействие

8. Стрелков, В.Ф. Система управления электродвигателем вращения антенны РЛС / В.Ф. Стрелков, М.В. Андрухин // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – №4. – С. 100-109.
9. Денисов, В.А. Система электропривода поворота антенны с переменной структурой канала управления / В.А. Денисов, М.Э. Жангиров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 2. – С. 115-120.
10. Nnaemeka C. Asiagbu, Chimezie F. Udechukwu, Chukwuebuka Ekenodu (2021). Antenna Positioning Control System for Effective Satellite Communication. Iconic Research And Engineering Journals, 4(12), 27-34.
11. Eze, P. C., Jonathan, A. E., Agwah, B. C., & Okoronkwo, E. A. (2020). Improving the performance response of mobile satellite dish antenna network within Nigeria. Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science – JEECCS, 6(21), 25-30.
12. Achebe, P. N. (2018). Design of digital cascade compensator for ground station satellite antenna servo control system. International Journal of Latest Engineering Science, 1(3), 26-31. <https://www.ijlesjournal.org/2018/volume-1%20issue-3/ijles-v1i3p104.pdf>.
13. Vesper – промышленная автоматизация [Электронный ресурс] // Vesper. – URL: <https://www.vesper.ru/> (дата обращения 22.11.2025).
14. Рапопорт, Э.Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока: конспект лекций. – Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1985. – 56 с.
15. Просто о Modbus RTU с подробным описанием и примерами [Электронный ресурс] // IPC2U. – URL: <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu> (дата обращения 10.01.2026).
16. Кононова, М.Е. Исследование и разработка следящих электроприводов опорно-поворотных устройств больших телескопов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Кононова Мария Евгеньевна; [Место защиты: Нац. исслед. ун-т информ. технологий, механики и оптики]. – Санкт-Петербург, 2016. – 119 с.
17. MATLAB – MathWorks [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. (дата обращения: 12.03.2025).

CONTROL SYSTEM FOR A SLEWING DRIVE BASED ON AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH FREQUENCY CONTROL

© 2026 I.A. Danilushkin, S.A. Kolpashchikov, E.V. Melnikov

Samara State Technical University, Samara, Russia

This paper considers an automatic control system for antenna positioning using a slewing drive based on an asynchronous electric drive with a frequency converter implementing vector torque control. The control system is designed as a two-loop cascade control structure. The inner speed control loop of the electric drive is implemented by the frequency converter, while the outer positioning loop is implemented by the software of a programmable logic controller with feedback on the antenna rotation angle. An approach to the formalization of a unified mathematical model of the closed-loop control system is proposed. The model takes into account the dynamic characteristics of the electric drive, gearbox, and load, as well as the discrete nature of control signal generation for the inner loop caused by the transmission of setpoints via the industrial Modbus RTU protocol. It is shown that communication delays and the control signal update period have a significant effect on system dynamics and must be considered during control system design. Specialized models for the azimuth and elevation axes are developed, taking into account variations in the equivalent moment of inertia due to changes in the spatial orientation of the antenna, as well as the influence of disturbance torques caused by wind load and unbalanced gravitational torque. A computational experiment using the MATLAB/Simulink environment is carried out to analyze system behavior under extreme operating conditions, including acceleration with maximum angular acceleration and simultaneous action of disturbances. The parameters of PI controllers for the outer positioning loop are calculated with consideration of accuracy requirements, absence of oscillations, and technical feasibility of the system. Simulation results demonstrate that the proposed control system structure ensures the specified positioning accuracy of $\pm 0.03^\circ$ in all considered operating modes without reaching the torque and speed limits of the electric drive. The need for refinement of controller parameters during commissioning is noted, taking into account the actual dynamic characteristics of the power stage.

Keywords: slewing drive, antenna positioning, two-loop control system, cascade control, mathematical modeling, asynchronous electric drive, frequency converter, programmable logic controller

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-43-52

EDN: QQUGIT

REFERENCES

1. Baunin, V.G. Problemy proektirovaniya i proizvodstva upravlyaemyh oporno-povorotnyh ustrojstv antenn radiosvyazi / V.G. Baunin, B.V. Novoselov // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2011. – № 5-1. – S. 21-30.
2. Ekengwu Bonaventure Onyeka, Muoghalu Chidiebere, & Achebe Patience Nkiruka. (2018). Performance Improvement of Antenna Positioning Control System Using Model Predictive Controller. European Journal of Advances in

- Engineering and Technology, 5(9), 722-729. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10722808>.
3. Uthman, A., & Sudin, S. (2018). Antenna Azimuth Position Control System using PID Controller & State-Feedback Controller Approach. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(3), 1539-1550. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1539-1550>.
 4. Al-Mayyahi, A., Aldair, A., Khalaf, Z.A. et al. Control system design for azimuth position of earth station antennas (2024). *J. Eng. Appl. Sci.* 71, 199. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00532-5>.
 5. Eze P. C., Ugoh C. A., Inaibo D. S. (2021). Positioning control of DC servomotor-based antenna using PID tuned compensator. *Journal of Engineering Sciences*, 8(1), E9–E16, [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(1\).e2](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(1).e2).
 6. Njoku, D.O., Chioma, N.E., Okolie, S.A., & Asagba, P.O. (2019). Discrete-time state space analysis of satellite antenna system. In 2019 IEEE 1st International Conference on Mechatronics, Automation and Cyber-Physical Computer System (IEEE MAC 2019). pp. 333-338. IEEE.
 7. Rasheed, L.T., Yousif, N.Q., Al-Wais, S. (2023). Performance of the optimal nonlinear pid controller for position control of antenna azimuth position system. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 10(1), 366-375. <https://doi.org/10.18280/mmep.100143>
 8. Strelkov, V.F. Sistema upravleniya elektrodvigatelem vrashcheniya anteny RLS / V.F. Strelkov, M.V. Andryuhin // *Intellektual'naya elektrotehnika*. – 2018. – №4. – S. 100-109.
 9. Denisov, V.A. Sistema elektroprivoda povorota anteny s peremennoj strukturoj kanala upravleniya / V.A. Denisov, M.E. Zhangirov // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. – 2012. – № 2. – S. 115-120.
 10. Nnaemeka C. Asiegbu, Chimezie F. Udechukwu, Chukwuebuka Ekennodu (2021). Antenna Positioning Control System for Effective Satellite Communication. *Iconic Research And Engineering Journals*, 4(12), 27-34.
 11. Eze, P. C., Jonathan, A. E., Agwah, B. C., & Okoronkwo, E. A. (2020). Improving the performance response of mobile satellite dish antenna network within Nigeria. *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science – JEECCS*, 6(21), 25-30.
 12. Achebe, P. N. (2018). Design of digital cascade compensator for ground station satellite antenna servo control system. *International Journal of Latest Engineering Science*, 1(3), 26-31. <https://www.ijlesjournal.org/2018/volume-1%20issue-3/ijles-v1i3p104.pdf>.
 13. Vesper – promyshlennaya avtomatizaciya [Elektronnyj resurs] // Vesper. – URL: <https://www.vesper.ru/>, svobodnyj. – Data obrashcheniya: 22.11.2025.
 14. Rapoport, E.Ya. Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov postoyannogo toka: konspekt lekciy. – Kujbyshev: Kujbyshevskij aviacionnyj institut, 1985. – 56 s.
 15. Prosto o Modbus RTU s podrobnym opisaniem i primerami [Elektronnyj resurs] // IPC2U. – URL: <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu> (data obrashcheniya 10.01.2026).
 16. Kononova, M. E. Issledovanie i razrabotka sledyashchih elektroprivodov oporno-povorotnyh ustrojstv bol'shih teleskopov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.05 / Kononova Mariya Evgen'evna; [Mesto zashchity: Nac. issled. un-t inform. tekhnologij, mekhaniki i optiki]. – Sankt-Peterburg, 2016. – 119 s.
 17. MATLAB – MathWorks [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, svobodnyj. – Data obrashcheniya: 12.03.2025.

Ivan Danilushkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Control in Technical Systems. E-mail: idanilushkin@mail.ru
Sergey Kolpashchikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Control in Technical Systems. E-mail: skolpaschikov@mail.ru
Evgeny Melnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Measurement Technology. E-mail: mev163@yandex.ru