Моделирование палубной адаптивной гиростабилизированной приборной платформы

И. Р. Гогорев[1], П. В. Соколов[2]
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
[1]ilmirgogorev@yandex.ru, [2]pvsokolov@etu.ru

Аннотация*. Данная работа посвящена моделированию судовой адаптивной гиростабилизированной приборной платформы. Многие палубные приборы для их корректной работы необходимо стабилизировать в горизонте, поэтому обычно они устанавливаются на стабилизированную платформу. Сложность работы этой системы заключается в необходимости обеспечения высокого качества функционирования в условиях действия внешних возмущений, вызванных качкой корабля, ветровой нагрузкой, вибрацией двигательной установки и неопределенностью параметров системы при установке дополнительного оборудования. Решение этой проблемы требуют применения адаптивного подхода. Работа посвящена исследованию применения сигнального алгоритма адаптивного управления с эталонной моделью в задаче стабилизации платформы в горизонте при воздействии качки. Разработана математическая модель приборной гиростабилизированной платформы взлетно-посадочной системы, состоящая из модели трёхосного стабилизатора, дополненного моделью привода с классическим ПИД-регулятором. Адаптивный регулятор введен параллельно основному регулятору, и обеспечивает способность устройства адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени. Результаты исследования подтверждают эффективность предложенной модели на основе имитационного моделирования и анализа основных показателей системы.

Ключевые слова: адаптивная система управления; посадка; БПЛА

I. Введение

Необходимость нахождения в горизонте для корректной работы вынуждает ставить многие палубные приборы на стабилизированный подвес. Так как качка корабля имеет три составляющие: бортовая качка (Θ), килевая качка (Ψ), рысканье (φ), – то для достижения большой точности в позиционировании нужен как минимум трёхосный стабилизатор. При этом для избегания эффекта складывания рамок (gimbal lock) необходимо, чтобы плоскости осей подвеса были все перпендикулярны [1].

Для осей примем стандартные обозначения: q – внешняя ось (ось горизонтального наведения), ρ – средняя ось (ось вертикального наведения), h – внутренняя ось (ось поперечного наведения). Также будем обозначать угол вращения вокруг определённой оси соответствующей этой оси букве: угол q, угол ρ, угол h.

Предполагается, что на каждом кольце подвеса стоит волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) – очень точный датчик, который измеряет угловую скорость поворота относительно земли, то есть в рассматриваемой задаче он фактически меряет угловую скорость ошибки стабилизации. Также предполагается, что за вращение осей отвечают синхронные двигатели на постоянных магнитах.

II. Вывод математической модели объекта

A. Модель объекта

На практике широко распространён метод моделирования многоосного стабилизируемого подвеса, как набора независимых осей [2–3]. Конечная цель работы – это исследование поведение модели и регулятора, максимально приближенных к реальным условиям. Принимается несколько допущений для упрощения задачи в первом приближении:

- Корабль не движется поступательно, рассматривается только стабилизация угловых движений качке.
- Предполагается, что все тела симметричны и сбалансированы и их оси инерции совпадают с осями, связанных с ними системами координат. Также предполагается, что момент инерции каждого тела по его оси вращения много больше моментов инерции по вспомогательным осям и последними можно пренебречь.
- Центры масс каждого звена лежат в начале координат связанных с ними систем.
- Все связанные системы координат имею начало в одной точке.

Модель синтезирована по методике, аналогичной той, что представлена в работе [4]. В ней уравнения динамики выводятся с помощью уравнений Лагранжа 1го рода. Данный подход удобен тем, что требует лишь нахождения полных кинетической и потенциальной энергий, каждая их которых складывается из кинетических и потенциальных энергий отдельных колец, при этом скорости и энергии одного кольца и внешнего(внутреннего) к нему связаны простыми рекуррентными формулами:

$$T_i = \frac{1}{2} m_i \left(v_{ci}{}^T v_{ci} \right) + m_i \omega_i^T R_{ci} A_{i-1,i} v_{ci} + \frac{1}{2} \omega_i^T J_{ci} \omega_i \quad (1)$$

где T_i – кинетическая энергия i-го кольца, m_i – масса i-го кольца, v_{ci} – вектор линейной скорости i-го кольца, ω_i – вектор угловой скорости i-го кольца, J_{ci} – момент инерции i-го кольца, R_{ci} – матрица координат центра масс i-го кольца:

$$R_{ci} = \begin{bmatrix} 0 & z_{ci} & -y_{ci} \\ -z_{ci} & 0 & x_{ci} \\ y_{ci} & -x_{ci} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$A_{i-1,i}$ – матрица перехода системы координат, связанной с $i-1$ кольцом в систему, связанной с i-ым кольцом. При этом i = q, ρ, h. Для самого внешнего кольца в качестве внешней системы нужно брать систему, связанную с кораблём.

Кинетическая и потенциальная энергии определяются для каждого кольца, после чего складываются и уравнения динамики находятся в форме:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}=Q_i-\frac{\partial P}{\partial q_i}, i=q,\rho,h \tag{3}$$

где q_i – независимые обобщённые координаты, $\dot{q}_i$ – производные от q_i, $T=T\left(q,\dot{q}\right)$ – кинетическая энергия системы, $P=P\left(q\right)$ – потенциальная энергия системы, Q_i – обобщённые силы и моменты, не выводимые из потенциальной энергии. С учётом принятых допущений сила тяжести не действует на систему, следовательно, слагаемое в правой части с потенциальной энергией можно приравнять нулю.

Уравнения динамики находятся в форме:

$$\ddot{q}=M^{-1}\left(q\right)\left(Q-C\left(q,\dot{q}\right)\dot{q}-G\left(q\right)\right) \tag{4}$$

где $M(q)$ – матрица инерции, $C(q,\dot{q})$ – матрица кориолисовых и центростремительных сил, $G(q)$ – матрица потенциальных сил, которая в нашем случае равна нулевой.

Полный вывод и сами уравнения динамики не приводятся в силу их громоздкости.

B. Модель возмущений

К возмущениям, действующим на систему, относятся силы трения в осях приводов и небаланс. Качка моделируется просто как гармоническое воздействие с заданной амплитудой и частотой, в качестве модели момента трения берётся упрощённая модель в виде релейной характеристики:

$$M_{mp}=M_{mp,max}sign\left(\dot{\theta}\right) \tag{5}$$

где $M_{\text{тр,max}}$ – максимальный момент трения, $\dot{\theta}$ – относительная угловая скорость оси.

Небаланс обычно моделируется с помощью введения в уравнения динамики объекта плеча между центром масс кольца и началом координат связанной с этим кольцом системы. Однако с учётом наших допущений, небаланс моделируется как дополнительный внешний возмущающий момент. Для этого используются модели момента небаланса в вертикальной и горизонтальной плоскостях [3]:

$$M_{в}=M_{mp,max}\frac{l}{g}\ddot{\Theta} \tag{6}$$

$$M_{в}=M_{mp,max}\left(l+\frac{w}{g}\right) \tag{7}$$

где $\ddot{\Theta}$ – относительное угловое ускорение качки, l – смещение центра масс относительно центра подвеса, w – скорость линейных вибраций.

Тогда Q_i будет иметь вид:

$$Q_i=u_i+r_i+w_i \tag{8}$$

где u_i – управляющий момент, r_i – момент небаланса, w_i – момент трения.

C. Модель привода

В объекте используются синхронные привода с постоянными магнитами.

Для точности моделирования с одной стороны и простоты проектирования модели с другой выбрана модель синхронного привода в системе координат d-q.

На рис. 1 представлена подсистема, моделирующая работу синхронного привода. Параметры, входящие в неё: *Gf_r* – проводимость статорной обмотки, *p_r* – число пар полюсов статора, *Ld_r*, *Lq_r* – индуктивности статорной обмотки по продольной и поперечной осям, *Temd_r*, *Temq_r* – электромагнитные постоянные времени по продольной и поперечной осям, *m_r* – число фаз обмотки статора, *ce_r*, *cm_r* – постоянные противо-ЭДС и момента, Mem – электромагнитный момент.

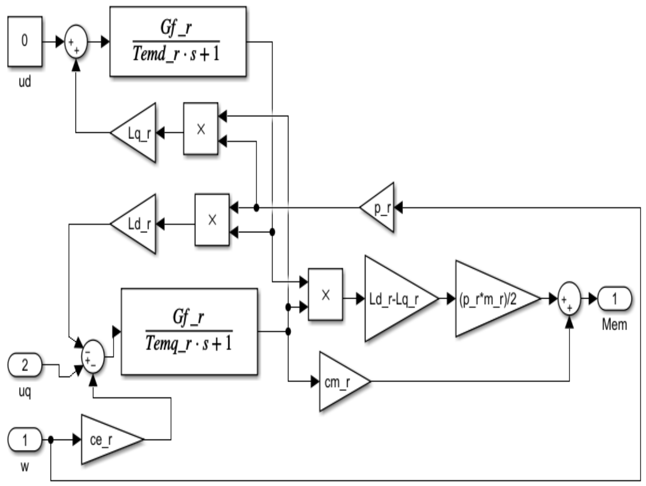

Рис. 1. Модель привода в осях d-q, построенная в среде Simulink

D. Постановка задачи

Ставится задача улучшения точности стабилизации в условиях действия возмущений за счет применения адаптивного подхода.

III. Выбор регулятора и моделирование

Для исходной разомкнутой системы, рассмотренной ранее, был использован простой регулятор по ошибке – ПИД регулятор.

Для примера была взята система со следующими параметрами:

ТАБЛИЦА I. Параметры модели

	q	ρ	h
Gf_r, См	0.5263	0.4	0.1724
p_r	64	64	77
Ld_r, Гн	0.0021	0.0022	0.0064
Lq_r, Гн	0.0025	0.0027	0.0077
Temd_r, сек	0.0011	0.0008	0.0011
Temq_r, сек	0.0013	0.0011	0.0013
m_r, кг	3	3	3
*ce_r, В*сек/рад*	0.08	0.07	0.03
*cm_r, Н*м/А*	7.76	4.54	2.59
*J, кг*м²*	0.6	0.9	0.2
$M_{\text{тр,max}}$*, Н*	0.15	0.15	0.15

Параметры ПИД регулятора были выбраны для всех осей одинаково: *Кп* = 200, *Кд* = 500, *Ки* = 100. Параметры качки по всем трём осям: амплитуда 10°, частота 1,26 Гц. Так как важна точность стабилизации, допустимым значением ошибки стабилизации считается одна угловая минута или 60 секунд.

При указанных параметрах ПИД регуляторов, ошибки по ρ и h остаются в допустимых пределах – ошибка по модулю по ρ не превосходит 58”, а по h – 30”. По q получены весьма плохие показали (рис. 2) – ошибка в успевает менее чем за 4 с достигнуть 1000”, а потом стабилизируется в пределах 200”.

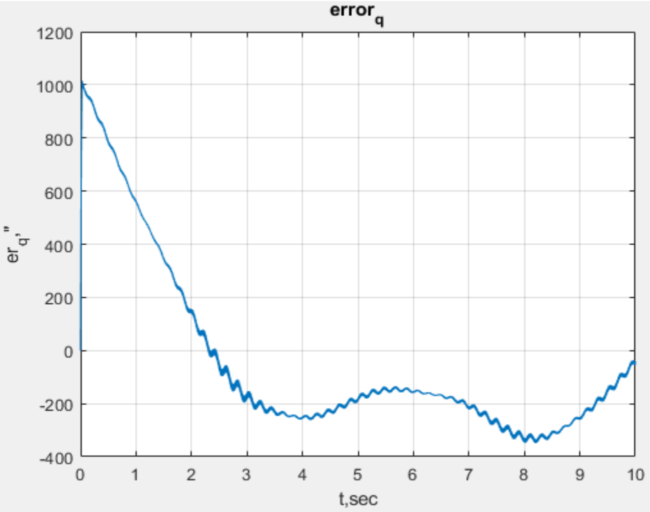

Рис. 2. Ошибка стабилизации по оси q при использовании классического ПИД-регулятора

Это недопустимые значения. При этом дальнейшее изменение коэффициентов ПИД регулятора не помогает, значения не сильно меняются, либо становятся ещё больше, а после определённых значений система перестаёт быть устойчивой.

Для улучшения точностных показателей системы было решено по оси q параллельно ПИД регулятору включить адаптивный регулятор с эталонной моделью и с сигнальным законом адаптации [6]. Измеряя скорость ошибки стабилизации, за счет использования интегральной составляющей в ПИД можно получить также саму ошибку. Это позволяет выбрать в качестве эталона фильтр второго порядка, настроенный на ослабление частотного диапазона качки. Фильтр описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\mu^2 \ddot{y} + 2d\mu\dot{y} + y = u\,, \qquad (9)$$

где u – входной сигнал фильтра, y – выходной сигнал фильтра, μ – малый параметр, отражающий инерционность фильтра, *d* – параметр демпфирования.

Требуемая динамика обеспечивается выбором параметров: *d* = 0.8, μ = 8.

В результате применения параллельного включения классического и адаптивного регуляторов получилось стабилизировать ошибку по q в районе минуты (рис. 3).

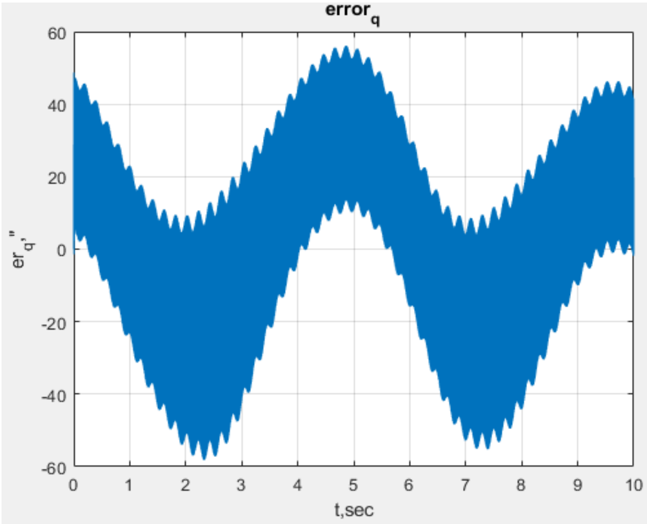

Рис. 3. Ошибка стабилизации по оси q при совместном использовании классического и адаптивного регуляторов

Можно сделать вывод об эффективности применения адаптивного подхода в задаче стабилизации подвеса в условиях действия возмущений и априорной неопределенности параметров.

IV. Заключение

В работе был описан порядок формирования модели трёхосного карданного подвеса для стабилизации приборов на палубе при качке, дополненный моделью привода и возмущений. Проведена проверка применимости к данной системе классического ПИД регулятора, а также исследована возможность совместного использования классического и адаптивного регулятора. Результаты работы показали, что выбранный подход действительно способен существенно улучшить динамику замкнутой системы на качке. В дальнейшем планируется усложнить модель объекта, учесть все возмущения, присутствующие в море, шумы датчиков, исследовать возможности адаптивных методов управления при ограничении на амплитуду и частоту сигнала управления.

Список литературы

[1] Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: Наука. 1978.

[2] Бесекерский В.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации / Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Л: Судостроение. 1968.

[3] Фабрикант Е.А., Журавлев Л.Д. Динамика следящего привода гироскопических стабилизаторов. М.: Машиностроение, 1984. 348 с.

[4] Borodin V.M., Spiridonov I.O., Faizutdinov R.N. Analysis of dynamics of a passive line-of-sight stabilization system with four-axis gimbal suspension // Russian Aeronautics. 2016. Т. 59. №. 4. С. 480-488.

[5] Гаврилов Р.С. Управление синхронными машинами с постоянными магнитами: учебное пособие / Р.С. Гаврилов, Ю.Н. Мустафакв. Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2019. 77 с.

[6] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами: Учеб. пособие. СПб: Наука, 2000. 549 с.