

На правах рукописи



**Кожеуров Максим Александрович**

**ВЫСОКОТОЧНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ  
СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ  
ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ С ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.11.16. – «Информационно-измерительные и управляющие системы» (в промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула, 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор

**Родионов Владимир Иванович**

**Официальные оппоненты:** **Солдаткин Владимир Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ", заведующий кафедрой приборов и информационно-измерительных систем;

**Чемоданов Владимир Борисович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт», доцент кафедры 301

**Ведущая организация:** ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»,

Защита диссертации состоится «18» апреля 2017 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.271.07 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте <http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-07/kozeurov-ma/>

Автореферат разослан «22» февраля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Данилкин Федор Алексеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы.* Информационно-измерительные системы стабилизации и наведения (ИИССиН) применяются в обзорно-прицельных комплексах на морских, воздушных и сухопутных подвижных объектах. Они служат для получения информации об угловых параметрах движения оптической линии визирования (ОЛВ) и представляют собой электромеханические системы автоматического управления (САУ), обеспечивающие стабилизацию качки основания и наведение ОЛВ. В качестве полезной нагрузки в ИИССиН используются оптические и тепловизионные камеры, лазеры, а также отдельные элементы этих приборов: зеркала, линзы, клинья. Для стабилизации ОЛВ на летательных аппаратах (ЛА) применяют электрические приводы (ЭП), осуществляющие движение рам карданова подвеса, несущего полезную нагрузку относительно корпуса ЛА, таким образом, чтобы угловое положение ОЛВ воспроизводило произвольно изменяющееся направление задающей линии визирования (ЗЛВ). Для измерения абсолютных угловых скоростей и углов ОЛВ в контурах обратных связей ИИССиН используются гироскопические датчики угловых скоростей (ДУС). Как информационно-измерительная система ИИССиН выполняет две функции: моделирует систему координат, связанную с ОЛВ, и измеряет пеленг ОЛВ относительно корпуса ЛА. От погрешности определения выходной информации в виде углов и угловых скоростей пеленга ОЛВ в значительной мере зависит точность всего обзорно-прицельного комплекса.

В настоящее время в России Уральский оптико-механический завод, ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева», ОАО «Пергам-Инжиниринг» (г. Москва), ФГУП НИИ прикладной механики им. Академика В.И. Кузнецова (г. Москва), ГУП НППАП (г. Москва), ОАО «НПО «Карат» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Холдинговая компания «Ак Барс» (г. Казань), МВТУ им. Н.Э. Баумана, в Белоруссии БелОМО – ММЗ им. С.И. Вавилова (г. Минск) и другие предприятия разрабатывают различные высокотехнологичные гиросtabilизированные приборы и системы. Эти предприятия создают ИИССиН ОЛВ, соответствующие современным техническим требованиям.

За рубежом разработкой и производством подобных систем занимаются Cineflex, FLIR Systems Inc., McDonnell Douglas, HMC Helicopters Services, Rockwell International Corp., United Space Alliance (США), TRT, SFIM (Франция), DST CONTROL AB (Швеция), GEC Avionics (Великобритания), Somag, Carl Zeiss, Rodenstock GmbH (Германия).

Предлагаемые промышленностью устройства обычно имеют двух или трехосные кардановы подвесы с ЭП, двигатели которых работают в режиме датчиков момента, причем по каждой оси карданова подвеса используют один ЭП, совмещающий функции стабилизации и наведения ОЛВ. ИИССиН с такими ЭП будем называть совмещенными.

Существующие публикации, посвященные совмещенным ИИССиН с двухосным кардановым подвесом, имеющие целью обеспечение высокой точности стабилизации и наведения ОЛВ, не достаточно полно отражают вопросы мате-

математического описания и исследования движения системы с учетом кинематики карданова подвеса и динамики гироскопов и ЭП. Режим наведения рассматривают без учета качки ЛА, а режим стабилизации - без учета электродинамических процессов, протекающих в ЭП. Однако, в режиме наведения переменные составляющие угловых скоростей и ускорений рам карданова подвеса, вызванные качкой ЛА, создают дополнительные возмущающие моменты, компенсацию которых должны обеспечивать ЭП. При этом, методик и формул для расчета погрешностей, имеющих целью повышение точности совмещенных систем при переменных возмущающих моментах с учетом электромагнитных процессов, протекающих в ЭП, на данный момент не существует, поэтому результаты аналитического анализа нуждаются в уточнении средствами моделирования и экспериментальными исследованиями, что усложняет процесс проектирования и увеличивает его длительность.

Таким образом, задача разработки высокоточных совмещенных ИИССиН в области создания математических моделей ИИССиН, учитывающих переменные углы поворота ОЛВ и электродинамические процессы, протекающие в ДУС и ЭП, и определения на их основе погрешностей стабилизации и наведения, а также способов повышения точности регулирования ЭП, является *актуальной* и в целом пока еще не решена.

**Объектом исследования** диссертационной работы является высокоточная совмещенная ИИССиН с двухосным кардановым подвесом, ДУС и ЭД постоянного и переменного тока, предназначенная для стабилизации и наведения ОЛВ и выдачи информации об углах и угловых скоростях поворота ОЛВ в систему управления ЛА.

**Предметом исследования** является разработка математических моделей высокоточной совмещенной ИИССиН с учетом динамики ДУС и электромагнитных процессов, протекающих в ЭП постоянного и переменного тока, и проведение на их основе анализа динамических погрешностей стабилизации и наведения ОЛВ при переменных углах поворота ЗЛВ, а также динамического синтеза, направленного на уменьшение этих погрешностей.

**Целью работы** является повышение точности определения углов поворота ОЛВ с помощью двухосной совмещенной ИИССиН за счет улучшения динамических процессов, протекающих в контурах регулирования ЭП, стабилизации и наведения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- получены уравнения кинематики, структурные схемы и аналитические зависимости, определяющие влияние качки ЛА и наведения ОЛВ на угловые скорости, ускорения и углы поворота ЗЛВ;
- разработаны математические модели движения совмещенной ИИССиН для угловой скорости, погрешности и пеленга ОЛВ, учитывающие уравнения кинематики ЗЛВ, динамики ДУС и электромагнитных процессов в ЭП.
- определены возмущающие моменты в осях двухосного карданова подвеса совмещенной ИИССиН, вызванные качкой ЛА и наведением ОЛВ для моделей по угловой скорости, погрешности и пеленгу ОЛВ;

- проведен анализ и получены выражения для погрешности стабилизации и наведения ОЛВ от действия возмущающих моментов с учетом динамики ДУС и ЭП постоянного и переменного тока;

- предложены методы динамического синтеза ИИССиН с подчиненным регулированием и косвенным измерением задающего воздействия, направленные на уменьшение погрешности стабилизации и наведения ОЛВ.

Решение указанных задач позволяет расширить области теоретических исследований и практического применения высокоточных ИИССиН ОЛВ.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использовались матричные методы, методы теории автоматического регулирования, методы преобразований Лапласа, методы решения дифференциальных уравнений, методы компьютерного моделирования.

Теоретические предпосылки к разработке подобных систем были созданы трудами отечественных ученых: Ишлинским А.Ю., Пельпором Д.С., Ривкиным С.С., Северовым Л.А., Фабрикантом Е.А., Неусыпиным А.К., Родионовым В.И. и др.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- предложен порядок поворотов системы координат, связанной с ЗЛВ, для различных вариантов расположения двухосного карданова подвеса на ЛА, который в отличие от других позволяет использовать кинематические уравнения ЗЛВ в качестве первого приближения при исследовании динамики совмещенных ИИССиН при переменных углах поворота рам кардановых подвесов;

- получены дифференциальные уравнения первого приближения, определяющие динамику высокоточной совмещенной ИИССиН, отличающиеся от известных учетом кинематики ЗЛВ, динамики ДУС и электромагнитных процессов, протекающих в ЭП постоянного и переменного тока;

- проведен анализ и впервые получены выражения для возмущающих моментов ИИССиН с учетом кинематики ЗЛВ по моделям для абсолютной угловой скорости, погрешности и углов поворота ОЛВ.

- проведен анализ и впервые получены выражения для погрешности совмещенных ИИССиН от действия возмущающих моментов с учетом кинематики ЗЛВ, динамики ДУС и электромагнитных процессов, протекающих в ЭП постоянного и переменного тока;

- впервые предложены методы подчиненного регулирования и косвенного измерения задающего воздействия для совмещенных ИИССиН с ДУС и ЭП постоянного и переменного тока, позволяющие повысить точность определения углов поворотов ОЛВ.

**Практическая ценность** результатов работы заключается в том, что разработанное математическое описание, структурные схемы, аналитические зависимости и методы повышения точности позволяют сократить время и затраты на проектирование высокоточных совмещенных ИИССиН с ЭП постоянного и переменного тока.

**Апробация работы.** Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: XXIV Международная научно-практическая Международная научно-практическая

конференция «Актуальные вопросы науки», г. Москва, 2015 г., XXIV Международная научно-практическая конференция «наука в современном мире», г. Москва, 2015 г.

***Положения, выносимые на защиту.***

1. Кинематические уравнения, структурные схемы и аналитические зависимости для углов поворота ЗЛВ двухосных высокоточных совмещенных ИИССиН, полученные с учетом предложенного порядка поворотов системы координат, связанной с ЗЛВ.

2. Математические модели движения двухосной совмещенной ИИССиН, учитывающие кинематику ЗЛВ, динамику ДУС и ЭП постоянного и переменного тока.

3. Выражения для определения возмущающих моментов, полученные с учетом кинематики ЗЛВ для математических моделей ИИССиН, определяющих угловую скорость, погрешность и пеленг ОЛВ.

4. Результаты исследования динамики двухосной совмещенной ИИССиН на подвижном ЛА с учетом кинематики ЗЛВ, динамики ДУС и ЭП постоянного и переменного тока.

5. Динамический синтез совмещенной ИИССиН, основанный на методе подчиненного регулирования и косвенного измерения задающего воздействия, направленный на уменьшение погрешности стабилизации и наведения ОЛВ.

***Реализация и внедрение результатов.*** Научные положения и результаты исследований диссертации реализованы в учебных дисциплинах «Общая и прикладная теория автоматического управления» и «Автоматизированный электропривод» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 24.03.02 и 13.04.02.

***Публикации.*** По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 6 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 2 публикации в материалах Всероссийских и Международных конференций.

***Достоверность*** теоретических положений и результатов исследования подтверждены математическим моделированием ИИССиН с использованием пакета MatLab (Simulink).

***Структура и объем работы.*** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и включает 133 страницы машинописного основного текста с 59 рисунками, список литературы из 103 наименований на 9 страницах и приложения на 8 страницах. Отдельные выводы и рекомендации даны в каждом разделе, основные теоретические и практические результаты – в заключении диссертации. В приложении помещены акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс, программы и схемы численного моделирования ИИССиН на компьютере.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** рассмотрена актуальность и практическая ценность работы, сформулирована цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна, результаты апробации, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен краткий обзор ИИССиН, применяемых в обзорно-прицельных комплексах, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью. Описываются методы стабилизации и наведения ОЛВ, а также разновидности гиростабилизаторов, применяемых в ИИССиН.

На рисунке 1 показана схема двухосной совмещенной ИИССиН оптического прибора (ОП), расположенного на платформе, управляемой ЭП постоянного и переменного тока по сигналам ДУС, которая соответствует первому варианту расположения карданова подвеса, рассмотренному в диссертации.

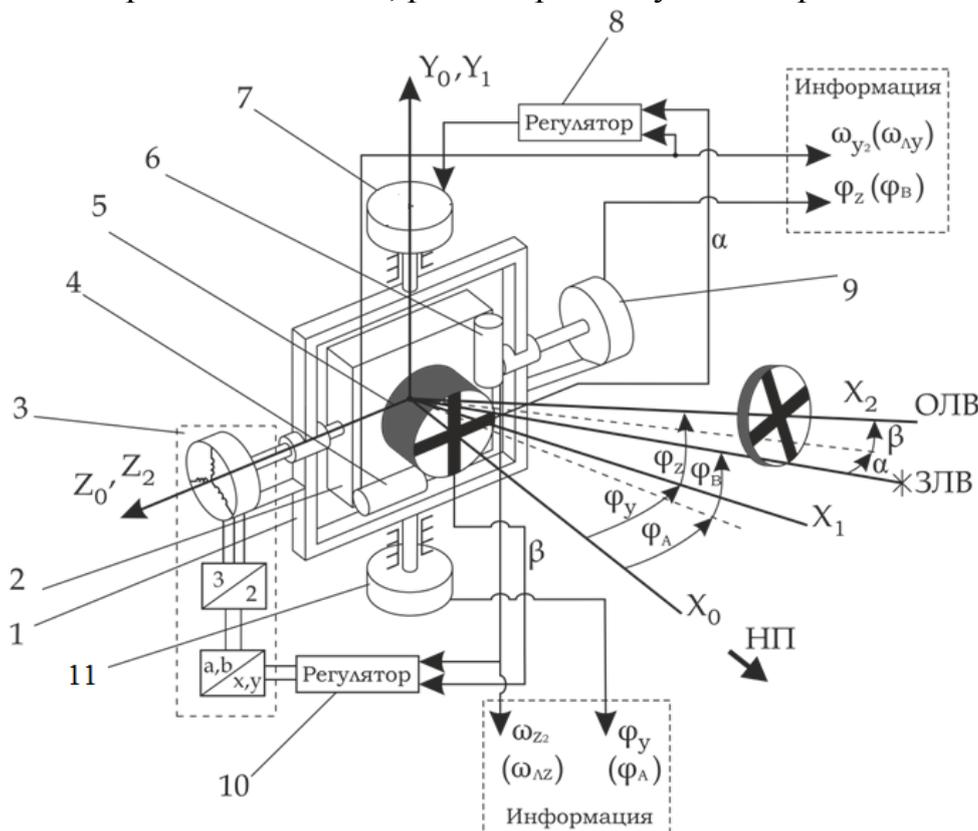


Рисунок 1 - Схема двухосной совмещенной ИИССиН ОЛВ:

- 1 – наружная рамка; 2 – внутренняя рамка (платформа); 3 – ЭД переменного тока; 4 – азимутальный гироскоп; 5 – оптический прибор; 6 – гироскоп угла места; 7 – ЭД постоянного тока; 8, 10 – регулятор; 9, 11 – датчик угла

Отмечается, что отличительные особенности математических моделей, совмещенных ИИССиН связаны с кинематикой и динамикой их карданова подвеса, а также с работой ДУС и ЭП, обеспечивающих стабилизацию и наведение ОЛВ. При составлении уравнений ИИССиН были использованы следующие системы координат (СК):  $OX_0Y_0Z_0$  – СК, связанная с корпусом ЛА;  $OX_1Y_1Z_1$  – СК, связанная с наружной рамкой карданова подвеса;  $OX_2Y_2Z_2$  – СК, связанная с ОП.

Кинематическое уравнение СК  $OX_2Y_2Z_2$  относительно СК  $OX_0Y_0Z_0$ , имеет следующий вид:

$$\frac{d\varphi_{\text{ОЛВ}}}{dt} = \mathbf{F}(\varphi_{\text{ОЛВ}}) \omega_{\text{ОЛВ}} + \mathbf{R}(\varphi_{\text{ОЛВ}}) \omega_0, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{ОЛВ}} = (\varphi_X \ \varphi_Y \ \varphi_Z)^T$  - вектор поворота СК  $OX_2Y_2Z_2$  относительно СК  $OX_0Y_0Z_0$ ;  $\omega_{\text{ОЛВ}} = (\omega_{X2} \ \omega_{Y2} \ \omega_{Z2})^T$  - вектор абсолютной угловой скорости СК  $OX_2Y_2Z_2$ ;  $\omega_0 = (\omega_{OX} \ \omega_{OY} \ \omega_{OZ})^T$  - вектор абсолютной угловой скорости СК  $OX_0Y_0Z_0$ ;  $\mathbf{F}(\varphi_{\text{ОЛВ}}), \mathbf{R}(\varphi_{\text{ОЛВ}})$  - матрицы поворота рам карданова подвеса.

Показано, что элементы матриц  $\mathbf{F}(\varphi_{\text{ОЛВ}}), \mathbf{R}(\varphi_{\text{ОЛВ}})$  представляют собой нелинейные тригонометрические функции проекций пеленга ОЛВ, которые зависят не только от кинематики, но и от динамики ИИССиН. Траектория ЗЛВ не зависит от динамики ИИССиН, поэтому используем ее в качестве первого приближения при упрощении уравнения (1). Для этого введем СК  $OX_{\text{Л}}Y_{\text{Л}}Z_{\text{Л}}$ , связанную с ЗЛВ, порядок поворотов которой совпадает с ОЛВ. Тогда кинематическое уравнение ЗЛВ, связывающее СК  $OX_{\text{Л}}Y_{\text{Л}}Z_{\text{Л}}$  и  $OX_0Y_0Z_0$ , имеет вид

$$\frac{d\varphi_{\text{ЗЛВ}}}{dt} = \mathbf{F}(\varphi_{\text{ЗЛВ}}) \omega_{\text{ЗЛВ}} + \mathbf{R}(\varphi_{\text{ЗЛВ}}) \omega_0, \quad (2)$$

где  $\varphi_{\text{ЗЛВ}} = (\varphi_C \ \varphi_A \ \varphi_B)^T$  - вектор поворота СК  $OX_{\text{Л}}Y_{\text{Л}}Z_{\text{Л}}$  относительно СК  $OX_0Y_0Z_0$ ;  $\omega_{\text{ЗЛВ}} = (\omega_{\text{ЛX}} \ \omega_{\text{ЛY}} \ \omega_{\text{ЛZ}})^T$  - вектор абсолютной угловой скорости СК  $OX_{\text{Л}}Y_{\text{Л}}Z_{\text{Л}}$ ;  $\mathbf{F}(\varphi_{\text{ЗЛВ}}), \mathbf{R}(\varphi_{\text{ЗЛВ}})$  - кинематические матрицы поворота ЗЛВ.

Для варианта 1 с вертикальной наружной осью карданова подвеса структурная схема, соответствующая уравнениям (2), приведена на рисунке 2.

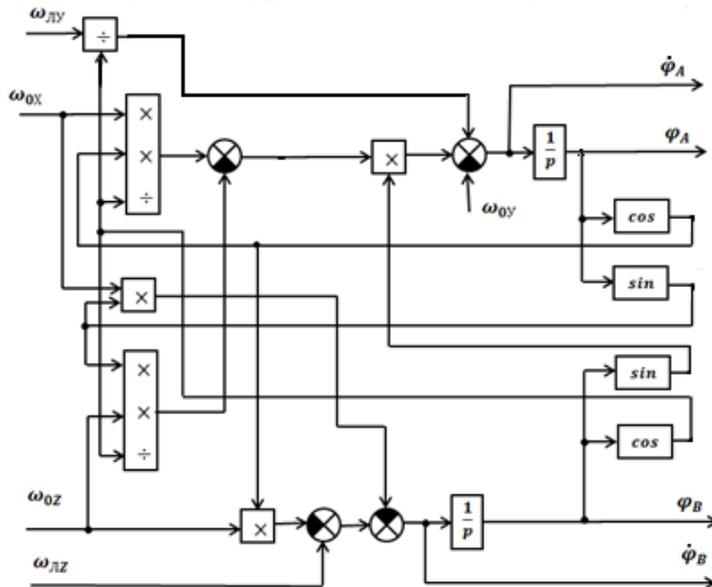


Рисунок 2 – Структурная схема кинематики ЗЛВ

Для этого варианта кинематические матрицы ЗЛВ имеют вид:

$$\mathbf{F}(\varphi_{\text{ЗЛВ}}) = \begin{bmatrix} 0 & \operatorname{tg}\varphi_B & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos\varphi_B} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}(\varphi_{\text{ЗЛВ}}) = \begin{bmatrix} \frac{\cos\varphi_A}{\cos\varphi_B} & 0 & -\frac{\sin\varphi_A}{\cos\varphi_B} \\ \cos\varphi_A \operatorname{tg}\varphi_B & -1 & -\sin\varphi_A \operatorname{tg}\varphi_B \\ -\sin\varphi_A & 0 & -\cos\varphi_B \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Решением уравнений (2) являются выражения для угловых скоростей, ускорений и углов пеленга ЗЛВ в режимах стабилизации и наведения. В работе получены кинематические матрицы ЗЛВ для четырех вариантов расположения двухосного карданова подвеса ИИССиН на ЛА.

**Во второй главе** разработаны математические модели динамики двухосных ИИССиН, состоящие из дифференциальных уравнений движения карданова подвеса, гироскопических ДУС и ЭП постоянного и переменного тока. Уравнения составлены относительно системы координат, связанной с ЛА, которая имеет абсолютную угловую скорость  $\omega_0$ . За основу взяты необобщенные уравнения Эйлера для тел вращения с симметрично расположенной относительно начала координат массой. В качестве выходных переменных выбраны абсолютные угловые скорости, углы пеленга и погрешности ОЛВ. Считая углы пеленга ЗЛВ  $\varphi_A, \varphi_B$  известными, запишем уравнения движения двухосной ИИССиН по азимутальному каналу наведения, в которых выходной переменной является угол пеленга ОЛВ. Для первого варианта расположения карданова подвеса на ЛА такие уравнения имеют вид:

$$(J_{Y1} + J_{Y2} \cos^2 \varphi_B + J_{X2} \sin^2 \varphi_B) \frac{d^2 \varphi_y}{dt^2} + b \frac{d\varphi_y}{dt} - H \frac{d\sigma}{dt} \cos\varphi_B - M = M_B + M_{\Pi};$$

$$J_{\sigma} \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + b_{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} + k_{\sigma} \sigma = -H(\omega_{\text{ЛГ}} + \frac{d\alpha}{dt} - \omega_{\xi}^a \sigma); \quad (4)$$

$$M = F_{\text{ЭП}}(u);$$

$$u = W_{\sigma} \sigma - W_{\alpha} \alpha;$$

$$\alpha = (\varphi_y - \varphi_A) \cos\varphi_B,$$

где  $J_{Y1}, J_{Y2}, J_{X2}$  – моменты инерции наружной рамки и платформы с ОП вокруг осей  $OY_1$  и  $OY_2, OX_2$ ;  $b$  – момент инерции и коэффициент вязкого трения по оси  $OY_1$ ;  $\alpha, \sigma$  – отклонение ОЛВ от ЗЛВ и угол прецессии гироскопа ДУС;  $H, J_{\sigma}, b_{\sigma}, k_{\sigma}$  – кинетический момент, момент инерции, коэффициенты вязкого трения и жесткость пружины ДУС;  $\omega_{\xi}^a$  – абсолютная угловая скорость вокруг ЗЛВ;  $M_B, M_{\Pi}$  – возмущающие моменты, зависящие от расположения карданова подвеса и выходной переменной уравнений движения;  $M, u$  – момент и напряжение управления ЭП;  $F_{\text{ЭП}}(u)$  – функция ЭД по моменту;  $W_{\sigma}, W_{\alpha}$  – передаточные функции контуров, ДУС и оптико-электронного датчика положения ОЛВ.

Особенностью совмещенных ИИССиН является то, что в каждом канале существует два контура регулирования: внутренний (контур ДУС) и внешний (контур наведения), которые работают на один общий ЭП.

Для ЭП с двигателем постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения, работающего в режиме датчика момента, уравнения, определяющие передаточную функцию  $F_{ЭП}(u)$ , представляется в виде:

$$\begin{aligned} L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + R_{я} i_{я} &= u_{я} - c_{E} \frac{d\varphi_{A}}{dt}; \\ u_{я} &= k_{к} [T_{к} (u - k_{i} i_{я}) + \int (u - k_{i} i_{я}) dt]; \\ M &= C_{M} i_{я}, \end{aligned} \quad (5)$$

$L_{я}, R_{я}$  – индуктивность и активное сопротивление якорной обмотки;  $i_{я}, u_{я}, c_{E}$  – ток, напряжение и коэффициент противо-ЭДС ДПТ;  $k_{i}$  – коэффициент обратной связи ЭП по току;  $T_{к}, k_{к}$  – постоянная времени и коэффициент усиления корректирующего звена.

Для ЭП с трехфазным асинхронным датчиком момента (АДМ) динамические уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} R(T_s \frac{di_{sx}}{dt} + i_{sx}) - \frac{k}{T_R} \Psi_{RX} - \omega L i_{sy} &= K_{\psi} (\Psi - \Psi_{RX}); \\ L \frac{di_{sy}}{dt} + R i_{sy} + \omega L i_{sx} + k z \frac{d\varphi_A}{dt} \Psi_{RX} &= u; \\ T_R \frac{d\Psi_{RX}}{dt} + \Psi_{RX} &= L_m i_{sx}; \\ \omega &= z \frac{d\varphi_A}{dt} + \frac{k R_R i_{sy}}{\Psi_{RX}}; \\ M &= 1,5zk\Psi_{RX} i_{sy}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Psi, \Psi_{RX}$  – заданное и текущее потокосцепление ротора АДМ;  $i_{sy}, i_{sx}$  – проекции тока статора во вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  системе координат;  $T_s = L/R$ ;  $T_R = L_R/R_R$  – электромагнитные постоянные времени статора и ротора;  $R = R_s + k^2 R_R$ ;  $L = L_s - k^2 L_R$ ;  $k = L_m/L_R$ ;  $R_R, L_R$  – активное сопротивление и индуктивность статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $z$  – число пар полюсов статора;

Динамические модели двухосной ИИССиН (4) – (6) учитывают переменные пеленги ЗЛВ, электромагнитные процессы в двигателях постоянного и переменного тока и механические процессы, протекающие в ДУС. Особенностью дифференциальных уравнений является то, что взаимное влияние каналов стабилизации и наведения, отражено в кинематических уравнениях (2). В динамических уравнениях в первом приближении оно появляется в виде дополнительных моментов, действующих по осям азимута и угла места ОЛВ, а во втором приближении – в гироскопах ДУС. Это позволяет проводить исследование движения ИИССиН в первом приближении по каждому каналу в отдельности.

В третьей главе получены структурные схемы и проведено исследование движения ИИССиН с учетом динамических процессов, протекающих в ДУС и ЭП постоянного и переменного тока. Получены выражения для возмущающих моментов  $M_B, M_{\Pi}$ , действующих по осям карданова подвеса. Для уравнений (4) выражения этих моменты имеют следующий вид:

$$M_B \approx -(J_{Y1} + J_{X2}) \left[ \frac{d\omega_{\xi}}{dt} \sin \varphi_B + (\omega_{ЛЗ} - \omega_{ОХ} \sin \varphi_A - \omega_{ОЗ} \cos \varphi_A) \omega_{ЛY} \operatorname{tg} \varphi_B / \cos \varphi_B \right];$$

$$M_{\Pi} = -(J_{Y1} + J_{Y2} \cos^2 \varphi_B + J_{X2} \sin^2 \varphi_B) \left( \frac{d\omega_{OY}}{dt} - \frac{d\omega_{\xi}}{dt} \sin \varphi_B \right), \quad (7)$$

где  $\omega_{\xi} = \omega_{ОХ} \frac{\cos \varphi_A}{\cos \varphi_B} - \omega_{ОЗ} \frac{\sin \varphi_A}{\cos \varphi_B}$  - переносная составляющая  $\omega_{\xi}^a$ .

В первом приближении обобщенная структурная схема азимутального канала ИИССиН с выходной координатой по углу пеленга ОЛВ, соответствующая уравнениям (4) - (7), приведена на рисунке 3.

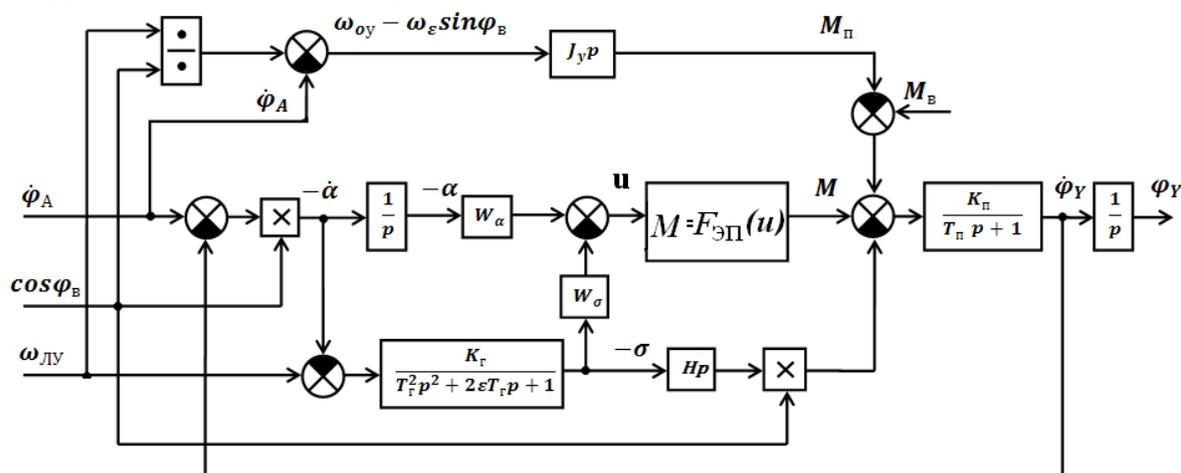


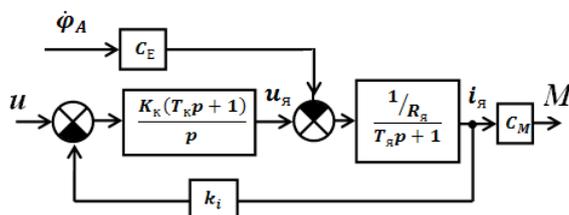
Рисунок 3 - Структурная схема азимутального канала ИИССиН

На структурной схеме  $p$  – оператор Лапласа;  $k_{\Gamma} = H/k_{\sigma}$ ;  $T_{\Gamma} = \sqrt{J_{\sigma}/k_{\sigma}}$ ;  $k_{\Pi} = 1/b$ ;  $J_Y = J_{Y1} + J_{Y2} \cos^2 \varphi_B + J_{X2} \sin^2 \varphi_B$ ;  $T_{\Pi} = J_Y / b$ ; - коэффициенты передачи и постоянные времени ДУС и платформы с кардановым подвесом.

В диссертации приведены уравнения и структурные схемы ИИССиН по каналам азимута и угла места с ЭП постоянного и переменного тока для выходных переменных  $\varphi_Z, \omega_{Y2}, \omega_{Z2}, \alpha, \beta$ .

На рисунке 4 приведены структурные схемы ЭП, построенных на ДПТ и трехфазных АДМ с векторным управлением.

а)



б)

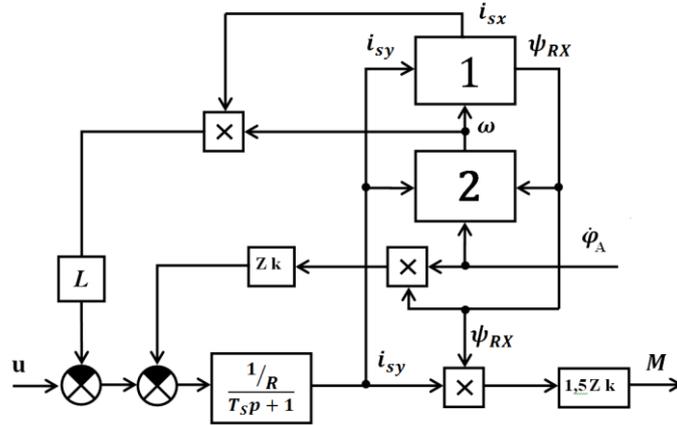


Рисунок 4 – Структурные схемы ЭП постоянного (а) и переменного (б) тока:  
1- блок формирования потокосцепления ротора, 2 - блок формирования угловой скорости поля статора

В переходном режиме анализ динамики ИИССиН в первом приближении проведем при постоянных углах пеленга  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ . Тогда в режиме стабилизации, при  $\omega_{\text{лв}} = 0$ ;  $W_\alpha = 0$ ;  $W_\sigma = k_\sigma + k_{\text{и}}/p$ ;  $k_{\text{и}} > \frac{k_\sigma^2 K_0 \cos \varphi_B}{4T_{\text{п}}}$ , упрощенная зависимость для погрешности  $\alpha$  имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{1}{k_{\text{и}} k_{\Gamma} k_{\text{ЭП}}} [1 - A_{\text{с}} e^{-\lambda_{\text{с}} t} \sin(v_{\text{с}} t + \varepsilon_{\text{с}})] M_{\text{в}}^*$$

где  $K_0 = k_{\text{ЭП}} k_{\text{п}}$ ;  $k_{\text{ЭП}} = \frac{1,5 z k \Psi_{\text{RX}} i_{\text{SY}}}{R}$ ;  $A_{\text{с}} = \frac{1}{v_{\text{с}} T_{\text{с}}}$ ;  $\lambda_{\text{с}} = \frac{\xi_{\text{с}}}{T_{\text{с}}}$ ;  $v_{\text{с}} = \frac{\sqrt{1 - \xi_{\text{с}}^2}}{T_{\text{с}}}$ ;

$$\varepsilon_{\text{с}} = \arctg(v_{\text{с}} / \lambda_{\text{с}}); \quad \xi_{\text{с}} = \frac{k_{\sigma}}{2} \sqrt{\frac{k_{\Gamma} K_0 \cos \varphi_B}{k_{\text{и}} T_{\text{п}}}}; \quad T_{\text{с}} = \sqrt{\frac{T_{\text{п}}}{k_{\text{и}} k_{\Gamma} K_0 \cos \varphi_B}}$$

В режиме наведения при  $W_\sigma = k_\sigma$ ,  $W_\alpha = k_\alpha$

$$\alpha = -\frac{k_\sigma k_{\Gamma}}{k_\alpha} [1 + A_{\text{н}} e^{-\lambda_{\text{н}} t} \sin(v_{\text{н}} t - \varepsilon_{\text{н}})] \omega_{\text{лв}}^*$$

где  $\lambda_{\text{н}} = \frac{k_\alpha \xi_{\text{н}} K_0 \cos \varphi_B}{T_{\text{п}}}$ ;  $v_{\text{н}} = \frac{k_\alpha K_0 \cos \varphi_B \sqrt{1 - \xi_{\text{н}}^2}}{T_{\text{п}}}$ ;

$$\xi_{\text{н}} = \frac{k_\sigma k_{\Gamma} \sqrt{K_0 \cos \varphi_B}}{2 \sqrt{k_\alpha T_{\text{п}}}}; \quad \varepsilon_{\text{н}} = \arctg \frac{k_\sigma k_{\Gamma} \lambda_{\text{н}}}{k_\alpha - k_\sigma k_{\Gamma} \lambda_{\text{н}}}$$

$$A_{\text{н}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{T_{\text{п}}}{k_\sigma k_{\Gamma} K_0 \cos \varphi_B}\right)^2 + \left(1 - 2\lambda_{\text{н}} \frac{T_{\text{п}}}{k_\sigma k_{\Gamma} K_0 \cos \varphi_B}\right) \frac{T_{\text{п}}}{\xi_{\text{н}}}}}{\sqrt{1 - \xi_{\text{н}}^2}}$$

На рисунке 5 приведены графики вынужденного движения ИИССиН по переменным  $M_B$ ,  $\varphi_Y$ ,  $\alpha$ , полученные моделированием уравнений (2) - (6) при качке ЛА с угловыми скоростями

$$\omega_{Ox} = 0,628 \cos 6,28t; \omega_{Oy} = \omega_{Oz} = 0,314 \cos 3,14 t$$

и движении ЗЛВ со скоростями наведения  $\omega_{ЛY} = \omega_{ЛZ} = 0,34 \sin 0,5t$ .

В процессе моделирования в среде MatLab были приняты следующие численные значения параметров ИИССиН:  $T_{\Gamma} = 0,00316c$ ,  $T_{ЭП} = 0,002c$ ,  $T_{\Pi} = 10c$ ,  $2\xi T_{\Gamma} = 0,0025c$ ,  $H = 0,0025 \text{ кгм}^2 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_{\Gamma} = 0,025c$ ,  $k_{\Pi} = 333 (\text{Нмс})^{-1}$ ,  $K_0 = 4,33 (\text{Вс})^{-1}$ ,  $k_{\sigma} = 5000 \text{ В/рад}$ ,  $k_{\alpha} = 50000 \text{ В/рад}$ .

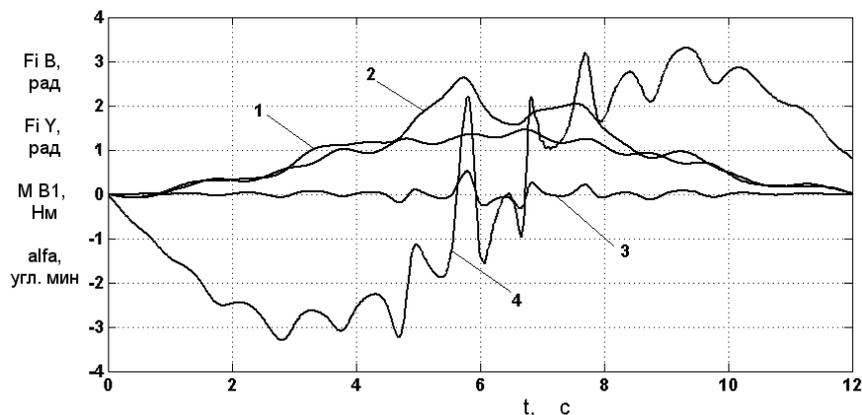


Рисунок 5 - Графики вынужденного движения ИИССиН по азимутальной оси: 1 –  $\varphi_B$ ; 2 –  $\varphi_Y$ ; 3 –  $M_B$ ; 4 –  $\alpha$

Из графиков видно, что погрешность  $\alpha$  представляет собой сумму гармонических составляющих, вызванных угловой скоростью ЗЛВ и проекциями качки ЛА. Причем погрешность от качки увеличивается с увеличением проекции пеленга ЗЛВ по углу места и достигает 1 угл. мин., в то время, как максимальная погрешность от наведения ОЛВ с угловой скоростью 0,34 рад/с достигает 3 угл. мин.

**В четвертой главе** проведен динамический синтез ИИССиН, направленный на повышение точности наведения ОЛВ на подвижном основании. Совмещенные ИИССиН допускают использование неселективной коррекции, которая обеспечивает требуемую погрешность от задающих воздействий  $\omega_{ЗЛВ}$ ,  $\varphi_{ЗЛВ}$  с одновременным уменьшением действия возмущающего момента  $M_B$ . При скоростях наведения, превышающих скорости качки, возникает необходимость в использовании селективной коррекции, работающей избирательно по задающему воздействию.

В диссертации рассмотрен неселективный метод подчиненного управления с пропорционально-интегральными регуляторами в контурах ДУС и наведения и селективный метод, использующий косвенное измерение задающего воздействия  $\omega_{ЗЛВ}$ . На рисунке 6 приведена структурная схема азимутального канала ИИССиН в режиме наведения с селективной коррекцией и звеньями  $W_1, W_2, W_3$ . Показано, что на низких частотах стабилизации и наведения передаточные функции измерительных звеньев  $W_1, W_2$  и корректирую-

шего звена  $W_3$  могут быть определены с использованием упрощенной передаточной функции ЭП. Тогда они имеют следующий вид:

$$W_1 = 1; \quad W_2 = p; \quad W_3 = k_\sigma k_\Gamma (T_3 p + 1); \quad T_3 = \frac{T_\Pi}{k_\sigma k_\Gamma K_0 \cos \varphi_B}.$$

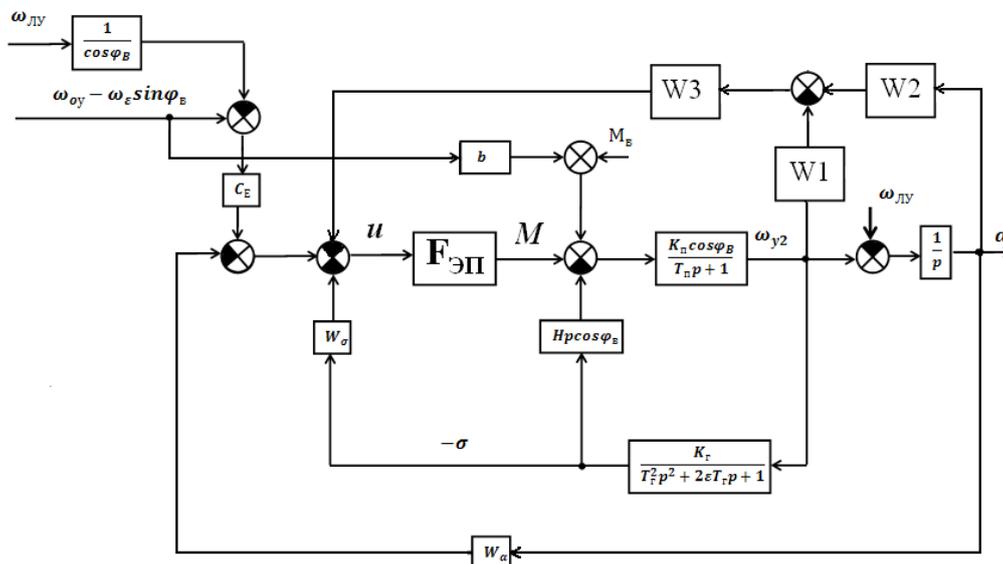


Рисунок 6 - Структурная схема азимутального канала ИИССиН с косвенным измерением задающего воздействия

В диссертации приведены результаты численных экспериментов имитационных моделей двухосной ИИССиН в среде Simulink MATLAB, которые учитывают момент сил сухого трения, равный 0,1 Нм, ограничения на токи и моменты электродвигателей до  $\pm 0,4$  Нм, а также нелинейности в ЭП и кардановом подвесе. На рисунке 7 показаны графики погрешности азимутального канала наведения ИИССиН, полученные для последовательной коррекции (кривая 1), подчиненного управления (кривая 2) и косвенного измерения задающего воздействия (кривая 3).

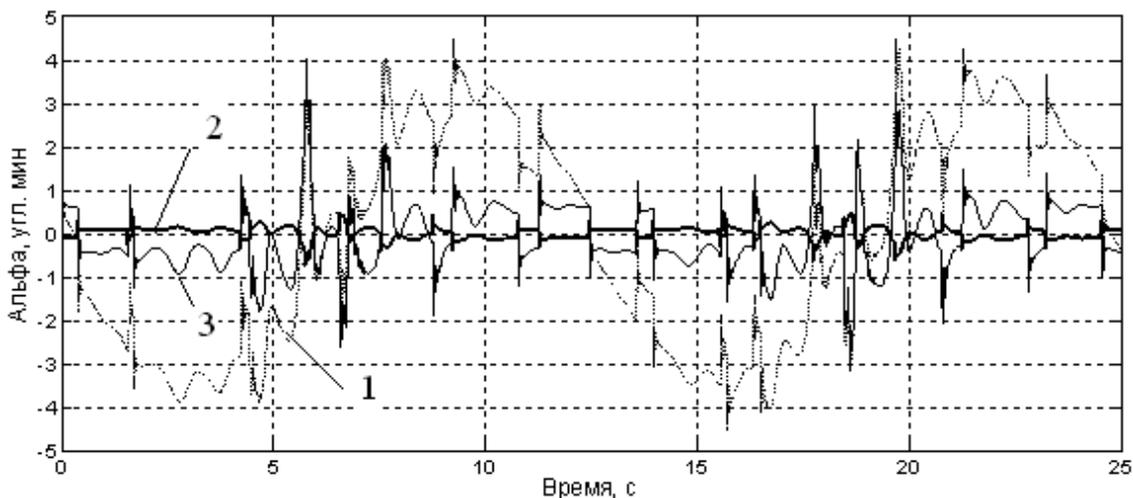


Рисунок 7 – Графики погрешностей азимутального канала наведения с учетом моментов сухого трения и других нелинейностей

Численные значения параметров ИИССиН соответствовали макетному образцу УСОВ-2, разработанному в Тульском государственном университете на кафедре «Приборы управления» для института Океанологии Академии наук РФ. Из графиков видно, что в установившемся режиме сухое трение увеличивает погрешность ИИССиН до 4 угл. мин. При подчиненном регулировании эта погрешность менее 0,5 угл. мин., а при косвенном измерении задающего воздействия не превышает 1 угл. мин. в диапазоне углов пеленга  $\varphi_B = \pm 60$  град.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

**В приложении** приведены имитационные модели ИИССиН и акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Основные результаты выполненных исследований можно сформулировать следующим образом:

1. Определены кинематические зависимости для угловых скоростей, ускорений и углов поворота ЗЛВ в режимах стабилизации и наведения при четырех вариантах расположения двухосного карданова подвеса ИИССиН на ЛА.

2. Разработаны динамические уравнения двухосной ИИССиН с переменными углами поворота ЗЛВ, позволяющие исследовать абсолютные угловые скорости, углы пеленга и погрешности стабилизации и наведения ОЛВ с учетом электромагнитных процессов, протекающих в ЭП постоянного и переменного тока.

3. Получены выражения для возмущающих моментов, действующих по осям двухосного карданова подвеса ИИССиН, для моделей с выходными переменными по абсолютной угловой скорости, погрешности и углам поворота ОЛВ.

4. Проведено исследование динамики двухосной совмещенной ИИССиН с учетом электромагнитных процессов, протекающих в электроприводах постоянного и переменного тока при переменном пеленге ЗЛВ.

5. Разработаны методы подчиненного регулирования и косвенного измерения задающего воздействия для совмещенных ИИССиН с ДУС и ЭП постоянного и переменного тока, позволяющие повысить точность наведения ОЛВ до 0,5 угл.мин.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. **Кожеуров М.А., Родионов В.И. Сравнительный анализ кинематики двухосных систем стабилизации и наведения // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5: в 2 ч. Ч.2.Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С.313-319.**

2. **Кожеуров М.А., Родионов В.И. Влияние динамики гироскопа и электропривода на погрешность стабилизации систем наведения // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5: в 2 ч. Ч.2.Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С.320-329.**
3. **Кожеуров М.А., Михед А.Д., Родионов В.И. К вопросу повышения точности информационно-измерительных систем стабилизации и наведения // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12: в 2 ч. Ч.1.Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 210-215.**
4. **Кожеуров М.А., Родионов В.И. Система стабилизации и наведения с подчиненным регулированием // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12: в 2 ч. Ч.1.Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 228-234.**
5. **Кожеуров М.А., Михед А.Д., Родионов В.И. Информационно-измерительная система стабилизации и наведения с последовательно-параллельной коррекцией // Наука в современном мире: материалы XXIV Международной научно-практической конференции (30 октября 2015). – М.: Издательство «Перо», 2015. С. 98-101.**
6. **Кожеуров М.А., Михед А.Д., Родионов В.И. Применение автоматического проектирования и синтеза для исследования информационно-измерительной системы наземного мобильного робота // Актуальные вопросы науки: Материалы XXII Международной научно-практической конференции (10.11.2015). – М.: Издательство «Спутник +», 2015. С. 28-31.**
7. **Кожеуров М.А., Родионов В.И. Информационно-измерительная система стабилизации и наведения с асинхронным трехфазным электродвигателем // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 7: в 2 ч. Ч.1.Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 123-129.**
8. **Кожеуров М.А., Родионов В.И. Исследование влияния электроприводов на динамику системы стабилизации и наведения// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10.Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 126-131.**