

УДК 629.3.025.2

Маляров С.П., Сущенко О.А., Сайфетдинов Р.А., Цирук В.Г., Янкелевич Г.Е.

**РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЦИФРОВОГО СТАБИЛИЗАТОРА  
ДЛЯ НАЗЕМНОГО ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА**

**Постановка задачи.** В последнее время становится актуальным создание высокоточных стабилизаторов, предназначенных для эксплуатации на наземных подвижных объектах. Решение этой проблемы требует создания сложной технической системы «платформа – силовая установка» с использованием цифрового регулятора. При этом необходимо использовать новые подходы к проектированию и испытанию систем исследуемого класса, предназначенных для эксплуатации в сложных условиях. Особое значение имеет проверка точностных параметров, прежде всего динамической погрешности, и создание соответствующих методик испытаний для автономных проверок, что является актуальным для разработчиков стабилизаторов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Общие принципы организации проверок и оценивания точностных параметров систем управления широкого класса приведены в работе [1]. Анализ погрешностей гироскопической системы стабилизации, к которым можно отнести и стабилизатор рассматриваемого класса приводится в работе [2]. Математическое описание стабилизатора представлено в работе [3].

**Особенности разработки стабилизатора.** Разработка и проектирование стабилизатора представляет собой многошаговый процесс, который включает четкое определение требований и условий эксплуатации, выбор схемно-технических и программных решений, автономное тестирование, изготовление и испытания [4].

Сложные технические системы «платформа – силовая установка» могут быть построены с использованием множества типов электромеханических устройств и регуляторов и ориентированы на стабилизацию полезной нагрузки разного типа. Но в целом процесс их создания должен включать следующие этапы: анализ требований к системе, включая динамику внешней среды, выполняемые функции, требуемые характеристики, конструктивные ограничения; определение структуры системы; проектирование; тестирование программного обеспечения; автономные и натурные испытания. На этапе проектирования выполняется структурный анализ, определение схемы подвеса, выбор отдельных блоков, синтез и анализ контуров управления, анализ динамических характеристик.

Прежде всего, осуществляется анализ требований к системе. Формализованное определение требований к системе является наиболее критичным и сложным шагом в общем процессе ее создания. Требования к системе определяются анализом ее функций, алгоритмом работы и типом полезной нагрузки. К основным функциям системы исследуемого типа относится отслеживание изображения объекта наблюдения и его стабилизация с учетом того, что аппаратура наблюдения устанавливается на подвижном основании.

Анализ функций системы позволяет определить предъявляемые к ней технические требования, в том числе к динамическим и эксплуатационным характеристикам. К конструктивным ограничениям относятся допустимые габаритные размеры, масса, энергопотребление и стоимость. Эксплуатационные требования определяют точность и особенности управления. Требования к динамическим характеристикам определяют полосу пропускания и характер переходных процессов.

На этапе выбора структуры системы, как правило, рассматривается несколько альтернативных вариантов. При этом определяются типы исполнительных механизмов, гироскопических датчиков, датчиков углов и других составляющих системы «платформа – силовая установка».

После предварительного определения структуры осуществляется выбор схемно-технических и программных решений системы, выполняется структурный анализ и прогнозирование основных точностных характеристик, а также массы, габаритов и стоимости системы. Далее осуществляется окончательный выбор составляющих системы и предлагаются методы обеспечения ее устойчивости и динамических характеристик. Определяется также состав электронных устройств и интерфейсов с другими системами.

Даже после завершения проектирования все технические решения считаются предварительными и требуют подтверждения их правильности. Основным инструментом проверки правильности схемно-технических и программных решений является имитационное моделирование. Математические модели системы «платформа – силовая установка» основываются на соотношениях между моментами и угловыми ускорениями. Математическое описание системы учитывает модели исполнительных механизмов, гироскопических устройств, регулятора и их структурные связи [3]. При этом необходимо учитывать возму-

щения, действующие на систему, к которым относятся момент неуравновешенности, движение наземного объекта, на котором устанавливается стабилизатор, возмущения, вызванные люфтом привода и т.д.

На последнем этапе создания системы проводят автономные и натурные испытания.

Такой порядок проектирования актуален для систем «платформа – силовая установка» разного типа, но каждый конкретный случай характеризуется своими уникальными особенностями.

Основные особенности стабилизатора рассматриваемого типа определяются их использованием на наземных объектах, которые могут эксплуатироваться в трудных в смысле передвижения условиях, например, в условиях бездорожья. Полезной нагрузкой стабилизатора является аппаратура наблюдения, к которой предъявляются высокие точностные требования.

Очевидно, что эти особенности могут быть эффективно учтены лишь при условии решения двух важных задач:

- 1) стабилизации аппаратуры наблюдения на подвижном основании в горизонтальной и вертикальной плоскости;
- 2) отслеживания местоположения объекта наблюдения в горизонтальной и вертикальной плоскости.

Решение этих задач возможно посредством использования высокоточных стабилизаторов с цифровым регулятором.

Стабилизаторы с цифровым блоком управления и индикации характеризуются высокими техническими характеристиками, в том числе повышенными скоростями наведения, высокими показателями точности и жесткости стабилизации, увеличением плавности процессов наведения на минимальных скоростях. При этом достигается улучшение эргономических и эксплуатационных показателей, таких как удобство настройки и проверки регулировочных параметров, информативность блока индикации и возможности диагностики работоспособности блоков стабилизатора.

Стабилизатор рассматриваемого типа включает горизонтальный и вертикальный каналы, структурные схемы которых представлены на рис. 1, 2.

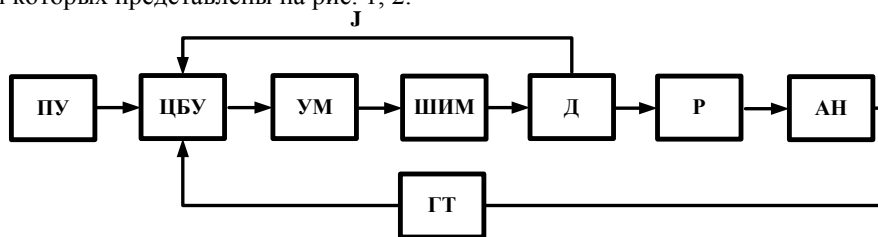


Рисунок 1 – Структурная схема горизонтального канала стабилизатора:  
 ПУ – пульт управления, ЦБУ цифровой блок управления, УМ – усилитель мощности, ШИМ – широтно-импульсный модулятор, Д – двигатель, Р – редуктор, АН – аппаратура наблюдения, ГТ – гиротахометр,  
 $J$  – ток обмотки двигателя

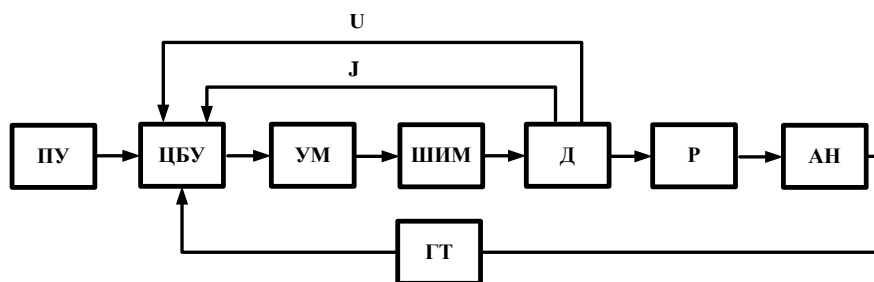


Рисунок 2 – Структурная схема вертикального канала стабилизатора:  
 $U$  – напряжение обмотки двигателя

В состав цифрового стабилизатора входят цифровой блок управления, гиротахометры горизонтального и вертикального каналов, широтно-импульсный модулятор, электродвигатели постоянного тока, редуктор, пульт управления оператора с блоком индикации.

Выбор двигателя постоянного тока обусловлен его высокими регулировочными, динамическими и энергетическими характеристиками. Главное преимущество двигателя постоянного тока заключается в возможности его использования в качестве малоинерционного регулятора момента [2]. Использование редуктора обусловлено необходимостью стабилизации значительных масс. В качестве измерителя угловой скорости стабилизируемой массы в инерциальном пространстве используется гиротахометр на осно-

ве электромеханического гироскопа ввиду необходимости обеспечения высокой точности процессов стабилизации и наведения.

При выборе элементной базы цифрового блока управления во главу угла ставилось достижение компромисса между необходимой точностью и стоимостью. Также принималась во внимание степень сложности проектирования необходимых сопрягающих устройств, которая, как известно, повышается с увеличением тактовой частоты выбранных вычислительных средств. Анализ приведенных требований позволил остановиться на микроконтроллере i8051. При этом программное обеспечение цифрового блока было создано на диалекте языка С для микроконтроллеров семейства i8051. Разработка и отладка программного обеспечения проводилась в среде программирования Keil u Vision V.8.09.

Цифровой блок управления горизонтальным каналом наведения и стабилизации реализует четыре основных сигнала управления, которые поступают на сумматор. Первый сигнал формируется на основании сигнала гироскопа и пульта управления, которые суммируются, а потом поступают на интегратор, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный углу рассогласования. Второй и третий сигналы формируются на основе суммарного сигнала гироскопа и сигнала обратной связи по току обмотки двигателя с использованием фильтров высоких частот и полосового фильтра. Четвертый сигнал определяется сигналом обратной связи по току обмотки двигателя, в его формировании участвуют фильтры высоких и низких частот. Цифровой блок управления вертикальным каналом наведения и стабилизации реализует аналогичные сигналы управления, которые поступают на сумматор. Первый сигнал формируется на основании суммарного сигнала гироскопа и пульта управления, который в дальнейшем подвергается интегрированию и прохождению через фильтры. Второй сигнал формируется на основе сигнала гироскопа и сигналов обратной связи по току и напряжению обмотки двигателя. Третий сигнал формируется на основе только сигнала обратной связи по току обмотки двигателя. Последний четвертый сигнал включает в себя сигналы обратной связи по току и напряжению обмотки двигателя.

Такой подход к формированию закона управления обеспечивает наведение и стабилизацию, а также демпфирование и инвариантность к моментам возмущения.

По линии формирования каждого сигнала установлены пороговые устройства, ограничивающие их уровень. С целью повышения качества процессов управления в процессе эксплуатации предусмотрено использование настроечных коэффициентов.

Процесс разработки стабилизатора сопровождался испытаниями, среди которых можно выделить три этапа:

- 1) математическое моделирование на компьютерах;
- 2) испытания на стенде-имитаторе объекта;
- 3) испытания на динамическом стенде;
- 4) испытания в составе наземного объекта.

Математическое моделирование было выполнено в системе MATLAB. Главное преимущество этой вычислительной системы заключается в наличии расширенных пакетов, специально созданных для проведения расчетно-моделирующих работ при проектировании современных систем управления. В процессе разработки стабилизатора широко использовался расширенный пакет Simulink, позволяющий учитывать в модели нелинейности, присущие реальным системам.

Следует отметить, что современные научные требования одной из самых авторитетных ассоциаций инженеров IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, США) к решению технической проблемы включают моделирование с использованием системы MATLAB.

Испытания при помощи стенда-имитатора позволяют разработчику стабилизатора осуществлять необходимые проверки и отработки схемно-технических решений в процессе проектирования.

Испытания при помощи динамического стенда позволяют разработчику в условиях предприятия-изготовителя оценить работоспособность стабилизатора в условиях, приближенных к условиям его эксплуатации.

И, наконец, испытания после установки на объект эксплуатации, позволяют выполнить окончательную оценку эксплуатационных характеристик стабилизатора.

В процессе испытаний осуществлялась настройка приводов вертикального и горизонтального каналов стабилизатора, а также проверялись и оценивались следующие параметры: динамическая погрешность стабилизации; жесткость стабилизации системы; характеристики переходного процесса, в том числе быстрдействие и перерегулирование; запас устойчивости; влияние остаточного момента неуравновешенности на параметры стабилизатора; максимальная и минимальная скорости наведения; неплавность скорости наведения.

На первом этапе испытаний выполнялось имитационное моделирование с использованием математической модели стабилизатора, составленной на основе расширенного пакета Simulink [3]. При этом моделировались как основные режимы функционирования реальной системы, так и ее основные провер-

ки, в том числе динамической погрешности, жесткости стабилизации и показателей переходного процесса, как это показано на рис. 3.

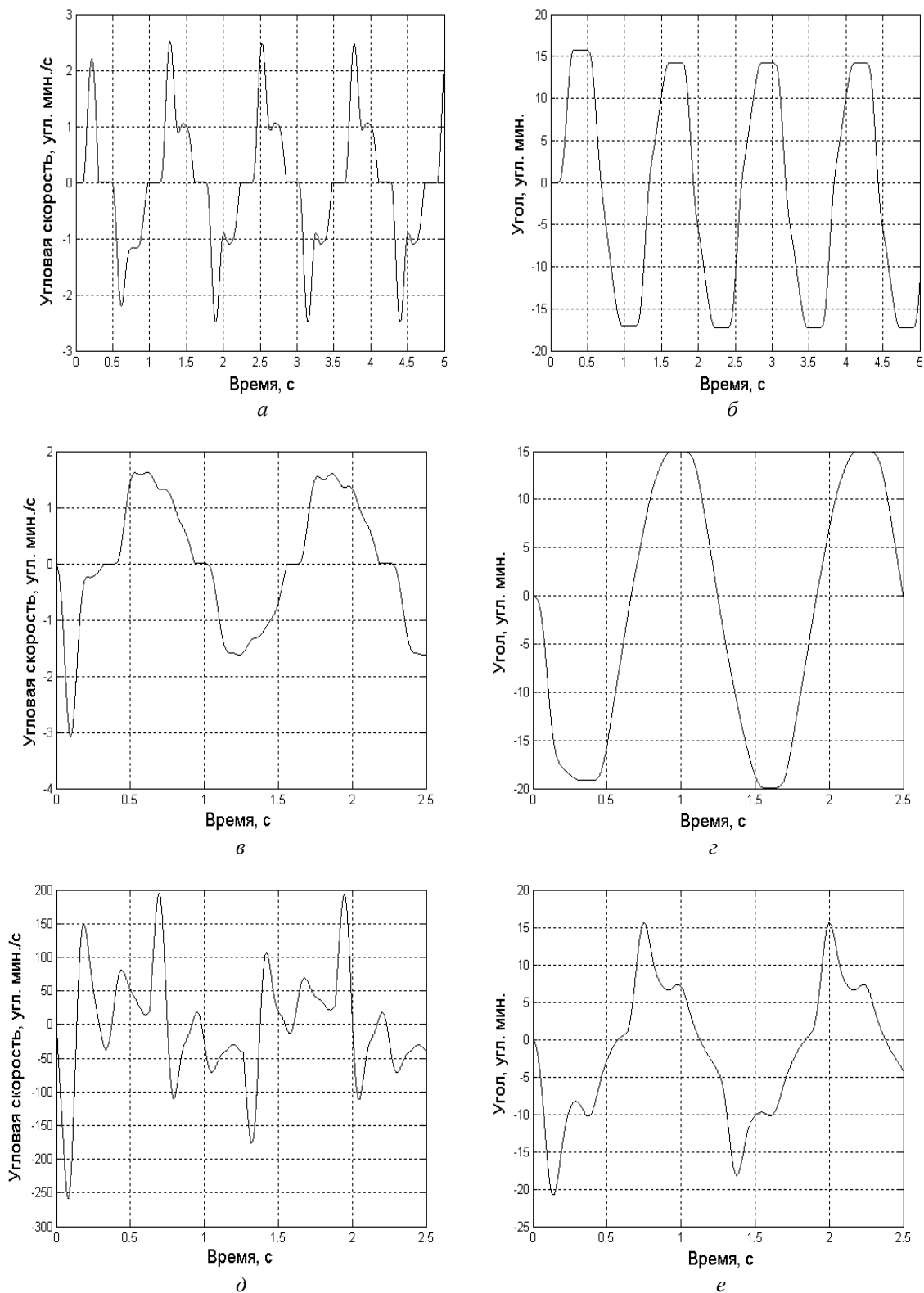


Рисунок 3 – Угловые скорости и погрешности углового положения стабилизатора при условии разных способов задания контрольных сигналов:

$a, b$  – на виході інтегратора;  $v, z$  – на вході демодулятора в цепі інтегрування;  
 $d, e$  – на вході гіротахметра

При розробці методики перевірки була промоделирована можливість задання контрольного сигналу на вході гіротахметра і на виході інтегратора. Результати досліджень підтвердили можливість використання тестових цифрових сигналів, що упростило процес автономного тестування стабілізатора. Это позволило оценивать динамическую погрешность стабилизатора за счет задания гармонического сигнала программными средствами.

Следует отметить, что использование гармонического сигнала обеспечивает имитацию движения наземного объекта, на котором эксплуатируется стабилизатор, в разных направлениях с разными скоростями.

Таким образом, методика проверки динамической погрешности стабилизатора программными средствами должна включать такие шаги [5].

1. Тарировку амплитуды гармонического воздействия с целью обеспечения отклонения объекта стабилизации на некоторые заданные углы. Как уже отмечалось, стабилизатор состоит из двух независимых каналов, которые обеспечивают стабилизацию в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Проверки разных каналов, отличаются некоторыми несущественными особенностями, например, в части величины амплитуды моделируемого сигнала.

2. Формирование синусоидального сигнала и его подачу в цепь определения погрешности углового положения стабилизируемого объекта на протяжении некоторого заданного времени.

3. Суммирование тестового гармонического сигнала с сигналом основной цепи канала управления.

4. Определение амплитуды углового положения объекта стабилизации и оценивание разности между определенной амплитудой и ее заданным значением. Эта оценка и представляет собой оценку динамической погрешности.

Предложенный подход может быть использован для оценивания запаса устойчивости при следующей последовательности действий.

1. Определение в процессе тарировки в статическом режиме амплитуды сигнала, которая обеспечивает отклонение стабилизируемого объекта на некоторый заданный угол.

2. Задание сигнала с определенным уровнем в контрольную точку после интегратора на протяжении некоторого заданного промежутка времени.

Процесс определения перерегулирования представлен на рис. 4.

Для стабилизаторов исследуемого класса наибольшее значение имеют проверки в условиях контрольной трассы. Наличие указанных испытательных средств позволяет существенно сократить сроки разработки стабилизатора и внедрения его в эксплуатацию.

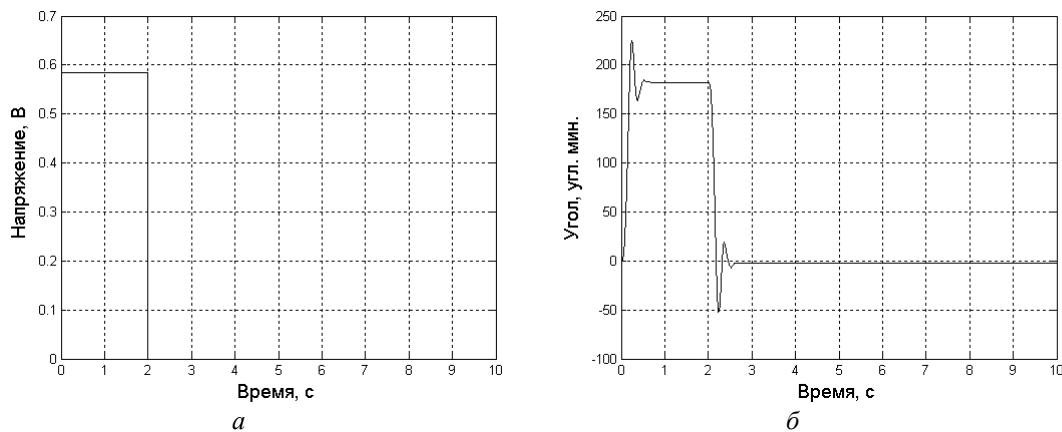


Рисунок 4 – Методика проверки перерегулирования:

$a$  – задание тестового сигнала;  $b$  – процесс изменения углового положения стабилизируемого объекта

На втором этапе испытания проводились на стенде-имитаторе объекта, что позволило оценить правильность принятых схемно-технических решений и программно-алгоритмического обеспечения в целом.

Испытания на третьем этапе проводились на динамическом стенде, что позволило проверить работоспособность стабилизатора в режимах, которые нельзя реализовать на стенде-имитаторе, оценить динамические характеристики стабилизатора, а также подтвердить результаты расчетно-моделирующих работ. Схема испытаний стабилизатора на динамическом стенде представлена на рис. 5.

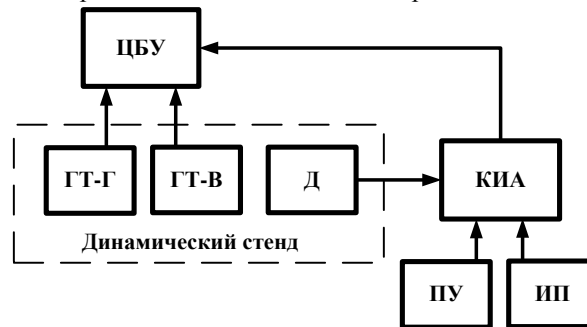


Рисунок 5 – Схема испытаний стабилизатора на динамическом стенде:

КИА – контрольно-измерительная аппаратура, ИП – источник питания; ГТ-Г – гиротахометр горизонтальный; ГТ-В – гиротахометр вертикальный

Испытания, проводимые с помощью динамического стенда, позволяют оценить:

- 1) характеристики функционирования стабилизатора в процессах наведения и стабилизации;
- 2) максимальные и минимальные скорости наведения во всех режимах работы;
- 3) нестабильность компенсации нулевых сигналов датчиков кинематических параметров при малых уровнях сигналов.

При этом были выполнены проверки

- 1) влияния на работу стабилизатора изменений моментов инерции аппаратуры наблюдения;
- 2) возможностей автоматической диагностики исправного состояния блоков стабилизатора с имитацией их отказов.

Следует отметить, что по итогам всех видов испытаний проводились корректировки программно-алгоритмического обеспечения стабилизатора, направленные на улучшение его точностных и динамических характеристик.

Четвертый этап испытаний цифрового стабилизатора проводится в составе оборудования наземного объекта с целью окончательного подтверждения правильности выбранных схемно-технических и программно-алгоритмических решений.

Необходимые испытания могут быть классифицированы как стыковочные, типовые и межведомственные.

Для оценки эффективности работы цифрового стабилизатора в сопряжении с реальной аппаратурой необходимо проводить стыковочные испытания стабилизатора в составе наземного объекта. По результатам испытаний устраняются замечания по согласованию электрических связей стабилизатора и вырабатываются соответствующие рекомендации.

Проведение типовых испытаний обусловлено необходимостью проверки изменений, вносимых в схемно-технические решения и программно-алгоритмическое обеспечение стабилизатора в процессе его разработки. Для подтверждения правильности выбора направления модернизации и эффективности изменений, вносимых в конструкторскую документацию стабилизатора, типовые испытания следует проводить в полном объеме.

В части направлений дальнейшей модернизации стабилизатора, прежде всего, следует рассмотреть возможность замены гироскопических приборов и датчиков углов.

В современных стабилизаторах могут использоваться разные типы гироскопических приборов. В наиболее ответственных случаях до сих пор используют электромеханические гироскопические приборы ввиду их низких шумов и высоких динамических характеристик. Но для платформенной стабилизации уже начинают использовать волоконно-оптические гироскопы, поскольку они имеют более высокие динамические характеристики и больший ресурс работы в сравнении с электромеханическими гироскопами. Кольцевые лазерные гироскопы, которые нашли широкое применение в инерциальной навигации благодаря малым уходом и стабильности масштабного коэффициента, в инерциальной платформенной стабилизации используются редко вследствие их больших размеров и высоких шумов квантования. Для применений средней и низкой точности, где на первый план выходят малые габариты и низкая стоимость, могут использоваться гироскопические измерители, построенные на основе MEMS-технологии. В

последнее время стали появляться датчики этого типа, способные обеспечить высокие точностные требования, предъявляемые к стабилизаторам исследуемого класса.

В стабилизаторах исследуемого типа используются датчики угла, установленные в осях подвеса платформы. К наиболее важным характеристикам датчиков углов относят точность и разрешающую способность, которым должно отдаваться преимущество в сравнении с компромиссными требованиями к габаритам и массе.

Для измерения углов, больших нескольких градусов, традиционно используют индукционные датчики, например, многообмоточные СКВТ и индуктосины, поскольку они более надежны и при условии правильного использования могут достигать высокой точности, так как многообмоточные датчики имеют тенденцию к осреднению последствий влияния эксцентриситета. Эти датчики имеют высокую разрешающую способность, которая ограничивается аналого-цифровым преобразованием и уровнем электрических сигналов.

В последнее время становятся распространенными инкрементные энкодеры (кодовые датчики положения), которые обеспечивают разрешающую способность до доли  $\mu$  рад. По габаритам эти устройства значительно меньше индукционных датчиков. Энкодеры характеризуются несколько более высокими динамическими характеристиками в сравнении с индукционными датчиками.

В качестве основных направлений дальнейшей модернизации стабилизатора следует выделить:

1. Поиск возможностей уменьшения габаритов и массы блоков стабилизатора.
2. Введение технологического режима измерения динамической ошибки при имитации движения подвижного объекта по пересеченной местности.
3. Поиск перспективных датчиков угловой скорости и датчиков угла с требуемыми характеристиками.

**Выводы.** Предложенные подходы к разработке и корректировке схемно-технических решений в процессе проведения испытаний цифрового стабилизатора позволяют обеспечить его высокие точностные характеристики и подтверждают эффективность его применения для эксплуатации на наземных подвижных объектах.

### Литература

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
2. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
3. Сущенко О.А., Сайфетдінов Р.А. Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта / Електроніка та системи управління. – К.2007. – №3(13). – С. 146–151.
4. Masten M. K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems/ IEEE Control Systems Magazine. – #1. – Vol. 28. – 2008. – P. 148–156.
5. Сущенко О.А., Янкелевич Г.Є., Маляров С.П., Сайфетдінов Р.А. Особливості автономного тестування стабілізатора наземного рухомого об'єкта. – Електроніка та системи керування. – 2009. – № 3. – С. 73–79.

УДК 629.3.025.2

Маляров С.П., Сущенко О.А., Сайфетдінов Р.А., Цірук В.Г., Янкелевич Г.Є.

### РОЗРОБКА ТА ВИПРОБУВАННЯ ЦИФРОВОГО СТАБІЛІЗАТОРА ДЛЯ НАЗЕМНОГО РУХОМОГО ОБ'ЄКТА

Розглянуто основні етапи розробки та випробувань цифрового стабілізатора для наземного рухомого об'єкта. Представлено результати імітаційного моделювання режимів функціонування стабілізатора та його перевірок. Запропоновано алгоритм перевірки динамічної похибки стабілізатора програмними засобами. Визначено основні напрями вдосконалення цифрового стабілізатора.

Malyarov S.P., Sushchenko O.A., Sayfetdinov P.A., Tziruk V.G., Yankelevich G.E.

### DESIGN AND TESTS OF STABILIZER FOR THE GROUND VEHICLE

The basic design and test phases of the digital stabilizer for the ground vehicle are considered. The results of the stabilizer operation modes and checks simulation are represented. The algorithm of the stabilized dynamic error check by the software tools is suggested. The basic trends of the stabilizer development are defined.