

УДК 621.313.3

Разработки и исследования гироскопических гистерезисных электроприводов

Б. А. Делекторский, В. Б. Никаноров,
С. Ю. Останин*, П. С. Рудник, В. А. Телегин

Объектом исследования являются системы электропитания и электропривода динамически настраиваемых гироскопов с поплавковым подвесом ротора и электромеханических гироскопов с механическим носителем кинетического момента и электрическим приводом. Данные приборы используются на самолетах, ракетах, космических летательных аппаратах, подводных и надводных судах, самоходных наземных установках в составе гироскопических приборов и систем ориентации, стабилизации, навигации и управления движением как самих объектов, так и отдельных элементов в их составе. Рассмотрены вопросы развития научных концепций, научно-технических решений и разработок в области электрооборудования электромеханических гироскопов, приборов и систем на их основе. К особенностям исследований относятся научные проблемы совмещения электропривода и прецизионных механизмов гироскопических приборов; конструкторско-технологические проблемы уменьшения гистерезиса характеристик гироскопического гистерезисного электропривода за счет комплекса конструктивных решений. Проведены учет, снижение и устранение влияния постоянных составляющих течений, выявленных при повышении точности giroприборов. Созданы методы и средства стабилизации характеристик гироскопического гистерезисного электропривода. Получено решение проблемы погрешностей гироскопов от дестабилизирующих факторов электропитания и нагрузки. Обеспечено снижение ошибок, определяемых произвольным положением гистерезисного гироскопа при синхронизации и устранение погрешности, связанной с нестабильностью средней частоты вращения ротора. Решена задача асинхронизации гистерезисного электродвигателя с одновременным обеспечением стабильности частоты вращения ротора. Представлено альтернативное решение этой задачи: обеспечение синхронности вращения с фиксацией однозначного положения ротора в синхронной системе координат за счет импульсного намагничивания.

Ключевые слова: системы электропитания и электропривода, гироскопы с поплавковым подвесом ротора, механическим носителем кинетического момента, динамически настраиваемые и электромеханические.

* OstaninSY@mpei.ru

Объект исследования — системы электропитания и электропривода гироскопов с поплавковым подвесом ротора, динамически настраиваемых и электромеханических, т. е. с механическим носителем кинетического момента и электрическим приводом [1 — 4]. Все они необходимы для работы на самолетах, ракетах, космических летательных аппаратах, подводных и надводных судах, самоходных наземных установках в составе гироскопических приборов и систем ориентации, стабилизации, навигации и управления движением как самих объектов, так и отдельных элементов в их составе.

Широкое применение гироскопические устройства и системы на основе электромеханических гироскопов получили также в горнорудной, нефтяной и газовой отраслях промышленности. С их помощью определяют направление меридиана и истинной вертикали места, измеряют углы, в том числе поворота, угловые скорости, ускорения и координаты подвижных объектов с высокой и сверхвысокой точностью [2 — 4].

Научно-исследовательские (НИР) и опытно-конструкторские (ОКР) работы по гистерезисным, в частности, гироскопическим электродвигателям (ГД) и электроприводам впервые в стране начались на кафедре Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАОиЭТ) (ранее кафедра Авиационного и автотракторного электрооборудования) Московского энергетического института (в настоящее время Национальный исследовательский университет (НИУ) «МЭИ») в 1949 г. под руководством члена-корреспондента Академии наук СССР А. Н. Ларионова [5 — 9]. На основе современных для того времени разработок, выполненных Центральным научно-исследовательским институтом черной металлургии им. И. П. Бардина (ныне Государственный научный центр РФ Федеральное государственное унитарное предприятие «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина») [10], для роторов были применены материалы класса викаллой, на базе которого впервые были созданы ГД [5], конкурентоспособные по энергетическим характеристикам с другими электродвигателями и имеющие ряд важных преимуществ перед ними.

На рубеже 1970-х гг. основные научно-технические проблемы в области прецизионной механики были решены и возникла проблема развития гироскопического электропривода. Очевидной стала невозможность его совершенствования на основе асинхронного электродвигателя и целесообразность перехода к электроприводу на базе гистерезисного электродвигателя в синхронном режиме с управлением возбуждением и, ограниченно, синхронизированного вентильного электродвигателя (ВД) [11], в некоторых источниках называемого бесконтактным электродвигателем постоянного тока (БДПТ).

Эти два конкурирующих направления одновременно развивались и продолжают совершенствоваться

в НИУ «МЭИ» авторами работы с определением областей применения [12 — 15]. Научно-технические решения и методические разработки авторов стали основой создания гироскопических прецизионных электроприводов, определивших научно-технический прогресс в гироскопии, и продолжают оставаться в настоящее время базовыми в большинстве практических применений.

Цель работы: обобщение и развитие научных концепций, научно-технических решений и разработок в области электрооборудования электромеханических гироскопов, приборов и систем на их основе.

Для ее достижения были решены следующие задачи:

— научные проблемы совмещения электропривода и прецизионного механизма гироскопических приборов;

— конструкторско-технологические проблемы уменьшения гистерезиса характеристик гироскопического гистерезисного электропривода за счет комплекса конструктивных решений [12 — 15];

— учет, снижение и устранение влияния постоянных составляющих течений, выявленных при повышении точности гироскопов;

— создание методов и средств стабилизации характеристик гироскопического гистерезисного электропривода [12 — 15];

— решение проблем погрешностей гироскопов от дестабилизирующих факторов электропитания и нагрузки;

— снижение ошибок, определяемых произвольным положением гистерезисного гироскопа при синхронизации, и устранение ошибки, связанной с нестабильностью средней частоты вращения ротора [12 — 16];

— задача асинхронизации гистерезисного электродвигателя с одновременным обеспечением стабильности частоты вращения ротора;

— обеспечение синхронности вращения с фиксацией однозначного положения ротора в синхронной системе координат за счет импульсного намагничивания.

Научные проблемы совмещения электропривода и прецизионного механизма гироскопов обусловлены тем, что такие приборы наиболее чувствительны к различным проявлениям электромеханического преобразования энергии. Авторы провели работы по синтезу нового поколения электропривода ротора гироскопа, в результате которых были:

1) классифицированы источники погрешностей гироскопов, определяемых электроприводами роторов гироскопов;

2) разработан метод выделения погрешностей от электропривода;

3) установлен общий энергетический фактор, определяющий уровни погрешностей различной физической природы;

4) выявлен характер проявления погрешностей, обусловленных гистерезисом, и разработана совокупность приемов для их уменьшения;

5) установлен конструкционно-технологический фактор возникновения погрешности в виде несимметрии конструкции;

6) разработана модель термоупругой разбалансировки;

7) созданы модели:

погрешностей от собственных угловых вибраций, линейных вибраций, вызванных импульсами, угловой магнитной несимметрии;

расчета радиальной и осевой составляющих электромагнитной силы взаимодействия статора и ротора гистерезисного электродвигателя.

Результаты исследований с помощью указанных моделей стали основой банка научно-технических решений, используемых при практической реализации гироскопических приборов и систем, содержащего основные решения авторов, защищенные авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ (табл. 1). За рубежом патентование не проводилось, так как разработки в основном использовались в оборонных отраслях.

Общее число изобретений — более 100. В табл. 1 указаны лишь изобретения, отражающие приоритетные решения, открывающие новые направления в области конструкций, способов управления, материалов ротора, систем электроснабжения и электропривода. Внедренные изобретения с подтверждением внедрения Всесоюзным (Всероссийским) научно-исследовательским институтом патентной информации (ВНИИПИ), актами организаций и предприятий помечены знаком *.

Работы коллектива кафедры ЭКАОиЭТ НИУ «МЭИ» и организаций — партнеров и заказчиков НИУ «МЭИ» в этой сфере обеспечили практически монопольное применение гистерезисного электропривода в прецизионных электромеханических гироскопах. Совместно с профильными организациями были разработаны гироскопы различных модификаций: ГПА-20, ГПА-200, ГПА-Л2-1, КИ99-078 и ряд других.

Партнерами и заказчиками были и остаются ведущие организации авиационной, ракетно-космической и горной промышленности, энергетики и Российской академии наук (РАН):

Таблица 1

Система научно-технических решений, направленных на повышение технических показателей гироскопов

Номер и наименование группы	Номер и наименование направления в составе группы	Номера охранных документов
1. Научно-технические решения по конструкционному выполнению	1.1. Научно-технические решения по выполнению ротора, магнитопровода, обмотки гистерезисных электродвигателей, по качественно новым конструкциям электродвигателей, развитым в работах других авторов	357646, 612353, 656160, 682991, 716118, 748695*, 1091275, 1457088, 1617536, 1658301
2. Новые направления уменьшения погрешностей гироскопов, обусловленных гистерезисом	2.1. Разработка устройств трансформаторной передачи энергии чувствительному элементу	350388, 382922, 818242*, 157289*
	2.2. Разработка гистерезисного электропривода ротора гироскопа с импульсным управлением возбуждением электродвигателя	205595*, 534015*, 600667, 705636*, 748695*, 966837, 1003288*
	2.3. Интегрализация гироскопических узлов (гироскопов)	177882, 192186*, 484393, 236068*, 3064248
3. Научно-технические предложения по уменьшению физически определенных погрешностей гироскопов	3.1. Научно-технические предложения по уменьшению тепловых погрешностей гироскопов	342929*, 396393, 494052, 808846, 1111557*
	3.2. Научно-технические предложения по уменьшению вибрационных погрешностей гироскопов	157118*, 404413, 710100, 749182
	3.3. Научно-технические предложения по уменьшению магнитных погрешностей гироскопов	162275*, 169100*, 199805*, 205595*, 350388, 623324, 658957, 690918*, 716360*, 818244*, 1099698, 1101676, 1162350
	3.4. Научно-технические предложения по уменьшению прочих погрешностей гироскопов	98578, 205595*, 658957, 690913*, 716360*, 923259*
4. Научно-технические предложения по уменьшению времени готовности гироскопов	4.1. Новые алгоритмы управления, улучшение параметров гироскопов	348867*, 587583, 603084, 682991, 808846
	4.2. Электроприводы с перестраиваемой структурой	87369, 203413, 338785, 433618*, 695304, 1059997

— ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» («ЦЭНКИ») — филиал «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова» (НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова);

— ФГУП «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Н. А. Пилюгина» (ФГУП «НПЦАП»);

— Акционерное общество «Научно-исследовательский институт командных приборов» (АО «НИИ командных приборов»);

— АО «Московский институт электромеханики и автоматики»;

— Открытое акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королева»;

— ГНЦ РФ АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»» (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»);

— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН;

— ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина»;

— Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела — Межотраслевой научный центр ВНИМИ (г. Санкт-Петербург) с филиалами (Министерство энергетики РФ, РАН).

Конструкторско-технологические проблемы уменьшения гистерезиса характеристик гироскопического гистерезисного электропривода [4, 12] решались в период 1975 — 1985 гг. в работах профессора Орлова И. Н., профессора Делекторского Б. А., их сотрудников и аспирантов. В результате за счет комплекса конструктивных достижений [4, 12] были уменьшены физически определенные погрешности, обусловленные: магнитными течениями, токоподводами, тепловой разбалансировкой, вибрациями и т. д.

Радикальным средством повышения уровня и стабильности характеристик гистерезисного электродвигателя в синхронном режиме стали технические решения по импульсному намагничиванию его ротора и стабилизации характеристик электродвигателя при периодическом импульсном намагничивании его ротора [4, 12, 13, 15].

Внедрение итогов работы в нескольких десятках ОКР практически во всех организациях и предприятиях, занимающихся гироскопическими системами для авиационной, космической и морской техники, позволили примерно на 2 порядка снизить влияние дестабилизирующих факторов на точность гироскопов. Таким образом, по этим показателям гистерезисные электродвигатели стали самыми стабильными и ничем не уступают вентильным.

Процесс внедрения проходил в два этапа. На первом этапе в 1980 — 1992 гг. были выработаны и ис-

пользованы основные научно-технические решения, направленные на повышение стабильности собственно гироскопического гистерезисного электропривода. Результаты были отражены в соответствующих актах.

На втором этапе (1993–2010 гг.) разработки продолжались с использованием дополнительных алгоритмов стабилизации по устранению постоянной составляющей инвертора, управляющих импульсов, а также стабилизации скольжения.

Только в двух организациях: ФГУП «НПЦАП» и ФГУП «ЦЭНКИ» (филиал НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова) — было выполнено около 20 разработок гироскопического гистерезисного электропривода с использованием научно-технических решений и рекомендаций авторов.

В результате обеспечено главное: огромная экономия средств за счет отказа от конструкторско-технологической переориентации десятков предприятий на вентильный вид электропривода благодаря обеспечению точности гироскопов.

Режим скольжения [12, 13, 15] был введен в гироскопическом гистерезисном электроприводе для усреднения ошибки от положения ротора, которая для разных видов гироскопов колеблется от десятитысячных до миллионных долей град/час. Стабильность скольжения s менее 0,1 — 0,2% при $s \leq 1\%$ и 0,015 — 0,030% при $s \leq 0,10$ — 0,15%, оценивается при изменении нагрузки в 1,5 — 2,0 раза. Установлено теоретически и подтверждено экспериментально при испытаниях, что:

— при стабильной нагрузке дестабилизирующим фактором является изменение напряжения электропитания, параметров импульса;

— существенно значение сопротивления цепи электропитания;

— в составе гироскопа в течение 1 — 2 ч после запуска проявляется медленный дрейф гироскопа, мероприятия по стабилизации скольжения позволяют его уменьшить;

— в составе гироскопа необходимо гарантировать не только скольжение каждого гироскопа, но и их взаимное скольжение для уменьшения общего дрейфа платформы по координатным осям.

Практическая проверка режима стабилизации скольжения проводилась на профильных предприятиях на гироскопах и гироскопах классов ГПА-20, ГПА-200, КИ99-078 и ряде других, в частности, на гироскопах в составе гироскопа ГПА-Л2-1 при их электропитании от созданного в НИУ «МЭИ» источника по программам:

сравнительной оценки стабильности скольжения для режима «неподвижных» импульсов (с постоянной составляющей) и режима «вращающихся» импульсов (с исключением постоянной составляющей);

испытания в режиме 2-х последовательностей импульсов (сочетание шагового движения и синхронного вращения);

сравнительных статистических испытаний ряда гироскопов в режимах с одной и с двумя последовательностями импульсов;

выявления возможностей регулирования частоты скольжения.

В табл. 2 — 5 приведены зависимости тока, частоты вращения n и скольжения s , показывающие нестабильность тока и скольжения при изменении напряжения и амплитуды намагничивающих импульсов при асинхронизации ГД «неподвижными» и «вращающимися» импульсами.

В табл. 6 представлены нестабильность тока и скольжения при изменении напряжения электропитания и амплитуды импульсов в режиме стабилизации скольжения с двумя последовательностями импульсов: намагничивающих ($I_{\text{посл}}$), $\alpha_{UAC1} = 110$ град, $t_{U1} = 45$ град,

$f_{U1} = 49,48$ Гц; перематричивающих ($I_{\text{посл}}$), $\alpha_{UAC2} = 347$ град, $t_{U12} = 60$ град, $f_{U2} = 1,25$ Гц.

Исследования двенадцати гидродвигателей в процессе испытаний гироскопов показали, что при «обычном» скольжении разброс для десяти гидродвигателей составил от 0,161 до 0,556 Гц или 71%, а для двух гидродвигателей — 0,645 и 0,770 Гц. При создании нового режима скольжение десяти гидродвигателей равно $s = 0,191 \pm [(2...14)\%]$ Гц, а при меньшем абсолютном скольжении — $s = 0,036 \pm [(9...13)\%]$ Гц.

Регулирование скольжения изменением вольсекундной площади наиболее просто реализуется введением активного R или L реактивного сопротивлений в фазы электропитания гидродвигателя (табл. 7), но диапазон регулирования скорости вращения при этом единицы оборотов в минуту. Стабильность частоты

Таблица 2

Изменение напряжения, $f_1 = 800$ Гц ($n_c = 24\ 000$ об/мин), $\alpha_U = 100$ град, $t_U = 45$ град, $f_U = 50$ Гц, $U_U = 90$ В, «неподвижный импульс»

ГД	U_{AB} , В	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_{cp} , мА	ΔI_{cp} , %	n , об/мин	s , об/мин	s , Гц	Δn , $\% \cdot 10^{-2}$
№ 1	33	75	72	69	72,0	0	23 986	14	0,23	0
№ 2		78	75	71	74,6	0	23 991	9	0,15	0
№ 1	34	77	73	70	73,3	+1,80	23 987	13	0,21	+0,4
№ 2		80	78	73	77,0	+3,50	23 993	7	0,11	+0,8
№ 1	32	75	71	69	71,6	-0,55	23 980	20	0,33	-2,5
№ 2		76	74	70	73,3	-1,70	23 986	14	0,23	-2,0

Таблица 3

Изменение напряжения, $f_1 = 800$ Гц, $\alpha_U = 100$ град, $t_U = 45$ град, $f_U = 49,48$ Гц, $U_U = 90$ В, «вращающийся импульс»

ГД	U_{AB} , В	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_{cp} , мА	ΔI_{cp} , %	n , об/мин	s , об/мин	s , Гц	Δn , $\% \cdot 10^{-2}$
№ 1	33	72,5	71,0	72,0	71,8	0	23987	13	0,21	0
№ 2		74,0	74,0	74,0	74,0	0	23991	9	0,15	0
№ 1	34	74,0	73,0	74,0	73,6	+2,50	23989	11	0,18	+0,4
№ 2		76,5	77,0	76,5	76,6	+3,50	23992	8	0,13	0,8
№ 1	32	72,0	70,0	71,0	71,0	-1,10	23982	18	0,30	-2,5
№ 2		73,5	73,5	73,5	73,5	-0,67	23985	15	0,25	-2,0

Таблица 4

Изменение амплитуды «неподвижных» намагничивающих импульсов, $U = 33$ В, $f_1 = 800$ Гц, $\alpha_U = 100$ град, $t_U = 45$ град, $f_U = 50$ Гц

ГД	U_{AB} , В	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_{cp} , мА	ΔI_{cp} , %	n , об/мин	s , об/мин	s , Гц	Δn , $\% \cdot 10^{-2}$
№ 1	90	75	72,0	69,0	72,0	0	23986	14	0,23	0
№ 2		78	75,0	71,0	74,6	0	23991	9	0,15	0
№ 1	94	76	72,0	69,5	72,5	+0,69	23974	26	0,43	-5,0
№ 2		71	77,0	75,0	74,3	-0,40	23982	18	0,30	-3,7
№ 1	86	75	71,5	69,0	71,8	-0,27	23991	9	0,15	2,0
№ 2		78	76,0	72,0	75,3	+0,93	23998	2	0,03	3,0

Таблица 5

Изменение амплитуды «вращающихся» импульсов, $U = 33$ В, $f_1 = 800$ Гц, $\alpha_U = 100$ град, $t_U = 45$ град, $f_U = 49,48$ Гц

ГД	U_{AB} , В	I_A , мА	I_B , мА	I_C , мА	I_{cp} , мА	ΔI_{cp} , %	n , об/мин	s , об/мин	s , Гц	Δn , $\% \cdot 10^{-2}$
№ 1	90	72,5	71,0	72,0	71,8	0	23987	13	0,21	0
№ 2		74,0	74,0	74,0	74,0	0	23991	9	0,15	0
№ 1	94	73,0	71,0	72,0	72,0	+0,27	23978	22	0,36	-4,0
№ 2		74,5	74,5	74,5	74,5	+0,67	23989	17	0,28	-3,3
№ 1	86	73,0	72,0	73,0	72,6	+1,10	23992	8	0,13	2,0
№ 2		75,0	75,5	75,0	75,1	+1,50	23997	3	0,05	2,5

Таблица 6

Результаты экспериментальной проверки режима стабилизации скольжения с двумя последовательностями импульсов

ГД	U_{AB} , В	U_U , В	I_{cp} , мА	ΔI_{cp} , %	n , об/мин	s , об/мин	s , Гц	Δn , $\% \cdot 10^{-2}$
№ 1	33	90	90,0	0	23987	13	0,22	0
№ 2			89,0	0	23988	12	0,20	0
№ 1	34	90	92,0	+2,20	23989	11	0,18	+0,8
№ 2			91,5	+2,80	23990	10	0,17	+0,8
№ 1	32	90	87,5	-2,70	23985	15	0,25	-0,8
№ 2			87,0	-2,20	23986	14	0,23	-0,8
№ 1	33	94	89,0	-1,10	23985	15	0,25	-0,8
№ 2			88,5	-0,56	23986	14	0,23	-0,8
№ 1	33	84	91,5	+1,60	23991	9	0,15	+1,6
№ 2			91,0	+2,20	23992	8	0,13	+1,6

Таблица 7

Регулирование скольжения введением активного R и реактивного L сопротивлений в фазы электропитания гидродвигателей

L , мГн	R , Ом	U_n , В	I_1 , В	U_U , В	s , Гц	n , об/мин	Δn , $\% \cdot 10^{-2}$
0	0	33,0	79...93	90	0,153	23991	0
2,5	0	32,4	75...89	84	0,137	23992	0
0	12,3	31,4	83...98	88	0,182	23989	0
0	0	35,0	80...94	92	0,135	23992	0,45
2,5	0	34,4	77...89	86	0,132	23992	0,13
0	12,3	33,4	81...95	90	0,157	23990	0,63
0	0	31,0	77...89	88	0,180	23989	-0,67
2,5	0	30,5	77...91	82	0,157	23990	-0,50
0	12,3	29,4	83...99	86	0,293	23982	-2,70

вращения при введении дросселей не ухудшается, а при введении активных сопротивлений оказывается на уровне 0,03%.

При регулировании скольжения изменением частоты импульсов ресинхронизации f_{Up} (табл. 8) нижний предел регулирования должен определяться частотными свойствами гиросприбора. Стабильность частоты вращения при уменьшении скольжения возрастает, так как в интервалах между импульсами он строго в синхронном режиме.

Таким образом, в гироскопии благодаря комплексу научно-технических решений по управлению и стабилизации характеристик наиболее эффективен гистерезисный электропривод, что установлено и подтверждено исследованиями показателей и характеристик гиросприборов.

Сравнение полученных результатов с возможностями электроприводов, принятых, в частности, для использования в США, в том числе, вентильных, показало получение такого же относительного повышения

Таблица 8

Регулирование скольжения изменением частоты импульсов ресинхронизации

f_{U_p} , Гц	U_n , В	I_1 , В	s , Гц	n , об/мин	Δn , $\% \cdot 10^{-2}$
1,00	33	79...93	0,153	23991	0
	31	77...89	0,180	23989	-0,670
	35	80...94	0,135	23992	0,450
0,50	33	72...88	0,058	23997	0
	31	73...90	0,067	23996	-0,210
	35	71...85	0,054	23997	0,100
0,25	33	74...91	0,032	23998	0
	31	77...95	0,042	23997	-0,250
	35	72...88	0,027	23998	0,001

показателей стабилизации мощности и дрейфа гироприбора.

Разработанные способы обеспечивают практически полное исключение гистерезиса гидродвигателя и стабилизацию его показателей при действии на него возмущающих факторов и, что особенно важно, не требуется радикальная и дорогостоящая перестройка электропривода.

Время готовности гироприборов снизилось в 1,5 — 3,0 раза.

Определяющее требование высокоточного гироприбора — стабильность центра масс под действием случайного момента любой физической природы: тепловые деформации, магнитные течения, вибрации и так далее, — обеспечено на уровне более 10^{-6} — 10^{-8} Г·см.

Погрешности гироприборов при действии наиболее сильных дестабилизирующих факторов, в первую очередь, прерывания электропитания, снизились в 70 — 100 раз, зависимость ухода гироприборов от изменения напряжения электропитания в пределах допуска на реализацию электропитания уменьшилась в 2 — 5 раз.

Энергетическая экономичность гироскопического гистерезисного электропривода повысилась в 1,5 — 2,0 раза, массогабаритные показатели источников электропитания гироприборов улучшились в 2,0 — 2,5 раза.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15-08-99600-а и 16-08-01101-а).

Литература

1. Федосов Е.А. и др. Динамическое проектирование систем управления автоматических маневренных летательных аппаратов: Учеб. пособие для студ. вузов. М.: Машиностроение, 1997.
2. Пешехонов В.Г. Ключевые задачи современной автономной навигации // Гироскопия и навигация. 1996. № 1 (12). С. 48 — 55.
3. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1 (72). С. 3 — 16.

4. Арбузов Ю.В. и др. Гиродвигатели. М.: Машиностроение, 1983.

5. Ларионов А.Н., Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Гистерезисные электродвигатели: техническая информация. М.: МЭИ, 1958.

6. Ларионов А.Н., Мастяев Н.З., Орлов И.Н., Панов Д.Н. Общие вопросы теории гистерезисных двигателей // Электричество. 1958. № 7. С. 1 — 6.

7. Ларионов А.Н., Морозов В.Г. Гистерезисная муфта для стабилизации частоты // Электричество. 1958. № 12.

8. Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Гистерезисные электродвигатели. Ч. I. Вопросы теории и применения / под. ред. А.Н. Ларионова. М.: МЭИ, 1963.

9. Мастяев Н.З., Орлов И.Н. Гистерезисные электродвигатели. Ч. II. Вопросы проектирования / под. ред. А.Н. Ларионова. М.: МЭИ, 1963.

10. Горжевский И.И. Гистерезисные электродвигатели. М.: ЦИНТИ ЭПП, 1959.

11. Компактные шпиндельные двигатели переменного тока. Kompakter AC – Spindelmotor eignet sich für grosse Werkzeugmaschinen // Maschinenmarkt. 2001. Bb 107. N 7. P. 77.

12. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный привод. М.: Энергоатомиздат, 1983.

13. Тарасов В.Н., Нагайцев В.И., Останин С.Ю., Павлихина Е.В. Сравнительная оценка прецизионных гироскопических электроприводов на базе синхронных электродвигателей // Гироскопия и навигация. 1996. № 1. С. 41 — 47.

14. Гарганеев А.Г. Управление гироскопическими гистерезисными двигателями в системах электропитания поплавковых гироприборов. Томск.: Изд-во ТПУ, 1999. С. 42 — 44.

15. Тарасов В.Н., Останин С.Ю. Разработка научных основ и технических решений для автоматизации и роботизации роторных и центрифужных технологий // Высокие технологии. Инновации. Инвестиции: Доклады IX Междунар. выставки-конгресса. СПб., 2004. С. 127 — 131.

16. **Тарасов В.Н.** Методы и технические средства разделения составляющих погрешностей поплавковых гироскопов, обусловленных электроприводом // Гироскопия и навигация. 2005. № 3 (50). С. 59 — 67.

17. **Протокол № 2361.** Автоматизированные расчеты гистерезисных двигателей. Сравнение методик расчета. М.: НИИКП, 1990.

18. **Акт** о применении методик и программных средств автоматизированных расчетов спецэлектродвигателей в НИИКП, разработанных МЭИ по договорам

в период с 1987 по 1989 гг. (акт внедр. исх. 6950/2300 от 30.06.88; акт внедр. исх. 10031/2300 от 28.12.89); Утв. зам. директора НИИ КП В.И. Лебедевым. М.; НИИКП, 1991.

19. **Слесарев М.Ю.** Мехатроника, основные понятия, современный и прогнозируемый уровень мехатронных систем // Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. Т. Ш-8. М.: Машиностроение, 2000. С. 714 — 731.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016