

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**  
Факультет электротехнический  
Кафедра автоматики  
Направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_  
Голощاپов С.С.  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Система управления динамически настраиваемого гироскопа

(тема)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ–....27.03.04.2017.171.00.00. ....ПЗ ВКР

**Автор проекта**

студент группы МиЭт- 521

\_\_\_\_\_  
/ Мурдасов А.С.  
подпись ФИО  
\_\_\_\_\_ 2017\_\_ г.

**Руководитель работы**

\_\_\_\_\_  
вед. Инженер  
должность

\_\_\_\_\_  
/ Смекалин Д.Ю.  
подпись ФИО  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Нормоконтроль**

\_\_\_\_\_  
ст. Преподаватель  
должность

\_\_\_\_\_  
/ Елисеев В.П.  
подпись ФИО  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Миасс 2017г.

## АННОТАЦИЯ

Мурдасов А. С. «Система управления динамически настраиваемого гироскопа» – г. Миасс, ЮУрГУ, кафедра «Автоматика», 2017г., 61 с. Библиография литературы – 19 наименований; четыре приложения; Графический материал – шесть наименований.

В выпускной квалификационной работе разработана система управления динамически настраиваемого гироскопа.

Блок предназначен для реализации устройств и систем управления динамически настраиваемыми гироскопами (ДНГ).

Изложены основные характеристики и алгоритм работы системы управления, обоснован выбор датчиков.

Алгоритмы системы обратной связи (СОС) гироскопа реализуются программным обеспечением (ПО) контроллера, при этом взаимодействие с другими элементами блока осуществляется через его встроенные периферийные устройства.

В блоке реализованы следующие функциональные системы и устройства:

- система обеспечения функционирования контроллера;
- система съёма информации с датчиков угла;
- система электропривода чувствительного элемента (ЧЭ);
- устройство управления датчиками момента (ДМ);
- устройство измерения температуры корпуса ДНГ;
- устройство измерения тока в обмотках электропривода;

Составлены: схема электрическая принципиальная, схема структурная, схема функциональная ячейки управления.

					27.03.04.2017.171.00.00. ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Мурдасов.			Система управления динамически настраиваемого гироскопа	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>		Смекалин.				Д	4	61
<i>Рецен.</i>						ЮУрГУ кафедра Автоматики		
<i>Н.контр</i>		Елисеев						
<i>Утв.</i>		Голощатов						

## Введение

Навигация используется для получения информации о местонахождении и особенностях движения организмов или механических объектов относительно окружающего материального мира. В процессе эволюционного развития человек развивал свои навигационные способности в зависимости от потребностей повседневной жизни. Особенно сложные задачи навигации возникали при движении в безориентирной местности и при навигации морского транспорта.

Постепенно накапливался опыт судовождения, который и получил название навигации (от латинского *navigato* – мореплавание, *navis* – корабль). В современных условиях человек использует навигацию для ориентации объектов, движущихся под водой, на воде, по суше, в воздухе и космическом пространстве.

На данный момент различают 9 видов навигации:

1) Автомобильная навигация. Данная технология применяется с целью вычисления оптимального маршрута для наземного транспорта по существующим дорогам благодаря наличию визуальных и, возможно, голосовых подсказок. В качестве инструментария используется специальная автомобильная карта.

2) Астрономическая навигация. Метод установления месторасположения базирующийся на световом или радиоизлучении небесных тел. Используется в основном для космических аппаратов.

3) Воздушная навигация. Под нею понимают прикладную науку про точное, надёжное и безопасное вождение в воздухе самых различных летательных аппаратов. Система навигации в данном случае является сложным компьютерным и аппаратным комплексом, с которым работают внешние передатчики данных (спутники и антенны).

4) Инерциальная навигация. Метод, который позволяет определять параметры и координаты объекта без привлечения внешних ориентиров или сигналов. Сущность инерциальной навигации состоит в определении ускорения объекта и его угловых скоростей с помощью

										Лист
										6
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ					







сигнал гироскопа (его крутящий момент) пропорционален его угловой скорости движения вокруг оси, перпендикулярной к основной оси вращения.

Принцип действия оптического гироскопа основан на эффекте Саньяка: появление фазового сдвига встречных электромагнитных (световых) волн во вращающемся кольцевом интерферометре. Эффект прямо пропорционален угловой скорости вращения интерферометра, площади, охватываемой путём распространения световых волн в интерферометре и частоте излучения.

Принцип действия оптических гироскопов теоретически объясняется с помощью специальной теории относительности (СТО). Согласно СТО скорость света постоянна в любой инерциальной системе отсчёта, в то время как в неинерциальной системе она может отличаться от данного постоянного значения. При посылке луча света в направлении вращения прибора и против направления вращения определяемая интерферометром разница во времени прихода лучей позволяет найти разницу оптических путей лучей в инерциальной системе отсчёта, и, следовательно, величину углового поворота прибора за время прохождения луча.

Лазерный гироскоп— оптический прибор для измерения угловой скорости, принцип действия которого основан на эффекте Саньяка.

Находит применение в системах инерциальной навигации (определение координат и параметров движения различных объектов и управление их движением, основанное на свойствах инерции тел и являющееся автономным, т.е. не требующим наличия внешних ориентиров или поступающих извне сигналов).

Вибрационные гироскопы — устройства, сохраняющие свои колебания в одной плоскости при повороте.

Согласно техническому заданию требуется разработать:

- разгон маховика чувствительного элемента (ЧЭ);
- поддержание резонансной скорости вращения ротора;
- измерение угла отклонения маховика и передача его в вышестоящее устройство для поддержания неизменного положения маховика.

Актуальность поставленной задачи состоит в том, чтобы повысить точность, снизить габарит и модернизация элементной базы.

					27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ	Лист
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		11









## 1 Постановка задачи

### 1.1 Постановка задачи

Система управления динамически настраиваемым гироскопом (ДНГ) должна на выходе осуществлять разгон и поддержание резонансной скорости двигателя гироскопа. Необходимо увеличить быстродействие, повысить точность. Система управления динамически настраиваемого гироскопа должна при разгоне автоматически позиционировать маховик таким образом, чтобы свести к минимальному значению с емкостных датчиков угла.

Однако существующая система управления не позволяет удовлетворить настоящие требования по быстродействию, точности. Необходимо применить современные комплектующие, для выполнения требований.

Необходимо повышение точности существующей системы, для этого применяется новые аппаратные средства, в том числе микроконтроллеры AT32UC3C1512C-A2UR, обладающий большей производительностью, по сравнению с предшественником, что позволяет повысить производительность устройства и точность измерения. Кроме того, необходимо поддерживать скорость вращения ротора с достаточно большой скоростью, для чего используется одна из трех обмоток попеременно в качестве датчика положения ротора. Сигнал с обмотки приходит на один из трех компараторов, по сигналу с него происходит переключение обмоток.

Элементная база, которая применяется в системе управления морально устарела, сокращается количество компаний, производящих данную продукцию.

Для решения текущей задачи необходимо применить современные элементы, которые будут удовлетворять требованиям.

Оптимизация существующей системы и внедрение новых элементов позволит приборам оставаться конкурентоспособным. Увеличится быстродействие, повысится точность, произведется модернизация элементной базы, появится перспектива для увеличения функционала за счет быстродействия

										Лист
										15
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ					



наружным кардановым подвесом двигатель ДНГ расположен на корпусе прибора. Упругий подвес ДНГ обеспечивает кинематическую связь ротора с двигателем по оси собственного вращения и две степени свободы углового движения относительно вала двигателя.

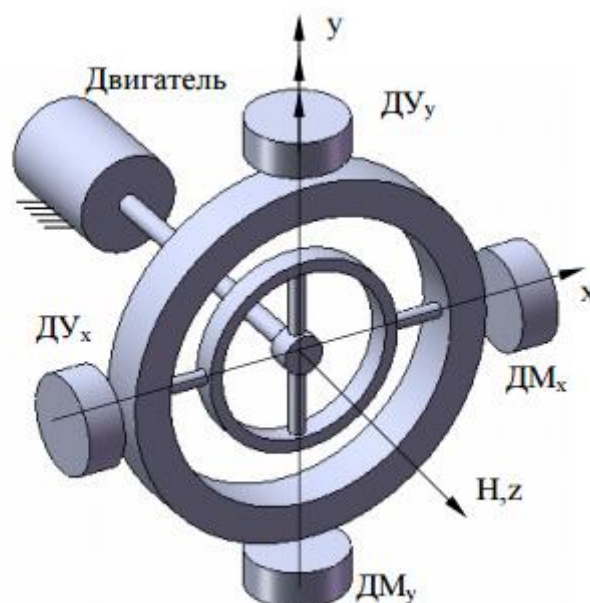


Рисунок 1 – Кинематическая схема ДНГ

Применение в ДНГ упругого карданного подвеса исключает сухое трение в опорах подвеса, что повышает его точность. При вращении ротора с подвесом упругие моменты подвеса компенсируются центробежными инерционными моментами кольца, что приближает ДНГ к свободному гироскопу. Эта компенсация обеспечивается при определенной скорости собственного вращения гироскопа и поэтому называется динамической. Угловое положение ротора ДНГ относительно корпуса измеряют с помощью двух датчиков угла. В индикаторных гиростабилизаторах выходные сигналы с датчиков углов поворота ротора ДНГ относительно корпуса пропорциональны углам поворота стабилизированной платформы в абсолютном пространстве. Создание управляющих моментов в ДНГ осуществляется с помощью двух датчиков момента, по одному на каждой оси чувствительности.

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

17

### 1.3 Назначение и принцип работы динамически настраиваемого гироскопа

Прибор КЕАФ05А(Б) предназначен для использования в качестве чувствительного элемента в индикаторной системе стабилизации трехосного гиросtabilизатора и представляет собой прецессионный динамически настраиваемый гироскоп. Сущность работы прибора поясняется принципиальной схемой ДНГ с одним карданным кольцом, которая приведена на рисунке 2.

Симметричный маховик 1 (рисунок 2) - носитель кинетического момента - связан с приводным валом 2 посредством упругого подвеса, состоящего из карданного кольца 3 и двух ортогонально расположенных пар упругих элементов, одной из которых (4) кольцо связано с приводным валом, другой (5) - с маховиком. Каждая пара упругих элементов имеет ось минимальной угловой жесткости, податливость к повороту вокруг которой на несколько порядков выше податливостей к повороту вокруг других, ортогональных ей осей. Для пояснения сущности работы ДНГ эти податливости можно считать равными нулю. Благодаря такой конструкции подвеса при отклонении полярной оси  $Z_M$  маховика относительно оси  $Z_B$  приводного вала на угол  $\alpha_0$  карданного кольца за один оборот вала совершает два периода колебаний в плоскости отклонения маховика между двумя крайними положениями, в одном из которых полярная ось  $Z_K$  кольца совпадает с осью  $Z_B$  вала, в другом - с осью  $Z_M$  маховика. Если в первом из этих положений угол поворота  $\Omega t$  вала принять равным нулю ( $\Omega$  - угловая скорость вращения вала), то движение карданного кольца вокруг оси поворота маховика описывается уравнением

$$\alpha = (\alpha_0 / 2) * (1 - \cos 2\Omega t) \quad (1.1)$$

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

18

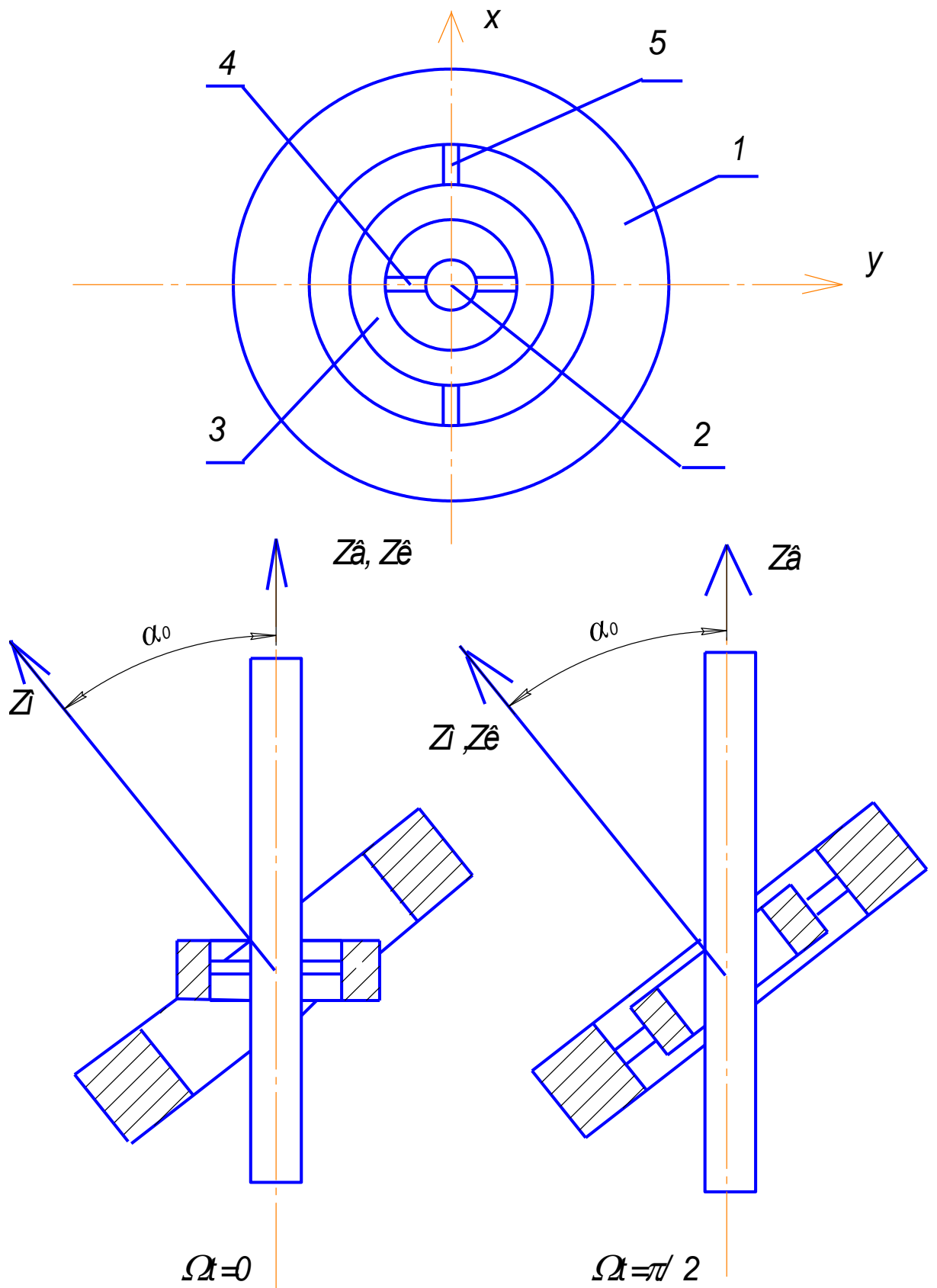


Рисунок 2 – Принципиальная схема ДНГ

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

19



## Инерционный момент кольца

$$M_{\text{ин}} = - v \alpha = - 2 v \Omega^2 \alpha_0 \cos 2 \Omega t , \quad (1.2)$$

где  $v$  - экваториальный момент инерции кольца, при  $\Omega t = 0$  и  $\Omega t = \pi/2$  будет максимальным. Этот момент при  $\Omega t = 0$  передается только на приводной вал через упругие элементы 4, жесткость которых относительно осей, перпендикулярных оси  $Y_k$ , принята бесконечно большой. К маховику приложен только момент от упругих элементов 5:

$$M_1 = k_x * \alpha_0, \quad (1.3)$$

где  $k_x$  - угловая жесткость пары упругих элементов 5 относительно оси  $X_k$ . При  $\Omega t = \pi/2$  момент, передаваемый от подвеса на маховик, является суммой трех моментов:

$$M_2 = M_{\text{упр}} + M_{\Gamma} + M_{\text{ин}}, \quad (1.4)$$

где  $M_{\text{упр}}$  - момент от упругих элементов 4, имеющих угловую жесткость  $k_y$  относительно оси  $Y_k$ ,

$$M_{\text{упр}} = k_y * \alpha_0 , \quad (1.5)$$

$M_{\Gamma}$  - гироскопический момент карданова кольца, кинетический момент которого  $H_k = a \Omega$  ( $a$  - осевой момент инерции кольца) направлен по оси  $Z_k$ , а внешней угловой скоростью является скорость приводного вала,

$$M_{\Gamma} = a \Omega * \Omega \sin \alpha_0 \approx a \Omega^2 \alpha_0; \quad (1.6)$$

$M_{ин}$  - инерционный момент карданова кольца,

$$M_{ин} = - 2 в \Omega^2 \alpha_0 \quad (1.7)$$

Таким образом,

$$M_2 = [ k_y - ( 2 в - а ) \Omega^2 ] \alpha_0 \quad (1.8)$$

Приложенный от подвеса к маховику момент при вращении гироскопа изменяется, принимая значения от  $M_1$  до  $M_2$ . Среднее за один оборот вала значение этого момента определяется выражением:

$$M_{ср} = (M_1 + M_2) / 2 = [ (k_x+k_y)/2 - (2в - а)/2 * \Omega^2 ] \alpha_0 \quad (1.9)$$

Из последнего выражения следует, что  $M_{ср} = 0$  при выполнении условия:

$$( k_x + k_y ) / 2 - (2в - а) / 2 * \Omega^2 = 0 \quad (1.10)$$

Это условие называется условием динамической настройки гироскопа, при котором упругий момент  $((k_x + k_y)/2 * \alpha_0)$  подвеса уравнивается динамическим моментом  $((2в - а) / 2 * \Omega^2 * \alpha_0)$  карданова кольца.

При выполнении условия (1.10) ДНГ приобретает свойство свободного гироскопа сохранять неизменным в инерциальном пространстве ось собственного вращения маховика. Угол отклонения маховика относительно корпуса содержит информацию об угле отклонения основания, на котором устанавливается прибор, от начального положения.

Упругий подвес прибора КЕАФ05А(Б) содержит два кардановых кольца, каждое из которых связано одной парой упругих элементов с маховиком, другой парой - с валом. Условие динамической настройки по аналогии с выражением (1.10) имеет вид:

$$k_{1x} + k_{2x} + k_{1y} + k_{2y} - [(2v_1 - a_1) + (2v_2 - a_2)] * \Omega^2 = 0, \quad (1.11)$$

где параметры с индексами 1 и 2 относятся к разным кардановым кольцам.

Для гироскопа, у которого упругий подвес имеет равные жесткости по осям X и Y и одинаковые моменты инерции кардановых колец ( $v_1 = v_2, a_1 = a_2$ ), т.е. подвес обладает жесткостной и инерционной симметрией, в любой момент времени упругий момент уравновешивается динамическим моментом кардановых колец. Такой гироскоп не имеет погрешности, связанной с угловой вибрацией приводного вала на удвоенной частоте вращения, в отличие от гироскопа с одним кардановым кольцом.

#### 1.4 Основные технические характеристики ДНГ

Прибор КЕАФ05А(Б) имеет следующие точностные характеристики:

- 1) систематическая составляющая скорости ухода, не зависящая от ускорения, не более 0.2 '/мин;
- 2) систематическая составляющая скорости ухода, зависящая от проекции ускорения на ось измерения ухода, не более 1.0 '/мин;
- 3) систематическая составляющая скорости ухода, зависящая от проекции ускорения на ось, ортогональную оси измерения ухода и оси собственного вращения гироскопа (квadrатурная составляющая), не более 1.6 '/мин;
- 4) систематическая составляющая скорости ухода, пропорциональная кажущемуся ускорению во второй степени, не более 0.03 '/мин;

5) случайная составляющая скорости ухода от запуска к запуску, не зависящая от ускорения, не более 0.03 '/мин ;

6) случайная составляющая скорости ухода от запуска к запуску, зависящая от ускорения (из-за осевой разбалансировки, квадратурная) не более 0.02 '/мин;

7) случайная составляющая скорости ухода в запуске, не зависящая от ускорения не более 0.020 '/мин;

8) случайная составляющая скорости ухода в запуске, не зависящая и зависящая от ускорения (суммарная) не более 0.022 '/мин;

9) коэффициент зависимости скорости ухода, не зависящей от ускорения, от температуры не более 0.002 '/(мин °С).

Диапазон рабочих температур 5 ÷ 65°С.

Назначенный ресурс работы 650 часов.

Назначенный срок службы прибора не менее 22 лет 6 месяцев.

### 1.5 Конструкция и работа ДНГ

Конструкция прибора представлена в приложении А

Прибор состоит из следующих основных элементов:

- ротор (поз. 9);
- валик (поз. 10);
- плата датчика угла (поз. 8);
- трансформаторы (поз. 4);
- датчик момента (поз. 15);
- двигатель (поз. 3);
- подшипники (поз. 21);
- корпус (поз. 6);
- крышки (поз. 11).

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

23

Ротор (поз. 9) гироскопа представляет собой монолитную деталь из термостабильного материала - сплава 45НХТ-ВИ, содержащую массивное наружное кольцо - маховик (носитель кинетической энергии), внутреннее кольцо, напрессованное на валик (поз. 10) и закрепленное на нем гайкой (поз. 12), и два одинаковых промежуточных кардановых кольца, каждое из которых одной парой упругих элементов - торсионов соединено с наружным кольцом, другой парой - с внутренним кольцом. Оси каждой пары торсионов, принадлежащих одному карданову кольцу, взаимно перпендикулярны. Конструктивно каждый торсион представляет собой перемичку прямоугольного сечения, образованную двумя близлежащими цилиндрическими отверстиями, оси которых параллельны оси вращения ротора. Торсион имеет малую угловую жесткость на кручение и относительно большую жесткость на изгиб и сжатие - растяжение. Жесткостные параметры подвеса подобраны из условия динамической настройки гироскопа, требований прочности и равножесткости. Гайка (поз. 12) крепления ротора на валик одновременно является упором, ограничивающим угловые отклонения ротора. Валик (поз. 10) с закрепленным на нем ротором двигателя (поз. 3) содержит цилиндрический упор, ограничивающий угловое отклонение ротора (поз. 9), и ротор молекулярного насоса, представляющий собой гладкую цилиндрическую поверхность с нарезанной винтовой канавкой прямоугольного сечения. Валик вращается в скоростных шарикоподшипниках (поз. 21) 5М4-7076094ЮТ. Наружные кольца подшипников установлены в корпус (поз. 6) и крышку (поз. 11), а внутренние - на шейках валика (поз. 10). Осевой натяг  $(6 \pm 1)\text{Н}$  обеспечивается линейной деформацией упругих элементов корпуса и крышки путем подбора и доработки прокладки (поз. 17), установленной между крышкой и накладкой (поз. 18). Смазка подшипников ВНИИ НП-274Н выбрана из условий малой испаряемости в условиях вакуума и высокотемпературного ( $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) обезгаживания прибора, а также обеспечения необходимого ресурса работы прибора. Динамическая балансировка ротора (поз. 9) и всего вращающегося узла, в целом, осуществляется удалением металла в кольцевых

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

24

канавках на роторе (поз. 9), валике (поз. 10), гайке (поз. 12). Валик приводится во вращение бесконтактным магнитоэлектрическим двигателем (поз. 3) ДПМ1-016А. Принцип действия двигателя основан на взаимодействии вращающегося поля статора и поля магнита ротора. При таком взаимодействии на валу двигателя возникает необходимый вращающий момент. Управление двигателем осуществляется электронным блоком управления БУДГ, который обеспечивает разгон и стабильное вращение двигателя с требуемой скоростью. Работа привода строится по принципу обратной связи с использованием в качестве сигнала о положении ротора Э.Д.С. "свободной" фазы, т.е. той фазной обмотки статора, на которую в данный момент не подано напряжение питания. Двигатель ДПМ-016А имеет следующие характеристики:

1) частота вращения ротора:

для прибора КЕАФ05А ( $273 \pm 0,6$ ) с<sup>-1</sup>;

для прибора КЕАФ05Б ( $275 \pm 0,6$ ) с<sup>-1</sup>;

2) момент на валу двигателя при номинальной частоте вращения и при токе в фазе 0,175А - не менее  $2 * 10^{-3}$  Н м;

3) сопротивление обмоток постоянному току ( $9 \pm 0,9$ ) Ом.

Двигатель состоит из статора и ротора. Статор выполнен в виде шихтованного пакета из пластин сплава 50Н, толщиной 0.2 мм, в пазы которого уложена трехфазная петлевая обмотка, соединенная звездой, с выводом нулевой точки. Статор установлен во втулке (поз. 2), которая крепится винтами к корпусу (поз. 6). Для уменьшения влияния электромагнитных полей двигателя на ротор (поз. 9) во втулке (поз. 2) установлен экран (поз. 5) из сплава 50Н, закрепленный с помощью лазерной сварки. Одновременно экран ограничивает осевое перемещение статора двигателя. Ротор двигателя - кольцевой постоянный магнит с одной парой полюсов, изготовленный из горячекатанного сплава ЮНДК35Т5БА, установлен на валике и закреплен от осевого смещения гайкой (поз. 22). Для экранирования полей рассеивания на торцах магнита установлены экраны из сплава 50Н, отделенные от магнита немагнитными прокладками.

										Лист
										25
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ					

Управление гироскопом в режимах приведения гиросtabilизированной платформы, а также электрического арретирования гироскопа по "избыточной" измерительной оси в составе платформы осуществляется с помощью датчика момента (ДМ) ДМ-625.004 (поз. 15). ДМ состоит из четырех одинаковых башмаков из сплава 50Н (с обмотками), установленных на общем немагнитном основании по двум взаимно перпендикулярным осям. Датчик работает по принципу клапанного электромагнита, якорем которого является ротор (поз. 9) гироскопа. ДМ с помощью винтов установлен на крышке (поз. 11). Зазор 0.4<sub>0.02</sub> мм между статором ДМ и ротором обеспечивается подбором или доработкой прокладок (поз. 16), установленных между крышкой и датчиком.

ДМ-625.004 имеет следующие характеристики:

- питание постоянным током управления от 0 до 120 мА;
- коэффициент преобразования характеристики "скорость прецессии в функции управляющего тока",  $w = f(I_{упр}^2)$ ,  $K_{дм}$  составляет от 0.32 до 0.42  $^{\circ}/(\text{мин} * \text{мА}^2)$ ;
- сопротивление каждой обмотки ДМ постоянному току  $(26,5 \pm 2,7)$  Ом.

Система съема выходной информации об угловом отклонении ротора (поз. 9) гироскопа содержит двухкоординатный емкостный датчик угла (ДУ). ДУ предназначен для преобразования угловых перемещений ротора гироскопа по двум ортогональным осям чувствительности в электрический сигнал. ДУ состоит из дифференциального конденсатора, образованного платой (поз. 8) и ротором (поз. 9) гироскопа, и двух измерительных трансформаторов (поз. 4), первичные обмотки которых образуют с рабочими емкостями резонансные контуры. Дифференциальная схема позволяет обеспечить нечувствительность датчика к линейным перемещениям ротора гироскопа, вызванным механическими возмущениями. Принцип действия емкостного ДУ основан на регистрации изменений рабочих емкостей дифференциального конденсатора при угловых отклонениях ротора гироскопа и последующем преобразовании этих изменений в электрические сигналы, которые снимаются с выходных обмоток







прибора на корпусе (поз. 6) под крышкой (поз. 1) установлены два газопоглотителя ПЦ1-М, которые активируются при обезгаживании прибора. С целью повышения эффективности работы молекулярного насоса винтовая канавка насоса имеет переменную глубину вдоль оси валика.

Электромонтаж прибора выполнен проводом МП16-11-0,05 и медной проволокой ММ-0,315 и заканчивается клеммной платой, закрепленной на корпусе прибора. Для экранирования прибора от внешних магнитных полей кожух корпуса (поз. 6), крышка (поз. 1) и экран (поз. 13) выполнены из магнитомягкого сплава.

Для измерения температуры прибора на корпусе установлен терморезистор (поз. 19).

На наружной поверхности экрана (поз. 13) нанесены эмалью черной: стрелка с обозначением  $\Omega$ , указывающая направление вращения ротора, и стрелки, обозначающие оси чувствительности  $\alpha$  и  $\beta$ .

Конструктивно приборы КЕАФ05А и КЕАФ05Б отличаются различной толщиной перемычек роторов (поз. 9).

Габаритные размеры прибора  $\varnothing 70 \times 69,8$  мм.

Масса прибора 655 г.

## 2 Описание ячейки управления динамически настраиваемого гироскопа с двигателем гироскопа

### 2.1 Описание работы ячейки управления ДНГ

Ячейка управления ДНГ предназначена для обеспечения функционирования динамически настраиваемого гироскопа.

Функциональная схема ЯУ с ДГ представлена на рисунке 3.

										Лист
										30
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ					

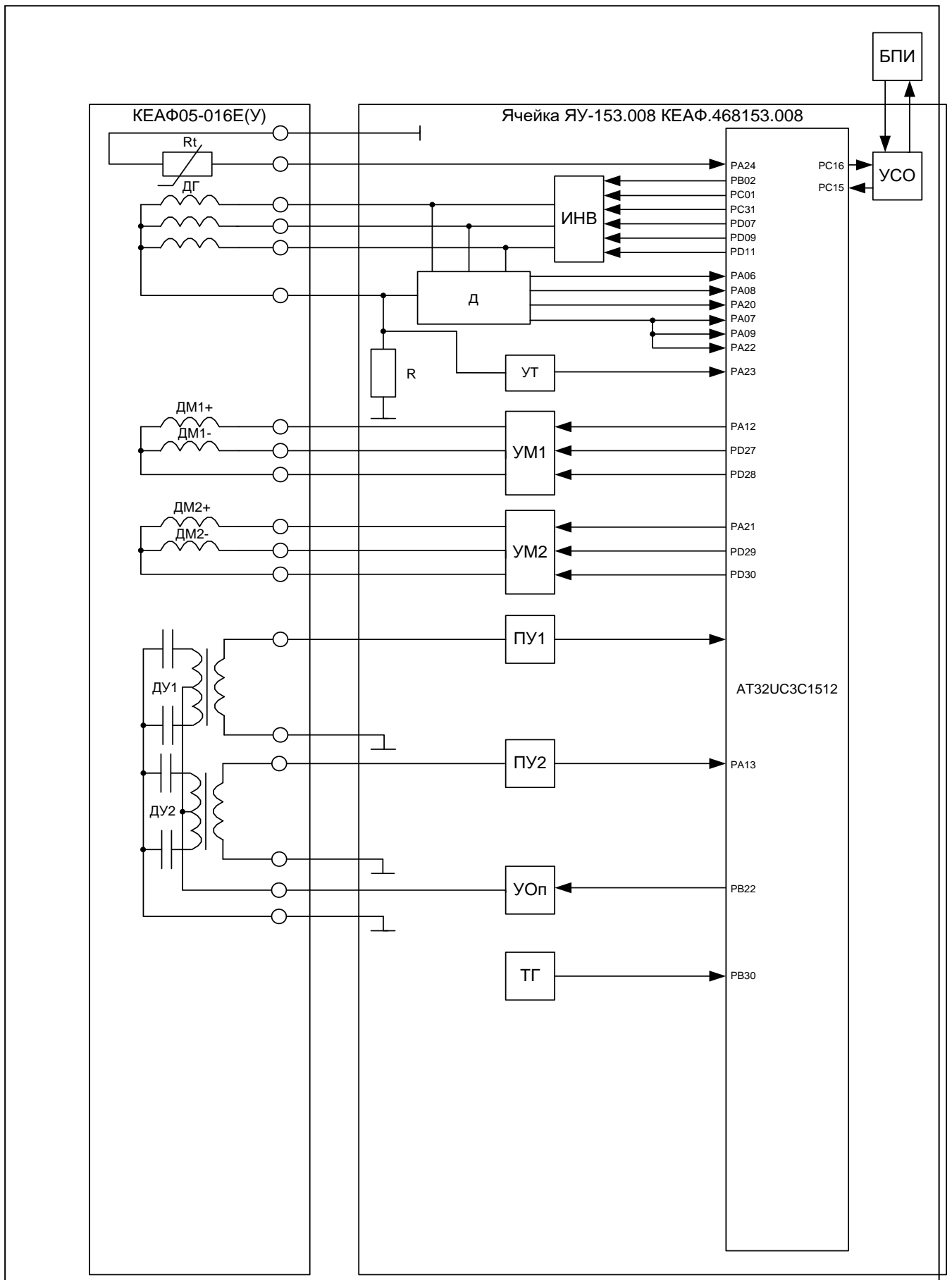


Рисунок 1 - Функциональная схема блока ЯУ-153.008

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

31



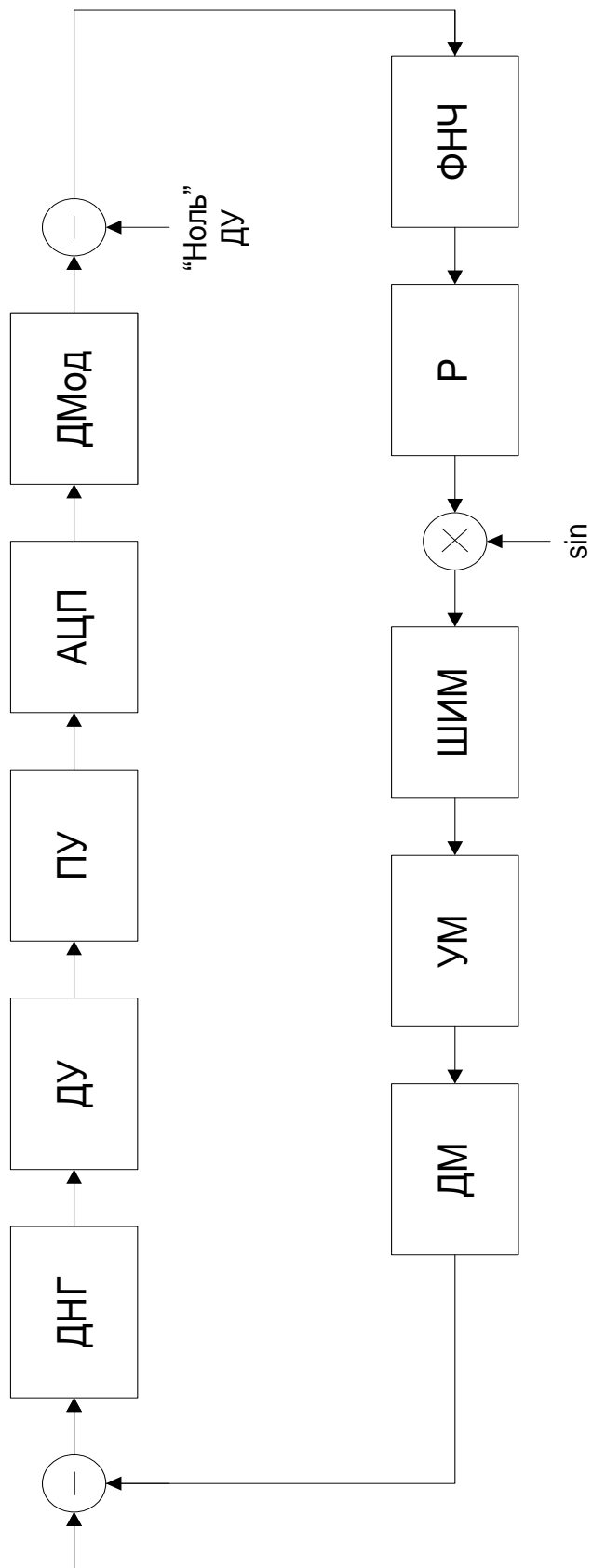


Рисунок 4 – Структурная схема электропривода ДНГ

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ







из компараторов, выход которого подключен к коммутаторам захвата на элементах, ко входу захвата (ICP) микроконтроллера (МК). Компаратор фиксирует прохождение ЭДС через ноль и вырабатывает фронт захвата для схемы захвата МК. Скорость вращения ДГ измеряется методом заполнения импульсами времени между фронтами захвата, формируемый компараторами. Импульсы вырабатывает таймер-счетчик МК. По наступлении события «Захват» схема захвата МК генерирует прерывание – программа МК переходит на п/п обработки прерывания. Число находящихся в регистрах Т/С1 заполняется, далее вычисляется длительность времени между соседними фронтами захвата. Это время – период вращения ротора ДГ. Измеренный период записывается в специальный массив памяти (в режиме разгона в обмотки поступает в ШИМ ток, оперативно сформированным таймером-счетчиком МК). В режиме стабилизации скорости используемый аппаратный ШИМ, формируемый в обработчике пребывания по захвату. В той же п/п происходит коммутация следующих двух обмоток двигателя к источнику питания и свободной обмотки к схеме захвата. Программный регистр СЭП осуществляет осреднение массива скорости, изодромную коррекцию входной величины, вычисление ошибки управления, переключение коэффициента изодрома вычисляет код управления ШИМ.

СЭП гироскопа позволяет:

- задавать скорость вращения ротора гироскопа с целью измерения "нулевых" сигналов с выходов ДУ для последующей их компенсации;
- разгонять ротор гироскопа до скорости  $0,8\omega_{рез}$  и выдачей донесения "n1";
- до скорости  $\omega_{рез}$  и выдачей донесения "n2".

На рисунке 5 показана функциональная схема СЭП.

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

36

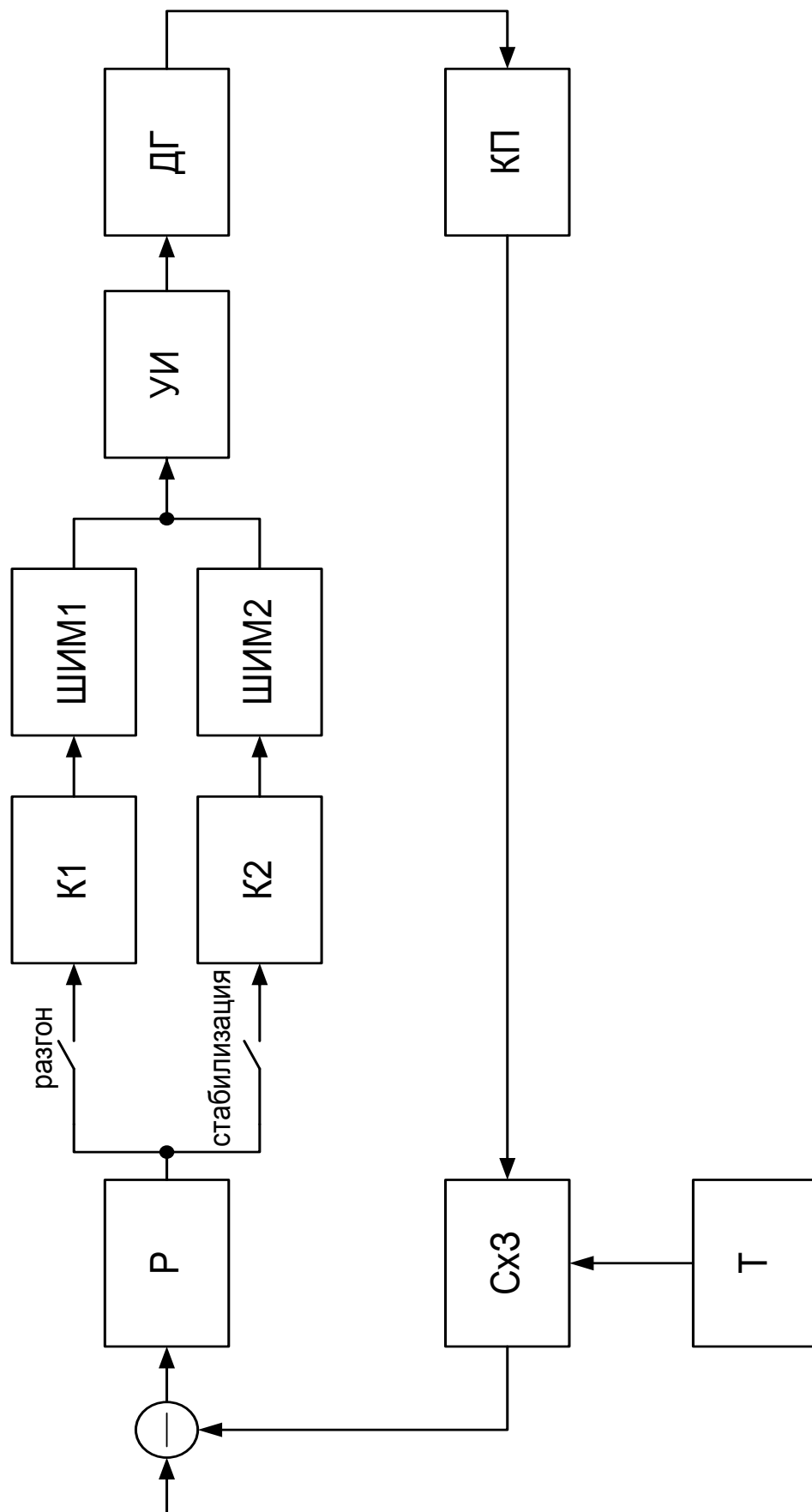


Рисунок 5 – Функциональная схема СЭП

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

37

- Р – регулятор системы;
- К1 – коэффициент усиления системы в режиме "разгон";
- К2 – коэффициент усиления системы в режиме "стабилизация скорости";
- ШИМ1 – ШИМ в режиме "разгон";
- ШИМ2 – ШИМ в режиме "стабилизация скорости";
- УИ – усилитель импульсов;
- ДГ – двигатель гироскопа;
- КП – компаратор;
- СхЗ – схема захвата;
- Т – таймер-счётчик МК.

УИ предназначены для коммутации обмоток ДГ по сигналу МК, усиления логического сигнала управления. Обмотки коммутируются через  $360 / 6 = 60$  градусов. Инверторы подключают две обмотки ДГ, одна из которых подключается к источнику питания +30 В, другая к общему проводу питания. Третья обмотка остаётся свободной.

Вращение ротора создаёт э.д.с. самоиндукции в свободной обмотке двигателя. Э.д.с. самоиндукции поступает на вход одного из компараторов, выход которого подключён СхЗ ко входу захвата МК. Компаратор фиксирует прохождение э.д.с. через ноль ДГ и формирует фронт захвата для схемы захвата МК. Скорость вращения ДГ измеряется методом заполнения импульсами времени между фронтами захвата, формируемыми компараторами. Импульсы вырабатывает таймер-счётчик Т/С1 МК с тактовой частотой 16 МГц. Три компаратора фиксируют шесть переходов э.д.с. самоиндукции свободной обмотки через ноль ДГ за один оборот ротора (по два перехода в каждой фазе), период вращения делится на шесть зон, поэтому частота дискретизации в системе будет равна  $f = f_{\text{вращ}} * 6 = 273 * 6 = 1638$  Гц. На рисунке 6 показано чередование фаз ДГ и переходы э.д.с. самоиндукции через ноль.

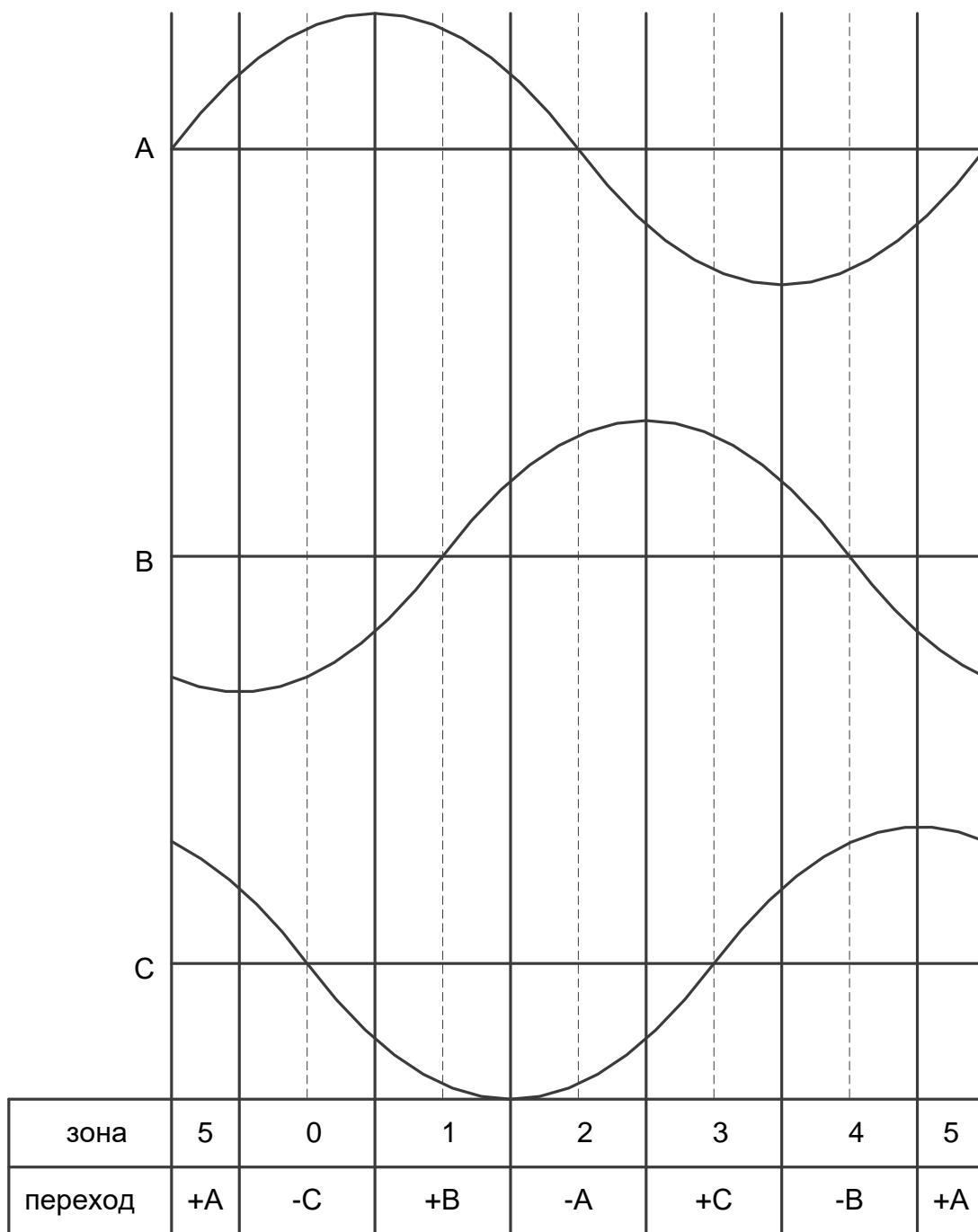


Рисунок 6 – Чередование фаз ДГ

По наступлению события "захват" схема захвата МК генерирует прерывание – основная программа переходит на подпрограмму обработки прерывания. В этой подпрограмме происходит вычисление времени между

соседними фронтами захвата. Это время составляет  $1 / 6$  периода вращения ДГ. Измеренное время записывается в массив памяти.

Подпрограмма регулятора СЭП вычисляет период вращения ротора ДГ путём осреднения массива скорости. Далее регулятор пропускает полученную величину через изодромное звено, вычисляет код управления ШИМ. Тактовая частота регулятора –  $f = f_{\text{вращ}} * 6 = 273 * 6 = 1638$  Гц.

ШИМ СЭП реализован на таймере МК. Загрузка кода управления ШИМ в таймере происходит в подпрограмме прерывания по событию "захват". В режиме "разгон" используется аппаратный ШИМ в режиме Phase Correct PWM, тактовая частота - 16 МГц, опорная частота ШИМ –  $f = 16 \text{ МГц} / 512 = 31250$  Гц. В режиме "стабилизация скорости" используется программно-аппаратный ШИМ, опорная частота  $f = f_{\text{вращ}} * 6 = 273 * 6 = 1638$  Гц, тактовая частота – 500 кГц. Разрешение ШИМ –  $500 \text{ кГц} / 1638 \text{ Гц} = 305$  е.м.р. В этой подпрограмме осуществляется коммутация обмоток ДГ. Период коммутации равен периоду ШИМ-сигнала. ШИМ преобразует код управления в длительность логического сигнала. Далее ШИМ-сигнала усиливается в УИ и подаётся в обмотки ДГ.

### 3 Основная часть

#### 3.1 Структурная схема ячейки управления динамически настраиваемого гироскопа с двигателем гироскопа

Структурная схема ячейки управления представлена в приложении Б.

Контроллер протокола обмена – по командам от блока связи управляет режимами работы устройства. Существуют несколько режимов работы устройства.

По команде извне (БПИ, ЭВМ) «Разгон» производится последовательное переключение обмоток с увеличением скорости переключения. Программа проверяет скорость разгона, если она устанавливается до заданного значения, то происходит начальная ориентация гироскопа (включение всех обмоток, передача в них импульса длительностью 12,24 мс), устанавливается максимальный код управления ШИМ ДГ, включается режим «Трогание», выдача донесения, настройка прерываний таймеров.

В следующем цикле программа начинает непосредственно режим трогания ДГ: программа коммутирует обмотки двигателя в шаговом режиме, причем шаг постепенно уменьшается.

По окончании трогания устанавливается режим «Разгон». Разгон осуществляется путем изменения установки скорости вращения по линейному закону. По достижении скорости  $0,8 \omega_{рез}$  выдается донесение. «Разгон» продолжается заданное количество (секунд) времени.

Режим «стабилизации скорости».

По истечении времени разгона программа переходит в режим «стабилизация скорости». ДГ продолжает некоторое время разгоняться. При достижении скорости  $\omega_{рез}$  выдается донесение.

По команде извне включается режим «Торможение». Торможение осуществляется путем изменения установки скорости вращения. Торможение осуществляется заданное количество времени. Далее снимаются все донесения.

Программа переходит в начальный режим, установка токов ДМ записываются нули, системы ограничения токов, постепенно снимают токи ДМ до нуля.

На блок связи передается информация с емкостного датчика угла, который является рабочий.

Для компенсации температурных изменений в параметры электронной и механической части используется два датчика температур, один находится внутри ДНГ, второй на ячейки управления. Коэффициенты компенсирующие температурные отклонения устанавливаются в процессе испытания ДНГ.

Контролирующее устройство выполняет основные функциональные назначения. Получив информацию после демодуляторов сигнал поступает на фильтр нижних частот.

Датчики угла представляют собой две пластины, находящиеся с разных сторон маховика. Маховик электрически соединен с общей цепью устройства. Средняя точка первичной обмотки трансформатора соединена с выходом генератора опорной частоты. Крайние точки, через вторичные обкладки, соединены с общей цепью. Когда емкости конденсаторов равны, индуктивные поля компенсируют друг друга, на вторичной обмотке отсутствие вторичной индуктивности. В случае если одна из емкостей больше другой, индуктивные поля через первичную обмотку, перестает компенсировать друг друга, в результате чего наводится индуктивность на вторичную обмотку и появляется не нулевое напряжение на вторичной обмотке, что свидетельствует об отклонении маховика от нулевого значения.

Скорость вращения маховика определяется при помощи наведенной индукции в одной из обмоток статора. Используемая для этой цели обмотка переключается в зависимости от фазы статора.

### 3.2 Выбор структурных элементов

Блок связи (БС) обеспечивает связь с устройствами верхнего уровня по интерфейсу manchester. Он принимает данные с вышестоящего устройства, передает обратно данные и команды. Информация поступает на контроллер протокола обмена, который при запросе сравнивает адрес с тем, который записан.

Контроллер протокола обмена – по командам от блока связи управляет режимами работы устройства.

По команде «Разгон» производится последовательное переключение обмоток с увеличением скорости переключения. Программа проверяет скорость разгона, если она устанавливается до заданного значения, то происходит начальная ориентация гироскопа, устанавливается максимальный код управления ШИМ ДГ, включается режим «Трогание», выдача донесения, настройка прерываний таймеров.

В следующем цикле программа начинает непосредственно режим трогания ДГ: программа коммутирует обмотки двигателя в шаговом режиме, причем шаг постепенно уменьшается.

По окончании трогания устанавливается режим «Разгон». Разгон осуществляется путем изменения установки скорости вращения по линейному закону. По достижении скорости  $0,8 \omega_{рез}$  выдается донесение. «Разгон» продолжается заданное количество (секунд) времени.

По истечении времени разгона программа переходит в режим «стабилизация скорости». ДГ продолжает некоторое время разгоняться. При достижении скорости  $\omega_{рез}$  выдается донесение.

По команде извне включается режим «Торможение». Торможение осуществляется путем изменения установки скорости вращения. Торможение осуществляется заданное количество времени. Далее снимаются все донесения. Программа переходит в начальный режим, установка токов ДМ записываются нули, системы ограничения токов, постепенно снимают токи ДМ до нуля.



На блок связи передается информация с емкостного датчика угла, который является рабочий.

Для компенсации температурных изменений в параметры электронной и механической части используется два датчика температур, один находится внутри ДНГ, второй на ячейки управления. Коэффициенты компенсирующие температурные отклонения устанавливаются в процессе испытания ДНГ.

Контролирующее устройство выполняет основные функциональные назначения. Получив информацию после демодуляторов сигнал поступает на фильтр нижних частот.

Датчики угла представляют собой две пластины, находящиеся с разных сторон маховика. Маховик электрически соединен с общей цепью устройства. Средняя точка первичной обмотки трансформатора соединена с выходом генератора опорной частоты. Крайние точки, через вторичные обкладки, соединены с общей цепью. Когда емкости конденсаторов равны, индуктивные поля компенсируют друг друга, на вторичной обмотке отсутствие вторичной индуктивности. В случае если одна из емкостей больше другой, индуктивные поля через первичную обмотку, перестает компенсировать друг друга, в результате чего наводится индуктивность на вторичную обмотку и появляется не нулевое напряжение на вторичной обмотке, что свидетельствует об отклонении маховика от нулевого значения.

Скорость вращения маховика определяется при помощи наведенной индукции в одной из обмоток статора. Используемая для этой цели обмотка переключается в зависимости от фазы статора.

### 3.3 Разработка схемы электрической принципиальной.

Схема электрическая принципиальная изображена в приложении В.

Перечень элементов представлен в приложении Г.

Для начала необходимо определиться с требуемыми задачами, которые должна решить схема электрическая принципиальная. Одной из наиболее очевидных задач является разгон ротора синхронного двигателя, с последующим поддержанием требуемой скорости вращения.

Двигатель является трёхфазным синхронным двигателем. Ротор представляет собой постоянный многополюсный магнит. Требуется поочерёдное переключение обмоток. Кроме того, необходимо контролировать скорость вращения ротора. Коммутация обмоток происходит при помощи драйверов верхнего и нижнего ключей  $D9 \div D11$ , при помощи диодов  $V1 \div V3$  и конденсаторов  $C45 \div C47$  (обеспечивается умножение напряжения до величины, необходимой для открытия верхних ключей полумостов). Для управления датчиками момента применены по два операционных усилителя  $D14:1, D14:2$  и  $D15:1, D15:2$  на каждый канал соответственно. Силовой выход обеспечивается транзисторными полумостоками  $V10 \div V13$ . Гальваническая развязка обеспечивается микросхемами  $D12, D13$ .

На микросхемах  $D1, D6$  и  $D2, D7$  выполняется усиление и фильтрация сигнала с датчика угла. Усиление и фильтрация опорного сигнала для датчиков угла реализована на операционном усилителе  $D5$ .

При включении питания программа микроконтроллера (МК) производит инициализацию устройств МК. Затем переходит в начальный режим.

Технологический обмен.

ЭВМ непрерывно посылает команды запроса данных (частота запроса примерно 20 Гц). Программа МК производит декодировку команды, заполняет массив передачи данных соответствующие команды данными, инициализирует их передачу и передает.



В следующем цикле программа начинает непосредственно режим трогания ДГ: программа коммутирует обмотки двигателя в шаговом режиме, причем шаг постепенно уменьшается.

По окончании трогания снимается флаг донесения и устанавливается флаг режима «Разгон». Разгон осуществляется путем изменения установки скорости вращения по линейному закону. По достижении скорости  $0,8 \omega$  рез. выдается донесение. «Разгон» продолжается заданное количество (секунд) времени.

По истечении времени разгона устанавливается бит регулятора. Программа переходит в режим «стабилизация скорости». ДГ продолжает некоторое время разгоняться. При достижении скорости  $\omega$  рез выдается донесение.

По команде извне «Торможение» включает режим «Торможение». Торможение осуществляется путем изменения установки скорости вращения. Торможение осуществляется заданное количество времени. Далее снимаются все донесения, обнуляется статусный регистр и регистр работы гироскопа. Программа переходит в начальный режим, установка токов ДМ записываются нули, системы ограничения токов, постепенно снимают токи ДМ до нуля.

Система обеспечения функционирования МК:

– ТГ G1 выполнен на микросхеме ОСМ ГК-108-П15ГР-316М АФТП.435520.007ТУ ПО.070.052, обеспечивает тактирование и синхронизацию работы контроллера и других устройств модуля;

Система задействования ДУ:

– Генератором опорного сигнала служит таймер-счётчик МК, на его выходе формируется сигнал в виде меандра с частотой 235 кГц;

– УОп выполнен на операционном усилителе (ОУ) ОР37 (D5 ÷ D7). Фильтрация нижних частот (до 100Гц) осуществляется цепью R18,C21, фильтрация верхних частот осуществляется цепью R16,C7. УОп служит для возбуждения измерительного LC-моста ДУ.

– ПУ предназначен для усиления сигнала с дифференциального выхода LC-моста. Выполнен в виде двухкаскадного усилителя. Первый каскад –

измерительный усилитель AD8221 (D1), второй каскад – ОУ ОР37 (D6) – полосовой усилитель, цепь R16,C7 задерживает частоты выше опорной частоты, цепь R18,C21 задерживает нижние частоты. ПУ смещает входной сигнал на +2,5 В. Резистор R16 – токоограничительный.

Усиленный сигнал с ДУ поступает на вход МК. После аналого-цифрового преобразования МК производит цифровую обработку сигнала и выдаёт ШИ сигнал управления, который поступает на УМ.

УМ служит для подавления несущей частоты логического ШИ-сигнала управления, усиления и преобразования его в постоянное биполярное напряжение, прикладываемое к обмотке ДС и масштабному сопротивлению.

										Лист
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ					48

### 3.4 Расчёт схемы электрической принципиальной

#### 3.4.1 Расчет УОп.

Операционный усилитель ОР37:

1)полоса пропускания 3 МГц

2)входное сопротивление 4 МОм

Исходные данные:

- нижняя частота пропускания  $f = 100 \text{ Гц}$ ;
- верхняя частота пропускания  $f = 300 \text{ кГц}$ ;
- коэффициент усиления  $K=2$ .

Выбираем из ряда E24  $C24=220 \text{ нФ}$ .

$$R22 = \frac{1}{2\pi \cdot C24 \cdot f_H} = \frac{1}{2\pi \cdot 220 \cdot 10^{-9} \cdot 100} = 6828 \text{ Ом}$$

Выбираем из ряда E48  $R22=6,81 \text{ кОм}$ .

$$R23 = R22 \cdot K = 6810 \cdot 2 = 13620 \text{ Ом}$$

Выбираем из ряда E48  $R23=13,3 \text{ кОм}$ .

$$C19 = \frac{1}{2\pi \cdot R23 \cdot f_B} = \frac{1}{2\pi \cdot 13300 \cdot 300000} = 39,9 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 39,9 \text{ пФ}$$

Выбираем из ряда E24  $C19=39 \text{ пФ}$ .

#### 3.4.2 Расчет ПУ входного сигнала.

Исходные данные:

Полоса пропускания сигнала  $3600 \text{ Гц} \div 500 \text{ кГц}$

Коэффициент усиления  $500 \text{ В/В}$

ПУ состоит из инструментального усилителя AD8221

Диапазон питания:  $\pm 2,3 \div \pm 18 \text{ В}$

Температурный диапазон: от минус 40 до +85 градусов

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

49

Коэффициент ослабления синфазного сигнала 80дБ на частоте 10кГц  
(коэффициент усиления (КУ) = 1)

Полоса пропускания от 0 до 800 кГц, при КУ = 1

Низкий шум – 8нВ/√Гц

### 3.4.3 Расчет КУ

Выберем коэффициент усиления равному 5, тогда  
 $R8 = 49,4\text{кОм} / (5 - 1) = 12,35\text{кОм}$

Выбираем из ряда E24 резистор 12кОм

### 3.4.4 Усилители ОР37 микросхемы (D6, D7).

Расчет КУ

$$K_{ус} = R18 / R16 = 20\text{кОм} / 2\text{кОм} = 10$$

ФВЧ на элементах C7,R16

Частота среза

$$f = 1 / RC2\pi = 1 / 2\text{кОм} * 22 \text{ нФ} * 2 * \pi = 3617 \text{ Гц}$$

Расчет ФНЧ на элементах R18,C21

Частота среза

$$f = 1 / RC2\pi = 1 / 20\text{кОм} * 15 \text{ пФ} * 2 * \pi = 530516 \text{ Гц}$$

### 3.4.5 Делитель напряжения

Делитель напряжения на элементах R12,R13

Подает на положительный вход усилителя D6 (ОР37) +2,5В, тем самым смещает входной сигнал в середину диапазона входного напряжения АЦП.

### 3.4.6 Расчёт УМ.

Операционный усилитель ОР213:

Полоса пропускания – 3,4 МГц

Исходные данные:

- максимальный ток МДС  $I_{МДС} = 60\text{мА}$ ;
- сопротивление обмотки МДС – 107 Ом;
- опорное напряжение АЦП D1, D2  $U_{оп} = 5\text{В}$ .

Сопротивление масштабного резистора:

$$R_M = \frac{2\text{В}}{60\text{мА}} = 33\text{Ом}$$

В качестве масштабного сопротивления служат три резистора R4, R5, R6, включённых параллельно номиналом 101 Ом, выбранным из ряда E192.

Максимальное напряжение на обмотке МДС:

$$U = I_{МДС} \cdot (R_{МДС} + R_M) = 60 \cdot 10^{-3} \cdot (107 + 33) = 8,4\text{В}$$

Для формирования на выходе УМ биполярного напряжения входной сигнал  $\Delta U = 5\text{В}$  вычитается из половины опорного напряжения  $+2,5\text{В}$ . Максимальное напряжение на входе составляет  $\pm 2,5\text{В}$ . Для обеспечения вычитания сигналов, а также для подавления синфазной помехи R15=R18, R17=R19.

Коэффициент усиления УМ по напряжению:

$$K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{10\text{В}}{2,5\text{В}} = 4 \quad K = \frac{R19}{R18} = \frac{100\text{кОм}}{20\text{кОм}} = 5$$

Выбираем R19=105 кОм, R18=20 кОм, R15=20 кОм, R17=105 кОм.

Частота среза ФНЧ – менее 100 Гц.

$$\text{Выбираем } C22=22\text{ нФ. } f_{cp} = \frac{1}{2\pi \cdot R19 \cdot C22} = \frac{1}{2\pi \cdot 105000 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 69\text{Гц}.$$

Второе звено ФНЧ C21=22 нФ, R16=10 кОм

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi \cdot R16 \cdot C21} = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 723\text{Гц}$$

Подтягивающие резисторы R24 – R33 выбраны номиналом 4,7 кОм, служат для предотвращения конфликтов с синхронными портами АЦП D1, D2.

Конденсаторы C9 ÷ C12, C16, C17, C19, C20, C24, C25, C27, C28, ёмкостью 220 нФ – фильтрующие по сигнальным цепям.



## Заключение

В ходе работы над выпускной квалификационной работой была разработана система управления.

Были исследованы достоинства и недостатки различных способов реализации.

В блоке реализованы следующие функциональные системы и устройства:

- система обеспечения функционирования контроллера;
- система съёма информации с датчиков угла;
- система электропривода чувствительного элемента (ЧЭ);
- устройство управления датчиками момента (ДМ);
- устройство измерения температуры корпуса ДНГ;
- устройство измерения тока в обмотках электропривода;
- устройство обмена с блоком БПИ;

Все требования технического задания выполнены в полном объёме.

## Список используемой литературы

1. Виниченко Н.Т., Кацай Д.А., Лысова А.А. Теория гироскопических приборов, учебное пособие. – Челябинск: ЮурГУ, 2010. - 141 с.
2. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем, СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2001. — 150 с. — ISBN 5-900780-30-9.
3. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация, М.: Наука, 1976. — 672 с.
4. Ишлинский А.Ю., Борзов В.И., Степаненко Н.П. Лекции по теории гироскопов, М.: Изд.-во МГУ, 1983. - 248 с.
5. Коновалов С.Ф. и др. Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. III. Акселерометры, датчики угловой скорости, интегрирующие гироскопы и гироскопические интеграторы, Коновалов С.Ф., Никитин Е.А., Селиванова Л.М. — Учеб. пособие. Под ред. Д.С. Пельпора. — М.: Высш. школа, 1980. — 128 с., ил.
6. Крылов А.Н., Крутков Ю.А. Общая теория гироскопов и некоторых технических их применений, М. : 1932. -400 с
7. Микроконтроллеры Microchip. Практическое руководство. – 2-е изд. испр. и дополн. / В.С. Яценков – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 280 с.: ил.
8. Лунц Я.Л. Введение в теорию гироскопов, М.: Наука, 1972. – 296 с.
9. Метелицын И.И. Теория гироскопа. Теория устойчивости. Избранные труды, М.: Наука, 1977. – 130 с.
10. Павлов В.А. Гироскопический эффект, его проявления и использование, 1-е изд., – Л.: Судпромгиз, 1961 – 164 с.
11. Шепелев Н.И. Сборка, регулировка и испытание гироскопических приборов, М.: Машиностроение, 1977. — 192 с.

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата

27.03.04.2017.171.00.00.ПЗ

Лист

53

12. Сломьянский Г.А. и др. Детали и узлы гироскопических приборов. Атлас конструкций, М.: Машиностроение, 1975. — 364 с.
13. Сайдов П.И. Теория гироскопов. Часть 1, М.: Высшая школа, 1965. — 472 с.
14. Ригли У., Холлистер У., Денхард У. Теория, проектирование и испытания гироскопов, Москва: Мир, 1972. — 416 с.
15. Пельпор Д.С., Михалев И.А., Бауман В.А. Гироскопические системы. Гироскопические приборы и системы, Учебник для вузов. Под ред. Д.С. Пельпора. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1988. — 424 с.
16. Павлов В.А. Теория гироскопа и гироскопических приборов, Л.: Судостроение, 1964. — 284 с.
17. Резисторы: Справочник / Ю. Н. Андреев, А. И. Антонян, Д. М. Иванов и др.; Под ред. И. И. Четверткова. – М.: Энергоиздат. – 352 с.: ил.
18. Конденсаторы: Справочник / И. И. Четвертков, М. Н. Дьяконов, В. И. Присняков и др.; Под ред. И. И. Четверткова, М. Н. Дьяконова – М.: Радио и связь, 1993.– 392с.: ил.
19. Шевкопляс Б.В., Микропроцессорная структура. Инженерные решения. Справочник, - М.: Радио и связь, 1993.