

Работа № 2. ПОВОРОТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Цель работы - изучение поворотных трансформаторов (ПТ), применяемых в гироскопической технике.

После выполнения работы студент должен:

- знать устройство, принцип действия, основные характеристики ПТ, варианты его применения в гироскопической технике;
- знать состав контрольно-измерительной аппаратуры, применяемой в работе, целевое назначение каждого прибора и устройства, и уметь пользоваться ими;
- знать методику проведения эксперимента, уметь рассчитывать характеристики ПТ;
- иметь отчет по работе, содержащий:
 - 1) название работы и ее цель;
 - 2) конспективное изложение сведений, заинтересовавших студента;
 - 3) структурную схему испытаний ПТ;
 - 4) заполненную результатами измерений табл. 3;
 - 5) графики $U_c = f(\alpha_{pc})$, $U_n = f(\alpha_{pc})$;
 - 6) формулы для расчета и результаты расчета по ним основных характеристик ПТ. Класс точности ПТ, определенный студентом;
 - 7) алгоритм работы амплитудного преобразователя угол-код на основе ПТ;
 - 8) программу расчета углов на языке Фортран и результаты расчета на ЭВМ ошибок преобразования.

1. Краткие теоретические сведения

В гироскопической технике типичной является задача регистрации угла поворота корпуса гироскопа или гиросtabilизатора (установленного на движущемся объекте) относительно оси, стабилизируемой гироскопом. Часто этот угол должен составлять больше 360° . Простым и надежным устройством для регистрации углов, больших 360° , является круглая шкала, устанавливаемая на оси, стабилизируемой гироскопом, и индекс, нанесенный на корпус прибора. Однако в связи с широким внедрением в практику автоматических гироскопических систем (автопилоты, автоштурманы) гироскопы с визуальным съемом показаний (со шкалами) вытеснены гиросtabilизаторами-датчиками, информация с которых снимается в виде электрических сигналов.

Линейно преобразовать большой угол поворота ($> 360^\circ$) в

электрический сигнал не просто. Простейшее решение этой задачи, с помощью кругового потенциометра, оказалось неприемлемым для современной гироскопической техники ввиду низкой надежности потенциометрических датчиков, имеющих подвижной механический контакт. Других, столь же простых решений пока не предложено. Поэтому для регистрации больших углов в современных гироскопах и гиросtabilизаторах применяются достаточно сложные системы, построенные на основе поворотных трансформаторов.

В литературе используются и другие названия ПТ: вращающиеся трансформаторы (ВТ), синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ), синусно-косинусные трансформаторы (СКТ).

Поворотные трансформаторы - многоцелевые элементы - широко применяются в вычислительных системах для решения тригонометрических задач.

В гироскопической технике поворотные трансформаторы используются для регистрации углов отклонения корпусов движущихся объектов относительно осей, стабилизируемых гироскопами; в качестве преобразователей координат в 3-осных гиросtabilизаторах;

в качестве датчиков первичной информации в преобразователях угол-цифровой код; в последнем случае ПТ может использоваться в режимах фазовращателя или амплитудного преобразователя.

ПТ устанавливаются на осях стабилизации гиросtabilизаторов и на выходных осях курсовых гироскопических приборов.

2. Конструкция и принцип действия ПТ

Поворотные трансформаторы выполняются в виде электрических машин, на статорах и роторах которых расположены соответственно первичные и вторичные обмотки. В гироскопической технике чаще применяются плоские конструкции ПТ ($D/L > 1$), так как они лучше вписываются в конструкцию гироскопического прибора. Конструктивно ПТ могут представлять собой комплект, состоящий из статора и ротора (рис. 7а), и самостоятельный узел, в котором ротор может поворачиваться относительно статора на собственных шарикоподшипниковых опорах (рис. 7б).

Магнитопроводы статора и ротора ПТ набирают из листов электротехнической стали (Сталь И621) или пермаллоя (50 Н). Магнитопроводы имеют пазы, в которые укладываются статорные и роторные обмотки. На статоре и роторе размещают по две обмотки, магнитные оси которых взаимно перпендикулярны (рис. 8а). Обмотки

статора выполняют одинаковыми, т.е. с одинаковым числом витков, одинаковым проводом и по одной схеме. Для определенности обмотку статора C_1C_2 иногда называют главной, обмотку C_3C_4 - вспомогательной или квадратурной. Обмотки ротора также выполняют одинаковыми; обмотка P_1P_2 называется синусной, обмотка P_3P_4 - косинусной.

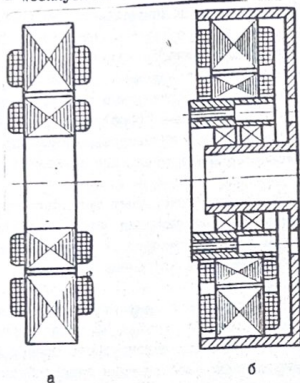


Рис. 7

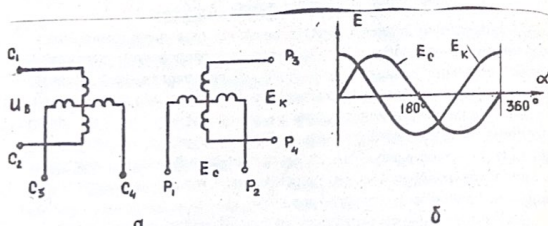


Рис. 8

При подключении одной из статорных обмоток, например главной C_1C_2 , к источнику переменного напряжения $u = U_m \sin \omega t$ в соответствии с принципом действия трансформатора в роторных обмотках будут наводиться ЭДС E . Если ПТ работает в режиме холостого хода, то амплитуды наведенных ЭДС будут пропорциональны синусу угла поворота ротора α относительно статора (рис. 8б)

$$E_c = \kappa_T \cdot U_m \cdot \sin \alpha; \quad E_k = \kappa_T \cdot U_m \cdot \cos \alpha,$$

где κ_T - коэффициент трансформации.

Если роторные обмотки включены на конечную нагрузку $Z_c \neq \infty$, $Z_k \neq \infty$ (Z_c , Z_k - полные сопротивления нагрузки), то идеальные синусные и косинусные зависимости искажаются. Причиной искажения являются токи в роторных обмотках ПТ.

Для снижения искажений используют прием симметрирования ПТ. Сущность симметрирования состоит в подборе оптимальных значений сопротивлений нагрузок квадратурной обмотки статора (первичное симметрирование) и косинусной обмотки ротора (вторичное симметрирование).

Поворотные трансформаторы, у которых при повороте ротора на 360° выходной сигнал изменяется на один период (рис. 8б), называются двухполюсными.

Для повышения точности передачи угла и преобразования угла в цифровой код применяются также многополюсные поворотные трансформаторы. Принципиально они устроены так же, как и двухполюсные, но только в пазы статора и ротора уложены многополюсные обмотки.

Выходные сигналы многополюсного ПТ, работающего в режиме холостого хода, могут быть представлены в виде

$$E_c = \kappa_T \cdot U_m \cdot \sin p\alpha; \quad E_k = \kappa_T \cdot U_m \cdot \cos p\alpha,$$

где p - число пар полюсов многополюсного ПТ.

3. Основные характеристики ПТ

Основными выходными характеристиками ПТ являются: максимальное значение выходного напряжения $U_{c,k}^m$; крутизна выходного напряжения

$$\kappa_n = \frac{d \cdot U_{c,k}}{d\alpha} \quad \text{при } \alpha \rightarrow 0 \text{ - для синусных обмоток;}$$

$$\text{при } \alpha \rightarrow 90^\circ \text{ - для косинусных обмоток;}$$

коэффициент трансформации

$$K_T = \frac{U_{с,к}}{U_M}$$

где U_M - амплитуда напряжения возбуждения.

Погрешности работы ПТ в зависимости от их физической природы можно разделить на четыре группы.

1. Погрешности, определяемые принципом работы в данном режиме. У синусно-косинусных ПТ - это отклонение выходной характеристики от идеальной синусоидальной из-за неточности симметрирования.

2. Погрешности, определяемые конструкцией. Они вызываются в основном несинусоидальностью распределения намагничивающих сил обмоток вдоль окружности машины, изменением магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие наличия пазов на поверхностях статора и ротора, нелинейностью кривой намагничивания материала магнитопровода и явлением гистерезиса.

Уменьшение этих погрешностей достигается применением специальных "синусных" схем обмоток, скосом пазов статора или ротора на 1...1,5 зубцовых деления, выбором режима работы поворотного трансформатора, исключающего возможность насыщения материала магнитопровода.

3. Погрешности, определяемые технологией изготовления. Основными источниками этих погрешностей являются эксцентриситет расточек статора и ротора, асимметрия параметров материала магнитопровода, неточность расположения и скоса пазов, неидеальность изготовления и монтажа обмоток и др.

Технологические погрешности, так же как и в индукционных датчиках угла, приводят к появлению остаточных (или нулевых) сигналов U_0 . В общем случае остаточный сигнал U_0 состоит из синфазной $U_{с,н}$ и квадратурной $U_{к,н}$ составляющих на частоте питания ПТ, а также высших гармонических составляющих, начиная с удвоенной частоты питания.

Синфазная составляющая может быть устранена дополнительным разворотом ротора относительно его расчетного нулевого положения; квадратурная составляющая разворотом ротора не устраняется. В результате, при наличии остаточного сигнала U_0 :

- а) выходные сигналы ПТ никогда не обращаются в нуль, а лишь достигают некоторых минимальных значений $U_{0,мин} \approx U_{к,н}$;
- б) угловые положения ротора, при которых достигаются минимальные выходные сигналы, точно не соответствуют углам, кратным 90° .

4. Погрешности, определяемые условиями эксплуатации. В основном, это изменение температуры окружающей среды и нестабильность параметров питания.

По точности работы поворотные трансформаторы делятся на шесть классов. При определении классов точности учитываются следующие показатели.

Ошибка Δ_{φ} в процентах в выработке функциональной зависимости. Например, для синусоидальной зависимости Δ_{φ} рассчитывают по формуле (для косинусоидальной зависимости формула аналогична)

$$\Delta_{\varphi} = \frac{U - U_M}{U_{с,к}} 100\% = \frac{U - U_{с,к} \sin \alpha}{U_{с,к}} 100\% = \left(\frac{U}{U_{с,к}} - \sin \alpha \right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где U - напряжение, снимаемое с синусной (косинусной) обмотки ПТ при повороте его ротора относительно статора на угол α ;

U_M - идеальное значение напряжения U .

Асимметрия нулевых точек $\Delta_{н,т}$ - это показатель, оценивающий тот физический факт, что угол $\alpha_{мин}$, при котором имеет место минимальный выходной сигнал синусной или косинусной обмотки ПТ, не равен углу, кратному 90° . Асимметрия нулевых точек

$$\Delta_{н,т} = 0,5 \left\{ \left| n 90^\circ - \alpha_{мин} \right| > 0 \mid \left| n 90^\circ - \alpha_{мин} \right| < 0 \mid \right\}_{макс}, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3$ - коэффициент кратности.

Максимальное значение ЭДС, наведенное в квадратурной обмотке статора (ротора) при работе ПТ в режиме холостого хода

$$\Delta_E = \frac{|U_{к0}|_{макс}}{U_E} 100\%, \quad (3)$$

где U_E - напряжение возбуждения ПТ; $U_{к0}$ - напряжение на зажимах квадратурной обмотки.

Нулевой сигнал (остаточный) в нулевых точках оценивается относительным показателем Δ_{U_0} :

$$\Delta_{U_0} = \frac{U_0}{U_{с,к}} 100\%. \quad (4)$$

Разность коэффициентов трансформации синусной и косинусной обмоток вычисляется в процентах

$$\Delta K_T = \left| \frac{K_{T, \text{макс}} - K_{T, \text{мин}}}{K_{T, \text{макс}}} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $K_{T, \text{макс}}$ — больший из коэффициентов трансформации.
Класс точности поворотных трансформаторов устанавливается их селекцией по наилучшему из параметров.

Числовые значения параметров, соответствующих различным классам точности поворотных трансформаторов, приведены в табл. I.

Таблица I

Параметр точности	Класс точности					
	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
Погрешность отображения синусоидальной зависимости, %	+0,005	+0,01	+0,02	+0,05	+0,1	+0,2
Асимметрия нулевых точек	+10"	+20"	+40"	+1°40'	+3°20'	+6°40'
ЭДС квадратурной обмотки, %, не более	0,04	0,08	0,12	0,3	0,6	1,2
Остаточный сигнал, %, не более	0,003	0,006	0,01	0,025	0,05	0,1
Разность коэффициентов трансформации	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2

4. Применение ПТ в гироскопической технике

ПТ как фазовращатель. ПТ могут использоваться в качестве двухфазных и однофазных фазовращателей.

Схема двухфазного фазовращателя представлена на рис. 9.

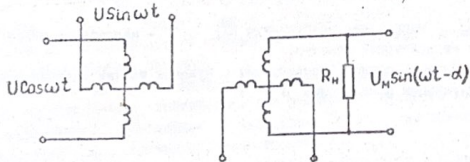


Рис. 9

Роторные обмотки подключены к двум источникам питания, напряжения которых сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90°.

Одна из статорных обмоток подключена к сопротивлению нагрузки R_n . Фаза напряжения, снимаемого с сопротивления R_n , в идеальном случае пропорциональна углу поворота ротора α , т.е.

$$U_n = U_m \sin(\omega t - \alpha).$$

В реальных условиях возможны отклонения от идеального случая по параметрам источников питания (сдвиг по фазе не равен 90°, не соблюдается равенство амплитуд, напряжение несинусоидально, частота нестабильна) и по параметрам фазовращателя (неравенство активных и индуктивных сопротивлений, неперпендикулярность магнитных осей первичных обмоток, неравномерность зазора между ротором и статором). Эти отклонения вызывают ошибки двухфазных фазовращателей. Для снижения ошибок применяют автоматические устройства, стабилизирующие амплитуды и фазы источников питания.

Схема однофазного фазовращателя представлена на рис. 10.

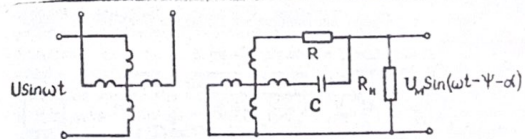


Рис. 10

Последовательно со статорными обмотками поворотного трансформатора включаются пассивные электроэлементы: резистор R и конденсатор C . В идеальном случае фаза выходного напряжения, снимаемого с нагрузочного сопротивления R_n , зависит от угла поворота ротора α и параметров фазосдвигающей цепи (R, C), вызывающей дополнительный фазовый сдвиг ψ , т.е.

$$U_n = U_m \sin(\omega t - \psi - \alpha).$$

Наибольшую ошибку в работе однофазных фазовращателей вызывает нестабильность частоты питающего напряжения. Для снижения ошибок используют стабилизированные по частоте электронные источники питания и специальные сложные корректирующие и компенсирующие устройства.

Фазовращатели, построенные на основе поворотных трансфор-

моторов, в которых используются оптимальные по сложности стабилизирующие и компенсирующие устройства, имеют ошибку преобразования угла в фазу порядка $15... 30'$.

Одноканальные системы дистанционной передачи угла на ПТ. К системам дистанционной передачи угла вообще и, в частности, на ПТ предъявляют требования:

к статическим ошибкам, т.е. ошибкам воспроизведения ведомым валом углов поворота ведущего вала β_1 при повороте последнего на различные фиксированные углы;

к динамическим ошибкам, т.е. ошибкам воспроизведения ведомым валом углов поворота ведущего вала при непрерывном вращении последнего;

к свойствам самосинхронизации, т.е. способности системы дистанционной передачи угла обеспечивать только одно устойчивое согласование положение ведомого вала при повороте ведущего в пределах 360° .

Типичная система дистанционной передачи угла на ПТ представлена на рис. II.

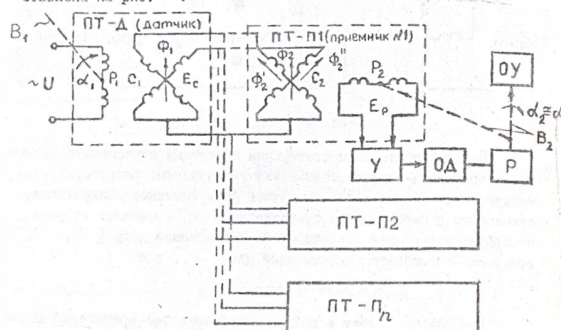


Рис. II

Основными элементами этой передачи являются: поворотный трансформатор-датчик (ПТ-Д), состоящий из ротора P_1 и статора C_1 , провода дистанционной передачи (см. рис. II, пунктир); поворот-

ный трансформатор-приемник (ПТ-П), также состоящий из ротора P_2 и статора C_2 ; система обработки объекта управления (ОУ) (потребителя), включающая в себя усилитель (У); обрабатывающий двигатель (ОД); механический редуктор (Р); вал β_2 . Обычно сигнал с ПТ-датчика одновременно поступает на несколько ПТ-приемников ПТ-П2...ПТ-Пn.

В гироскопических приборах роторы ПТ-датчиков устанавливаются, например, на осях наружных рам шарданных подвесов курсовых приборов, на осях стабилизации гиросtabilизаторов; статоры ПТ-датчиков — на корпусах гироскопических приборов, в некоторых случаях — на наружных рамках шарданных подвесов.

Рассмотрим работу системы дистанционной передачи угла (см. рис. II). При подключении обмотки ротора P_1 ПТ-датчика к сети переменного тока в ней возникает электрический ток, создающий в магнитопроводе ПТ-датчика магнитный поток Φ_1 , направление которого совпадает с магнитной осью обмотки P_1 . Поток Φ_1 наводит в обмотках статора ЭДС, амплитуды которых пропорциональны проекциям потока Φ_1 на магнитные оси обмоток статора. При соединении обмоток статора ПТ-датчика с обмотками статора ПТ-приемника электрическая цепь замыкается, и в обмотках статора ПТ-приемника появляются электрические токи. Эти токи создают в магнитопроводе ПТ-приемника магнитные потоки Φ_2' и Φ_2'' , направление которых совпадает с направлением магнитных осей обмоток статора ПТ-приемника. Эти потоки, суммируясь, дают результирующий поток Φ_2 , который направлен так же, как и магнитный поток Φ_1 . Поток Φ_2 наводит в роторной обмотке P_2 ПТ-приемника ЭДС E_p , которая подается на вход электронного усилителя У. Характер изменения амплитуды напряжения на входе усилителя (U_y) в зависимости от угла θ рассогласования ведомого и ведущего валов показан на рис. I2.

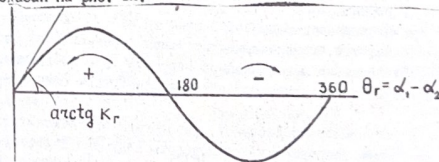


Рис. I2

Выходной сигнал усилителя подается на отработывающий двигатель ОД, который через редуктор P начинает поворачивать ротор III-приемника и объект управления. Поворот будет происходить до тех пор, пока ЭДС E_p не станет близка к нулю, т.е. когда магнитная ось обмотки ротора R_p не станет перпендикулярной к направлению потока Φ_p , или (с точностью до ошибки дистанционной передачи) к направлению магнитной оси обмотки ротора III-датчика.

Таким образом, в идеальном случае каждый угол поворота α_p ротора III-датчика относительно своего статора вызывает такой же угол поворота α_r ротора III-приемника относительно своего статора. При этом угловые положения ведомого и ведущего валов оказываются одинаковыми относительно корпуса движущегося объекта, а магнитная ось обмотки ротора III-приемника смещена на 90° по отношению к магнитной оси обмотки ротора III-датчика.

При углах рассогласования $\theta < 180^\circ$ отработка ведомого вала к согласованному положению ($\theta = 0$) происходит кратчайшим путем, т.е. в положительном направлении (против хода часовой стрелки); при $\theta > 180^\circ$ отработка происходит также кратчайшим путем, т.е. в отрицательном направлении по ходу часовой стрелки (см. рис. 12).

Особым является угол $\theta = 180^\circ$, называемый "ложным нулем" или "точкой неустойчивого равновесия". Теоретически при $\theta = 180^\circ$ входное напряжение усилителя $U_y = 0$ и система отработки не функционирует. Однако на практике это явление не возникает, так как ведущий вал в реальных условиях эксплуатации не может долго оставаться в положении, которому соответствует $U_y = 0$. Малейшие отклонения от этого положения вызывают появление управляющего напряжения ($U_y \neq 0$). В результате система обработки начинает функционировать и приводит ведомый вал R_p в согласованное положение, т.е. в положение устойчивого равновесия. Отсюда следует, что система дистанционной передачи угла на двухполюсных поворотных трансформаторах обладает свойством самосинхронизации.

В гироскопических системах, работающих при относительно малых скоростях изменения углов поворота ведущего вала, существенными являются статические ошибки, которые, в основном, порождаются ложными выходными сигналами роторной обмотки III-приемника. Ложные сигналы являются результатом несовершенства изготовления и монтажа поворотных трансформаторов. В частности,

ложные сигналы порождаются: асимметрией параметров магнитопроводов; неравномерностью воздушного зазора между статором и ротором; вызываемой некруглостью рабочих поверхностей ротора и статора; наличием зубцов; эксцентричной посадкой ротора и статора и т.д.

Принято оценивать статическую ошибку $\Delta\theta$ дистанционной передачи отношением ложного сигнала ΔU_r , снимаемого с ротора III-приемника, к крутизне K_r характеристики выходного сигнала в диапазоне малых углов рассогласования θ :

$$\Delta\theta = \Delta U_r \cdot K_r^{-1}.$$

Крутизна выходной характеристики двухполюсных плоских ПТ $K = 5...10$ мВ/угл. мин. Системы дистанционной передачи угла, построенные на плоских двухполюсных ПТ, имеют статические ошибки порядка $12...20'$.

Дальнейшее снижение ошибок связано с большими технологическими и конструктивными трудностями, возникающими при совершенствовании двухполюсных поворотных трансформаторов, поэтому более точные системы дистанционной передачи угла выполняют двухканальными на основе двухполюсных и многополюсных ПТ.

ПТ как преобразователь координат. Чтобы исключить шарданные ошибки при измерении азимутального угла в прецизионных трехосных гиросtabilизаторах, применяют схему шарданова подвеса (рис. 13). Особенность этой схемы состоит в том, что внутреннее I и наружное 2 кольца шарданова подвеса (последнее связано с корпусом движущегося объекта) могут вместе с движущимся объектом поворачиваться в азимутальной плоскости относительно гиросtabilизированной платформы (ГСП) 3 на угол A (рис. 14). Это значит, что двигатели стабилизации крена $ДС_k$ и тангажа $ДС_t$, установленные на кольцах шарданова подвеса, меняют свое азимутальное положение относительно гироскопов $Г_1$ и $Г_2$ и не могут управляться сигналами, снимаемыми с какого-либо одного гироскопа. Следовательно, для управления двигателями стабилизации крена и тангажа нужен более сложный закон управления, учитывающий наличие угла A азимутального поворота движущегося объекта относительно ГСП.

Найдем этот закон. Предположим, что к ГСП приложен постоянный момент внешних сил M (см. рис. 13 и 14). Его проекциями на оси ГСП x , y являются M_x и M_y , а на оси Q , T шарданова подвеса — M_Q и M_T .

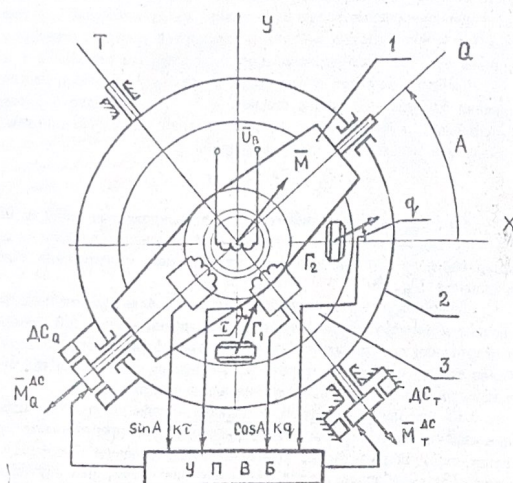


Рис. 13

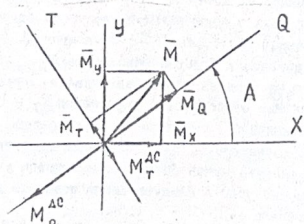


Рис. 14

После окончания переходных процессов в каналах стабилизации двигателя стабилизации должны уравновешивать моменты M_Q и M_T , действующие вокруг осей карданова подвеса

$$M_Q^{DC} = -M_Q, \quad M_T^{DC} = -M_T.$$

Гироскопы реагируют на моменты M_x и M_y , приложенные к ГСП, поэтому поворачиваются относительно ГСП на углы прецессии q и τ . Следовательно, с гироскопов пойдут управляющие сигналы, под действием которых двигатели стабилизации развили бы моменты

$$M_x^{DC} = -M_x = \kappa \cdot \tau, \quad M_y^{DC} = -M_y = -\kappa q, \quad (6)$$

где κ - передаточный коэффициент канала стабилизации.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы с помощью моментов M_x^{DC} и M_y^{DC} , действующих по осям ГСП, сформировать моменты M_Q^{DC} и M_T^{DC} , действующие по осям карданова подвеса.

Из анализа рис. 14 получим

$$M_Q = M_x \cdot \cos A + M_y \cdot \sin A; \quad (7)$$

$$M_T = M_y \cdot \cos A - M_x \cdot \sin A.$$

Чтобы составить формулы для формирования моментов M_Q^{DC} и M_T^{DC} , нужно в (7) подставить (6), тогда

$$M_Q^{DC} = \kappa \tau \cdot \cos A - \kappa q \cdot \sin A; \quad (8)$$

$$M_T^{DC} = -\kappa q \cdot \cos A - \kappa \tau \cdot \sin A.$$

Из (8) следует: для формирования стабилизирующих моментов M_Q^{DC} и M_T^{DC} нужно иметь информацию о значениях $\sin A$ и $\cos A$. Эту информацию получают с помощью ПТ, который в данном случае называется преобразователь координат (ПК). Ротор ПК устанавливается на оси, перпендикулярной ГСП, а статор - на внутреннем кольце 2 карданова подвеса (см. рис. 13).

Реализация алгоритма (8) наиболее просто осуществляется с помощью редуктивных двигателей стабилизации, построенных на основе двухфазных асинхронных микродвигателей. Это объясняется тем, что двухфазные асинхронные микродвигатели, являясь фазочувствительными элементами, допускают не только амплитудное, но и фазовое управление моментом. Однако в прецизионных гиросtabilизаторах редукторные двигатели стабилизации не применяются, а

используются безредукторные двигатели стабилизации, представляющие собой мощные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

При использовании безредукторных двигателей стабилизации алгоритм (8) реализуется с помощью электронного усилительно-преобразующего вычислительного блока (УИВБ) (см. рис. 13).

ПИ в устройствах преобразования угол-код. Цифровые вычислительные машины все шире используются в составе гироскопических систем ориентации, навигации и стабилизации, так как они значительно точнее, чем аналоговые машины, выполняют вычислительные операции.

Выходная информация гироскопических приборов, как правило, имеет аналоговую форму-угол поворота какой-либо оси или соответствующий ему электрический сигнал (напряжение, ток). Для использования в цифровой вычислительной машине аналоговый выходной сигнал гиросприбора должен быть представлен в дискретной форме, удобной для ввода его в вычислительную машину. При этом информация, содержащаяся в аналоговом сигнале, естественно сохраняется.

Для перехода от аналоговой формы сигнала к дискретной используют специальные преобразователи. Эти преобразователи могут размещаться на гиросприборе или входить в состав цифровой вычислительной машины, выполняться в виде самостоятельного блока, включаемого между гиросприбором и вычислительной машиной.

Фазовый преобразователь угол-код. Если аналоговой выходной величиной является угол поворота какой-либо оси, например оси стабилизации гиросплатформы, то применяются преобразователи с промежуточным преобразованием аналоговой величины, например преобразователи угол-фаза-время-импульсный код, либо преобразователи прямого кодирования.

В первом случае на выходной оси гиросприбора или на оси, связанной с выходной осью гиросприбора дистанционной передачи, устанавливается фазовращатель. В гироскопических системах наиболее широкое применение нашли фазовращатели, построенные на основе поворотных трансформаторов.

Фазовращатель преобразует угол поворота оси α в угол сдвига фаз φ между опорными напряжениями $U_{оп}$ и выходным напряжением $U_{фв}$ фазовращателя (рис. 15а). В идеальном случае $\varphi = \alpha$. Опорное напряжение $U_{оп}$ вырабатывается генератором синусоидальных колебаний (ГСК) и имеет стабильную частоту $f_{оп}$.

Схема преобразователя фазы во время-импульсный код содержит (рис. 15а) два электронных устройства выделения нуля ($УВН_{оп}$, $УВН_{фв}$), которые соответственно выдают управляющие импульсы при переходе через нуль напряжений $U_{оп}$ и $U_{фв}$, ключ (К); генератор импульсов (ГИ) и счетчик импульсов (СЧ).

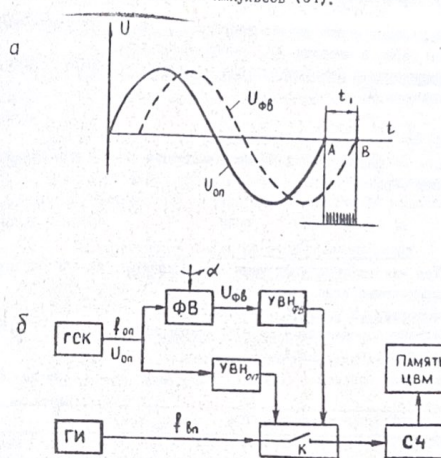


Рис. 15

Схема работает следующим образом. Предположим, что выходное напряжение фазовращателя $U_{фв}$ отстает по фазе от опорного напряжения $U_{оп}$ на угол φ . Тогда опорное и выходное напряжения будут проходить через нулевые значения в разные моменты времени (см. рис. 15а). В момент прохождения через нуль опорного напряжения (точка А) срабатывает устройство выделения нуля $УВН_{оп}$ и подает управляющий импульс на включение ключа, который начинает пропускать импульсы высокой частоты на счетчик импульсов. Напряжение фазовращателя пройдет через нуль при времени t_1 . При этом срабатывает устройство выделения нуля $УВН_{фв}$, пошлет управляющий импульс на выключение ключа.

поступление высокочастотных импульсов в счетчик прекратится. Число импульсов N , накопленное счетчиком за один цикл преобразования, пропорционально углу поворота оси α , т.е.

$$\alpha = \varphi; \varphi = 2\pi \cdot f_{\text{сн}} \cdot t; N_f = f_{\text{сн}} \cdot t_f; N_f = f_{\text{сн}} (2\pi \cdot f_{\text{сн}})^{-1} \cdot \alpha.$$

В рассмотренном случае частота $f_{\text{сн}}$ имеет значения порядка сотен герц, а частота $f_{\text{сн}}$ — миллионов герц. Амплитудный преобразователь угол-код. Выходные сигналы двухполюсного ПТ

$$U_c = U_c^M \sin \alpha; U_k = U_k^M \cos \alpha.$$

Если угол α расположен в первом квадранте, то он определяется следующим образом:

$$\alpha_f = \arctg \frac{U_c}{U_k}, \text{ если } U_c^M = U_k^M.$$

Так как тангенс — функция неоднозначная, то для однозначного определения угла в пределах 360° нужно знать квадрант, в котором находится угол α . В амплитудных преобразователях угол-код квадрант определяется по комбинации знаков (фаз) выходных напряжений U_c и U_k (табл. 2)

Таблица 2

Знак (фаза) U_c	+	+	-	-
Знак (фаза) U_k	+	-	-	+
Квадрант	I	II	III	IV

Зная квадрант, определим угол α по формулам:

$$\alpha_c = 180 - |\alpha_f|;$$

$$\alpha_f = 180 + |\alpha_f|;$$

$$\alpha_c = 360 - |\alpha_f|,$$

где α_c, α_f — соответственно углы, расположенные во втором, третьем и четвертом квадрантах.

5. Аппаратура, используемая в работе

На массивной плите размещены: испытуемый ПТ, установленный в устройстве, позволяющем

производить поворот ротора ПТ относительно его статора на неограниченный угол с минимальным шагом, равным 1° . В дальнейшем это устройство для краткости будет называться устройством разворота (УР);

скрытый электромотаж и клеммы, соответствующие концам обмоток ПТ;

цифровой вольтметр В1 (типа В7-27А/1), предназначенный для контроля напряжения питания ПТ;

два цифровых вольтметра В2 и В3 (типа В7-35), предназначенных для измерения выходных напряжений синусной и косинусной обмоток ПТ;

Для питания ПТ (напряжением 36 В, частотой 400 Гц) использован генератор звуковых частот (Г) (типа ГЗ-34).

Для наблюдения кривых выходных напряжений с синусной и косинусной обмотками ПТ использован двухлучевой осциллограф (ДО) (типа С1-64А).

6. Постановка задач по экспериментальному определению характеристик ПТ

Снять характеристику ПТ, т.е. зависимости $U_c = f_c(\alpha)$ и $U_k = f_k(\alpha)$, где U_c и U_k — выходные напряжения, снимаемые с синусной и косинусной обмоток ПТ.

Рассчитать на основе экспериментальных данных (полученных после выполнения предыдущего пункта) параметры ПТ и определить его класс точности.

Смоделировать работу амплитудного преобразователя угол-код, построенного на основе ПТ и, используя ЗБМ, оценить погрешности преобразования.

У п р а ж н е н и е. Уяснив постановку задач, самостоятельно:

составить схему испытаний ПТ, выполнить подробный план проведения экспериментов и расчетов, продумать форму представления конечных результатов.

7. Порядок выполнения работы

1. Приступить к оформлению отчета:

записать название и цель работы; выписать интересующие студента сведения из § 1...5.

2. Самостоятельно составить и занести в счет структурную схему испытаний ПТ; предъявить ее для проверки преподавателю.

3. Подготовить табл. 3 для занесения результатов измерений.
4. Поставить тумблеры измерительной аппаратуры в исходные положения.

Генератор ГЗ-34

Тумблер "сеть"	- "выкл";
Тумблер "внутр. нагрузка"	- "выкл";
Переключатель "шкала прибора"	- "X2";
Переключатель "вых. сопротивление Ω "	- "Авт";
Переключатель "индикатор"	- "А10";
Переключатель "растрейка %"	- "0";
Ручка "частота"	- 40 по шкале;
Ручка "рег. выхода"	- до упора против часовой стрелки.

Вольтметр В7-27А/1

Переключатель диапазонов измерения	- "100V~".
------------------------------------	------------

Вольтметры В7/35

Переключатель рода работы ($\sim, \sim, \approx$)	- " $\sim$ ";
Переключатель рода работы ($mV, \mu A, \kappa \Omega, m\Omega$)	- " $mV-V$ ".

Таблица 3

$\alpha_{\text{н.с.}}$	$\alpha_{\text{ш}}$	$U_{\text{с.в}}$	$U_{\text{к.в}}$
1	2	3	4
0			
15			
45			
75			
90			
900- <i>min</i>			
105			
135			
165			
180			
1800- <i>min</i>			
195			
225			
255			
270			

Омещение табл. 3

1	2	3	4
2700- <i>min</i>			
285			
315			
345			
360			
3600- <i>min</i>			

Здесь $\alpha_{\text{н.с.}}$ - угол поворота ротора относительно статора; $\alpha_{\text{ш}}$ - отсчет угла по шкале устройства разворота; $U_{\text{с.в}}$, $U_{\text{к.в}}$ - выходные сигналы синусной и косинусной обмоток; 900-*min*, 2700-*min* - углы, при которых сигнал косинусной обмотки минимален; 1800-*min*, 3600-*min* - углы, при которых сигнал с синусной обмотки минимален.

Осциллограф CI-64A (Д0)

Переключатели внутренней синхронизации	- " $\sim$ ";
I и II каналов ($\sim, \perp, \approx$)	- " $\sim$ ";
Переключатель синхронизации А и В ($\sim, \sim B, \sim H, \approx$)	- " $\sim$ ";
Переключатели синхронизации А и В (внутр., сеть, внеш. I:I, внеш. I:10)	- "внутр.";
Переключатель "режим А"	- "авт. ждущ.";
Переключатель "режим В"	- "авт.";
Переключатель "вид развертки"	- "А" с коэффициентом, равным 1
Переключатели усиления I и II каналов	- 10 (минимальное усиление);
Переключатель полярности	- "+".

В процессе работы при помощи переключателей "режим работы", "усиление", "каналы I и II", "длительность А" (развертка), а также ручек регулировок "яркость", "фокус", "длина А", "уровень" получают качественное изображение на экране осциллографа исследуемого процесса.

5. Используя структурную схему испытаний, проверить правильность электрического включения III, блока питания и контрольно-измерительной аппаратуры. При этом нужно иметь в виду следующее:

на вход вольтметров В2, В3 сигнал с ПТ подается голубым проводом;

первый канал двухлучевого осциллографа с помощью жгута под- соединяется к клеммам " $U \cdot \sin \varphi$ ", расположенным на плате, при- чем конец жгута, имеющий метку (кольцо), подсоединяется к клем- мем (правой) " $U \cdot \sin \varphi$ ";

второй канал Д0 с помощью другого жгута подсоединяется к клеммам " $U \cdot \cos \varphi$ ", расположенным на плате, причем конец жгута, имеющий метку (кольцо) подсоединяется к правой клемме " $U \cdot \cos \varphi$ ";

6. Включить и прогреть измерительную аппаратуру, поставить тумблер "сеть" на них в положение "вкл". Время прогрева составля- ет 3 мин.

7. Подать напряжение 36 В на статорную обмотку ПТ, для чего плавно вращать ручку "рег.входа" генератора. Контролировать это напряжение перед каждым измерением U_c и U_k по показаниям вольт- метра В1 и удерживать его на номинальном уровне, равном 36 В.

8. Определить начало отсчета углов (т.е. значение α_ω , соответствующее $\alpha_{cp} = 0$), для чего:

выставить значение $\alpha_\omega \approx 316^\circ$;

плавное вращая маховичок УР, добиться минимального ("ну- левого", остаточного) сигнала с выхода синусной обмотки;

наблюдать на экране осциллографа характер изменения выход- ного сигнала синусной обмотки при $\alpha_{cp} \approx 0$, обратить внимание на наличие второй гармоники в составе выходного сигнала и на изменение фазы основного сигнала на 180° ;

записать в табл. 3 значение α_ω , соответствующее нача- лу отсчета, а также значения выходных напряжений с синусной U_c и косинусной U_k обмотками.

9. Установив углы α_{cp} , указанные в табл. 3, изме- рять выходные напряжения, снимаемые с синусной (U_c) и коси- нусной (U_k) обмоток ПТ. На углах α_{cp} , кратных 90° , изме- рить два выходных напряжения. Второе измерение должно соответ- ствовать отсчету α_ω , при котором достигается минимальное значение напряжения, снимаемого с синусной или косинусной обмо- ток ПТ. Наблюдать по осциллографу характер изменения сигнала "у нуля" и отмечать фазу смены выходных напряжений введением или удалением знака "минус".

10. Используя табл. 3, построить графики $U_c = f(\alpha_{cp})$, $U_k = f(\alpha_{cp})$.

11. По формулам (1)...(5) рассчитать основные характерис-

тики ПТ и определить класс точности испытуемого ПТ.

12. Смоделировать работу амплитудного преобразователя (АП) угла-код, построенного на основе ПТ, для чего, используя форму- лы (9) и (10), составить алгоритм работы АП:

на основе алгоритма составить программу (на языке Форт- ран) расчета углов α_p и ошибок преобразования Δ_n :

$$\Delta_n = \alpha_{pc} - \alpha_p;$$

рассчитать ошибки преобразования на ЭВМ "Изот" для всех углов α_{pc} , указанных в табл. 3. Построить график

$$\Delta_n = f(\alpha_{pc}).$$

8. Контрольные вопросы

1. Как устроен ПТ?
2. Перечислить основные характеристики ПТ.
3. Сколько существует классов точности ПТ и как они опре- деляются?
4. Перечислить основные применения ПТ в гироскопической технике.
5. Каковы основные характеристики дистанционных передач угла на ПТ?
6. Какие из характеристик ПТ наиболее важны при использо- вании его в системах дистанционных передач угла и почему?
7. Какие из характеристик ПТ наиболее важны при использо- вании его в качестве преобразователя координат и почему?
8. С ПТ, работающего в качестве датчика амплитудного пре- образователя угол-код, сняты следующие сигналы: $U_c = +15$ В, $U_k = -15$ В. Определить угол α_{pc} , соответствующий этим сиг- налам.
9. На практике номинальные параметры питания ПТ - напряже- ние U_n и его частота f_n - выдерживаются с допусками ΔU и Δf (обычно $|\Delta U/U_n| \leq 5 \cdot 10^{-2}$, $|\Delta f/f_n| \leq 2 \cdot 10^{-2}$). Повлияют ли, и если да, то как именно, допуски ΔU и Δf на работу дистанционной передачи угла на ПТ, преобразователя координат, фазовращателя и преобразователя угол-код на его основе, амплитудного преобри- зователя угол-код; на ошибку в выработке синусной (косинусной) зависимости.