Двухосный индикаторный гиростабилизатор телекамеры на ВОГ

Введение

 Телевизионная техника применяется в различных областях человеческой деятельности - экономике, искусстве, военном деле и многих других. Область ее применения постоянно расширяется. Это объясняет активное развитие в настоящее время телевизионного и кинотехнического оборудования и применение новейших достижений техники при разработке и производстве устройств для различных видов теле и киносъемки.

 К таким устройствам относят гироскопические стабилизаторы (ГС) углового положения телекамеры, которые применяются при съемках с подвижных объектов: вертолета, судна, автомобиля, а также с кранов.

 Из требований, предъявляемых к этим устройствам, наиболее важными являются следующие:

— высокая точность стабилизации, обусловленная применением объективов с большим фокусным расстоянием;

— дистанционное управление стабилизатором и телекамерой, что связано с целесообразностью или даже необходимостью размещения телекамеры в месте, недоступном для оператора, например, на кране;

— защита от вибрационных возмущений как с целью обеспечения виброустойчивости гиростабилизатора, так и для повышения качества отснятого материала, снижающегося при поступательном движении телекамеры;

— удобство и простота в обращении, необходимость “защиты от дурака”;

— минимально возможные габариты и масса;

— удобство доступа к стабилизируемой камере;

— высокие скорости (до 120 град./с.) и ускорения (до 200 рад./с.) управления, для получения “динамичного” отснятого материала;

— большие углы прокачки, по некоторым осям равные 360°;

— минимально возможное энергопотребление, т.к. для работы часто используются автономные источники питания (аккумуляторы и т.д.).

— большой диапазон балансировок, необходимость которого вызывается использованием различных типов теле и кинокамер с сильно различающимися массогабаритными показателями.

 Из устройств, в наибольшей степени удовлетворяющих перечисленным требованиям, в настоящее время известны и применяются следующие. Это силовой гироскопический стабилизатор "Wesscam" (Канада) и трехосные гиростабилизаторы 1ГСП (разработка МВТУ и НИКФИ), 2ГСП, 4ГСП (разработка МВТУ {МГТУ}).

 Первый представляет собой платформу, помещенную в карданов подвес, на которой установлены три двухстепенных гироскопа. Компенсация внешнего момента осуществляется разгрузочным двигателем и маятниковым устройством. Сам карданов подвес крепится к основанию с помощью упругой связи, необходимой для аммортизации устройства при поступательных вибрациях вертолета, автомашины и т.п. Гиростабилизатор помещен в защитную сферу имеющую вырез напротив объектива киноаппарата.

 Гиростабилизаторы 1ГСП, 2ГСП, 4ГСП индикаторного типа. Все они в качестве чувствительного элемента используют трехстепенный гироскоп типа МГТУ-05. Также все эти три гиростабилизатора имеют дистанционное управление киноаппаратом и пространственным положением стабилизированной платформы.

 Особенностью гиростабилизатора 1ГСП является использование внутреннего карданова подвеса и двухконтурной системы стабилизации с применением маховиков совместно с двигателями стабилизации. К недостаткам этого стабилизатора относятся низкая скорость управления (10 град/сек) и отсутствие защиты от аэродинамических воздействий.

 В гиростабилизаторе 2ГСП применен наружный карданов подвес с подшипником большого диаметра и также используется двухконтурная система стабилизации (маховик и двигатели стабилизации). Скорость управления до 30 град/сек. Для защиты от аэродинамических воздействий введен следящий частично прозрачный обтекатель, внутри которого расположен трехосный аммортизатор для предохранения платформы с киноаппаратом от линейных вибраций.

 Гиростабилизатор 4ГСП также выполнен с наружным кардановым подвесом. Он имеет скорость управления до 60 град/сек., ограниченную, в основном, скоростью управления примененного чувствительного элемента. Защита от аэродинамических нагрузок отсутствует.

 В данной работе продолжены исследования по возможности построения гироскопического стабилизатора углового положения телекамеры, в котором:

—скорость управления обеспечивается не менее 100 град/сек;

—предусмотрено дистанционное управление телекамерой и самим гироcтабилизатором;

—в качестве чувствительного элемента использован волоконно-оптический гироскоп.

 В частности, рассматриваются вопросы:

—обеспечения устойчивости канала стабилизации при существенно нежесткой конструкции ГС, нежестком креплении телекамеры к ГС и расположении чувствительного элемента не на стабилизируемом объекте;

—проведено исследование инерционных возмущающих моментов, в том числе моментов возникающих от несимметричности конструкции рам ГС;

— проводилась доработка усилителя мощности с ШИМ;

— предложена конструкция датчика угла фазового типа;

— разработана конструкция двухосного ГС.

Обоснование выбора подвеса гиростабилизатора.

 Одним из основных факторов, определяющих выбор принципиальной схемы гиростабилизатора телекамеры, является тип карданова подвеса. В гиростабилизаторе телекамеры может быть использован как внутренний, так и наружный карданов подвес. Сравнительный анализ и конструктивная проработка схем подвесов [3] показывает, что применение наружного карданова подвеса для стабилизатора телекамеры представляется более целесообразным. Это объясняется следующими причинами.

 Использование наружного карданова подвеса при больших углах прокачки позволяет получить более компактную конструкцию стабилизированной платформы. В этом случае момент инерции платформы относительно собственной оси вращения значительно снижается, и тогда величина максимального момента двигателя стабилизации, выбираемая из условия обеспечения необходимого углового ускорения платформы при управлении может быть уменьшена. Это позволяет повысить точность стабилизации за счет использования двигателя стабилизации меньших габаритов, имеющего меньший момент сухого трения вокруг оси вращения и меньший коэффициент демпфирования.

 Габаритные размеры гиростабилизатора телекамеры с наружным кардановым подвесом оказываются меньше, чем с внутренним, т.к. в последнем случае для получения достаточных рабочих углов поворота платформы необходимо выполнение подвеса по гантельной схеме, что приводит к значительному увеличению одного габаритного размера гиростабилизатора по сравнению с другим. Применение наружного карданова подвеса позволяет добиться минимального различия между габаритными размерами гиростабилизатора по взаимноперпендикулярным осям, что является желательным.

 В то же время схема гиростабилизатора с наружным кардановым подвесом имеет следующие недостатки:

— увеличенный возмущающий инерционный момент, действующий вокруг оси наружной рамы подвеса, который возникает при переносных поворотах основания гиростабилизатора;

— пониженная жесткость рам наружного карданова подвеса по сравнению с внутренним.

 Возмущающий инерционный момент, действующий по оси наружной рамы карданова подвеса, вызывает появление ошибок стабилизации, а также создает дополнительные нагрузки на приводы. Однако, как показывают исследования, в реальных условиях эксплуатации гиростабилизатора киноаппарата на кране и на вертолете [8,9], величина инерционного момента при симметричной конструкции рам оказывается незначительной. В связи с этим первый из перечисленных недостатков наружного карданова подвеса оказывается несущественным.

 В представленном двухосном гиростабилизаторе телекамеры применен наружный карданов подвес.

 Конструкция подвеса гиростабилизатора позволяет получить угол прокачки по оси тангажа +60...-80 град., а по оси курса угол вращения не ограничен.

Описание особенностей конструкции гиростабилизатора.

 Особенностью данного ГС является выполнение наружной рамы в виде Г-образной конструкции. Это позволяет уменьшить габариты ГС и упростить доступ к телекамере. Однако такая конструкция является существенно несимметричной, что вызывает появление дополнительных возмущающих моментов из-за значительных по величине центробежных моментов инерции рам. Исследование этих возмущающих моментов проведено в разделе “Анализ инерционных возмущающих моментов”.

 Кроме того, требования по минимизации масс, моментов инерции, требования по динамике управления платформой приводят к тому, что наружная рама оказывается существенно нежесткой. А так как при этом необходимо учитывать требования по высокой точности стабилизации при значительных возмущающих моментах, то возникает необходимость в проведении специальных исследований по вопросам обеспечения устойчивости канала стабилизации. В частности, исследований по расположению ЧЭ в конструкции ГС. Исследование устойчивости канала стабилизации приведено в разделе “Исследование влияния нежесткостей элементов гиростабилизатора на его устойчивость”.

 Особенностью данной конструкции ГС является то, что стабилизация положения телекамеры по курсу осуществляется косвенным образом, путем стабилизации положения наружной рамы карданова подвеса. Эта особенность также учтена в разделе “Исследование влияния нежесткостей элементов ГС на его устойчивость”.

 Из требований по минимизации энергопотребления вытекает необходимость увеличения КПД канала стабилизации. Согласно этому требованию, а также с целью получения значительных по величине моментов привода, в качестве привода используется редукторный привод со встречным включением двигателей стабилизации серии ДПР. Кроме того, использование в качестве ЧЭ волоконно-оптического гироскопа позволяет снизить энергопотребление собственно ЧЭ до 3 Вт, как в режиме измерения, так и при управлении положением стабилизированной платформы.

 Наиболее существенное влияние на КПД электронной части канала стабилизации оказывает коэффициент полезного действия УМ. Поэтому УМ выполнен импульсным, с использованием ШИМ модуляции выходного напряжения. Это позволяет примерно в два раза увеличить КПД УМ по сравнению с линейными схемами УМ. Однако все импульсные УМ являются мощными источниками электромагнитных помех, поэтому в данной конструкции ГС УМ располагается на самом ГС, в непосредственной близости от двигателей стабилизации. Кроме того, непосредственно на ГС расположены схемы защиты ВОГа.

 Конструкция крепления телекамеры позволяет проводить установку на платформу телекамер отличающихся по массогабаритным параметрам от базовой на ± 30 %. При этом осуществляется независимая регулировка положения телекамеры по трем взаимоперпендикулярным осям.

 Применение в качестве ЧЭ ВОГа вместо механических гироскопов позволяет практически снять ограничения по максимальным скоростям измерения и управления, накладываемых на канал стабилизации самим ЧЭ.

АНАЛИЗ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ.

 При несимметричной конструкции рам гиростабилиза-тора и значительных угловых скоростях движения основания и управления платформой необходимо учитывать возмущающие моменты, вызываемые осевыми и центробежными моментами инерции рам.

 В данной работе проводится исследование инерционных возмущающих моментов для двухосного гиростабилизатора, с учетом влияния центробежных моментов инерции рам и скоростей управления платформой.

 Выражения для инерционных моментов получены путем раскрытия членов, зависящих от параметров движения основания и платформы входящих в динамические уравнения Эйлера. Основные математические преобразования выполнялись с помощью программы “DERIVE”.

 Системы координат и обозначения используемые далее.

Рис.1.

X0,Y0,Z0 - система координат связанная с основанием.

X1,Y1,Z1 - система координат связанная с наружной

 рамой.

X2,Y2,Z2 - система координат связанная с платформой.

Qij - момент количества движения j-го тела по i-й

 оси.

ωij - угловая скорость j-го тела по i-й оси.

ωij' - угловое ускорение j-го тела по i-й оси.

Ji - осевые моменты инерции тела относительно i-й

 оси.

Jij - центробежные моменты инерции.

Mij - внешние возмущающие моменты действующие

 на j-е тело по i-й оси.

α - угол поворота наружной рамы по оси Y1.

α' - угловая скорость вращения наружной рамы по

 оси Y1.

α'' - угловое ускорение наружной рамы по оси Y1.

β - угол поворота платформы по оси Z2.

β' - угловая скорость вращ. платформы по оси Z2.

β'' - угловое ускорение платформы по оси Z2.

 Динамические уравнения Эйлера для i-го тела имеют вид:

 dQxi/dt - Qyi⋅ωzi + Qzi⋅ωyi = Mxi

 dQyi/dt - Qzi⋅ωxi + Qxi⋅ωzi = Myi

 dQyi/dt - Qzi⋅ωxi + Qxi⋅ωzi = Myi

 В случае двухосного гиростабилизатора эти уравнения преобразуются в следующую форму:

 а) для наружной рамы:

 dQy1/dt - Qz1⋅ωx1 + Qx1⋅ωz1 = My1

б) для платформы:

 dQx2/dt - Qy2⋅ωz2 + Qz2⋅ωy2 = Mx2

 dQy2/dt - Qz2⋅ωx2 + Qx2⋅ωz2 = My2 (1)

 dQz2/dt - Qx2⋅ωy2 + Qy2⋅ωx2 = Mz2

 Полный момент количества движения наружной рамы в проекциях на оси X1, Y1, Z1 определяется следующими выражениями:

 Qx1 = Jx1⋅ωx1 - Jxy1⋅ωy1 - Jxz1⋅ωz1

 Qy1 = Jy1⋅ωy1 - Jyx1⋅ωx1 - Jyz1⋅ωz1 (2)

 Qz1 = Jz1⋅ωz1 - Jzx1⋅ωx1 - Jzy1⋅ωy1

 Полный момент количества движения платформы в проекциях на оси X2, Y2, Z2 определяется следующими выражениями:

 Qx2 = Jx2⋅ωx2 - Jxy2⋅ωy2 - Jxz2⋅ωz2

 Qy2 = Jy2⋅ωy2 - Jyx2⋅ωx2 - Jyz2⋅ωz2 (3)

 Qz2 = Jz2⋅ωz2 - Jzx2⋅ωx2 - Jzy2⋅ωy2

 Кинематические уравнения двухосного гиростаби-лизатора, для расположения координатных осей приве-денного на рис.1, имеют вид:

 а) для наружной рамы:

 ωx1 = ωx0⋅cos(α) - ωz0⋅sin(α)

 ωy1 = ωy0 + α' (4\*)

 ωz1 = ωx0⋅sin(α) + ωz0⋅cos(α)

 ωx1' = ωx0'⋅cos(α) - ωz0'⋅sin(α)

 ωy1' = ωy0' + α'' (4\*')

 ωz1' = ωx0'⋅sin(α) + ωz0'⋅cos(α)

 б) для платформы:

 ωx2 = ωx1⋅cos(β) + ωy1⋅sin(β)

 ωy2 = ωy1⋅cos(β) - ωx1⋅sin(β) (5\*)

 ωz2 = ωz1 + β'

 ωx2' = ωx1'⋅cos(β) + ωy1'⋅sin(β)

 ωy2' = ωy1'⋅cos(β) - ωx1'⋅sin(β) (5\*')

 ωz2' = ωz1' + β''

Из 2-го уравнения в (5\*) следует, что:

 ωy1=ωx1⋅tg(β)+ωy2/cos(β)

Из 2-го уравнения в (5\*') следует, что:

 ωy1'=ωx1'⋅tg(β)+ωy2'/cos(β)

 Тогда, учитывая, что ωy2, ωz2, ωy2', ωz2' являются параметрами движения стабилизированного объекта, т.е. заданы, кинематические уравнения можно переписать в следующем виде:

 ωx1 = ωx0⋅cos(α) - ωz0⋅sin(α)

 ωy1 = ωx1⋅tg(β)+ωy2/cos(β) (4)

 ωz1 = ωx0⋅sin(α) + ωz0⋅cos(α)

 ωx1' = ωx0'⋅cos(α) - ωz0'⋅sin(α)

 ωy1' = ωx1'⋅tg(β)+ωy2'/cos(β) (4')

 ωz1' = ωx0'⋅sin(α) + ωz0'⋅cos(α)

 ωx2 = ωx1⋅cos(β) + ωy1⋅sin(β) (5)

 ωx2' = ωx1'⋅cos(β) + ωy1'⋅sin(β) (5')

 Подставляя выражения для полных моментов количества движения (2), (3) в динамические уравнения Эйлера (1), получаем следующий вид уравнений движения наружной рамы и платформы:

 Jy1⋅ωy1' + (Jx1-Jz1)⋅ωx1⋅ωz1 + Jzx1⋅ωx12 - Jxz1⋅ωz12 +

 + Jzy1⋅ωx1⋅ωy1 - Jxy1⋅ωy1⋅ωz1 - Jyx1⋅ωx1' - Jyz1⋅ωz1' = My1 (6.1)

 Jx2⋅ωx2' + (Jz2-Jy2)⋅ωy2⋅ωz2 - 2⋅Jzy⋅ωy22 + Jyz2⋅ωz22 +

 + Jyx2⋅ωx2⋅ωz2 - Jzx2⋅ωx2⋅ωy2 - Jxz2⋅ωz2' - Jxy2⋅ωy2' = Mx2 (6.2)

 Jy2⋅ωy2' + (Jx2-Jz2)⋅ωx2⋅ωz2 + Jzx2⋅ωx22 - Jxz2⋅ωz22 +

 + Jzy2⋅ωx2⋅ωy2 - Jxy2⋅ωy2⋅ωz2 - Jyx2⋅ωx2' - Jyz2⋅ωz2' = My2 (6.3)

 Jz2⋅ωz2' + (Jy2-Jx2)⋅ωx2⋅ωy2 + Jxy2⋅ωy22 - Jyx2⋅ωx22 +

 + Jxz2⋅ωy2⋅ωz2 - Jyz2⋅ωx2⋅ωz2 - Jzx2⋅ωx2' - Jzy2⋅ωy2' = Mz2 (6.4)

 При отсутствии моментов внешних сил правые части уравнений (6.2), (6.3), (6.4) обращаются в нуль, а правая часть (6.1) представляет собой момент реакции со стороны платформы на внешнюю раму вокруг оси Y1. Обозначив левые части уравнений (6.1), (6.2), (6.3) буквами A, B и C, соответственно, получаем выражение для полного инерционного момента относительно оси внешней рамы:

 My1ин = A + B ⋅ sin(β) + C ⋅ cos(β) (7)

 Раскрыв в (7) сокращения A, B и C и преобразовав получаем выражение для полного инерционного момента Мy1ин.

Мy1ин=Jxz1{ωx12-ωz12}+

 +Jxz2cos(β)ωx22-Jyz2sin(β)ωy22+

+{Jyz2sin(β)-Jxz2cos(β)}ωz22+

+{Jyz2cos(β)-Jxz2sin(β)}ωx2ωy2+

+{Jxy2sin(β)+(Jx2-Jz2)cos(β)}ωx2ωz2+

+{(Jz2-Jy2)sin(β)-Jxy2cos(β)}ωz2ωy2+(8)

+{Jx2sin(β)-Jxy2cos(β)}ωx2 +

+{Jy2cos(β)-Jxy2sin(β)}ωy2-

-{Jxz2sin(β)+Jyz2cos(β)}ωz2+

+Jyz1ωx1ωy1-

-Jxy1ωz1ωy1+

+(Jx1-Jz1)ωx1ωz1 -

-Jxy1ωx1-

-Jyz1ωz1+

+Jy1ωy1

 После подстановки в полученные выражения для инерционных моментов Мy1ин, Mz2ин кинематических уравнений (4), (4), (5), (5) и преобразования, получим следующий вид выражений для Мy1ин, Mz2ин:

MZ2ИН={cos(2β)-2}cos(α)2tg(β)2Jxy2(ωx02+ωz02)+

+{2tg(β)2sin(β)2-2cos(β)2+4}sin(α)cos(α)Jxy2ωx0ωz0+

+{(Jy2-Jx2)/cos(β)-2Jxy2sin(β)(1+tg(β)2)}cos(α)ωx0ωy2+

+Jyz2ωz0ωz2(sin(α)-cos(α))/cos(β)-

-Jxz2ωx0'cos(α)/cos(β)+

+{2Jxy2(sin(β)tg(β)2+sin(β))sin(α)+(Jx2-Jy2)sin(α)/cos(β)}ωy2ωz0+

+Jxz2ωz0'sin(α)/cos(β)+

+{Jxz2-Jyz2}ωy2ωz2tg(β)+

+{(Jy2-Jx2)tg(β)+Jxy2(1-tg(β)2)}ωy22-

-{Jxz2tg(β)+Jyz2}ωy2'+

+Jz2ωz2'

 (9)

My1ин={[Jxz2(tg(β)4+2/cos(β)2-1)cos(β)3+Jyz1tg(β)+Jxz1]cos(α)2+

+[[(Jx1-Jz1)-Jxy1tg(β)]cos(α)-Jxz1sin(α)]sin(α)}ωx02+

+{[[Jxy1tg(β)+(Jz1-Jx1)]sin(α)-Jxz1cos(α)]cos(α)+

+[Jxz2cos(β)3[2/cos(β)2+tg(β)4-1]+Jyz1tg(β)+Jxz1]sin(α)2}ωz02+

+{(Jx1-Jz1)cos(2α)+[1-tg(β)4-2/cos(β)2]Jxz2cos(β)3sin(2α)-

-[Jyz1tg(β)+2Jxz1]2sin(α)cos(α)-

-Jxy1tg(β)cos(2α)}ωx0ωz0+

+{[Jxy2sin(β)cos(β)(tg(β)2+1)+(Jx2-Jz2)]cos(α)}ωx0ωz2+

+{[Jxz2sin(β)cos(β)+Jxz2sin(β)3/cos(β)+Jyz2]cos(α)+

+[Jyz1cos(α)-Jxy1sin(α)]/cos(β)}ωx0ωy2-

-{[Jxz2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+Jyz2]sin(α)+

+[Jyz1sin(α)+Jxy1cos(α)]/cos(β)}ωz0ωy2+

+{-[tg(β)2+1]sin(β)cos(β)Jxy2+(Jz2-Jx2)]sin(α)}ωz0ωz2+

+{[Jx2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+Jy1tg(β)-(Jxy1+

+Jxy2)]cos(α)-Jyz1sin(α)}ωx0'+

+{[-Jx2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+(Jxy1+Jxy2)-

-Jy1tg(β)]sin(α)-Jyz1cos(α)}ωz0'+

+{Jyz2sin(β)-Jxz2cos(β)]ωz22-

-{Jxz2sin(β)+Jyz2cos(β)}ωz2'+

+{(Jx2-Jy2)sin(β)+Jxy2cos(β)(tg(β)2-1)}ωz2ωy2+

+{Jx2sin(β)2/cos(β)-2Jxy2sin(β)+Jy2cos(β)+Jy1/cos(β)}ωy2'

Анализ инерционных возмущающих моментов для различных режимов работы гиростабилизатора.

 Численный анализ инерционных возмущающих моментов (9) провожу для различных режимов работы ГС, типовая конструкция которого приведена на рис 2.

Рис.2.

 Пусть ГС имеет следующие инерционные параметры наружной рамы и платформы:

Jx1 = -------//------ Jx2= 2000 гсмс2 = 0.2 кгм2

Jy1 = 1500 гсмс2 = 0.15 кгм2 Jy2= 9500 гсмс2 = 0.95 кгм2

Jz1 = -------//------ Jz2 = 10000 гсмс2 = 1 кгм2

Jxy1 = Jyx1 = 0 Jxy2 = Jyx2 = 0.0085 кгм2

Jxz1 = Jzx1 = 0 Jxz2 = Jzx2 = 0.023 кгм2

Jzy1 = Jyz1 =1500 гсмс2 = 0.15 кгм2 Jzy2 = Jyz2 = 0.04 кгм2

 Угловые скорости и ускорения основания и управления платформой принимаю равными их типовым значениям при работе гиростабилизатора на кране.

ωx0 = ±1 рад/с ωy2 = ±2 рад/с

ωy0 = ±1 рад/с ωz2 = ±2 рад/с

ωz0 = ±1 рад/с ωy2' = ±3 рад/с2 (10)

ωx0'= ±0,2 рад/с2 ωz2' = ±3 рад/с2

ωy0'= ±0,2 рад/с2

ωz0'= ±0,2 рад/с2

Углы прокачки рам изменяются в диапазоне:

α = ± 2 рад. ≈ ± 120 град. (10)

β = ±1 рад. ≈ ± 60 град.

 Исследование величины численных значений инерционных возмущающих моментов провожу с помощью программы “MOMIN” листинг которой приведен в “Приложении 1”.

 Анализ инерционных возмущающих моментов провожу для следующих случаев работы гиро-стабилизатора:

1) Работа на неподвижном основании при наличии скоростей управления платформой;

2) Работа на подвижном основании при неподвижной платформе;

3) Работа на подвижном основании при управляемой платформе;

1) Работа ГС на неподвижном основании при управляемой платформе,

т.е. при условии:

ωx0 = ωy0 = ωz0 = ωx0' = ωy0' = ωz0' = 0 (11)

α ≠ 0; β ≠ 0; ωy2≠ 0; ωz2 ≠ 0; ωy2' ≠ 0; ωz2' ≠ 0

 Тогда подставляя (11) в выражения для инерционных моментов (9), получаем следующий их вид:

MZ2ИН=+{Jxz2-Jyz2}ωy2ωz2tg(β)+

 +{(Jy2-Jx2)tg(β)+Jxy2(1-tg(β)2)}ωy22-

 -{Jxz2tg(β)+Jyz2}ωy2'+

 +Jz2ωz2'

MY1ИН=+{Jyz2sin(β)-Jxz2cos(β)}ωz22-

 -{Jxz2sin(β)+Jyz2cos(β)}ωz2'+

 +{(Jx2-Jy2)sin(β)+Jxy2cos(β)(tg(β)2-1)}ωz2ωy2+

 +{Jx2sin(β)2/cos(β)-

 -2Jxy2sin(β)+Jy2cos(β)+Jy1/cos(β)}ωy2'

 Максимальные значения инерционных моментов, полученные при выполнении условий (10), следующие:

а) ось Y1: Мy1ин = Мин + Мцб = 5.68 + 0.14 = 5.82 Н⋅м.

 при α = 0.067 рад.

 β = 1 рад.

 ωy2 = -2.0 рад/с.

 ωy2' = 3.0 рад/с2.

 ωz2 = 2 рад/с.

 ωz2' = -3.0 рад/с2.

 где Мин - вклад в Мy1ин возмущающих моментов, связаных с осевыми моментами инерции наружной рамы и платформы;

 Мцб - вклад в Мy1ин возмущающих моментов, связаных с центробежными моментами инерции наружной рамы и платформы;

 Вклад Мцб в суммарный возмущающий момент составил:

 К=2.38 %

б) ось Z2: Мz2ин = Мин + Мцб = 7.67 + 0.33 = 8.0 Н⋅м.

 при α = 0.067 рад.

 β = 1 рад.

 ωy2 = 2.0 рад/с.

 ωy2' = -3.0 рад/с2.

 ωz2 = -2 рад/с.

 ωz2' = 3.0 рад/с2.

Вклад Мцб в суммарный возмущающий момент составил:

К =4.2 %

2) Работа ГС на подвижном основании при неподвижной платформе,

т.е. при:

ωy2= ωy2'= ωz2 = ωz2' = 0; α ≠ 0; β ≠ 0; (12)

ωx0 ≠ 0; ωy0 ≠ 0; ωz0 ≠ 0; ωx0' ≠ 0; ωy0' ≠ 0; ωz0' ≠ 0

 Тогда подставляя (12) в выражения для инерционных моментов (9) получаем следующий их вид:

MZ2ИН={cos(2β)-2}cos(α)2tg(β)2Jxy2(ωx02+ωz02)+

+{2tg(β)2sin(β)2-2cos(β)2+4}sin(α)cos(α)Jxy2ωx0ωz0+

-Jxz2ωx0'cos(α)/cos(β)+

+Jxz2ωz0'sin(α)/cos(β)+

MY1ИН={[Jxz2(tg(β)4+2/cos(β)2-1)cos(β)3+Jyz1tg(β)+

 +Jxz1]cos(α)2+

 +[[(Jx1-Jz1)-Jxy1tg(β)]cos(α)-Jxz1sin(α)]sin(α)}ωx02+

+{[[Jxy1tg(β)+(Jz1-Jx1)]sin(α)-Jxz1cos(α)]cos(α)+

 +[Jxz2cos(β)3[2/cos(β)2+tg(β)4-1]+Jyz1tg(β)+

 +Jxz1]sin(α)2}ωz02+

+{(Jx1-Jz1)cos(2α)+[1-tg(β)4-2/cos(β)2]Jxz2cos(β)3

 sin(2α)-[Jyz1tg(β)+2Jxz1]2sin(α)cos(α)-

 -Jxy1tg(β)cos(2α)}ωx0ωz0+

+{[Jx2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+Jy1tg(β)-(Jxy1+Jxy2)]cos(α)-

 -Jyz1sin(α)}ωx0'+

+{[-Jx2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+(Jxy1+Jxy2)-Jy1tg(β)]sin(α)-

 -Jyz1cos(α)}ωz0'+

 При этом получены следующие максимальные значения инерционных возмущающих моментов:

а) ось Y1:

 Мy1ин = Мин + Мцб = 0.154 + 0.551= 0.705 Н⋅м.

при α = - 0.82 рад.

 β = 1 рад.

 ωx0 = ωz0 = 1 рад/с.

 ωx0' = ωz0' = 0.2 рад/с2.

 ωy0 = 0.167 рад/c.

 ωy0' = 0.167 рад/с2.

 Вклад Мцб в суммарный возмущающий момент составил:

 К= 78.14 %

б) ось Z2:

 Мz2ин = Мин + Мцб = 0 + 0.07= 0.07 Н⋅м.

при α = - 0.785 рад.

 β = 1 рад.

 ωx0 = ωz0 = 1 рад/с.

 ωx0' = ωz0' = 0.2 рад/с2.

 ωy0 = 0.167 рад/с.

 ωy0' = 0.167 рад/c2

 Вклад Мцб в суммарный возмущающий момент составил:

К = 100 %

3) Работа ГС на подвижном основании при управляемой платформе.

 При подвижном основании и управляемой платформе инерционные возмущающие моменты определяются выражениями (9).

MZ2ИН={cos(2β)-2}cos(α)2tg(β)2Jxy2(ωx02+ωz02)+

+{2tg(β)2sin(β)2-2cos(β)2+4}sin(α)cos(α)Jxy2ωx0ωz0+

+{(Jy2-Jx2)/cos(β)-2Jxy2sin(β)(1+tg(β)2)}cos(α)ωx0ωy2+

+Jyz2ωz0ωz2(sin(α)-cos(α))/cos(β)-

-Jxz2ωx0'cos(α)/cos(β)+

+{2Jxy2(sin(β)tg(β)2+sin(β))sin(α)+(Jx2-

-Jy2)sin(α)/cos(β)}ωy2ωz0+

+Jxz2ωz0'sin(α)/cos(β)+

+{Jxz2-Jyz2}ωy2ωz2tg(β)+

+{(Jy2-Jx2)tg(β)+Jxy2(1-tg(β)2)}ωy22-

-{Jxz2tg(β)+Jyz2}ωy2'+

+Jz2ωz2'

MY1ИН={[Jxz2(tg(β)4+2/cos(β)2-1)cos(β)3+Jyz1tg(β)+

 +Jxz1]cos(α)2+

 +[[(Jx1-Jz1)-Jxy1tg(β)]cos(α)-Jxz1sin(α)]sin(α)}ωx02+

 +{[[Jxy1tg(β)+(Jz1-Jx1)]sin(α)-Jxz1cos(α)]cos(α)+

 +[Jxz2cos(β)3[2/cos(β)2+tg(β)4-1]+

 +Jyz1tg(β)+Jxz1]sin(α)2}ωz02+

 +{(Jx1-Jz1)cos(2α)+[1-tg(β)4-2/cos(β)2]Jxz2cos(β)3

 sin(2α)-[Jyz1tg(β)+2Jxz1]2sin(α)cos(α)-

 -Jxy1tg(β)cos(2α)}ωx0ωz0+

 +{[Jxy2sin(β)cos(β)(tg(β)2+1)+(Jx2-Jz2)]cos(α)}ωx0ωz2+

 +{[Jxz2sin(β)cos(β)+Jxz2sin(β)3/cos(β)+Jyz2]cos(α)+

 +[Jyz1cos(α)-Jxy1sin(α)]/cos(β)}ωx0ωy2-

 -{[Jxz2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+Jyz2]sin(α)+

 +[Jyz1sin(α)+Jxy1cos(α)]/cos(β)}ωz0ωy2+

 +{-[tg(β)2+1]sin(β)cos(β)Jxy2+(Jz2-Jx2)]sin(α)}ωz0ωz2+

 +{[Jx2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+Jy1tg(β)-(Jxy1+Jxy2)]

 cos(α)-Jyz1sin(α)}ωx0'+

 +{[-Jx2sin(β)cos(β)(1+tg(β)2)+(Jxy1+Jxy2)-Jy1tg(β)]

 sin(α)-Jyz1cos(α)}ωz0'+

 +{Jyz2sin(β)-Jxz2cos(β)}ωz22-

 -{Jxz2sin(β)+Jyz2cos(β)}ωz2'+

 +{(Jx2-Jy2)sin(β)+Jxy2cos(β)(tg(β)2-1)}ωz2ωy2+

 +{Jx2sin(β)2/cos(β)-2Jxy2sin(β)+Jy2cos(β)+

 +Jy1/cos(β)}ωy2'

 При этом получены следующие максимальные значения инерционных моментов.

а) ось Y1:

 Мy1ин = Мин + Мцб = 8.1 + 1.65 = 9.75 Н⋅м

при α = 0.776 рад.

 β = 1.0 рад.

 ωy2 = -2 рад/с.

 ωy2' = 3 рад/с2.

 ωz2 = 2 рад/с.

 ωz2' = -3 рад/с2.

 ωx0 = ωz0 = 1 рад/c.

 ωx0' = 0.2 рад/c2.

ωz0' = - 0.2 рад/c2.

 ωy0 = 0.167 рад/c.

 ωy0' = 0.167 рад/c2.

 Вклад Мцб в суммарный возмущающий момент составил:

 К = 16.9 %

б) ось Z2:

 Мz2ин = Мин + Мцб = 11.6 + 0.361 = 11.96 Н⋅м

при α = -0.785 рад.

 β = 1.0 рад.

 ωy2 = 2 рад/с.

 ωy2' = -3 рад/с2.

 ωz2 = -2 рад/с.

 ωz2' = 3 рад/с2.

 ωx0 =ωz0 = 1 рад/c.

 ωx0' = ωz0' = - 0.2 рад/c2.

 ωy0 = 0.167 рад/c.

 ωy0' = 0.167 рад/c2.

 Вклад Мцб в суммарный возмущающий момент составил:

 К = 3.02 %

**Описание структурной схемы канала стабилизации.**

 Чувствительным элементом, измеряющим отклонение стабилизированной платформы от заданного положения является датчик угловой скорости (ДУС), роль которого выполняет волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), сигнал на выходе которого пропорционален угловой скорости вращения платформы. Поэтому для устранения статической ошибки стабилизации сигнал с выхода ВОГ поступает на интегратор, на выходе которого формируется напряжение пропорциональное уже не скорости, а углу отклонения платформы.

 Далее это напряжение поступает на вход корректирующего звена, которое формирует необходимый вид ЛАХ для обеспечения устойчивости работы ГС. После предварительного усиления напряжение пропорциональ-ное углу отклонения платформы поступает на схему гальванической развязки, которая обеспечивает развязку по цепям питания между схемой управления и усилителем мощности (УМ), между сильноточными и слаботочными цепями схемы. Это необходимо для увеличения помехозащищенности канала обратной связи, кроме того это позволяет запитывать УМ непосредственно от первичного источника питания (аккумулятора или внешнего блока питания) без использования мощных преобразователей напряжения для питания УМ.

 Далее сигнал подается на вход усилителя мощности, который обеспечивает подачу управляющего напряжения на двигатели стабилизации. УМ выполнен импульсным с использованием широтно-импульсной модуляции управляющего напряжения. Это позволяет повысить КПД УМ, что является актуальным с учетом требований к необходимости получения больших скоростей и ускорений управления положением телекамеры, что требует применения мощных двигателей стабилизации.

 Одной из особенностей использования ВОГ является его высокая чувствительность к воздействию внешних электрических возмущений, что приводит к нарушению работы ВОГ вплоть до выхода его из строя. Поэтому в состав канала стабилизации необходимо обязательное включение специальной схемы защиты ВОГ.

Рассмотрим некоторые возможные варианты конструкции ДУ.

1) Простейшая конструкция ДУ представлена на рис.1.

 Рис.1.

 С генератора на ОВ подаётся питающее напряжение. Напряжение на СО отстаёт по фазе от возбуждающего на величину пропорциональную косинусу угла поворота ротора, который выполнен в виде диска переменной толщины.

 Недостатком данной конструкции является присутствие постоянного сдвига по фазе между сигналами на ОВ и СО, который в данной конструкции зависит не только от свойств материала ротора, но и от радиальных перемещений ротора и частоты напряжения возбуждения. Эту постоянную составляющую необходимо знать заранее и вычитать из полезного сигнала, что вносит дополнительную погрешность в точность установки нуля ДУ.

2) Для устранения влияния свойств материала ротора на уровень нулевого сигнала и устранение постоянного фазового сдвига применяется дополнительная “опорная” обмотка по конструкции аналогичная измерительной. Конструкция такого ДУ приведена на рис.2.

Рис.2.

 На фазоизмеритель подаётся напряжение с двух сигнальных обмоток, сигнал в одной из которых является опорным, а в другой - измеряемым.

 В данной конструкции изменение свойств материала ротора от воздействия внешних факторов (например температуры), изменение частоты питания обмотки возбуждения приводит только к изменению крутизны выходной характеристики ДУ. Кроме того уменьшается влияние радиальных смещений ротора.

 Если необходимо стабилизировать крутизну ДУ, то это возможно выполнить введением в его конструкцию схемы стабилизации крутизны, представляющую собой дополнительный контур измерения фазы (аналогичный рис.1), который измеряет фазовое запаздывание на дополнительном участке ротора имеющего постоянную толщину при любом повороте ротора и схему управления частотой генератора возбуждения. Фазовое запаздывание измеряемое этим контуром сравнивается с “эталонным” и в случае их несовпадения вырабатывается сигнал управления частотой возбуждающего генератора. Хотя следует заметить, что чувствительность крутизны ДУ (ΔКр) зависящая от свойств материала ротора определяется в основном его температурным коэффициентом сопротивления (величина которого для металлов (1÷7)⋅10-3 [К-1]) в квадрате. Таким образом в ДУ без стабилизации крутизны ΔКр≈1⋅10-6÷5⋅10-5, что для большинства приложений оказывается достаточным

 Приведённые на рис.1 и рис.2 конструкции ДУ позволяют измерять углы поворота ротора не более 180°. Для измерения углов поворота ротора до 360°, в конструкцию необходимо добавить ещё один “комплект” возбуждающих и измерительных обмоток, расположенных под углом 90° к основным. Таким образом на выходе ДУ мы будем иметь два сигнала, один из которых пропорционален синусу, а второй - косинусу угла поворота ротора.

 Описание вариантов исполнения электроники ДУ рассмотрим для конструкции ДУ приведённой на рис.2 в случаях аналогового и цифрового выходных сигналов. Следует заметить, что хотя фазу сигнала в выходных обмотках ДУ возможно “вращать” на большие углы, на практике желательно ограничиться углами в несколько десятков градусов для упрощения построения электронной части ДУ.

1) Электронная часть ДУ для случая цифрового выходного сигнала представлена на рис.3.

Рис.3

 Схема обрабатывает сигнал поступающий с ДУ, конструкция которого представлена на рис.2. Компараторы DA1 и DA2 преобразуют синусоидальное напряжение поступающее с обмоток ДУ в прямоугольные импульсы не изменяя при этом фазу сигнала. Сигнал с обмотки СО1 является опорным. Передний фронт импульса напряжения U1 разрешает переключение триггера DD1 в состояние, определяемое логическим уровнем сигнала U2, знак которого в момент прихода фронта U1 определяется знаком разности фаз напряжений U1, U2. Одновременно импульсные последовательности U1 и U2 поступают на логический элемент DD2 (“исключающее ИЛИ”), на выходе которого дважды за период напряжения питания ДУ появляется сигнал логической единицы, длительность которого пропорциональна разности фаз напряжений U1, U2. Этот сигнал управляет прохождением тактовых импульсов fтакт ,число которых в пачке на выходе DD3 будет пропорционально разности фаз U1, U2 и следовательно пропорционально углу поворота ротора.

 Данная схема позволяет обрабатывать напряжения U1 и U2, разность фаз которых может изменяться в диапазоне от 0° до 180°.

2) Если выходной сигнал ДУ требуется получить в аналоговой форме, то электронная часть ДУ может быть выполнена, например, по следующей схеме (Рис.4.) [Л15,стр94].

 В данной схеме выделение разности фаз напряжений U1 и U2 осуществляется с помощью логических элементов DD1...DD5 совместно с фильтром нижних частот выполненном на R1,R2,C1. Питание на DD1...5 подаётся стабилизированное двуполярное, чтобы обеспечить смену знака выходного напряжения Uвых при смене знака разности фаз. Операционный усилитель DA3 - буферный. Схема позволяет измерять разность фаз U1, U2 в диапазоне ±180°.

Рис.4.

 Кроме данного варианта исполнения аналогового выхода ДУ, возможно построение фазового детектора на схемах аналоговых перемножителей [Л15]. При этом диапазон измерения разности фаз не превышает ±60°.