

Федеральное агентство морского и речного транспорта  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского»

## **ГИРОТАХОМЕТР**

Методические указания к выполнению лабораторной работы  
для курсантов и студентов заочного обучения  
специальности 180402.65 «Судовождение»

Составили: Б. Г. Абрамович  
В. Ф. Полковников

Владивосток  
2011

Позиция № 105  
в плане издания  
учебной литературы  
МГУ на 2011 г.

Рецензент Г. Н. Шарлай, канд. техн. наук, Мор. гос. ун-т

Составили: Борис Георгиевич Абрамович  
Владимир Филиппович Полковников

## **ГИРОТАХОМЕТР**

Методические указания

Печатается в авторской редакции

---

1,7 уч.-изд. л.  
Тираж 70 экз

Формат 60 × 84 1/16  
Заказ №

---

Отпечатано в типографии РПК МГУ им адм. Г. И. Невельского  
Владивосток, 59, ул. Верхнепортовая, 50а

## Введение

Безопасность мореплавания является важнейшей проблемой мирового судоходства, находящейся в фокусе внимания Международной морской организации (ИМО).

ИМО приняло дополнения к Конвенции СОЛАС-74, одно из которых гласит, что все суда валовой вместимостью 50 000 т и более, должны иметь измеритель угловой скорости поворота судна. В качестве измерителя угловой скорости поворота может быть успешно использован гиротаксометр.

Плавание в открытом море происходит обычно с постоянными скоростью и курсами, как правило, с использованием системы автоматического регулирования курса судна – авторулевого. Качество работы авторулевого существенно зависит от степени точности информации об угле рыскания судна, угле перекладки руля и об угловой скорости рыскания. Применяемые ныне в авторулевых дифференцирующие устройства обеспечивают формирование управляющего сигнала, пропорционального угловой скорости рыскания судна, с точностью не более  $0,1^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Использование для целей формирования указанного сигнала высокоточного навигационного гиротаксометра позволяет существенно повысить качество работы авторулевого.

При плавании вблизи берегов, которое характеризуется частым изменением курса и меньшей свободой маневрирования, гиротаксометр используется для контроля скорости поворота и для ручного или автоматического управления движением судна по заданной траектории.

Применение гиротаксометра весьма целесообразно при швартовке крупнотоннажных судов. В этом случае нельзя полагаться только на визуальную оценку обстановки, показания гирокомпасов, высокоточного абсолютного лага, а необходимо знать и угловую скорость сближения судна с причалом.

Поскольку гиротаксометр обладает практически мгновенным быстрым действием, что позволяет определить тенденцию и значение угловой скорости поворота судна задолго до того, как рулевой воспримет это по репитеру гирокомпаса. С этой же целью гиротаксометры, имеющие чувствительность менее  $0,1^{\circ}/\text{мин}$ . или равную этому значению, применяются совместно с гирокомпасами в качестве датчиков в современных авторулевых на крупнотоннажных судах.

При выполнении методических указаний за основу была принята информация, изложенная в учебниках Смирнова Е.Л. и др. Технические средства судовождения. Теория, Воронова В.В. и др. Технические средства судовождения. Конструкция и эксплуатация и учебном

пособии Горохова И.В., Утенкова А.М. Навигационные гиротахометры и их применение в судовождении. Необходимость подготовки методических указаний вызвана дефицитом информации в библиотечном фонде.

## **1. Техничко-эксплуатационные требования, предъявляемые к гиротахометрам.**

Гиротахометром (ГТ), или датчиком угловой скорости (ДУС), или дифференцирующим гироскопом (ДГ) называется гироскопическое устройство, предназначенное для определения угловой скорости объекта, на котором оно установлено.

В принятой на XII ассамблее ИМО Резолюции А. 526 (13) правительством стран – членом ИМО рекомендуется обеспечить, чтобы ГТ поворота, установленные на судах на 1 сентября 1984 г. и после этого срока, удовлетворяли следующим основным технико-эксплуатационным требованиям:

- ГТ может быть как автономным, так и являться частью другого соответствующего оборудования;
- ГТ должен обеспечивать измерение угловой скорости в сторону левого и правого бортов;
- индикация угловой скорости может осуществляться с помощью аналогового или цифрового репитера. На аналоговом репитере поворот судна влево должен индицироваться поворотом стрелки репитера влево от нулевого отсчета, а поворот вправо-поворотом стрелки вправо. На цифровом репитере должна быть также обеспечена индикация стороны поворота;
- должна быть предусмотрена линейная шкала в диапазоне угловых скоростей не менее  $30^\circ/\text{мин.}$ ; также могут быть предусмотрены дополнительные линейные шкалы;
- постоянная времени ГТ должна быть варьируемой в пределах до 10 с. в процессе эксплуатации;
- измеренная угловая скорость не должна отличаться от действительной более чем на  $0,5^\circ/\text{мин.}$ , плюс 5% от измеренной угловой скорости, включая погрешность, обусловленную вращением Земли;
- бортовая качка с амплитудой  $5^\circ$  и периодом до 25 с. и килевая качка с амплитудой  $1^\circ$  и периодом до 20 с. не должна вызывать погрешности в измерении угловой скорости поворота более чем на  $0,5^\circ/\text{мин.}$

Указанные требования к точности измерения угловой скорости должны обеспечиваться при скорости судна до 10 узлов;

- время приведения ГТ в полную готовность к работе должно быть не более 4 мин.;
- конструкция ГТ должна быть такой, чтобы его работа не ухудшала характеристик других приборов;

## 2. Принцип действия гиротаксометра

В настоящее время наибольшее распространение для целей судовождения получили ГТ, в которых используется астатический гироскоп с двумя степенями свободы.

Модель ГТ, построенного на двухстепенном гироскопе с механическими элементами, обеспечивающими наложение на него восстанавливающего и демпфирующего моментов, изображена на рис 2.1.

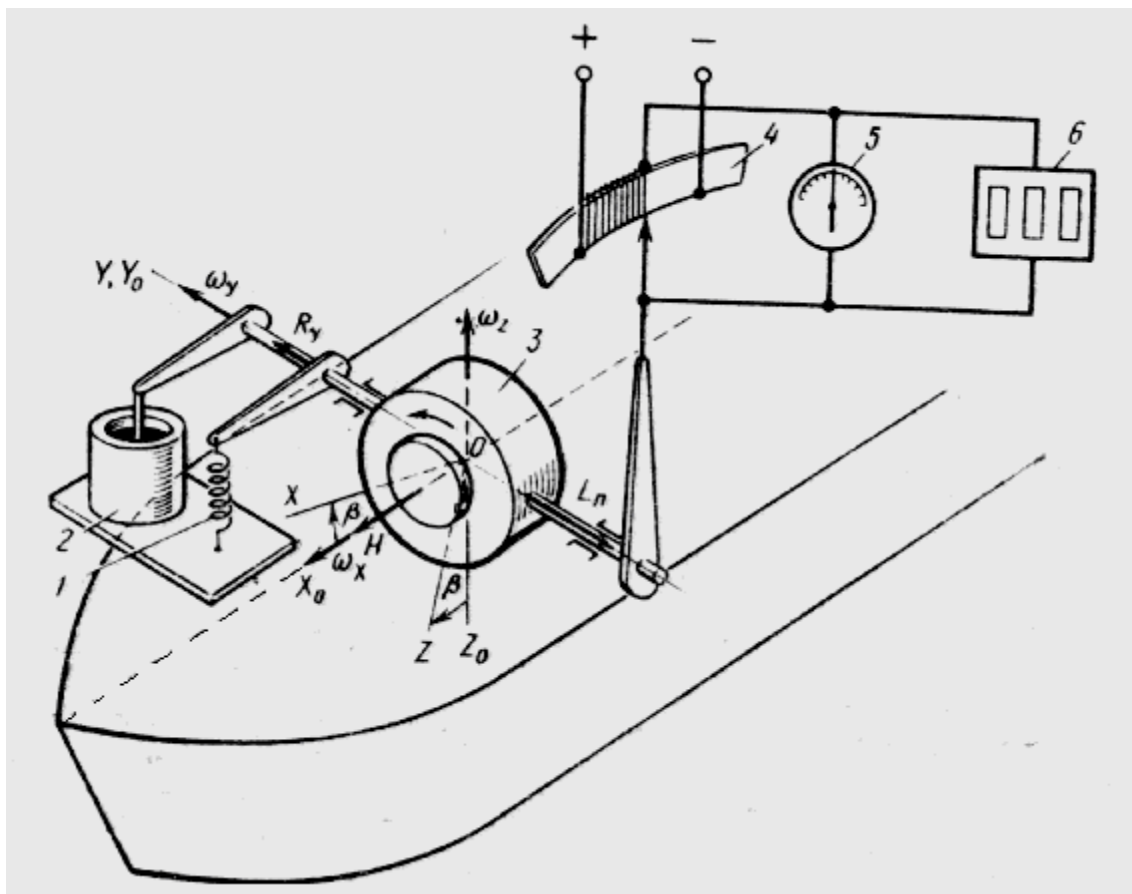


Рис 2.1 Модель гиротаксометра

На приведенном рисунке показаны: гирокамера 3 с быстровращающимся ротором; упругий элемент 1 (механическая пружина), создающий восстанавливающий момент по углу  $\beta$ ; демпфирующее уст-

ройство 2 (жидкостный или воздушный поршень), обеспечивающее погашение собственных колебаний гироскопа; преобразователь 4 механического движения (угла поворота гироскопа  $\beta$ ) в электрический сигнал, выполненный в виде переменного потенциометра; индикатор измеряемой угловой скорости аналогового 5 (в данном случае вольтметр) или цифрового 6 типа. При ориентации гироскопа, представленной на рис. 2.1, ГТ поставлен на судно в целях измерения его угловой скорости по углу рыскания. Нетрудно себе представить, что при другой ориентации он может измерять угловую скорость бортовой или килевой качки.

Принцип действия ГТ можно пояснить следующим образом. При появлении угловой скорости  $\dot{\omega}_z$  (см. рис. 2.1) поворота объекта по углу рыскания возникает гироскопический момент. Вектор этого гироскопического момента направлен по оси  $OY$  и для малых углов  $\beta$  имеет значение  $R_y = H\dot{\omega}_z$ . Указанный момент будет поворачивать гироскоп до тех пор, пока действие момента  $R_y$  не будет уравновешено моментом сил упругости пружины  $L_n = C\beta$  (где  $C$  – коэффициент, характеризующий жесткость пружины). В итоге угол поворота главной оси гироскопа будет пропорционален угловой скорости поворота основания, так как из равенства

$$R_y = L_n .$$

или  $H\dot{\omega}_z = C\dot{\beta}_z$  вытекает что,

$$\beta_z = (H / C)\omega_z$$

Следует особо отметить, что по принципу действия ГТ измеряет абсолютную угловую скорость, и здесь (а так же и в дальнейшем ) не учитываются угловые скорости суточного вращения Земли и вращения объекта вокруг Земли лишь по той причине, что они либо находятся за порогом его чувствительности, либо входят в погрешность измерения, либо их действие компенсируется с помощью датчика момента по соответствующей информации.

### 3. Уравнение движения гиротаксметра

В целях выявления основных характеристик ГТ перейдем к определению дифференциального уравнения его движения. Пусть  $OX_0Y_0Z_0$  (рис. 3.1) – система координат, неизменно связанная с судном, причем ось  $OX_0$  направлена вдоль продольной оси судна, ось  $OY_0$  – вдоль поперечной, ось  $OZ_0$  перпендикулярна палубе судна. Система координат  $OXYZ$  связана с гироскопом (система осей Резаля)

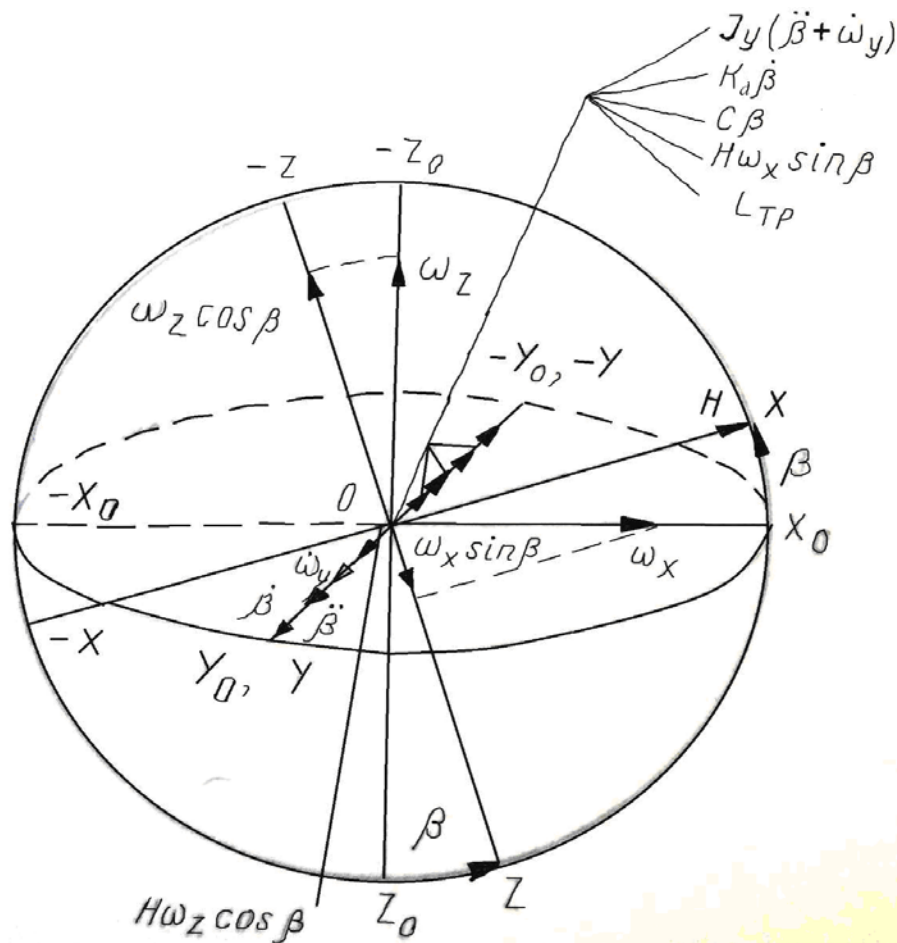


Рис.3.1

При составлении уравнения движения ГТ по способу профессора Б.И. Кудревича будем учитывать ( см. рис. 3.1):

а) инерционный момент  $J_y \ddot{\beta}$ , где  $J_y$  – момент инерции всех частей ГТ, участвующих в движении вокруг оси  $OY$ ;  $\ddot{\beta}$  – относительное ускорение;

б) демпфирующий момент  $K_d \dot{\beta}$  который принимается пропорциональным угловой скорости  $\dot{\beta}$  ( $K_d$  – коэффициент момента демпфирования);

в) момент сил упругости  $C\beta$ , где  $C$  – коэффициент момента силы упругости пружины;

г) гироскопические моменты

$H\omega_1 \cos\beta$  и  $H\omega_2 \sin\beta$ ;

д) момент сил сухого трения в опорах подвеса камеры гироскопа  $L_{тр}$ .

Суммируя моменты и, приравнивая полученную сумму нулю, получим дифференциальное уравнение движения чувствительного элемента одногироскопного ГТ:

$$J_y \ddot{\beta} + K_d \dot{\beta} + C\beta - H\omega_z \cos \beta + H\omega_x \sin \beta - L_{mp} = 0 \quad (3.1)$$

Отметим, что в полученном уравнении остались неучтенными некоторые, обычно весьма малые, моменты, вызванные неидеальной сбалансированностью и т.п.

Представим уравнение (3.1) в следующем виде:

$$J_y \ddot{\beta} + K_d \dot{\beta} + C\beta = H\omega_z \cos \beta - H\omega_x \sin \beta + L_{mp} \quad (3.2)$$

Из этого уравнения следует, что выходной сигнал прибора, характеризуемый углом  $\beta$ , будет зависеть не только от угловой скорости  $\omega_z$ , подлежащей измерению, но и от угловой скорости  $\omega_x$ . Уменьшение влияния бортовой качки, определяемой угловой скоростью  $\omega_x$ , может быть частично обеспечено конструктивным путем, а именно, применением более жесткой пружины, что уменьшает значения угла  $\beta$ .

Если не учитывать моменты, вызывающие помехи в показаниях ГТ, и считать угол  $\beta$  малым, то уравнение (3.2) примет следующий вид:

$$J_y \ddot{\beta} + K_d \dot{\beta} + C\beta = H\omega_z + L_{mp} \quad (3.3)$$

Из правой части полученного уравнения следует, что если угловая скорость  $\omega_z$  настолько мала, что гироскопический момент  $H\omega_z$  меньше момента сил сухого трения  $L_{mp}$ , то никакого движения гироскопа по углу  $\beta$  не возникает. Отсюда вытекает неравенство

$$\omega_{z \min} \geq (L_{mp} / H), \quad (3.4)$$

характеризующее минимальное значение угловой скорости, которое может быть измерено с помощью ГТ. Иначе говоря, его порог чувствительности.

Например, при следующих исходных данных:  $H=0,123 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ ;  $L_{mp} = 0,245 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$  определить порог чувствительного ГТ.

По формуле (1.4) находим

$$\omega_{z \min} = \frac{0,245 \cdot 10^{-4}}{0,123} = 1,99 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} = 1,14 \cdot 10^{-2} \text{ о} / \text{с} = 0,68^\circ / \text{мин} .$$



За пределами порога чувствительности можно пользоваться уравнением

$$J_y \ddot{\beta} + K_d \dot{\beta} + C\beta = H\omega_z. \quad (3.5)$$

Приведем полученное уравнение к нормальному виду:

$$\ddot{\beta} + 2h\dot{\beta} + \omega_0^2 \beta = \frac{H}{J_y} \omega_z. \quad (3.6)$$

где  $2h = K_d / J_y$ ;  $\omega_0^2 = C / J_y$

Частное решение этого уравнения, характеризующее положение равновесия гироскопа для случая, когда измеряемая угловая скорость постоянна по значению, определится выражением

$$\beta_r = \frac{H}{J_y \omega_0^2} \omega_z = \frac{H}{C} \omega_z. \quad (3.7)$$

Однородное уравнение, соответствующее уравнению (3.6) имеет вид

$$\ddot{\beta}_0 + 2h\dot{\beta}_0 + \omega_0^2 \beta_0 = 0.$$

Общее решение такого уравнения известно:

$$\beta_0 = e^{-ht} (C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t) \quad (3.8)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные интегрирования;  $\omega_d$  – частота затухающих колебаний ГТ равная  $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}$ .

Полное решение уравнения (3.6) получим, сложив решения (3.7) и (3.8)

$$\beta = e^{-ht} (C_1 \cos \omega_d t + C_2 \sin \omega_d t) + \frac{H}{C} \omega_z \quad (3.9)$$

Принимая начальные условия нулевыми, то есть считая, что при  $t=0$ ,  $\beta_{t=0} = 0$ ,  $\dot{\beta}_{t=0} = 0$ , найдем произвольные постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ .

Подставляя в решение (3.9) значения всех величин при  $t=0$ , получим

$$C_1 = -H\omega_z / C$$

Дифференцируя решение (3.9) по времени, будем иметь

$$\begin{aligned} \dot{\beta} = & -h e^{-ht} C_1 \cos \omega_d t - h e^{-ht} C_1 \omega_d \sin \omega_d t - \\ & - h e^{-ht} C_2 \sin \omega_d t + h e^{-ht} C_2 \omega_d \cos \omega_d t \end{aligned}$$

Подставляя сюда значения всех величин при  $t=0$ , найдем

$$C_2 = -\frac{H\omega_z h}{\omega_d C}.$$

С учетом найденных значений  $C_1$  и  $C_2$  полное решение приобретет вид

$$\beta = \ell^{-ht} \left( -\frac{H\omega_z}{C} \cos \omega_d t - \frac{H\omega_z h}{\omega_d C} \sin \omega_d t \right) + \frac{H\omega_z}{C}.$$

или 
$$\beta = \frac{H\omega_z}{C} \left[ 1 - \ell^{-ht} \left( \cos \omega_d t + \frac{h}{\omega_d} \sin \omega_d t \right) \right] \quad (3.10)$$

Выполним по отношению к выражению (3.10) операцию приведения к амплитуде и фазе. Обозначим  $h/\omega_d = \operatorname{tg} \theta$ , после чего выражение в круглых скобках может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \cos \omega_d t + \frac{h}{\omega_d} \sin \omega_d t &= \cos \omega_d t + \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \sin \omega_d t = \\ &= \frac{\cos \omega_d t \cos \theta + \sin \omega_d t \sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\cos(\omega_d t - \theta)}{\cos \theta} \end{aligned}$$

В соответствии с известной формулой тригонометрии  $\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta}}$  и с учетом выражения (3.10), полученный результат позволяет представить решение в следующей более удобной форме:

$$\beta = \frac{H\omega_z}{C} \left[ 1 - \frac{\omega_0}{\omega_d} \ell^{-ht} \cos(\omega_d t - \theta) \right]. \quad (3.11)$$

Выражение (3.11) характеризует реакцию гироскопа на приложенную к нему постоянную угловую скорость  $\dot{\omega}_z$ : совершив затухающие колебания, гироскоп придет в установившееся положение

$$\beta_r = \frac{H\omega_z}{C}.$$

Важным показателем качества ГТ является длительность его переходного процесса. Указанная характеристика определяется временем, спустя которое отклонение гироскопа при действии постоянной угловой скорости  $\omega_z$ , будет отличаться от его равновесного положения на значение, не превышающее заданное ( $m$ , %).

Для отыскания времени затухания колебаний обратимся к выражению (3.11). Искомое время  $t_1$  находим из выражения

$$(\omega_0 / \omega_d) \ell^{-ht_1} = m / 100.$$

Прологарифмировав это выражение  $\ln(\omega_0 / \omega_d) - ht_1 = \ln(m / 100)$ ,

получим 
$$t_1 = \frac{1}{h} \ln \frac{100\omega_0 / \omega_d}{m}.$$

Пример. Для ГТ, у которого частота собственных колебаний  $\omega_0=10\text{с}^{-1}$  и выполнено условие  $2h^2 = \omega_0^2$  или  $h = 0,707\omega_0$ , найдем время  $t_1$ , считая, что  $m=3\%$ .

Учитывая, что  $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - h^2}$ , а  $2h^2 = \omega_0^2$ , находим  $t_1 = \frac{\sqrt{2}}{\omega_0} \ln \frac{100\sqrt{2}}{m}$ ,

откуда 
$$t_1 = \frac{1,41}{10} \ln \frac{100 \cdot 1,41}{3} \approx 0,54\text{с}.$$

Аналогичный результат получится, если в соответствии с выражением(3.11) рассчитать график переходного процесса ГТ. Указанный график (рис.3.2) для простоты построен в относительных единицах, то есть принято, что  $\beta_r = \beta_r^* = 1$ .

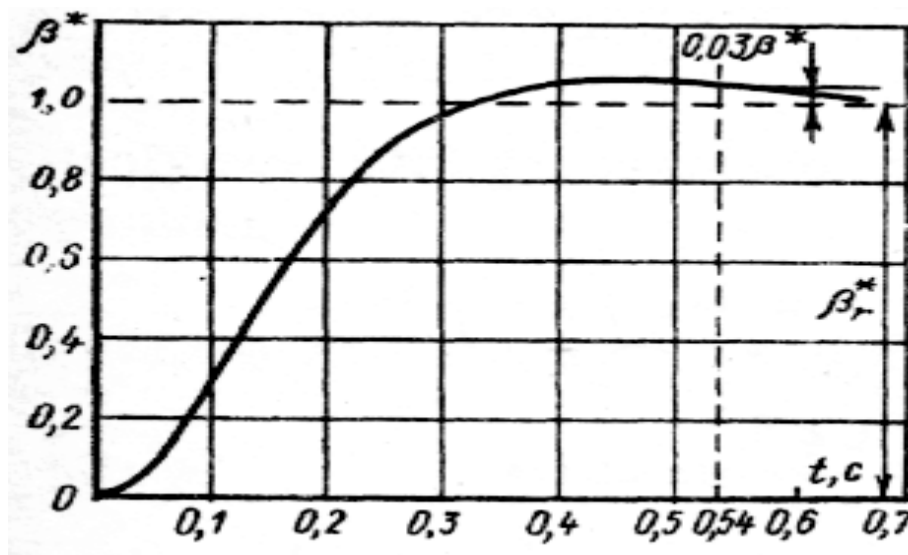


Рис 3.2

Существенными недостатками ГТ с механической пружиной является нестабильность его показаний по времени, недостаточная линейность выходной характеристики и сравнительно узкий диапазон измеряемых угловых скоростей.

#### 4. Гиротахометр с электрической пружиной и электрическим демпфированием

##### 4.1 Принцип действия

В современных морских навигационных ГТ, в том числе в отечест-

венном ГТ «Галс», вместо механической пружины, создающей восстанавливающий момент, используется устройство, которое называется электрической пружиной.

Указанное устройство выполнено по схеме обратной связи и функционирует следующим образом (рис. 4.1).

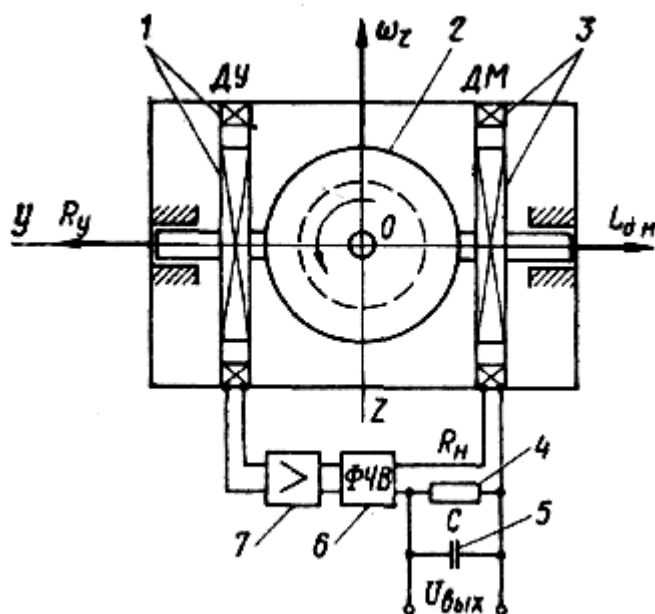


Рис. 4.1 Гиротахометр с электрической пружиной и электрическим демпфированием

С датчика угла ДУ(1) бесконтактного типа снимается электрический сигнал, пропорциональный углу  $\beta$  поворота гироскопа (2). После усилителя (7) этот сигнал подается на фазочувствительный выпрямитель (6) и далее на управляющую обмотку датчика момента ДМ(3), в результате чего создается восстанавливающий момент, пропорциональный углу поворота гироскопа. Наличие усилителя с большим коэффициентом усиления позволяет получить высокую собственную частоту колебаний ГТ, что обеспечивает ему хорошую амплитудную характеристику.

Демпфирование в ГТ с электрической пружиной осуществляется с помощью емкостной обратной связи, включающей в себя усилитель (7), фазочувствительный выпрямитель (6) и конденсатор (5). Указанный конденсатор, осуществляя сдвиг по фазе сигнала, пропорционального углу  $\beta$ , выполняет функции дифференцирующего элемента. Индикация значения измеряемой угловой скорости осуществляется с помощью аналогового либо цифрового указателей.

Докажем, что напряжение  $U_{\text{вых}}$ , снимаемое с резистора нагрузки (4) пропорционально измеряемой угловой скорости  $\omega_z$ . Напряжение, снимаемое с датчика угла, определяется выражением  $U_{\text{ДУ}} = K_1 \beta$ , где  $K_1$  - коэффициент пропорциональности. С выхода усилителя снимается напряжение  $U_y = K_2 U_{\text{ДУ}}$ , где  $K_2$  - коэффициент усиления усилителя. Момент создаваемый датчиком момента, определяется выражением  $L_{\text{ДМ}} = K_1 I = K_u U_y$ , где  $K_1$  - коэффициент датчика момента по току, протекающему по его управляющей обмотке;  $K_u$  - коэффициент датчика момента по напряжению;  $I$  - ток в цепи, включающей резистор нагрузки, управляющую обмотку датчика момента.

В положении равновесия момент  $L_{\text{ДМ}}$  уравнивает гироскопический момент

$$K_1 I = H \omega_z$$

или  $I = (H / K_1) \omega_z$

Ток, протекающий по резистору нагрузки  $R_H$ , создает падение напряжения

$$U_{\text{вых}} = I R_H = (H R_H / K_1) \omega_z,$$

что и требовалось доказать.

Выходной сигнал ГТ содержит помехи, вызванные влиянием бортовой и килевой качек судна. В целях уменьшения указанного влияния в соответствии с требованиями ИМО в конструкцию навигационного ГТ вводится электронный фильтр с регулируемой постоянной времени.

Такое требование объясняется различиями эксплуатации ГТ при его использовании в автоматических рулевых в качестве устройства выработки управляющего сигнала, пропорционального угловой скорости рыскания судна. Так, для точного удержания судна на заданном постоянном курсе или для точного выполнения циркуляции с заданной угловой скоростью на тихой воде, необходимо иметь сигнал об угловой скорости с наименьшим запаздыванием, что отвечает минимальному значению постоянной времени (0.5 – 1 с). Наоборот, в условиях значительного морского волнения во избежание существенного повышения интенсивности работы рулевого привода необходимо иметь намного большее значение постоянной времени (10 с. и более).

С помощью информации об угловой скорости судна, вырабатываемой навигационным ГТ, можно решить следующие задачи: удержание судна с высокой точностью на заданном постоянном курсе; выполнение циркуляции с заданным радиусом кривизны (с заданной угловой скоростью).

Кроме того, в комплексе с абсолютным лагом навигационный ГТ, вырабатывает информацию, обеспечивающую безопасную швартовку крупнотоннажных судов.

Рассмотрим подробнее первые две задачи.

1. Из теории классических авторулевых, относящихся к классу пропорционально-дифференциальных регуляторов (ПД), известен следующий закон управления рулем

$$\beta = K_1\alpha + K_2\dot{\alpha} \quad (4.1)$$

где  $\beta$ - угол перекладки руля;  $\alpha$  - угол отклонения судна от заданного курса;  $\dot{\alpha} = \omega_z$  - угловая скорость указанного отклонения;  $K_1K_2$ - коэффициенты обратной связи соответственно по курсу и угловой скорости.

Информация об угле  $\alpha$  поступает в авторулевую от какого-либо курсоуказателя, а об угловой скорости  $\dot{\alpha} = \omega_z$  - либо путем дифференцирования сигнала, пропорционального углу  $\alpha$ , либо от навигационного ГТ непосредственно  $\omega_z = \dot{\alpha}$ .

В первом случае возникает значительная трудность, оказывающая негативное влияние на точность удержания судна на заданном курсе. Сложность состоит в том, что вследствие существования, порога чувствительности гирокомпаса  $\alpha_{min}$ , который определяется величиной порога чувствительности следящей системы, а также системы синхронной передачи курса, построенной на сельсинах, при отклонениях судна от заданного курса на величину, меньшую  $\alpha_{min}$ , электрический сигнал, пропорциональный углу  $\alpha$ , будет отсутствовать (обычно  $\alpha_{min}=0,2^\circ$ ). В таком случае будет отсутствовать и сигнал, пропорциональный  $\dot{\alpha}$ . В результате этого перекладка руля в соответствии с законом (4.1) не состоится, и судно будет беспрепятственно уклоняться от заданного курса. При выходе за пределы  $\alpha_{min}$  работает закон (4.1). Однако судно за это время уже наберет определенную инерцию в своем движении по углу  $\alpha$ , как результат имевшего место запаздывания в выработке информации. Судно неизбежно отклонится от заданного курса даже в спокойную погоду на величину  $0,5-0,7^\circ$ , прежде чем будет остановлено и начнет возвращаться на заданный курс. Важно подчеркнуть, что особенно неприятным фактом в рассмотренной ситуации является отсутствие сигнала, пропорционального  $\omega_z$ , поскольку по своей физической сути именно этот сигнал имеет основное значение на начальной стадии отклонения от курса, обеспечивая своим опережающим возникновением форсированную перекладку руля, по сравнению с тем случаем, когда имелся бы только один сигнал. Пропорциональный  $\alpha$ . Теперь становится понятной роль включенного в схему автоматического управления ГТ, который вырабатывает сигнал,

пропорциональный  $\omega_z$  автономно, то есть независимо от сигнала, пропорционального  $\alpha$

Обладая высоким порогом чувствительности по угловой скорости, ГТ способен значительно повысить точность удержания судна на заданном постоянном курсе. Так, например, примененный в шведском авторулевом ASAP-II гиротахоакселерометр АТЕW обеспечивает точность стабилизации супертанкера на курсе при спокойном состоянии моря не хуже  $0,1^\circ$ .

Представляет интерес предельно достижимая точность, которая может быть обеспечена при существовании одной из важной характеристик движения судна, как величина его поперечного линейного смещения с линии заданного курса (линии пути при отсутствии течения).

Базируясь на известной формуле  $\alpha = S\varepsilon$ , определяющей поперечный линейный снос судна, управляемого по гирокомпасу, имеющему постоянную погрешность курса  $\varepsilon$ , запишем ее применительно к навигационному ГТ

$$\alpha = S \int_0^t \omega_{z \min} dt,$$

где  $\omega_{z \min}$  – порог чувствительности ГТ.

Считая что  $\omega_{z \min} = const$ , получим

$$d = S\omega_{z \min} t.$$

Подставляя в уравнение вместо  $t$  значение  $t=S/V$ , где  $S$  и  $V$ - соответственно пройденное судном расстояние за время  $t$  и его скорость, получим искомую формулу

$$d = \frac{S^2 \omega_{z \min}}{V}.$$

$\omega_{z \min} = 0,25^\circ / \text{мин} = 7,25 \cdot 10^{-5} c^{-1}$  (чувствительность отечественного навигационного ГТ «Галс»)

К примеру, принимая  $\omega_{z \min} = 7,25 \cdot 10^{-5} c^{-1}$  и задавая скорость судна  $V = 10 м \cdot c^{-1}$  (примерно 20 уз), найдем поперечное линейное смещение судна, которое образуется при прохождении расстояния  $S=1 \text{ миля} = 1852 м$ .

$$d = \frac{(1852 м)^2 7,25 \cdot 10^{-5} c^{-1}}{10 м \cdot c^{-1}} \approx 25 м$$

Поворот судна с заданной угловой скоростью в современных авторулевых, снабженных навигационным ГТ, осуществляется следующим образом. С помощью программного устройства непрерывно задается значение компасного курса  $KK_3$ , изменяющееся с заданной угловой скоростью  $\omega_{z3}$ ,

$$KK_3(t) = KK_H + \omega_{z3}t,$$

где  $KK_H$  - начальный (перед началом поворота) компасный курс. Закон управления рулем в рассматриваемом случае определяется выражением  $\beta = \beta_3 + \beta(t)$ , где  $\beta_3$  - заданное значение отклонения руля, обеспечивающее изменение курса по заданному закону;  $\beta(t)$  - мгновенное значение изменяющегося во времени дополнительного угла перекладки руля, определяемого выражением

$$\beta(t) = K_1\alpha + K_2\dot{\alpha}, \quad \dot{\alpha} = \omega_z,$$

причем в данном случае  $\alpha$  и  $\dot{\alpha}$  формируется в соответствии с выражениями

$$\alpha = KK_3(t) - KK(t); \quad \dot{\alpha} = \omega_z = \omega_{z3} - \omega_z(t),$$

где  $KK(t)$  - мгновенное значение курса, поступающее от гирокомпаса;  $\omega_z(t)$  - мгновенное значение угловой скорости, поступающее от ГТ.

Определим предельно допустимую точность, которая может быть обеспечена при выполнении поворота с заданной угловой скоростью. Для этого найдем поперечное линейное смещение судна, возникающее в том случае, когда в законе управления рулем (4.1) сигнал, пропорциональный  $\alpha$ , отсутствует, так как  $\alpha < \alpha_{min}$ , а сигнал, пропорциональный  $\omega_z$ , равен погрешности ГТ  $\varepsilon_\omega$ , то есть  $\omega_z = \omega_{z3} - \omega_z(t) = \varepsilon_\omega$

Для случая движения по дуге окружности, то есть когда  $S = (KK_K - KK_H)R_{n.3}$ , где  $KK_H, KK_K$  - соответственно начальный и конечный компасные курсы поворота,  $R_{n.3}$  - заданный радиус поворота, получим искомую формулу  $d = \frac{[(KK_K - KK_H)R_{n.3}]^2 \varepsilon_\omega}{V}$  (4.2)

Зададим  $R_{n.3} = 700\text{м}$ ,  $V = 10\text{мс}^{-1}$  (20 уз),  $KK_K - KK_H = 86^\circ \approx 1,5 \text{ рад}$ . и погрешность измерения угловой скорости, как у отечественного ГТ «Галс»:

$$\varepsilon_\omega = \omega_{z_{min}} + 2,5\% \omega_z,$$

то есть  $\varepsilon_\omega = 7,25 \cdot 10^{-5} + 0,025\omega_z$ .

Поскольку  $\omega_{z3} = \frac{V}{R_{n.3}} = \frac{10\text{м} \cdot \text{с}^{-1}}{700\text{м}} = 0,0143\text{с}^{-1}$ ,

то  $\varepsilon_\omega = 7,25 \cdot 10^{-5} + 0,025 \cdot 0,0143 = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$

Подставляя в формулу (4.2) значения всех входящих в нее величин, получим

$$d = \frac{(1,5 \cdot 700\text{м})^2 4,3 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}}{10\text{м} \cdot \text{с}^{-1}} \approx 47\text{м}$$



В заключении приведем основные технические характеристики современных навигационных ГТ (табл. 4.1)

Таблица 4.1

Марка, фирма-изготовитель, страна	Порог чувствительности, град/мин.	Диапазон измерения скорости, град/мин.	Тип подвеса чувствительного элемента	Точность изм. град/мин	Время готовности после включения, мин.	Постоянная времени фильтра, с.
Галс-2, Россия	0,25	$\pm 6, \pm 30, \pm 90$	Двухступенный гироскоп с «сухим» подвесом на тарикоподшипниках	$0,25 \pm 2,5$ % $\omega_z$	4	0,3,6,12,18,30
Naviturn, Плат (Plath) ФРГ	0,6	$\pm 30, \pm 90, \pm 300$		0,6	32	-
Аншютц (Anshutz) ФРГ	0,1	$\pm 10, \pm 30, \pm 100, \pm 180, \pm 300$		0,1	-	-
АТЕУ (гиротахоакселерометр)	0,018	-	Трехступенной гироскоп с аэродинамическим подвесом	-	0,5 - 3	-
R11-4326, Голандия	0,18	-	Двухступенной гироскоп с гидростатическим подвесом	-	1	-
Сперри (Sperry) США	0,5	$\pm 90, \pm 180$	-	-	1	-

## 5. Судовой гиротахометр «Галс-3»

### 5.1 Технические характеристики и состав комплекта

Отечественный навигационный гиротахометр «Галс-3» (разработка ЦНИИ «Дельфин», Москва) предназначен для измерения угловой скорости поворота судна. Получаемую от прибора информацию мож-

но использовать в системах автоматического управления курсом судна, а также применять при ручном управлении.

Значение угловой скорости отображается на трехдиапазонных аналоговых репитерах. Для внешних потребителей значение угловой скорости может быть представлено как в аналоговой форме, в виде сигнала постоянного тока, так и в цифровом коде.

Технические характеристики навигационного гиротаксметра:

диапазон измеряемой угловой скорости, °/мин	±6,±30,±90
чувствительность, °/мин	0,1
погрешность измерения, °/мин	0,2 (±2,5% значения измеряемой величины)
время готовности, мин	4
время непрерывной работы, ч	5000
полный ресурс работы, ч	50000
напряжения питания, В	220(50Гц)
потребляемая мощность, ВА	60
постоянная времени фильтра, с	0,3,6,12,18,30

Гиротаксметр «Галс-3» устанавливают на судах с угловыми скоростями поворота до 100°/мин.

В состав комплекта гиротаксметра (рис. 5.1) входят следующие приборы:

– основной прибор 3 (прибор Т4/3) служит для выработки угловой скорости судна и преобразования ее в электрический сигнал постоянного тока или цифровой код;

– аналоговый репитер 1 (прибор Р7-1). Представляет собой индикаторную следящую систему, отображающую направление и величину угловой скорости поворота судна. Весь диапазон измеряемых скоростей разбит на три поддиапазона. Переключение поддиапазонов можно осуществлять автоматически или вручную, с помощью переключателя; внутреннюю подсветку репитера можно регулировать как вручную, так и автоматически;

– цифровой репитер 4 (прибор Р6);

– прибор управления и фильтрации 2 (прибор Ш101) служит для включения-выключения гиротаксметра, включения и отключения аналоговых репитеров, находящихся на крыльях мостика. На передней панели прибора расположен пульт управления фильтром (выбор постоянной времени фильтра), а также специальные

лампы, сигнализирующие об отказах и неисправностях гиротаксометра.

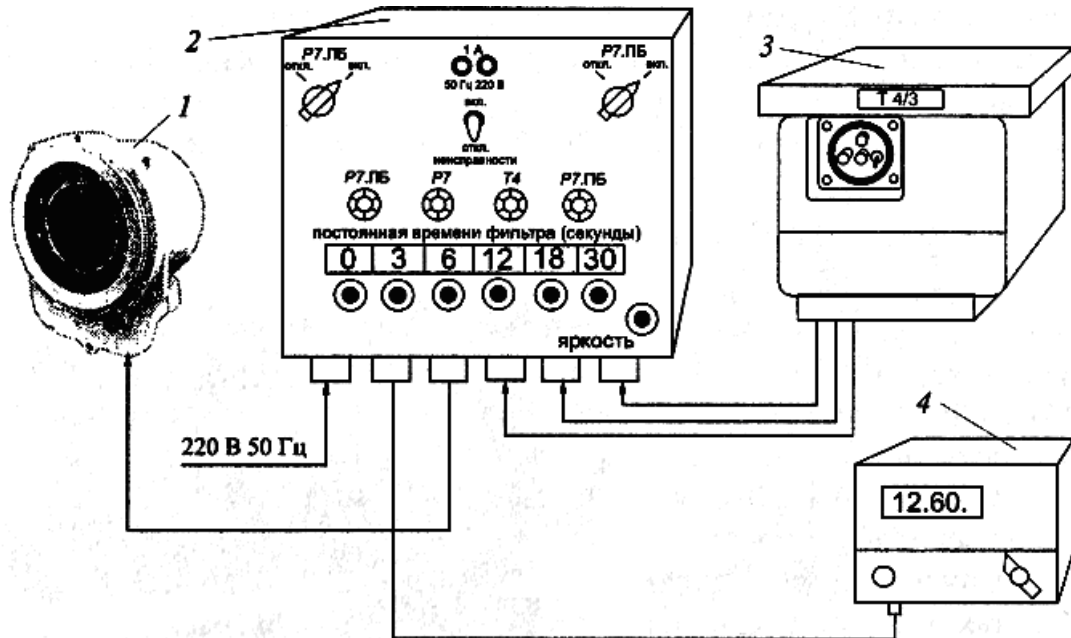


Рис. 5.1 Состав комплекта гиротаксометра «Галс - 3»

Разработаны четыре комплектации измерителя угловой скорости поворота: «Галс», «Галс-1», «Галс-2», «Галс-3». Наиболее полная комплектация изделия «Галс-3».

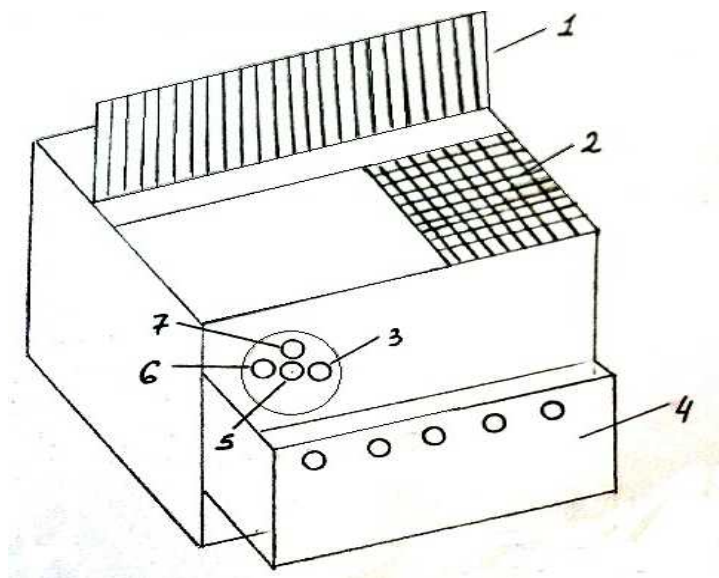
В комплектации изделия «Галс-2» в отличие от изделия «Галс-3» нет цифрового репитера (Р6), а в изделиях «Галс» и «Галс-1» нет еще и прибора управления и фильтрации (Ш101). Между собой изделия «Галс» и «Галс-1», различаются диапазоном измерения угловой скорости поворота судна, который у изделия «Галс» 0-360°/мин., а у «Галс-1»-0-180°/мин.

## 5.2 Устройство и принцип действия гиротаксометра

Основной прибор гиротаксометра (Т4/3) служит для измерения угловой скорости поворота судна и преобразования ее в сигнал постоянного тока или цифровой код.

Основной прибор (рис. 5.2) включает в себя следующие функциональные узлы и блоки: блок электронных плат (1), гиросекцию (2),

блок питания (4), схемы включения, защиты и контроля неисправностей.



Основной прибор рис. 5.2

В корпусе прибора Т4/3 «Галс-3» имеются три отсека. Вертикальная перегородка делит корпус на две части. Заднюю часть занимают электронные платы (1). Передняя часть разделена горизонтальной перегородкой. В правом отсеке размещены гиросекция (2), в нижнем – блок питания (4). На лицевой стороне отсека, где размещена гиросекция установлены: тумблер питания (3) предохранитель (5), сигнальные лампочки (6 и 7) «Неиспр 2» и «Неиспр 1».

К блоку электронных плат (1) относятся:

- плата питания гиromотора;
- плата управления и сигнализации;
- плата преобразователя «напряжение-код»;
- плата связи с прибором Р6 (цифровым репитером).

Гиросекция является основным узлом гиротаксметра. В горизонтальной рамке с помощью цапф и подшипников закреплен гиromотор. Вектор кинетического момента  $H$  гироскопа расположен горизонтально и параллелен диаметральной плоскости судна. Ось подвеса рамки с гироскопом также расположена горизонтально и параллельно плоскости шпангоутов. Такой подвес обеспечивает рамке с гироскопом свободу вращения относительно корпуса судна. Угол поворота рамки ог-

раничен упругими упорами в пределах от  $\pm 0,75$  до  $\pm 1,5^\circ$ . На углах поворота  $\pm 1,5^\circ$  установлены жесткие упоры.

Для высокой точности и стабильности показаний гироскопа необходимо обеспечить постоянство кинетического момента  $H$  и линейность выходной информации. С этой целью гироскоп выбран синхронным, его частота задается кварцевым генератором, датчик момента - соленоидного типа с постоянным магнитом

Реализация надлежащих характеристик гироскопа зависит от качества упругой связи. Она должна быть достаточно жесткой и обладать демпфирующими свойствами. Эти качества реализованы в электрической пружине. Её жесткость поддается регулировке в большом диапазоне значений вследствие изменения коэффициента усиления. Наличие в усилителе дифференцирующего звена обеспечивает выработку составляющей сигнала, пропорциональной производной от угла  $\beta$ . Таким образом, дифференцирующее звено придает упругой связи демпфирующее свойство типа вязкого трения.

Все элементы гиросекции размещены в корпусе. Гиросекция устанавливается на площадку; замена может быть выполнена в условиях судна. Более подробно принцип работы гироскопа приведен в главе 4.

Плата питания гироскопа (ППГ). Она состоит из следующих узлов: кварцевого генератора, делителей частоты  $f_3/f_2$  и  $f_3/f_4$ , дешифратора – фазорасщепителя, выходных транзисторных ключей, схемы контроля неисправностей.

Кварцевый генератор формирует управляющие импульсы частотой  $f_2=768\text{кГц}$ . Эта частота с помощью делителей преобразуется в частоты  $f_3=76.8\text{кГц}$  и  $f_4=1.2\text{кГц}$ . Сигнал частотой  $f_3$  поступает на преобразователь «напряжение-код». Сигнал частотой  $f_4$  подается на дешифратор, где его частота снижается до  $200\text{Гц}$ , и формирует шестифазную систему сигналов, управляющих транзисторами. Эти транзисторы формируют трехфазное напряжение частотой  $200\text{Гц}$ , подаваемое на гироскоп.

Схема контроля неисправности основана на измерении суммы напряжений фаз трехфазного тока.

Схема контроля выдает сигнал неисправности в прибор Т4/3 и расшифровывающий сигнал – на светодиод платы ППГ.

Плата управления и сигнализации (УПС). Она состоит из усилителей, генератора, интегратора, схем переключения и контроля.

Генератор формирует сигнал частотой  $f_1$ , равной  $4\text{--}6\text{кГц}$ , напряжением  $10\text{В}$  для датчика угла ДУ. Ток опорной частоты  $f_1$  поступает на демодулятор усилителя. Усиленный и выпрямленный сигнал, пропор-

циональный углу отклонения главной оси гироскопа относительно плоскости горизонта, проходит корректирующее звено усилителя и в виде постоянного тока подается на обмотку ДМ и усилитель. Последний охвачен отрицательной обратной связью через интегратор. Применение этой связи позволяет компенсировать дрейф «нуля» усилителя и гироскопа, а также суточное вращение Земли.

С выхода усилителя сигналы угловой скорости в аналоговой форме подаются на плату преобразователя напряжение – код (ПНК) и внешним потребителям.

Схема контроля неисправности осуществляет сравнение сигналов с усилителей, генератора и напряжения 13В. При превышении допустимого уровня разности этих напряжений выдается сигнал неисправности светодиодом в плате УПС.

Плата преобразователя «напряжение-код». Она преобразует сигнал с усилителя в двоичный числоимпульсный 12-разрядный код. Делитель частоты  $f_3/f_4$  формирует интервал времени  $\Delta t_1$ , в течение которого выходной сигнал с усилителя через электронный коммутатор подключен к интегратору платы ПНК, где происходит заряд конденсатора.

По истечении времени  $\Delta t_1$  вход интегратора переключается на источник опорного напряжения, знак которого противоположен знаку сигнала угловой скорости. Интегрирование продолжается до момента разряда конденсатора. Интервал времени  $\Delta t_2$  разряда конденсатора пропорционален угловой скорости поворота судна. В течение интервала времени  $\Delta t_2$  импульсы частотой  $f_3$  поступают на двоичный реверсивный счетчик, образуя числоимпульсный код.

В режиме контроля на вход интегратора подается тестовое напряжение, которому должен соответствовать контрольный код в счетчике. При несоответствии этого кода вырабатывается сигнал неисправности, который поступает на светодиод.

Плата связи ПНК с прибором Р6 формирует параллельный 14-разрядный двоично-десятичный код для этого прибора. Кроме того, в этой плате производится временное уплотнение выходного кода и усиление по мощности выходных сигналов.

Блок питания Блок питания предназначен для преобразования напряжения судовой сети 220В, 50Гц, с возможными колебаниями напряжения  $\pm 10\%$  и частоты  $\pm 5\%$ , в стабилизированное напряжение  $\pm 13В$  и нестабилизированное  $\pm 14В$  для питания всей схемы гиротачометра.

При неисправности отдельных функциональных устройств в них загораются светодиоды. Происходит расшифровка неисправностей и подача сигналов в схему сообщения.

Прибор Р7-1 (аналоговый репитер 1, рис. 5.1) Он предназначен для считывания угловой скорости поворота судна.

Выходом схемы служит индикаторное устройство с круглой шкалой. Интервал измеряемой угловой скорости разбит на три диапазона, причем оцифровка диапазонов переключается автоматически.

Прибор Р7-1 имеет следующие функциональные узлы: усилитель, демодулятор, генератор, двигатель, вращающийся трансформатор, дешифратор, шкальное устройство. На передней крышке прибора расположены шкальное устройство, фоторезистор и светодиод, ручка регулировки подсветки ламп и кнопка «ДИАП.» ручного возврата на самый малый диапазон.

Ниже даны диапазоны репитера Р7-1:

Диапазон	Угловая скорость °/мин	Оцифровка репитера °/мин
первый	0-7,2	0-5
второй	0-36	0-30
третий	0-108	0-90

Для исключения частого переключения диапазонов в районе их граничных значений в схему введена задержка длительностью 220с. При необходимости быстрого переключения на самый чувствительный диапазон предусмотрена кнопка «ДИАП.»

Яркость ламп шкального устройства автоматически регулируется фоторезистором. Начальную яркость устанавливают ручкой. Контроль неисправности прибора Р7-1 осуществляется по общему принципу от порогового устройства по сигналу рассогласования следящей системы.

Прибор Р6 (цифровой репитер 4, рис. 5.1) Он является пятиразрядным цифровым индикатором, в котором на пяти семисегментных светодиодных индикаторах отображается значение угловых скоростей от 0 до 360°/мин. Знак минус указывает на левый поворот.

Выходной пятиразрядный код подается на дешифратор прибора Р6. Дешифратор преобразует двоично-десятичный код в семисегментный код индикации, который поступает на счетчик. Счетчик осуществляет последовательное по времени включение цифровых индикаторов. При частоте включения 25-30 Гц пятиразрядная индикация воспринимается как светящаяся непрерывно. В приборе Р6 такая же регулировка яркости индикаторов, как и в приборе Р7-1.

### 5.3 Эксплуатация гиротахометра

Размещение приборов на судне. Основной прибор устанавливают на металлической подставке высотой 0,5 м в штурманской или рулевой рубках. Ограничений на расстояние от основного прибора до центра качаний судна не накладывается. Горизонтальная поверхность подставки должна быть параллельна основной плоскости судна с погрешностью  $\pm 0,1^\circ$ , а левая базовая грань основного прибора должна быть параллельна диаметральной плоскости судна с погрешностью  $\pm 1,5^\circ$ . Прибор управления и фильтрации устанавливают в рулевой рубке и закрепляют на специальном кронштейне. Репитеры устанавливают на крыльях мостика.

Пуск гиротахометра. Перед пуском прибора необходимо проверить наличие предохранителей в приборе управления и фильтрации, а также в основном приборе.

Выключатель 3 основного прибора (рис. 5.2) должен находиться в положении «вкл.». Выключатели Р7.ЛБ и Р7.ПБ в приборе управления должны быть установлены в положении «вкл.». Далее следует включить (рис. 5.1) на приборе управления и фильтрации тумблер «50Гц 220В», при этом должны засветиться шкалы репитеров. Через 2,5 мин. после включения необходимо проверить, какая из шкал аналогового репитера светится. Если светится шкалы  $(90-0-90)^\circ/\text{мин}$  или  $(30-0-30)^\circ/\text{мин}$  прибора Р7-1, то следует нажать кнопку «ДИАП.» аналогового репитера. При этом засветится шкала  $(5-0-5)^\circ/\text{мин}$  прибора Р7-1.

После этого нужно установить ручками регулировки яркости подсветки шкал репитеров желаемую яркость. В дальнейшем регулировка подсветки шкал осуществляется автоматически. Затем следует установить необходимую времени фильтра. При работе с переносным репитером нужно закрепить его в кронштейне и подсоединить кабель к прибору Ш 101.

Выключение гиротахометра. После окончания работы с гиротахометром следует выключить тумблер «220В, 50Гц» на приборе Ш 101 управления и фильтрации, при этом погаснут шкалы репитеров. Контроль работы гиротахометра осуществляют по лампам сигнализации неисправностей, установленных на приборе Ш 101.

Работоспособность гиротахометра на судне восстанавливают путем замены вышедших из строя приборов и кассет.



## 6. Общие сведения о зарубежных гиротахметрах

### 6.1 Гиротахометр фирмы «Anschutz» (Германия)

Индикатор угловой скорости поворота судна (гиротахометр) фирмы «Anschutz» обеспечивает быстрое определение угловой скорости поворота судна. Этот прибор имеет высокую чувствительность, компактную конструкцию, тестовый контроль, регулируемую подсветку шкал, возможность монтажа на переборке. Основные технические характеристики гиротахометра приведены в таблице 6.1

Таблица 6.1

Технические характеристики	Данные
Диапазоны измерений	10°/мин, 30°/мин, 180°/мин, 300°/мин;
Чувствительность	≤0,1°/мин;
Разрешающая способность	≤0,1°/мин;
Погрешность на качке	≤0,1°/мин;
Напряжение питания	24В-(±20%);
Потребляемый ток	1А;
Потребляемая мощность	24Вт

### 6.2 Гиртахометр «Naviturn Rate of Turn indicatore» (Германия)

Гиртахометр «Naviturn» обеспечивает безопасное маневрирование крупнотоннажных судов в открытом море, а также в стесненных условиях плавания. Прибор измеряет угловую скорость судна в азимуте, обладает высокой чувствительностью, имеет встроенный тестовый контроль, а также выход для авторулевого «Navipilot III».

В состав измерителя угловой скорости входит основной прибор – гиросистема, к которой могут подсоединятся до трех индикаторов через соединительную коробку.

Ниже приведены основные технические характеристики этого гиротахометра (Таблица 6.2).

Таблица 6.2

Технические характеристики	Данные
Диапазоны измерений	0-30°/мин; 0-90°/мин; 0-300°/мин;
Чувствительность	≤0,01°/сек;
Разрешающая способность	≤0,01°/сек;
Напряжение питания	24В(+25% до -17%);
Потребляемая мощность	45Вт;
Срок годности	15 лет;

### 6.3 Гиротахометр «Radio Zeeland Products» (Нидерланды)

Гиротахометр выпускается в двух модификациях. Прибор имеет высокую чувствительность, основной диапазон измерения  $\pm 90^\circ/\text{мин}$  и два дополнительных диапазона -  $\pm 30^\circ/\text{мин}$  и  $\pm 300^\circ/\text{мин}$ .

Индикатор имеет тестовый контроль, модульное исполнение, прост в эксплуатации. Ниже приведены технические характеристики этого прибора (Таблица 6.3)

Таблица 6.3

Технические характеристики	Данные
Напряжение питания	30-36В;
Начальное время действия	<30 сек;
Потребляемый ток	500 мА;
Чувствительность	<1°

### 6.4 Индикатор «RoT Indicator H-101» (Нидерланды)

Индикатор угловой скорости поворота судна – это современный электронавигационный прибор, до момента визуального обнаружения поворота показывающий рулевому, как поворачивается судно.

Прибор имеет тестовый контроль, автоматически регулирующую подсветку шкалы. Его можно устанавливать на переборке, столе или потолке, он обладает малым потреблением энергии и имеет высокую надежность.

Индикатор прост в эксплуатации.

Основные технические характеристики этого прибора приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4

Технические характеристики	Данные
Диапазон измерений	90-0-90°/мин; 300-0-300°/мин; 270-0-270°/мин;
Рабочий диапазон температур	-15 до +55;
Напряжение питания	24В;
Потребляемая мощность	0,6А;
Габариты индикатора	160x242x60 мм;
Габариты основного прибора	110x242x125мм

## Содержание

	стр.
Введение.....	3
1. Техничо – эксплуатационные требования, предъявляемые к гиротаксиметрам.....	4
2. Принцип действия гиротаксиметра .....	5
3. Уравнение движения гиротаксиметра .....	6
4. Гиротаксиметр с электрической пружиной и электрическим демпфированием.....	11
4.1 Принцип действия.....	11
5. Судовой гиротаксиметр «Галс – 3».....	17
5.1 Технические характеристики и состав комплекта .....	17
5.2 Устройство и принцип действия гиротаксиметра .....	19
5.3 Эксплуатация гиротаксиметра .....	24
6. Общие сведения о зарубежных гиротаксиметрах .....	23
6.1 Гиротаксиметр фирмы «Anchutz» (Германия) .....	24
6.2 Гиротаксиметр «Naviturn Rate of Turn indicator» (Германия).....	25
6.3 Гиротаксиметр «Radio Zeeland Products» (Нидерланды) .....	25
6.4 Индикатор «Ro T Indicator H – 101» (Нидерланды) .....	26