

УДК 681.586.2

ГИРОМАГНИТНЫЙ КОМПАС С АДАПТИРУЕМЫМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Мелешко В. В., Колесников Д. Н.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

E-mail: mvv44@mail.ru

Исследуются особенности применения не только известных алгоритмов интегрально-позиционного канала коррекции, но и дополнительного дифференциального канала, что соответствует структуре пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора.

Проведено сравнение точности коррекции в условиях возмущений, близких к гармоническим, и в условиях нерегулярных возмущений. Показано, что введение дополнительного дифференциального канала с задержкой во времени, соответствующей смещению фазы на четверть периода колебаний, приводит к значительному уменьшению динамической ошибки.

Показана робастность (грубость) регулятора при отклонении периода колебаний возмущений от используемого в настройке регулятора.

Ключевые слова: *гиромагнитный компас, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, ПИД-регулятор.*

1. Вступление

Магнитный канал был и остается востребованным для коррекции гироскопических систем: как в собственно гиромагнитных компасах (ГМК), так и в корректируемых инерциальных системах и в других разработках. Эта коррекция проводилась как много лет назад, так и сейчас, используя разные микромеханические и микромагнитные элементы. В основном, магнитный канал используется для коррекции показаний прибора по курсу, поскольку другие эталонные системы (спутниковая навигационная система, доплеровские измерители и др.) пока еще не обеспечивают информацию о курсе объекта.

Активное использование магнитного канала обусловлено также значительным прогрессом в повышении точности и уменьшении габаритов магниточувствительных элементов, возросшими возможностями обработки сигналов современными вычислительными средствами.

Известным средством для достижения хороших динамических характеристик является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. В литературе содержится достаточно примеров его применения к тепловым процессам, различного вида приводам, управлению станками, автопилотам [1,2,3]. Детально рассмотрены пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы в ГМК [4], в инерциальных навигационных системах (ИНС) [5]. В то же время применение дифференциального канала в приборах ориентации не рассматривается. Исключение составляет пример рассмотрения ПИД-регулятора при начальной выставке ИНС [6]. В статье рассматриваются особенности применения дифференциально-

го канала ПИД-регулятора в гиромагнитном компасе.

2. Задачи

Существенной помехой в работе ГМК являются возмущения показаний магнитного курса, вызываемые ускорениями движения объекта. Если на время действия постоянных ускорений (разгон или торможение объекта, вираж) магнитную коррекцию отключают, то от влияния ускорений, возникающих на качке, таким путем избавиться нельзя. Отметим, что при отключении коррекции накапливается ошибка прибора, обусловленная уходом гироскопа. Особенно это заметно при использовании микромеханического гироскопа, уход которого может достигать 100 град./час.

В ГМК с пропорциональной коррекцией статическая ошибка из-за собственного ухода гироскопа и ухода, вызванного качкой, может составить единицы градусов [1], что неприемлемо. Для исключения статической ошибки применяют интегратор. Коррекция становится пропорционально-интегральной (интегрально-позиционной).

Динамические ошибки на качке сглаживаются за счет уменьшения крутизны пропорциональной коррекции. Но такое уменьшение влечет за собой увеличение длительности выставки после отключения коррекции.

Рассмотрим возможности применения дифференциальной коррекции для уменьшения динамической ошибки при сохранении приемлемого времени начальной выставки.

3. Моделирование гиромагнитного компаса

3.1 Моделирование на регулярной качке

Рассмотрим Симулинк-схему ГМК с пропорционально-интегральной (ПИ) коррекцией (рис. 1). Результаты моделирования в течение 400 с. приведены на рис.2. при указанных коэффициентах передачи пропорционального k_u и интегрального k_i каналов, магнитном курсе k_m , амплитуде A_{mf} и частоте ω_{mf} возмущения датчика магнитного курса, вызываемого качкой, моменте помехи M_p , вертикальной составляющей угловой скорости вращения сопровождающего базиса ω_{mdz} , начальном рассогласовании a_{l0} . Для контроля приведены графики напряжений на

датчике момента U_{upr} , интеграторе int . Как видим, с помощью интегральной коррекции можно избавиться от установившейся ошибки. Но переменная ошибка от качки остается еще довольно значительной (более 1 градуса).

Введем дополнительно дифференциальный канал коррекции параллельно пропорциональному и интегральному. В итоге получим структуру параллельного пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора (рис. 3).

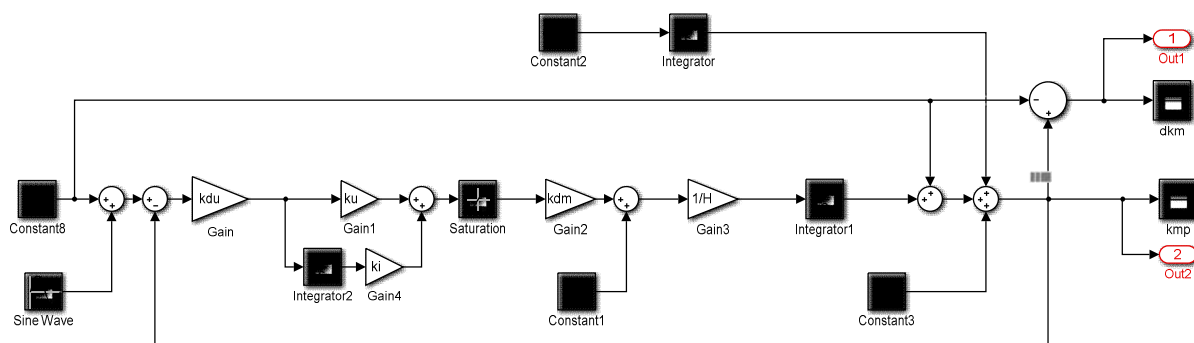
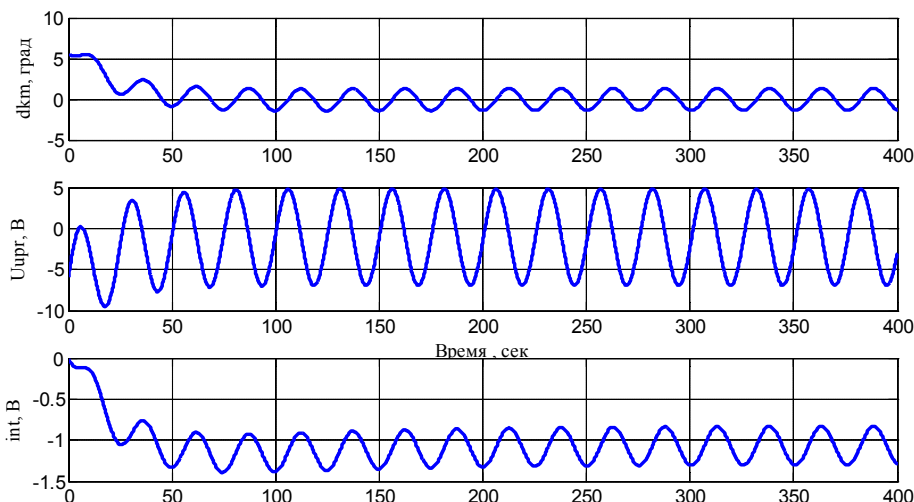


Рис. 1. Схема ГМК с пропорционально-интегральной коррекцией



$k_u = 3$
 $k_i = 0.03$
 $k_m = 0.5$ (рад.)
 $A_{mf} = 5.72958$ (град.)
 $\omega_{mf} = 0.25$ (1/с)
 $M_p = 0.001$ нм
 $\omega_{mdz} = 13.0222$ (град./час)
 $a_{l0} = 0.1$ (рад)
 $k_{dm} = 0.001$ (нм/В)

$H = 1$ (НМс)

Рис. 2. График ошибки d_{km} магнитного курса при использовании пропорционально-интегральной (ПИ) коррекции

ПИД регулятор проектируем по принципу минимума установившейся динамической ошибки при минимуме времени начальной выставки.

Как видим из графиков на рис. 4, ошибка от качки превышает значения ошибки ГМК с интегрально-пропорциональной коррекцией. Это связано со сдвигом фазы дифференциальной составляющей сигнала регулирования относительно пропорциональной составляющей (рис. 5). Сдвиг по фазе соответствует четверти периода (производная от синусоиды есть косинусоида).

При вводе задержки дифференциальной составляющей сигнала регулирования на четверть периода колебаний (рис. 6) и подборе коэффициента передачи в соответствии с амплитудой погрешности можно практически полностью устранить динамическую ошибку (выполнить динамическую компенсацию [7]).

Из графика на рис. 7 видно, что при помощи модернизированной мПИД-коррекции ошибка от качки уменьшилась на порядок. Если при ПИ коррекции ошибка была 1,2 град., то с использованием мПИД коррекции ошибка 0,02 град.

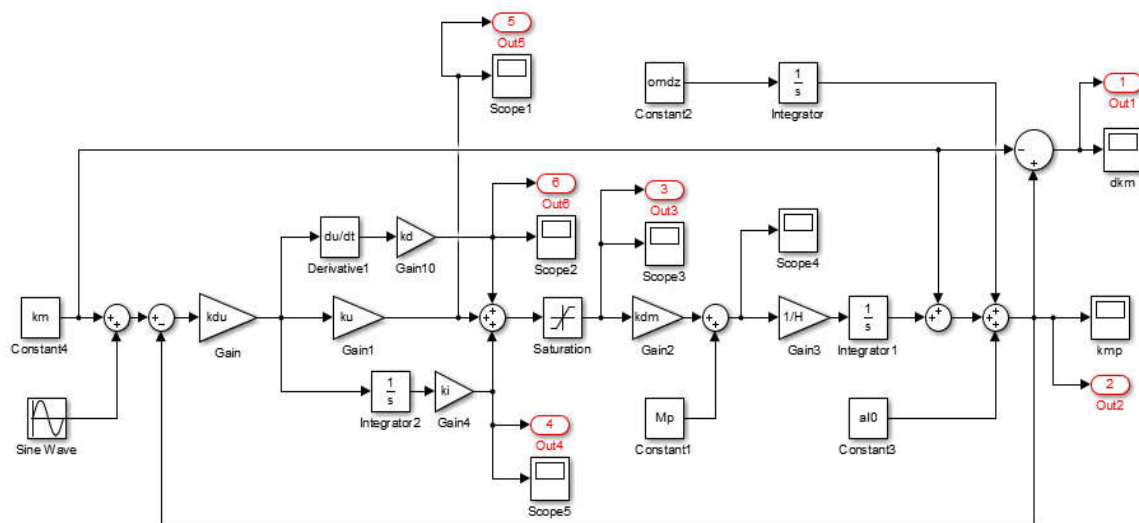
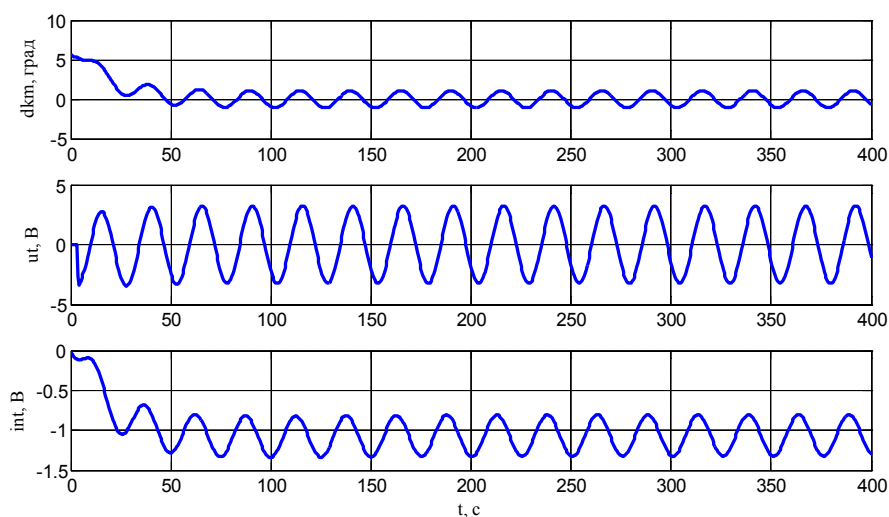


Рис. 3 Схема ГМК с ПИД коррекцией



$k_u = 3$
 $k_i = 0.03$ (1/c)
 $k_m = 0.5$ (рад.)
 $A_{fm} = 5.72958$ (град.)
 $omf = 0.25$ (1/c)
 $M_p = 0.001$ Нм
 $omdz = 13.0222$ (град./час)
 $al0 = 0.1$ (рад)
 $k_{dm} = 0.001$ (Нм/В)
 $H = 1$ (Нмс)
 $k_d = -6$ (с)

Рис. 4 График ошибки магнитного курса при использовании ПИД коррекции

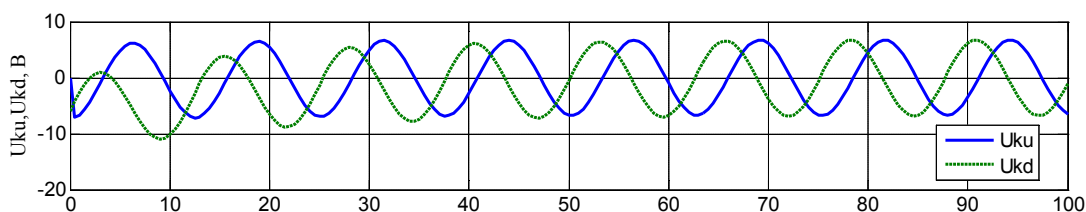


Рис. 5. График дифференциальной составляющей сигнала коррекции Ukd относительно пропорциональной составляющей Uku

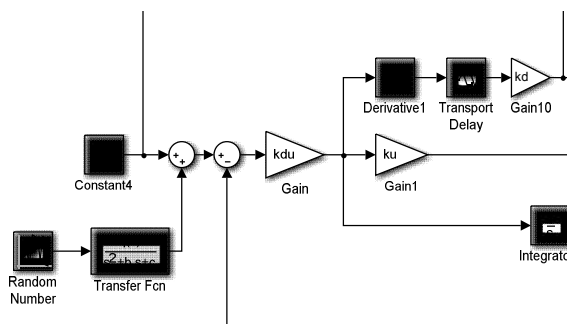


Рис.6. Задержка в дифференциальном канале

3.2 Моделирование при нерегулярной качке.

В условиях реальной работы мы имеем не просто гармоническое возмущение, а спектр возмущений, в основном, с преобладающей частотой качки. В связи с этим было проведено моделирование в условиях нерегулярной качки, оценка коррекции проводилась по среднеквадратической ошибке процесса.

Частота собственных колебаний датчика магнитного курса значительно больше частоты качки, следовательно, возмущения датчика можем принять соответствующими процессу качки.

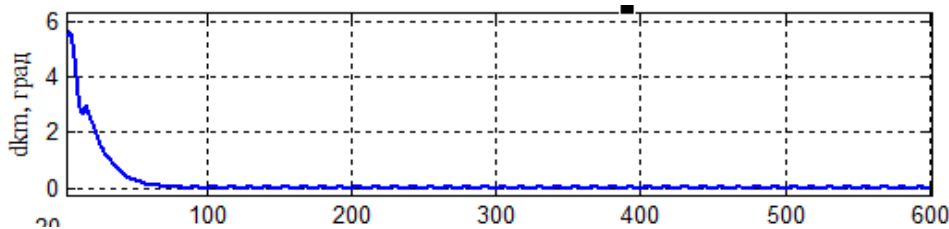


Рис. 7. График ошибки магнитного курса при использовании сдвинутой по фазе дифференциальной коррекции

Примем, что качка описывается следующей корреляционной функцией [8]:

$$k(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta|\tau| \right),$$

где σ - среднеквадратическое отклонение, α - коэффициент затухания, β - преобладающая частота, τ - временной сдвиг корреляционной функции.

Данной корреляционной функции соответствует передаточная функция формирующего фильтра, позволяющего из белого шума получить случайный процесс (рис. 8):

$$W(p) = \frac{\sqrt{4\alpha\sigma^2(\alpha^2 + \beta^2)}}{(p + \alpha)^2 + \beta^2}.$$

Для ГМК с ПИ коррекцией в условиях нерегулярной качки с преобладающей частотой $\beta = 0,5$ рад/с и коэффициентом затухания $\alpha = 0,1$ рад/с среднеквадратическая ошибка (СКО) стационарного процесса составила $\sigma_{\Delta k} = 0,41$ градуса.

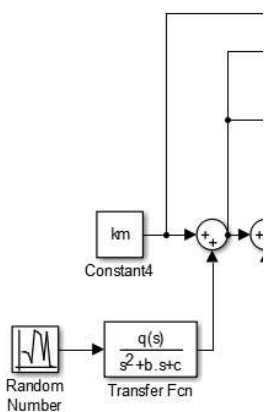


Рис.8. Формирующий фильтр

Для ГМК с мПИД коррекцией в условиях той же нерегулярной качки при задержке сигнала на четверть периода $t_s = 0,5 \pi / \beta$ получим $\sigma_{\Delta k} = 0,33$ градуса.

Полезно рассмотреть, насколько важна точность настройки t_s на преобладающую частоту. Для этого построим графики погрешностей ГМК с ПИ-коррекцией и ГМК с мПИД-коррекцией при изменении частоты качки в пределах 0,3 ... 0,7 1/с, при задержке t_s для $\beta = 0,5$ 1/с (рис. 9). Как видно

из графика, ГМК является робастным к настройке дифференциального канала на частоту качки.

Возможны два способа построения прибора. Более сложный, когда автоматически определяются частота и уровень преобладающей качки. Это усложнит прибор. Менее сложный, когда настройка проходит на основную преобладающую частоту. В процессе работы эта частота может меняться.

Как можем видеть из рис. 9, расстройка допустима в довольно больших пределах. Следовательно, можем использовать прибор с менее сложной конструкцией, без блока определения параметров качки.

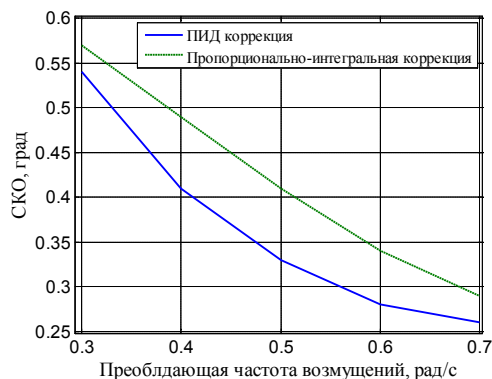


Рис. 9. График ошибки магнитного курса для разных частот возмущения

4. Выводы

При построении ГМК с ПИД-регулятором с задержкой сигнала в дифференциальном канале на величину четверти периода динамической ошибки происходит существенная компенсация динамической ошибки. Чем ближе процесс колебаний к гармоническому, тем лучше компенсация ошибки.

В условиях реального псевдогармонического возмущения уменьшение динамической ошибки составляет величину порядка 30%.

В последующем полезно оценить применение блока определения параметров динамической ошибки для автоматического ввода задержки в дифференциальный канал.

Литература

1. Дорф Р. Современные системы управления/ Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер.с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 832 с.

2. Денисенко В. В. ПИД-регулятори: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2006. - №4. – С. 66 – 74, 2007. - №1. – С. 78 – 88.
3. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. – 2007. - №4. – С. 87 – 97, 2008. - №1. – С. 89 – 99.
4. Одинцов А. А. Ориентация объектов в магнитном поле Земли / А. А. Одинцов, В. В. Мелешко, С. А. Шаров. – К.: Корнийчук, 2008. – 142 с.
5. Мелешко В. В. Инерциальные навигационные системы. Начальная выставка. – К.: «Корнийчук», 1999. – 126 с.
6. Аврутов В. В. Виставка інерціальної навігаційної системи з використанням ПІД-регулятора / В. В. Аврутов, З. С. Стефанишин // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2015. – № 5. – С. 35 – 42.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления: Т.3; Синтез регуляторов систем автоматического управления/ Под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 616 с.; ил.
8. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации/ О.А.Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». 2012. – 417 с.

УДК 681.586.2

В. В. Мелешко, Д. М. Колесніков

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ГІРОМАГНІТНИЙ КОМПАС З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ, ЩО АДАПТУЄТЬСЯ

Досліджуються особливості застосування не тільки відомих алгоритмів інтегрально-позиційного каналу корекції, але і додаткового диференціального каналу, що відповідає структурі пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД-регулятора).

Проведено порівняння точності корекції в умовах збурень, близьких до гармонійних, і в умовах нерегулярних збурень. Показано, що введення додаткового диференціального каналу з затримкою в часі, що відповідає зсуву фази на чверть періоду коливань, призводить до значного зменшення динамічної помилки.

Показана робастність (грубість) регулятора при відхиленні періоду коливань збурень від використовуваного в настройці регулятора.

Ключові слова: гіромагнітний компас, пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

V. V. Meleshko, D. N. Kolesnikov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

GYROMAGNETIC COMPASS WITH ADAPTED PID CONTROLLER

The work is devoted to research correction system of the magnetic channel gyromagnetic compasses. It uses the possibility of using not only the well-known algorithms of integrally-proportional correction channel and also additionally differential channel, which generally corresponds to the structure of a proportionally-integral-differential controller.

Conducted comparison of the correction accuracy in conditions perturbations close to harmonic, and irregular perturbations. It is shown, that introduction of the additionally differential channel with time delay corresponding to a phase shift of one quarter period of the oscillations, resulting in a significant reduction of the dynamic error.

Shown robustness of the regulator at a deviation of the oscillation period of the perturbations from used settings the controller.

Keywords: gyromagnetic compass, proportional-integral-derivative controller.

*Надійшла до редакції
11 червня 2016 року*

*Рецензовано
25 червня 2016 року*

© Мелешко В. В., Колесников Д. Н., 2016