

Разработка системы автоматической установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика магнитного поля

*А. Ю. Гришенцев¹, В. А. Горошков¹, А. Г. Коробейников^{1,2},
Р. И. Чернов¹, Д. П. Островский¹*

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук

Аннотация: Произведена разработка автоматической системы установки в нейтральное положение чувствительного элемента магнито-оптического датчика магнитного поля. Установка в нейтральное положение осуществляется за счёт автоматической системы управления пьезоэлектроприводом на основе микроконтроллера. Построена математическая модель и выполнено численное моделирование системы автоматического регулирования. Приведены результаты и параметры моделирования. Разработанная система обеспечивает значительное повышение автономности датчика, что позволяет исключить или существенно сократить затраты на регулирование датчика.

Ключевые слова: датчик магнитного поля, магнито-оптический датчик, система автоматического регулирования, пьезодвигатель

Постановка задачи

Наряду с другими датчиками магнитного поля магнито-оптические датчики (МОД) [1,2] используются в задачах геофизики для измерений вариабельности магнитного поля Земли в определённом географическом месте [3,4], магнитной разведки [5], поиска и мониторинга магнитных аномалий, мониторинга сетей электроснабжения, в том числе в системах информационной безопасности [6], магнитной связи [7,8] и пр. Предлагаемое усовершенствование позволяет повысить автономность датчика за счёт исключения необходимости вмешательства оператора при установке чувствительного элемента в нейтральное положение.

Датчик магнитного поля (рис. 1) реализован в виде магнита (рис. 1, а, 2) с зеркальной поверхностью, подвешенного на кевларовой нити (рис. 1, б.), т.е. магнита на торсионном подвесе. Диаметр чувствительного элемента (магнита) $D=6$ мм, толщина магнита 2 мм, длина нити $l=20$ мм диаметр нити $d=0.05$ мм. При изменении внешнего магнитного поля магнит поворачивается

на некоторый угол, закручивая нить. На зеркальную поверхность магнита падает лазерный луч, испускаемый лазерным диодом (рис. 1, а. 1). Отражённый от магнита лазерный луч проходит систему зеркал (рис. 1, а. 3,4), увеличивающих ход луча, тем самым осуществляя усиление смещения луча. Регистрация смещения луча осуществляется линейным фотоприёмником (рис. 1, а. 5).

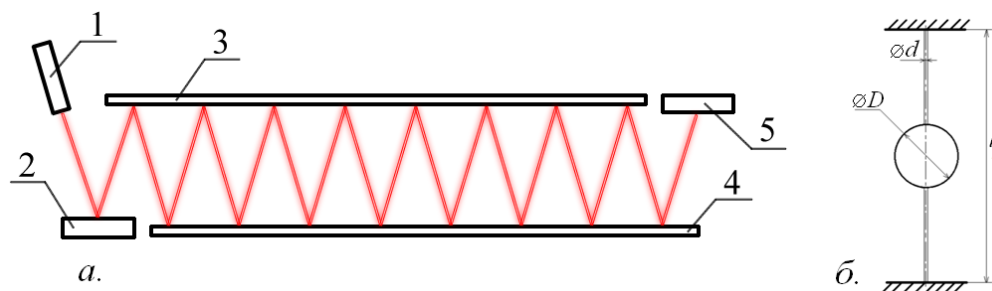


Рис. 1. – Опто-механическая часть датчика магнитного поля

Смещение пятна спекла лазерного луча по линейному фотоприёмнику влево и вправо относительно некоторого условного нейтрального положения позволяет производить регистрацию изменения внешнего магнитного поля. Воздействие квазистационарной помехи, например, в результате возмущения естественного магнитного поля Земли приводит к смещению фактического нейтрального положения относительно установленного. Небольшие смещения фактического нейтрального положения пятна спекла лазерного луча относительно принятого за нейтральное положение достаточно просто корректируются при обработке сигнала. Более значительные возмущения внешнего магнитного поля могут приводить к тому, что пятно луча лазера выходит за пределы линейного фотоприёмника. Задача устранения значительных смещений пятна лазерного луча на линейном фотоприёмнике – вплоть до его выхода за пределы фотоприёмника – требует дополнительных разработок и совершенствования конструкции датчика.

Постановка задачи исследований: разработка системы автоматической установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика

магнитного поля за счёт корректировки положения на линейном фотоприёмнике пятна спекла лазерного луча.

Модель автоматической системы установки в нейтральное положение

Предлагается динамическое изменение положения магнита (рис. 2) на торсионном подвесе, реализуемое за счёт применения регулировки углового положения опорного вала торсионного подвеса. Регулировка осуществляется за счёт поворота крепёжного основания торсионного подвеса при помощи микродвигателя, применение обратной связи позволяет устанавливать заданное положение.

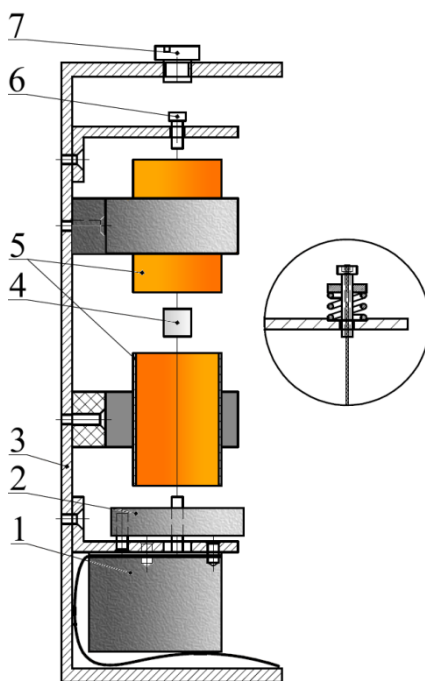


Рис. 2. – Датчик магнитного поля с интегрированным механизмом установки в нейтральное положение

На эскизном чертеже (рис. 2) обозначены следующие элементы: 1 – пьезоэлектрический микродвигатель; 2 – реверсивная муфта скольжения с ограничителем поворота ($\pm 720^\circ$) опорного вала торсионного подвеса; 3 – рама и корпус датчика; 4 – чувствительный элемент датчика (магнит); 5 – медные трубки магнитоиндукционного демпфера; 6 – винт натяжителя торсионного подвеса; 7 – винт-пробка, предназначен для доступа к винту 6 и

герметизации влагозащищённого корпуса датчика. На масштабной выноске изображен вариант узла крепления торсионного подвеса на подпружиненном штифте.

Обобщённая блок-схема разработанной системы автоматической установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика приведена на изображении (рис. 3).

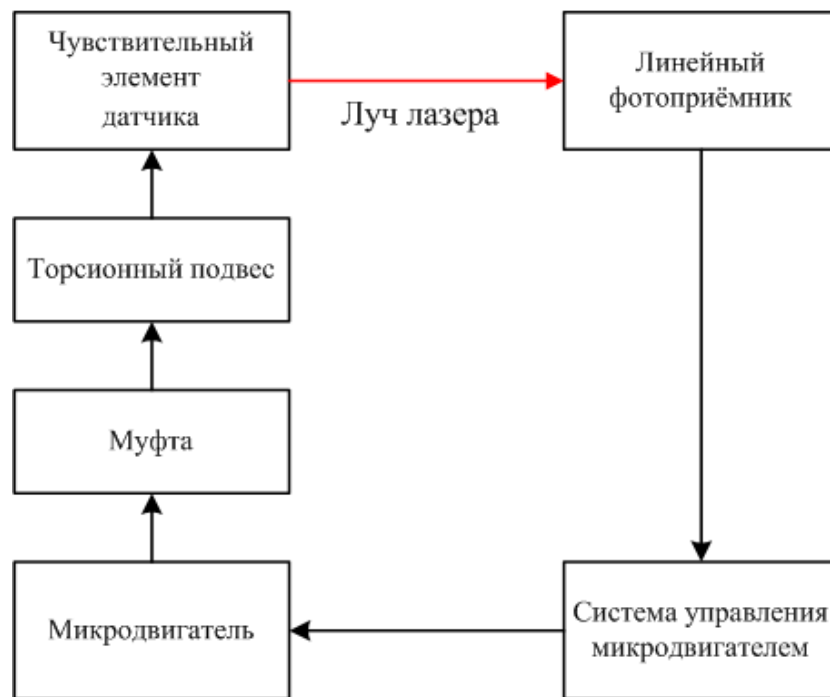


Рис. 3. – Блок-схема системы автоматической установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика

С целью снижения влияния токов управления электропривода на датчик используется резонансный ультразвуковой реверсивный пьезоэлектрический [9] микродвигатель ударного действия [10,11] с высоким угловым разрешением [12], частота рабочих токов которого расположена далеко за пределами регистрируемого датчиком частотного диапазона. Частота резонанса датчика составляет 93 Гц. Полоса пропускания датчика ограничена частотой порядка 40 Гц. Датчик, снабжённый магнитоиндукционным демпфером (рис. 2, обоз. 5) в области частот более 40 Гц имеет значительную нелинейность амплитудно-частотной

характеристики, поэтому рекомендуемый диапазон использования датчика ограничен полосой от 0 Гц до 40 Гц. Если линейность показаний не принципиальна, то возможно использование датчика на более высоких частотах. Частота токов питания микродвигателя составляет 23.2 кГц, максимальная скорость вращения вала 600 об/мин. Таким образом, магнитные поля, индуцируемые системой питания пьезодвигателя, расположены далеко за пределами полосы частот, регистрируемых датчиком. Для предотвращения скручивания нити торсионного подвеса более чем на один оборот с каждой стороны от чувствительного элемента, ход опорного вала торсионного подвеса механически ограничен в пределах $\pm 720^\circ$, при этом ход чувствительного элемента датчика, расположенного в центре кевларовой нити, ограничен в пределах $\pm 360^\circ$. Для предотвращения износа элементов двигателя при достижении углового ограничения вал двигателя и опорный вал торсионного подвеса связаны муфтой скольжения (рис. 2, обоз. 2).

Для фоточувствительной линейки *TCD1304DG* производства фирмы *Toshiba*, содержащей 3648 фотоэлементов (пикселей) с линейными размерами 8 мкм на 200 мкм, заполнением 100% и расстоянием между центрами пикселей 8 мкм, заданная область нейтрального положения составляет 37 пикселей, т.е. 296 мкм. Заранее выбранное нейтральное положение лазерного луча находится в центре линейного фотоприёмника и занимает область не более 1% от общего числа фотоэлементов.

Поворот опорного вала осуществляется до достижения пятном лазерного луча нейтрального положения. Детектирование положения пятна лазерного луча производится с помощью микроконтроллера *STM32F407*. Также на базе микроконтроллера реализована система управления модулем питания микродвигателя.

В качестве модели пьезоэлектрического микродвигателя будем использовать модель пьезоэлектрического активного упругого компенсатора

(АУК), дополненную преобразователем поступательного движения во вращательное.

Базовая модель АУК [12] имеет следующий вид:

$$\frac{d_{\pi} Y S_0}{h} u(t) = m_{\Sigma} \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} + K_{\text{д}} \frac{d\delta(t)}{dt} + (K_{\text{в}} + K_{\text{с}}) \delta(t), \quad (1)$$

где $u(t)$ – напряжение, приложенное к пьезоэлементу АУК; h – толщина пьезоэлемента; S_0 – площадь активной части пьезоэлемента; Y – модуль упругости пьезоэлемента; d_{π} – пьезомодуль пьезоэлемента; m_{Σ} – эквивалентная приведённая масса подвижных частей толкателя АУК; $K_{\text{д}}$ – коэффициент внутреннего демпфирования АУК; $K_{\text{в}} = \frac{Y S_0}{l_0}$ – коэффициент упругости пьезоэлемента; l_0 – длина активной части пьезоэлемента; $K_{\text{с}}$ – коэффициент статического усилия прикладываемого к пьезоэлементу; $\delta(t)$ – деформация (ход) пьезоэлемента.

АУК прижимается пружинным механизмом к ротору двигателя. При деформации пьезоэлемента, удовлетворяющего условию $\frac{d\delta(t)}{dt} > 0$, АУК входит в зацепление с ротором и приводит его в движение. Таким образом осуществляется преобразование возвратно-поступательных движений пьезоэлемента во вращательные движения ротора. За счёт снабжения двигателя двумя АУК и сдвоенным ротором, соединённым храповой муфтой, обеспечивается реверсивность, одновременная работа двух пьезоэлементов запрещена.

Запишем уравнение преобразования толкающей силы АУК во вращающее движение ротора и муфты:

$$\delta(t) R_p K_{\text{пр}} (K_{\text{в}} + K_{\text{с}}) = J_p \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} + P_p \frac{d\alpha(t)}{dt}, \frac{d\delta(t)}{dt} > 0 \quad (2)$$

где $\alpha(t)$ – угол поворота ротора двигателя, муфты и опорного вала торсионного подвеса; J_p – момент инерции ротора двигателя, муфты и опорного вала торсионного подвеса; $K_{пр}$ – коэффициент проскальзывания АУК по ротору; P_p – коэффициент торможения ротора силами трения; $\frac{d\delta(t)}{dt}$ – скорость деформации АУК; R_p – радиус ротора.

Уравнение чувствительного элемента на торсионном подвесе [13] при закручивании опорного вала на угол $\alpha(t)$:

$$J_M \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + P_M \frac{d\varphi(t)}{dt} + kG_H \left(\varphi(t) - \frac{\alpha(t)}{2} \right) = \pi R_{\text{вит}}^2 I_{\text{вит}} (B_x \cos(\varphi(t)) + B_y \sin(\varphi(t))), \quad (3)$$

где $\varphi(t)$ – угол поворота чувствительного элемента датчика; B_x, B_y – компоненты векторного поля магнитной индукции, взаимодействующие с магнитом чувствительного элемента датчика; $I_{\text{вит}}$ – ток в контуре эквивалентном магниту чувствительного элемента; $R_{\text{вит}}$ – радиус эквивалентного постоянному магниту датчика витка с током; J_M – момент инерции магнита датчика; P_M – коэффициент демпфирования; G_H – модуль кручения нити, при постоянной силе натяжения нити; k – единичный множитель знака момента силы противодействия нити, знак выбирают в зависимости от направления закручивания нити.

Общая система дифференциальных уравнений преобразования напряжения $u(t)$, приложенного к пьезоэлементу АУК в поворот $\varphi(t)$ чувствительного элемента датчика при отсутствии внешнего магнитного поля имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{d_n Y S_0}{h} u(t) = m_\Sigma \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} + K_D \frac{d\delta(t)}{dt} + K_{np} (K_y + K_c) \delta(t) \\ K_{np} (K_y + K_c) \delta(t) = J_p \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} + P_p \frac{d\alpha(t)}{dt} + G_n \alpha(t) \\ \frac{1}{2} G_n \alpha(t) = J_m \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + P_M \frac{d\varphi(t)}{dt} + G_H \varphi(t) \end{cases}, \quad (4)$$

После отражения от датчика магнитного поля оптический сигнал $\varphi(t)$ поступает на линейный фотоприёмник и затем через АЦП в микроконтроллер, микроконтроллер с запаздыванием τ вырабатывает сигнал текущего положения:

$$\gamma(t) = \varphi(t - \tau). \quad (5)$$

Основной вклад во время запаздывания вносит задержка при опросе линейного фотоприёмника, происходящая с частотой 200 Гц, и ещё 2.5 мс требуется на обработку данных микроконтроллером. Таким образом, время запаздывания τ составляет примерно 7.5 мс.

В микроконтроллере формируется управляющее воздействие на систему управления микродвигателем. За счёт поворота вала микродвигателя корректируется угловое положение чувствительного элемента $\varphi(t)$.

При воздействии внешнего магнитного поля фактический угол поворота чувствительного элемента датчика будет отличаться от угла, получаемого при отсутствии внешнего поля. Используя (4), запишем уравнение баланса моментов силы кручения нити и момента, определяемого внешним магнитным полем:

$$\frac{\alpha(t)}{2} - \varphi(t) = \frac{\pi R_{\text{вит}}^2 I_{\text{вит}} (B_x \cos(\varphi(t)) + B_y \sin(\varphi(t)))}{G}, \quad (6)$$

где $0.5\alpha(t) - \varphi(t) = \beta(t)$ – угол закручивания нити, определяющий баланс моментов. Значительное увеличение угла закручивания нити при установке в нейтральное положение приводит к изменению силы натяжения нити и, как

следствие, переходу датчика в нелинейный режим, т.е. нелинейной зависимости натяжения нити от угла закручивания $G_n(\beta(t))$. В таком случае, оценка фактического натяжения нити для корректировки $G_n(\beta(t))$ требует применения дополнительных тензорных датчиков и, в общем случае, является нетривиальной задачей. С некоторыми допущениями возможна оценка силы натяжения нити на основе математического моделирования. Значительное закручивание нити может найти применение, когда датчик используется в качестве приёмника в магнитной системе связи и линейность показаний не имеет принципиального значения. Увеличение зеркальных поверхностей чувствительного элемента, например, для диска с двух сторон, а в случае использования чувствительного элемента в форме куба с четырёх сторон, значительно увеличивает возможности установки в нейтральное положение при ограниченных углах поворота. Альтернативное решение данной проблемы заключается в применении пружины в верхнем узле крепления торсионного подвеса (рис. 2, масштабная выноска), которая будет работать в линейном режиме сжатия и тем самым линеаризовывать силу натяжения от угла закручивания. Возможна установка дополнительной муфты скольжения, которая при превышении момента силы закручивания нити $G_n\alpha(t)$ некоторого порога будет проскальзывать, поддерживая линейный режим работы датчика.

Обобщённый алгоритм установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика.

1. Если на линейном фотоприёмнике нет светового пятна лазерного луча, то срабатывает привод и на пониженной скорости (50% от номинала), совершает поворот в условно положительном направлении, до появления светового пятна лазерного луча на линейном фотоприёмнике или до совершения поворота на $+720^\circ$. Скорость двигателя можно регулировать с

помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). ШИМ контроллер имеется в блоке управления.

2. Если по пункту (1) не удалось вывести световое пятно лазерного луча на линейный фотоприёмник, то осуществляется поворот на пониженной скорости (50% от номинала) в условно отрицательном направлении, до появления светового пятна лазерного луча на линейном фотоприёмнике или до совершения поворота вала торсионного подвеса на -1440° .

3. Если по пунктам (1,2) не удалось вывести световое пятно лазерного луча на линейный фотоприёмник, то работа алгоритма установки в нейтральное положение заканчивается, датчик считается не введённым в эксплуатационный режим.

4. Если по пунктам (1,2) световое пятно лазерного луча выведено на линейный фотоприёмник, то оценивается его текущее положение и производится корректировка до достижения световым пятном нейтрального положения на линейном фотоприёмнике.

Моделирование системы установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика

Установка в нейтральное положение заключается в позиционировании светового пятна спекла лазерного луча в области на линейном фотоприёмнике, называемой нейтральным положением. Область нейтрального положения принимается в центре линейного фотоприёмника и имеет заранее установленный диаметр. Установка в нейтральное положение производится перед каждым сеансом связи, а если датчик используется для регистрации магнитного поля вне задач магнитной связи, то перед каждым сеансом регистрации магнитного поля (приёма магнитных сигналов).

На основании полученных ранее уравнений (1-5) построена исполняемая блок-схема управления (рис. 4), в пакете *MatLab Simulink*. Рассчитанные параметры моделирования сведены в таблицу 1.

Программа исполняемой блок-схемы *Simulink* соответствует системе дифференциальных уравнений (5), с учётом условия $\frac{d\delta(t)}{dt} > 0$ воздействия АУК на ротор и параметров, приведённых в таблице 1.

Таблица №1

Параметры модели

Обозначение	Физический смысл обозначения	Значение	Ед. изм.
1	2	3	4
C_0	эквивалентная электрическая ёмкость пьезоэлемента	3.693×10^{-10}	Ф
$R_{вт}$	эквивалентное электрическое сопротивление источника питания	15.0	Ом
K_d	коэффициент внутреннего демпфирования АУК	1.136	кг/с
K_y	коэффициент упругости АУК	1.95×10^7	Н/м
K_O	коэффициент обратного пьезоэффекта	5.46×10^{-2}	Н/В
$K_{П}$	коэффициент прямого пьезоэффекта	5.46×10^{-2}	Н/В
K_c	коэффициент статического усилия, прикладываемого к пьезоэлементу	3.593	Н/м
m_{Σ}	эквивалентная приведённая масса подвижных частей толкателя	8.815×10^{-4}	кг
$K_{пр}$	коэффициент проскальзывания АУК по ротору	0.98	-
R_p	радиус ротора	5.0×10^{-3}	м
J_M	момент инерции магнита датчика	1.763×10^{-8}	кг·м ² /рад
J_p	момент инерции ротора и муфты	2.651×10^{-8}	кг·м ² /рад
P_M	коэффициент демпфирования магнита	2.036×10^{-6}	кг·м ² /(с·рад)

1	2	3	4
P_p	коэффициент демпфирования ротора и муфты	1.15×10^{-3}	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{рад})$
G_H	модуль кручения нити	1.541×10^{-4}	$\text{Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$
τ	запаздывание обработки сигнала в микроконтроллере	7.5×10^{-3}	с

Шины с основными сигналами: $u(t), \delta(t), \alpha(t), \varphi(t), \gamma(t)$ и их производными подписаны. Для управления применён пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор (обозначен на схеме *PID Controller*), с коэффициентами, подобранными в ходе моделирования на основании метода Циглера-Никольса.

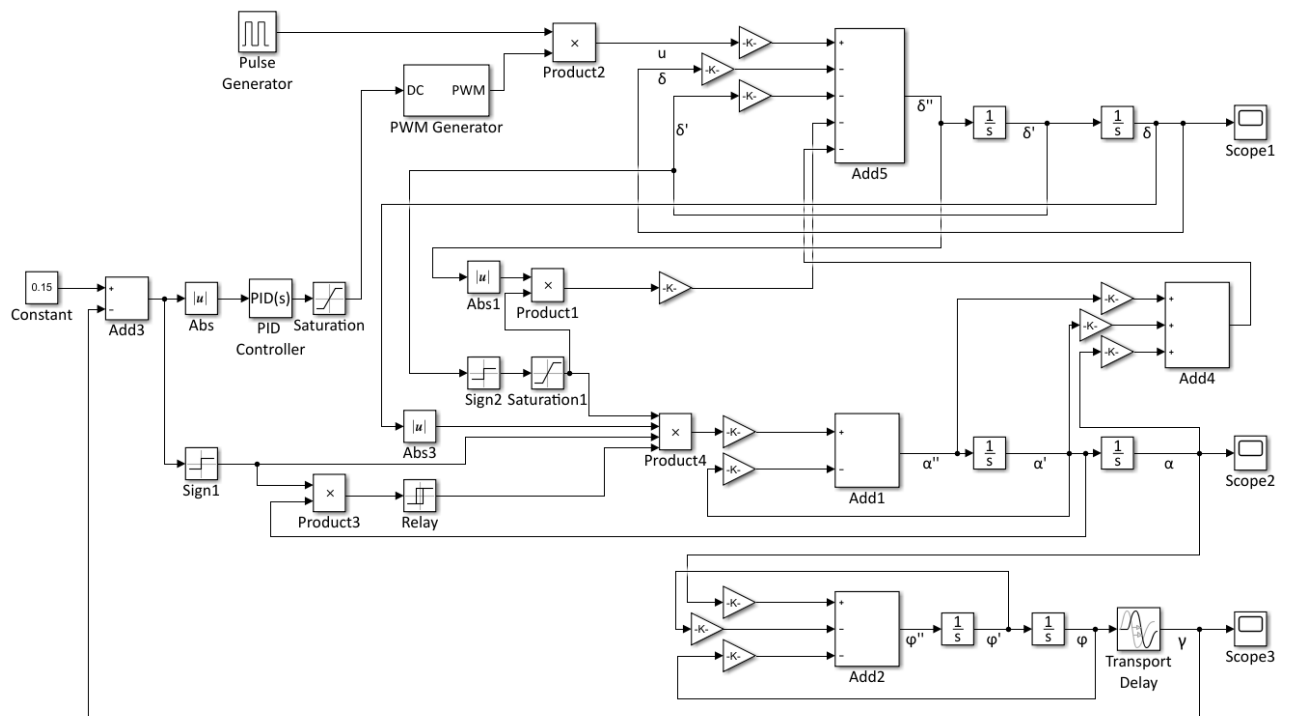


Рис. 4. – Модель автоматического привода, в *Simulink*

Коэффициенты ПИД-регулятора: пропорциональный – 0.36; интегральный – (-0.1); дифференциальный – 0.0. В качестве входного параметра ПИД-регулятор получает разность заданного угла поворота и фактического углового положения магнита (датчика чувствительного

элемента). ПИД-регулятор управляет скважностью ШИМ контроллера (обозначен на схеме *PWM Generator*), который определяет подачу на пьезоэлемент АУК питающего напряжения $u(t)$ от импульсного генератора (обозначен на схеме *Pulse Generator*).

Результаты моделирования представлены на графиках. Колебания пьезоэлемента АУК $\delta(t)$ (рис. 5), соответствуют выводу *Scope1* (рис. 4). Ударное действие пьезоэлемента АКУ приводит во вращение ротор двигателя и муфту. На валу муфты закреплен торсионный подвес чувствительного элемента датчика.

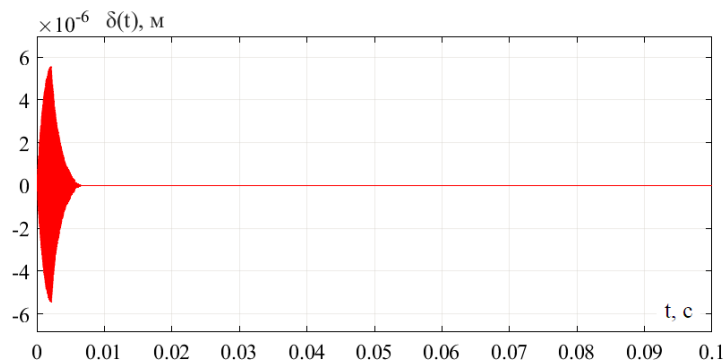


Рис. 5. – Управляемые колебания пьезоэлемента

Угол вращения ротора и муфты, т.е. вала пьезодвигателя $\alpha(t)$ (рис.6), соответствуют выводу *Scope2* (рис. 4).

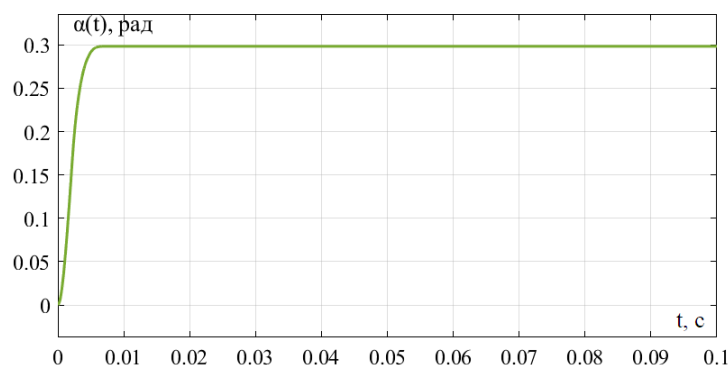


Рис. 6. – Вращение вала пьезодвигателя

Сравнение графиков вращения ротора (рис. 6) и поворота чувствительного элемента (рис. 7) показывает инерционную задержку поступающей информации к системе управления. Задержка образуется за

счёт инерционных свойств магнита совместно с упругим кручением нити и за счёт времени обработки данных с фотолинейки в микроконтроллере.

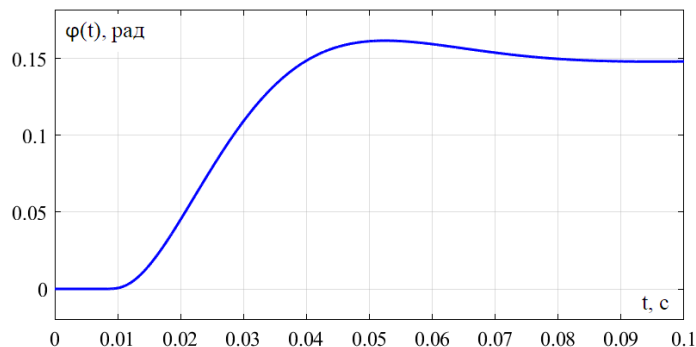


Рис. 7. – Регистрируемое угловое положение $\gamma(t)$ чувствительного элемента датчика во времени

Подбор параметров ПИД-регулятора, близких к оптимальным позволяет минимизировать время углового позиционирования чувствительного элемента. График поворота вала пьезодвигателя (рис. 6) показывает, что перерегулирование отсутствует, в то же время по графику управляемых колебаний пьезоэлемента (рис.5) видно, что пьезодвигатель работает всё время поворота вала, что говорит о высокой скорости установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика магнитного поля.

Выводы

Предложен способ и произведена разработка системы автоматической установки в нейтральное положение чувствительного элемента датчика магнитного поля. Разработанная система обеспечивает значительное повышение автономности датчика, что позволяет исключить или существенно сократить затраты на регулирование датчика, устанавливать датчик в места, исключая доступ, например, замуровывать в стены, в скальный массив. За счёт использования в системе автоматического регулирования положения чувствительного элемента

датчика пьезодвигателя питаемого высокочастотным напряжением практически полностью исключено влияние полей, наводимых токами системы на чувствительный элемент датчика. Оценка временных параметров регулирования показывает, что максимальное время автоматической установки составляет не более 3 с. Данное время приемлемо для автономных режимов работы датчика. Обладая высокой чувствительностью, разработанный датчик находит применение в задачах мониторинга магнитного поля объектов естественного и искусственного происхождения. В задачах геофизики и мониторинга влияния материалов, взаимодействующих с магнитным полем, на внешнее магнитное поле в результате магнитного поглощения и магнитного экранирования, в системах ближнепольной магнитной связи и других научно-практических приложениях. Повышение автономности датчика увеличивает спектр приложений его использования и снижает затраты на обслуживание.

Литература

1. Сергушин П.А., Мусалимов В.М. Моделирование динамики магнитостатического вариометра // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 37. С. 333-338.
2. Сергушин П.А. Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 28. С. 173-175.
3. Калишин А. С., Благовещенская Н. Ф., Трошичев О. А., Франк-Каменецкий А. В. ФГБУ "ААНИИ". Геофизические исследования в высоких широтах // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2020. Т. 107-108. № 3-4. С. 60-78.

4. Игнатъев В.К., Невзоров А.А., Орлов А.А. Цифровой протонный магнитометр для измерения геомагнитного поля // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1575
 5. Геофизический комплекс GI-MTS-1. Техническое описание. СПб: СПбФ ИЗМИРАН, 2005. 15 с.
 6. Грищенко А.Ю., Горошков В.А., Чернов Р.И. Оценка границ применимости и методов модуляции ближнепольной магнитной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. - № 1(143). С. 169-177. doi: [10.17586/2226-1494-2023-23-1-169-177](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-169-177)
 7. ROV assisted magnetic induction communication field tests in underwater environments. / D. Wei, S.S. Soto, J. Garcia, A.T. Becker, L. Wang, M. Pan. // Proceedings of the 13th International Conference on Underwater Networks & Systems. – Shenzhen. China. 2018. PP. 1-5. doi: [10.1145/3291940.3291988](https://doi.org/10.1145/3291940.3291988)
 8. Hott M., Hoehner P. A., Reinecke S. F. Magnetic Communication Using High-Sensitivity Magnetic Field Detectors. // Sensors. 2019. Vol. 15. № 19. PP. 1-14. doi: doi.org/10.3390/s19153415
 9. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Упрощенное определение параметров пьезоматериалов на образцах элементов в форме диска // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1038
 10. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В., Карев П. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб: Университет ИТМО, 2017. 134 с.
 11. Лавриненко В. В., Карташев И. А., Вишневецкий В. С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980. 110 с.
-

12. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
13. Копытенко Ю.А., Коробейников А.Г., Мусалимов В.М., Петрищев М.С., Сергушин П.А., Ткалич В.Л. Датчик магнитометра. Патент №RU 2287837 С1, заявл. 20.04.2005, опубл. 20.11.2006, Бюл. №32. С. 1573-1577.

References

1. Sergushin P. A., Musalimov V. M. Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. 2007. № 37. pp. 333-338.
2. Sergushin P. A. Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. 2006. № 28. pp. 173-175.
3. Kalishin A. S., Blagoveshchenskaia N. F., Troshichev O. A., Frank-Kamenetskii A. V. Vestnik Rossiiskogo fonda fundamentalnykh issledovani. 2020. № 3-4. pp. 60-78.
4. Ignatev V. K., Nevzorov A. A., Orlov A. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1575
5. Geophysical complex GI-MTS-1. Technical manual. Sankt-Peterburg: SPb IZMIRAN, 2005. 15 p.
6. Grishencev A. Yu., Goroshkov V. A., Chernov R. I. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023. № 1(23). P. 169-177. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-169-177
7. Debing Wei, Steban S. Soto, Javier Garcia, Aaron Trent Becker, Li Wang, Miao Pan. Proc. ACM Intern. Conf. WUWNet. – Shenzhen. China. 2018. PP. 1-5. doi: 10.1145/3291940.3291988



8. Hott M., Hoehner P. A., Reinecke S. F. Sensors (Basel, Switzerland). 2019. Vol. 15. № 19. PP. 1-14. doi: doi.org/10.3390/s19153415
9. Zemliakov V. L., Kliuchnikov S. N. Inzhenernyy vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1038
10. Bobcov A. A., Bojkov V. I., Bystrov S. V., Grigor'ev V. V., Karev P. V. Iсполnitel'nye ustrojstva i sistemy dlja mikroperemeshhenij [Actuators and systems for micro-displacements]. Sankt-Peterburg, Universitet ITMO, 2017. 134 p.
11. Lavrinenko V. V., Kartashev I. A., Vishnevskij V. S. P'ezoelektricheskie dvigateli [Piezoelectric motors]. Moskva, Jenergija, 1980. 110 p.
12. Nikol'skij A. A. Tochnye dvuhkanal'nye sledjashhie jelektroprivody s p'ezokompensatorami [Precise two-channel servo drives with piezo compensators]. Moskva: Jenergoatomizdat, 1988. 160 p.
13. Kopytenko Yu.A., Korobejnikov A.G., Musalimov V.M., Petrishhev M.S., Sergushin P.A., Tkalich V.L. Datchik magnitometra [Magnetometer sensor]. Patent no. RU 2287837 C1, application № 20.04.2005, publ. 20.11.2006, Bul. no. 32. PP. 1573-1577.