



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 94 за 2008 г.



Соколов С.М., Трифонов О.В.,
Ярошевский В.С.

Система управления
сферическим приводом
прямого управления с
датчиками Холла в контуре
обратной связи

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Соколов С.М., Трифонов О.В., Ярошевский В.С. Система управления сферическим приводом прямого управления с датчиками Холла в контуре обратной связи // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2008. № 94. 20 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2008-94>

ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
им. М.В.Келдыша РАН

С.М. Соколов, О.В. Трифионов, В.С. Ярошевский

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ПРЯМОГО
УПРАВЛЕНИЯ С ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА В КОНТУРЕ ОБРАТНОЙ
СВЯЗИ.**

Москва, 2008 г.

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются перспективные, обладающие высокой скоростью (до 1000 °/сек) и ускорением (10000 °/сек^2), точностью позиционирования (до $0,5^\circ$ и выше), большими угловыми диапазонами перемещений (до 90° по каждой из двух осей) сферические приводы прямого управления. Эти приводы предназначены для быстрых и точных перемещений сенсоров информационной системы мобильного робота. Описываются физические основы сферических приводов прямого управления с датчиками Холла в цепи обратной связи и компоновка аппаратной части соответствующей системы управления. На основе анализа и построения математических моделей всех факторов, оказывающих влияние на процесс управления, предлагаются алгоритмы эффективного управления рабочими органами подобных приводов с датчиками Холла в цепи обратной связи. Описана реализация и эксперименты с предлагаемой системой управления на действующих образцах приводов в составе информационной системы мобильного робота.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №№ 99-07-187, 99-01-00981, 02-01-00671, 02-07-90425, 06-08-01151.

ABSTRACT

Are considered perspective, having high speed (up to 1000 °/sec) and acceleration (10000 °/сек^2), by accuracy of positioning (up to $0,5^\circ$ and is higher), large angular ranges of moving (up to 90° on each of two axes) spherical direct drive actuators. This device is intended for rapid and precise mobile robot information system sensors moving. The physical fundamentals of spherical direct drive actuator with Hall sensors in a feedback and relative control system hardware configuration are described. On the basis of the analysis and the constructions of mathematical models of all factors rendering influence on control process are offered effective control algorithms of working heads of similar drives with Hall sensors in a feedback. The realization and experiments with this system on the acting samples of drives in structure of the mobile robot information system is circumscribed.

The work is executed at partial financial support of the grants RFBR №№ 99-07-187, 99-01-00981, 02-01-00671, 02-07-90425, 06-08-01151.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПРАВЛЕНИЯ	7
3. ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА	9
4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ	10
4.1. Системы координат, используемые в расчетах	10
4.2. Модель электрических процессов	11
4.3. Модели магнитных взаимодействий	12
5. КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	14
6. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ	14
6.1. Скользящий режим	15
6.2. Широтно-импульсная модуляция	16
7. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	16
8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
9. ЛИТЕРАТУРА	19

1. Введение.

С начала девяностых годов, с освоением технологий производства сильных постоянных магнитов ($B_r \approx 1$ тесла, $W_{H_{max}} 50 \div 260 \text{ kJ/ m}^3$), активизировались исследования по разработке двигателей прямого управления на их основе [1-10]. В частности, представляется перспективным использование двигателей прямого управления, а точнее их разновидности - сферических приводов прямого управления в устройствах позиционирования рабочих органов информационных систем мобильных роботов (ИСМР).

Устройства, обеспечивающие механические перемещения рабочих органов являются одним из узких мест при разработке информационных систем подвижных робототехнических комплексов [12]. Объективной трудностью здесь является то, что эти устройства должны удовлетворять следующим требованиям:

- большой диапазон перемещений по двум осям (50° и более);
- высокая точность (до $0,5^\circ$ и выше);
- высокая скорость перемещений (300° и более $^\circ$ в секунду);
- небольшой вес и габариты (в пределах $0,5 - 1,5 \text{ кг}$ и $150 \times 150 \times 150 \text{ мм}$);
- высокая надежность и долговечность (порядка тысячи часов наработки на отказ);
- умеренная цена (не превосходящая цену перемещаемого датчика, например ТВ-камеры $\approx 300-500 \text{ USD}$).

Среди небольшого числа устройств, предлагаемых в настоящее время для использования в указанных целях [13-15], ни одно не удовлетворяет всем перечисленным требованиям.

Сферические приводы прямого управления с их основными характеристиками:

- ✓ Рабочая область до 90° телесного угла;
- ✓ Средняя угловая скорость $500 \text{ }^\circ/\text{сек}$;
- ✓ Ускорение до $10000 \text{ }^\circ/\text{сек}^2$;
- ✓ Постоянный механический момент до 0.018 Nm/Amp
- ✓ Питание 12 в ;
- ✓ Цена $\approx 100 \div 200 \text{ USD}$.

Оказываются весьма привлекательными для указанных целей. В Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана при сотрудничестве с проф. Ричардом Валласом (Lehigh University, США) с 1993 года ведутся исследования по разработке и применению в робототехнике устройств на основе использования двигателей прямого управления. В лаборатории "АВИКОН" были созданы опытные образцы составных частей многофункциональной системы информационного обеспечения робототехнических комплексов (см. рис.1 и 2).

На рис.3 приведен пример компоновки информационной системы автономного мобильного робота, использующей два сферических привода прямого управления.

На рис. 4 показан действующий образец выносного пульта наблюдения подобной системы.

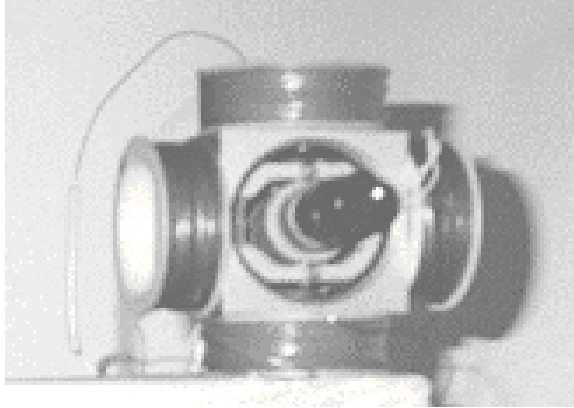


Рис. 1. Лазерный целеуказатель на сферическом приводе прямого управления ("малый" СППУ).

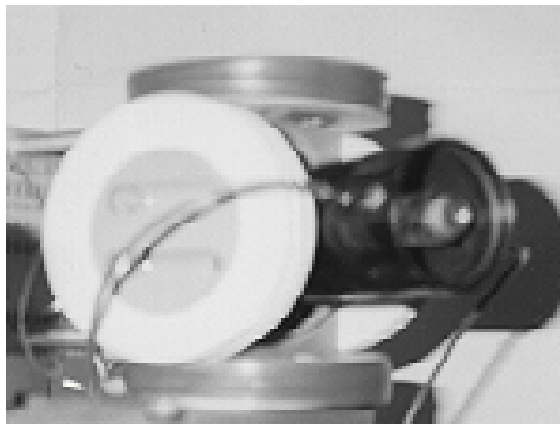


Рис. 2. Лазерный дальномер на сферическом приводе прямого управления ("большой" СППУ).

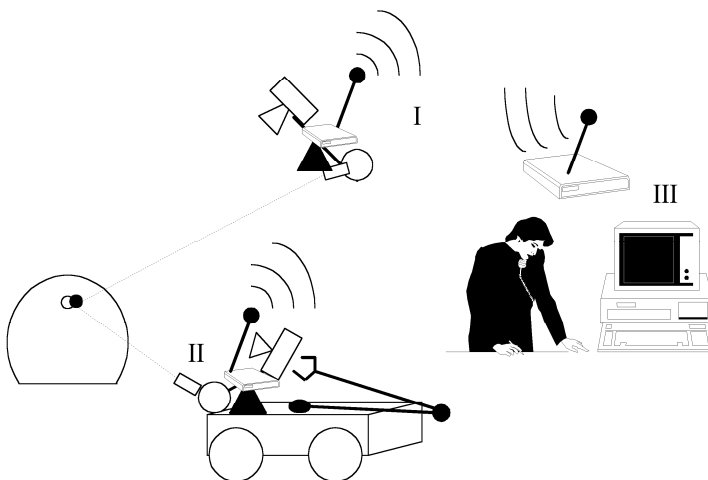


Рис. 3. Схема компоновки информационной системы мобильного робота, использующей два сферических привода прямого управления. I - выносной пульт наблюдения, использующий лазерный целеуказатель на базе малого СППУ в паре с ТВ - камерой; II - бортовая часть информационной системы, использую-

шая минидаальномер-целеуказатель на базе большого СППУ; III - стационарный пульт управления мобильным роботом.

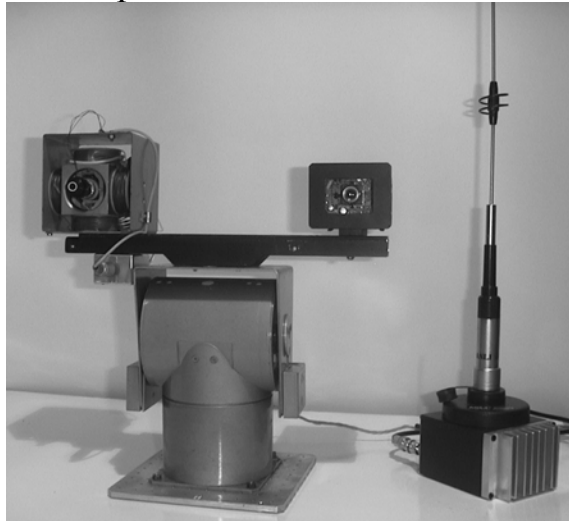


Рис.4. Общий вид выносного пульта наблюдения МСИОМР, использующего сферический привод прямого управления.

Сферический привод прямого управления (СППУ) состоит из постоянного магнита, установленного на торце цилиндра, подвешенного в кардановом подвесе. Цилиндр окружен двумя парами скрещенных соленоидов. На внешнем торце цилиндра устанавливается рабочий орган. Рабочий орган - устройство, предназначенное для перемещений с помощью СППУ (на так называемом малом СППУ это лазерный целеуказатель (рис. 1), а на большом СППУ - приемопередающая оптическая система лазерного минидаальномера (рис. 2)). На внутреннем торце цилиндра расположен постоянный магнит и устанавливается масса, уравнивающая рабочий орган. В качестве датчиков положения используются датчики Холла, расположенные на плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, расположенного в среднем положении (рис. 5 - схема СППУ).

Совмещение в одной детали СППУ (магнитном роторе) двух функций: силового привода и формирователя сигнала собственного положения обеспечивает одно из преимуществ подобной компоновки устройства наведения – относительную дешевизну. Для регистрации положения рабочего органа СППУ разумной альтернативой датчикам Холла могло быть применение магниторезисторов и индукционных магнитометрических преобразователей. Магниторезисторы были отклонены в виду нелинейности их передаточной характеристики, а индукционные магнитометрические преобразователи не позволяют измерять постоянное магнитное поле, что приводит к неконтролируемой погрешности измерения статического положения.

Управление сферическим приводом осуществляется посредством импульсного электромагнитного поля, формируемого соленоидами по командам от устройства управления.

Характеристики по амплитуде, точности и скорости исполнения движений СППУ в составе информационной системы (ИС) подвижного робота (МР) должны обеспечивать решение основных задач, стоящих перед ИС. Эти задачи можно разбить на два класса: задачи обеспечения безопасности движения – детектирование существенных препятствий на пути следования МР; и задачи обеспечения целенаправленного перемещения МР. Вторым классом задач является основной для рассматриваемой информационной системы мобильного робота. В нем, в свою очередь, следует выделить два основных подкласса:

- ◆ поиск и выделение ориентиров;
- ◆ слежение за указанным ориентиром.

Первый подкласс задач для системы управления характеризуется необходимостью перемещать рабочий орган информационной системы мобильного робота в большом телесном угле (для поиска ориентиров) и по специальным траекториям (для распознавания ориентиров заданного типа [13]).

Слежение за указанным ориентиром должно организовываться в процессе непрерывного движения МР, поэтому на выполнение соответствующих информационных действий отводится значительно меньше времени – 0,01 – 0,1 с.

В соответствии с этими потребностями нами были выбраны основные типы заданий, на реализации которых проверялась и отлаживалась система управления СППУ.

Первый тип задания: за минимальный промежуток времени возможно точно позиционировать рабочий орган в указанной точке.

Второй тип: в течение заданного времени как можно более точно описывать рабочим органом определенную траекторию движения (окружность заданного радиуса, отрезок прямой).

Простота конструкции компоновки сферического привода прямого управления имеет и оборотную сторону. Перемещения по сферической поверхности торца рабочего органа привода прямого управления (в угловых координатах), оказываются связаны нелинейной зависимостью с показаниями регистрируемыми датчиками Холла.

Для организации требуемого (для ИСМР) точного и быстрого управления рабочим органом потребовалось построить математическую модель всех процессов, происходящих в сферическом приводе прямого управления, верифицировать ее на действующих образцах СППУ и только после этого, на основе модели построить алгоритмы управления рабочими органами ИСМР.

В работе описаны результаты исследования системы управления СППУ, реализованной на базе персонального компьютера со специальной платой (см. п. 2).

2. Архитектура системы управления.

Система управления СППУ использует следующие средства аппаратной поддержки:

- ◆ датчики Холла;
- ◆ аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- ◆ устройство, реализующее алгоритмы управления СППУ (стандартный персональный компьютер в проведенных исследованиях);
- ◆ усилитель мощности управляющего воздействия;
- ◆ соленоиды управления постоянным магнитом СППУ.

К устройству, реализующему алгоритмы управления, подключены выходы датчиков Холла и обмотки соленоидов (рис. 5).

Предполагается, что в ЭВМ, организующей процесс управления функционированием мобильного робота (МР) – ЭВМ верхнего уровня, формируется задание для информационной системы (ИС) с целью получения необходимых данных об окружающей среде. ИС, в свою очередь разбивает эту задачу на ряд подзадач для отдельных составляющих ее подсистем. Для подсистемы наведения измерительного устройства (мини-дальномер или целеуказатель) такой подзадачей является команда перемещения рабочего органа в заданное положение или по заданной траектории.

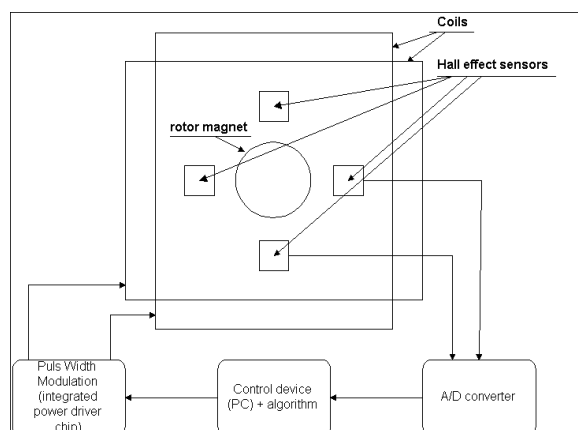


Рис. 5. Схема сферического привода прямого управления и его системы управления.

Датчики Холла, установленные на вертикальной плоскости, жестко связанной с тыльной стороной СППУ, выдают аналоговый сигнал, соответствующий положению постоянного магнита сферического привода относительно плоскости расположения датчиков. Этот сигнал с помощью АЦП преобразуется в цифровой код и передается в устройство, реализующий алгоритм управления СППУ. В качестве этого устройства, как уже было указано, выступает стандартный компьютер типа IBM PC, снабженный специальной платой сопряжения с датчиками Холла и соленоидами СППУ.

Устройство управления, получив задание на исполнение указанного движения с определенными параметрами (временными и геометрическими), счи-

тывает текущие показания датчиков Холла и выдает необходимые сигналы на силовые ключи, управляющие током соленоидов СППУ.

Для достижения требуемой точности возможны два варианта управления: использование скользящего управления с высокочастотной сменой управления и ШИМ-управлением с низкочастотной сменой управления.

После оценки параметров системы (см. п.4.1) и ряда экспериментов был использован вариант со скользящим управлением с частотой 1 КГц. Управление заключается в выдаче сигнала, по которому на соленоидах СППУ устанавливается и сохраняется в течении 1млсек (электронными ключами) положительное или отрицательное напряжение.

При использовании ШИМ-управления в течении 1-3 млсек (в зависимости от сложности расчета управления) генерился ШИМ с частотой 10 КГц со скважностью от 0 до 255 единиц.

3. Организация измерения положения рабочего органа.

Измерение положения рабочего органа по двум координатам производится с помощью сигналов от четырех датчиков Холла, расположенных в одной плоскости крестообразно.

В рассматриваемой конструкции СППУ магнитное поле вокруг каждого датчика Холла имеет две составляющие:

- ◆ магнитное поле цилиндрического постоянного магнита ;
- ◆ магнитное поле соленоидов при протекании импульсного управляющего тока;

При этом следует учитывать еще два обстоятельства, влияющих на точность измерения положения рабочего органа:

- чувствительность датчиков Холла, их размеры и расположение относительно измеряемых магнитных полей;
- стабильность напряжения питания датчиков Холла.

Показание i -го датчика Холла является функцией координат и размеров чувствительного элемента i -го датчика Холла (x_i, y_i, dx_i, dy_i), воздействия магнитного поля постоянного магнита (MF_i), магнитного поля управляющих катушек (SMF_i) и напряжения питания датчиков Холла (U). Показание можно выразить функцией $H_i(x_i, y_i, dx_i, dy_i, MF_i(\varphi, \psi), SMF_i, U)$.

Для определения положения оси постоянного магнита СППУ анализируется разность в сигналах датчиков Холла, расположенных по одной оси по разные стороны от центрального положения карданова подвеса (рис. 3, 4). Тем самым выходная информация об угловом положении оси постоянного магнита СППУ представляет собой следующую зависимость.

$$\begin{aligned} \text{Код}_X &= H_1 - H_2 \\ \text{Код}_Y &= H_3 - H_4 \end{aligned} \quad (3.1)$$

4. Математическая модель системы.

4.1. Системы координат, используемые в расчетах.

Наиболее подходящими для количественного описания процессов, происходящих в системе управления СППУ, были признаны следующие системы координат (рис. 6).

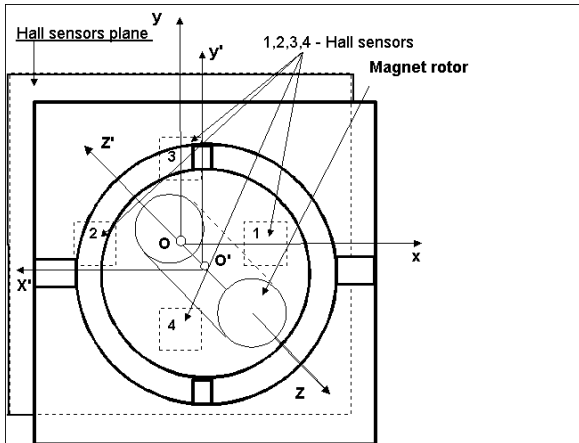


Рис.6. Системы координат, используемые в расчетах.

Декартова правая система координат **OXYZ**. Начало координат лежит в точке **O**, являющейся проекцией центра карданова подвеса СППУ (одновременно центр постоянного магнита) на плоскость крепления датчиков Холла. Ось **OZ** направлена вдоль перпендикуляра к этой плоскости в сторону магнита. Оси **OX** и

OY лежат в плоскости датчиков Холла и образуют правую систему координат с осью **OZ**. Ось **OX** параллельна внешней оси карданова подвеса и направлена от 2-го к 1-му датчику Холла (см. рис.3, 4), а ось **OY** дополняет описанные две оси до правой системы координат.

Декартова правая система координат **O¹X¹Y¹Z¹** с началом координат в центре карданова подвеса СППУ (одновременно центр постоянного магнита), ось **O¹Z¹** направлена вдоль перпендикуляра к плоскости внутреннего кольца карданова подвеса (оси симметрии постоянного магнита) в сторону плоскости расположения датчиков Холла. Оси **O¹X¹** и **O¹Y¹** образуют правую систему координат с осью **O¹Z¹** и в нейтральном положении карданова подвеса ось **O¹X¹** параллельна внешней оси карданова подвеса и направлена от 2-го к 1-му датчику Холла (см. рис.3, 4).

Связь введенных систем координат для произвольного положения постоянного магнита, характеризуемого углами поворота карданова подвеса φ - поворот вокруг внешней оси подвеса (на рис. 4 - горизонтальная ось) и ψ - поворот вокруг внутренней оси подвеса (на рис. 4 - вертикальная ось), задается соотношениями 3.1.

$$\begin{aligned} X' &= (Y * \sin\varphi - d * \cos\varphi) * \cos\Psi - X * \sin\psi \\ Y' &= -(Y * \sin\varphi - d * \cos\varphi) * \sin\Psi - X * \cos\psi \\ Z' &= Y * \cos\varphi + d * \sin\varphi \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

Здесь d - расстояние между точками **O** и **O'**.

4.2. Модель электрических процессов.

В рассматриваемой реализации электромагнитное поле в рабочем объеме привода возникает при протекании импульсного управляющего тока в двух скрещенных парах соленоидов. Обмотки соленоидов каждой пары расположены соосно и соединены синфазно для увеличения напряженности магнитного поля и механического момента, приложенного к рабочему органу привода. Такое расположение катушек соленоидов позволяет, в первом приближении, пренебречь их взаимным влиянием и взаимоиндукцией.

Электрическую эквивалентную схему для каждой из пар представим следующим образом (рис. 5).

Переключение управляющего тока обеспечивается мощными интегральными электронными ключами марки UDN2998, питаемыми от источника постоянного тока с номинальным выходным напряжением 12В. Пиковое значение управляющего тока достигает величины 3А. Анализ эквивалентной схемы показал, что при достаточно малой длительности управляющих импульсов с крутыми фронтами переключения в ней возможно возникновение нежелательных колебаний тока, осложняющих нормальное управление.

Времена переключения тока τ_k для UDN2998 около 500нс определяют минимальную длительность импульса управления $t_{y\min} = 2\tau_k$. Максимальная длительность импульса управления определяется разрядностью ШИМ формирователя. При используемом восьмиразрядном ШИМ формирователе $t_y = 2^8 t_{y\min} = 256 t_{y\min}$. Условия квазистационарности при этом выполнены для длины провода обмотки катушек порядка 300м.

Проведенные эксперименты подтвердили, что нестационарные колебательные процессы в обмотках используемых соленоидов действительно не возникают. Отсутствия ферромагнитных сердечников в соленоидах и незначительные импульсные потери дают возможность упростить эквивалентную схему (рис. 7).

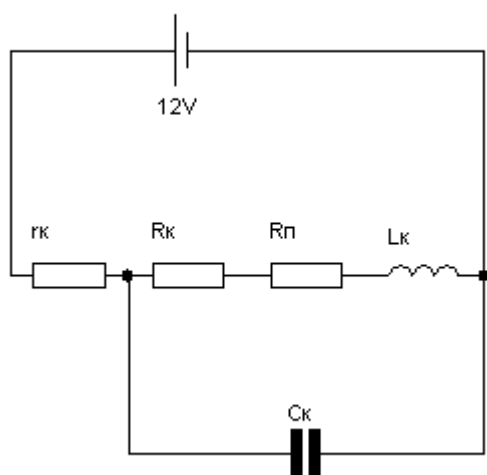


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема пары соленоидов одного направления в сферическом приводе прямого управления. Здесь: E – напряжение питания ключей;

r_k – внутреннее сопротивление ключей; R_k – активное сопротивление обмотки соленоида; $R_п$ – сопротивление импульсных потерь; C_k – емкость обмотки соленоида; L_k – индуктивность обмотки соленоида.

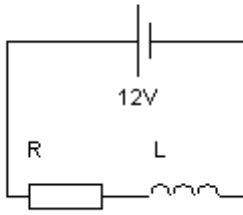


Рис. 8. Упрощенная эквивалентная электрическая схема пары соленоидов одного направления в сферическом приводе прямого управления. Здесь: $R = 2(r_k + R_k)$, $L = 2L_k$

Нарастание тока в этом случае характеризуется электрической постоянной времени переходного процесса $\tau_e = L/R$, которая должна быть меньше длительности цикла управления T_y и, в тоже время, больше максимальной длительности импульса управляющего тока t_y .

$$t_y \ll \tau_e \ll T_y$$

Активное сопротивление обмотки соленоида можно представить $R_k = \rho l/S$ где: ρ -удельное сопротивление; l –суммарная длина провода обмоток соленоида; S – его поперечное сечение. С учетом геометрии обмоток $R_k = 2\pi\rho D_{cp} N/S$ где: D_{cp} – средний диаметр обмотки; N - число витков.

Полуэмпирическая формула [11] для индуктивности L_k [мкГн] цилиндрических соленоидов диаметром D_{cp} , длиной a и толщиной обмотки b в миллиметрах имеет вид:

$$L_k = 4.6 \cdot 10^{-4} a N^2 \lg \frac{D_{cp} + b}{D_{cp} - b}$$

Как показано в [2] инерционность сферического двигателя определяется в основном механическими характеристиками (моментом инерции рабочего органа и моментом сил управления).

Приведенные соотношения позволяют оценить максимальную частоту цикла управления $f_{max} = 2/\tau_e$ (11688 Гц для малого СППУ), и определить минимально достижимую инерционность сферического двигателя.

Модель электродвижущей силы, возникающей при движении магнита в соленоидах

$$J = \frac{nE_i}{R}, \quad E_i = -\frac{d\Phi_M}{dt}, \quad \Phi_M = \iint_S B_n dS$$

где J - ток, вызванный Э.Д.С.; n - количество витков в соленоиде; R - сопротивление соленоида; E_i - Э.Д.С., возникающая в соленоиде; Φ_M - магнитный поток, вызванный движением постоянного магнита СППУ; интегрирование производится по площади витка соленоида; B_n - нормальная составляющая вектора магнитной индукции постоянного магнита в элементе dS к плоскости витка соленоида.

Численное моделирование движения постоянного магнита с постоянной угловой скоростью 1рад/сек показало, что нормальная составляющая магнитного поля, обусловленная Э.Д.С., возникающей в соленоидах, в 10000 раз меньше, чем аналогичная составляющая магнитного поля управления, что позволило пренебречь этим явлением в расчетах.

4.3. Модели магнитных взаимодействий.

Модель магнитного поля цилиндрического постоянного магнита
(в системе координат O'x'y'z')

$$\bar{H}_c(x, y, z) = \frac{1}{\mu} \int \frac{\bar{R}}{R^3} \sigma_M^0 dS \quad (4.3.1.)$$

где μ - магнитная проницаемость воздуха, интегрирование производится по плоскостям торцов цилиндрического постоянного магнита; \bar{R} - вектор, направленный из элемента интегрирования dS в точку (x, y, z) ; $\sigma_M^0 = 50000 \text{ а/м}$ (для магнитов, используемых в описываемых СППУ).

Модель магнитного поля соленоидов:

$$\bar{H}_s(x, y, z) = \frac{ni_c}{4\pi} \oint \frac{[\bar{dl}, \bar{r}]}{r^3} \quad (4.3.2)$$

где n - число витков в одном соленоиде; i_c - ток управления; интегрирование производится по одному витку соленоида; \bar{r} - вектор, направленный из элемента интегрирования \bar{dl} в точку (x, y, z) .

Модель аналогового сигнала (напряжения) от чувствительного элемента датчика Холла.

$$h_i = \frac{1}{S} \iint (\bar{H}_c + \bar{H}_s, \bar{e}_z) dS \quad (4.3.3)$$

где S - площадь чувствительного элемента датчика Холла, интегрируется нормальная составляющая суммы векторов напряженности магнитных полей постоянного магнита и соленоидов по площади чувствительного элемента датчика Холла.

Таким образом, H_i является результатом оцифровки аналогового сигнала h_i . Напряжение питания U всех датчиков Холла выбиралось и фиксировалось из допустимого диапазона напряжений для конкретной модели датчиков так, чтобы оцифрованный сигнал от каждого из датчиков Холла находился в пределах 1 - 255 единиц восьмиразрядного АЦП при любом положении рабочего органа СППУ.

5. Калибровка системы управления.

Для калибровки созданной модели СУ СППУ был разработан специальный стенд, позволяющий фиксировать произвольные положения рабочего органа (рис. 9).

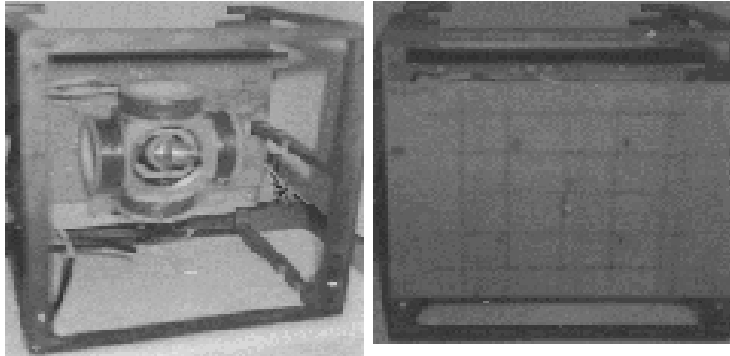


Рис. 9. Стенд для калибровки системы управления СППУ. Слева: стенд без панели для фиксации рабочего органа.

Была выбрана последовательность из 28 точек, взятых в центральной и периферической областях перемещений СППУ.

В каждой из этих точек рассчитывались показания датчиков Холла в соответствии с построенной моделью h_i и сравнивались с измеренными по факту (Код_Х и Код_У). По результатам этих измерений методом наименьших квадратов на совокупности калибровочных точек выбирались коэффициенты пересчета теоретических значений параметров h_i в реальные показания Код_Х и Код_У.

Выбранные таким способом коэффициенты по всем контрольным точкам обеспечивали совпадение теоретических и реальных значений с точностью до 0,4%.

6. Алгоритм управления сферическим приводом.

6.1. Скользящий режим управления.

Входами в систему управления являются целевые значения углов φ и ψ карданова подвеса постоянного магнита с рабочим органом.

Управление приводами вычисляется с частотой 1 КГц. Для расчета управляющих воздействий определяются текущие показания датчиков Холла (Код_Х и Код_У). По этим показаниям и известным управляющим воздействиям предыдущего шага определяется реальное угловое положение постоянного магнита. $\varphi = (U_x, U_y, \text{Код}_X, \text{Код}_Y)$; $\psi = (U_x, U_y, \text{Код}_X, \text{Код}_Y)$ эти зависимости затабулированы на основании формул 3.1, 4.1.1, 4.3.1-4.3.3. Управление производится по двум осям отдельно.

$U_x = 0$ - приложение напряжения, реализующего перемещение торца постоянного магнита с рабочим органом в положительном направлении оси ОХ

$U_x = 1$ - приложение напряжения, реализующего перемещение торца постоянного магнита с рабочим органом в отрицательном направлении оси ОХ

$U_y = 0$ - приложение напряжения, реализующего перемещение торца постоянно-го магнита с рабочим органом в положительном направлении оси ОУ

$U_y = 1$ - приложение напряжения, реализующего перемещение торца постоянно-го магнита с рабочим органом в отрицательном направлении оси ОУ

Управление строится в соответствии с графиком, параметры которого вычисляются для каждой конкретной реализации. График показан на рис. 10.

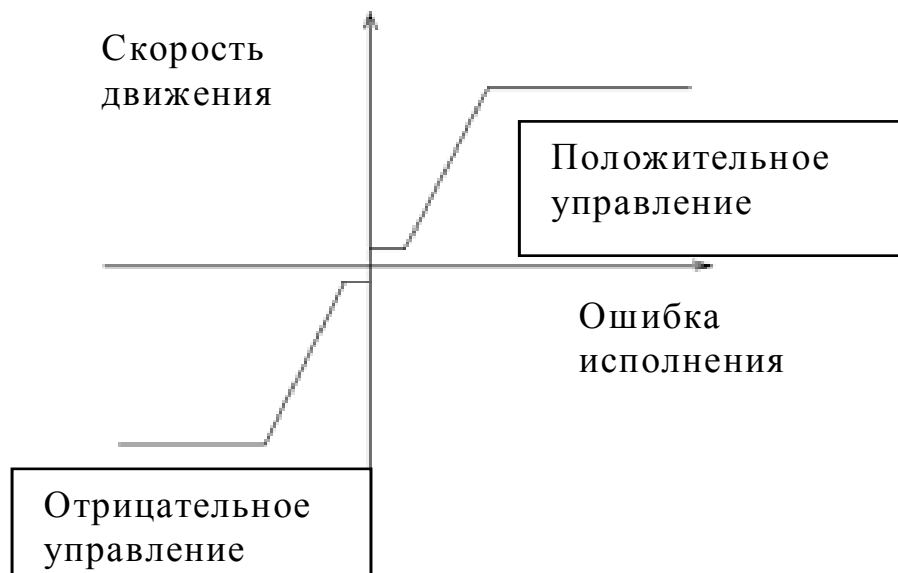


Рис. 10. Распределение управлений в зависимости от ошибки исполнения и скорости движения.

Вычисляется ошибка исполнения и скорость движения магнита в заданном направлении. Если полученная точка на рис. 8 находится ниже графика, то управление принимается положительным, иначе отрицательным.

Аналогично строится управление и по другой оси.

6.2. Широтно-импульсная модуляция управляющего воздействия.

Управление приводами вычисляется с частотой 600 гц. Для расчета управляющих воздействий определяются текущие показания датчиков Холла (Код_X и Код_Y). По этим показаниям и известным управляющим воздействиям предыдущего шага определяется реальное угловое положение постоянного магнита. $\varphi = (U_x, U_y, \text{Код}_X, \text{Код}_Y)$; $\psi = (U_x, U_y, \text{Код}_X, \text{Код}_Y)$ эти зависимости затабулированы на основании формул 3.1, 4.1.1, 4.3.1-4.3.3. Управление производится по двум осям отдельно.

U_x, U_y – текущие управляющие воздействия реализуются по формулам ПИ-регулятора $U = k_p \circ Err + U_i$, где $U_i = U_{i-1} + k_i \circ Err$. Err – ошибка исполнения текущего движения.

U – ограничивается диапазоном изменения от -255 до 255.

7. Результаты экспериментов.

При решении задачи указания на произвольные точки рабочей области малого СППУ (телесный угол 70°) рассмотренная система управления сферическим приводом прямого управления обеспечила точность наведения рабочего органа лазерного целеуказателя в $0,08^\circ$ по каждой из координат. Скорость наведения составила $400^\circ/\text{сек}$

На рис. 11. – иллюстрация точности выведения рабочего органа в заданную точку.

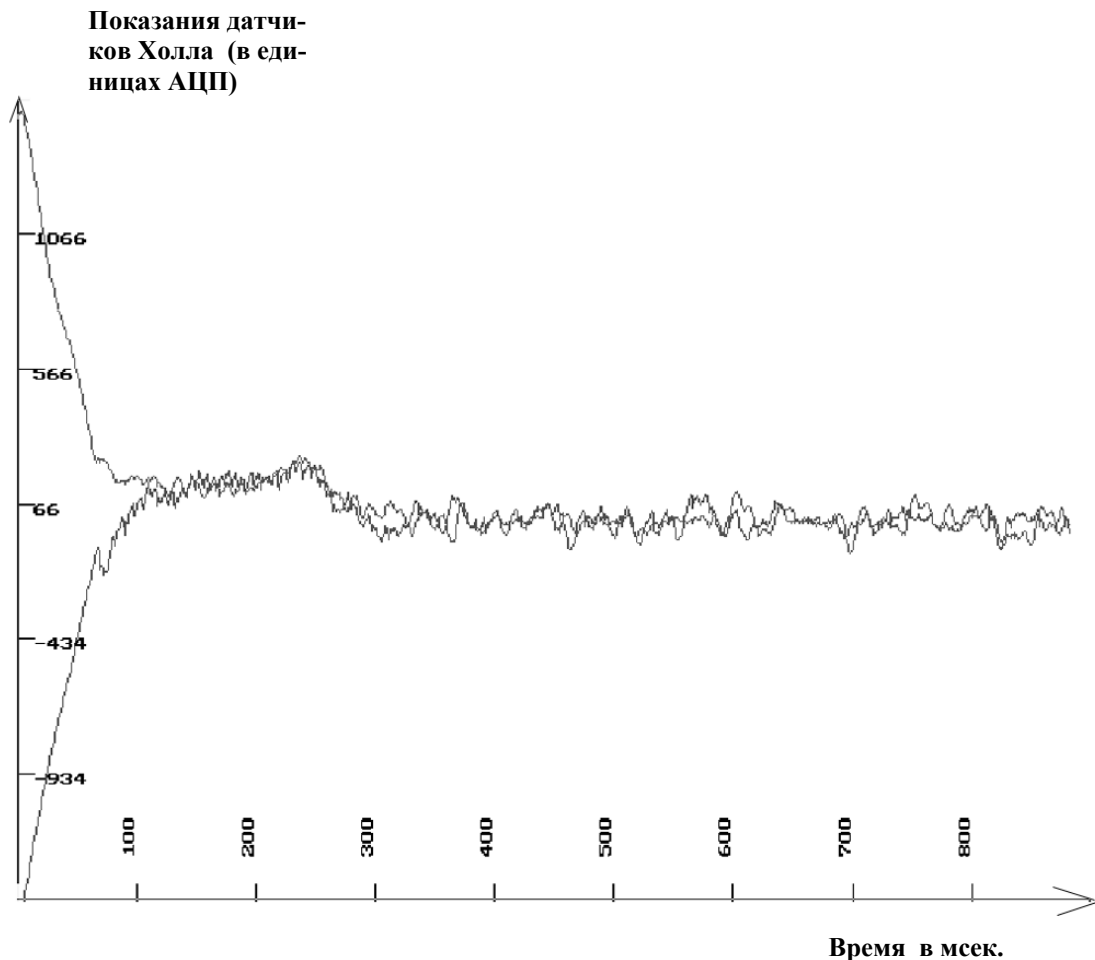


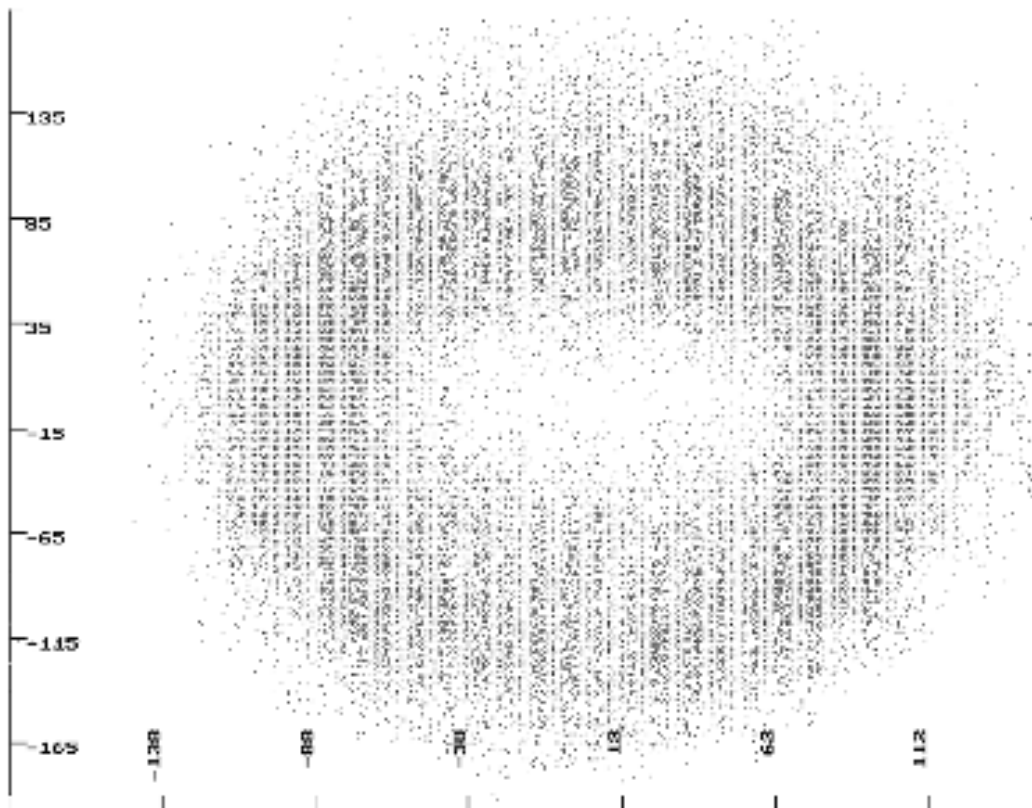
Рис. 11. Шлейф движения рабочего органа малого СППУ при выведении лазерного целеуказателя в заданную точку.

Точностные характеристики системы управления описанного привода при движении рабочего органа малого СППУ по заданной траектории были исследованы на траекториях двух типов: отрезках прямых и окружностях разного радиуса.

На рис. 12 представлены результаты измерений показаний датчиков Холла при движении лазерного целеуказателя по окружности с центром с угловыми координатами $0, 0$ и угловым радиусом в три градуса.

На рис. 13 представлены результаты измерений показаний датчиков Холла при движении лазерного целеуказателя по отрезку прямой с центром с угловыми координатами $0, 0$ и угловым размером в шесть градусов.

Показания датчиков Холла , расположенных вдоль вертикальной оси (в единицах АЦП)



Показания датчиков Холла, расположенных вдоль горизонтальной оси (в единицах АЦП).

Рис.13. Шлейф показаний датчиков Холла при движении лазерного целеуказателя по окружности радиусом три угловых градуса с центром в заданной точке (угловые координаты $0,0$).

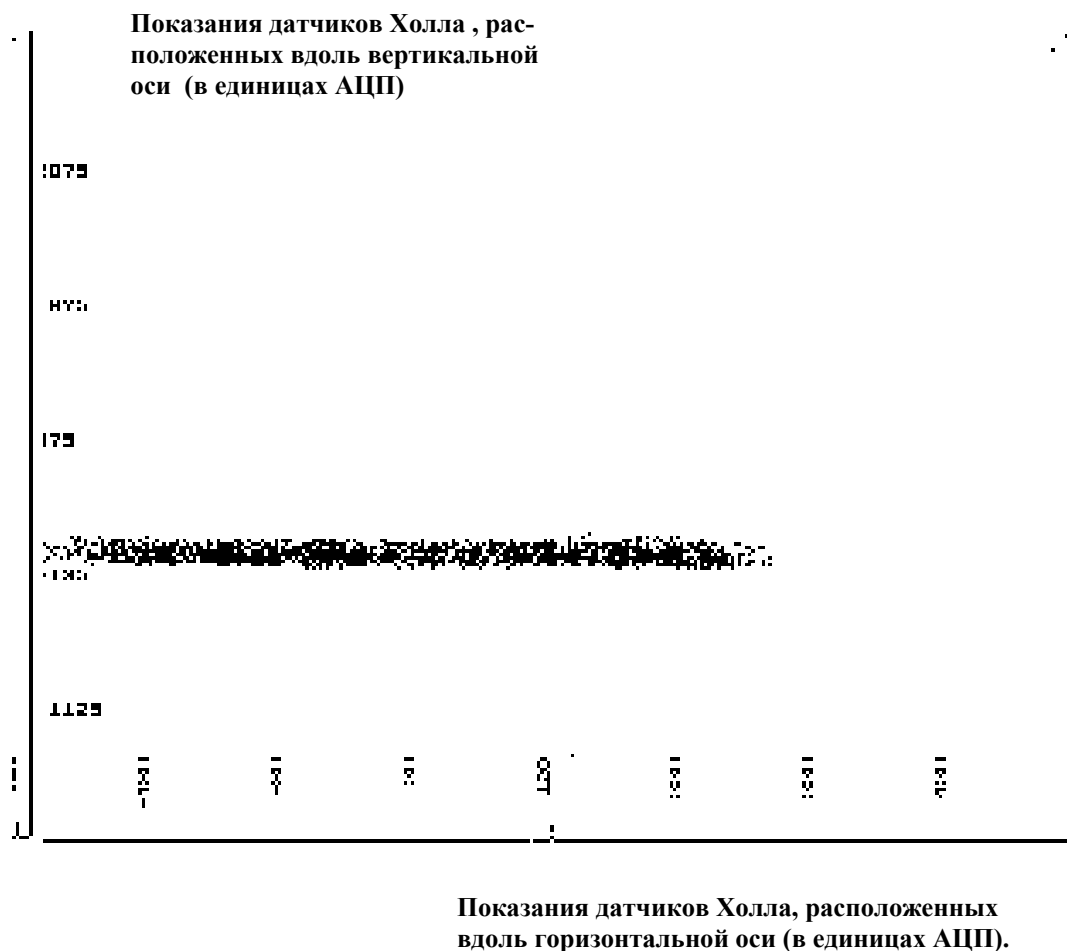


Рис. 14. Шлейф показаний датчиков Холла при движении лазерного целеуказателя по отрезку прямой в шесть угловых градусов с центром в заданной точке (угловые координаты 0,0).

8. Заключение.

В работе описаны исследования системы управления сферическим приводом прямого управления (СППУ) для обеспечения двух координатных перемещений сенсоров информационных систем мобильных роботов. В основу предложенных алгоритмов управления рабочими органами информационных систем положены математические модели физических процессов, происходящих в цепи обратной связи СППУ. Качество используемых моделей было верифицировано на действующих образцах СППУ и в количественном выражении составило 0,5% отклонения расчетных координат от реальных координат в 28 контрольных точках рабочей области.

Разработанный программно – аппаратный комплекс позволяет оперативно настраивать систему управления сферических приводов прямого управления для реализации быстрых и прецизионных движений информационно - измерительных головок с индивидуальными масс – инерционными характеристиками.

На двух опытных образцах сферических приводов прямого управления с массами перемещаемых устройств 12 и 70 граммов в диапазоне перемещений 70 и 50 телесных градусов соответственно, получены точности исполнения движений 0,08 – 0,15 градуса. При этом скорость выхода в заданную точку или на заданную траекторию движения составляла 300 –400 градусов в секунду.

Полученные результаты позволили сделать вывод о возможности успешного применения подобных программно-аппаратных комплексов в составе информационных систем мобильных роботов. При этом сохраняются такие достоинства СППУ как простота и относительная дешевизна конструкции, а основные затраты производятся в аналитической форме на этапе проектирования для расчета необходимых параметров алгоритмов управления.

Описанная программно-аппаратная система продолжает совершенствоваться.

Литература.

1. H. Asada and K. Youcef-Toumi, Direct Drive Robots: Theory and Practice (MIT Press, Cambridge, MA, 1986).
2. R.L.Hollis, S.E. Salcudean and A.P. Allen, A six degree of freedom and magnetically levitated variable compliance fine motion wrist: Design, modeling and control, IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (1991) 320-332.
3. K.M. Lee and C. Kwan, Design concept development of a spherical stepper for robotic applications, IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (1991) 175-181.
4. B.B. Bederson, R.S. Wallace and E.L. Schwartz, A miniaturized active vision system, 11th Int. Conf. On pattern Recognition (august 1992).
5. B.B. Bederson, R.S. Wallace and E.L. Schwartz, Two miniature pantilt devices, IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation (May 1992).
6. B.B. Bederson, R.S. Wallace and E.L. Schwartz, Control and design of the spherical pointing motor, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (May 1993).
7. B.B. Bederson, R.S. Wallace and E.L. Schwartz, Spherical pointing motor, Tech. Report, U.S. Patent Number 5,204,573, April 1993.
8. David P.Max and Richard S. Wallace, Feedback Control of Miniature Direct Drive Devices, Tech. Report 652, New York University, Computer Science, November 1993.
9. David P.Max, Richard S. Wallace, Sergey M. Sokolov “ Simple multi function vision system for 3D data acquisition”. Proceedings of ICAR 95, 7th International Conference on Advanced Robotics, Barcelona, Spain, 1995, v 2, pp. 674-678.
10. inet.keldysh.ru/robotics/msiomr

11. Sokolov S.M., Trifinov O.V., Yaroshevsky V.S. Control system design for spherical direct drive actuators with Hall sensors. Proceedings of the International conference AIM'99 p.916-921
12. Sokolov S.M., Trifinov O.V., Yaroshevsky V.S. Improved Control System of the Spherical Direct Drive Actuators. Proceedings of the International conference Mechatronics 2000, Atlanta, Georgia, 2000
13. Sokolov S.M., Trifinov O.V., Yaroshevsky V.S. Research of spherical direct drive actuators control systems Proc. of the Intern. Conf. ICRA2001, May 21-26, Seoul, Korea, 2001, pp. 1673-1688
14. Tod S. Levitt, Daryl T. Lawton. Qualitative Navigation for Mobile Robots. In Artificial Intelligence 44, 1990, N 3, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), pp. 305-360.
15. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств М: Энергия 1978./Под ред. Дулина В.Н., Жука М.С. 303 с.
16. Н.Е. Богомолов, В.С. Ярошевский. О точностных характеристиках дальнометрических обзорно-информационных систем робототехнических комплексов. Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, 1982, № 177, 14 с.