

Управление поворотом полезной нагрузки робота для движения по трубопроводам малых диаметров

12, декабрь 2014

Тачков А. А., Калининченко С. В., Малыхин А. Ю., Волков А. Г.

УДК: 681.5.017

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

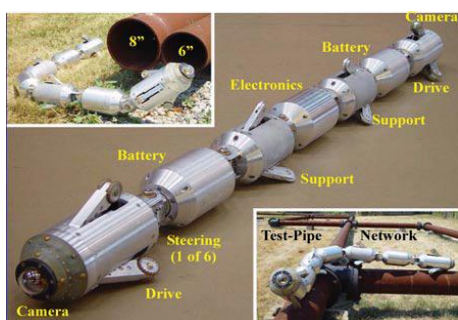
tachkov@bmstu.ru

Введение

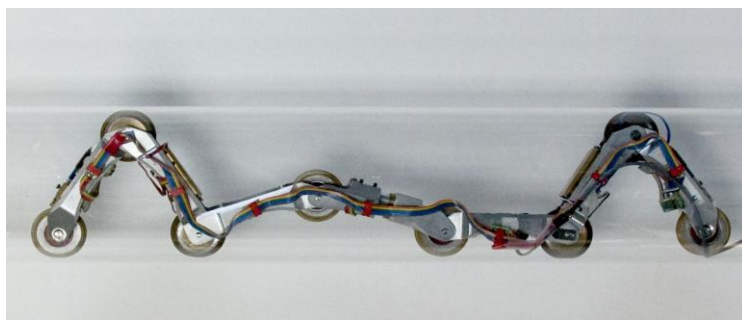
Одной из сфер применения мобильных робототехнических систем является их использование в качестве носителей технологического оборудования (полезной нагрузки, или ПН) при обслуживании или обследовании трубопроводов различного назначения, например с привлечением методов неразрушающего контроля [1]. Для трубопроводов с внутренним диаметром от 10 до 200 мм, имеющих произвольное пространственное расположение, повороты и искривления, актуальной является задача обеспечения позиционирования и ориентации оборудования в требуемом положении относительно продольной оси.

Для трубопроводов малых диаметров робот – доставщик оборудования, как правило, имеет многозвенное исполнение (рис.1). Звенья-модули соединяются между собой шарнирами, и каждый модуль имеет определенное функциональное назначение: модуль управления, модуль датчиков, модуль, обеспечивающий поступательное перемещение, поворот, фиксацию и т.п. При этом продольное перемещение робота по трубопроводу осуществляется в соответствии с различными принципами движения, подробно рассмотренными в работах [2,3].

При диаметре трубопровода более 40 мм габариты робота позволяют разместить ПН – технологическое оборудование внутри одного из таких модулей (рис.1а). Для трубопроводов меньших диаметров, из-за необходимости прохождения роботом их изгибов, ПН приходится размещать в нескольких последовательно соединенных между собой шарнирах контейнерах, расположенных внутри гибкого кожуха и имеющих подвижность только в одной полуплоскости (аналог разомкнутой велосипедной цепи). Из-за чего возникает задача совмещения этой полуплоскости с плоскостью, в которой расположен пространственный изгиб трубопровода (рис.2).



а)



б)



в)

Рис.1. Многозвенные внутритрубные роботы для диагностики (а – робот X-II-RFEC (США), б – робот PIRATE для труб диаметром 41 мм (Нидерланды), в – MICROTUBE (Испания))

Решение указанной задачи рассматривается при следующих допущениях:

1. трубопровод имеет не более одного изгиба на участке длиной, равной длине ПН;
2. внутренний диаметр трубы не превышает 32 мм;
3. продольное перемещение робота может происходить с ускорением;
4. полезная нагрузка имеет одну степень свободы.
- 5.

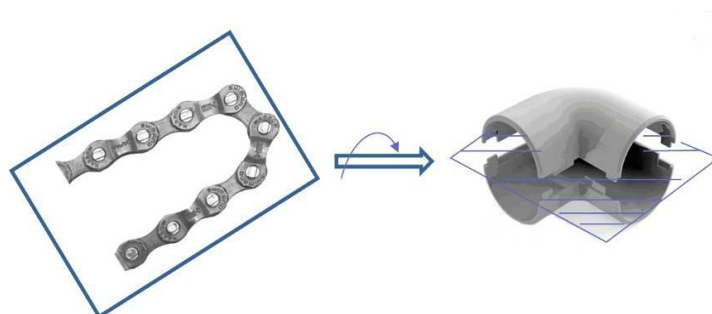


Рис. 2. Пояснение к задаче ориентации полезной нагрузки

1. Решение задачи ориентации полезной нагрузки

Формально задача ставится следующим образом. Имеется многозвенный робот, все звенья которого, кроме двух, соединены двухстепенными карданами. Два смежных звена

соединяются гибким кожухом, внутри которого располагается ПН. Для определенности будем называть эти звенья – «хвостовое» и «головное». Одним концом ПН соединена через редуктор с валом двигателя постоянного тока, расположенного в «хвостовом» звене, второй конец нагрузки свободен. Нагрузка имеет одну степень свободы, как было показано ранее.

«Головное» и «хвостовое» звенья оснащены системой пространственной ориентации (СПО), позволяющей определить в земной системе координат $OXYZ$ углы тангажа θ , крена γ и поворота (азимут ψ) систем координат $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$, связанных с «хвостовым» и «головным» звеньями соответственно (рис.3). Требуется найти угол φ , на который необходимо повернуть ПН для беспрепятственного прохождения поворота трубопровода.

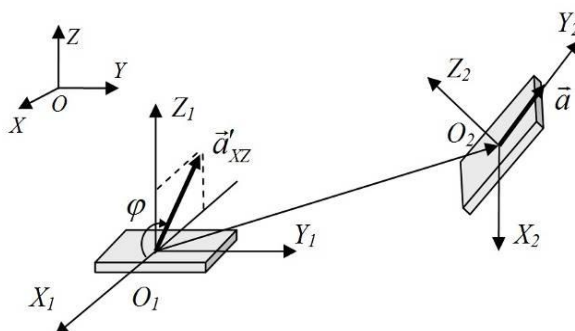


Рис. 3. Системы координат головной и хвостовой части цепочки контейнеров с ПН

($O_1X_1Y_1Z_1$ – система координат, связанная с хвостовой частью СПО, $O_2X_2Y_2Z_2$ – система координат, связанная с головной частью СПО)

Решение задачи заключается в следующем. Так как угол φ представляет собой угол между проекцией орта O_2Y_2 ($\vec{a}$) на плоскость $O_1X_1Z_1$ и осью O_1X_1 , то он определяется из матрицы поворота как:

$$\varphi = \text{atan2} \left(\frac{a'_z}{a'_x} \right), \quad (1)$$

где a'_x , a'_z – проекции вектора $\vec{a}'$ на оси OX_1 и OZ_1 соответственно, atan2 – функция вычисления арктангенса угла с учетом квадранта.

Вектор $\vec{a}'$ определяется в соответствии с формулой (2):

$$\vec{a}' = R_2 R_{1,\theta}^{-1} R_{1,\gamma}^{-1} R_{1,\psi}^{-1} \vec{a}, \quad (2)$$

$$R_i = \begin{pmatrix} \cos \gamma_i \cos \psi_i & \cos \gamma_i \sin \psi_i & -\sin \gamma_i \\ \sin \theta_i \sin \gamma_i \cos \psi_i - \cos \theta_i \sin \psi_i & \sin \theta_i \sin \gamma_i \sin \psi_i + \cos \theta_i \cos \psi_i & \sin \theta_i \cos \gamma_i \\ \cos \theta_i \sin \gamma_i \cos \psi_i + \sin \theta_i \sin \psi_i & \cos \theta_i \sin \gamma_i \sin \psi_i - \sin \theta_i \cos \psi_i & \cos \theta_i \cos \gamma_i \end{pmatrix},$$

где R_i – матрица направляющих косинусов хвостовой ($i=1$) и головной ($i=2$) частей СПО, $\theta_i, \gamma_i, \psi_i$ – углы тангажа, крена и азимута i -ой части СПО в земной системе координат

$OXYZ$, $R_{1,\theta}^{-1}, R_{1,\gamma}^{-1}, R_{1,\psi}^{-1}$ – обратные матрицы поворота вокруг оси O_1X_1 , O_1Y_1 , O_1Z_1 соответственно.

Введем обозначение для матрицы направляющих косинусов:

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{11}^{(i)} & r_{12}^{(i)} & r_{13}^{(i)} \\ r_{21}^{(i)} & r_{22}^{(i)} & r_{23}^{(i)} \\ r_{31}^{(i)} & r_{32}^{(i)} & r_{33}^{(i)} \end{pmatrix}.$$

Тогда, вектор $\vec{a}$ в земной системе координат равен $\vec{a}^{(0)} = (r_{12}^{(2)} \quad r_{22}^{(2)} \quad r_{32}^{(2)})^T$, а обратную матрицу $R_1^{-1} = R_{1,\theta}^{-1} R_{1,\gamma}^{-1} R_{1,\psi}^{-1}$ можно определить через элементы матрицы R_1 как:

$$R_1^{-1} = \begin{pmatrix} r_{11}^{(1)} & -r_{12}^{(1)} & -r_{13}^{(1)} \\ 2 \cos \theta_1 \sin \psi + r_{21}^{(1)} & 2 \cos \theta_1 \cos \psi - r_{22}^{(1)} & -r_{23}^{(1)} \\ 2 \sin \theta_1 \sin \psi - r_{31}^{(1)} & 2 \sin \theta_1 \cos \psi + r_{32}^{(1)} & r_{33}^{(1)} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Тогда, искомый вектор $\vec{a}'$ в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ равен:

$$\vec{a}' = \begin{pmatrix} r_{11}^{(1)} r_{12}^{(2)} - r_{12}^{(1)} r_{22}^{(2)} - r_{13}^{(1)} r_{32}^{(2)} \\ r_{12}^{(2)} (2 \cos \theta_1 \sin \psi + r_{21}^{(1)}) + r_{22}^{(2)} (2 \cos \theta_1 \cos \psi - r_{22}^{(1)}) - r_{32}^{(2)} r_{23}^{(1)} \\ r_{12}^{(2)} (2 \sin \theta_1 \sin \psi - r_{31}^{(1)}) + r_{22}^{(2)} (2 \sin \theta_1 \cos \psi + r_{32}^{(1)}) + r_{32}^{(2)} r_{33}^{(1)} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1), определим искомый угол φ :

$$\varphi = \text{atan2} \left(\frac{r_{12}^{(2)} (2 \sin \theta_1 \sin \psi - r_{31}^{(1)}) + r_{22}^{(2)} (2 \sin \theta_1 \cos \psi + r_{32}^{(1)}) + r_{32}^{(2)} r_{33}^{(1)}}{r_{11}^{(1)} r_{12}^{(2)} - r_{12}^{(1)} r_{22}^{(2)} - r_{13}^{(1)} r_{32}^{(2)}} \right). \quad (5)$$

Из последнего выражения видно, что для повышения быстродействия и уменьшения погрешности при вычислении тригонометрических функций построение алгоритма определения углов θ, γ, ψ желательно проводить с применением метода направляющих косинусов.

2. Метод направляющих косинусов

Задача определения углов θ, γ, ψ является одной из задач инерциальной навигации и заключается в их вычислении относительно двух опорных и постоянных в пространстве векторов, не обязательно перпендикулярных [4]. В качестве таких векторов (земная система координат) выступают вектор ускорения свободного падения, который используется для определения углов тангажа и крена, и магнитный азимут – для угла ψ . Отклонения от этих векторов определяются акселерометрами, магнитометрами и датчиками угловых скоростей. Измеренные значения используются в методе направляющих косинусов, подробно описанном в работе [4]. Суть этого метода заключается в следующей итерационной процедуре.

1. Из показаний, измеренных 3-х степенным датчиком угловой скорости, вычитаются смещения «нуля» и текущие уходы по каждой из осей чувствительности датчика,

рассчитываемых по значениям матрицы направляющих косинусов, полученных на предыдущем шаге расчета, и показаниям 3-х степенного акселерометра и магнитометра на текущем шаге расчета.

2. Скорректированные показания датчика угловой скорости интегрируются и по ним пересчитывается матрица направляющих косинусов.
3. После этого матрица проверяется на условие ортогональности. Ошибки, полученные из-за не ортогональности осей, используются на следующем шаге расчета при оценке ухода датчика угловой скорости. После чего цикл вычислений повторяется.

Поскольку акселерометр измеряет так называемое «кажущееся ускорение», то есть разницу между истинным и гравитационным ускорением, для определения последнего нами метод направляющих косинусов был дополнен упрощенным фильтром Калмана [5]. В этом случае структурная схема описываемого метода принимает вид, приведенный на рис. 4. В векторной форме фильтр описывается уравнением:

$$\frac{\Delta t}{K} \frac{d\vec{g}}{dt} + \vec{g} = \frac{(1-K)\Delta t}{K} (\vec{g} \times \vec{\omega}) + \vec{a},$$

где $\vec{g}$ – вектор гравитационного ускорения, $\vec{a}$ – вектор «кажущегося» ускорения, $\vec{\omega}$ – вектор показаний трехстепенного датчика угловой скорости, K – коэффициент Калмана, Δt – шаг интегрирования.

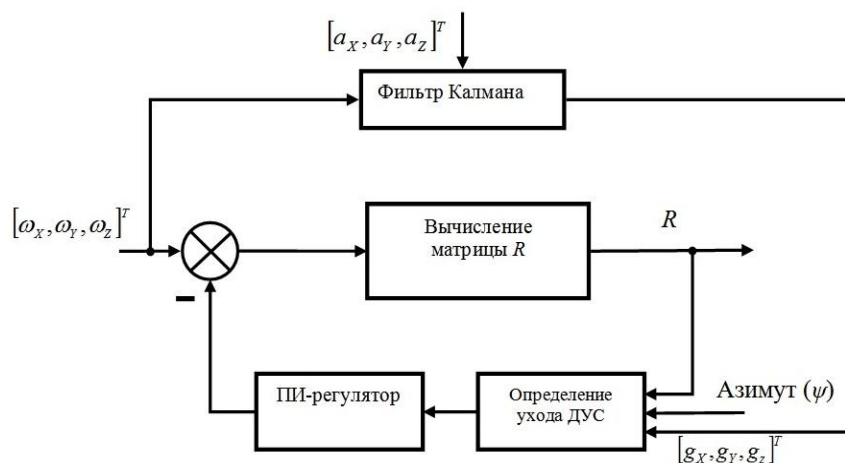


Рис.4. Модифицированная схема расчета матрицы направляющих косинусов

Предложенный модифицированный метод был программно реализован на базе отладочной платы STM32F3Discovery, на которой установлены трехстепенные MEMS-датчик угловой скорости, MEMS-акселерометр и магнитометр. Аппаратная реализация измерительной системы предопределило также характер проводимого моделирования по управлению поворотом ПН – полунатурное.

3. Полунатурное моделирование процесса поворота полезной нагрузки

Для верификации полученного решения применялась полунатурная модель, включающая в себя имитатор «головной» части СПО, выполненный на базе отладочной платы

STM32F3Discovery, модель системы управления поворотом и 3D модель нагрузки для визуализации процесса управления.

Структурная схема модели (рис.5) включает в себя блок расчета углов ориентации и угла поворота φ , блок визуализации поворота (Simulink3D) и блоки, моделирующие систему стабилизации угла поворота. При моделировании полагалось, что поворот ПН массой 1 кг осуществляется двигателем постоянного тока MAXON RE10 с редуктором, имеющим коэффициент передачи 128:1. Настройки двухконтурной системы стабилизации поворота были получены по методу обратных задач динамики для желаемого апериодического переходного процесса.

Для упрощения визуального восприятия результатов моделирования в эксперименте предполагалось, что система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ совмещена с $OXYZ$. В этом случае не трудно убедиться, что матрица R_1 – единичная, а выражение (5) для угла φ упрощается и определяется углами ориентации, измеряемыми STM32F3Discovery:

$$\varphi = \text{atan2}\left(\frac{r_{32}^{(2)}}{r_{12}^{(2)}}\right) = \text{atan2}\left(\frac{\sin \theta_2 \cos \psi_2 - \cos \theta_2 \sin \gamma_2 \sin \psi_2}{\cos \gamma_2 \sin \psi_2}\right).$$

При вращении платы STM32F3Discovery в пространстве в окне визуализации происходит аналогичный поворот головной части СПО и, соответственно, поворот ПН, которая для наглядности представлена прямоугольным параллелепипедом с разноцветными гранями, при этом индикатором поворота является грань красного цвета (определяющая степень свободы), совпадающего с цветом визуализированного орта $\bar{a}$ (рис. 5).

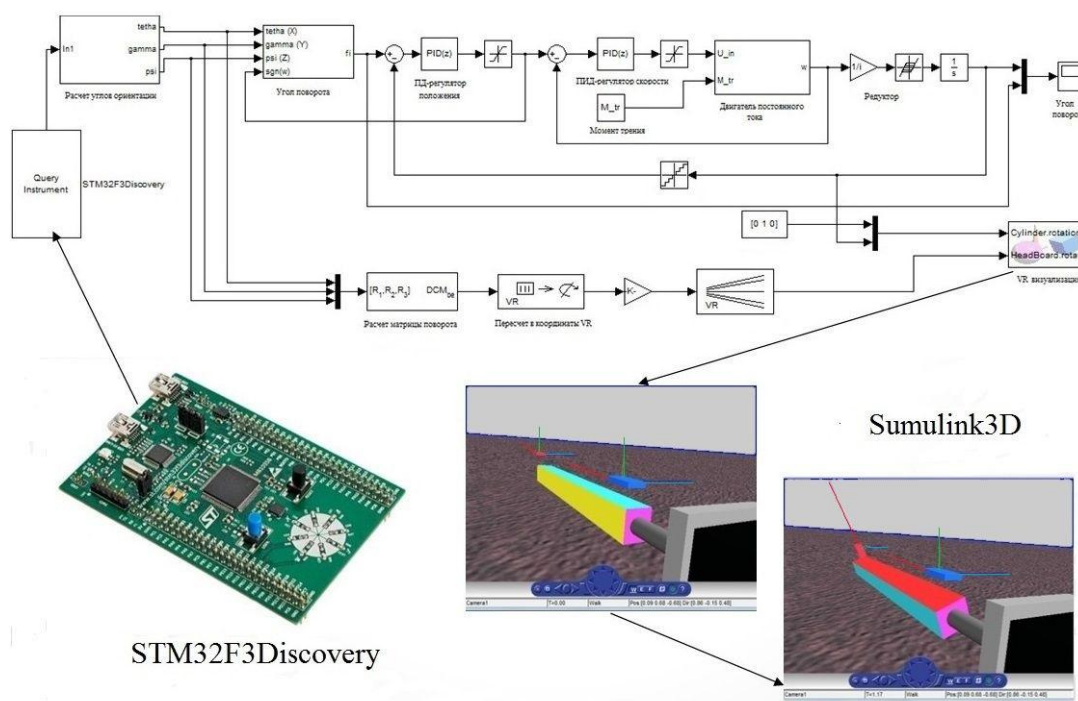


Рис.5. Структурная схема модели процесса транспортировки оборудования

На рис. 6 приведены результаты моделирования следящей системы при повороте ПН в одном из экспериментов.

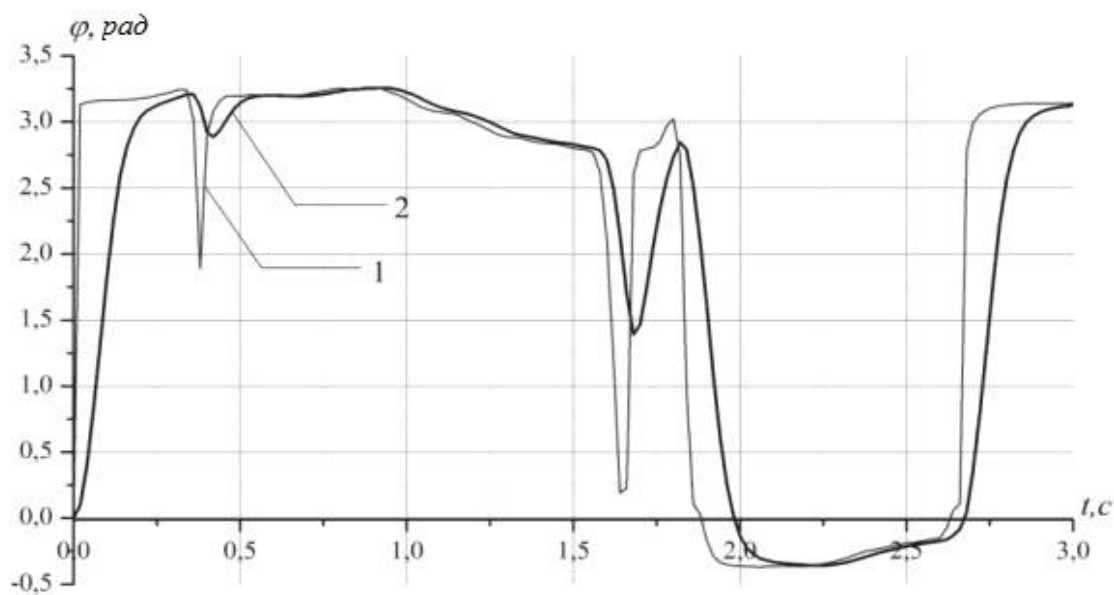


Рис.6. Результаты моделирования угла поворота нагрузки (1 – заданный угол поворота, рассчитанный по формуле (2), 2 – угол поворота нагрузки)

Результаты моделирования подтвердили правильность полученного решения (5) и позволили установить, что показатели качества разработанной следящей системы не превышают следующих значений: время переходного процесса – 0,6 секунд, динамическая ошибка позиционирования 3° , статическая ошибка отсутствует.

По результатам исследования разработана структура программно-аппаратной реализации системы управления (рис. 7), обеспечивающей необходимую ориентацию ПН в трубопроводах малого диаметра и включающей электромеханическую часть, систему пространственной ориентации и систему управления поворотом нагрузки.

Электромеханическая часть системы состоит из мотор-редуктора MAXON RE10/GP10 (128:1), цилиндрической передачи, выходного вала, к которому крепится ПН, и абсолютного энкодера, определяющего угол поворота выходного вала. Система пространственной ориентации включает в себя две платы модулей инерциальной навигации – головную и хвостовую. По показаниям акселерометров, датчиков угловых скоростей и магнитометров с использованием метода направляющих косинусов рассчитываются углы наклона и поворота плат. Для обработки данных используется 32-х разрядный микроконтроллер, поддерживающий математические операции с плавающей запятой. По измеренным значениям углов в соответствии с формулой (5) определяется угол поворота ПН и осуществляется его низкочастотная фильтрация. Значения углов ориентации передаются на верхний уровень управления и диагностики по шине CAN, а заданный угол поворота ПН – в систему управления поворотом: двухконтурную систему стабилизации по скоро-

сти и углу поворота. Выбор такой системы определяется целесообразностью повышения помехоустойчивости следящей системы по положению.

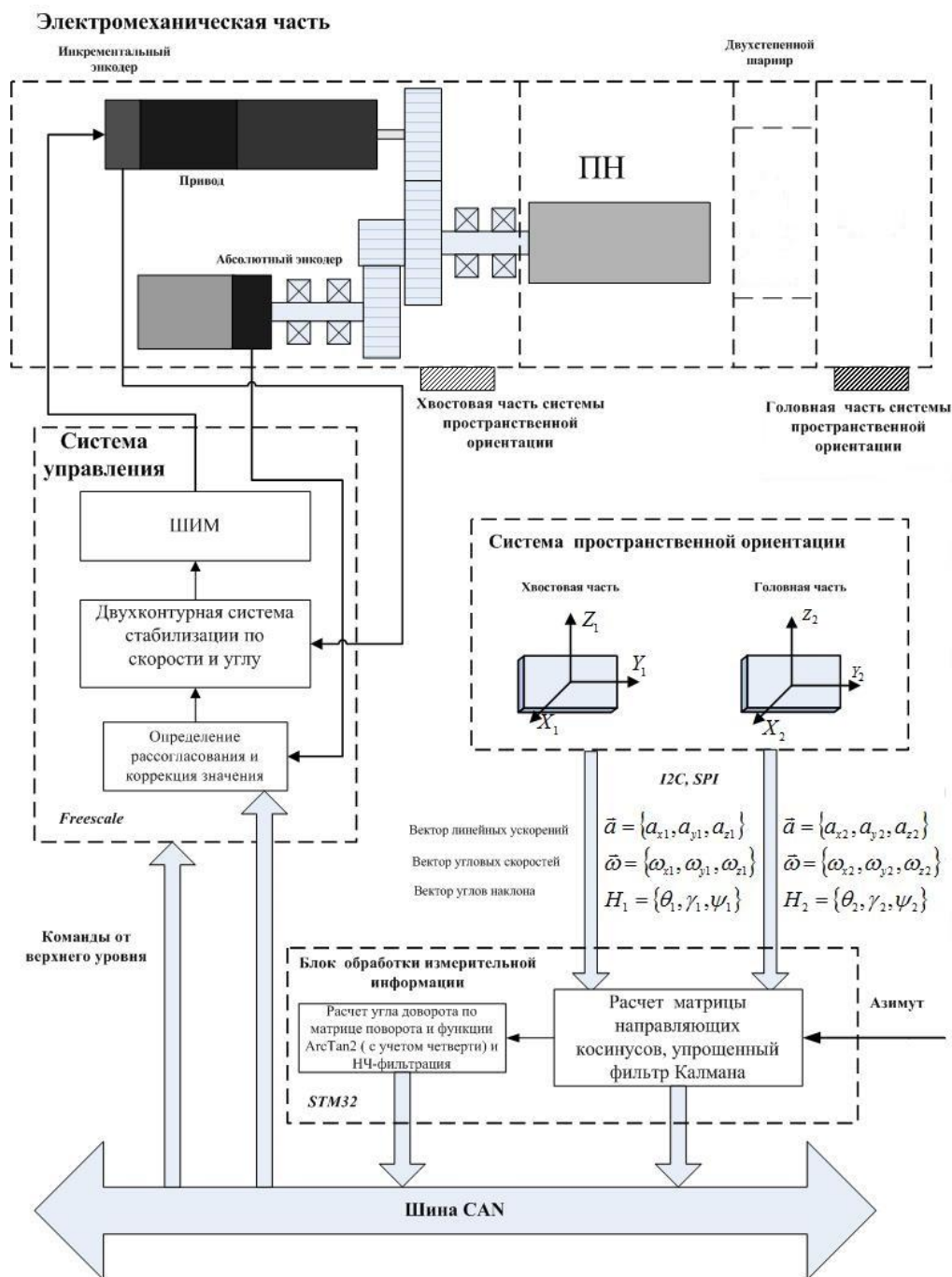


Рис.7. Функциональная схема системы управления поворотом полезной нагрузки

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрена задача управления поворотом технологического оборудования с одной степени свободы в ограниченном пространстве трубопровода малого диаметра. Основу решения задачи составляет применение матриц направляющих

косинусов. Показано, что угол поворота ПН можно выразить практически только через элементы матриц направляющих косинусов «головной» и «хвостовой» частей. Проведенное моделирование показало, что показатели качества системы управления не превышают следующих значений: время переходного процесса – 0,6 секунд, динамическая ошибка позиционирования 3° , статическая ошибка отсутствует.

Объем статьи не позволяет осветить все вопросы, касающиеся метода направляющих косинусов и его программной реализации, а также программно-аппаратной реализации системы пространственной ориентации, поэтому они будут раскрыты в последующих работах.

Список литературы

1. Князьков М.М., Семенов Е.А., Рачков М.Ю. Многозвенный робот для движения внутри труб малых диаметров // Машиностроение и инженерное образование, № 1, 2009, С. 31– 36.
2. Градецкий В.Г. Методы движения миниатюрных управляемых роботов // В.Г. Градецкий и др. // Нано- и микросистемная техника, №9, 2005, С. 37 – 42.
3. Jinwei Qiao, Jianzhong Shang, A. Goldenberg, Development of inchworm in-pipe robot based on self-locking mechanism // IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 18, No. 2 , 2013, pp. 799 – 805.
4. W. Premerlani, P. Bizard Direction cosine matrix IMU: Theory [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://robot-chopper.googlecode.com/svn/trunk/Research/DCMDraft2.pdf>.
5. Распопов В.Я., Метод коррекции бесплатформенной системы ориентации малоразмерного беспилотного летательного аппарата / В.Я. Распопов, М.Н. Машнин, А.В. Ладонкин, А.П. Шведов // Мехатроника, автоматизация и управление, № 9, 2012, С. 10 – 14.