INERTIAL NAVIGATION

Yu. G. MARTYNENKO

The history of development and state-of-art of the theory of autonomous and corrected inertial navigation system are reviewed. Applications of navigational system in different areas of engineering and tendencies of its development are discussed.

Приводится обзор истории развития и современного состояния теории автономных и корректируемых инерциальных навигационных систем (ИНС). Обсуждается применение навигационных систем в различных областях техники и анализируются тенденции их развития.

ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ

Ю. Г. МАРТЫНЕНКО

Московский энергетический институт (технический университет)

Когда человек не знает, к какой пристани он держит путь, для него ни один ветер не будет попутным.

Сенека

ВВЕДЕНИЕ

Термин “навигация” (от лат. navigo – плыву на корабле) может быть переведен как искусство кораблевождения. Навигационные приборы, то есть устройства, которые используются для решения навигационной задачи – определения местоположения и направления движения, создавались и совершенствовались вместе с развитием нашей цивилизации.

Природа в процессе эволюции не выработала механизма, позволяющего человеку без визуального контакта с известными ориентирами определять свое местоположение, поэтому всякому приходилось в своей жизни неоднократно решать старые, как мир, вопросы: “Где я нахожусь?” и “Куда я направляюсь?” Наверное, любому жителю Земли знакомо неприятное чувство страха и неуверенности, когда он, очутившись в неизвестном месте, вдруг начинает понимать, что сбился с пути, заблудился и не знает, в какую сторону ему нужно двигаться.

Самыми ранними навигационными средствами, если судить по египетским картам золотых рудников, относящимся ко времени трехтысячелетней давности, служили земные ориентиры. Когда такие средства становились недоступными, человек днем ориентировался по Солнцу, а ночью использовал звезды, и в первую очередь звезду альфа Малой Медведицы – Полярную. Уже древние мореходы – греки, финикийцы – умели “разговаривать со звездами” и для грубого определения местоположения и оценки широты определяли угол между направлением на Полярную и плоскостью местного горизонта. Увы, в жизни не всегда, как в песне, “мне звезда в тумане светит”.

Люди давно осознали значение навигационных средств и не случайно искусственный навигационный ориентир – Александрийский маяк считался одним из семи чудес света.

В Неаполе стоит памятник Флавио Джойе, который, по мнению итальянцев, в 1302 году изобрел магнитный компас. Однако еще задолго до Джойи существовали многочисленные легенды о морских капитанах, обладавших волшебными продолговатыми металлическими предметами, которые, будучи подвешенными на нити, могли “видеть” за тучами и даже за толстыми стенами Полярную звезду и сами поворачивались одним из своих концов в ее направлении.

Из-за многочисленных аномалий магнитного поля Земли и магнитных бурь магнитный компас является весьма капризным устройством, а звезды и Солнце в любой момент могут спрятаться в густом тумане или за черными тучами штормового неба.

Долгое время отсутствие точной информации о местоположении было серьезным препятствием на пути развития авиации. Многие поколения моряков и летчиков мечтали о навигационной системе, которая бы не зависела от видимости звезд и земных ориентиров, от капризов погоды и искусства штурмана и действительно могла быть путеводной звездой, “светящей в тумане”.

Становилось все более очевидным, что решение навигационных задач не менее важно для современных подвижных объектов, чем вопросы создания новых конструкций, двигателей и т.п. Поэтому развитие техники настоятельно требовало создания надежных навигационных приборов, способных работать не только на поверхности Земли, но и в дальнем космосе и морской пучине. Так появились новые сочетания “воздушная навигация”, “наземная навигация”, “космическая навигация”, “инерциальная навигация”. Создание автономной навигационной аппаратуры стало одним из важнейших направлений в развитии авиационной техники, космической техники, при создании атомного подводного флота.

Первым применением инерциальных методов в навигации можно считать появление корабельных гирокомпасов в начале этого века. Одновременно с работой над компасами возникла идея создания систем инерциальной навигации, в которых текущее местоположение движущегося объекта определяется интегрированием измеряемых на борту ускорений. Замечательное свойство – полная автономность систем инерциальной навигации – аналогично свойству часов измерять время вне зависимости от контактов с внешним миром.

История рождения и становления инерциальной навигации наглядно демонстрирует ту важную роль, какую играет теоретическая механика и математика при решении практических задач [1, 2].

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ПЕРВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Для пояснения идеи инерциальной навигации рассмотрим задачу о движении материальной точки в неинерциальной системе координат. В классической механике с большой степенью точности инерциальной системой координат можно считать прямоугольную декартову систему координат с началом в центре масс Солнечной системы и осями, направленными на неподвижные звезды. Всякая другая система координат, которая движется относительно инерциальной равномерно и прямолинейно, тоже является инерциальной.

Пусть $Ox^*y^*z^*$ – инерциальная система координат, $Oxyz$ – подвижная система координат, жестко связанная с некоторым подвижным твердым телом (рис. 1). Ускорение материальной точки M относительно системы $Ox^*y^*z^*$ называется абсолютным ускорением и обозначается $\mathbf{w}^a$.

В инерциальной системе координат для любой материальной точки, обладающей массой m, справедлив второй закон Ньютона

$$m\mathbf{w}^a = \mathbf{F}. \qquad (1)$$

Здесь $\mathbf{F}$ – равнодействующая приложенных к рассматриваемой точке сил.

Согласно знаменитой теореме кинематики, носящей имя французского ученого Г. Кориолиса, вектор абсолютного ускорения точки равен геометрической сумме трех ускорений:

$$\mathbf{w}^a = \mathbf{w}^r + \mathbf{w}^e + \mathbf{w}^c, \qquad (2)$$

где $\mathbf{w}^r$ – относительное, $\mathbf{w}^e$ – переносное, $\mathbf{w}^c$ – кориолисово ускорения точки.

Относительным ускорением $\mathbf{w}^r$ называется ускорение точки относительно подвижной системы координат. Переносным ускорением $\mathbf{w}^e$ относительно неподвижной системы координат называется ускорение той точки подвижной системы координат, с которой в данный момент совпадает рассматриваемая точка. Кориолисово ускорение $\mathbf{w}^e$ определяется как удвоенное векторное произведение угловой скорости подвижной системы $\mathbf{\Omega}$ на вектор относительной скорости точки $\mathbf{v}^r$:

$$\mathbf{w}^c = 2[\mathbf{\Omega}, \mathbf{v}^r]. \qquad (3)$$

Направление вектора кориолисова ускорения определяется правилом Н.Е. Жуковского: надо вектор относительной скорости точки повернуть в плоскости, перпендикулярной вектору угловой скорости $\mathbf{\Omega}$, на 90° по направлению вращения подвижной системы координат.

Если подставить выражение для абсолютного ускорения (2) в закон Ньютона (1), а затем перенести

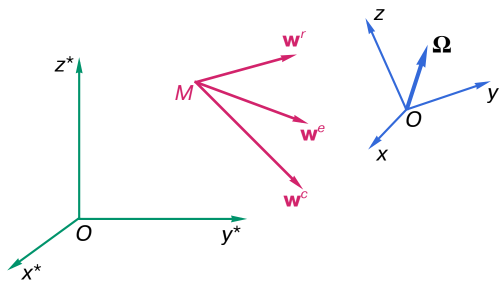


Рис. 1

слагаемые с переносным и кориолисовым ускорениями в правую часть, то получится дифференциальное уравнение движения точки в неинерциальной системе координат

$$m\mathbf{w}^r = \mathbf{F} + \mathbf{\Phi}^e + \mathbf{\Phi}^c. \qquad (4)$$

В этом уравнении векторы

$$\mathbf{\Phi}^e = -m\mathbf{w}^e, \qquad \mathbf{\Phi}^c = -m\mathbf{w}^c \qquad (5)$$

называются соответственно переносной и кориолисовой силами инерции.

Таким образом, основной результат динамики относительного движения материальной точки можно сформулировать следующим образом.

Уравнения движения материальной точки в неинерциальной системе координат можно записать в форме второго закона Ньютона, если к действующим на точку ньютоновым силам добавить переносную и кориолисовы силы инерции (5).

В случае, когда материальная точка находится в равновесии в подвижной системе координат, ее координаты будут постоянны, относительная скорость $\mathbf{v}^r$, относительное ускорение $\mathbf{w}^r$ и кориолисово ускорение $\mathbf{w}^c$ обращаются в нуль.

Следовательно, из уравнения (4) получается следующее векторное уравнение равновесия материальной точки в неинерциальной системе координат:

$$0 = \mathbf{F} + \mathbf{\Phi}^e. \qquad (6)$$

Уравнение (6) эквивалентно трем скалярным уравнениям:

$$0 = F_x + \Phi_x^e,$$
$$0 = F_y + \Phi_y^e, \qquad (7)$$
$$0 = F_z + \Phi_z^e.$$

Используем уравнения (7) для определения условий равновесия материальной точки, подвешенной на невесомой пружине в поступательно движущемся лифте вдоль оси z^* (рис. 2).

Предположим, что ось z^* инерциальной системы координат направлена вверх по вертикали места, и введем подвижную систему координат xyz, жестко связанную с лифтом. Ось z подвижной системы координат параллельна оси z^*. Согласно уравнению (6), к действующим на точку силам тяготения $m\mathbf{g}$ и упругости $\mathbf{F}^{el}$ добавим переносную силу инерции и запишем последнее уравнение (7) в виде

$$0 = -mg + F_z^{el} + \Phi_z^e. \qquad (8)$$

Здесь $-mg$, F_z^{el} – проекции силы тяготения и силы упругости. Для простоты предположим, что сила упругости $\mathbf{F}^{el}$ удовлетворяет закону Гука, согласно которому величина силы пропорциональна деформации пружины z, отсчитываемой от недеформированного положения

$$F_z^{el} = -Kz.$$

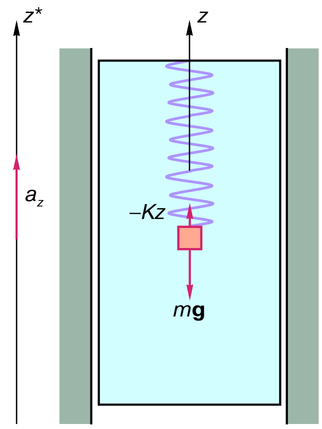


Рис. 2

Здесь K – жесткость пружины, которая предполагается постоянной (на рис. 2 изображен случай, когда деформация пружины z отрицательна и проекция на ось z силы упругости $F_z = -Kz$ положительна).

Обозначим через a_z проекцию вектора ускорения лифта на ось z (ускорение лифта является переносным ускорением для рассматриваемой материальной точки). Тогда, согласно (5), $\Phi_z^e = -ma_z$ и уравнение (8) примет вид

$$0 = -mg - Kz - ma_z. \qquad (9)$$

Из уравнения (9) определяем деформацию пружины

$$z = -\frac{m(g + a_z)}{K}. \qquad (10)$$

Уравнение (10) позволяет рассмотреть следующие частные случаи:

1) $a_z = 0$, лифт покоится, и деформация z оказывается пропорциональной силе тяготения. Так устроен обычный механический пружинный динамометр, в котором измерение веса тела сводится к измерению деформации пружины;

2) $a_z > 0$, лифт движется с ускорением вверх, абсолютная величина деформации пружины увеличивается, и наблюдатель, находящийся в лифте и не имеющий контактов с окружающим лифт пространством, фиксирует возрастание деформации пружины, которая им воспринимается как увеличение силы тяготения. Субъективные ощущения человека, находящегося в лифте (или ракете), называются перегрузкой;

3) $a_z < 0$, лифт движется с ускорением вниз, деформация пружины уменьшается, и наблюдатель фиксирует уменьшение силы тяготения;

4) $a_z = -g$, лифт движется вниз с ускорением, равным ускорению свободного падения, деформация пружины обращается в нуль ($z = 0$), и наблюдатель фиксирует исчезновение силы тяготения в

лифте. Возникающее состояние называется невесомостью.

Формула (10) открывает принципиальную возможность без привлечения внешней информации по деформациям пружины судить об ускорении лифта, которое, вообще говоря, является функцией времени $a_z = a_z(t)$. При изменении ускорения лифта положение равновесия (10) точки изменяется и возникает некоторый переходный процесс, после которого точка оказывается в новом положении равновесия. Время переходного процесса зависит от жесткости пружины и сил демпфирования, которые можно создать специальными демпферами, обеспечивающими затухание колебаний точки относительно положения равновесия. Будем считать, что время переходного процесса (время затухания колебаний) оказывается столь малым, что в каждый момент времени справедливо уравнение относительного равновесия точки (10), в котором $a_z = a_z(t)$.

Если обозначить через Z абсолютную координату лифта в инерциальной системе координат $Ox^*y^*z^*$, V_z – проекцию абсолютной скорости лифта на ось z, то

$$a_z(t) = \frac{dV_z}{dt}, \qquad V_z(t) = \frac{dZ}{dt}, \qquad a_z(t) = \frac{d^2Z}{dt^2}. \qquad (11)$$

Согласно (9) и (11), имеем

$$\frac{dV_z}{dt} = -\frac{mg + Kz(t)}{m}. \qquad (12)$$

Умножая уравнение (12) на дифференциал времени dt и интегрируя на некотором временном интервале $[0, t]$, получаем

$$V_z - V_z^0 = -\int_0^t \left[g + \frac{K}{m}z(\tau)\right]d\tau. \qquad (13)$$

Здесь V_z^0 – значение скорости лифта в начальный момент времени.

Учитывая (11) и еще раз выполняя интегрирование по времени уравнения (13), находим абсолютную координату лифта

$$Z(t) - Z^0 = tV_z^0 - \int_0^t\int_0^\xi \left[g + \frac{K}{m}z(\tau)\right]d\tau d\xi. \qquad (14)$$

Здесь Z^0 – начальные значения координаты лифта в инерциальной системе координат.

Формула (14) объясняет принцип работы систем инерциальной навигации, которые при известном ускорении силы тяготения g и известных начальных условиях позволяют с помощью двукратного интегрирования функции $z = z(t)$, представляющей собой деформацию пружины, автономно, без привлечения дополнительной информации, определять координаты поступательно движущегося объекта – лифта.

В рассмотренном выше примере о равновесии материальной точки в лифте была фактически описана конструкция простейшего однокомпонентного акселерометра[1] – прибора, предназначенного для измерения проекции ускорения объекта на ось z, которая называется осью чувствительности акселерометра.

Эта конструкция акселерометра, в которой используется механическая пружина, оказывается не очень удобной для практического применения. Часто акселерометр представляет собой плоский маятник, который имеет ось вращения, перпендикулярную оси чувствительности. Колебания этого маятника управляются электромагнитной пружиной, в которой используется идея обратной связи, когда при отклонениях маятника от невозмущенного положения с помощью специальных электромагнитов создаются силы, удерживающие маятник в положении относительного равновесия. Измерение тока в обмотке электромагнита позволяет получить информацию о силах, приложенных к чувствительной массе акселерометра. Таким образом, современный акселерометр представляет собой достаточно сложную электромеханическую систему.

Точность работы инерциальной системы во многом определяется точностью измерения ускорения. Источники погрешностей акселерометра связаны с неточностями измерения перемещения чувствительной массы, неточным знанием жесткости пружины K, наличием сил сухого и вязкого трения и т.д.

Иногда для разгрузки подшипников подвеса маятника акселерометра чувствительная масса помещается в жидкости с большим удельным весом так, чтобы ее вес уравновешивался гидростатическими силами. Благодаря этому на много порядков снижается сухое трение в осях подвеса и увеличивается ударная и вибрационная стойкость прибора. Известны конструкции акселерометров, в которых чувствительная масса подвешивается в вакууме в электрическом или магнитном поле неконтактного подвеса. Современные акселерометры позволяют с высокой точностью (до $10^{-7}g$) измерять ускорение подвижных объектов.

Для того чтобы выходной сигнал акселерометра (10) не зависел от гравитационных сил, ось чувствительности акселерометра должна лежать в горизонтальной плоскости – плоскости, ортогональной местной вертикали. Горизонтальная площадка на борту подвижного объекта может быть практически реализована с помощью гиростабилизированной платформы [3].

[1] Правильнее было бы использовать для названия этого прибора термин "ньютонометр", так как на самом деле с помощью акселерометра производится измерение силы, пропорциональной деформации пружины. Однако в силу традиции в большинстве научной и технической литературы используется термин "акселерометр" (от лат. accelero – ускоряю) – прибор для измерения ускорений (перегрузок).

Принцип силовой гироскопической стабилизации [3] был предложен С.А. Ноздровским в 1924 году.

Идею определения местоположения объекта с помощью двукратного интегрирования (14) по времени проекций вектора ускорения, измеряемого на борту, запатентовал Рейнгард Вуссов в 1905 году. Для этого он предложил поместить на объекте акселерометр, ось чувствительности которого стабилизировалась с помощью свободного гироскопа. Указанная заявка в своей основе содержала идею метода навигации, в дальнейшем названного инерциальным. Суть этого метода состоит в определении координат объекта посредством расположенных на нем гироскопов, маятников (акселерометров) и часов без использования во время движения сторонней информации.

Кроме того, практически одновременно с Вуссовым была запатентована идея американского и русского изобретателей М. Керри (1903) и В.В. Алексеева (1911) инерциальных систем геометрического типа, которые должны обеспечивать определение координат объекта, движущегося по поверхности вращающегося земного шара. Для объяснения принципа работы инерциальных систем геометрического типа рассмотрим подвижный объект, на борту которого имеется идеальный свободный гироскоп [4]. Этот гироскоп может абсолютно точно "запомнить" направление местной вертикали в момент начала движения объекта. Для простоты рассмотрим случай, когда объект движется по меридиану земного шара на север (рис. 3).

Пусть кроме свободного гироскопа на борту объекта находится маятник, абсолютно точно указывающий направление местной вертикали. (Практически такой маятник может быть создан тоже с помощью гироскопа со смещенным центром масс. Этот прибор называется гировертикалью.) Измеряя угол $\Delta\alpha$ между осями вращения свободного гироскопа и маятника и умножая этот угол на радиус Земли R можно получить путь, пройденный объектом: $s = R\Delta\alpha$. Эта формула позволяет сразу оценить требования к точности гироскопов, используемых в системах инерциальной навигации: ошибка в одну угловую минуту приводит к ошибке в одну морскую милю (1852 м = 1′ дуги меридиана) на поверхности Земли. Не намного сложнее устроен алгоритм определения пути при движении объекта по параллели. На борт объекта нужно взять хронометр, который достаточно точно измеряет время t движения объекта. Из угла $\Delta\alpha$ надо вычесть (добавить) угол поворота местной вертикали, вызванный вращением Земли и равный Ut, где $U = 15°$/ч – угловая скорость вращения Земли. Путь, пройденный объектом, $s = R(\Delta\alpha \pm Ut)\cos\varphi$, φ – широта параллели, по которой движется объект. Алгоритм определения пути при произвольном движении объекта получается соответствующим разложением каждого малого участка пути объекта на северную и восточную составляющие.

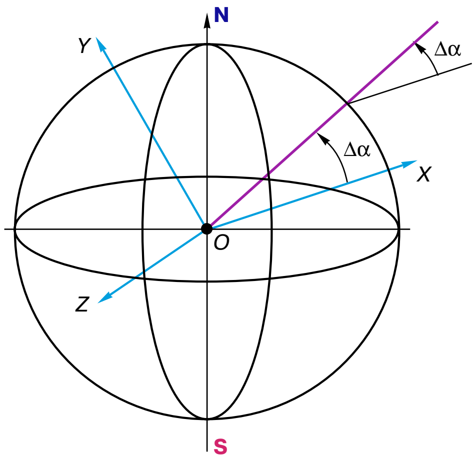


Рис. 3

На первый взгляд может показаться, что метод Вуссова и геометрический метод построения систем инерциальной навигации не имеют ничего общего. Однако на самом деле, с одной стороны, в методе Вуссова геометрические операции заменяются вычислительными (14), а с другой – свободный гироскоп можно рассматривать как интегратор угловой скорости системы координат XYZ (рис. 3), имеющей начало в центре Земли и одну из осей, проходящих через центр масс объекта. Заметим, что примером интегратора служит, например, обычный электрический счетчик, показания которого пропорциональны интегралу электрического тока по времени. Инерциальные навигационные системы, в которых определение координат осуществляется с помощью вычислительной процедуры (14), называются аналитическими или полуаналитическими.

Компьютер, входящий в состав инерциальной системы, интегрирует по времени выходные сигналы акселерометров и, учитывая показания гироскопов, выдает навигационную информацию. Если инерциальная навигационная система использует только сигналы от своих гироскопов и акселерометров, то она называется автономной. В случае, когда инерциальная навигационная система использует стороннюю навигационную информацию (показания радиовысотомеров, лагов, астросистем и т.п.), она называется корректируемой.

В 1932 году инженеры Л.М. Кофман и Е.Б. Левенталь предложили новую схему инерциальной системы для навигации объектов, движущихся вблизи поверхности Земли. Дело в том, что, как видно из формулы (14), при определении координат движущегося объекта под знаком двойного интеграла находятся два слагаемых: ускорение g, вызванное проекций гравитационных сил на ось чувствительности акселерометра, и слагаемое, пропорциональное деформации пружины акселерометра. При этом любые неточности в задании g после двукратного интегрирования приведут к достаточно быстрому росту погрешности всей системы инерциальной навигации. Таким образом, желательно разделить в (14) силу гравитации и силу инерции. Это можно сделать повернув ось чувствительности акселерометра ортогонально силе гравитации, то есть расположив акселерометры на абсолютно горизонтальной площадке. Горизонтирование этой площадки можно осуществлять с помощью гироскопов и тех же акселерометров, подавая выходной сигнал с акселерометров на двигатели, которые поворачивают платформу в пространстве до тех пор, пока для неподвижного объекта выходной сигнал акселерометров не станет равным нулю. Оказалось, что если период свободных колебаний платформы, управляемой акселерометрами, выбрать равным

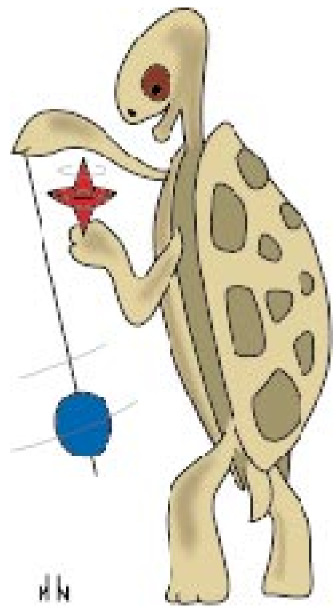
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \approx 84{,}4 \text{ мин} \tag{15}$$

(R – радиус Земли, g – ускорение свободного падения, T – период Шулера – период колебаний математического маятника, длина нити которого равна радиусу Земли), то платформа приобретает удивительное свойство невозмущаемости, когда ее угловое положение не зависит от ускорений объекта, на котором установлена платформа. Идея Кофмана и Левенталя как бы соединила в одном устройстве два упомянутых ранее метода навигации: метод, по которому с помощью гироскопа и маятника моделируется астрономическое определение места[1], и метод вычисления пройденного объектом пути двойным интегрированием показаний акселерометров.

Началом практической реализации идеи инерциальной навигации можно считать разработку системы управления немецкой баллистической ракетой ФАУ-2, а после второй мировой войны работы по созданию ИНС энергично проводились в СССР, США и некоторых странах Западной Европы. Прогресс в создании систем инерциальных систем был тесно связан с математическими работами в области небесной механики, так как дифференциальные уравнения пространственных систем инерциальной навигации совпадают с уравнениями движения небесных тел.

Решение задачи Коши уравнений движения небесных тел является неустойчивым по Ляпунову, поэтому создание работоспособных алгоритмов обработки информации в системах инерциальной навигации потребовало больших усилий от целых научных коллективов математиков и механиков [5].

Известны многочисленные и очень остроумные технические решения, предложенные при разработке систем инерциальной навигации. Так, были созданы Бесплатформенные Инерциальные Навигационные Системы (БИНС), в которых гиростабилизированная платформа моделируется виртуально внутри компьютера, а гироскопы и акселерометры устанавливаются непосредственно на борту движущегося объекта.



Весьма плодотворной оказалась идея использования в алгоритмах систем инерциальной навигации дополнительной информации, учитывающей неоднородность гравитационного поля Земля. Приборы, измеряющие градиенты гравитационного поля Земли, называются градиентометрами. Это направление называется навигацией по геофизическим полям.

В настоящее время большинство навигационных задач с очень высокой точностью (доли метра) решается с помощью систем спутниковой навигации GPS (Global Position System) и ГЛОНАСС.

Можно сказать, что классическая навигация завершила свое эволюционное развитие, обеспечив при этом главным образом узкоспециальные потребности военно-промышленного комплекса и получив сильного конкурента в виде спутниковых навигационных систем, подошла к рубежу, на котором она практически вынуждена сменить приоритеты своего развития [2].

В настоящее время можно указать следующих потенциальных потребителей и области применения микромеханических инерциальных датчиков и систем:

автомобилестроение (активная подвеска, автоматическое управление, навигация, системы безопасности, противоугонные системы);

авиация (навигация и ориентация малых, а также сверхмалых беспилотных летательных аппаратов);

[1] Рисунок И.В. Новожилова.

морской и речной флот (навигация и ориентация малых динамичных надводных и подводных аппаратов);

космос (системы навигации и ориентации для космонавта в открытом космосе, малые спутники, создание и управление больших космических конструкций);

нефте- и продуктопроводы;

робототехника (датчики и системы контроля кинематических параметров движения манипуляторов, управление мобильными роботами и специальными микророботами);

спорт (контроль параметров движения спортсмена, спортивные тренажеры);

медицина (контроль состояния пациента по измерению параметров его движения), реабилитационные тренажеры, активные протезы, система навигации и ориентации для слепых, управляемые медицинские зонды, включая операции на человеческом мозге;

системы виртуальной реальности (трехмерные компьютерные мыши, шлемы, перчатки с отображением силовых полей, игровые системы, профессиональные тренажеры);

бытовая техника (датчики и системы контроля бытовых приборов и их функциональные узлы, детские игрушки, бинокли).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория систем инерциальной навигации, идеи которой начали зарождаться еще в начале нашего века, в настоящее время является вполне завершенным разделом мехатроники. Однако последние достижения как в области теоретической механики, электроники, информатики, так и при создании новых типов микромеханических гироскопов позволяют ожидать появления новых подходов к решению рассмотренных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шестов С.А.* Гироскоп на земле, в небесах и на море. М.: Знание, 1989. 192 с.

2. *Пешехонов В.Г.* Ключевые задачи современной автономной навигации // Гироскопия и навигация. 1996. № 1(12). С. 48–55.

3. *Магнус К.* Гироскоп: Теория и применение. М.: Мир, 1974. 526 с.

4. *Мартыненко Ю.Г.* Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 11. С. 120–127.

5. *Климов Д.М.* Инерциальная навигация на море. М.: Наука, 118 с.

* * *

Юрий Григорьевич Мартыненко, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической механики Московского энергетического института, действительный член Международной академии наук высшей школы. Автор более 130 научных работ.