

## Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску

© Д.С. Чиркин, П.В. Рословец, Ф.В. Татаринов, Л.З. Новиков

Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» — НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова,  
Москва, 111024, Россия

*Представлены материалы экспериментальных исследований различных методов поворота вектора намагниченности ротора привода динамически настраиваемого гироскопа путем изменения параметров его системы питания, в частности, подачи импульсов напряжения различной шириной и амплитудой. Предложена методика определения действительной ориентации вектора намагниченности ротора привода с использованием индуцированного напряжения на дополнительной обмотке датчика момента гироскопа. Приведены экспериментальные данные по величине дрейфа гироскопа при различной ориентации вектора намагниченности ротора привода. Выявлена зависимость изменения постоянной составляющей дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску, определяемой ориентацией вектора намагниченности ротора привода. Предложена модель физической интерпретации исследуемой зависимости. Даны рекомендации по формированию параметров системы питания привода, обеспечивающих управление ориентацией вектора намагниченности и снижение указанного дрейфа.*

**Ключевые слова:** динамически настраиваемый гироскоп, дрейф, синхронный гистерезисный двигатель

**Введение.** С расширением спектра задач искусственных спутников Земли изменяются также требования к точности их положения, а следовательно, и к их навигационным системам. Например, высокие требования предъявляются к точности позиционирования космических аппаратов, на борту которых установлены оптические приборы (такие как телескопы и камеры высокого разрешения), а также космических аппаратов спутниковых систем навигации. Решающее значение для точности навигационных приборов спутников имеет точность их чувствительных элементов — гироскопов.

Несмотря на активное развитие в современной гироскопии таких отраслей, как оптоволоконные, лазерные и микромеханические гироскопы, до сих пор подавляющая часть систем навигации летательных и космических аппаратов использует в качестве чувствительных элементов классические механические гироскопы. Среди них одними из самых эффективных как по соотношению стоимость/точность, так и по массогабаритным характеристикам являются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ).

С момента создания ДНГ их конструкция претерпела множество изменений и улучшений, благодаря которым была достигнута предельно эффективная работа гироскопов. Вследствие этого актуаль-

ным становится вопрос минимизации погрешностей, не связанных с конструкцией, уже существующих ДНГ.

Систематические составляющие дрейфа ДНГ определяются различными факторами. Одним из наиболее прогнозируемых факторов с точки зрения их возможного влияния на нестабильность дрейфа гироскопа от запуска к запуску является ориентация на магнитно-гистерезисном роторе привода вектора его намагниченности.

В данной работе поставлена задача уменьшения дрейфа ДНГ от запуска к запуску путем уменьшения составляющей, связанной с положением вектора намагниченности ротора гиродвигателя. Для этих целей проведены экспериментальные исследования, подтверждающие наличие и повторяемость описанного явления и позволяющие провести количественную оценку его влияния на дрейф ДНГ, а также испытана методика минимизации данной погрешности на отдельно взятых ДНГ.

**Принцип работы ДНГ.** Динамически настраиваемый гироскоп — трехстепенный гироскоп с внутренним упругим кардановым подвесом. Специфической особенностью ДНГ является возможность точной и стабильной компенсации угловой жесткости упругих элементов подвеса инерционным моментом кольца при отклонении ротора относительно оси приводного вала. Точная компенсация обеспечивается при выполнении так называемого условия динамической настройки.

По сравнению с поплавковыми гироскопами ДНГ имеют преимущества в массогабаритных характеристиках и стоимости, поэтому в настоящее время ДНГ широко применяют в качестве чувствительных элементов гиростабилизированных платформ, бесплатформенных инерциальных систем, бесплатформенных инерциальных блоков, гиротакметров, систем бортовых курсовертикалей и гироинклинометров.

В соответствии с кинематической схемой (рис. 1) основным узлом ДНГ является маховик 11, который подвешен с помощью упругих элементов 4, 7, 8, 10, 13–15, 20, работающих на кручение, и промежуточных колец (рамок) 12 и 17, на валу 21, вращающемся от привода (ротор 1, статор 2). Скоростная опора 3 служит для кинематической связи вращающейся и неподвижной частей прибора. На корпусе ДНГ расположены два датчика угла (ДУ) 5, 19 и два датчика момента (ДМ) 9, 16, которые ориентированы по взаимно перпендикулярным осям, связанным с корпусом. Датчики угла фиксируют угловое отклонение плоскости вращения маховика относительно корпуса, а ДМ прикладывают к маховику гироскопа управляющие моменты в системе координат, связанной с корпусом. Указанные управляющие моменты формируются по сигналам соответствующих ДУ, усиленным в усилителях обратной связи 6, 18. Эта система обеспечивает работу прибора в режиме обратной связи типа «электрическая пружина» [1, 2].

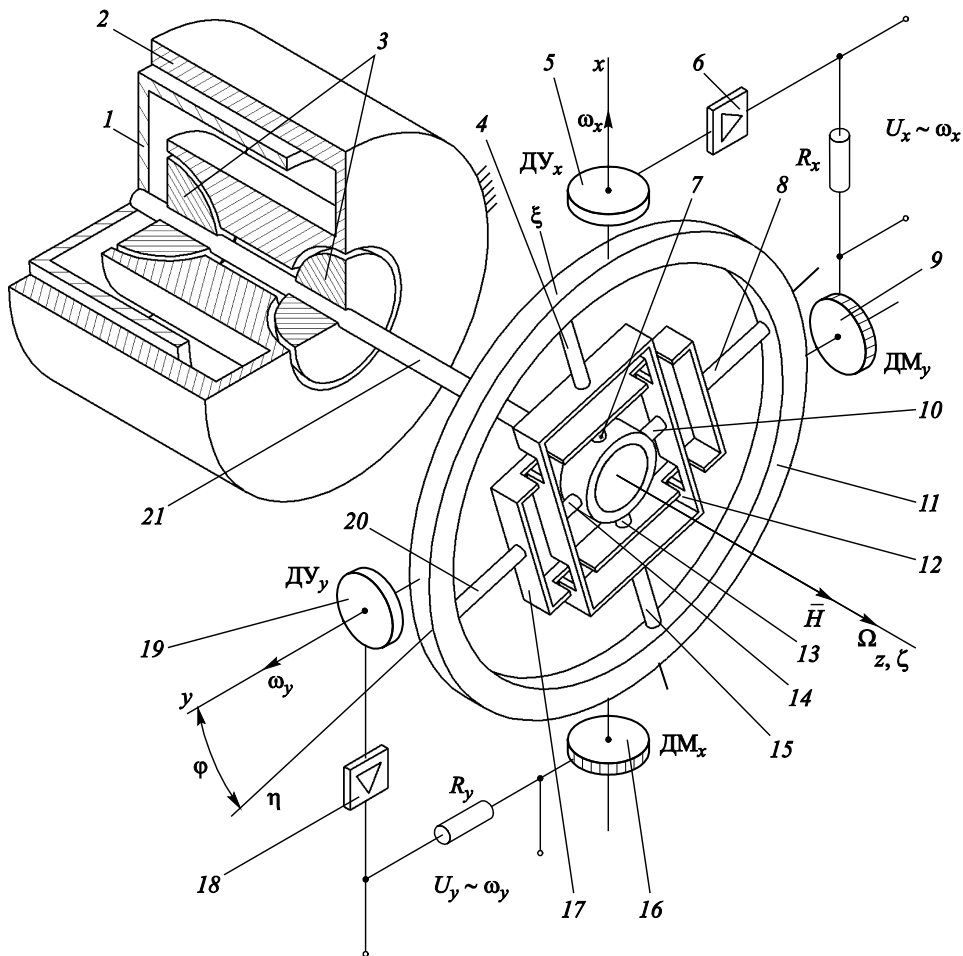


Рис. 1. Кинематическая схема ДНГ

Двухкольцевой подвес применен для снижения чувствительности прибора к возмущающим моментам и угловой вибрации корпуса на удвоенной частоте собственного вращения маховика.

Упругие подвесы обладают сравнительно малой угловой жесткостью, препятствующей повороту вокруг осей карданова подвеса, и имеют большую жесткость на изгиб в плоскости, перпендикулярной оси вращения вала.

Отклонение плоскости вращения маховика ДНГ от плоскости, перпендикулярной валу, вызывает появление пропорциональных этому угловому отклонению моментов, действующих со стороны кольца карданова подвеса на маховик: упругого момента и направленного противоположно ему антиупругого момента. Условие компенсации этих моментов и представляет собой условие динамической настройки. При такой настройке обеспечивается совпадение одной из собственных частот колебаний маховика относительно приводного вала с

частотой вращения вала. Резонансная реакция любой упругомассовой колебательной системы не зависит от жесткостных параметров и ограничена сверху демпфирующими факторами. Использование этого принципа позволило создать упругие вращающиеся подвесы, которые, обладая достаточной линейной жесткостью и прочностью, при определенной частоте собственного вращения приобретают свойства, близкие к свойствам безмоментного шарнира.

Как уже отмечалось, это можно истолковать как результат действия антиупругого динамического момента, пропорционального квадрату скорости вращения вала. При скорости, соответствующей условию динамической настройки, антиупругий динамический момент компенсирует упругий момент подвеса. В связи с этим ДНГ в таком резонансном режиме ведет себя при малых углах отклонения маховика как интегрирующий гироскоп, очень близкий к свободному.

Условие динамической настройки для двухкольцевого подвеса можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{2}(A+B-C)\Omega^2 - \frac{1}{2}(K_1 + K_2) = 0, \quad (1)$$

где  $A, B, C$  — моменты инерции одного из колец относительно осей  $\xi, \eta$  и  $\zeta$  соответственно;  $\Omega$  — номинальная угловая скорость вращения вала;  $K_1, K_2$  — угловая жесткость подвеса в целом по каждой из осей  $\xi, \eta$ , т. е. всех четырех упругих элементов, работающих по одной оси [3].

**Принцип работы идеального синхронного гистерезисного двигателя.** Как и в асинхронном двигателе, статор гистерезисного двигателя представляет собой пакет изолированных листов электротехнической стали. В пазах располагается трехфазная обмотка, которая при подключении к сети переменного тока создает вращающееся магнитное поле. Ротор представляет собой кольца из материала с широкой петлей гистерезиса (с большой остаточной намагниченностью), которые установлены на немагнитной втулке.

Рассмотрим режим запуска (разгона) гиродвигателя (рис. 2, а).

Магнитное поле  $\bar{B}$ , формируемое обмоткой статора, вращается со скоростью  $n_1$ . Это поле намагничивает материал ротора. Гистерезисные свойства материала ротора обуславливают отставание оси  $\bar{I}$  его намагниченности, от оси  $\bar{B}$  — намагничивающего поля статора на гистерезисный угол  $\alpha$ . Этот угол при разгоне определяется магнитными свойствами материала ротора и равен  $30...40^\circ$ . Участки намагниченного ротора независимо от скорости его вращения поворачиваются за полем статора со скоростью  $n_1$ . Вследствие сдвига по углу между полюсами намагничивающего поля статора  $N_1-S_1$  и участками ротора  $N_2-S_2$  возникают магнитные силы  $F_M$ , стремящиеся

втянуть ротор в поле статора, в результате возникает момент  $M_M$  и происходит разгон ротора. Этот процесс имеет место до тех пор, пока скорость вращения ротора  $n_2$  не станет равной скорости вращения намагничивающего поля статора  $n_1$ , т. е. пока двигатель не войдет в синхронизм:

$$n_2 = n_1 = n_{2c},$$

где  $n_{2c}$  — скорость поля ротора в синхронном режиме.

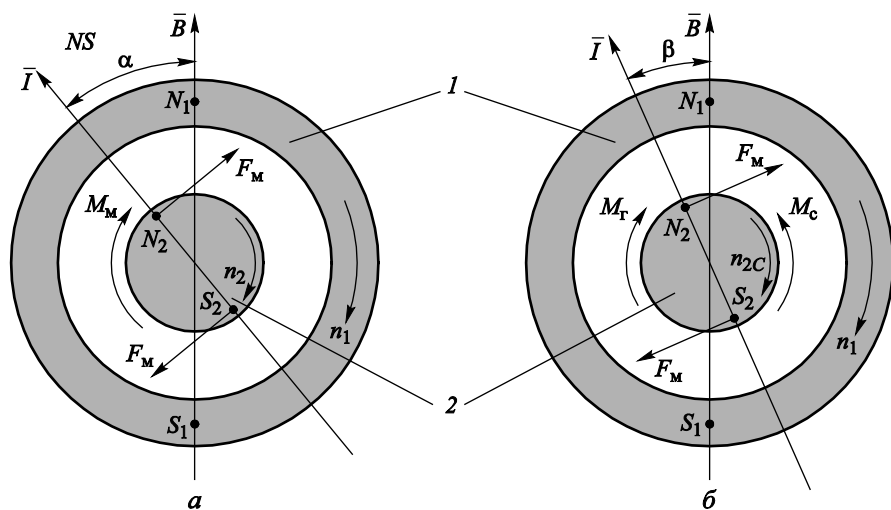


Рис. 2. Схема работы идеального гидродвигателя в режиме разгона (а) и после вхождения в синхронизм (б):  
1 — статор; 2 — ротор

В момент вхождения в синхронизм перемагничивание материала ротора прекращается и, поскольку энергия на перемагничивание не затрачивается, ток в обмотке статора скачком падает до номинального значения. Если бы вращению ротора не препятствовали моменты сопротивления  $M_C$  на валу гидродвигателя, то ось  $N_2-S_2$  намагниченности ротора совпадала бы с осью  $N_1-S_1$  намагничивающего поля статора. Под действием моментов сопротивления ось намагниченности ротора отклоняется (отстает) от оси намагничивающего поля на угол  $\beta$  (рис. 2, б). При этом возникают магнитные силы  $F_M$ , стремящиеся втянуть ротор в положение, согласованное с полем статора, и в результате возникает момент гидродвигателя  $M_T$ , компенсирующий момент сопротивления  $M_C$ . Если момент сопротивления изменяется скачком, то возникают низкочастотные медленно затухающие колебания ротора около положения, определяемого новым значением угла  $\beta$  [4].

Гистерезисные гидродвигатели применяют в гироскопических приборах, в которых требуется высокая стабильность скорости вра-

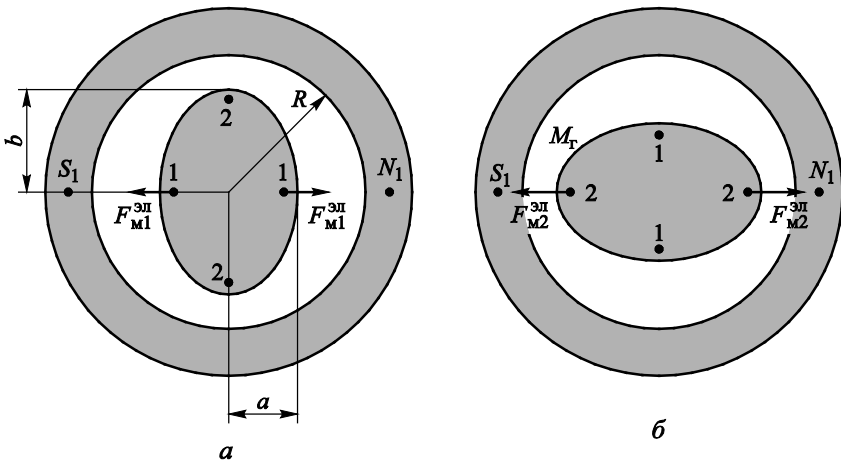
щения маховика. К таким приборам относятся и ДНГ, так как постоянство скорости вращения маховика необходимо для выполнения условия динамической настройки (1) [5].

**Причина возникновения возмущающего момента.** Рассмотрим механизм изменения возмущающих моментов в зависимости от направления вектора намагниченности ротора гидродвигателя ДНГ.

Неидеальность формы ротора гидродвигателя, выраженная в его эллиптичности, вызывает изменение зазоров между ротором и полюсами статора, а следовательно, и силы притяжения со стороны статора на двойной частоте вращения маховика (1000 Гц). Опишем это явление подробнее.

Поскольку расчет касается сил, направленных радиально и не создающих полезный момент, для упрощения вычислений будем рассматривать случай, при котором ось намагниченности ротора гидродвигателя совпадает по направлению с осью  $N_1-S_1$  в момент подачи на обмотки статора импульсов питающего напряжения.

Если вектор намагниченности расположен по малой оси эллипса 1–1 (рис. 3, а), то сила магнитного взаимодействия  $F_{M1}^{эл}$  минимальна (так как имеет обратную квадратичную зависимость от зазора).



**Рис. 3.** Эллиптичность ротора гидродвигателя при расположении вектора намагниченности по малой (а) и большой (б) полуоси эллипса

Если вектор направлен по большой оси эллипса 2–2 (рис. 3, б), то сила магнитного взаимодействия максимальна:

$$F_{M2}^{эл} = F_{M1}^{эл} \frac{(R-a)^2}{(R-b)^2},$$

где  $R$  — номинальное расстояние от центра ротора до полюса;  $a$  — малая полуось эллипса;  $b$  — большая полуось эллипса.

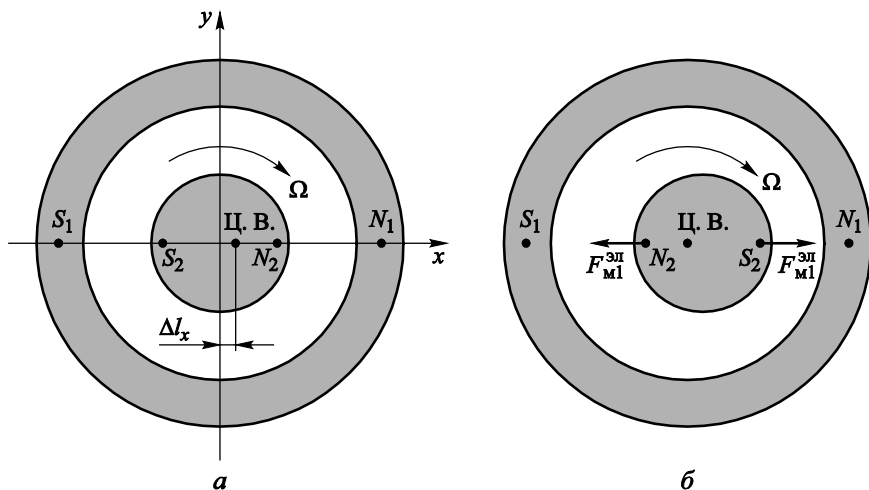
Из вышеизложенного можно сделать вывод, что в зависимости от положения вектора намагниченности возникает сила магнитного взаимодействия между ротором и обмоткой статора, действующая на двойной частоте вращения 1000 Гц (частота питания каждой обмотки статора гидродвигателя):

$$F_M^{\text{эл}} = F_{M1}^{\text{эл}} \frac{(R-a)^2}{(R-a \cos \gamma - b \sin \gamma)^2}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — угол между вектором намагниченности и осью  $x$ .

Однако эта сила уравнивается силой, которая действует со стороны обмотки, расположенной на противоположной от статора стороне.

Рассмотрим теперь погрешность в значении сил магнитного взаимодействия ротора и статора гидродвигателя, связанную со смещением центра вращения (ЦВ) ротора относительно его геометрического центра (это может быть обусловлено, например, погрешностями газодинамической опоры). Рассмотрим смещение оси вращения по оси  $x$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Смещение ЦВ ротора гидродвигателя:  
 а — геометрические параметры; б — действующие силы

Если вектор намагниченности расположен по линии  $N_1-S_1$ , то силы магнитного взаимодействия в начальный момент (см. рис. 4, а) со стороны левого и правого полюса равны. При повороте ротора на  $180^\circ$  (см. рис. 4, б) сила, действующая на ротор со стороны левого полюса, минимальна:

$$F_{M1}^{\text{см.ц}} = F_M \frac{(R-r)^2}{(R-r + \Delta L_x)^2},$$

где  $F_M$  — сила магнитного взаимодействия в случае идеального гидродвигателя;  $\Delta l_x$  — смещение ЦВ ротора относительно его геометрического центра по оси  $x$ .

В то же время с противоположной стороны ротора сила максимальна:

$$F_{M2}^{см.ц} = F_M \frac{(R-r)^2}{(R-r-\Delta l_x)^2}.$$

В данном случае результирующая сила не равна нулю, следовательно, на ротор действует радиальная сила

$$F_M^{см.ц} = F_{M2}^{см.ц} - F_{M1}^{см.ц}$$

с частотой вращения ротора гидродвигателя 500 Гц.

Эта радиальная вибрация сама по себе не вызывает возмущающего момента, однако при одновременном наличии двух описанных несовершенств изготовления ДНГ силы, действующие на двойной частоте вращения, более не уравниваются аналогичной силой, действующей с противоположной стороны ротора. Результатом является воздействие на ротор радиальных сил на двойной частоте вращения, проекции которых на ось  $x$ :

при фазе поворота ротора  $0^\circ$

$$F_M^{\Sigma(0)} = F_M \left[ \frac{(R-a)^2}{(R-a \cos \gamma - b \sin \gamma - \Delta l_x)^2} - \frac{(R-a)^2}{(R-a \cos \gamma - b \sin \gamma + \Delta l_x)^2} \right]; \quad (3)$$

при фазе поворота ротора  $180^\circ$

$$\begin{aligned} F_M^{\Sigma(180)} &= -F_M^{\Sigma(0)} = \\ &= F_M \left[ \frac{(R-a)^2}{(R-a \cos \gamma - b \sin \gamma + \Delta l_x)^2} - \frac{(R-a)^2}{(R-a \cos \gamma - b \sin \gamma - \Delta l_x)^2} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Воздействие этих сил приводит к угловой вибрации подвижной части ДНГ на двойной частоте вращения, которая, в свою очередь, вызывает возмущающие моменты, рассчитываемые по формулам

$$\begin{aligned} \omega_x^{2\Omega} &= -\frac{k_1 - k_2 + (J_1 - J_2)\Omega^2}{H} \Psi_0 \cos \varphi; \\ \omega_y^{2\Omega} &= \frac{k_1 - k_2 + (J_1 - J_2)\Omega^2}{H} \Psi_0 \sin \varphi, \end{aligned}$$

где  $k_1, k_2$  — средние значения угловой жесткости упругих элементов для каждого кольца подвеса;  $J_1 = A_1 + B_1 - C_1$ ,  $J_2 = A_2 + B_2 - C_2$  —



разностные моменты инерции каждого кольца подвеса;  $H$  — кинетический момент гироскопа;  $\Psi_0$  — начальная фаза колебаний;  $\varphi$  — угол между направлением вектора угловых колебаний и осью  $x$  корпуса гироскопа [6].

Как видно из формул (2)–(4), значения возникающих сил зависят от направления намагниченности материала ротора гиродвигателя (угол  $\gamma$ ). Следовательно, можно сформулировать два способа уменьшения погрешности:

1) поддержание одинакового направления намагниченности ротора гиродвигателя от запуска к запуску для обеспечения одинаковой величины возникающего систематического дрейфа;

2) поддержание такого направления намагниченности ротора гиродвигателя, при котором систематический дрейф ДНГ в запуске минимален (требует экспериментального определения зависимости дрейфа от направления намагниченности ротора для каждого ДНГ).

С целью определить значимость влияния описанного эффекта на изменение систематической составляющей скорости дрейфа ДНГ от запуска к запуску проведены испытания. В испытуемых ДНГ разброс, связанный с направлением намагниченности ротора гиродвигателя, составляет около 0,06...0,07 град/ч, или до 40 % общего дрейфа от запуска к запуску.

Можно исключить эти составляющие дрейфа, если обеспечить одинаковое положение оси намагниченности ротора гиродвигателя в каждом запуске. Для этого применяют механизм импульсов перемагничивания.

Импульсы подмагничивания в штатном режиме питания гиродвигателя (рис. 5, *а*) — сигналы, подаваемые на обмотки статора гиродвигателя в момент сближения с ними полюсов намагниченности ротора (рис. 6, *а*) один раз в 20 оборотов вала. Таким образом поддерживается режим насыщения ротора гиродвигателя.

Для разворота вектора намагниченности применяют импульсы перемагничивания — это импульсы подмагничивания со смещением по фазе, соответствующем направлению необходимого поворота оси намагниченности ротора (рис. 5, *б*). В результате возникает скольжение и двигатель переходит в асинхронный режим на короткий промежуток времени, в течение которого происходит перемагничивание ротора (рис. 6, *б*).

Определить текущее положение ротора гиродвигателя можно по первой гармонике ЭДС, возбуждаемой в отключенных от выхода усилителя обратной связи обмотках статора датчика момента ДНГ вследствие неизбежной неидеальности исполнения ротора ДМ, которая выражается в неоднородности магнитных свойств кольцевого магнита и магнитопровода по углу поворота маховика. Выделив из

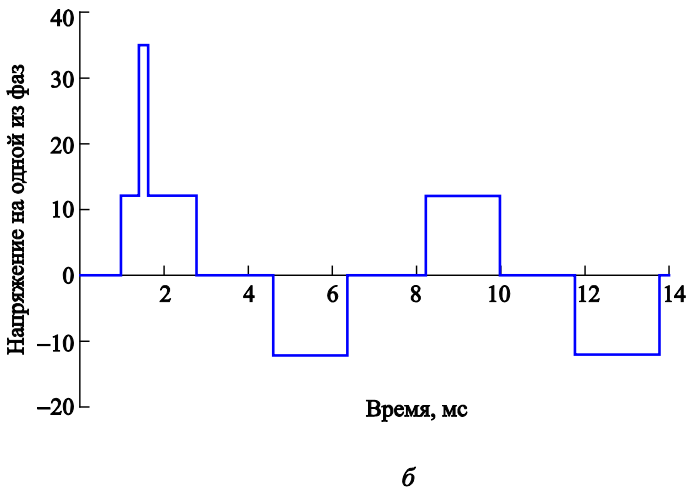
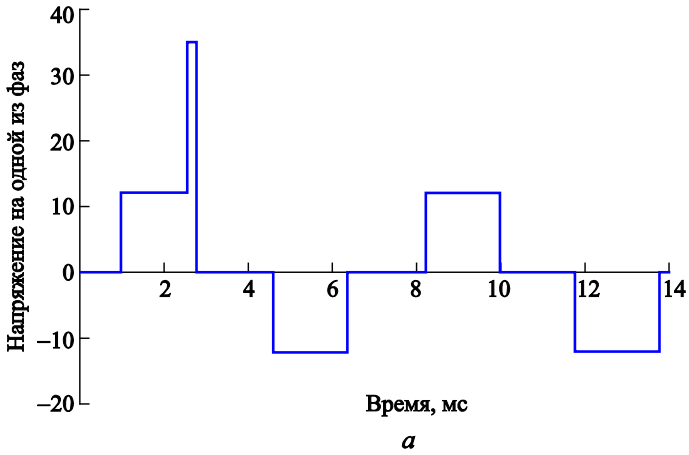


Рис. 5. Циклограммы питания на одной из фаз ДНГ при использовании импульсов подмагничивания (а) и перемгничивания (б)

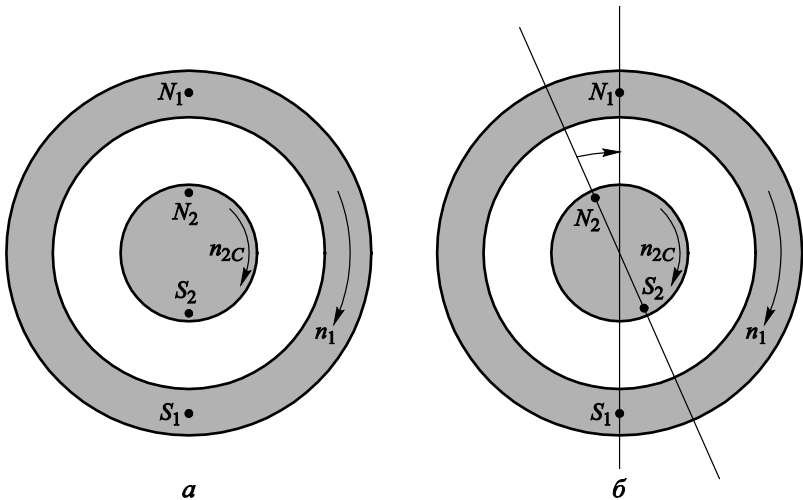


Рис. 6. Действие импульсов подмагничивания (а) и перемгничивания (б)

сигнала ЭДС ДМ эту гармонику, можно определить текущее положение ротора гиродвигателя по ее текущей фазе (путем сравнения с неизменной фазой напряжения питания одной из фаз статора гиродвигателя).

Разворот оси намагниченности ротора проводится после разгона двигателя до синхронного режима и занимает до 10 с.

**Заключение.** Эксперименты показывают, что положение вектора намагниченности ротора гиродвигателя ДНГ оказывает влияние на его погрешность, составляющее до 40 % дрейфа от запуска к запуску. Предложен алгоритм питания двигателя, позволяющий управлять положением вектора намагниченности ротора синхронного гиродвигателя и, таким образом, уменьшить дрейф гироскопа от запуска к запуску, а также уменьшить систематический дрейф ДНГ в запуске без изменения конструкции.

Предложенный метод разворота вектора намагниченности показал эффективность при экспериментальных исследованиях и может быть применен при запуске ДНГ как автономно, так и в составе инерциальной системы управления.

За помощь в подготовке статьи авторы выражают благодарность В.П. Подчерзеву.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пельпор Д.С., ред. *Гироскопические системы*, ч. 2. Москва, Высш. шк., 1977, 488 с.
- [2] Пельпор Д.С., Матвеев В.А., Арсеньев В.Д. *Динамически настраиваемые гироскопы*. Москва, Машиностроение, 1988, 264 с.
- [3] Новиков Л.З., Шаталов М.Ю. *Механика динамически настраиваемых гироскопов*. Москва, Наука, 1985, 246 с.
- [4] Шестов С.А. *Гироскопы*. Москва, Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977, 64 с.
- [5] Делекторский Б.А., Мастяев Н.З., Орлов И.Н. *Проектирование гироскопических электродвигателей*. Москва, Машиностроение, 1968, 252 с.
- [6] Матвеев В.А., Подчерзев В.П., Фатеев В.В. *Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 103 с.

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.*

Статья поступила в редакцию 11.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татарин Ф.В., Новиков Л.З. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-01-1579>

**Чиркин Дмитрий Сергеевич** родился в 1994 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2016 г. Ведущий инженер филиала ФГУП «ЦЭНКИ» — НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова. Автор 2 печатных работ. Область научных интересов: гироскопы, навигационные приборы и комплексы. e-mail: info@niipm.ru

**Рословец Павел Владимирович** родился в 1990 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г. Ведущий инженер филиала ФГУП «ЦЭНКИ» — НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова. Автор 3 печатных работ. Область научных интересов: гироскопы, навигационные приборы и комплексы. e-mail: info@niipm.ru

**Татаринов Федор Владимирович** родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Заместитель начальника отдела филиала ФГУП «ЦЭНКИ» — НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова. Автор 8 печатных работ. Область научных интересов: гироскопы, навигационные приборы и комплексы. e-mail: info@niipm.ru

**Новиков Леонид Захарович** родился в 1938 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1960 г. Канд. физ.-мат. наук., главный научный консультант филиала ФГУП «ЦЭНКИ» — НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова. Автор более 50 печатных работ. Область научных интересов: гироскопы, навигационные приборы и комплексы. e-mail: info@niipm.ru

## Run-to-run drift reduction of dynamically tuned gyro

© D.S. Chirkin, P.V. Roslovets, F.V. Tatarinov, L.Z. Novikov

Branch of FSUE “TsENKI” — “Scientific & Research Institute  
of Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov”  
Moscow, 111024, Russia

*Systematical drift of dynamically tuned gyro are defined with multiple factors, the most predictable of which is rotor magnetization vector orientation in reference to synchronous hysteresis drive rotor. The article presents experimental data on different dynamically tuned gyros' drive rotor magnetization vector rotation methods based on variation of power supply parameters, such as voltage pulsing of various width or amplitude to inductors of drive rotor. We also offer methods of actual drive rotor magnetism orientation vector and experimental data on systematical drift of dynamically tuned gyro quantity value. As a result the dependence of dynamically tuned gyro drift systematical component of magnetization vector rotation was found. We formulated physical model of researched dependence. This study could be valuable for engineers and students of appropriate specialty.*

**Keywords:** *dynamically tuned gyro, drift, synchronous drive*

### REFERENCES

- [1] Pelpor D.S., ed. *Гироскопические системы* [Gyro systems]. Part 2. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 488 p.
- [2] Pelpor D.S., Matveev V.A., Arsenyev V.D. *Динамически настраиваемые гироскопы* [Dynamically tuned gyro]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 264 p.
- [3] Novikov L.Z., Shatalov M.Yu. *Механика динамически настраиваемых гироскопов* [Mechanics of dynamically tuned gyro]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 246 p.
- [4] Shestov S.A. *Гиромотор* [Giromotor]. Moscow, BMSTU Publ., 1977, 64 p.
- [5] Delektorsky B.A., Mastyaev N.Z., Orlov I.N. *Проектирование гироскопических электродвигателей* [Designing gyroscopic electric motors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 252 p.
- [6] Matveev V.A., Podchezertsev V.P., Fateev V.V. *Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах* [Gyroscopic stabilizers on dynamically tuned vibration gyroscopes]. Moscow, BMSTU Publ., 2005, 103 p.

**Chirkin D.S.** (b. 1994) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2016. Lead Engineer, Branch of FSUE “TsENKI” — “Scientific & Research Institute of Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov”. Author of 2 published works. Sphere of research: giro, navigation devices and systems. e-mail: info@niipm.ru

**Roslovets P.V.** (b. 1990) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2013. Lead Engineer, Branch of FSUE “TsENKI” — “Scientific & Research Institute of Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov”. Author of 3 published works. Sphere of research: giro, navigation devices and systems. e-mail: info@niipm.ru

**Tatarinov F.V.** (b. 1988) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2011. Deputy Head of Department, Branch of FSUE “TsENKI” — “Scientific & Re-

search Institute of Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov”. Author of 8 published works. Sphere of research: giro, navigation devices and systems. e-mail: info@niipm.ru

**Novikov L.Z.** (b. 1938) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1960. Cand. Sci. (Phys.-Math.), Chief Scientific Adviser, Branch of FSUE “TsENKI” — “Scientific & Research Institute of Applied Mechanics named after academician V.I. Kuznetsov”. Author of over 50 published works. Sphere of research: giro, navigation devices and systems. e-mail: info@niipm.ru