

## МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА

Д.С. Науменко  
(ООО «НИЛАКТ ДОСААФ»)

*Выполнен анализ разных методов измерения частоты вращения ротора двигателя-маховика, используемого в системах ориентации космических аппаратов. Предложенный комбинированный метод позволяет увеличить точность измерений. Экспериментально подтвердила возможность на два порядка снизить погрешность измерения частоты вращения ротора маховика по сравнению с традиционными методами.*

**Ключевые слова:** двигатель-маховик, система ориентации, погрешность измерения, угловая скорость, округление, тахогенератор.

### Введение

Двигатели-маховики (ДМ) служат исполнительными органами систем ориентации космических аппаратов (КА). Маховичные системы являются двухконтурными [1]. Первый контур управляет угловым положением КА. Второй контур (или система разгрузки) управляет кинетическим моментом двигателей-маховиков. Работа системы разгрузки требует измерения кинетического момента ДМ и вычисления суммарного кинетического момента системы (КА + ДМ). Информация о частоте вращения ДМ может быть также использована для оценки угловой скорости КА и оптимизации структуры системы стабилизации КА [2]. В этом случае требуемая точность измерения существенно выше, что делает задачу точного измерения частоты вращения ротора ДМ весьма актуальной. Кроме того, задача обеспечения точной стабилизации КА накладывает ограничение на время формирования оценки кинетического момента ДМ.

Для большинства перспективных систем стабилизации КА актуальна задача активного демпфирования упругих колебаний конструкции. Длительность цикла управления цифровой системы стабилизации выбирается с учётом спектра и коэффициентов влияния упругих колебаний конструкции, полосы пропускания ДМ. Маховик ДМ1-20, разработанный в ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», имеет полосу пропускания около 10 Гц. Исходя из этого, для оценки угловой скорости КА с использованием информации о частоте вращения ротора ДМ можно принять цикл управления контура стабилизации равным 0,1 с.

### Погрешность измерения

Скорость вращения ротора маховика можно измерять механическим, электромагнитным, магнитомодуляционным или оптическим методами [3]. В конструкциях ДМ производства ОАО «Кор-

порация «ВНИИЭМ» получили распространение оптический и магнитомодуляционный методы. Наибольший ресурс обеспечивает магнитомодуляционный метод, основанный на использовании датчиков Холла.

Рассмотрим задачу увеличения точности измерения частоты вращения ротора. Предположим, что за интервал измерения скорость остаётся постоянной.

На каждом обороте ротора двигателя-маховика тахогенератор формирует  $N$  измерительных импульсов. Импульсы передаются в контроллер системы ориентации по одной из двух линий связи в зависимости от направления вращения ротора.

Для идеального случая период следования определяется выражением

$$T = \frac{2\pi}{\omega N},$$

где  $\omega$  – частота вращения ротора маховика, рад/с.

Рассмотрим следующие погрешности измерения:

- шум фронтов измерительных импульсов  $\Delta T$ , обусловленный задержкой в электрической схеме измерительного узла контроллера системы ориентации;
- погрешность, обусловленную округлением в схеме измерения  $\Delta T_k$ , будем называть её погрешностью квантования измерительных импульсов.

Помимо перечисленных погрешностей, все методы имеют две методические погрешности: первая неизбежно возникает при изменении направления вращения ротора, вторая обусловлена технологическим разбросом в конструкции формирователя измерительных импульсов. Оценка величины этих погрешностей и методов минимизации их негативного влияния является предметом дальнейших исследований и здесь не рассматривается.

С учётом шума фронтов период измерительных импульсов

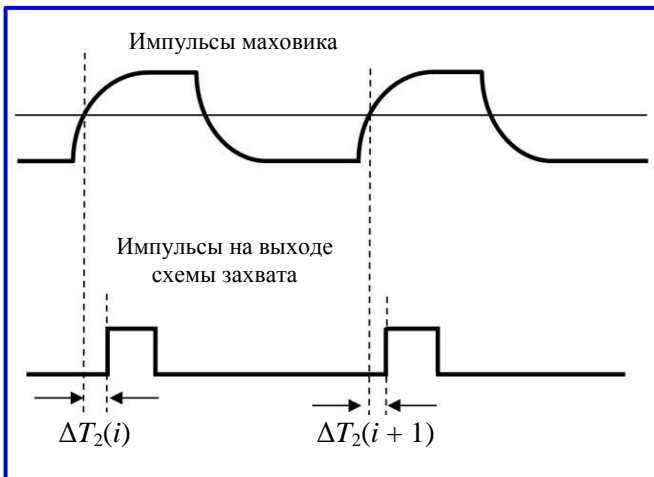


Рис. 1. Шум фронтов измерительных импульсов

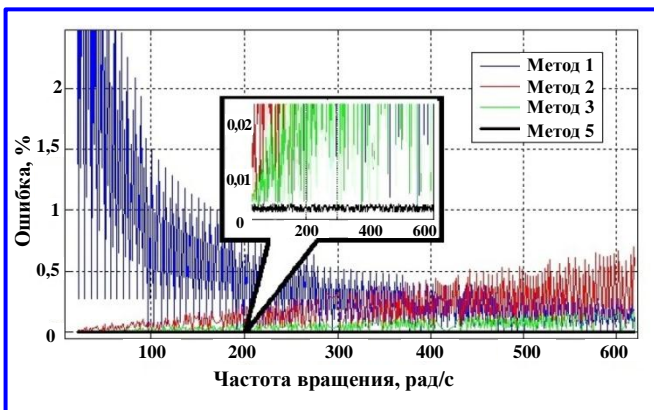


Рис. 2. Погрешность квантования (модуль ошибки)

$$T = \frac{2\pi}{\omega N} + \Delta T.$$

Полагая, что погрешность  $\Delta T$  является случайной с нормальным законом распределения, примем математическое ожидание  $\langle \Delta T \rangle = 0$ , а среднеквадратичное отклонение  $\sigma_T$  определим экспериментально.

Для оценки дисперсии шума фронтов измерительных импульсов использовалась установка, содержащая ДМ1-20, схему управления маховиком и входное устройство захвата измерительных импульсов контроллера системы ориентации КА «Ионосфера». На первый вход осциллографа подавались импульсы тахогенератора ДМ. На второй вход осциллографа подавался сигнал с выхода схемы захвата импульсов узла измерения. Измерялась задержка между фронтами импульсов контролируемых сигналов (рис. 1). В результате математической обработки выборки измерений длительностью 10 с было получено среднеквадратичное отклонение

задержки  $\sigma_{T_2} = 5$  нс.

Вторая составляющая погрешности  $\Delta T_k$  зависит от способа измерения частоты вращения ротора ДМ и может быть оценена для каждого из рассмотренных ниже способов.

### Способы измерения скорости

Рассмотрим несколько способов измерения частоты вращения ротора ДМ:

- подсчёт количества импульсов ДМ за фиксированный промежуток времени (измерение частоты следования измерительных импульсов);
- подсчёт времени между импульсами ДМ (измерение периода следования измерительных импульсов);
- подсчёт количества импульсов генератора за время нескольких импульсов ДМ (измерение периода следования измерительных импульсов с усреднением);
- одновременное измерение частоты и периода импульсов и использование тех данных, для которых точность оценки текущей частоты вращения ротора выше;

– комбинированный способ, основанный на подсчёте измерительных импульсов на интервале измерения и определения времени двух задержек: первой – от начала интервала до первого импульса и второй – от последнего измерительного импульса до конца интервала. Как будет показано ниже, в случае, когда необходимо реализовать способ при ограниченных ресурсах контроллера системы ориентации, можно вместо времени двух задержек определять один интервал времени между двумя последними измерительными импульсами для двух последовательных интервалов измерения.

Для каждого метода измерения частоты вращения ротора ДМ вычислим ошибки, обусловленные квантованием.

Количество измерительных импульсов ДМ за время измерения  $T_n$  составит  $\left[ \frac{T_n N_\omega}{2\pi} \right]$ , где [...] – операция взятия целой части. Абсолютная ошибка определения частоты вращения ротора первым методом:

$$\Delta\omega_{n1}(\omega) = \left[ \frac{T_n N_\omega}{2\pi} \right] \frac{2\pi}{T_n N} - \omega. \quad (1)$$

Для второго метода измерения используется задающий генератор с периодом импульсов  $T_r$ . Число тактов задающего генератора за интервал между измерительными импульсами составит  $\left[ \frac{2\pi}{T_r N_\omega} \right]$ .

Абсолютная ошибка определяется выражением:

$$\Delta\omega_{и2}(\omega) = \frac{2\pi}{NT_r \left[ \frac{2\pi}{T_r N \omega} \right]} - \omega. \quad (2)$$

Абсолютная ошибка для третьего метода определяется выражением:

$$\Delta\omega_{и3}(\omega) = \frac{2\pi}{\frac{NT_r}{m} \left[ \frac{2\pi m}{T_r \omega} \right]} - \omega, \quad (3)$$

где  $m$  – количество усредняемых импульсов.

С учётом формул (1) и (2) абсолютная ошибка для четвёртого метода определяется выражением:

$$\Delta\omega_{и4}(\omega) = \left\{ \begin{array}{l} \Delta\omega_{и1}(\omega), \text{ если } |\Delta\omega_{и1}(\omega)| < |\Delta\omega_{и2}(\omega)| \\ \Delta\omega_{и2}(\omega), \text{ в остальных случаях} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Рассмотрим подробнее пятый комбинированный метод.

Количество измерительных импульсов за время  $T_n$

$$n = \left[ \frac{T_n}{T} \right],$$

где  $T = \frac{2\pi}{N\omega}$  – период измеряемых импульсов.

Количество импульсов задающего генератора за время прохождения  $n$  измеряемых импульсов

$$\left[ \left[ \frac{T_n}{T} \right] \frac{T}{T_r} \right].$$

Оценка периода измеряемых импульсов

$$T_{и} = \frac{\left[ \left[ \frac{T_n}{T} \right] \frac{T}{T_r} \right]}{n} T_r = \frac{\left[ \left[ \frac{T_n}{T} \right] \frac{T}{T_r} \right]}{\left[ \frac{T_n}{T} \right]} T_r.$$

Таким образом, абсолютная ошибка метода имеет вид:

$$\Delta\omega_{и5}(\omega) = \frac{2\pi}{T_{и} N} - \omega = \frac{2\pi \left[ \frac{T_n}{T} \right]}{\left[ \left[ \frac{T_n}{T} \right] \frac{T}{T_r} \right] T_r N} - \omega. \quad (5)$$

### Сравнение погрешностей путём численного эксперимента

Для сопоставления различных методов сравним погрешности, вычисляемые по формулам (1) – (5). По результатам расчётов были построены графики зависимости относительной ошибки как функции частоты вращения ротора ДМ (см. рис. 2).

При расчётах были приняты следующие значения параметров:  $T_n = 100$  мс,  $m = 4$ ,  $N = 36$ ,  $T_r = 2$  мкс, период переполнения таймера 131 мс.

На частоте вращения ротора 200 рад/с среднее значение относительной ошибки составляет:

- для 1-го метода (измерения частоты) – 0,39%;
- для 2-го метода (измерения периода) – 0,12%;
- для 3-го метода (усреднения периода) – 0,025%;
- для 4-го метода (минимум первого и второго) – 0,11%;
- для 5-го (комбинированного метода) – 0,001%.

Следует отметить, что в системе стабилизации КА обычно используется от трёх до шести ДМ. Возникает необходимость параллельного измерения скоростей нескольких ДМ. Этому требованию отвечает схема алгоритма, реализующего комбинированный метод измерения частоты вращения ротора, показанная на рис. 3, где  $k = \frac{2\pi}{T_r N} = 87\,266,46$ .

Измеряемые величины:

– интервал времени между последними измерительными импульсами текущего и предыдущего интервалов измерения. Длительность интервала измерения  $T_n$ ;

– количество пауз между измерительными импульсами на интервале измерения.

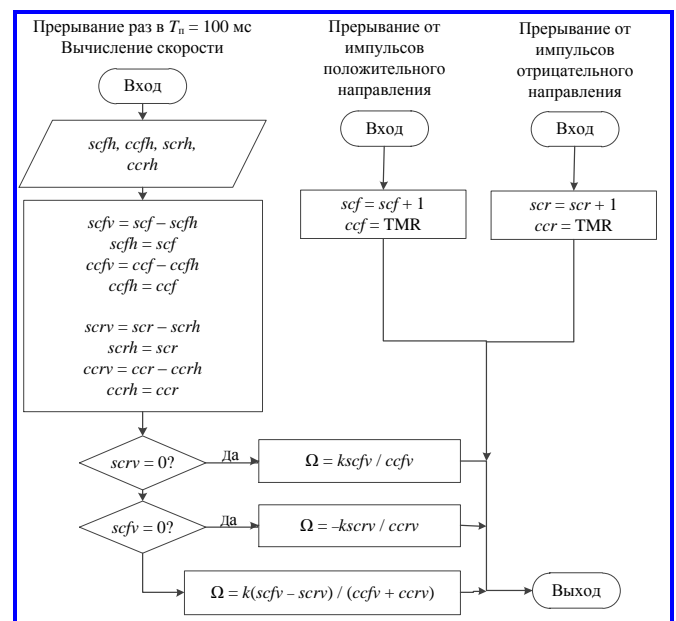


Рис. 3. Схема комбинированного алгоритма

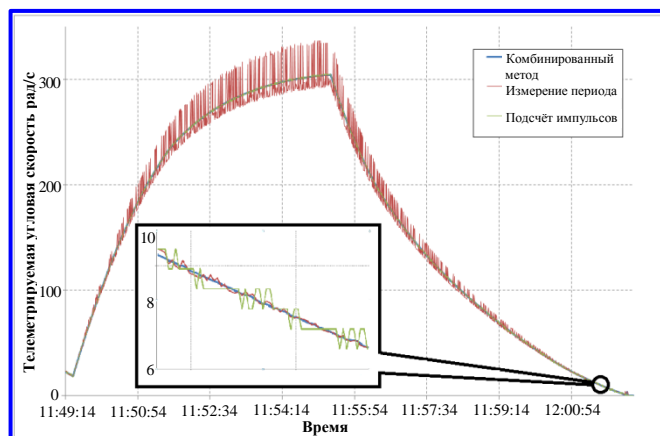


Рис. 4. Сравнение методов

Отметим, что для получения оценки достаточно наличия по одному измерительному импульсу за интервал измерения  $T_n$ , но при этом оценка может быть сформирована только на втором такте, т. е. после двух интервалов  $T_n$ .

Интервалы времени  $scfv$  и  $scrv$  (см. рис. 3) вычисляются как разность между значением таймера TMR и его значением на предыдущем такте оценки. Аналогично определяется количество измерительных импульсов  $scfv$  и  $scrv$ . По этим данным определяется направление вращения ротора, и вычисляется оценка частоты вращения.

Следует отметить, что затраты времени процессора в этом случае оказались одного порядка с затратами при реализации первого метода, однако точность существенно выше.

#### Экспериментальная проверка

Для проверки результатов численного эксперимента и идентификации математической модели тахогенератора ДМ проведено физическое моделирование процесса измерения скорости ДМ. Перспективные методы измерения (первый, второй и пятый) были реализованы в технологическом образце контроллера системы ориентации (КСО), разрабатываемого для космических аппаратов КК «Ионозонд». Проведены испытания КСО с маховиком ДМ1-20, и получены результаты одновременной работы разных алгоритмов. В начале

эксперимента из КСО в ДМ выдавались сигналы управления, соответствующие 30% от максимального момента ДМ. Импульсы тахогенератора ДМ поступали в КСО и использовались в разных алгоритмах, работающих одновременно. После набора скорости 300 рад/с управляющие сигналы отключались, и маховик останавливался за счёт сил трения. Измерялась частота вращения ротора как при разгоне, так и при медленном торможении ДМ. Телеметрические данные тестируемых алгоритмов сохранялись в памяти КСО с периодичностью 0,5 с.

Как видно из графика на рис. 4, метод измерения периода вносит большой шум в оценку частоты вращения ротора ДМ. Для метода измерения частоты характерна «ступенька» на небольшой частоте вращения ротора. Комбинированный метод не имеет этих недостатков.

#### Заключение

Предложенный комбинированный метод позволяет увеличить точность измерения частоты вращения ротора маховика. Полученная оценка относительной погрешности комбинированного метода на скорости 200 рад/с равна 0,001%. Реализация метода в контроллере системы ориентации КА «Ионосфера» экспериментально подтвердила возможность на два порядка снизить погрешность измерения частоты вращения ротора маховика по сравнению с традиционными методами.

#### Литература

1. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов / В. Н. Васильев. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
2. Беленький А. Д. Оптимизация структуры системы стабилизации искусственного спутника земли посредством двигателя-маховика / А. Д. Беленький // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – Новочеркасск : Южно-Российский государственный политехнический университет, 1982. – № 6. – С. 727 – 730.
3. Корбинский Н. Е. Методы и приборы измерения угловых скоростей / Н. Е. Корбинский. – М. : Институт машиностроения, 1941. – 54 с.

Поступила в редакцию 22.08.2013

Дмитрий Сергеевич Науменко, аспирант, инженер,  
e-mail: dima-post2009@yandex.ru, т. (484) 255-81-74.