

УДК 62-83: 004.4

Н.Н. Балковой, Г.Я. Михальченко

Эталонная цифровая модель управляющего двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата

Описывается устройство, имитирующее сигналы датчика положения ротора управляющего двигателя-маховика, разработанное на основе программируемой логической интегральной схемы. Устройство необходимо для формирования задающих сигналов электропривода двигателя-маховика с фазовой синхронизацией. Сформулированы требования, предъявляемые к эталонной цифровой модели, приведены структурная схема, алгоритмы работы, основные расчетные соотношения и временные диаграммы разработанного устройства.

Ключевые слова: управляющий двигатель-маховик, динамический момент, прямой цифровой синтез, датчик положения ротора, синхронный двигатель с постоянными магнитами, система ориентации и стабилизации космического аппарата.

Для ориентации и стабилизации малых космических аппаратов предназначены простые и надежные управляющие двигатели-маховики (УДМ), которые, кроме формирования управляющего (динамического) момента в широком диапазоне, обеспечивают возможность рекуперации накопленной энергии в бортовой источник электропитания. В связи с уменьшением требуемого диапазона динамических моментов и повышением требований к точности систем ориентации и стабилизации увеличилось влияние момента сопротивления M_c и момента трогания M_t на линейность регулировочных характеристик приборов. Это обусловлено тем, что момент сопротивления становится соизмеримым с управляющим моментом, а момент трогания существенно расширяет зону нечувствительности электропривода. Поэтому в настоящее время актуально создание системы управления УДМ, действие «паразитных» моментов в которой компенсируется изменением мгновенных значений фазных токов двигателя в реальном времени. Предлагается реализовать этот путь на основе привода с фазовой синхронизацией, задающими сигналами для которого являются выходные сигналы эталонной цифровой модели (ЭЦМ) УДМ.

Такого рода модель в структуре электропривода должна обеспечить формирование его линейных характеристик и синхронизацию задающих сигналов с выходными сигналами датчика положения ротора (ДПР) во всех режимах работы.

На рис. 1 представлен один из вариантов построения системы управления УДМ, на котором приняты следующие обозначения: ЭЦМ – эталонная цифровая модель; ГОЧ – синусно-косинусный генератор опорной частоты; ПЧ1, ПЧ2 – преобразователи частот; ИЧФД – импульсный частотно-фазовый дискриминатор; КУ – корректирующее устройство; СДПМ – синхронный двухфазный двигатель с постоянными магнитами; ПС – перемножители сигналов; РТ – регуляторы тока; ДПР – синусно-косинусный датчик положения ротора; N_y – кодовый сигнал управления, определяющий темп нарастания частоты. Принцип работы такой системы детально описан в [1].

В общем случае модель электродвигателя состоит из двух передаточных функций, охваченных обратной связью по ЭДС, как показано на рис. 2.

Первая передаточная функция $W_{д1}(p) = K_{д1}/T_3 p + 1$ отражает процессы, протекающие в электрической части двигателя, вторая $W_{д2}(p) = K_{д2}/T_M p$ – процессы в его механической части, $W_{ос}(p) = C$. В этих выражениях $K_{д1}$ – добротность механической характеристики; T_3 – электромагнитная постоянная времени; $K_{д2}$ – жесткость механической характеристики; T_M – электромеханическая постоянная времени; C – электромашинная постоянная двигателя.

Для управления электродвигателем УДМ согласно структурной схеме (см. рис. 1) необходима такая модель на входе системы, в которой не учитываются электромагнитная постоянная времени двигателя, потери в инверторах и самом двигателе, ЭДС вращения двигателя, паразитные моменты. Кроме того, выходные напряжения ДПР представляют собой идеальные гармонические колебания.

Существующие аналоговые схемы, выполняющие функцию интегрирования, не могут быть применены для реализации поставленной задачи, так как имеют нестабильные характеристики, связанные с утечкой тока конденсатора, сильно зависят от температурных условий и не способны обеспечить требуемый диапазон формирования выходных сигналов, соответствующих скорости и угловому положению ротора УДМ при обработке заданных динамических моментов.

Двойное интегрирование для получения требуемой точности воспроизведения характеристик выходного сигнала необходимо проводить с помощью высокопроизводительных микропроцессорных систем или на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), выполняющей одновременно множество независимых друг от друга операций.

В основе алгоритма функционирования ЭЦМ УДМ лежат следующие требования:

- выходные сигналы углового положения вала должны находиться в диапазоне частот $0 < \omega < \omega_{\max}$;
- при достижении задаваемой программно максимальной частоты, она должна оставаться постоянной вплоть до смены направления динамического момента или подачи кода разгрузки, тем самым имитируется насыщение электромеханического исполнительного органа;
- необходимо зарезервировать код разгрузки, который должен инициировать сброс текущей частоты с программно заданным темпом до нулевого значения;
- необходимо обеспечить однозначное определение направления вращения вала двигателя при многократной смене знака кода управления и включении/выключении питания;
- темп изменения выходной частоты должен быть пропорционален входному коду управления N_y и оставаться постоянным во время действия этого кода, за исключением входа в режим насыщения;
- крутизна характеристик должна изменяться практически мгновенно при смене кода управления;
- необходимо реализовать возможность предустановки аккумулятора частоты в соответствии с текущим кодовым значением частоты вращения вала для увеличения быстродействия контура синхронизации сигналов ЭЦМ с координатами двигателя.

Исходя из этих требований, была разработана функциональная схема ЭЦМ УДМ (рис. 5). Базовым принципом, лежащим в ее основе, является прямой цифровой синтез (Direct Digital Synthesis или DDS [2]). Отличия данного устройства от типовых DDS-синтезаторов заключаются в следующем:

- ЭЦМ производит функцию двойного интегрирования (а не одного, как в DDS), поэтому, кроме аккумулятора фазы, применяется еще и аккумулятор частоты;
- входной код динамического момента N_y пропорционален ускорению (а не частоте) и может быть как положительным, так и отрицательным;
- в составе ЭЦМ имеются два аккумулятора фазы для формирования синуса и косинуса;
- выходные сигналы содержат информацию о направлении вращения (благодаря однозначному определению чередования фаз).

Аккумулятор частоты проектируется аналогично аккумулятору фазы с возможностью предустановки кода частоты вращения вала двигателя в процессе синхронизации для ускорения приведения координат ЭЦМ в соответствие с координатами двигателя. Каждый из таких аккумуляторов строится на основе накапливающего сумматора-вычитателя, представляющего собой регистр, инкрементирующийся/декрементирующийся на определенное значение входного кода с каждым тактом работы устройства.

Код управления N_y , поступающий на вход аккумулятора частоты, преобразуется в мгновенные значения выходной частоты с приращением, пропорциональным входному коду и определяющим угловое ускорение, а следовательно, и динамический момент. Данный аккумулятор тактируется некоторой частотой $F_{CLK/D}$, полученной путем деления основной тактовой частоты устройства в D раз. Нулевой код на выходе этого счетчика соответствует нулевой выходной частоте ω_3 . Следует отметить, что аккумулятор частоты никогда не переполняется и не опрокидывается, так как имеет программное ограничение максимального значения, соответствующее максимальной частоте вращения маховика. Входным кодом аккумулятора фазы является мгновенное значение частоты ω_3 , полученное в аккумуляторе частоты. Этот аккумулятор работает с гораздо большей частотой, имеет большую разрядность и, циклически переполняясь, воспроизводит периодическую функцию угла поворота ротора. Чем больше мгновенное значение кода интегратора частоты, тем быстрее аккумулятор фазы переполняется и тем выше выходная частота.

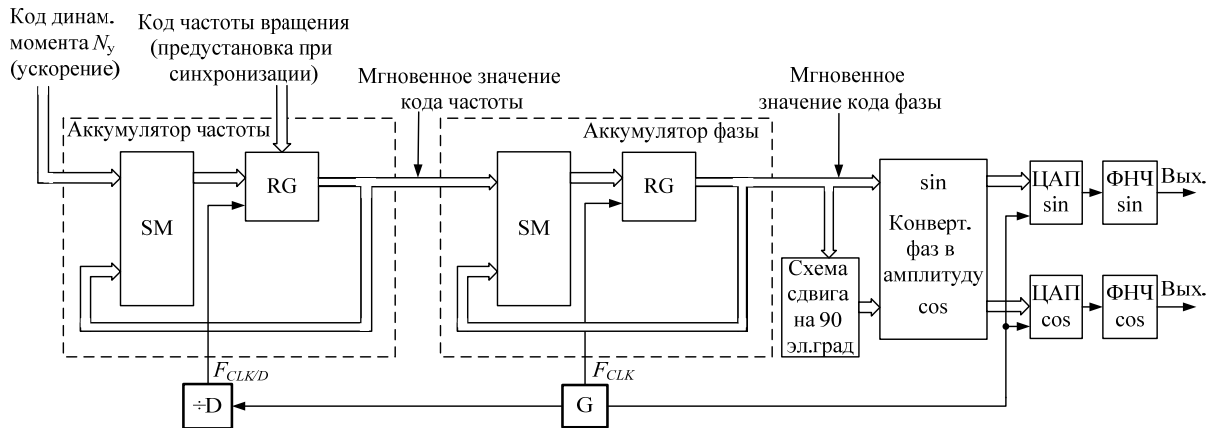


Рис. 5. Функциональная схема ЭЦМ УДМ

Преобразование пилообразных сигналов мгновенного кода угла в соответствующие им значения гармонических функций производится в конвертере фаз в амплитуду. На его вход подается усеченное справа значение аккумулятора фазы (число входных разрядов определяется желаемым количеством отсчетов воспроизводимой функции), а на выходах цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) формируются сигналы с частотой ω_3 . На выходе фильтров получают искомые сигналы задающей частоты $\sin(\omega_3 t)$ и $\cos(\omega_3 t)$, имитирующие сигналы ДПР УДМ. В качестве конвертера фаз в амплитуду может быть использовано постоянное запоминающее устройство с таблицами функций синуса и косинуса или программная/аппаратная реализация алгоритма Coordinate Rotate in Digital Compute [3] (CORDIC).

Формирование выходной частоты не отличается от традиционного способа прямого цифрового синтеза. В устройствах, основанных на этом способе, выходная частота определяется соотношением

$$f_{\text{вых}} = \frac{K F_{\text{CLK}}}{2^P},$$

где $f_{\text{вых}} = \omega/2\pi$ – выходная частота, Гц; K – десятичное значение кода частоты; F_{CLK} – системная частота, определяющая скорость увеличения аккумулятора фазы на значение K ; P – разрядность аккумулятора фазы.

Особенность программного обеспечения ЭЦМ в том, что K динамично увеличивается на значение кода N_y с частотой $F_{\text{CLK}/D}$, причем $F_{\text{CLK}/D}$ определяется исходя из выражения

$$\frac{K_{\text{max}}}{N_{y\text{max}} F_{\text{CLK}/D}} = \frac{H_{\text{max}}}{M_{\text{д max}}} \rightarrow F_{\text{CLK}/D} = \frac{K_{\text{max}} M_{\text{д max}}}{H_{\text{max}} N_{y\text{max}}}, \quad (1)$$

где K_{max} – значение кода частоты, определяющее максимальную частоту сигналов ДПР; $N_{y\text{max}}$ – максимальное значение кода управления; $F_{\text{CLK}/D}$ – частота приращения мгновенного значения кода частоты; H_{max} , $M_{\text{д max}}$ – максимальные значения кинетического и динамического моментов УДМ соответственно.

Мгновенное значение аккумулятора частоты определяется выражением

$$K(t) = N_y F_{\text{CLK}/D} t. \quad (2)$$

Таким образом, мгновенное значение выходной частоты

$$f_{\text{вых}}(t) = \frac{K(t) F_{\text{CLK}}}{2^P}. \quad (3)$$

Подставив в выражение (3) формулы (1) и (2), получим

$$f_{\text{вых}}(t) = \frac{N_y F_{\text{CLK}/D} t F_{\text{CLK}}}{2^P} = \frac{N_y t F_{\text{CLK}} K_{\text{max}} M_{\text{д max}}}{2^P H_{\text{max}} N_{y\text{max}}}. \quad (4)$$

Следует также отметить, что разрядность аккумулятора фазы и системная частота F_{CLK} подбираются таким образом, чтобы темп изменения выходной частоты и фазы был линейным, т.е. сту-

пени мгновенного значения кода фазы имели единичное значение во всем диапазоне рабочих ускорений и частот.

На основе требований к алгоритму работы ЭЦМ, функциональной схемы (рис. 5) и расчетных соотношений (1)–(4) разработаны алгоритмы работы аккумуляторов фазы и частоты. Причем эти алгоритмы составлены с использованием синтаксиса, наиболее близкого к языку описания цифровых устройств Verilog [4], для простого перехода к программируемой логике и написания соответствующего кода.

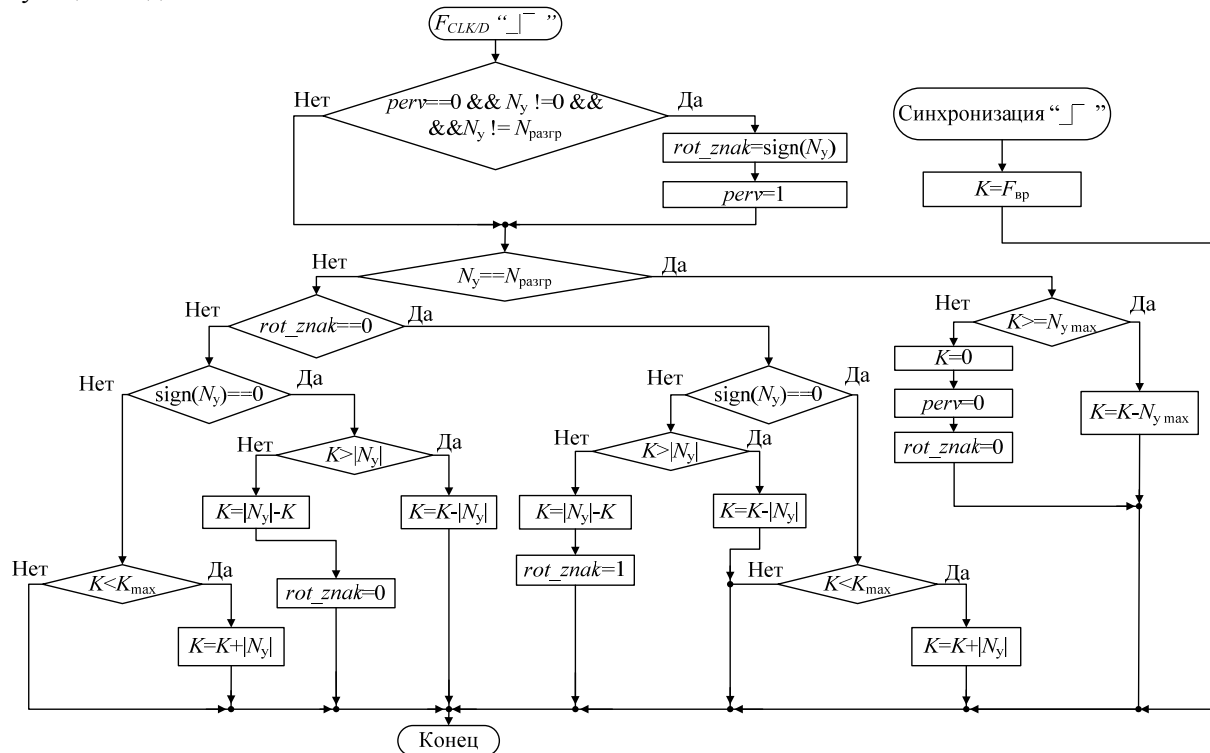


Рис. 6. Алгоритм функционирования аккумулятора частоты

На блок-схеме алгоритма функционирования аккумулятора частоты (рис. 6) с каждым фронтом частоты $F_{CLK/D}$ происходит смена значения s -разрядного двоичного регистра частоты K , которое является входным кодом для аккумулятора фазы. Здесь также происходят инициализация и дальнейшее изменение регистра направления вращения rot_znak , определяющего правильное чередование фаз синуса и косинуса. Если текущий код N_y равен коду разгрузки $N_{разгр}$, то алгоритм идет по отдельной ветви, в которой регистр K с максимальным кодом $N_{y\ max}$ за определенное количество тактов доходит до нулевого значения. Тем самым имитируется сброс частоты вращения вала двигателя до нуля. Если текущий код N_y не равен коду разгрузки $N_{разгр}$, то в зависимости от знака направления вращения и направления динамического момента регистр K инкрементируется или декрементируется на текущее значение N_y . Также при переходе K через нуль меняется значение регистра rot_znak , происходит смена чередования фаз синуса и косинуса, вал двигателя начинает вращаться в противоположную сторону. При достижении максимального значения регистра частоты (условие $K=K_{max}$) нарастание частоты прекращается, что соответствует насыщению УДМ и исчезновению динамического момента. Дальнейшее изменение частоты возможно лишь при условии подачи противоположного кода динамического момента или кода разгрузки. При появлении сигнала инициализации синхронизации регистру K присваивается кодовое значение частоты вращения вала двигателя. Это значение служит исходной координатой, от которой ЭЦМ будет приводиться в соответствие с частотой вращения и угловым положением вала двигателя благодаря контуру синхронизации. Также для ускорения синхронизации уменьшается коэффициент деления D тактовой системной частоты, за счет чего частота $F_{CLK/D}$ увеличивается, а ЭЦМ синхронизируется с двигателем с большей скоростью. По окончании синхронизации коэффициенту деления D присваивается прежнее значение.

Алгоритм работы аккумулятора фазы (рис. 7) заключается в изменении регистра аккумулятора фазы A_{sin} на величину текущего значения выходного кода аккумулятора частоты.

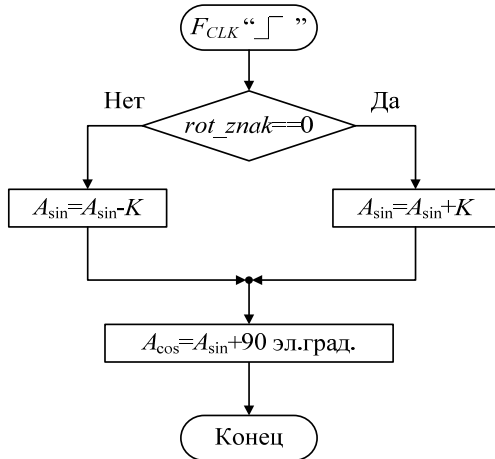


Рис. 7. Алгоритм функционирования интегратора частоты

Таким образом, в регистре A_{sin} хранится информация о фазе выходного синуса. При этом мгновенное значение фазы косинуса A_{cos} определяется программным сдвигом фазы синуса на 90 электрических градусов. Старшие разряды аккумуляторов фаз синуса и косинуса подаются на вход конвертора фаз в амплитуду, затем коды амплитуд синуса и косинуса поступают на соответствующий ЦАП. При достижении максимального значения эти аккумуляторы фаз обнуляются, тем самым обеспечивается периодичность выходных сигналов.

Для реализации функций ЭЦМ УДМ создан макет на основе отечественной ПЛИС 5576ХС1Т. Программа на языке Verilog HDL, описывающая приведенные алгоритмы, успешно синтезирована, отлажена, ее работа просимулирована в САПР Quartus II 9.0.

На временной диаграмме выходной частоты разработанного устройства (рис. 8) показано, что темп нарастания частоты (ускорение или локальный угол наклона характеристики) постоянен во время действия определенного кода управления и пропорционален этому коду.

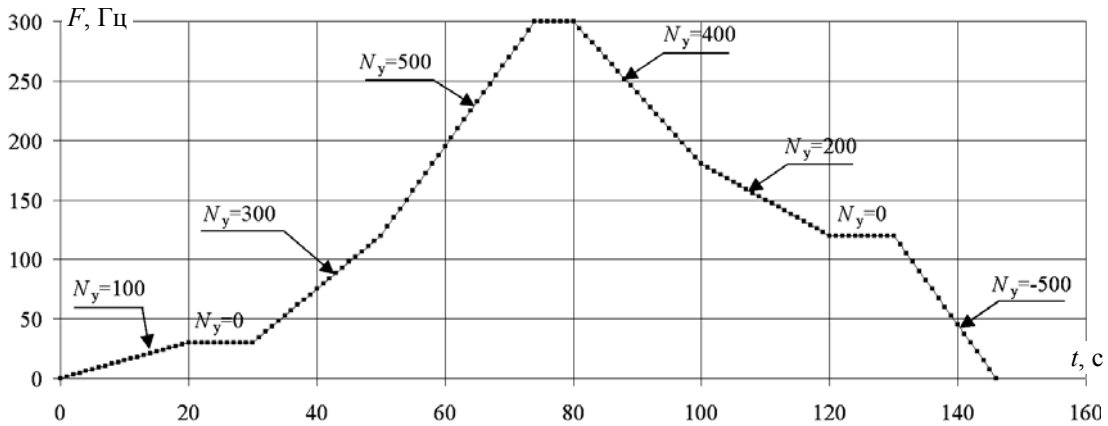


Рис. 8. Временная диаграмма выходной частоты ЭЦМ УДМ

На типичной диаграмме выходных сигналов устройства (рис. 9) приведены различные режимы работы ЭЦМ: разгон, торможение, реверс и разгон в противоположную сторону.

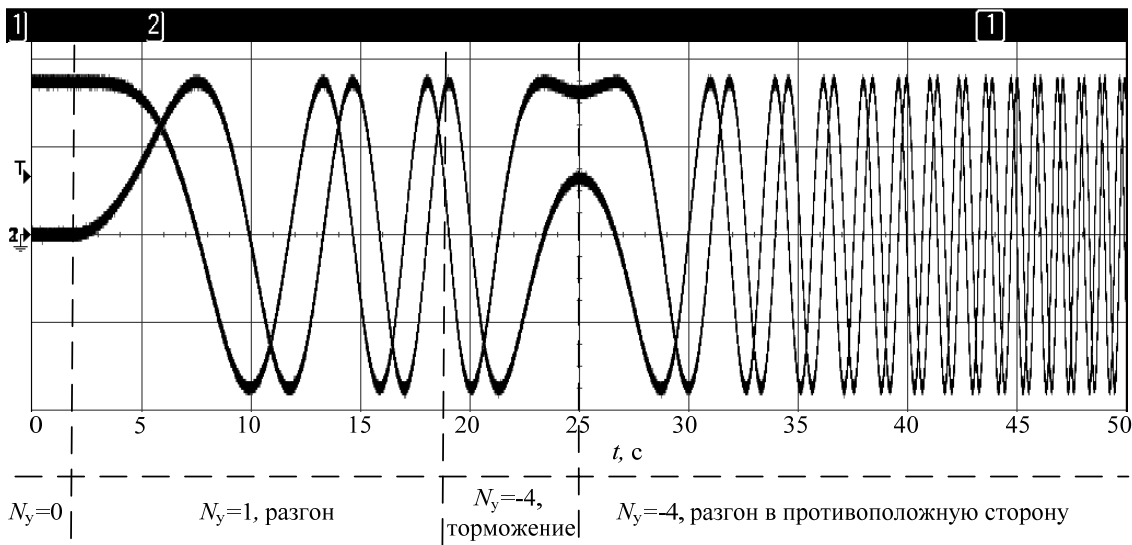


Рис. 9. Осциллограммы работы ЭЦМ

Экспериментальные исследования ЭЦМ УДМ подтвердили адекватность разработанных алгоритмов, написанных по ним программ и стабильную работу сконструированного и собранного макета. Достигнутые значения погрешности ускорения и частоты выходного сигнала не превышают 0,2% и зависят лишь от аппаратных ограничений и могут изменяться в зависимости от разрядности аккумулятора фазы и соотношения тактовых частот внутренних интеграторов ЭЦМ.

Литература

1. Балковой Н.Н. Устройство управления динамическим моментом двигателя-маховика на основе привода с частотно-фазовой синхронизацией / Н.Н. Балковой, Ю.Е. Муравяткин, В.П. Лянзбург // Электромеханические преобразователи энергии: матер. V юбилейной Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти Г.А. Сипайлова. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2011. – С. 280–284.
2. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. – 2001. – №8. – С. 50–56.
3. Захаров А.В. Алгоритмы CORDIC. Современное состояние и перспективы / А.В. Захаров, В.М. Хачумов // Программные системы: теория и приложения. – 2004. – Т. 26, № 6. – С. 353–372.
4. Поляков А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 320 с.

Балковой Николай Николаевич

Аспирант каф. ПрЭ ТУСУРа, инженер-электроник 1-й кат. ОАО «НППЦ «Полус»
Тел.: +7-923-401-43-91
Эл. почта: balkovoy.nn@gmail.com

Михальченко Геннадий Яковлевич

Д-р техн. наук, профессор каф. промышленной электроники ТУСУРа,
директор ООО «Компания «Промышленная электроника»
Тел.: +7 (382-2) 33-70-73
Эл. почта: kre-tusur@yandex.ru

Balkovoy N.N., Mikhailchenko G.Ya.

Digital reference model of the reaction wheel used in a spacecraft orientation and stabilization system

The paper describes a FPGA-based device simulating signals of the reaction wheel shaft encoder. Such a device can be used for generating master signals in the reaction wheel electric drive with phase alignment. The qualifying standards and requirements to digital reference model were formulated. The block diagram, functioning algorithms, basic formulas and timing diagrams of the developed device were represented.

Keywords: reaction wheel, dynamic torque, etalon digital generator, direct digital synthesis, rotor position sensor, permanent-magnet synchronous motor, orientation and stabilization system of the spacecraft.