

Новый поворотный двигатель для спутников Meteosat третьего поколения

C. Benoit, N. Bencheikh, O.Sosnicki, A. Pages, P. Meneroud CEDRAT TECHNOLOGIES, Мейлан, Франция, J. Lazaro, E. Abengoza SENER, Лас Аренас, Испания

Резюме:

В рамках проекта Meteosat третьего поколения (MTG), являющегося основой будущей системы Европейских оперативных геостационарных метеорологических спутников, компания Cedrat Technologies разработала специализированный привод для созданного группой SENER механизма сканирования (SCA). Такие двигатели необходимы для перемещения SCA по осям "север-юг" (С/Ю) и "восток-запад" (В/З). Необходимость прецизионного позиционирования SCA налагает определенные требования на характеристики привода. К таким характеристикам относятся следующие: постоянство мгновенной скорости вращения и момента электрического двигателя, высокая стабильность вращающего момента $[Нм/\sqrt{W}]$ во всем диапазоне хода, очень маленький гистерезис и дублированные катушки. С целью удовлетворения этих жестких требований было принято решение разработать специализированный поворотный двигатель - Rotating Voice Coil Motor; RVCM.

В этой статье описывается двигатель, удовлетворяющий выдвинутым требованиям. Первая часть статьи посвящена принципам выбора архитектуры и магнитных материалов. В ней рассматриваются основные проблемы: характеристики крутящего момента, энергопотребление и снижение массы. Затем рассматривается сам привод, соответствующий ожидаемым характеристикам. В заключение представлена сводка результатов испытаний простой макетной модели (EBB).

Ключевые слова: магнитный, привод, линейная катушка, двигатель, вращение, непостоянство мгновенной скорости вращения и момента, гистерезис, космическое устройство, Meteosat третьего поколения, MTG

Введение

Механизм сканирования вращает зеркало относительно двух ортогональных осей (рисунок 1). Оси вращения соответствуют земным осям С/Ю и В/З.

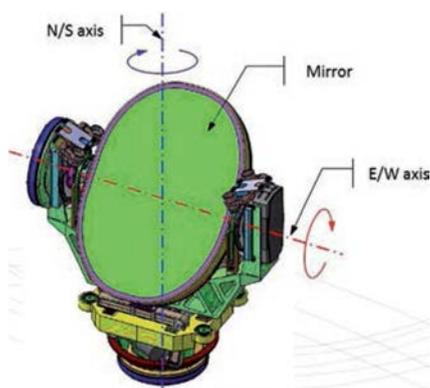


Рисунок 1. Сканирующий механизм спутника MTG (с разрешения SENER)

Решение на основе пьезоэлектрического эффекта обычно подходит для формирования смещения с высоким разрешением при сканировании. Требование по обеспечению углового хода в диапазоне ± 12 градусов можно выполнить, применив электромагнитный принцип перемещения.

В настоящей статье предложена технология и архитектура привода, способного удовлетворить всем необходимым требованиям. При разработке решения по реализации привода применялось механическое и электромеханическое моделирование. Были изготовлены два прототипа включая стенд с устройством в сборе, испытательный стенд и инструмент для формирования покрытия катушки. Представленные характеристики двигателя получены на основании испытаний.

Технология приводного механизма

На рынке космических технологий используется несколько вариантов реализации электромагнитных приводов. Необходимым решением, удовлетворяющим всем предъявляемым к двигателю требованиям, является решение на основе Лапласовой силы. Альтернативные решения обладают некоторыми ограничениями и не соответствуют всем требованиям. Основными недостатками бесщеточного двигателя постоянного тока (BLDC) с постоянным магнитом является непостоянство крутящего момента и присутствие паразитных сил. Моментные электродвигатели с ограниченным углом (LAT; Limited Angel Torque) способны создавать чистый крутящий момент при большом диапазоне угла поворота. Основой двигателя LAT является тороидальная катушка, охватывающая цилиндрический статор. Ротор находится внутри статора. Поэтому в создании крутящего момента участвует только половина катушки. Технология линейного двигателя позволяет избавиться от гистерезиса, непостоянства мгновенной скорости вращения и момента, а также от вихревых токов. Эти особенности позволяют использовать такие двигатели для сканирующих устройств. Однако могут возникнуть проблемы с теплоотведением, поскольку катушка - это подвижный компонент. Наличие подвижных кабелей требует их надежного крепления на весь срок эксплуатации, а также необходимо учесть жесткость кабеля.

Линейные двигатели широко применяются в линейных приводах. Однако их можно использовать и для угловых перемещений. Такие двигатели называются соленоидными двигателями поворотного типа (RVCM; Rotary Voice Coil Motor), см. рисунок 2.

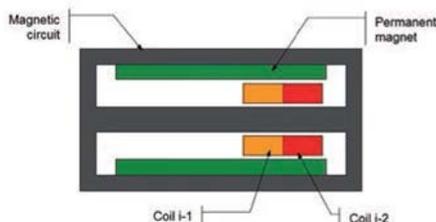


Рисунок 2. Двумерное сечение RVCM

Создание крутящего момента основано на сочетании Лапласовой силы и плеча рычага с осями вращения. Во избежание появления паразитных сил предлагается механизм на основе двух RVCM.

Описание механизма

Основой предлагаемого решения служат два RVCM, соединенные с общим ротором. Ось вращения совпадает с осью Z. Требующие компенсации паразитные силы ориентированы вдоль оси X (см. рисунок 3). Дублирование обеспечивается за счет четырех катушек в составе привода на основе RVCM-PP. Рабочая катушка организована последовательным соединением двух катушек на обеих сторонах двигателя (на следующем рисунке показаны красным цветом). Соединение дублирующих катушек выполнено таким же образом.

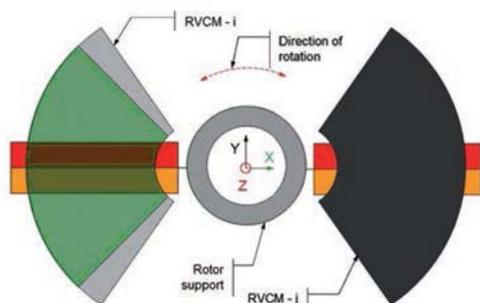


Рисунок 3. Структура RVCM-PP

Для оценки параметров привода RVCM-PP было проведено его моделирование.

Моделирование

Оценивались электромагнитные, механические и термомеханические характеристики привода на основе RVCM-PP.

Электромагнитные характеристики

Первое моделирование было выполнено на основе двумерной модели, основанной на описанной выше геометрии (рисунок 2). С целью получения геометрии, соответствующей требуемым постоянным двигателя (К_М) и номинальному крутящему моменту (М_н), было проведено параметрическое исследование:

$$K_m = 0,205 \text{ Нм} / \sqrt{W} \text{ и } M_n = 0,38 \text{ при } 60^\circ\text{C}$$

В процессе оптимизации учитывались некоторые ограничения, связанные с массой двигателя, массой привода и его допустимым объемом. С точки зрения материала было проведено сравнение магнитов на основе NdFeB и SmCo. Диаметр электрических проводников выбирался исходя из требований по электрическому сопротивлению.

На основании результатов процесса оптимизации была создана и испытана трехмерная модель. Применявшиеся при электромагнитном моделировании электрические материалы приведены в таблице 1. Был выбран магнит на основе SmCo (RECOMA32S), обладающий достаточной температурной стабильностью и устойчивостью к коррозии.

Таблица 1. Магнитные свойства участвовавших в моделировании материалов

Материал	Область применения	mg	Js / Br (T)
Recoma32S	Магниты	1,07	1,12
AFK502	Магнито-провод	2000	2,35

На первом этапе рассчитывалась напряженность магнитного поля в магнитопроводе, магниты и катушки (рисунок 4). Создаваемый крутящий момент определялся на основании протекающего тока.

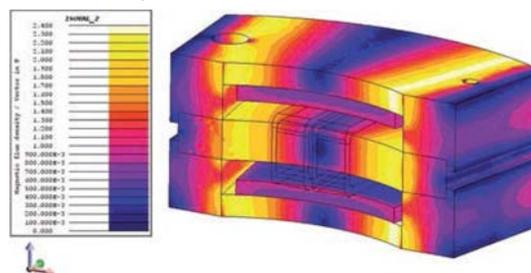


Рисунок 4. Трехмерная модель магнитного поля в магнитопроводе и магнит.

Полученные при моделировании характеристики привода RVCM-PP показаны в следующей таблице (таблица 2).

Таблица 2. Характеристики RCVM-PP

Параметр	Значение	Ед. измерения
Характеристики двигателя		
Рабочий ход	+ -12	градусы
Средний крутящий момент	0,38	Нм
Характеристики катушки		
Диаметр проводника (медь)	0,300	мм
Диаметр проводника (с)	0,344	мм
Класс изоляции	2	
Количество витков (1 катушка)	159	
Количество слоев (1 катушка)	7	
Коэффициент заполнения	56,2 (%)	%
Параметры двух последовательно соединенных катушек при 20°C		
Сопротивление	8,852	Ом
Ток	0,595	А
Напряжение	5,267	В
Плотность тока	8,42	А/мм ²
Рассеиваемая мощность	3,134	Вт
Постоянная двигателя	0,215	Нм/А
Индуктивность	18,2	мГ
Постоянная времени	2,06	мс

Механические ограничения

С точки зрения применения, RVCM-PP не подвержен каким-либо механическим нагрузкам. Тем не менее необходимо оценить вероятность столкновения ротора и статора при выводе на орбиту от воздействия вибрации. Учитывалось воздействие синусоидальной, случайной и ударной нагрузки. Наихудший случай соответствует ударной нагрузке, параметры которой были заданы заказчиком (таблица 3). Эти данные были использованы при расчете взаимодействия ротора и статора привода.

Таблица 3. Параметры ударной нагрузки

Частота (Гц)	Ускорение (g)
100	20
1000	2000
10000	2000

На основании моделирования было вычислено смещение ротора относительно статора (рисунок 5). Максимальное относительное смещение ротора и статора составляет 358 мкм, нагрузка на ротор достигает 298 МПа.

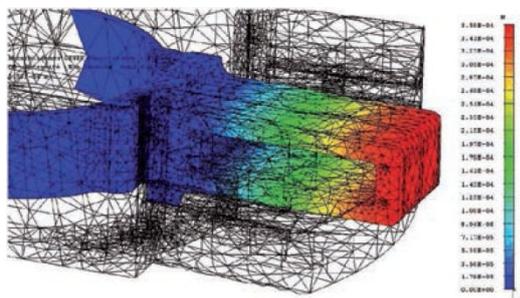


Рисунок 5. Смещение при заданной ударной нагрузке

Механический воздушный зазор между ротором (корпусом катушки) и внутренней поверхностью магнитопровода составляет по расчетам в худшем случае 230 мкм. Допустимая ударная нагрузка оценивается в 1200 г при 10.000 Гц.

Температурные характеристики и саморазогрев

При номинальном требуемом крутящем моменте (0,38 Нм) рассеиваемая электрическая мощность достигает 3,13 Вт (при расчетной катушке). Температура рабочей (внутренней) поверхности ротора контролируется и поддерживается на уровне 30°C. При эксплуатации в космосе температурный обмен с внешней средой не учитывается (конвекция и излучение отсутствуют). Этот случай соответствует самым тяжелым температурным условиям.

В стабильном состоянии температура повышается на 10°C. Термомеханический эффект заключается в небольшом удлинении (5 мкм) в худшем направлении и давлении в 10 МПа на корпус катушки.

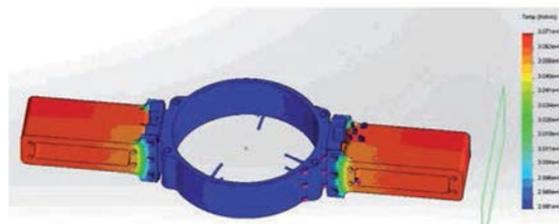


Рисунок 6. Температурное воздействие на ротор по причине саморазогрева катушки.

Изготовление

На основании выполненного электромеханического, механического и температурного анализа была выработана определенная геометрия двигателя RVCM-PP. На основе этой конфигурации были изготовлены два прототипа.

Намотка и покрытие катушки

На основании требований по виброустойчивости был выбран материал корпуса катушки (ТА6V). Во избежание повреждения покрытия в процессе намотки, между корпусом катушки и проводником была помещена электроизоляционная лента (Картон). Во избежание паразитного взаимодействия рабочей и дублирующей катушки, они разделены конструкцией корпуса катушки (рисунок 7).

На обе катушки было помещено покрытие для механической защиты и по температурным соображениям. Компаунд покрытия был выбран из соображений теплопроводности (рисунок 7).



Рисунок 7. Коэффициент заполнения при намотке катушки и ее покрытие.

Привод

Были изготовлены все компоненты привода для создания двух прототипов. Механический воздушный зазор между катушками и магнитопроводом составляет 250 мкм. Поэтому узел ротора был изготовлен так, чтобы обеспечивалась надлежащая взаимная ориентация обеих катушек. Стенд для сборки узла статора обеспечивал защиту от повреждения из-за магнитного взаимодействия компонентов магнитопровода.

Привод RVCM-PP поставляется без прокладки между статором и ротором. Поэтому для предотвращения соударения ротора и статора при транспортировке предусмотрен специальный фиксатор (рисунок 8).



Рисунок 8. Привод RVCM-PP/EBB-1

Испытательный стенд

Для измерения характеристик привода RVCM-PP был разработан специальный испытательный стенд (рисунок 9). В состав испытательного стенда входит вал на подшипниках. На одном конце вала размещены два электромагнита, блокирующие его вращение. На другом конце вала установлен RVCM-PP и датчик угла поворота. Между RVCM-PP и электромагнитами установлен измеритель крутящего момента.



Рисунок 9. Испытательный стенд для двигателя RCVM-PP

Проведение испытаний

Создаваемый приводом RCVM-PP крутящий момент измерялся во всем диапазоне угловых перемещений в статическом режиме при различных значениях тока. Крутящий момент в каждом положении измерялся в обоих направлениях (по часовой стрелке и против часовой стрелки). Характеристики привода измерялись при температуре -15, 23 и 60°C.

Результаты

Полученные на основании измерений характеристики приведены ниже.

Зависимость крутящего момента от угла поворота

Зависимость крутящего момента от угла поворота для различной силы тока приведена на следующем графике (рисунок 10). Номинальный ток составляет 0,595 А.

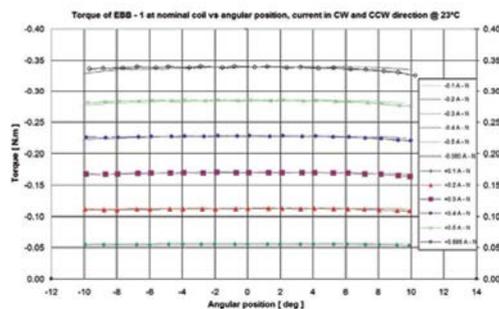


Рисунок 10. Зависимость крутящего момента от угла поворота для различной силы тока

Неравномерность крутящего момента в зависимости от угла поворота для рабочей и дублирующей катушки не превышает 2,5 % в диапазоне ± 10 градусов.

Гистерезис

Гистерезис измерялся на основании измерения крутящего момента в обоих направлениях при одном и том же угле поворота. Гистерезис в центральном положении не превышает 2,3%.

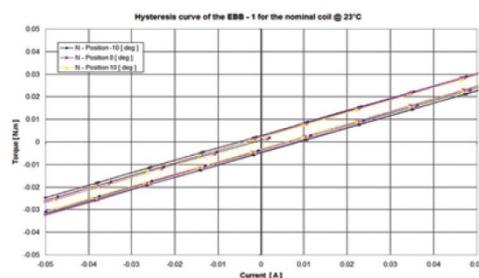


Рисунок 11. Зависимость крутящего момента от угла поворота для различной силы тока

Скорость

RVCM-PP способен перемещать вал испытательного стенда (4,20E-03 кг.м²) со скоростью 68 град/с.

Измерение скорости EBB-1 при 22°C

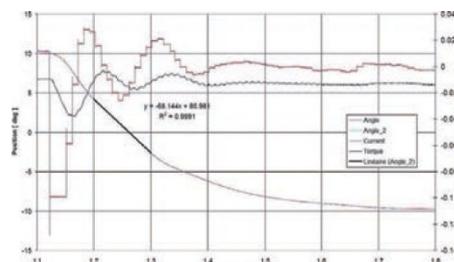


Рисунок 12. Результаты измерения скорости

Заключение

В настоящей статье рассмотрен привод на основе линейного двигателя, предназначенный для обеспечения сканирования. Двигатель RVCM-PP способен создавать постоянный крутящий момент во всем рабочем диапазоне угловых перемещений. Все характеристики и параметры RVCM-PP приведены ниже.

Диапазон угловых перемещений	[градусы]	±10
Масса ротора	[г]	150
Масса двигателя	[г]	1360
Постоянная двигателя	[Нм./W]	0,175
Постоянная крутящего момента	[Нм/А]	0,573
Сопротивление	[Ом]	9,7
Индуктивность	[мГ]	16,46
Электрическая постоянная времени	[мс]	1,697

Благодарность

Настоящая работа была выполнена в рамках проекта MTG в сотрудничестве с SENER.

Ссылки

[1] N. Bencheikh, R. Le Letty, F. Claeysen, G. Migliorero, *Linear magnetic actuators for fine positioning (Линейные магнитные приводы для точного позиционирования)*, ESMATS2009, Австрия.

Материал подготовлен ООО «Промышленная метрология»
Официальный представитель CEDRAT TECHNOLOGIES на территории РФ
26 мая 2015 года.

<http://metrology-spb.ru>

karev_p@metrology-spb.ru

Бренд-менеджер

Павел Валерьевич Карев +7 (950) 023-7389