

Компоненты для обеспечения механического позиционирования антенных систем

Юрий ПОНОМАРЕВ,
к. т. н.
sensor@ranet.ru
Сергей ПАВЛОВ
pavlov@ranet.ru

Данная статья завершает цикл публикаций, посвященный решениям для реализации таких сложных технических комплексов, как радиолокационные системы с активными фазированными решетками (АФАР). Рассмотрены возможные к применению компоненты производства компаний Netzer (Израиль) и Spinner (Германия), предназначенные для прецизионного позиционирования антенной системы и обеспечения ее обзора в требуемом диапазоне углов.

Введение

Несмотря на то, что радиолокационные системы с применением фазированных решеток позволяют производить электронное сканирование пространства, диапазон перемещения луча остается ограниченным, как следствие конструктивного исполнения. Кроме того, на граничных углах существенно ухудшаются радиолокационные характеристики. Поэтому в соответствии с необходимым сектором обзора разработчики таких систем зачастую вынуждены применять механические системы ориентации плоскости антенны в пространстве.

В зависимости от задачи к системам позиционирования предъявляются различные требования по техническим характеристикам, но можно выделить два базовых принципа, значимых практически для любой подобной системы, — точное определение относительного положения (угла относительно определенной оси) антенны в каждый момент времени и диапазон возможного изменения этого угла.

Предлагаем рассмотреть два типа устройств, предназначенных для решения подобных задач, — датчики положения (энкодеры) и вращающиеся сочленения, позволяющие в совокупности обеспечить вращение антенны на углы до 360° включительно (непрерывный полный оборот) и точное определение текущего значения угла поворота.

Датчики положения (энкодеры)

Одним из лидеров по проектированию и изготовлению подобной продукции является компания Netzer Precision Motion Sensors Ltd (Израиль). Эта компания, основанная в 1998 году, занимается раз-



Рис. 1. Продукция компании Netzer

работкой, производством и поставками эффективных электрических датчиков абсолютных угловых и линейных перемещений (рис. 1) на основе запатентованного решения Electric Encoder [1–5].

Зapatентованное решение Electric Encoder представляет собой бесконтактную технологию измерения углового и линейного положения, основанную на периодическом изменении электрического поля при изменении положения ротора, что позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с оптическими и магнитными датчиками. Простая и надежная конструкция, высокая точность, малые инерционные характеристики, малая высота профиля (менее 10 мм), высокая степень защиты от конденсата и загрязнений, нечувствительность к электромагнитным помехам, низкое энергопотребление, высокая степень адаптируемости датчика к требованиям заказчика — вот лишь часть преимуществ, сделавших датчики Netzer популярными по всему миру. Рассчитанные на тяжелые условия эксплуатации, датчики успешно применяются в таких областях, как:

- системы вооружения с дистанционным управлением;
- авионика, аэрокосмическая робототехника и приводные механизмы;
- панорамные установки видеонаблюдения и прицеливания;
- промышленное оборудование и медицинские приборы;
- медицинские изделия, геофизические приборы;
- возобновляемые источники электроэнергии.

Еще одним важным преимуществом вращающихся датчиков Netzer является возможность индивидуальной калибровки в составе изделия для компенсации радиальных биений и неперпендикулярности с записью калибровочных данных в энергонезависимую память датчика.

Вращающиеся датчики фирмы Netzer — это датчики угла (ДУ) высокой точности, по принципу действия относящиеся к емкостному типу, имеющие в своем составе грубый и точный каналы измерения угла. Роторная часть ДУ представляет собой диэлектрический диск зубчатой формы (рис. 2а) с двумя наборами зубьев (полюсов) для грубого и точного каналов. Статорная часть содержит две платы с неподвижными электродами ДУ. При этом на нижней плате размещено два набора радиально расположенных электродов для грубого и точного каналов, а на верхней — два кольцевых электрода. Количество радиальных электродов в четыре раза больше количества зубьев для каждого из каналов. Причем каждый из первых четырех электродов соединяется с каждым последующим четвертым электродом, образуя в результате четыре набора электродов для каждого из двух каналов. При повороте ротора изменяется комбинация

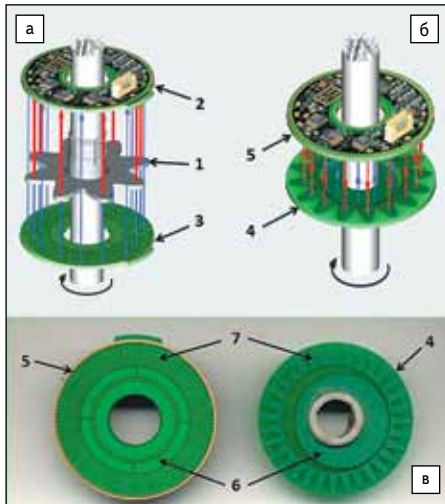


Рис. 2. Варианты конструкций датчиков угла фирмы Netzer:

- а) с диэлектрическим ротором;
 б) с ротором, совмещенным с нижней платой:
 1 — диэлектрический ротор;
 2 — верхняя пластина с электроникой;
 3 — нижняя пластина;
 4 — ротор, совмещенный с нижней пластиной;
 5 — верхняя пластина с электроникой;
 6, 7 — электроды грубого и точного каналов соответственно

открытых и перекрытых диэлектрическими зубьями неподвижных электродов и степень их перекрытия, что приводит к изменению электрического поля между электродами верхней и нижней плат. Изменения электрического поля измеряются электроникой, расположенной на верхней плате, которая формирует четыре аналоговых выходных сигнала постоянного тока (по два для каждого из каналов), пропорциональных синусу и косинусу угла поворота. По комбинации полученных значений сигналов вычисляется абсолютный угол поворота ротора.

Второй вариант конструктивного исполнения представлен на рис. 2б. Здесь роль статорной части выполняет верхняя пластина, а роль роторной части — нижняя пластина с фигурными электродами в виде зубцов. Датчик имеет аналогичный принцип действия за исключением того, что изменения электри-

Таблица 1. Основные характеристики датчиков угла Netzer

	DS-25	DS-37	DS-58(20)	DS-70	DS-90	DS-130	DS-247	—
Пластиковый корпус	DS-25	DS-37	DS-58(20)	DS-70	DS-90	DS-130	DS-247	—
Металлический корпус	DM-25	DM-37	DM-58(20)	DM-70	DM-90	DM-130	—	DL-25
Количество электрических циклов на 1 оборот ротора	16	16	32	64	64	64	128	16
Разрешающая способность (с 12-разрядным АЦП), бит	17	17	18	19	19	19	20	17
Точность	$<\pm 0,015^\circ$	$<\pm 0,015^\circ$	$<\pm 0,01^\circ$	$<\pm 0,01^\circ$	$<\pm 0,01^\circ$	$<\pm 0,01^\circ$	$<0,006^\circ$	$<0,04^\circ$
Предельная рабочая скорость, об/мин	3000	1500	750				375	750
Диапазон измерений	360° — полнооборотный							
Общий вес (пластиковый корпус), г	4	10	36	50	50	65	665	25
Внешний диаметр / внутренний диаметр / высота, мм	25 / 6 / 7	37 / 10 / 8	58 / 20 / 10	70 / 30 / 10	90 / 50 / 10	130 / 90 / 10	247 / 170 / 10	25 / — / 20, вал 4 мм
Степень защиты	IP40 (по заказу — до IP65)							
Диапазон рабочих температур, °C	-40...+85							
Относительная влажность	<98% без конденсации							
ЭМС	IEC 6100-6-2, IEC 6100-6-4							
Стойкость к ударам	IEC 60068-2-27; 100г 11 мс							
Стойкость к вибрации	IEC 60068-2-6; 20г в диапазоне 10–2000 Гц							
Напряжение питания, В	+4,6...+5,5							
Потребляемый ток, мА	10 (аналоговый), 160 (цифровой)							180

ческого поля при повороте ротора происходит за счет изменения площади перекрытия электродов на верхней и нижней платах.

В зависимости от угла поворота ротора выходные аналоговые сигналы меняются по синусоидальному закону. В один оборот ротора укладывается некоторое количество электрических циклов грубого M и точного N каналов, равное количеству зубьев (половусов) ротора в точном и грубом каналах соответственно. Например, на рис. 2 изображен случай, когда $M = 1$, а $N = 8$. Очевидно, что одной паре значений выходных сигналов точного канала могут соответствовать восемь значений углов, поэтому для исключения неопределенности используется пара сигналов с грубого канала. Обычно количество электрических циклов грубого канала M варьируется от 1 до 7, а точного канала N — от 16 до 128. В случае если M больше 1, снова появляется неопределенность, которая устраняется путем выбора M и N такими, чтобы они не имели общего знаменателя. Таким образом, любому углу поворота ротора будет соответствовать уникальная комбинация сигналов грубого и точного каналов (рис. 3).

На практике грубый канал применяется только при включении ДУ для определения начального положения роторной части, далее угловое положение определяется по приращению сигналов в точном канале. При

этом пользователю доступны на выбор аналоговый выход \sin/\cos , требующий дополнительной постобработки для определения абсолютного угла, и цифровые выходы SSI и AqV+I, предоставляющие информацию об абсолютном угле и о приращении угла соответственно.

Разрешающая способность ДУ зависит от количества электрических циклов точного канала N (а следовательно, и от количества зубьев ротора) и от разрядности L АЦП, на которые поступают аналоговые выходные сигналы датчика. С учетом того, что при изменении угла поворота за один электрический цикл синусоидальный выходной сигнал проходит диапазон АЦП 2 раза, разрешающая способность в пределах одного электрического цикла будет равна $L + \log_2(2)$ бит, а разрешающая способность на всем диапазоне углов от 0° до 360° будет равна $L + \log_2(2 \times N)$ бит. Например, для датчика DS-70 с N , равным 64, и при использовании 12-разрядного АЦП получаем разрешающую способность в 19 бит.

Взглянув на таблицу 1, можно проследить тенденцию повышения разрешающей способности с увеличением наружного диаметра датчиков. Это объясняется тем, что разрешающая способность может быть увеличена повышением либо разрядности АЦП, но она ограничена уровнем шумов самого датчика,

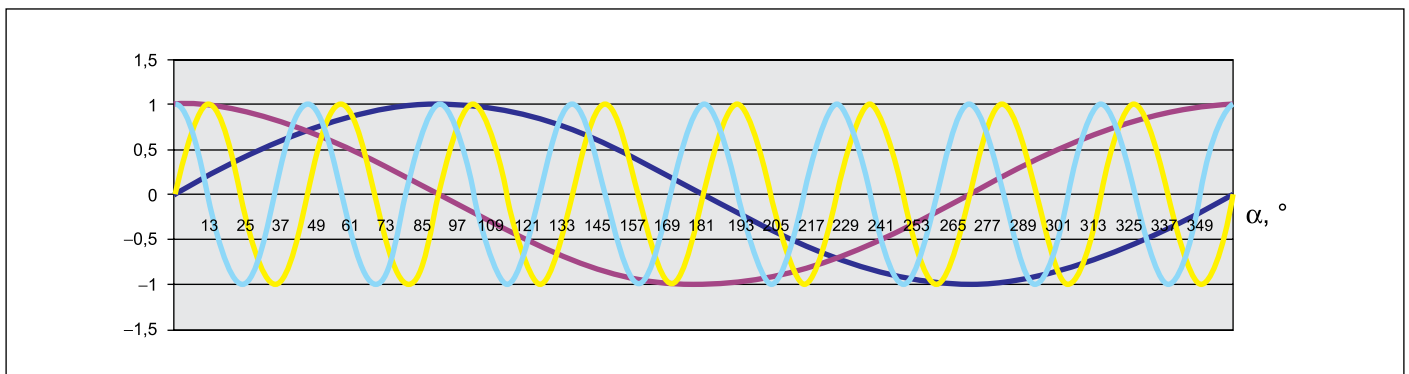


Рис. 3. Выходные сигналы грубого и точного каналов в зависимости от угла поворота ротора датчика угла



Рис. 4. Отладочный набор Netzer



Рис. 6. Датчик угла DL-25 фирмы Netzer со степенью защиты IP65

либо количества зубьев, что приводит к увеличению наружного диаметра датчика.

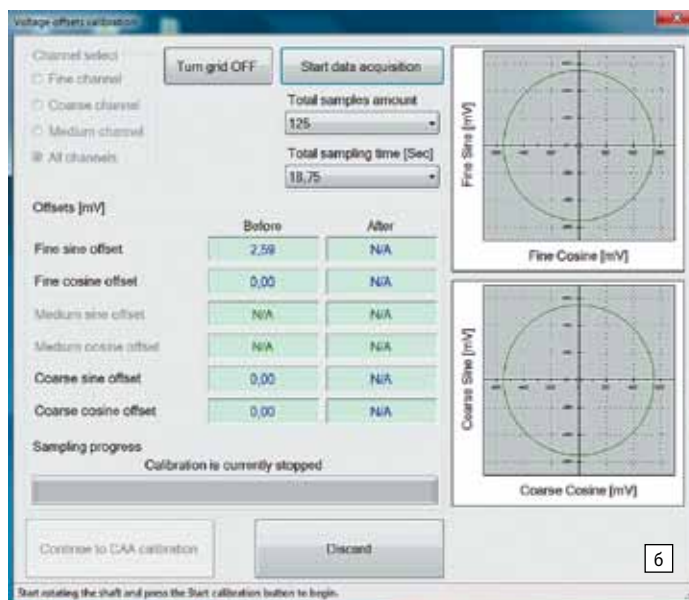
Продукция фирмы Netzer представлена линейкой датчиков угла в различном исполнении, датчиками линейных перемещений и набором оборудования для отладки. Возможен вариант изготовления датчиков со степенью защиты IP65 с полной защитой от пыли.

Отладочный набор Netzer (рис. 4) содержит демонстрационный поворотный столик с установленным датчиком угла линейки DS, преобразователь интерфейса и программное обеспечение (рис. 5, где отображена часть функциональных возможностей), включающее набор инструментов для тестирования и калибровки датчика.

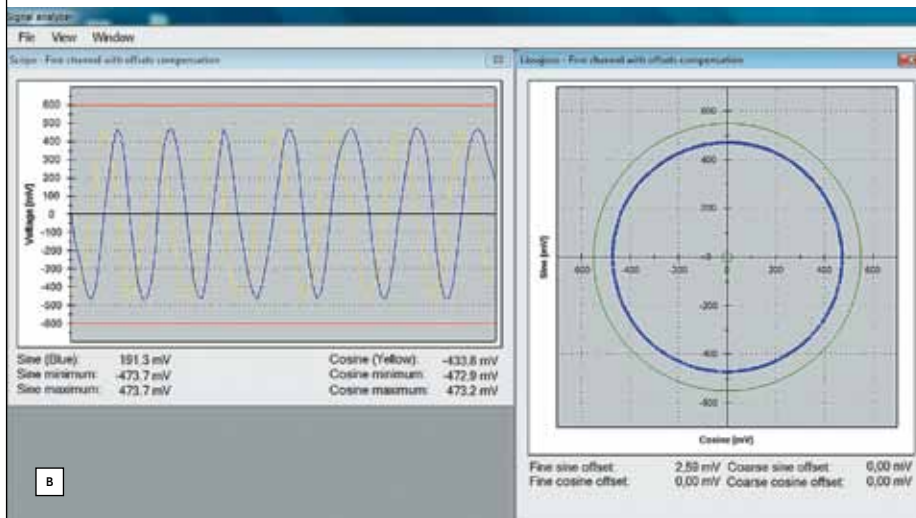
Также следует уделить внимание опыту фирмы Netzer в разработке датчиков для различных условий эксплуатации и окружающей среды. Например, датчик угла DL-25 (рис. 6) имеет степень защиты IP65 по умолчанию. А человекоподобный робот «Робонавт-2» (R2), предназначенный для эксплуатации как внутри, так и снаружи Международной космической станции, включает 25 датчиков угла Netzer, которые выполнены в радиационно-стойком варианте, предназначенном для работы в открытом космосе.



a



6



b

Рис. 5. Программное обеспечение отладочного набора Netzer: а) главное окно; б) окно калибровки; в) окно анализа выходных сигналов



Рис. 7. Примеры использования вращающихся антенных систем

Вращающиеся сочленения

Для систем (рис. 7), использующих в своем составе фазированные решетки и предназначенных для непрерывного кругового обзора пространства, вопрос передачи информации с движущейся части на неподвижную становится одной из первоочередных задач.

Именно разработкой таких компонентов начиная с 60-х годов прошлого века успешно занимается компания Spinner Group (Германия). На данный момент компания имеет возможность предложить потенциальным заказчикам широкий спектр подобных решений:

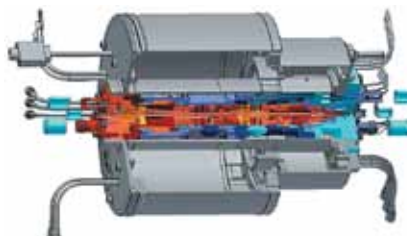


1. коаксиальные переходы;
2. волноводные переходы;
3. оптические переходы;
4. скользящие контакты (передача низкочастотных, цифровых и сигналов питания);
5. вращающиеся переходы для передачи охлаждающих жидкостей (эта возможность особенно актуальна для мощных АФАР, в частности корабельного базирования);
6. комплексные системы, позволяющие произвольно комбинировать все предыдущие типы переходов.

Каждый вращающийся переход, как правило, является заказным изделием, выполняющим специализированные функции и имеющим специально заданные характеристики. Поэтому ограничимся несколькими примерами уже реализованных этой компанией решений и описанием общих возможностей по разработке новых (табл. 2).

Отдельно хочется остановиться на таком решении, как оптические переходы вращения (рис. 8). Современная тенденция такова, что разработчики стараются выполнить преобразование аналоговых сигналов из эфира в цифровой код уже на вращающейся части, а передачу данной информации в централизованной блок обработки осуществлять по волоконно-оптической линии. Это позволяет получить целый ряд преимуществ перед традиционными коаксиальными либо волноводными линиями передачи:

1. Уменьшение габаритных размеров перехода вращения — например, 12-канальный оптический переход BN 54 95 82 имеет размеры: 118,2 мм в длину и всего 60 мм наружный диаметр в ширину.
2. Для применений, где требуется передавать сигнал с антенной системы на относительно большие расстояния (корабельная техника, авиация, оборудование обзора летного поля и т. д.), использование оптоволоконных линий позволяет это осуществлять практически без отрицательных последствий, в то время как применение коаксиальных или волноводных линий приводит к существенным ограничениям из-за потерь в линии передачи. Немаловажный фактор — улучшение электромагнитной совместимости такой линии передачи в плане как эмиссии электромагнитного поля, так и помехоустойчивости.

Таблица 2. Примеры реализованных компанией Spinner решений для АФАР производства США и Европы

	<p>3 канала ВЧ-сигналов: СН1: 9–10 ГГц; СН2, СН3: 1–1,1 ГГц А также 18 каналов передачи сигналов управления и питания.</p>
	<p>9 каналов ВЧ-сигналов: СН1: 2,85–3,35 ГГц (1500 кВт/20 кВт) СН2, СН3: 2,85–3,35 ГГц (20 кВт/200 Вт) СН4–СН7: 2,85–3,35 ГГц (10 кВт/100 Вт) СН8, СН9: 1–1,15 ГГц (10 кВт/70 Вт) А также 51 канал передачи сигналов управления и питания.</p>
	<p>3 канала ВЧ-сигналов: Н1: X-диапазон (1500 кВт/20 кВт) СН2, СН3: L-диапазон (20 кВт/200 Вт)</p>

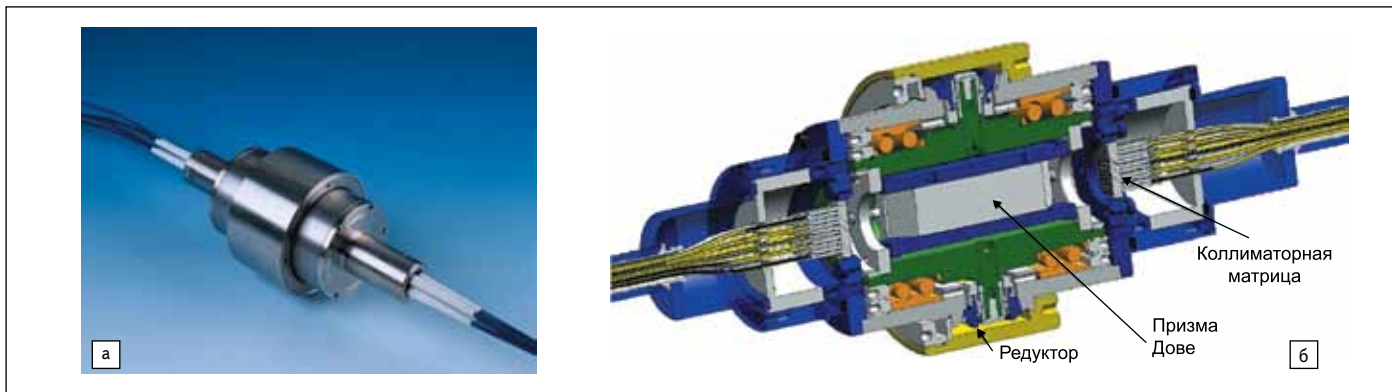


Рис. 8. Многоканальное вращающееся сочленение для передачи оптических сигналов: а) внешний вид; б) конструкция

3. Передача сигнала в цифровом виде исключает возможность его искажения в линии и существенно улучшает его помехозависимость.

Инженерами компании Spinner применяется технология реализации передачи оптического потока через элемент вращения путем использования призмы Дове и редуктора (рис. 9).

При вращении призмы Дове изображение поворачивается на угол в два раза больше, что позволяет направлять изображение в любом требуемом направлении. Таким образом, при использовании редуктора скоростей удалось добиться точного позиционирования лучей на ответной части перехода и возможности реализации вплоть до 42 каналов на один вращающийся переход (табл. 3).

Заключение

В заключение как этой статьи, так и всего цикла хочется отметить факт достаточно большого количества современных решений различной степени сложности и интеграции для реализации систем, базирующихся на принципе сканирования луча в фазированной решетке. Перед инженерами-разработчиками открывается огромное поле деятельности для создания комплексов с повышенными техническими и эксплуатационными характеристиками. ■

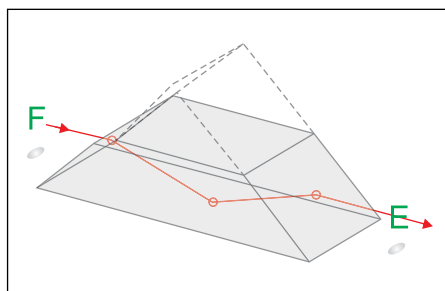


Рис. 9. Прохождение луча через призму Дове

Литература

1. www.radiant.su
2. Pat. US 6492911 B1. Capacitive displacement encoder / Netzer Y.; Assignee: Netzer Motion Sensors Ltd.; Date of patent: Dec. 10, 2002; Appl. No.: 09/294794; Filed: Apr. 19, 1999.
3. Pat. US 6788220 B2. Multi-speed capacitive displacement encoder / Netzer Y.; Assignee: Netzer Motion Sensors Ltd.; Date of patent: Sep. 7, 2004; Appl. No.: 10/282890; Filed: Oct. 29, 2002.
4. Pat. US 7126495 B2. Linear electric encoder with facing transmitter and receiver / Netzer Y.; Assignee: Sick Sensors Ltd.; Date of patent: Oct. 24, 2006; Appl. No.: 10/822094; Filed: Apr. 8, 2004.
5. Pat. US 8567229 B2. Method for calibrating a rotational angle sensor / Netzer Y.; Assignee: Sick Sensors Ltd.; Date of patent: Oct. 29, 2013; Appl. No.: 12/907057; Filed: Oct. 19, 2010.
6. www.netzerprecision.com
7. www.bastion-karpenko.narod.ru
8. www.militaryrussia.ru
9. www.spinner-group.com
10. Павлов С., Филиппов А. Антенные фазированные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей // Компоненты и технологии. 2014. № 7.
11. Ефремов В. Компонентная база для АФАР: высокочастотные соединители // Компоненты и технологии. 2014. № 9.
12. Воробьев С. Выбор элементной базы для систем вторичного электропитания приемопередающих модулей АФАР // Компоненты и технологии. 2014. № 10.

Таблица 3. Общие характеристики оптических вращающихся сочленений компании Spinner

Параметр	Значение
Количество каналов	1–42
Длина волны, нм	850, 1310, 1550, одно- либо многомодовые режимы
Типы входных/выходных соединителей	FC/PC, FC/APC, ST/PC, SC/PC, SC/APC, LC/PC, LC/APC, E-2000/PC, E-2000/APC, FSMA
Возвратные потери на отражение, дБ	55
Вносимые потери на прохождение, дБ	1
Девияция вносимых потерь при вращении, дБ	0,5
Максимальная скорость вращения, об/мин	2000
Гарантированный цикл работоспособности, оборотов	200 млн