

# Волновые редукторы Harmonic Drive

О. Сергеев<sup>1</sup>

УДК 621.83.061 | ВАК 05.27.00

Важными компонентами современных высокоточных электромеханических систем считаются редукторы, из них наиболее распространенными являются волновые редукторы, впервые представленные на рынке компанией Harmonic Drive более 45 лет назад. За прошедшее время ассортимент продукции компании многократно расширился, и разобраться в особенностях различных серий редукторов не всегда просто. Сегодня Harmonic Drive предлагает прецизионные волновые редукторы различных версий и вариантов исполнения для устройств и систем, где требуются компактное решение и высокая точность. Рассмотрим принцип действия и варианты конструкции волновых редукторов, преимущества технологии волновой передачи, особенности ключевых серий и основные параметры изделий компании Harmonic Drive.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВЫХ РЕДУКТОРОВ

В состав волновой зубчатой передачи классической конструкции входят три основных элемента: генератор волны, гибкое кольцо и жесткое кольцо. С точки зрения конструкции генератор волны – это тонкостенный шарикоподшипник, напрессованный на эллиптическую втулку. Гибкое кольцо – тонкостенное зубчатое колесо с внешним зубом. Когда при сборке внутрь кольца устанавливается генератор волны, то оно деформируется, принимая форму генератора. Жесткое кольцо представляет собой зубчатое кольцо с внутренним зубом. Количество зубьев жесткого кольца обычно на два меньше, чем у гибкого кольца (несколько реже делают разницу в четыре зуба). При сборке волнового редуктора гибкое кольцо, установленное на генератор волны, помещается внутрь жесткого кольца. Зубья жесткого кольца и гибкого кольца входят в зацепление в двух зонах, которые располагаются на большой полуоси генератора волны.

По мере поворота генератора волны зоны зацепления зубьев смещаются по окружности жесткого кольца. Из-за того, что количество зубьев на гибком и жестком кольце различно, то, после того как генератор волны поворачивается на 360°, гибкое кольцо оказывается смещено относительно жесткого, при этом величина смещения соответствует разнице в числе зубьев этих колес. Если жесткое кольцо неподвижно, то при быстром вращении генератора волны получаем медленное вращение гибкого кольца. Устройство в этом случае является понижающим редуктором: генератор волны является входом, гибкое кольцо – выходом, а жесткое кольцо – корпусом.

Изменив входные и выходные элементы волнового редуктора, устройство можно, например, преобразовать в повышающий редуктор или поменять направление вращения выхода относительно входа. Третий элемент волнового редуктора не всегда остается неподвижным. Если он также приводится во вращение, то устройство работает в качестве дифференциального редуктора.

Конструкция волнового редуктора обеспечивает отсутствие люфта, что позволяет использовать устройство в различных областях техники, требующих точной передачи вращения. Конкретное применение волновых редукторов накладывает особые требования к конструкции устройства, что определяет широкий ассортимент редукторов в каталоге Harmonic Drive.

## ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ РЕДУКТОРОВ

По конструкции все волновые редукторы, предлагаемые заказчикам, можно разделить на несколько групп. Самые простые по конструкции редукторы – это установочные комплекты. Они включают в себя три основные детали редуктора, подогнанные друг к другу, но не собранные в единое изделие. Подшипники в такой комплектации отсутствуют, что позволяет при интеграции редуктора в конечное изделие установить именно те, которые оптимальным образом подходят для конкретного применения. Такая возможность дает преимущество в случае, когда подшипники стандартных готовых редукторов не устраивают по тем или иным параметрам. Вал в такой комплектации также отсутствует (нет ни полого, ни сплошного вала). Некоторые серии установочных комплектов снабжаются кулачково-дисковой муфтой на генераторе волны для компенсации несоосности вала. Такая конструкция обеспечивает высокую гибкость

<sup>1</sup> Компания «АВИ Солюшнс», руководитель технического отдела, тел. +7 812 703-00-66, sergeev@avi-solutions.com.

в проектировании конечной системы и позволяет оптимально состыковать волновой редуктор с остальной частью системы.

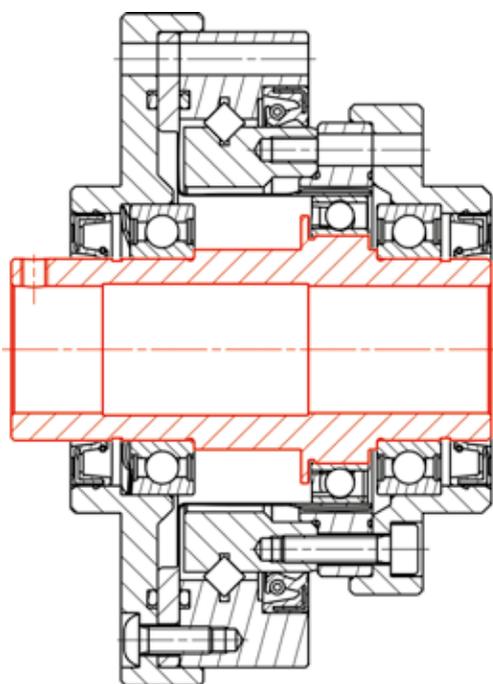
Вторая группа по конструктивному исполнению – редукторы в исполнении «модуль». Эти редукторы представляют собой полностью собранные изделия с установленными подшипниками, дополнительными корпусными деталями и зачастую с установленным валом – полым или сплошным. Несмотря на то что полностью собранные изделия не дают в построении системы такой же гибкости, как установочные комплекты, использование их упрощает конструирование благодаря отсутствию необходимости установки подшипников и вала. Еще одна особенность этого конструктивного исполнения – отсутствие сплошного наружного корпуса у редуктора.

Третья группа по конструктивному исполнению – корпусированные редукторы. Они, так же как и модули, представляют собой полностью собранные изделия, однако, в отличие от них, имеют наружный корпус. Корпусные редукторы всегда снабжаются подшипниками, входным и зачастую выходным валом. Полый вал в таких редукторах в настоящее время отсутствует.

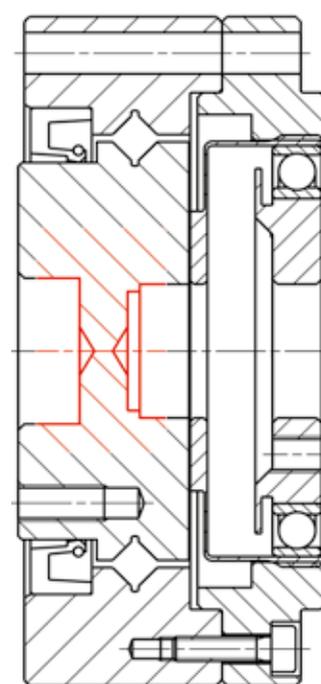
Еще одна важная для конкретного применения особенность, которая отличает серии редукторов – это наличие полого вала. Самый простой вариант – полый вал реализован как отдельный конструктивный элемент в стандартном каталожном исполнении редуктора, как, например, в редукторе серии HFUS-2UH (рис. 1). Второй вариант – полый вал не предусмотрен в конструкции, как, например, в редукторе серии CSD-2UH (рис. 2).

Третий вариант конструкции – полый вал не установлен, но имеется сквозное отверстие, позволяющее это сделать без дополнительной модификации редуктора. Пример – редуктор SHD-2UH (рис. 3). В ряде серий редукторов полый вал отсутствует, и на генераторе волны имеется кулачково-дисковая муфта с втулкой со шпоночным пазом для установки

**Рис. 3.** Конструкция волнового редуктора с возможностью установить полый вал

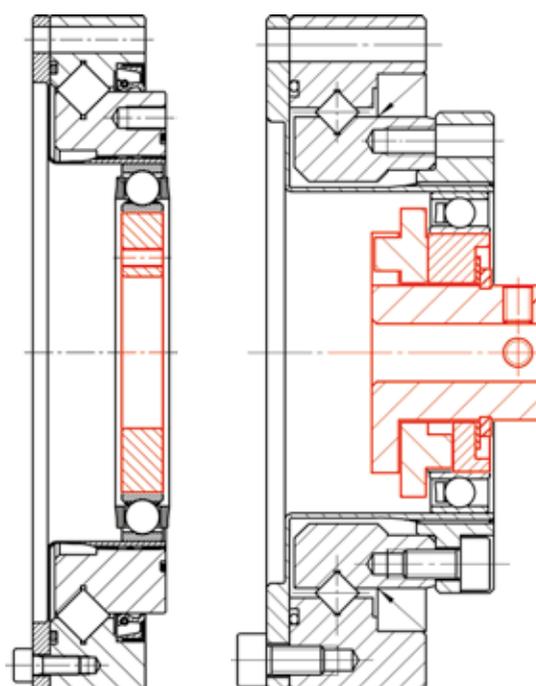


**Рис. 1.** Конструкция волнового редуктора с полым валом (выделен цветом)



**Рис. 2.** Конструкция волнового редуктора без полого вала

на вал двигателя со шпонкой. Примером может служить CobaltLine-2UH (рис. 4). В таких редукторах полый вал установить можно только при наличии заказной модификации редуктора без входных элементов на генераторе волны (снимаются муфта и втулка).



**Рис. 4.** Конструкция волнового редуктора, в котором требуется доработка для установки полого вала

## ОСНОВНЫЕ СЕРИИ УСТАНОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ

В каталоге Harmonic Drive в настоящее время представлено шесть серий редукторов в исполнении «установочный комплект». Все эти серии отличаются по различным параметрам, в частности, по производительности. Можно выделить группу серий с базовой производительностью: HFUC-2A, HFUS-2A и CPL-2A. Серия HFUC представлена в самом широком диапазоне габаритов (типоразмеров): от 8 до 100, что касается других параметров, то она занимает среднее положение. Гибкое кольцо выполнено в классической форме «кастрюля».

Серия HFUS имеет несколько иную конструкцию: гибкое кольцо выполнено в форме «шляпа», что обеспечивает больше пространства внутри редуктора. Однако по этой причине наружный диаметр и масса редукторов HFUS-2A несколько увеличены по сравнению с аналогичными редукторами HFUC-2A. Серия установочных комплектов CPL-2A (рис. 5) была разработана для применения в авиационных и космических системах, где требуются минимальные размеры и масса. При разработке была проведена оптимизация конструкции, благодаря чему масса и длина редуктора были уменьшены, и при этом удалось сохранить на прежнем уровне номинальный момент.

Еще одна группа серий отличается увеличенной производительностью: номинальный момент у них выше, чем у серий с базовой производительностью. К таким сериям относятся CSG-2A и CobaltLine-2A. Обе серии, помимо повышенного (примерно на 30%) номинального момента, имеют также значительно (на 40%) увеличенный срок службы, в отличие от серий базовой производительности. По остальным параметрам и конструкции эти две серии идентичны, только производятся в разных странах: CSG-2A – в Японии, CobaltLine-2A – в Германии.

Кроме двух перечисленных выше групп серий, есть еще одна группа редукторов, отличающихся пониженной

производительностью для тех же типоразмеров. В настоящее время к этой группе относится только одна серия – CSD-2A. Эта серия имеет пониженную массу (на 40% по сравнению с HFUC) и значительно меньшую осевую длину (на 50%). Эта серия по длине компактнее серии CPL-2A (у последней длина меньше, чем у HFUC, всего на 10%), однако за это приходится расплачиваться более низкой производительностью.

Поскольку установочные комплекты содержат в себе необходимый минимум компонентов, а остальные детали добавляются при интеграции редуктора в конечное изделие, то полый вал, как элемент конструкции, также отсутствует. Он может быть установлен непосредственно в конечное изделие, если это необходимо. Кроме того, следует отметить, что установочные комплекты поставляются без подшипников, которые также должны быть установлены в конечное изделие.

## ОСНОВНЫЕ СЕРИИ МОДУЛЕЙ

Ассортимент волновых редукторов в исполнении «модуль», выпускаемых компанией Harmonic Drive, существенно более широк, чем установочных комплектов. Так же как и установочные комплекты, они могут быть разделены на несколько групп по производительности и по наличию или отсутствию полого вала.

Среди волновых редукторов в исполнении «модуль» полый вал отсутствует в 10 сериях (две серии со входным валом, одна серия без отверстия в центре редуктора, остальные – со входным элементом под вал со шпонкой). Из них четыре серии относятся к группе базовой производительности. Серия HFUC-2UH здесь тоже выступает в роли базовой: со средним уровнем параметров и самым широким диапазоном габаритов. Серия HFUS-2SO имеет форму генератора волны («шляпа») и уменьшенную осевую длину. Серии CPU-S и CPU-M отличаются входным элементом – входной вал и втулка со шпоночным пазом для установки на двигатель соответственно. Кроме того, они имеют расширенный диапазон температур и массу, увеличенную по сравнению с HFUC-2UH.

К редукторам повышенной производительности среди серий в исполнении «модуль без полого вала» можно отнести пять серий: SHG-2SO, CSG-2UH, CobaltLine-2UH (рис. 6), CobaltLine-CPS и CobaltLine-CPM. Все представители этой группы имеют увеличенный номинальный момент (на 30%) и срок службы (на 40%) по сравнению с сериями базовой производительности. SHG-2SO при этом является развитием серии редукторов HFUS-2SO: размеры редукторов одинаковы, отличаются только момент и срок службы. Аналогичная ситуация и с редукторами CSG-2UH и HFUC-2UH: разница в конструкции и размерах минимальна. Серия CobaltLine-2UH имеет по сравнению с CSG-2UH расширенный диапазон



**Рис. 5.**  
Волновой редуктор в исполнении «установочный комплект» серии CPL-2A



Рис. 6. Волновой редуктор в исполнении «модуль» серии CobaltLine-2UH

рабочих температур. CobaltLine-CPM и CobaltLine-CPH представляют собой варианты с входным валом и для непосредственной установки на двигатель.

К группе серий с пониженной производительностью среди модулей без полого вала относится только одна серия – CSD-2UH (рис. 7). Эта серия наряду с меньшим на 30% номинальным моментом имеет меньшие диаметр, осевую длину и массу по сравнению с HFUC-2UH.

Среди волновых редукторов в исполнении «модуль» есть группа серий с полым валом (или с возможностью его легко установить). Из имеющихся в каталоге десяти серий подобных редукторов полый вал физически установлен в шести сериях и еще в двух есть возможность его установки без дополнительных модификаций. Из этих серий три: HFUS-2UH, HFUS-2SH и CPU-H – можно отнести к группе изделий со средней производительностью. Обе упомянутые серии редукторов HFUS имеют более низкую входную скорость (на 70%) и более высокую массу (до 60%), чем, например, у HFUC-2UH. При этом HFUS-2SH имеет более короткую конструкцию. Серия редукторов CPU-H имеет усиленные подшипники и расширенный диапазон рабочих температур, а также пониженную входную скорость.

Три серии редукторов в исполнении «модуль с полым валом» можно отнести к группе серий повышенной производительности: SHG-2SH, SHG-2UH и CobaltLine-CPH. Первые две серии являются развитием HFUS-2SH и HFUS-2UH,

соответственно, с увеличенными номинальным моментом (на 30%) и сроком службы (на 40%). Аналогичным образом CobaltLine-CPH является улучшенной версией редуктора CPU-H с увеличенным номинальным моментом и сроком службы.

Две серии редукторов в исполнении «модуль с полым валом» имеют пониженную производительность. Это серии SHD-2SH (рис. 8) и CSD-2UF. По сравнению с сериями стандартной производительности они имеют укороченную конструкцию и номинальный момент, сниженный на 30%. Кроме того, масса редукторов серии SHD-2SH меньше серии CSD-2UF.

### КОРПУСНЫЕ МАЛОГАБАРИТНЫЕ РЕДУКТОРЫ

В отдельную группу изделий можно выделить волновые редукторы, заключенные в сплошной наружный корпус. Сегодня в каталоге представлены две серии редукторов в таком исполнении: PMG и CSF Mini (рис. 9). Обе серии выпускаются в виде малогабаритных редукторов – их габарит не превосходит 14, в то время как установочные комплекты и модули в подавляющем большинстве выпускаются в более крупных габаритах (14 и выше).

Серия PMG выпускается в двух вариантах: PMG-M (для установки на двигатель) и PMG-S (со входным валом). На выходе в обоих случаях установлен вал. Серия CSF Mini выпускается в шести вариантах, отличающихся типом входного и выходного элемента, а также крепежного фланца: выходной вал или фланец, входной вал или втулка под вал со шпонкой, а также широкий или узкий крепежный фланец.



Рис. 7. Волновой редуктор в исполнении «модуль» серии CSD-2UH



Рис. 8. Волновой редуктор в исполнении «модуль» серии SHD-2SH

### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЛНОВЫХ РЕДУКТОРОВ

Следует отметить, что подход к определению параметров редукторов у разных производителей немного отличается друг от друга, поэтому рассмотрим ключевые параметры волновых редукторов, которые компания Harmonic Drive устанавливает для своих изделий.

Во-первых, **габарит (типоразмер)** – число, определяющее размеры редукторов в рамках одной серии. Для волновых редукторов Harmonic Drive это число соответствует диаметру гибкого кольца, выраженному в десятых долях дюйма. По этой причине, число, характеризующее габарит волнового редуктора, тесно связано с крутящим моментом, который может развить редуктор (в отличие от тех вариантов, когда число, характеризующее габарит, соответствует какому-либо наружному размеру редуктора). Поэтому многие серии редукторов имеют не просто похожую производительность, а и точно совпадающие значения моментов для одинаковых габаритов.

**Передаточное число (редукция)** определяет соотношение входной и выходной скорости. Значение этого параметра в каталоге приводится для следующего варианта установки редуктора: генератор волны – вход, гибкое

кольцо – выход, жесткое кольцо – неподвижно. Практически доступный диапазон передаточных чисел ограничен значениями от 30 до 160.

Производительность редуктора определяется моментом и скоростью, с которыми он может работать. Для волновых редукторов компания Harmonic Drive в каталоге помещает четыре различных момента. **Максимальный повторяющийся пиковый момент** указывает на предельные значения динамических нагрузок, максимально допустимых в рабочем цикле. **Средний допустимый момент** определяет предельные значения момента на

грузки, допустимые в продолжительном режиме работы. **Номинальный момент** используется при расчетах срока службы редуктора и не применяется как характеристика производительности редуктора. **Кратковременный импульсный момент** – это момент, который может быть приложен к редуктору при аварийном торможении на протяжении очень короткого времени. Приложение к редуктору такого момента допустимо всего несколько раз за весь срок службы.

Скорость, которую может развивать редуктор, характеризуется двумя параметрами – для работы при различной смазке: жидкой и консистентной. Значения скорости определяются на входе редуктора. **Максимальная скорость** указывает на предельно допустимое значение скорости в кратковременных режимах работы. **Средняя входная скорость** – предельно допустимое значение скорости в продолжительном режиме работы. Оба параметра имеют разные значения для работы при различной смазке: более высокие при жидкой смазке и более низкие – при консистентной. Необходимо отметить, что редуктор с консистентной смазкой – это стандартное каталожное решение, которое не требует реализации дополнительных

конструкторских мер, в то время как редуктор с жидкой смазкой – это дополнительная возможность, выходящая за пределы стандартных решений, и в этом случае потребуются создание резервуара для смазки (как минимум).

**Диапазон рабочих температур** определяется главным образом смазкой и по этой причине не указывается для редукторов в исполнении «установочный комплект», которые поставляются без рабочей смазки. ●



Рис. 9. Волновые редукторы в корпусном исполнении серии CSF Mini