

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000030044
Data Deposito	26/11/2021
Data Pubblicazione	26/05/2023

Classifiche IPC

Titolo

NUOVO RIDUTTORE ARMONICO A STRUTTURA COMPATTA REALIZZATO CON MATERIALE PLASTICO

Descrizione dell'invenzione industriale avente per titolo:

“NUOVO RIDUTTORE ARMONICO A STRUTTURA COMPATTA REALIZZATO CON MATERIALE PLASTICO”,

a nome: ERGOTECH s.r.l., di nazionalità italiana e

con sede in: Strada Statale 26, n° 1/bis - 10010 Settimo Vittone (TO).

Inventori designati: DINI Maurizio, GAIDA Gabriele, PERETTO, Gabriele.

* * *

Campo dell'invenzione

La presente invenzione riguarda in generale il settore dei riduttori di velocità, ovvero di quei dispositivi, solitamente comprendente una serie di ingranaggi alloggiati all'interno di una carcassa o guscio e ingranati fra di loro, che riducono una velocità di rotazione da un albero rotante di ingresso, o albero motore o veloce, a un albero rotante di uscita, o albero condotto o lento, e più in particolare essa riguarda un nuovo e innovativo riduttore del tipo armonico che si caratterizza, come illustrato in dettaglio nel seguito, per avere i suoi componenti essenziali che sono realizzati per stampaggio di un materiale plastico e per una configurazione e struttura molto compatta e resistente.

Sfondo dell'invenzione e stato della tecnica nota

Come noto, un tipico riduttore armonico, anche chiamato in inglese “strain wave gearing” o anche “harmonic drive” o “harmonic reducer”, inventato da C. Walton Musser nel 1959, comprende tre componenti essenziali e di base, ovvero:

- un primo elemento dentato, anche chiamato in inglese “Circular Spline” e pertanto con l'acronimo CS, rigido, a forma di anello dentato internamente;
- un secondo elemento dentato, anche chiamato in inglese “Flex Spline” o “Flexible Spline” e pertanto con l'acronimo FS, flessibile e deformabile, solitamente avente

una forma a tazza o campana dentata esternamente, con un numero di denti leggermente inferiore, tipicamente due, rispetto a quello dei denti interni del primo elemento dentato CS, e

- un generatore di onda, anche chiamato in inglese “Wave Generator” pertanto con l’acronimo WG,

in cui, nel funzionamento del riduttore armonico, il generatore di onda o wave generator WG, ruotando coassialmente al primo elemento dentato rigido o circular spline CS, coopera con una sottile parete anulare, deformabile, del secondo elemento dentato o flex spline FS, in modo da deformare la rispettiva dentatura esterna da una configurazione circolare a una configurazione leggermente ellittica e pertanto premerla contro la dentatura interna del primo elemento dentato o circular spline CS, rigido, così da generare un’onda di deformazione anche chiamata in inglese “strain wave”, esibente un andamento armonico, che si propaga lungo la dentatura del secondo elemento dentato o flex spline FS e determina un avanzamento di almeno due zone di ingranamento fra i denti dei due elementi dentati flex spline FS e circular spline CS, che a sua volta determina una rotazione relativa del secondo elemento dentato o flex spline FS, flessibile, con un minore numero di denti, in senso opposto rispetto al primo elemento dentato o circular spline CS, rigido, ad una velocità angolare notevolmente ridotta rispetto a quella del generatore di onda o wave generator WG che opera da albero e organo di ingresso.

Pertanto il funzionamento di questo riduttore armonico è primariamente basato sulla deformazione elastica della flex spline FS a sua volta indotta dal moto e dalla rotazione del wave generator WG, avente un profilo di forma ellittica, che può essere costituito da un singolo elemento di forma ellittica, oppure, come nella maggior parte delle applicazioni, da un cuscinetto con una serie di sfere girevoli di piccole dimensioni

disposte lungo la periferia del wave generator in modo che il loro involucro definisca il profilo ellittico desiderato.

La speciale forma ellittica del wave generator WG è indispensabile affinché la flex spline FS, flessibile ed elasticamente deformabile, possa impegnarsi nella dentatura della circular spline CS, rigida, senza produrre un'interferenza ma recuperandola nella direzione ortogonale a quella lungo la quale si verifica l'ingranamento.

Nella maggior parte delle applicazioni di questi riduttori armonici, la flex spline FS è solidale con l'elemento che trasmette il moto all'esterno, alla velocità angolare ridotta, ed è costituita da una campana, la cui flessibilità è determinata dalla sua altezza e dal suo spessore.

Questa geometria e configurazione della flex spline FS, che è tipica dei riduttori armonici che sono costruiti in acciaio armonico, ha il vantaggio di consentire di realizzare dentature di materiale rigido, ma comporta un certo ingombro determinato dalla campana che si sviluppa in direzione assiale.

E' anche chiaro che, al fine di realizzare un buon riduttore armonico, ovvero capace di funzionare correttamente nel tempo, la flex spline FS gioca un ruolo determinante e da un lato deve essere sufficientemente rigida nella zona della dentatura in modo da garantire un corretto ingranamento e la trasmissione della coppia, e da un altro lato deve anche essere sufficientemente elastica e flessibile così da rendere possibile il progressivo ingranamento nella circular spline CS, fissa, ed evitare contemporaneamente l'interferenza con i denti della stessa in direzione normale a quella di ingranamento.

Inoltre, è necessario e fondamentale che la deformazione della flex spline FS sia sempre di natura elastica in modo da garantire la massima efficienza del riduttore armonico e una buona resistenza a fatica.

Per chiarezza la Fig. 10, suddivisa nelle sezioni (a)-(g), mostra in forma prospettica, separata e assemblata, le parti fondamentali, prima illustrate, ovvero la circular spline CS, la flex spline FS e il wave generator WG, di un tipico riduttore armonico, indicato nel complesso con HD, dall'inglese "Harmonic Drive", conforme alla tecnica nota, come anche il modo in cui queste parti fondamentali cooperano fra di loro nel funzionamento del riduttore armonico HD.

Inoltre per una completa informazione, con riferimento allo schema di Fig. 10 - sez. (h), sono illustrate nel seguito le formule di base di un tipico riduttore armonico, ed in particolare la formula che ne definisce il rapporto di ingranamento.

In questa schematizzazione di Fig. 10 – sez. (h), il wave generator WG è collegato a un servomotore che lo pone in movimento attorno ad un asse longitudinale del riduttore armonico, la circular spline CS è fissa, mentre la flex spline FS è solidale con una utenza ovvero con un organo, ad esempio costituito dal braccio di un robot, comandato ad una rotazione ridotta dal riduttore armonico.

Pertanto, supponendo di riferirsi ad un sistema di riferimento solidale con il wave generator WG, vale la formula:

$$\frac{\omega_{CS} - \omega_{WG}}{\omega_{FS} - \omega_{WG}} = \frac{Z_{FS}}{Z_{CS}},$$

con $\omega_{CS} = 0$;

dove :

ω_{CS} è la velocità angolare della circular spline CS;

ω_{FS} è la velocità angolare della flex spline FS;

ω_{WG} è la velocità angolare del wave generator WG;

Z_{FS} è il numero di denti della flex spline FS;

Z_{CS} è il numero di denti della circular spline CS.

Quindi, sviluppando tale formula, si ottiene:

$$\frac{\omega_{WG}}{\omega_{FS}} = \frac{Z_{FS}}{Z_{FS} - Z_{CS}},$$

da cui la seguente formula del rapporto di ingranamento I del riduttore armonico HD:

$$I = \frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} = \frac{\omega_{WG}}{\omega_{FS}} = \frac{Z_{FS}}{Z_{FS} - Z_{CS}},$$

dove:

ω_{FS} è la velocità angolare della flex spline FS;

ω_{input} è la velocità angolare di ingresso, ovvero del wave generator WG, del riduttore armonico HD;

ω_{output} è la velocità angolare di uscita, ovvero della flex spline FS, del riduttore armonico HD

Si fa notare come il rapporto di ingranamento I sia negativo ad indicare che il verso di rotazione del wave generator WG, all'ingresso del riduttore armonico HD, e quello della flex spline FS mobile, all'uscita del riduttore armonico HD, sono opposti.

Attualmente questi riduttori armonici, grazie alla loro compattezza e ridotte dimensioni, l'elevato rapporto di trasmissione, la coassialità fra albero di ingresso e albero di uscita, i giochi ridotti al minimo grazie al numero esiguo di componenti e parti di cui sono composti, altre vantaggiose caratteristiche e prestazioni, trovano un sempre più largo impiego in settori industriali di avanguardia quali la robotica, l'automazione collaborativa, e l'industria aerospaziale.

Per completezza si citano nel seguito alcuni documenti brevettuali, trovati tramite una ricerca condotta consultando le specifiche banche dati dei brevetti e pertanto rappresentativi della tecnica nota in questo campo dei riduttori armonici : WO 2021/098903 A1, US 2021/0138667 A1, US 10,883,592 B2, WO 2020/074039 A1, CN

109623819 A, CN 108115658 A, WO 2018/000995 A1, US 8,776,638 B2, US 6,736,028 B2, US 2003/0089194 A1, EP 1 261 814 B1, US 6,202,509 B1.

Questi brevetti indicano come la tecnologia dei riduttori armonici si sia evoluta ovvero sia stata oggetto di continui sviluppi e perfezionamenti nel tempo fino ad oggi, a partire da quando C. Walton Musser ebbe l'idea di base ed inventò il riduttore armonico.

Inoltre da questi stessi brevetti si evince, come già anticipato, che questi riduttori armonici stanno avendo una sempre più ampia ed estesa applicazione in settori industriali avanzati e di avanguardia quali la robotica, dove i riduttori armonici si prestano ad essere vantaggiosamente utilizzati nelle zone dei giunti e delle articolazioni fra i bracci dei robot, e in quello dell'automazione e della logistica in generale.

Comunque si osserva come, almeno in generale, i riduttori armonici attualmente offerti dalla tecnica nota e disponibili nel mercato implicano un rilevante costo di realizzazione, pertanto tale da limitarne potenzialmente o anche escluderne l'applicazione in certi settori e campi industriali nei quali invece questi riduttori armonico potrebbero essere vantaggiosamente applicati qualora fossero più convenienti, ovvero implicassero un costo di fabbricazione più basso e più competitivo di quello attuale.

Pertanto, nel suddetto contesto, gli inventori hanno percepito che in questo speciale campo dei riduttori armonici era possibile andare oltre ed innovare rispetto alla tecnica nota, ed in particolare era possibile favorire e incrementare l'utilizzo di questi dispositivi in un numero sempre maggiore di applicazioni e settori industriali ottimizzandone e riducendone il costo di fabbricazione industriale, e che, a questo scopo, la realizzazione delle parti essenziali di un riduttore armonico poteva vantaggiosamente beneficiare della tecnologia dello stampaggio a iniezione di materiale plastico.

In particolare, nella percezione degli inventori, le parti fondamentali e di base, prima descritte in dettaglio, di un riduttore armonico presentano e richiedono caratteristiche, per quanto riguarda sia la loro configurazione sia il materiale con cui devono essere realizzate, e più nello specifico il rispettivo elemento dentato deformabile o flex spline, parte fondamentale del riduttore armonico, richiede una adatta e appropriata flessibilità ed elasticità, tali per cui queste parti fondamentali possono essere vantaggiosamente fabbricate e prodotte per stampaggio ad iniezione di materiale plastico, o in generale con tecnologie di produzione collegate allo stampaggio a iniezione di materiale plastico nel quale opera ed eccelle la richiedente ERGOTECH s.r.l. .

Sommario dell'invenzione

Pertanto un primo scopo, più generale, della presente invenzione è rendere disponibile un nuovo riduttore armonico che vada incontro alle esigenze e aspettative, quali prima illustrate, del mercato, attualmente in notevole e rapida espansione, di questi speciali riduttori e dispositivi, ovvero realizzare una nuova generazione di riduttori armonici esibenti una più elevata qualità e migliori prestazioni rispetto a quelli ora in uso e nello stesso tempo atti ad essere prodotti in modo industriale e a costi contenuti.

Un secondo scopo, collegato al primo, della presente invenzione è anche realizzare un nuovo e innovativo riduttore armonico le cui parti fondamentali, ovvero la circular spline, la flexible spline e il wave generator, siano producibili a costi industriali competitivi e nello stesso tempo con un elevato livello di qualità, così da favorirne e ampliarne l'applicazione in molteplici campi, e che a questo fine, ovvero in particolare per la produzione delle rispettive parti fondamentali, si avvalga vantaggiosamente della tecnologia dello stampaggio a iniezione di materiale plastico, ormai da tempo affermatasi per produrre parti e componenti in molteplici settori industriali.

Un altro scopo, collegato ai precedenti, della presente invenzione è anche proporre e realizzare un nuovo riduttore armonico esibente una configurazione molto solida, resistente e compatta, come anche tale da implicare un ingombro limitato, così da consentire una facile e vantaggiosa integrazione del riduttore armonico in strutture più ampie.

Ancora un ulteriore scopo, anch'esso collegato ai precedenti, della presente invenzione è proporre e realizzare un nuovo riduttore armonico atto ad essere vantaggiosamente integrato lungo linee di comando e trasmissione del moto, in particolare al fine di assicurare una precisa ed affidabile trasmissione del moto, ad esempio nelle zone degli snodi e delle articolazioni dei bracci di una apparecchiatura di robotica o simile.

I suddetti scopi si possono considerare pienamente raggiunti dal riduttore armonico avente le caratteristiche definite dalla prima rivendicazione principale indipendente.

Forme particolari di realizzazione del sistema di stampaggio ad iniezione dell'invenzione sono inoltre definite dalle rivendicazioni dipendenti.

Vantaggi dell'invenzione

Il nuovo riduttore armonico dell'invenzione, grazie alle sue speciali e uniche caratteristiche e come si evincerà dal seguito della descrizione, presenta numerosi e rilevanti vantaggi, in parte già prima implicitamente annunciati, fra i quali si citano a puro fine semplificativo:

- una struttura solida, resistente e compatta;
- un costo di produzione competitivo, senza che questo costo vantaggioso sia a scapito della qualità del riduttore armonico prodotto;

- capacità di operare con rapporti di trasmissione molto elevati, non dissimili da quelli dei riduttori armonici noti ed attualmente disponibili nel mercato;
- possibilità di integrare il riduttore armonico in e lungo linee di comando e trasmissione del movimento che richiedono comandi e movimenti molto precisi ed affidabili;
- possibilità di produrre il riduttore armonico in modo industriale con costi ridotti e ottimizzati;
- un agevole e rapido assemblaggio delle parti di cui il riduttore armonico è costituito;
- una agevole e facile integrabilità in strutture e macchine più ampie e complesse, in vari settori industriali e in particolare nel settore della robotica;
- assenza di giochi fra le parti e i componenti di cui il riduttore armonico è costituito, così trasmettere il moto in modo estremamente preciso;
- funzionamento affidabile e limitata usura nel tempo;
- ridotti se non nulli costi di manutenzione.

Breve descrizione dei disegni

Questi ed altri scopi, caratteristiche e vantaggi della presente invenzione risulteranno in modo chiaro ed evidente dalla seguente descrizione di una sua forma preferita di realizzazione, fatta a puro titolo di esempio non limitativo con riferimento agli annessi disegni, in cui:

Fig. 1 è una vista assonometrica esplosa di un riduttore armonico conforme alla presente invenzione;

Fig. 2A è una prima vista schematica in sezione longitudinale del riduttore armonico di Fig. 1 conforme alla presente invenzione;

Fig. 2B è una seconda vista schematica in sezione longitudinale dei componenti fondamentali del riduttore armonico di Fig. 1 e in particolare di una rispettiva circular spline, a sua volta suddivisa in una circular spline fissa e in una circular spline mobile, dentate internamente, e di una rispettiva flex spline, dentata esternamente;

Fig. 3 è una immagine grafica tridimensionale della flex spline di Fig. 2B;

Fig. 4 è un'immagine grafica tridimensionale di un gruppo costituito dalla circular spline fissa e dalla flex spline di Figg. 2B e 3, e da un wave generator incluso nel riduttore armonico di Fig. 1;

Fig. 5, suddivisa nelle sezioni (a) e (b), è costituita da due immagini grafiche tridimensionali che mostrano da due punti di osservazione diversi un gruppo costituito dalla flex spline e dal wave generator di Fig. 4;

Fig. 6, suddivisa nelle sezioni (a) e (b), è costituita da due viste in sezione trasversale del riduttore armonico dell'invenzione che mostrano lo sfasamento tra le dentature interne della rispettiva circular spline fissa e della rispettiva circular spline mobile;

Fig. 7, suddivisa nelle sezioni (a) e (b), è uno schema che illustra come può essere scelto il numero di denti delle dentature della flex spline e della circular spline mobile del riduttore armonico dell'invenzione;

Fig. 8, suddivisa nelle sezioni (a)-(f), mostra alcuni disegni costruttivi e le dimensioni salienti dei componenti fondamentali del riduttore armonico dell'invenzione;

Fig. 9, suddivisa nelle sezioni (a)-(c), mostra le simulazioni di alcune parti, quale ad esempio la flex spline, deformabile elasticamente, del riduttore armonico dell'invenzione, che sono state eseguite durante la sua progettazione;

Fig. 10, suddivisa nelle sezioni (a)-(g), è una serie di immagini grafiche che mostrano le parti fondamentali, la configurazione e il funzionamento di un tipico riduttore armonico conforme alla tecnica nota; e

Fig. 10 – sez. (h) è uno schema, a integrazione delle immagini grafiche di Fig. 10 – sez. (a)-(g), che illustra la configurazione di un tipico riduttore armonico conforme alla tecnica nota;

Descrizione dettagliata di una forma preferita di realizzazione del riduttore armonico dell'invenzione

Con riferimento ai disegni e in particolare alla rispettive Figg. 1, 2A e 2B un riduttore armonico realizzato in conformità alla presente invenzione è indicato nel complesso e in generale con 10 e comprende:

- un guscio esterno 10', fisso; e
- tre componenti o parti fondamentali, alloggiato nel guscio esterno 10', costituite rispettivamente da:
 - una prima parte o circular spline, indicata con 20 o CS (dall'inglese Circular Spline), rigida, avente una rispettiva dentatura interna;
 - una seconda parte o flex spline, indicata con 30 o FS (da Flexible Spline), flessibile e elasticamente deformabile, dentata esternamente, atta a trasmettere il moto nel riduttore armonico 10; e
 - una terza parte o generatore di onda o wave generator, indicata con 40 o WG (da Wave Generator); e
- un motore elettrico, indicato con 50 e anch'esso alloggiato nel guscio esterno 10', fisso, atto a comandare la rotazione del wave generator 40 attorno ad un asse longitudinale X-X del riduttore armonico 10, come indicato da una freccia f1 in Fig. 2A.

Il motore elettrico 50 ha uno statore 50a solidale con il guscio esterno 10', fisso, e un rotore 50b, solidale con un corpo centrale di supporto, indicato con 40', della terza

parte o wave generator (40, WG), per comandarlo in rotazione attorno all'asse X-X del riduttore armonico 10.

Inoltre un coperchio 10'' ha la funzione di chiudere il guscio esterno 10' del riduttore armonico 10, con tutti le rispettive parti e componenti 20, 30, 40 e 50, prima elencati, alloggiati all'interno dello stesso guscio esterno 10'.

Secondo una caratteristica saliente della presente invenzione, il riduttore 10 presenta una configurazione innovativa, in cui la prima parte o circular spline 20 è una doppia circular spline ed in particolare è costituita da una prima circular spline fissa, indicata nei disegni con 20a, solidale con il guscio esterno 10' del riduttore armonico 10, e da una seconda circular spline mobile, indicata con 20b, solidale con un'utenza U del riduttore armonico 10 schematizzata con linee a tratto e punto in Fig. 2A, con ciascuna di queste prima e seconda circular spline 20a, 20b avente una rispettiva dentatura interna 20a', 20b'.

La dentatura interna 20a' della prima circular spline fissa 20a, solidale con il guscio esterno 10', ha un numero di denti pari a quello della dentatura esterna 30' della flex spline 30, mentre la dentatura interna 20b' della seconda circular spline mobile 20b, solidale con l'utenza U, ha alcuni denti in più, in particolare due, rispetto a quelli della dentatura interna 20' della prima circular spline fissa 20a.

Anche la flex spline 30 presenta una innovativa configurazione, a cinghia dentata esternamente, con una superficie interna, liscia, indicata con 30'', e con una dentatura esterna 30' che è ingranata per una metà con la dentatura interna 20a' della prima circular spline fissa 20a e per un'altra metà con la dentatura interna 20b' della seconda circular spline mobile 20b.

Il wave generator 40 a sua volta ha un primo gruppo, indicato con 40a, di cuscinetti girevoli attorno al proprio asse, supportati dal corpo centrale di supporto 40', e

un secondo gruppo, indicato con 40b, di cuscinetti, anch'essi girevoli attorno al proprio assi e supportati dl corpo centrale di supporto 40', in cui questi due gruppi 40a e 40b di cuscinetti girevoli sono disposti in zone diametralmente opposte del wave generator 40 e si impegnano e sono atti a cooperare con la superficie interna 30'' della flex spline 30, in modo da deformarla elasticamente e premere una prima metà della sua dentatura esterna 30' contro la dentatura interna 20a' della circular spline fissa 20a e una seconda altra metà della sua dentatura esterna 30' contro la dentatura interna 20b' della circular spline mobile 20b, quando, nel funzionamento del riduttore armonico 10, più avanti descritto, il wave generator 40 ruota, come indicato dalla freccia f1, attorno all'asse longitudinale X-X del riduttore armonico 10.

A questo scopo, sia il gruppo 40a sia il gruppo 40b di cuscinetti girevoli, esibiti dal wave generator 40, sono suddivisi ognuno in due sottogruppi, in cui ciascun di questi due sottogruppi è a sua volta costituito da una pluralità di rulli girevoli, disposti in fila.

In particolare il gruppo 40a di cuscinetti girevoli è suddiviso in due sottogruppi costituiti da due corrispondenti file, fra loro affiancate, di rulli girevoli, ognuna a sua volta costituita ad esempio da tre rulli girevoli, rispettivamente 40a' e 40a'', in cui queste due file affiancate di rulli girevoli 40a' e 40a'' impegnano la flex spline 30 per premere rispettivamente una prima metà della sua superficie 30' contro la dentatura interna 20a' della circular spline fissa 20a e una seconda metà della sua dentatura esterna 30' contro la dentatura interna 20b' della circular spline mobile 20b.

Analogamente il gruppo 40b di cuscinetti girevoli è suddiviso in due sottogruppi costituiti da due corrispondenti file, fra loro affiancate, di rulli girevoli, ognuna a sua volta costituita ad esempio da tre rulli girevoli, rispettivamente 40b' e 40b'', in cui queste due file affiancate di rulli girevoli 40b' e 40b'' impegnano la flex spline 30 per premere rispettivamente una prima metà della sua superficie 30' contro la dentatura interna 20a'

della circular spline fissa 20a e una seconda metà della sua dentatura esterna 30' contro la dentatura interna 20b' della circular spline mobile 20b.

Vantaggiosamente, come anche chiaramente mostrato dai disegni, i vari cuscinetti girevoli 40a', 40a'', 40b', 40b'', inclusi nel wave generator 40 e atti a cooperare a contatto con la superficie interna 30'' della flex spline 30, sono costituiti da cuscinetti a sfera o componenti simili, in modo da rendere minimo l'attrito durante la loro rotazione attorno al proprio asse.

Ancora allo scopo di ridurre il più possibile gli attriti, in questa innovativa configurazione del riduttore armonico 10, quale prima descritta, il corpo centrale di supporto 40' del wave generator 40 del riduttore armonico 10 è montato girevolmente sulla prima circular spline mobile 20b con l'interposizione di uno o più cuscinetti a sfere o componenti simili, indicati con 40c.

Come anche chiaramente mostrato dai disegni, in questa innovativa configurazione del riduttore armonico 10, la flex spline 30 è alloggiata in un vano anulare, indicato con 11 in Figg. 2A e 2B, formato dalla prima circular spline fissa 20a, dalla seconda circular spline mobile 20b, e dal wave generator (40).

Per completezza, a integrazione della descrizione della configurazione del riduttore armonico 10 dell'invenzione, la seguente tabella mostra una serie di possibili combinazioni, realizzabili ed implementabili in questo riduttore armonico 10, del numero di denti Z_{CS} della circular spline mobile 20b e del numero di denti Z_{FS} della flex spline 30, a sua volta uguale al numero di denti della circular spline fissa 20a.

La stessa tabella mostra anche il rapporto di ingranamento I del riduttore armonico 10, calcolato con la formula citata in precedenza, corrispondente a tali possibili combinazioni.

Numero di denti Z_{CS} della circular spline mobile 20b	Numero di denti Z_{FS} della flex spline 30 e della circular spline fissa 20a	Rapporto di ingranamento I del riduttore armonico 10
70	68	-34
71	69	-34,5
72	70	-35
73	71	-35,5
74	72	-36
75	73	-36,5
76	74	-37
77	75	-37,5
78	76	-38
79	77	-38,5
80	78	-39
81	79	-39,5
82	80	-40
83	81	-40,5
84	82	-41
85	83	-41,5
86	84	-42
87	85	-42,5
88	86	-43
89	87	-43,5

La Fig. 7 a sua volta è uno schema che, a integrazione della precedente tabella, illustra, alla rispettiva sezione (a) di sinistra, come può essere scelto il numero di denti, nel caso di un numero dispari, e, alla rispettiva sezione (b) di destra, come può essere scelto il numero di denti, nel caso di un numero pari, della dentatura della flex spline 30, e quindi anche della circular spline fissa 20a, e della dentatura della circular spline mobile 20b, che sono incluse nel riduttore armonico 10 dell'invenzione.

In particolare questa Fig. 7 dei disegni consente di cogliere una caratteristica importante della configurazione del riduttore armonico 10 dell'invenzione che è alla base del suo funzionamento, più avanti meglio descritto.

Infatti, come si può dedurre da questa Fig. 7, imponendo una differenza di due denti tra le dentature delle due circular spline fissa 20a e mobile 20b e adottando per esse un numero di denti pari, ci sono sempre due posizioni e zone diametralmente opposte nelle quali c'è un perfetto allineamento tra le due circular spline fissa 20a e mobile 20b e nelle quali è pertanto possibile realizzare correttamente l'ingranamento della flex spline 30 con esse.

In questo modo è anche possibile definire il numero di lobi del wave generator 40, ovvero dei rispettivi gruppi di cuscinetti girevoli che impegnano e premono sulla superficie interna 30'' della flex spline 30 in modo da impegnarsi ed ingranarsi con la circular spline 20, numero che deve essere uguale a due.

Secondo una ulteriore caratteristica saliente della presente invenzione le prima e seconda parte del riduttore armonico 10, ovvero la circular spline 20, la flex spline 30, e il corpo centrale di supporto 40' della terza parte, ovvero del wave generator 40, sono totalmente realizzati per stampaggio, preferibilmente del tipo a iniezione, di un materiale plastico, indicato in generale con MP.

In particolare le materie ovvero i materiali plastici MP utilizzabili nell'ambito della presente invenzione per realizzare queste parti e componenti del riduttore armonico 10 si possono raggruppare in due macro tipologie, ovvero le materie plastiche rigide e quelle flessibili.

Nello specifico, la parte o componente flex spline 30 richiede di essere flessibile e deformabile elasticamente, ma allo stesso tempo resistente, per cui questo componente flex spline 30 è preferibilmente realizzato per stampaggio a iniezione di un materiale plastico o un polimero ad alto peso molecolare senza aggiunta di fibre o cariche di rinforzo, con un'eventuale aggiunta nel polimero di additivi tribologici, ovvero additivi e sostanze atte a ridurre l'attrito e l'usura delle superfici della flex spline 30 a contatto e in moto relativo con le altre parti del riduttore armonico 10.

Fra questi additivi si citano ad esempio il PTFE (da PoliTetraFluoroEtilene) anche noto con il nome commerciale di Teflon, il silicio Si, e il bisolfuro di molibdeno MoS_2 , ed altri additivi atti a conferire alla flex spline 30 le caratteristiche tribologiche richieste.

La parte o componente circular spline 20, a sua volta costituita dalla parte fissa 20a e dalla parte mobile 20b, necessita invece di essere rigida, per cui in questo caso i polimeri e i materiali plastici utilizzabili per stampare ad iniezione le due parti 20a e 20b, fissa e mobile, della circular spline 20, possono contenere fibre e rinforzi di ogni genere e tipo, atti a conferire a queste due parti la richiesta resistenza meccanica, termica e dimensionale.

In generale la scelta dei materiali plastici utilizzabili per stampare la circular spline 20 e la flex spline 30 è molto ampia, ed in questa scelta possono influire molti fattori ed essere considerati sia materiali plastici termoindurenti sia materiali termoplastici e le loro varianti composite e additivate.

Nel contesto dell'invenzione, materiale plastici, opportunamente additivati, possono essere anche vantaggiosamente utilizzati per produrre, per stampaggio ad iniezione, boccole tribologiche, ovvero esibenti proprietà anti attrito, atte a sostituire i cuscinetti a sfera girevoli 40a', 40a'', 40b', 40b'', inclusi nel wave generator 40, che impegnano la superficie interna 30'' della flex spline 30.

Allo scopo di fornire un'informazione più precisa su questo rilevante aspetto dell'invenzione, nel seguito si riporta un elenco di specifici materiali plastici MP in cui possono essere prodotte per stampaggio ad iniezione le tre parti fondamentali del riduttore armonico 10, ovvero la circular spline 20, la flex spline 30, e il wave generator 40:

- polimeri termoplastici amorfi o semicristallini,
- polimeri termoindurenti, polimeri termoplastici o termoindurenti compositi ovvero caricati con cariche inerti o funzionali e/o rinforzati con fibre di varia natura vetro, carbonio, kevlar, fibre naturali;
- polimeri termoplastici o termoindurenti compositi caricati con polveri metalliche, ceramiche, mica, talco, varie tipologie di cariche inerti.

Si citano anche, fra i materiali utilizzabili per realizzare le parti del riduttore armonico 10, i terpolimeri e i nano compositi.

Inoltre in generale sono utilizzabili tutte quelle materie plastiche che vengono funzionalizzate con additivi di ogni natura e tipologia, ovvero quei materiali polimerici che possono contenere altre sostanze finalizzate a migliorarne le proprietà.

Funzionamento del riduttore armonico dell'invenzione

Nel funzionamento del riduttore armonico 10 dell'invenzione, il rotore del motore elettrico 50, montato direttamente sul corpo centrale di supporto 40' del wave generator 40,

comanda una rotazione di quest'ultimo attorno all'asse longitudinale X-X del riduttore armonico 10, come indicato nei disegni da una freccia f1.

Pertanto, dal momento che le due circular spline, ovvero la circular spline fissa 20a e la circular spline mobile 20b del riduttore armonico 10 sono angolarmente sfasate fra di loro a causa della differenza di due denti fra le rispettive dentature interne, la rotazione del wave generator 40 attorno all'asse longitudinale X-X, a sua volta comandata dal motore 50, fa sì che tale sfasamento angolare sia continuamente recuperato dalla flex spline 30, flessibile, a forma di cinghia dentata, che sotto la spinta e pressione applicata sulla sua superficie interna 30'' dai cuscinetti girevoli 40a e 40b del wave generator 40 si impegna e si ingrana con la circular spline fissa 20a, così da essere soggetta ad una certa deformazione elastica tale da allineare la circular spline mobile 20b con la circular spline fissa 20a in corrispondenza delle due zone di ingranamento, diametralmente opposte tra loro, della flex spline 30, da una parte, con le due circular spline fissa 20a e mobile 20b, da un'altra parte.

In questo modo la circular spline mobile 20b del riduttore armonico 10 è soggetta a ruotare, come indicato da una freccia f2, attorno all'asse longitudinale X-X, in senso opposto e ad una velocità angolare notevolmente ridotta, quale determinata dal rapporto di ingranamento I dello stesso riduttore armonico 10, rispetto alla rotazione, corrispondente alla freccia f1, alla quale il motore elettrico 50 comanda il wave generator 40.

Esempio numerico di una possibile forma di realizzazione del riduttore armonico dell'invenzione.

Per una più completa informazione, si illustrerà nel seguito un esempio, puramente indicativo

e non limitativo, di una forma di realizzazione, integrato da dati numerici, del riduttore armonico 10 dell'invenzione.

In particolare in questo esempio il riduttore armonico 10 presenta le seguenti caratteristiche:

- numero denti circular spline fissa $20a = 80$
- numero denti Z_{CS} della circular spline mobile $20b = 82$
- numero denti Z_{FS} della flex spline $30 = 80$

per cui si ottiene dalla seguente formula, già citata in precedenza:

$$I = \frac{Z_{FS}}{Z_{FS} - Z_{CS}} = \frac{80}{80 - 82} = -40$$

un rapporto di ingranamento $I = -40$, del riduttore armonico 10

- motore elettrico 40, integrato nel riduttore armonico 10, con :
- coppia nominale = 0,3 Nm
- velocità nominale = 5.000 RPM (giri al minuto)

da cui si ottiene:

- potenza in Watt erogata dal riduttore armonico 10 = $0,3 * 5000 * (2\pi/60) = 157 \text{ W}$
- coppia di picco = 0,96 Nm

Pertanto, nel caso di funzionamento del riduttore armonico 10 in condizione nominale, si ottiene:

- coppia C_U all'uscita del riduttore armonico = $0,3 * 40 = 12 \text{ Nm}$
- velocità angolare ω_U all'uscita del riduttore armonico = $(157 \text{ W} / 12 \text{ Nm}) = 13 \text{ rad/sec} =$
 $13 * (60/2\pi) = 124 \text{ RPM}$

Invece, nel caso di funzionamento del riduttore armonico 10 in condizione di picco di coppia, si ottiene:

- coppia C_U all'uscita del riduttore armonico = $0,96 * 40 = 38,4 \text{ Nm}$
- velocità angolare ω_U all'uscita del riduttore armonico = $(157 \text{ W} / 38,4 \text{ Nm}) =$

$$4 \text{ rad/sec} = 4 * (60/2\pi) = 38 \text{ RPM}$$

Dimensioni del riduttore armonico dell'invenzione

Ancora, sempre per ragioni di completezza di informazione, si forniranno alcuni dati dimensionali, anch'essi puramente indicativi, sui componenti fondamentali, prima illustrati, del riduttore armonico 10.

La dimensione assiale del riduttore armonico 10 è primariamente e sostanzialmente determinata dai seguenti due principali fattori: l'estensione assiale del motore elettrico 40 che si intende utilizzare e la larghezza di fascia della flex spline 30, a forma di cinghia dentata, a sua volta funzione della coppia che si desidera trasmettere con il riduttore armonico 10.

Come si può osservare dai disegni, il riduttore armonico 10 dell'invenzione, grazie alla speciale configurazione a cinghia dentata della rispettiva flex spline 30, presenta vantaggiosamente un ingombro e una estensione assiale notevolmente ridotti rispetto ai riduttori armonici attualmente disponibili nel mercato, la cui flex spline presenta invece solitamente una convenzionale configurazione a campana o simile.

E' anche chiaro che questa speciale configurazione a cinghia, dentata esternamente, che caratterizza la flex spline 30 inclusa nel riduttore armonico 10 dell'invenzione, richiede l'adozione di un adatto materiale plastico, fra quelli citati in precedenza, per realizzare tale flex spline 30, in modo che sia capace di assicurare le prestazioni richieste per essa, ed in particolare una elevata resistenza meccanica alle sollecitazioni sia di torsione sia di flessione, oltre a una buona elasticità e la capacità di mantenere inalterata nel tempo tale elasticità.

Infatti, differentemente dai riduttori armonici convenzionali con flex spline esibenti una configurazione a campana in cui i rispettivi denti devono sostenere unicamente gli sforzi in direzione normale alla loro faccia durante la trasmissione del moto e della

coppia, nel caso del riduttore armonico 10 dell'invenzione i denti della rispettiva flex spline 30, esibente una configurazione a cinghia dentata esternamente, sono soggetti anche a torsione, come confermato dalla simulazioni più avanti descritte eseguite in fase di progettazione del riduttore armonico 10, in corrispondenza della mezzeria della larghezza di fascia della cinghia, per effetto dell'allineamento tra le dentature delle due circular spline fissa 20a e mobile 20b.

Inoltre, sempre allo scopo di fornire una ancora più completa e precisa informazione, la Fig. 8 dei disegni, suddivisa nelle sezioni (a)-(f), mostra alcuni disegni costruttivi, in vista normale e in sezione, concernenti i componenti fondamentali, prima illustrati, del riduttore armonico 10 dell'invenzione, e, con riferimento alla seguente tabella, a titolo puramente indicativo e non limitativo, alcune possibili valori dimensionali di tali componenti.

Componente	Dimensioni preferite [mm]
Flex spline 30	R1 = 21,4 ; R2 = 22,4 ; R3 = 23,5 ; H1 = 14
Circular spline fissa 20°	R4 = 27 ; R5 = 23,5 ; R6 = 24,5 ; H2 = 8
Circular spline mobile 20b	R7 = 26,3 ; R8 = 23,4 ; R9 = 24,6 ; H3 = 7,5
Wave generator 40	R10 = 15 ; R11 = 3,5 ; H4 = 30,9 ; H6 = 44,4; H7 = 38; $\alpha = 27^\circ$
Guscio esterno 10'	R12 = 28,5 ; H5 = 66,6

In particolare la Fig. 8 - sez. (f) mostra la disposizione dei due gruppi 40a e 40b di cuscinetti girevoli, disposti in zone diametralmente opposte nel wave generator 40, che

cooperano con la superficie interna 30'' della flex spline 30 per deformare quest'ultima e premerla contro la circular spline 20.

Progettazione, simulazioni e verifica sperimentale del riduttore armonico dell'invenzione

Il riduttore armonico dell'invenzione è stato oggetto di un'accurata progettazione, supportata da simulazioni strutturali, e di una successiva sperimentazione, eseguita su alcuni prototipi, che ne hanno confermato le innovative caratteristiche ed i rilevanti vantaggi.

In particolare la Fig. 9, suddivisa nelle sezioni (a)-(c), è una simulazione delle sollecitazioni e corrispondenti deformazioni alle quali è soggetta la flex spline 30 a causa della spinta, simbolizzata con frecce, applicata dai rulli girevoli 40a e 40b sulla superficie interna 30'' della stessa flex spline 30, durante il funzionamento del riduttore armonico 10 e pertanto la rotazione del wave generator 40 attorno all'asse longitudinale X-X.

Come si può osservare da tale Fig. 9, la simulazione mostra che, durante il funzionamento del riduttore armonico 10, al fine di allineare le dentature della circular spline fissa 20a e della circular spline mobile 20b, la flex spline 30, esibente una configurazione a cinghia con dentatura esterna, è soggetta in combinazione sia a sollecitazioni e deformazioni di torsione nella zona di mezzeria della fascia della cinghia dentata sia a sollecitazioni e deformazioni di flessione dei suoi denti.

Varianti

Naturalmente, fermi restando il principio e i concetti di base della presente invenzione, le forme di attuazione e i particolari di realizzazione del riduttore armonico, qui proposto, in particolare caratterizzato, ma non solo, dal fatto che le sue parti essenziali sono sostanzialmente prodotte per stampaggio a iniezione di un materiale

plastico MP, possono essere ampiamente variati rispetto a quanto fin qui descritto e illustrato, senza per questo uscire dall'ambito della stessa invenzione.

Ad esempio il wave generator 40, al fine di cooperare con e deformare la flex spline 30, invece che una prima doppia fila o primo gruppo 40a di cuscinetti girevoli e una seconda doppia fila o secondo gruppo 40b di cuscinetti girevoli, disposti in zone diametralmente opposte del wave generator 40, come nella forma di realizzazione 10 prima descritta del riduttore armonico, può comprendere semplicemente un primo cuscinetto e un secondo cuscinetto, sempre disposti in zone diametralmente opposte del wave generator 40, in cui ciascuno di questi primo e secondo cuscinetto è atto a cooperare a contatto con la superficie interna 30'' della flex spline 30 per premere una prima e una seconda metà della dentatura esterna 30' della stessa flex spline 30 rispettivamente contro la dentatura interna 20a' della prima circular spline fissa 20a e contro la dentatura interna 20b' della seconda circular spline mobile 20b della circular spline 20.

RIVENDICAZIONI

1. Riduttore armonico (10) comprendente:

- un guscio esterno (10'), fisso; e
- tre componenti o parti, alloggiato nel guscio esterno (10'), costituite rispettivamente da:
 - una prima parte o circular spline (20, CS, 20a, 20b), rigida, dentata internamente (20a', 20b');
 - una seconda parte o flex spline (30, FS), flessibile e deformabile elasticamente, dentata esternamente (30'), ingranata e atta a cooperare con detta prima parte o circular spline (20, CS, 20a, 20b) per trasmettere il moto nel riduttore armonico (10); e
 - una terza parte o generatore di onda o wave generator (40, WG) atto a ruotare (f1) attorno ad un asse longitudinale (X-X) del riduttore armonico (10); e
- un motore elettrico (50, 50a, 50b), anch'esso alloggiato in detto guscio (10'), atto a comandare la rotazione (f1) di detta terza parte o wave generator (40, WG) attorno all'asse longitudinale (X-X) del riduttore armonico (10);

in cui il wave generator (40, WG) è configurato per impegnare, in zone diametralmente opposte del wave generator (40, WG), una superficie interna (30'') della flex spline (30, FS) in modo da deformarla elasticamente e premere la sua dentatura esterna (30') contro la dentatura interna (20a', 20b') della circular spline (20, CS), quando il wave generator (40, WG) ruota (f1) attorno all'asse longitudinale (X-X) del riduttore armonico (10);

caratterizzato da ciò che detta seconda parte o flex spline (30, FX) ha una forma di cinghia dentata esternamente, con una superficie interna liscia (30'') e una dentatura esterna (30'), e

da ciò che dette prima parte o circular spline (20, CS) e seconda parte o flex spline (30, FS) e un corpo centrale di supporto (40') di detta terza parte o wave generator (40) del riduttore armonico (10), alloggiate in detto guscio esterno (10'), fisso, sono totalmente realizzate per stampaggio, in particolare ad iniezione, di un materiale plastico (MP).

2. Riduttore armonico (10) secondo la rivendicazione 1, in cui detta prima parte o circular spline (20, CS) è una doppia circular spline ed è costituita da una prima circular spline fissa (20a), solidale con il guscio esterno (10') del riduttore armonico (10), e da una seconda circular spline mobile (20b), collegata a e solidale con un'utenza (U) del riduttore armonico (10), con ciascuna di dette prima circular spline fissa (20a) e seconda circular spline mobile (20b) presentante una rispettiva dentatura interna (20a', 20b');

in cui detta seconda circular spline mobile (20b) è atta a ruotare (f_2) attorno a detto asse longitudinale (X-X) ad una velocità angolare ridotta rispetto alla rotazione (f_1), comandata da detto motore elettrico (50), di detta terza parte o wave generator (40, WG);

in cui la dentatura interna (20a') della prima circular spline fissa (20a), solidale con il guscio esterno (10'), ha un numero di denti pari a quello della dentatura esterna (30') della flex spline (30, FS), e la dentatura interna (20b') della seconda circular spline mobile (20b), solidale con l'utenza (U), ha alcuni denti in più, in particolare due, rispetto a quelli della dentatura interna (20a) della prima circular spline fissa (20a);

in cui la dentatura esterna (30') della flex spline (30, FS) è ingranata per metà con la dentatura interna (20a') della prima circular spline fissa (20a) e per metà con la dentatura interna (20b') della seconda circular spline mobile (20b); e

in cui il wave generator (40, WG) comprende almeno un primo cuscinetto girevole (40a, 40a', 40a'') e almeno un secondo cuscinetto girevole (40b, 40b', 40b''), disposti in zone diametralmente opposte del wave generator (40, WG), che, quando il wave generator (40, WG) ruota (f_1) attorno all'asse longitudinale (X-X) del riduttore armonico (10), impegnano una superficie interna (30'') della flex spline (30, FS) in modo da deformarla elasticamente e pertanto premere una metà della sua dentatura esterna (30') contro la dentatura interna (20a') della prima circular spline fissa (20a) e un'altra metà contro la dentatura interna (20b') della seconda circular spline mobile (20b) della circular spline (20, CS);

per cui, nel funzionamento del riduttore armonico (10), quando il wave generator (40, WG) ruota (f) attorno al rispettivo asse longitudinale (X-X), lo sfasamento angolare tra le due circular spline fissa e mobile (20a, 20b) della circular spline (20, CS), dovuto alla differenza fra i denti della due dentature interne (20a', 20b') rispettivamente della circular spline fissa (20a) e della circular spline mobile (20b), è recuperato dalla flex spline (30, FS) che, impegnandosi con la circular spline fissa (20a) e conseguentemente deformandosi elasticamente per effetto della pressione esercitata sulla stessa flex spline (30, FS) dal wave generator (40, WG) comandato in rotazione dal motore elettrico (50), costringe la circular spline mobile (20b), solidale con l'utenza (U), ad allinearsi con la circular spline fissa (20a) della circular spline (20, CS) in corrispondenza di almeno due zone o punti di ingranamento, diametralmente opposti tra loro, fra la flex spline (30, FS) e la circular spline mobile (20b).

3. Riduttore armonico (10) secondo la rivendicazione 2, in cui il wave generator (40, WG) ha una prima doppia fila (40a, 40a', 40a'') e una seconda doppia fila di cuscinetti (40b, 40b', 40b''), disposte in zone diametralmente opposte del wave generator (40,

WG), includenti rispettivamente detto almeno un primo cuscinetto girevole (40a', 40a'') e detto almeno un secondo cuscinetto girevole (40b', 40b''); e

in cui le due file di cuscinetti (40a', 40a'', 40b', 40b''), di ciascuna prima e seconda doppia fila di cuscinetti (40a, 40b), sono atte ad impegnare la superficie interna della flex spline (30, FS) in modo da deformarla elasticamente così da premere rispettivamente una metà della sua dentatura esterna (30') contro la dentatura interna (20a') della prima circular spline fissa (20a) e un'altra metà della sua dentatura esterna (30') contro la dentatura interna (20b') della seconda circular spline mobile (20b).

4. Riduttore armonico (10) secondo la rivendicazione 3, in cui ciascuna delle due file di cuscinetti, di ciascuna prima e seconda doppia fila di cuscinetti girevoli (40a, 40b) del wave generator (40, WG), è costituita da tre cuscinetti girevoli (40a', 40a'', 40b', 40b'').

5. Riduttore armonico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 4, in cui il wave generator (40, WG) è montato girevolmente su detta prima circular spline mobile (20b) con l'interposizione di uno o più cuscinetti a sfere (40c) o componenti simili.

6. Riduttore armonico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 5, in cui i cuscinetti girevoli, inclusi nel wave generator (40), atti a cooperare con la superficie interna (30'') della flex spline (30) sono costituiti da cuscinetti a sfera o componenti simili.

7. Riduttore armonico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 6, in cui la flex spline (30, FS), dentata esternamente (30'), è alloggiata in un vano anulare (11) formato dalla prima circular spline fissa (20a), dalla seconda circular spline mobile (20b), e dal wave generator (40).

8. Riduttore armonico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui anche il rispettivo guscio esterno (10'), fisso, è totalmente realizzato per stampaggio, in particolare ad iniezione, di un materiale plastico (MP).

9. Riduttore armonico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto motore elettrico (50) ha uno statore (50a) solidale con detto guscio esterno (10'), fisso, e un rotore (50b), solidale con il wave generator (40, WG), per comandarlo in rotazione attorno all'asse (X-X) del riduttore armonico (10).

10. Riduttore armonico (10) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il materiale plastico (MP) con il quale dette tre parti, ovvero la circular spline (20), la flex spline (30) e il wave generator (40), sono prodotte per stampaggio ad iniezione è incluso in un gruppo costituito da resine termoplastiche, resine termoindurenti, resine caricate, resine caricate con polveri metalliche, polimeri termoplastici amorfi o semicristallini, polimeri termoindurenti, polimeri termoplastici o termoindurenti compositi ovvero caricati con cariche inerti o funzionali e/o rinforzati con fibre di varia natura vetro, carbonio, kevlar, fibre naturali; polimeri termoplastici o termoindurenti compositi caricati con polveri metalliche, ceramiche, mica, talco, varie tipologie di cariche inerti, e in cui i materiali utilizzabili per realizzare le parti del riduttore armonico (10) includono anche i terpolimeri e i nano compositi.

p.i. ERGOTECH s.r.l.

(ing. Mario Gallo)

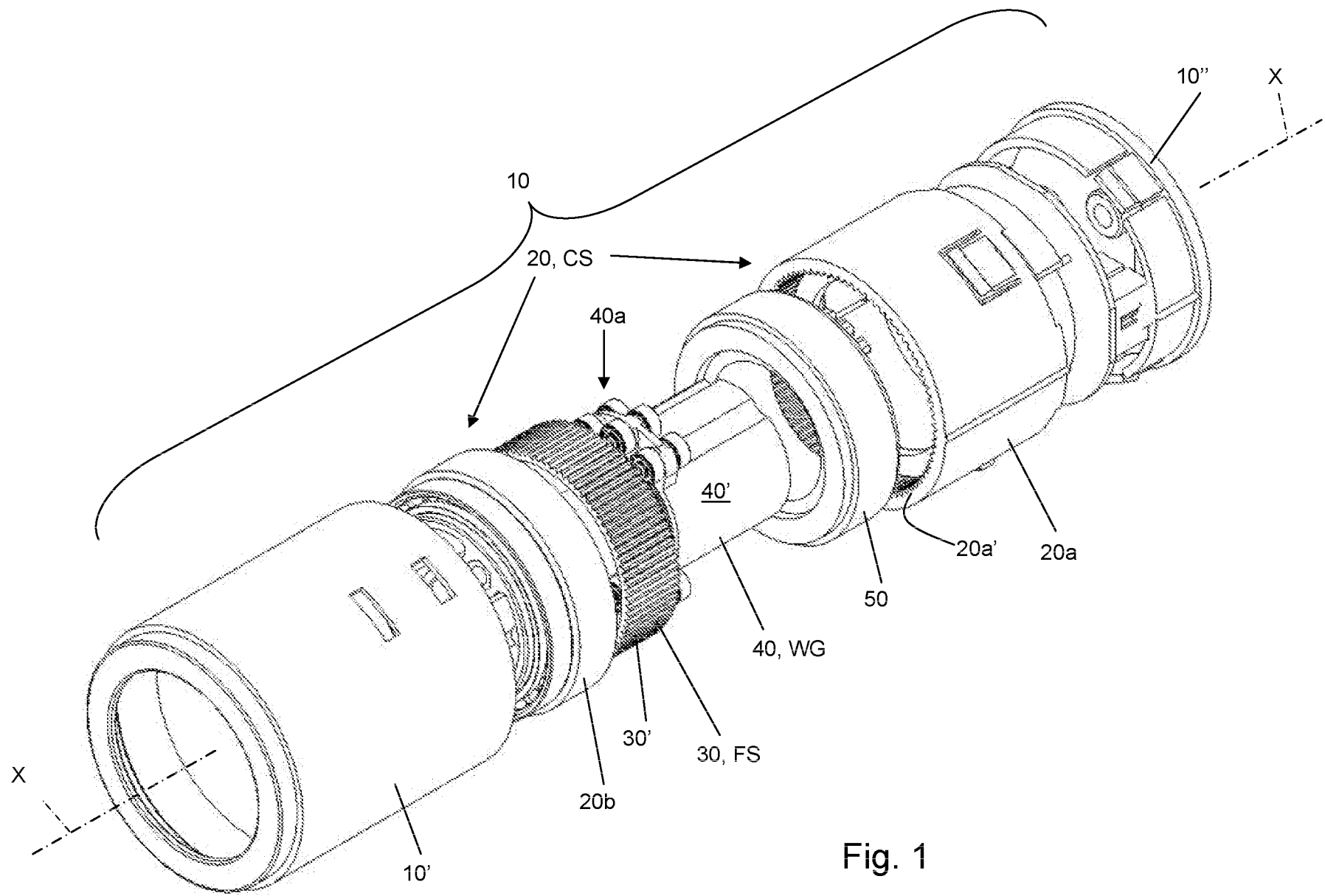


Fig. 1

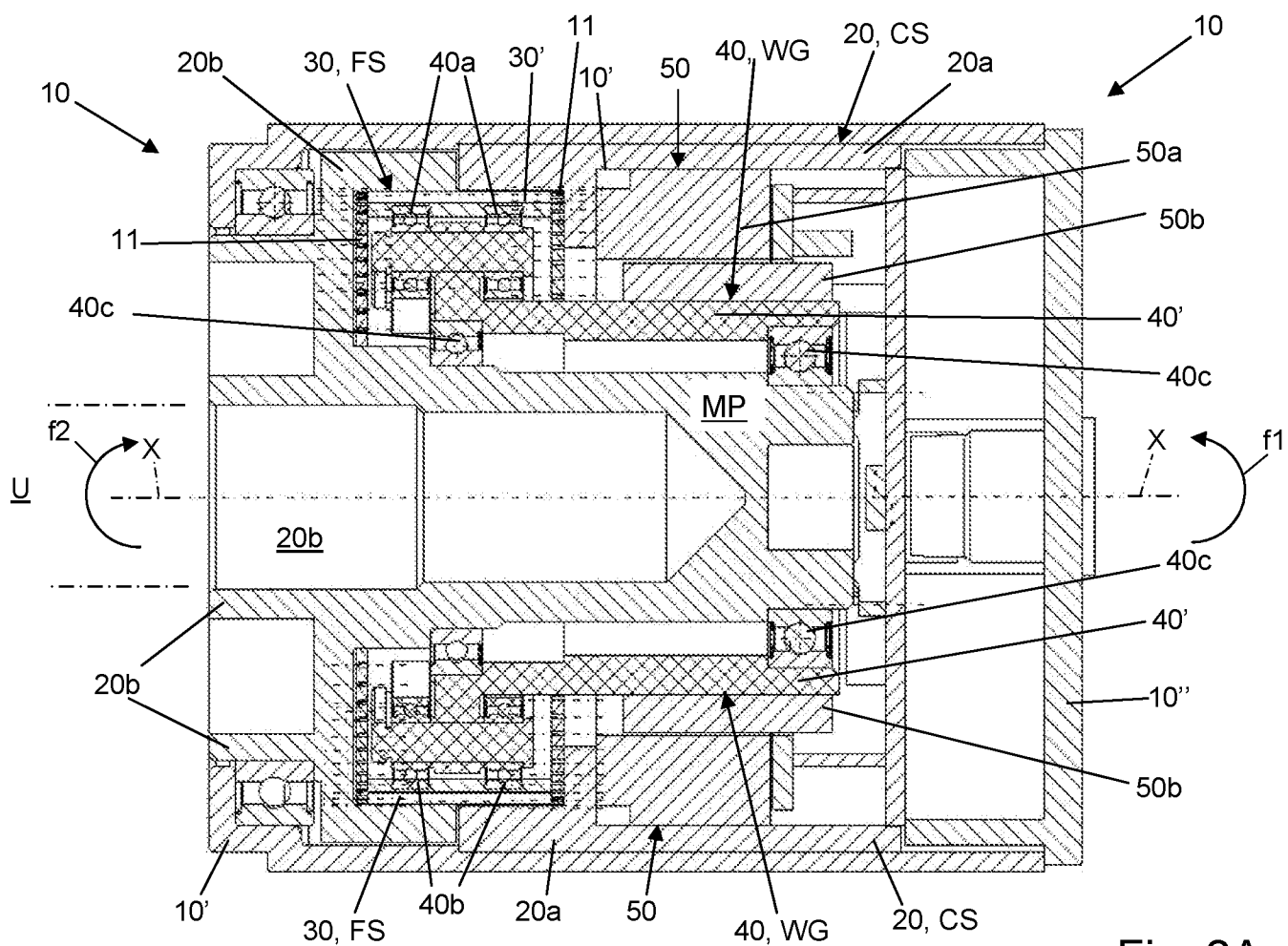


Fig. 2A

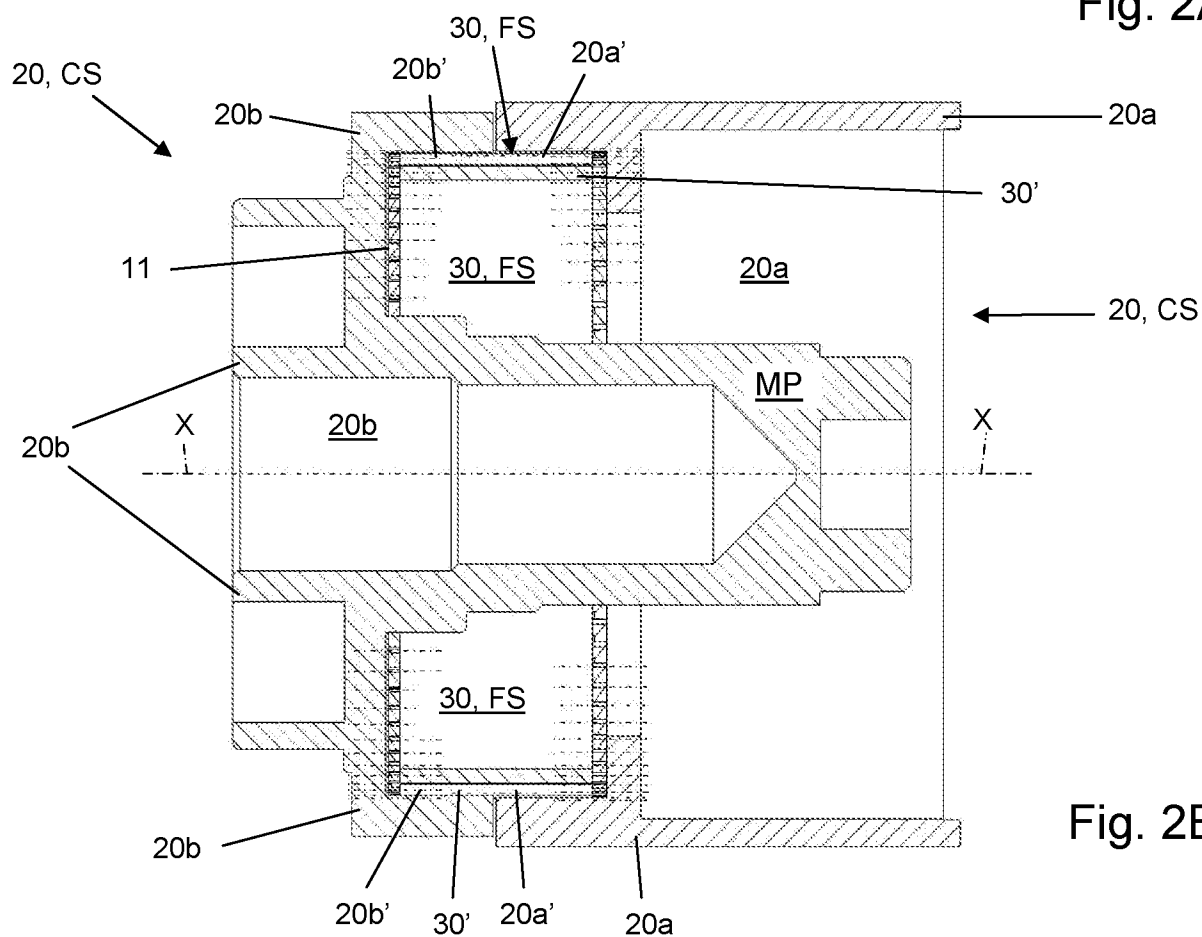


Fig. 2B

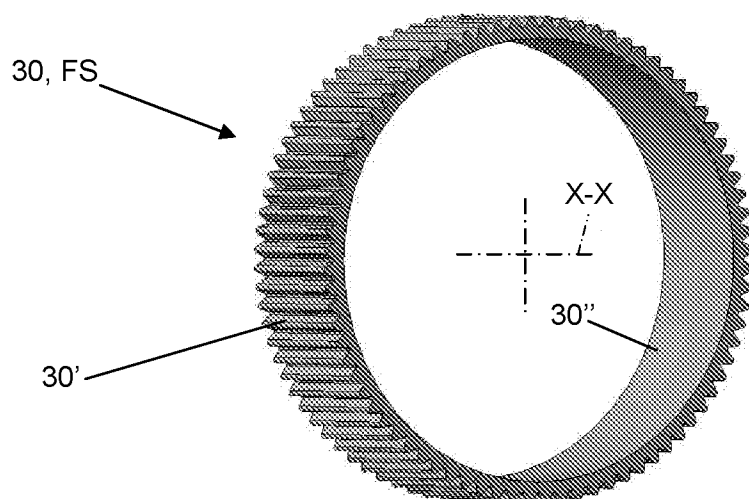


Fig. 3

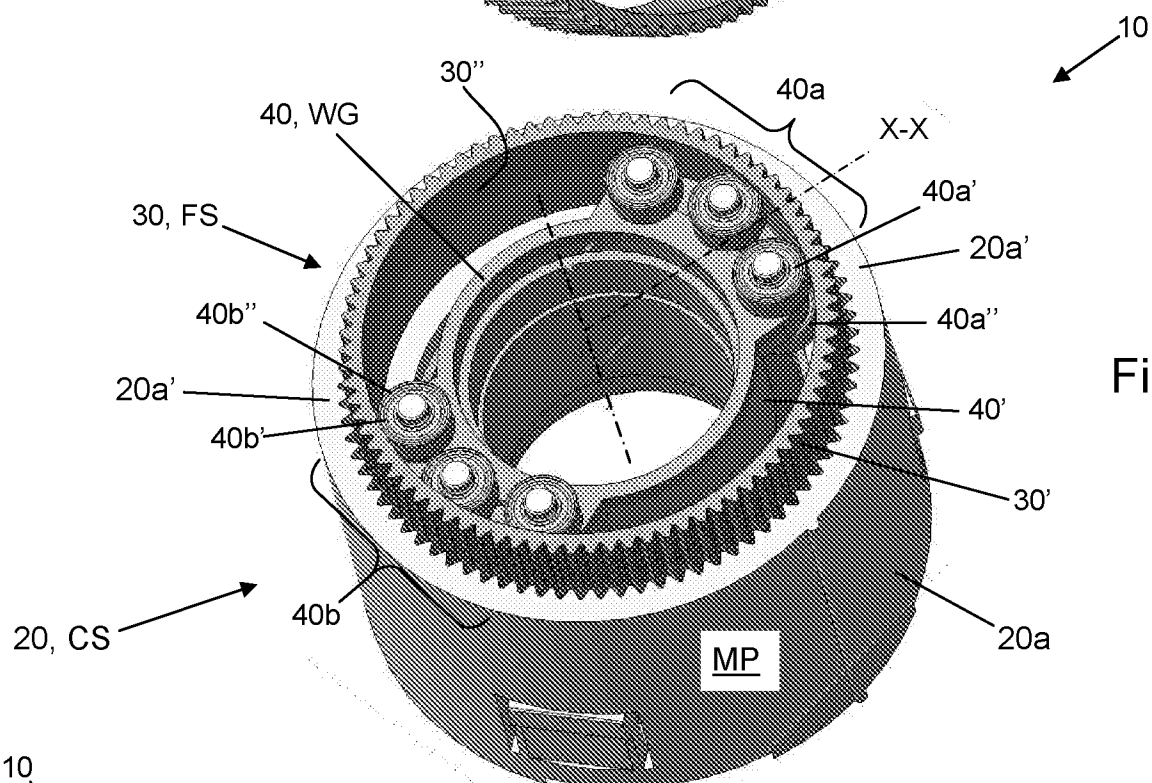


Fig. 4

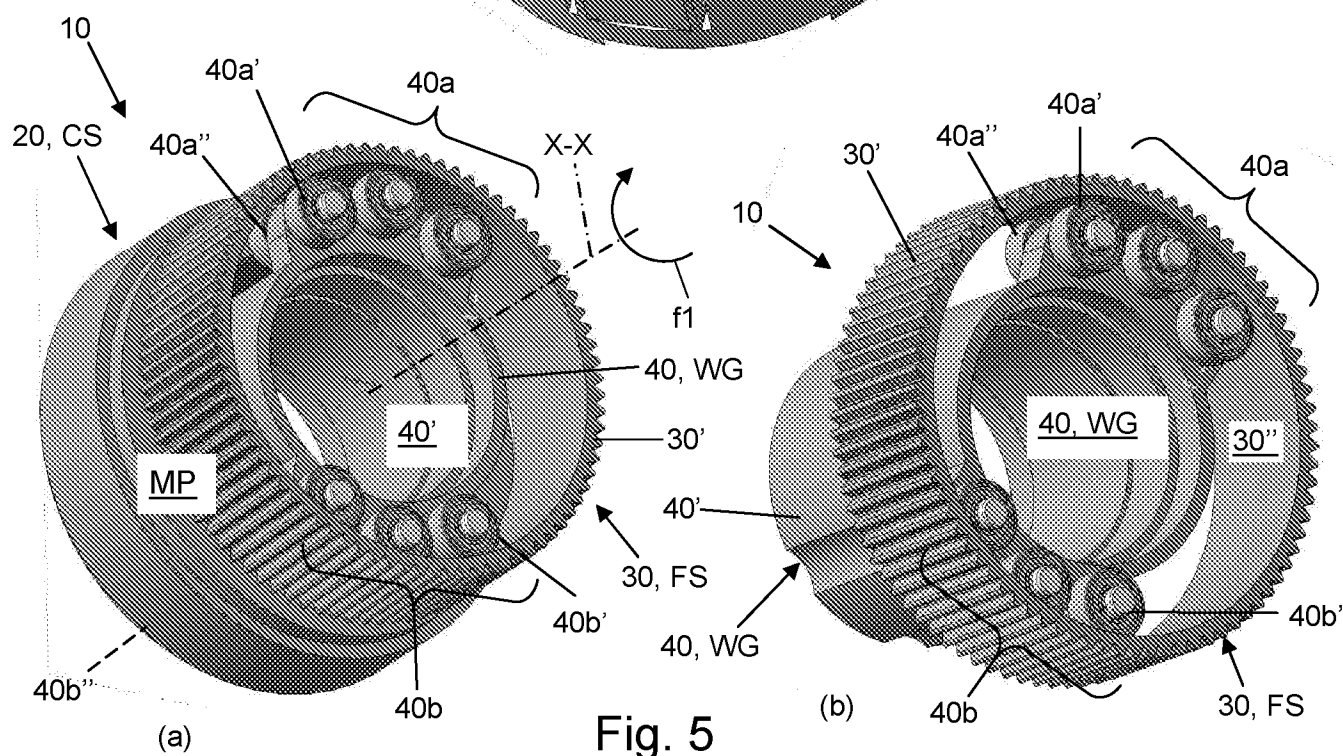


Fig. 5

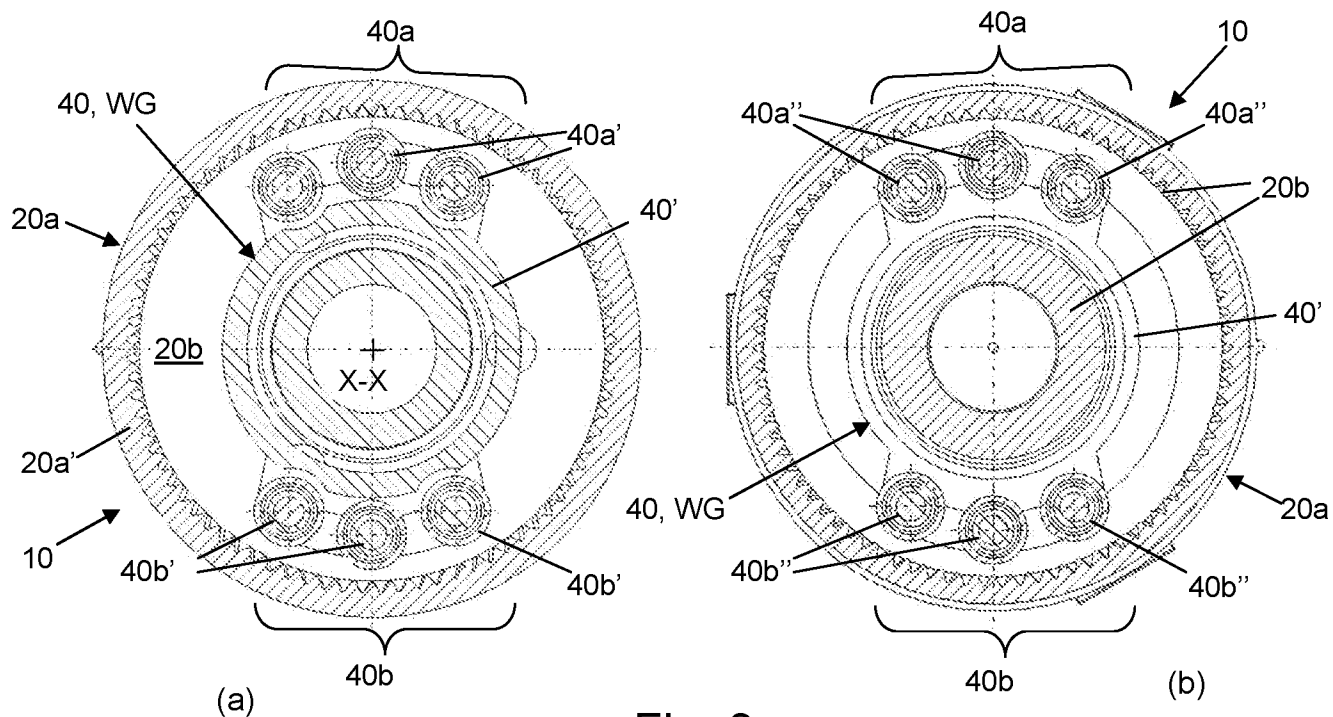


Fig. 6

Fig. 7

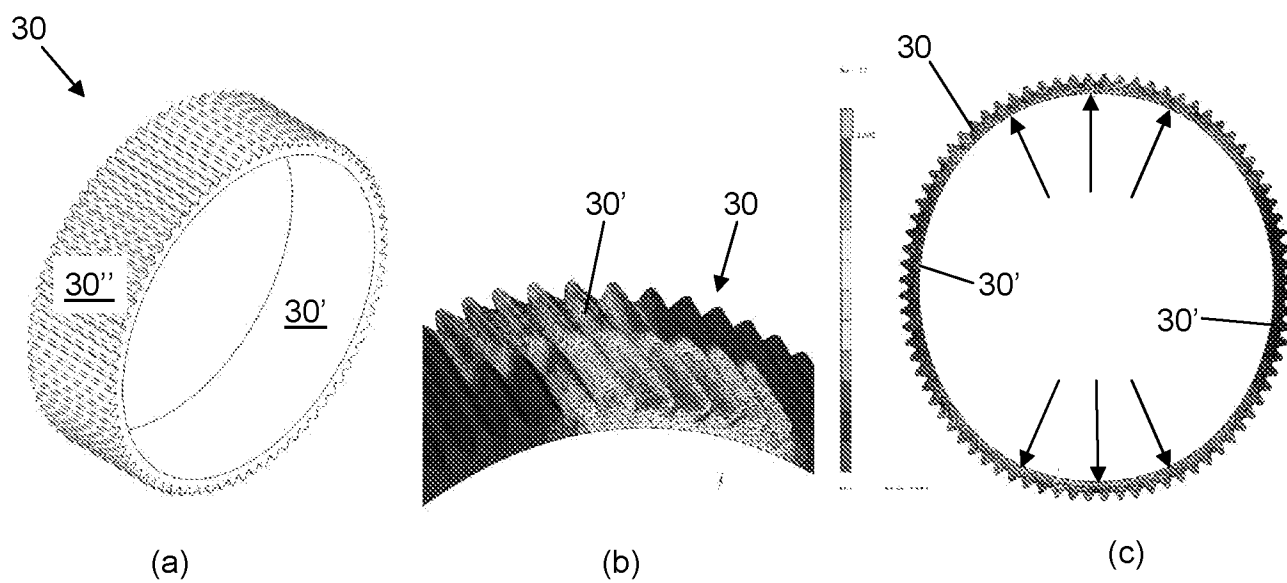
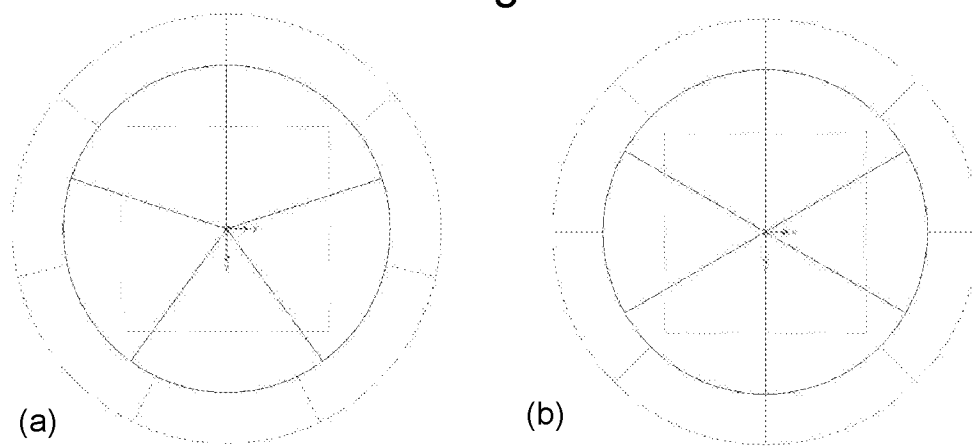


Fig. 9

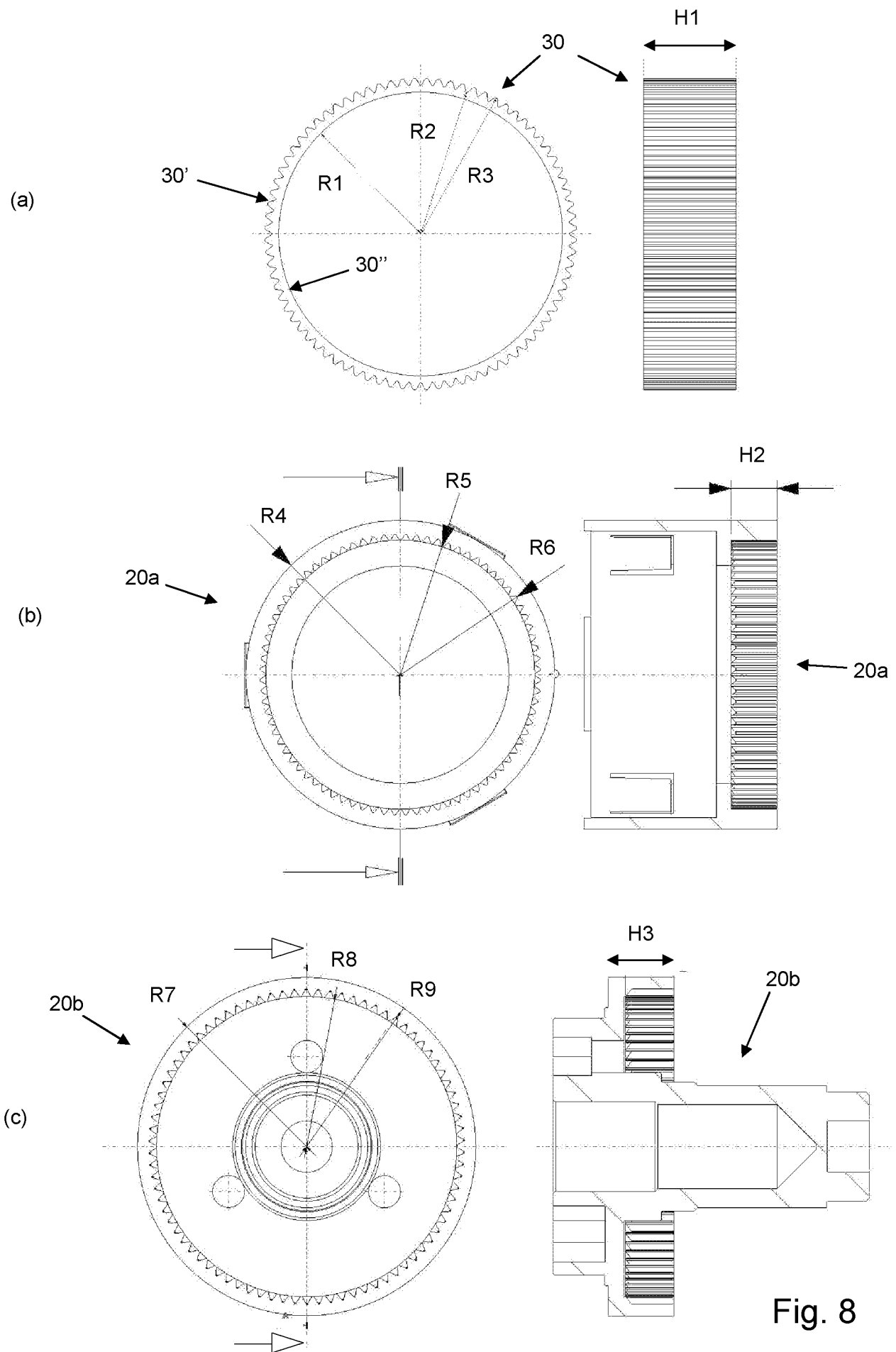
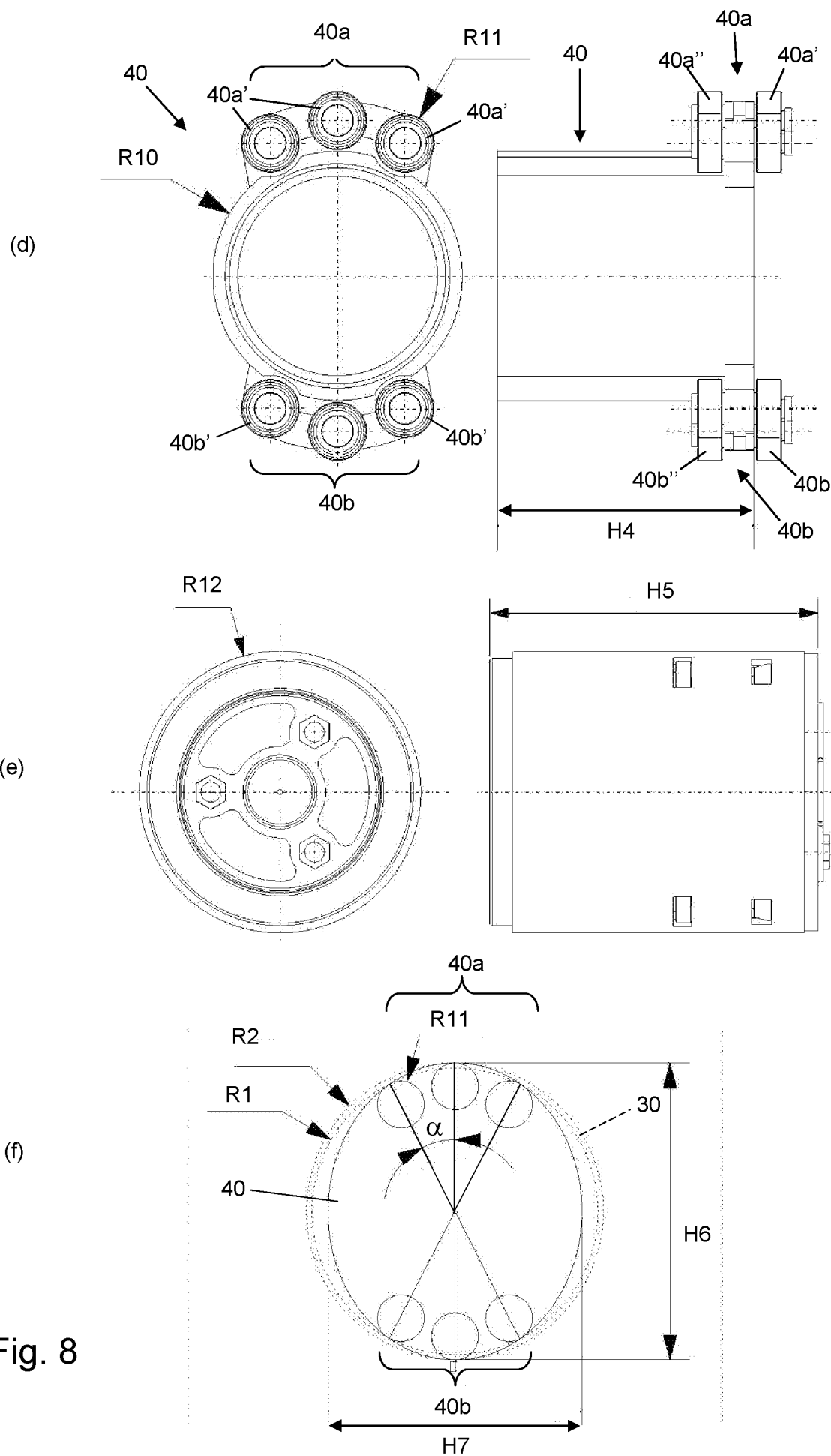


Fig. 8



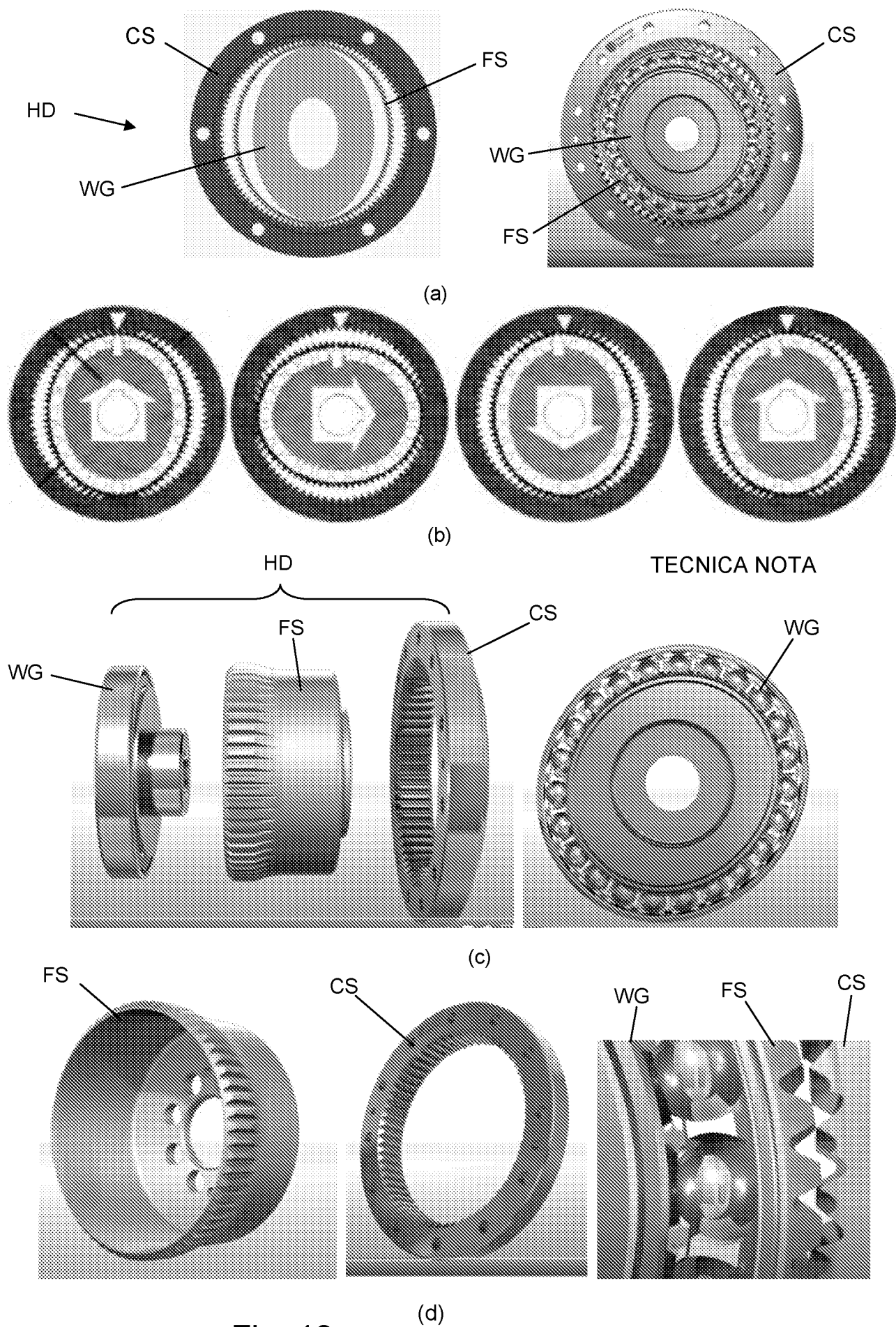


Fig. 10

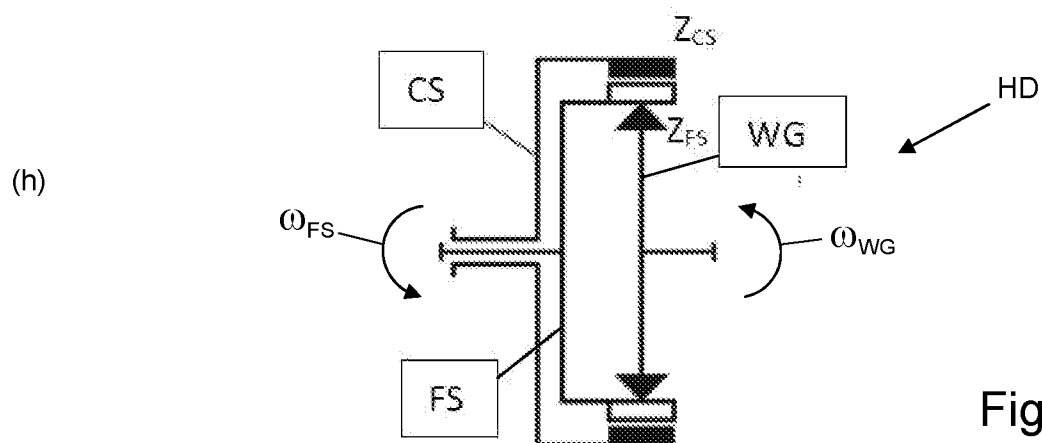
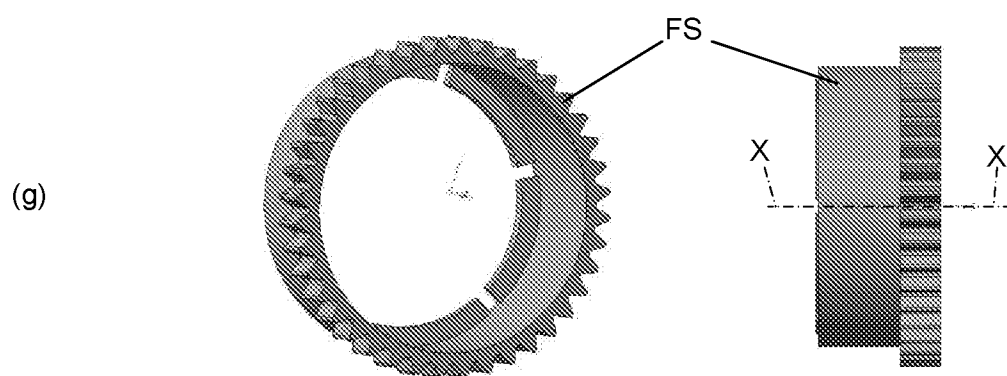
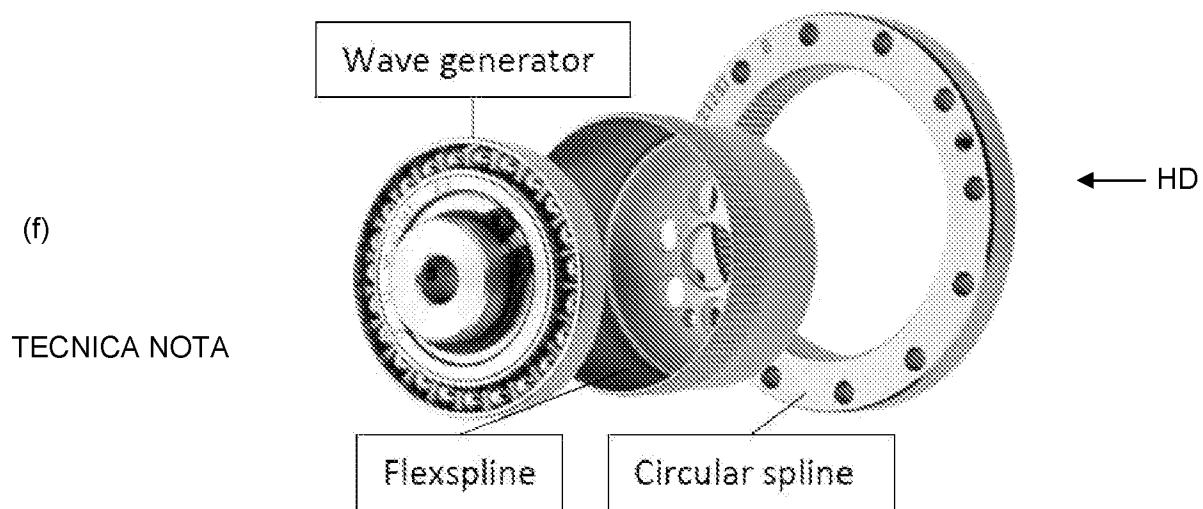
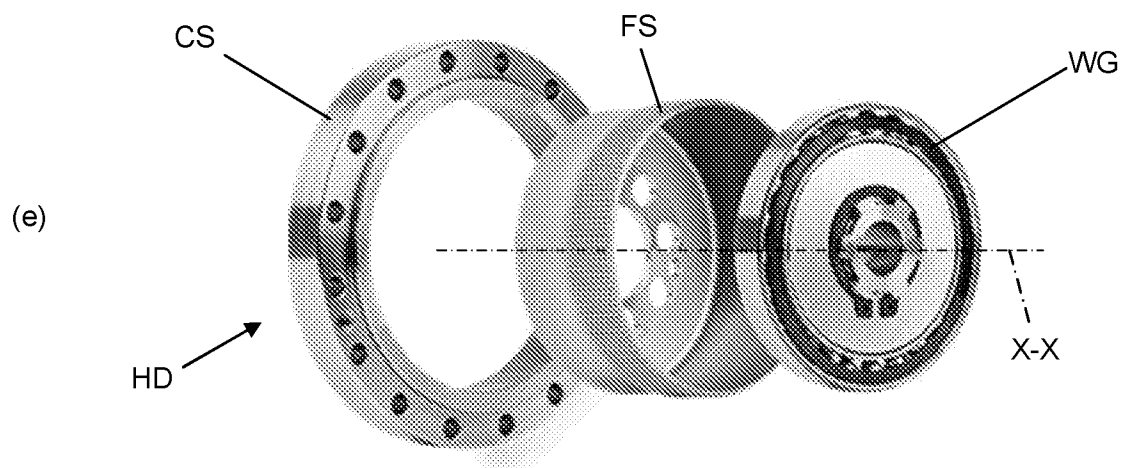


Fig. 10