

# Analisi cinematica di un riduttore

## E BENEFICI APPLICATIVI

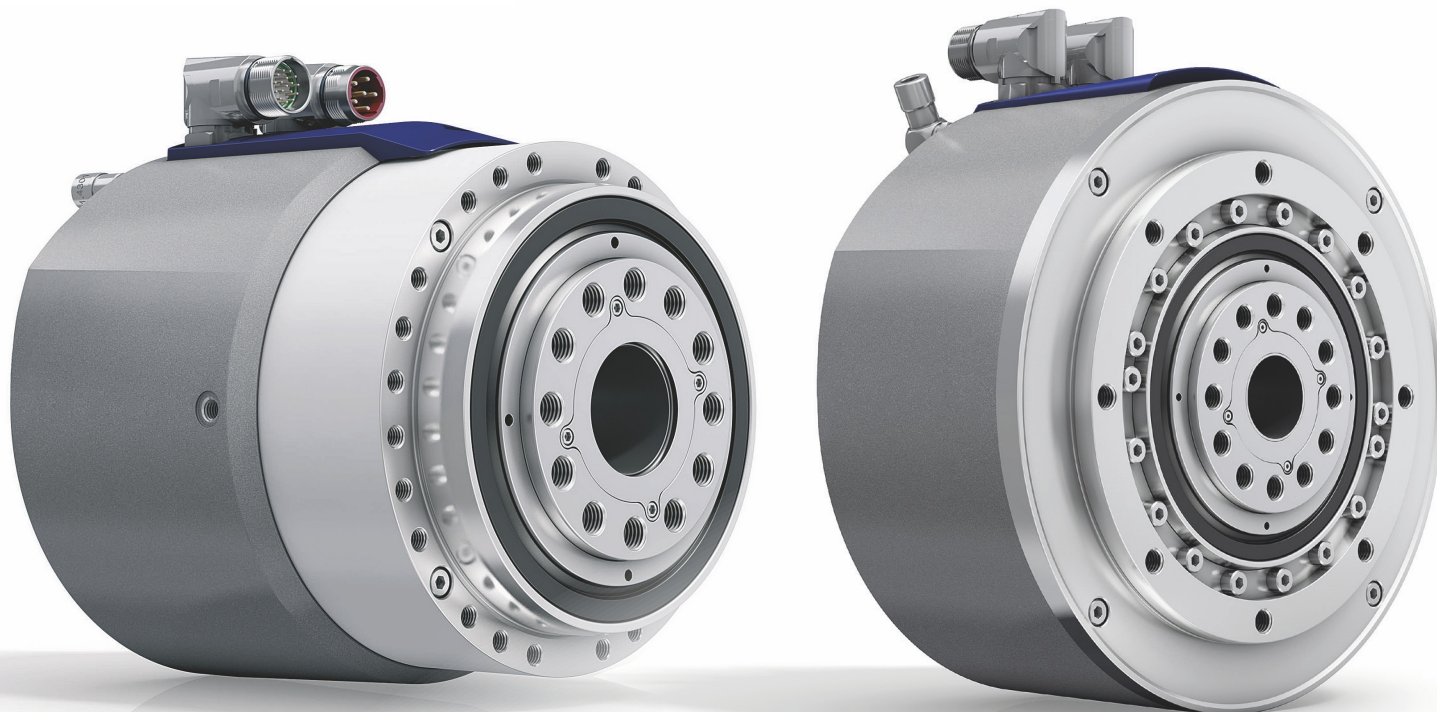
LA PRESENTAZIONE DEL RIDUTTORE WITTENSTEIN GALAXIE, NEL 2015, HA RAPPRESENTATO UNA PIETRA MILIARE NELL'INGEGNERIA DELLA TRASMISSIONE DELLA POTENZA. IN MOLTI ARTICOLI SCIENTIFICI SI SONO GIÀ DESCRITTI I VANTAGGI CHE SI HANNO NELL'UTILIZZO DI UN PROFILO LOGARITMICO.

IL PRESENTE ARTICOLO SI FOCALIZZA SULLO STUDIO DELLA CINEMATICA DI TALE SOLUZIONE. LA CONFIGURAZIONE GALAXIE VERRÀ CONFRONTATA CON LE SOLUZIONI TRADIZIONALI COME I RIDUTTORI PLANETARI, QUELLI ARMONICI E QUELLI CICLOIDALI. SI MOSTRERANNO LE DIFFERENZE FONDAMENTALI DELLE VARIE ARCHITETTURE. SI MOSTRERÀ IL BENEFICIO DI AVERE ELEMENTI GUIDATI LINEARMENTE E DI COME QUESTO COMPORTI VANTAGGI IN TERMINI DI MIGLIORE OMOGENEITÀ DEI CONTATTI. L'ANALISI CINEMATICA VIENE SUPPORTATA NON SOLAMENTE DA RISULTATI NUMERICI, MA ANCHE DA MISURAZIONI SPERIMENTALI. INOLTRE, È STATA CONDOTTA UNA ANALISI DELLA RIGIDEZZA DEI RIDUTTORI DELLA SERIE GALAXIE.

I riduttore Wittenstein Galaxie ha assunto un ruolo chiave nella progettazione di sistemi di trasmissione della potenza [1-3]. In questo contesto, a catturare l'attenzione sono le differenze cinematiche con le soluzioni tradizionali. Al fine di permettere un confronto oggettivo, si è studiata nel dettaglio la cinematica di soluzioni armoniche, cicloidali, planetarie e Galaxie.

### Riduttore planetario

Le soluzioni planetarie vengono solitamente adottate quando è richiesto un rapporto di riduzione maggiore rispetto a quello che si può ottenere con un tradizionale riduttore ad assi paralleli. Inoltre, l'elevata densità di potenza garantisce sistemi compatti ed economici. Il nome "planetario" deriva dalla sua configurazione. Vi è infatti un ingranaggio, detto solare, posto al centro, attorno a cui ruotano altre ruote, dette pianeti, che ingranano, oltre che con il solare, anche con una corona esterna. Questo garantisce una buona efficienza, un gioco ridotto e la possibilità di avere alberi cavi (corona). L'ingranaggio solare, però, limita la dimensione massima dell'albero a cui è connesso. La figura 1 mostra lo schema di tale rotismo. La sua cinematica è ben rappresentata in figura 2.



## Riduttore armonico

Il concetto alla base di un riduttore armonico prevede un cilindro dentato internamente ed una spline circolare flessibile avente due denti in meno rispetto alla corona dentata. All'interno della spline flessibile vi è un cuscinetto montato su un disco ellittico che ha la funzione di generatore d'onda (figura 3) [5]. Quando il disco ellittico viene posto in rotazione, porta a contatto la spline elastica con la dentatura rigida (figura 3). La cinematica appartiene, come per il caso del rotismo planetario, alla famiglia degli epicicloidali. L'applicazione del movimento eccentrico dei pianeti è indotto dal moto dell'albero centrale attraverso la spline flessibile. La figura 4 mostra schematicamente la catena cinematica della soluzione armonica.

Le differenze rispetto alla soluzione planetaria stanno nella connessione dei pianeti/spline flessibile con l'albero centrale. Se nel caso planetario i pianeti sono connessi tramite un giunto rotante (portatreno), nel caso della spline flessibile vi sono delle boccole.

## Riduttore cicloidale

I riduttori cicloidali sono rotismi eccentrici con profilo cicloidale [5]. Tale geometria è derivata dal principio di attuazione dell'eccentrico. Il vantaggio di questa soluzione è la bassissima pressione di contatto e la risultante elevata durata dei cuscinetti. Inoltre, la corona dentata può essere sostituita da semplici cilindri. Per contro il cinematisma è estremamente sensibile a variazioni dell'interasse.

Per garantire il moto eccentrico sono disponibili molteplici soluzioni. La prima possibilità è avere un albero tradizionale montato su un cuscinetto eccentrico (figura 5) [5].

Grazie alla differenza del numero di rulli rispetto al numero di lobi, il disco si muoverà molto lentamente mentre i rulli cilindrici lo sosterranno. Per garantire una distribuzione omogenea delle forze, vengono utilizzati due dischi, sfalsati di 180°. I pin posti all'interno del disco trasmetteranno il moto eccentrico trasformandolo in pura rotazione dell'albero centrale.

Un rotismo cicloidale può essere descritto mediante lo schema riportato in figura 6. I modi per trasformare il moto eccentrico in una rotazione dell'albero possono però essere i più svariati. La differenza in termini cinematici tra una architettura planetaria rispetto ad una configurazione cicloidale sta nell'accoppiamento tra i pianeti/disco cicloidale e l'albero. Nel caso di configurazione cicloidale, il giunto rotante (portatreno) presente nei planetari viene sostituito da un giunto che permette la conversione da moto eccentrico a pura rotazione.

## Riduttore Galaxie

Nel riduttore Galaxie viene adoperata un'altra tipologia di connessione. Il pianeta viene "spezzettato" in tanti denti singoli [1-3]. Il trasferimento del moto all'albero centrale avviene attraverso un giunto (detto, in analogia al portatreno, portadenti) (figura 7).

Il rapporto di trasmissione si ottiene imponendo, come per le altre tipologie di riduttore, un differente numero di denti. Guardando gli schemi cinematici dell'architettura Galaxie (figura 8) le differenze con le altre configurazioni diventano piuttosto ovvie.

Nel riduttore planetario, la connessione tra l'albero centrale e l'albero cavo (cassa) avviene tramite i pianeti. Nel riduttore cicloidale attraverso il disco cicloidale ed un giunto. Vi è inoltre una boccia. Nel riduttore Galaxie la rotazione eccentrica del poligono in pura rotazione dell'albero avviene in modo distribuito attraverso i singoli denti e il giunto portadenti. In questo caso non è nemmeno necessaria la presenza della boccia. Le dentature sono guidate dal portadenti e possono avere solamente

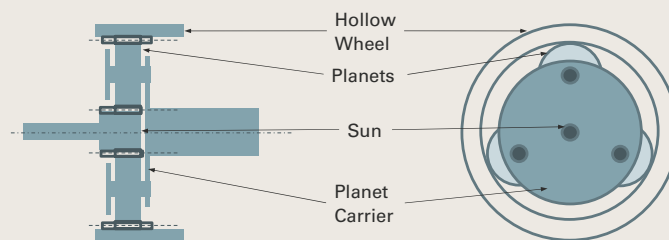


Fig. 1 - Schema di un riduttore planetario [4-5].

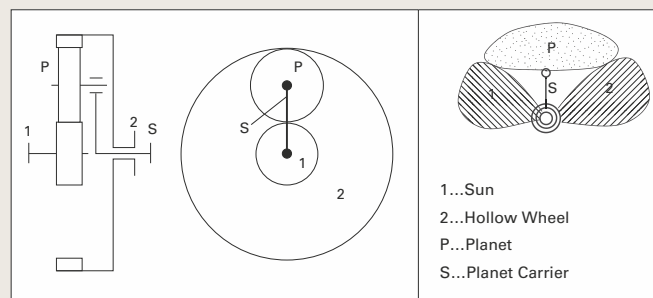


Fig. 2 - Cinematica di un riduttore planetario [4].

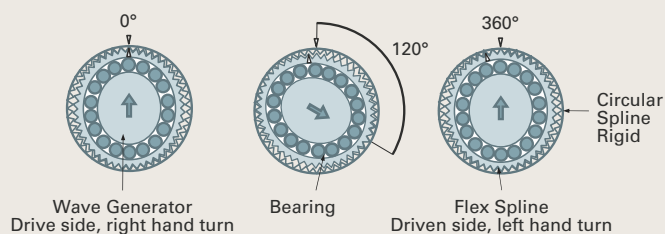


Fig. 3 - Schema di funzionamento di un riduttore armonico [5].

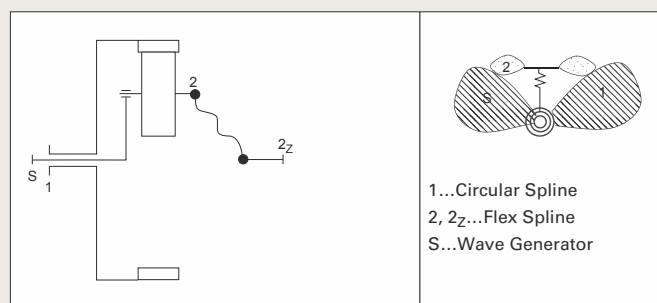


Fig. 4 - Schema cinematico [1] del riduttore armonico.

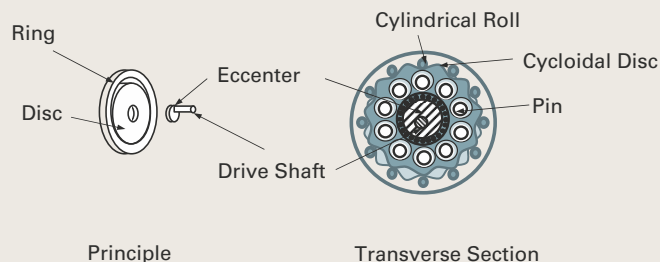


Fig. 5 - Esempio di cinematica di un rotismo cicloidale [5].

→ segue a pagina 26

una traslazione radiale. Questo garantisce una rigidezza torsionale molto maggiore rispetto alle altre configurazioni cinematiche.

## Funzione del singolo dente

Dato che la presenza di denti singoli rappresenta la principale differenza tra la cinematica Galaxie e le altre configurazioni, nel seguito si cercherà di approfondire questo aspetto.

In particolare si studieranno in modo separato i contatti dente – corona dentata e dente – portadenti. Tipicamente le soluzioni Galaxie montano due file di denti alloggiati nelle apposite cavità presenti sul portadenti (figura 9). Due denti sono solitamente entrambi montati su un unico segmento orientabile. Più segmenti orientabili compongono il cuscinetto poligonale [3].

### Contatto dente - corona dentata

Guidato dall'elemento poligonale, ogni dente viene mosso radialmente prima del contatto. In questo modo va ad ingranare assieme ai denti della corona dentata. Il contatto è dunque di tipo lineare, il che richiede un design specifico per garantire elevate prestazioni [1-3]. All'interno del contatto è sempre necessario avere un meato lubrificante convergente e, almeno in condizioni ideali, un'area di contatto il più possibile distribuita. A tale scopo, il fianco viene tagliato con profilo logaritmico (figura 10). La spirale è una curva che si forma dall'intersezione del vettore radiale e di quello tangente. Questa caratteristica assicura l'omogeneità del contatto e la corretta lubrificazione.

Utilizzando un modellatore ad elementi finiti è possibile determinare la ripartizione del carico tra i denti (figura 11). Le analisi sperimentali hanno confermato i risultati numerici (figura 12). A causa delle contenute pressioni di contatto e dell'ottima lubrificazione, si è osservata una usura minima di queste superfici.

La figura 12 mostra l'area di contatto tra dente e corona dentata dopo differenti cicli di carico. Si possono ancora notare dei segni lasciati dalla lavorazione. Si può dunque affermare che anche in fase di rodaggio l'usura dei componenti è limitata. Le striature, orientate lungo la direzione di strisciamento, hanno dimensioni comparabili con quelle della rugosità. Non si è osservato un effetto negativo della presenza di tali striature.

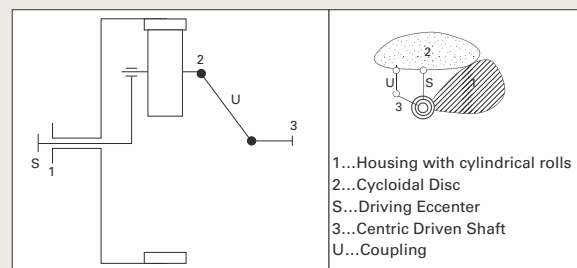
### Contatto dente - portadenti

Al fine di garantire la possibilità al dente di scorrere nella sua guida sul portadenti, è necessario lasciare un minimo gioco. Da questo deriva un contatto a due punti tra dente e sede (figura 13).

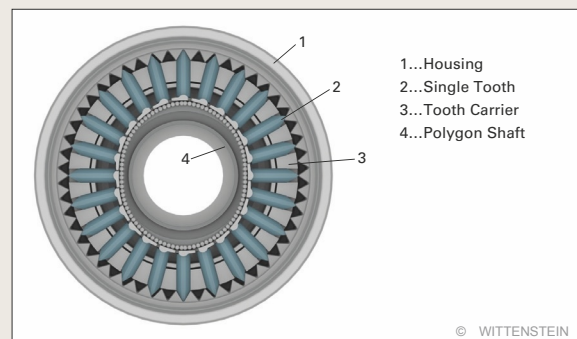
Il punto più esterno del portadenti è sempre un punto (linea) di contatto. Il secondo punto (linea) di contatto è dato dal fondo del dente e la parete della sede. La sua posizione è variabile a seconda della posizione radiale del dente. Pertanto, in fase progettuale, è importante studiare nel dettaglio questo aspetto in modo da garantire una lubrificazione ottimale anche tra dente e portadenti.

La figura 14 mostra un'immagine delle superfici a contatto dopo un certo numero di cicli. L'area di contatto nel punto esterno risulta molto minore rispetto a quella interna. Questo conferma quanto affermato in precedenza rispetto alla posizione variabile del contatto. All'interno di queste aree sono ancora presenti, anche dopo cicli ripetuti, segni delle lavorazioni meccaniche a conferma della bassa usura che si ha in fase di rodaggio tra guida e dente. Anche in questo caso si osservano striature nella direzione dello strisciamento. Queste sono però dello stesso ordine di grandezza della rugosità e non impattano sul buon funzionamento del meccanismo.

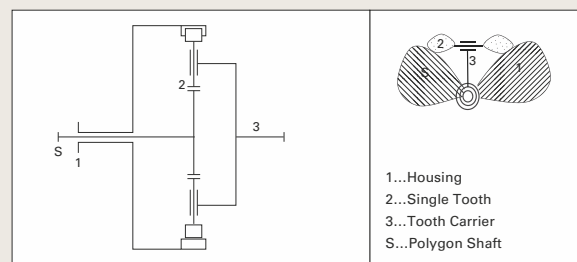
→ segue a pagina 28



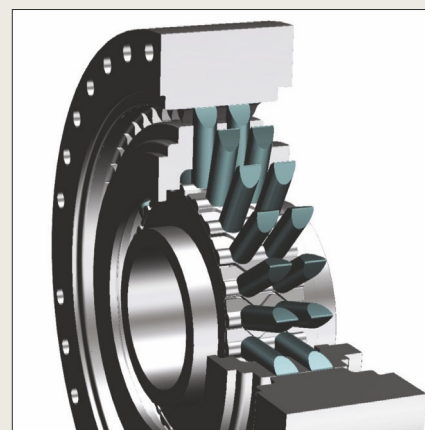
**Fig. 6** - Schema cinematico di un rotismo cicloidale.



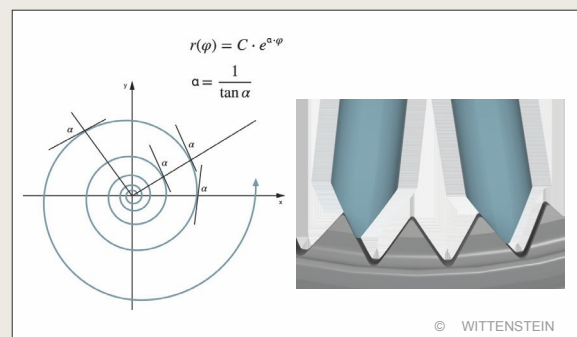
**Fig. 7** - Sezione trasversale di un riduttore Galaxie [1-3].



**Fig. 8** - Schema cinematico di un riduttore Galaxie[1-3]

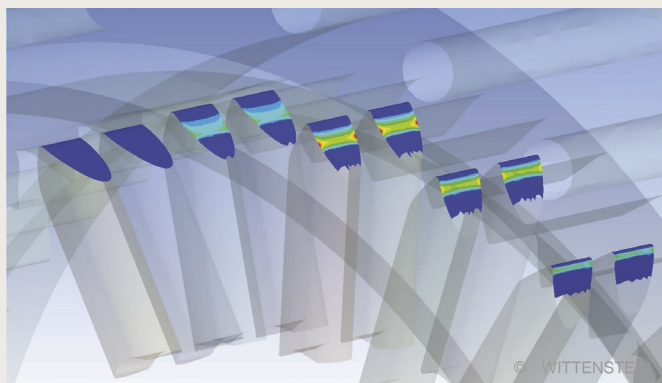


**Fig. 9** - Sezione di un riduttore Galaxie.

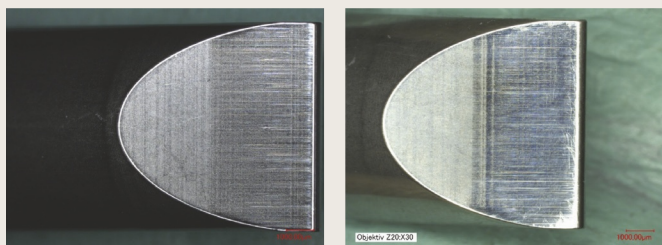


**Fig. 10** - Profilo logaritmico [1-3].

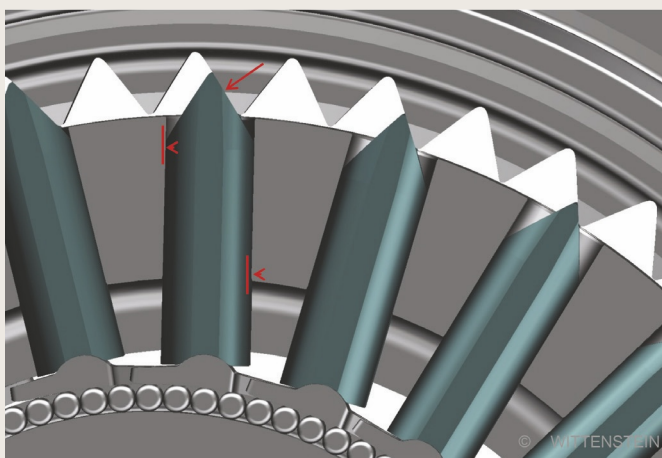




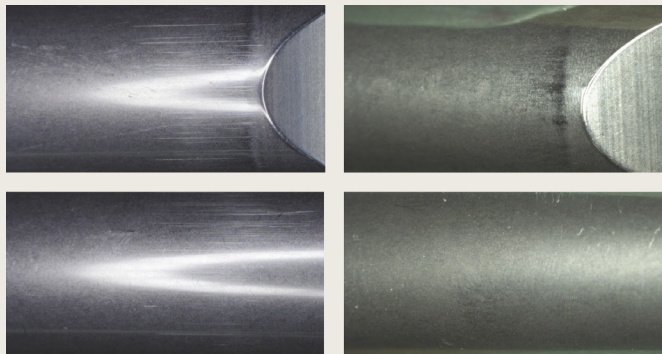
**Fig. 11** - Simulazioni FEM della distribuzione del carico durante la fase di accelerazione a coppia massima.



**Fig. 12** - Fianco a seguito di test condotti al massimo carico [coppia accelerante] (sinistra) e a seguito di test condotti a carico nominale raddoppiato (destra) dopo una vita tripla rispetto a quella da catalogo.



**Fig. 13** - Doppio contatto tra dente e portadente.



**Fig. 14** - Area di contatto esterna (sopra) e interna (sotto) della guida dopo alcuni cicli di carico in condizioni di coppia accelerante (sinistra) e con coppia nominale raddoppiata (destra) per una durata tripla rispetto a quella nominale.

Grazie alla piccola distanza tra la fine della guida (punto di contatto più esterno) e il punto di contatto con la corona dentata (dente - dente), le forze (momenti) che si sviluppano sono di piccola entità. Questo, considerando anche l'ottima lubrificazione, permette di ridurre al minimo le pressioni di contatto. I denti sono poi supportati dal portadenti che ha una struttura massiccia ed assicura elevata rigidezza al sistema.

## Rigidezza

Le caratteristiche peculiari descritte in precedenza fanno del riduttore Galaxie una soluzione particolarmente performante dal punto di vista della rigidezza. L'elevato numero di denti permette una distribuzione più omogenea del carico.

La cinematica dell'accoppiamento denti - portadenti, permette di minimizzare le forze scambiate nei contatti. Il portatreno, massiccio e simmetrico, assorbe in modo ottimale le reazioni vincolari tra le parti. Questo assicura bassissime deformazioni ed un'elevata rigidezza.

Per ottenere un riduttore Galaxie a gioco zero, è necessario stringere i giochi a tal punto da forzare le parti in fase di montaggio.

Questo però, grazie alla particolare configurazione di questa tipologia di riduttore, comporta carichi paragonabili a quelli che si avrebbero comunque in esercizio. Inoltre, in esercizio, tali carichi vengono compensati. In altre parole, il carico massimo, che è quello che determina la vita del componente, è confrontabile con quello che si avrebbe in un riduttore Galaxie con gioco per cui il gioco stesso non ha impatto significativo sulla vita del riduttore.

© RIPRODUZIONE RISERVATA

## BIBLIOGRAFIA

- [1] T. Burger, H. Schreiber und T. Wimmer, „High Torque, Torsional Stiff and Precise - The WITTENSTEIN Galaxie®-Kinematics-“, in *International Conference on Gears, ICG, München, 2015*.
- [2] H. Schreiber, T. Wimmer, F. Michel und B. Schlecht, „Die WITTENSTEIN Galaxie®- Kinematik - Exzenter-Getriebe neu gedacht -“, in *Antriebstechnische Kolloquium, ATK, Aachen, 2015*.
- [3] H. Schreiber, „Revolutionäres Getriebeprinzip durch Neuinterpretation von Maschinenelementen - Die WITTENSTEIN Galaxie®-Kinematik“, in *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, DMK, Dresden, 2015*.
- [4] H. W. Müller, *Die Umlaufgetriebe*, Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [5] M. Weck und C. Brecher, *Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*, Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [6] „<http://www.nabtesco.de/produkte/funktionsprinzip/>“, Nabtesco Precision Europe GmbH. [Online]. [Zugriff am 03 2017].
- [7] „<http://www.spinea.sk/de/products/twinspin/>“, SPINEA, s.r.o.. [Online]. [Zugriff am 03 2017].
- [8] T. Bayer und M. Schmidt, „Getriebe“. Patent WO 2008028540, 08 09 2006.

**Questo articolo è già stato presentato all'International VDI Conference 2017, Garching/Monaco (VDI - Berichte 2294, 2017, VDI Verlag GmbH) ed è qui ripubblicato dietro autorizzazione di VDI.**