

Ingranaggi in 3D

Potenzialità, caratteristiche e applicazioni di KISSsys, un software destinato alla progettazione di trasmissioni a ingranaggi. In particolare, si presentano esperienze e prestazioni analizzando i casi concreti di Getrag e Liebherr.

» U. Kissling, M. Raabe, H. Dinner
KISSsoft AG, Hombrechtikon (CH)

Il software KISSsys associa l'analisi dei flussi di potenza, il calcolo della durata e la grafica 3D a un linguaggio di programmazione, proponendosi come la soluzione ideale per l'analisi della resistenza delle trasmissioni a ingranaggi.

KISSsys permette all'utente di eseguire in breve tempo studi parametrici rapidi e dettagliati di una trasmissione completa, per comparare le diverse soluzioni. I componenti progettabili vanno dagli ingranaggi, agli alberi, ai cuscinetti, ai calettamenti albero-mozzo fino ai bulloni. Ne deriva una progettazione più equilibrata e un minor numero di modifiche nelle diverse fasi di progettazione. Lo scopo di questa presentazione è di illustrare i principi del software e i suoi molteplici impieghi. In particolare, si parlerà delle esperienze e delle prestazioni analizzando i casi concreti di Getrag e Liebherr.

La progettazione CAE di organi meccanici

KISSsys utilizza KISSsoft per i calcoli della durata dei diversi organi delle macchine. KISSsoft è uno strumento CAE per la progettazione efficace e conveniente di componenti come gli ingranaggi, gli alberi, i cu-

scinetti, i calettamenti albero-mozzo e le molle. KISSsoft è soprattutto studiato per la progettazione dei cambi ed è noto per le sue capacità di analisi dettagliata degli ingranaggi. I metodi implementati per i calcoli sono tutti conformi agli standard (ISO, AGMA, DIN) o ampiamente riconosciuti e accettati. Oltre alla classica verifica di resistenza statica e di fatica, il software mette a disposizione funzioni sofisticate per l'ottimizzazione delle parti. Una delle funzioni più potenti esegue iterazioni attraverso una data di parametri per ingranaggi cilindrici o elicoidali, determina le soluzioni geometricamente possibili e le classifica in base a diversi criteri come la resistenza, la rigidità, la rumorosità o il peso.

Il software, sviluppato in origine da un'azienda svizzera produttrice di cambi di velocità, è oggi affidato a una società di ingegneria indipendente specializzata in software

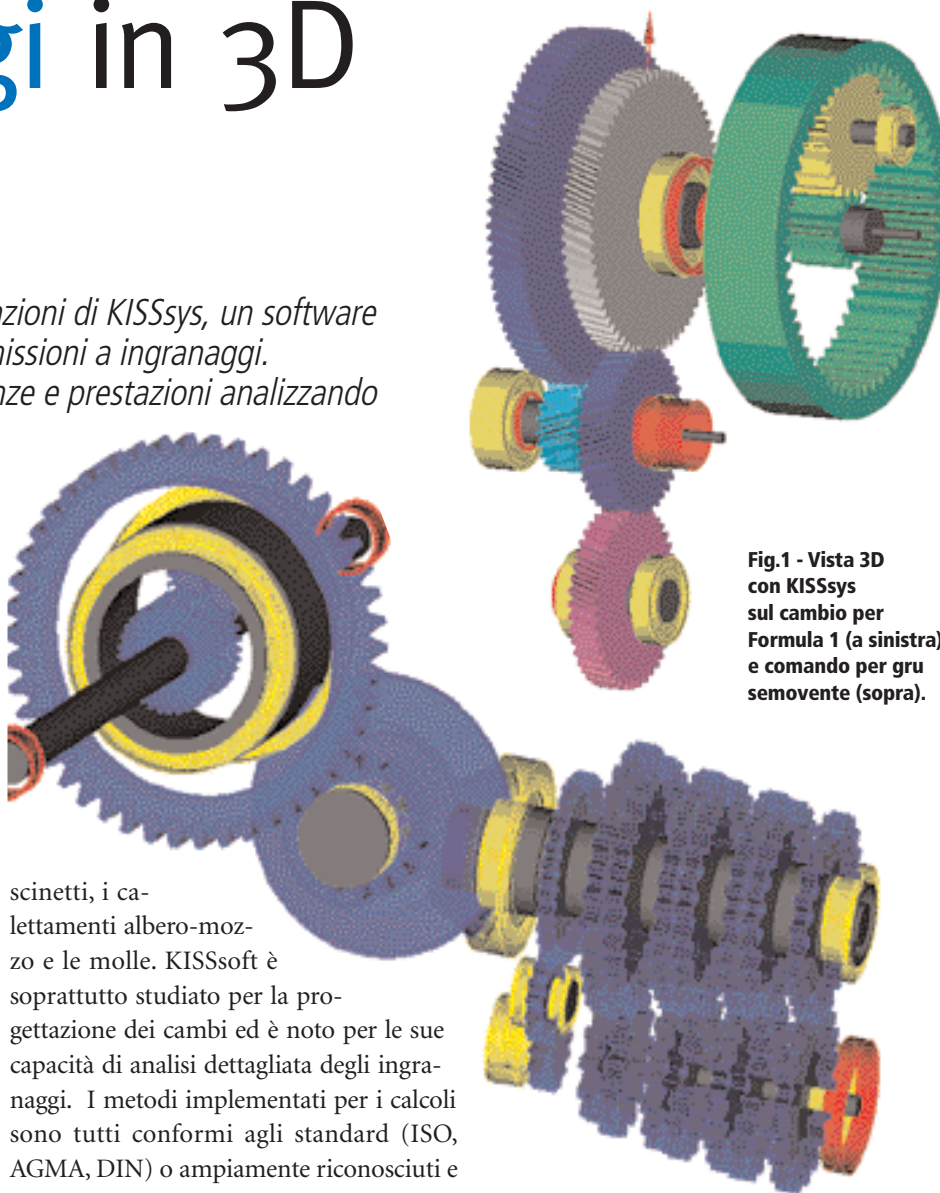


Fig.1 - Vista 3D con KISSsys sul cambio per Formula 1 (a sinistra) e comando per gru semovente (sopra).

per la trasmissione di potenza meccanica. Negli ultimi 25 anni è stato continuamente perfezionato e arricchito con nuove funzioni e, per diventare un utile strumento per l'attività quotidiana del progettista, è stato affidato a ingegneri meccanici competenti ed esperti. KISSsoft è ormai diventato un prodotto di punta in Europa per il calcolo della resistenza e della vita utile nello sviluppo di trasmissioni a ingranaggi.

Nella progettazione di un cambio, il tecnico deve eseguire una procedura iterativa: ogni cambiamento di un elemento del cambio

(per esempio, l'angolo d'elica di un ingranaggio) influisce su quasi tutte le altre parti (per esempio i cuscinetti). Il controllo di questi influssi, per mezzo di calcoli eseguiti manualmente, può essere estremamente lento e suscettibile di errori. L'obiettivo è quindi quello di avere non solo una coppia di ingranaggi parametrizzati (come avviene nel software standard), ma l'intera trasmissione e con KISSsys l'obiettivo è raggiunto. Qui, tutte le parti (ingranaggi, alberi, cuscinetti e calettamenti) del cambio sono collegate fra loro e l'analisi della resistenza/durata viene eseguita per tutti gli elementi contemporaneamente. Una rappresentazione grafica tridimensionale dello stato corrente del sistema indica immediatamente l'influenza geometrica di ogni cambiamento di parametro. Questo tipo di approccio accelera enormemente il processo di sviluppo del progetto e sfocia in una progettazione molto più bilanciata anche durante la fase iniziale.

Alcuni esempi applicativi

Dall'uscita della sua prima edizione nel 2001, KISSsys è stato utilizzato con successo in un'ampia varietà di applicazioni. Oltre che in quelle dell'industria (inclusi motori a ingranaggi, turbine eoliche, utensili a motore, attuatori, ecc.), è stato impiegato per diversi progetti in campo automobilistico, agricolo e meccanico.

Ecco alcuni esempi di progetti particolarmente interessanti.

Modellazione di un cambio per una squadra di Formula 1

La modellazione prevede il cambio stesso (7 marce avanti e 1 indietro), l'intermedio, la riduzione finale a ingranaggio conico e il differenziale cilindrico (fig.1). Il calcolo della vita utile viene eseguito per gli ingranaggi, i cuscinetti e gli alberi in condizioni di carico misurate durante le corse. Un elemento del ciclo di esercizio è composto dalla frequenza d'uso, dalla velocità del motore e della coppia e dall'ingranaggio selezionato e utilizza una delle proprietà più interessanti di KISSsys, nel senso che nella determinazione della vita utile totale, inclusi i cicli d'esercizio, prima viene impostato il flusso di potenza per ogni gruppo di condizioni di carico corrispondenti alla marcia selezionata e poi vengono eseguiti i calcoli di sistema.

Il risultato è una tabella facilmente comprensibile delle vite utili di tutte le parti, calcolate per il ciclo d'esercizio. Gli elementi critici (per esempio, vita utile troppo breve) e gli elementi sovradimensionati (per esempio, possibile risparmio di peso) possono essere individuati immediatamente.

Grandi gru semoventi

Le grandi gru semoventi hanno non meno di otto assi, dei quali la parte più grande

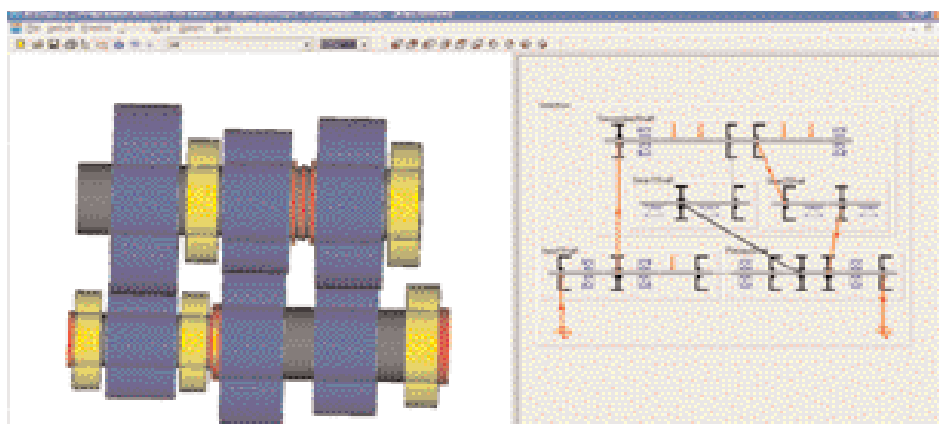


Fig. 2 - Cambio a tre marce (esempio semplificato); l'ingranaggio per la riduzione costante dell'albero secondario è sospeso sopra i cuscinetti.

Caratteristiche del software

Calcoli cinematici:

- Ingranaggi conici, elicoidali, viti senza fine e ruote piano-coniche
- Ingranaggi epicicloidali (satellitari, di Ravnigneaux, di Wolfrom, ...)
- Modellazione di trasmissioni differenziali
- Aggiunta di alberi, cuscinetti e connessioni albero-mozzo al modello
- Inclusione di trasmissioni a catena e di cinghie dentate
- Attivazione /disattivazione di giunti, aggiunta di slittamento
- Aggiunta di carichi esterni e rendimento

Modellazione 3D:

- Rappresentazione 3D basata su struttura ad albero
- Grafica basata solo sui dati di calcolo, grafica parametrizzata
- Esportazione in CAD per i controlli di interferenza
- Importazione di scatole del cambio come STEP o IGES

Funzioni speciali:

- Calcolo degli spettri di carico per tutti gli organi delle macchine inclusi nel modello
- Uso delle varianti di un cambio nello stesso modello KISSsys
- Esecuzione automatica dell'analisi di sensibilità
- Generazione automatica di documentazione per l'analisi completa del cambio
- Uso di linguaggio script per l'automatizzazione dei processi di routine

deve essere comandata. Le trasmissioni della distribuzione sugli assi, con i loro differenziali collegati e i cambi ruota dentata-mozzo, sono di conseguenza complessi. Il calcolo delle varie condizioni di carico (per esempio, per comparare la guida su strada e fuori strada) rende quindi necessario un elevato numero di calcoli per ogni singolo elemento. La strutturazione di questi calcoli con KISSsys consente un grande risparmio di tempo e permette di ottenere una migliore chiarezza dei risultati.

Sviluppo di nuove soluzioni per trattori

Per ottenere una velocità variabile con continuità si utilizzano comandi a potenza distribuita. A tal fine, nel cambio la potenza del motore è ripartita fra un componente idrostatico e un componente meccanico. Nella parte idraulica, una pompa a pistoni assiali comanda un motore idraulico con un elevato angolo di inclinazione. La parte idrostatica agisce così da cambio CVT.

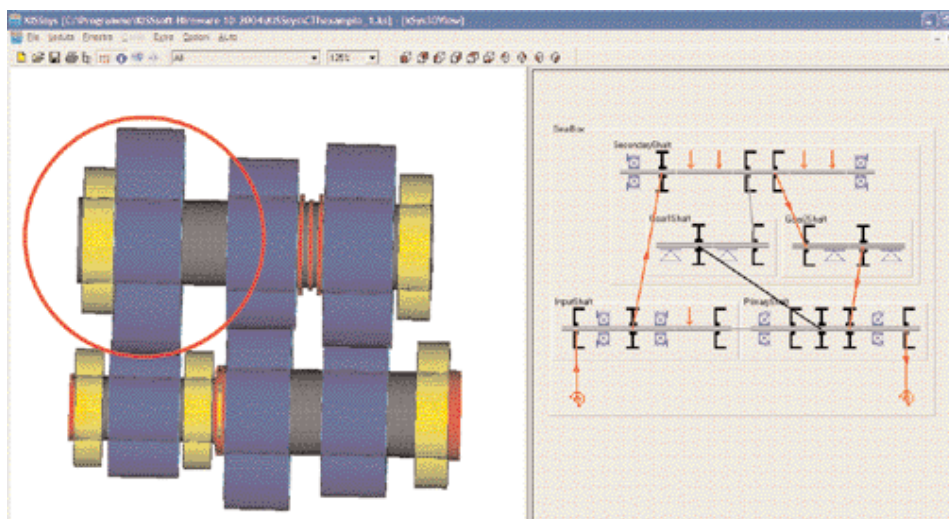


Fig. 3 - L'albero secondario è supportato da cuscinetti posti a ogni estremità.

I due componenti di potenza vengono fatti convergere in un albero di raccordo, che arriva fino al differenziale centrale e poi ai treni di ingranaggi assiali. Le operazioni principali da eseguire con KISSsys sono la determinazione del rendimento complessivo, la potenza trasmessa per via idrostatica e il calcolo della vita utile con particolari condizioni di carico specifiche del caso. Di speciale interesse è l'operazione consistente nel determinare lo spettro di carico, da usare nelle prove, che porta allo stesso grado di danneggiamento degli spettri di carico che si prevede di avere nelle condizioni reali di funzionamento.

Una soluzione per lo sviluppo dei cambi manuali

Un'area di applicazione di KISSsys è lo sviluppo preliminare dei cambi per automobili. Spesso, nelle prime fasi del lavoro di ideazione, i calcoli devono essere eseguiti rapidamente e per diverse configurazioni senza arrivare a risultati definitivi. Con KISSsys, indicazioni relative alla vita utile possono essere ottenute già nella prima fase di studio per tutte le configurazioni considerate, così come è possibile eseguire rapidamente analisi sulle diverse disposizioni dei cuscinetti e degli ingranaggi. Anche l'influsso delle varianti sulla durata dei cu-

scinetti e della deformazione degli alberi può essere facilmente analizzato con KISSsys. Il calcolo può essere eseguito sia per carichi nominali sia per spettri di carico.

Per le finalità di questo articolo, potrà servire da esempio il cambio a tre marce semplificato, riportato nella figura 2. Il lato destro della figura mostra lo schema del flusso di potenza. In basso a sinistra è visibile l'albero d'ingresso, che può essere innestato

direttamente nell'albero di uscita, per fornire la terza marcia, e comanda l'albero secondario tramite una coppia di ingranaggi in presa. Sull'albero secondario sono collocati due ingranaggi folli che possono essere bloccati sull'albero tramite dischi. La linea grigia nella rappresentazione di KISSsys indica un disco aperto, la linea rossa un disco bloccato che trasferisce la potenza. Le forze degli ingranaggi folli sono rappresentate come forze individuali sull'albero di rinvio. Con la configurazione riportata in figura 2 (cuscinetti sul lato destro dell'ingranaggio), si riscontrano le inflessioni dell'albero (angolo), come indicato nella tabella 1.

Una semplice variazione di questo modello potrebbe consistere, ad esempio, nel cambiare l'ordine ingranaggio e cuscinetto sull'albero secondario. Si otterrebbe una rappresentazione come quella riportata nella figura 3. I calcoli darebbero, ad esempio, gli angoli di inflessione delle ruote dentate e in corrispondenza dei punti del cuscinetto.

I risultati ottenuti sono ora quelli indicati in tabella 2.

In questo modo, cambiando la posizione del cuscinetto, gli angoli di inflessione delle

TAB. 1 - ANGOLO DI INFLESSIONE DELL'ALBERO IN SESSANTESIMI DI GRADO (SECONDA MARCIA SELEZIONATA) IN VARI PUNTI

Punto	Riduzione fissa	Primo ingranaggio	Secondo ingranaggio	Cuscinetto 1	Cuscinetto 2
Albero ingresso	0,01			0,8	0,9
Secondario	2,4	0,5	1,0	1,8	1,4
Primario		0,3	0,6	0,5	1,0

TAB. 2 - ANGOLO DI INFLESSIONE DELL'ALBERO IN 1/60° (SECONDO INGRANAGGIO SELEZIONATO) NEI VARI PUNTI

Punto	Riduzione fissa	Primo ingranaggio	Secondo ingranaggio	Cuscinetto 1	Cuscinetto 2
Albero ingresso	0,02			0,8	0,9
Secondario	0,5	0,3	0,6	0,8	0,8
Primario		0,9	0,2	0,7	1,2

ruote dentate e dei cuscinetti possono essere sensibilmente ridotti riducendo la tendenza verso una migliore capacità di carico e a una più lunga vita utile o (con una sezione trasversale dell'albero ridotta) a una riduzione di peso. Un raffronto di questo tipo richiede normalmente pochi minuti, ma fornisce informazioni di grande utilità. Getrag, azienda produttrice di cambi per vetture a trazione anteriore, utilizza oggi KISSsys nello sviluppo preliminare di nuovi cambi per automobile e per cambi a doppia frizione. Secondo i tecnici Getrag, le applicazioni e i vantaggi di KISSsys sono così riassumibili.

Ricerca sullo schema dei cambi a ingranaggi (tempi molto lunghi per la costruzione di un nuovo modello di cambio: 4-6 h).

Comparazione fra soluzioni per cuscinetti (tempo necessario per la comparazione di più soluzioni per cuscinetti, in base al lavoro necessario per modificare il modello: da 0,5 a 1h per variante).

Ottimizzazione del layout (una variazione nell'ordine dei piani della ruota dentata prolunga la vita utile di un cuscinetto critico di un fattore 4 dimezzando contemporaneamente la deflessione dell'albero; 8 varianti: 4 h).

Dimensionamento degli alberi e selezione iniziale dei cuscinetti (tempo necessario per dimensionare gli alberi e i cuscinetti durante l'analisi di un cambio a doppia frizione: circa 4 h).

Secondo le informazioni ricevute dai tecnici responsabili dello sviluppo, il tempo di analisi per la comparazione delle diverse soluzioni potrebbe ridursi di un fattore 5!

Applicazione nello sviluppo dei cambi automatici

Con KISSsys non solo essere modellati i cambi ad albero parallelo, ma anche gli ingranaggi epicicloidali.

La modellazione del flusso di potenza e i calcoli delle forze di avvolgimento, delle coppie e delle relative velocità di albero dei sistemi epicicloidali sono sempre stati uno dei requisiti più importanti nello sviluppo

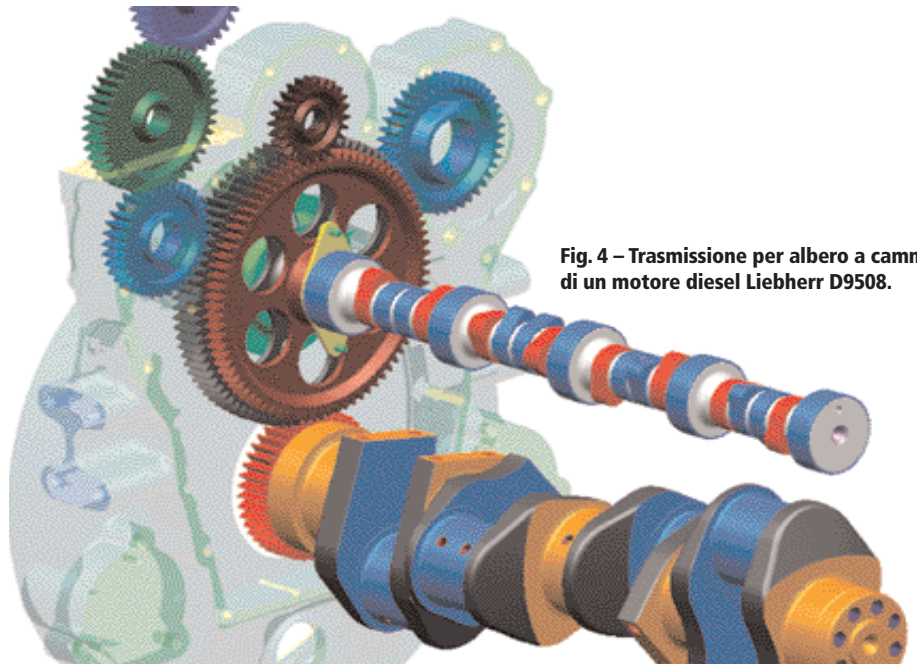


Fig. 4 – Trasmissione per albero a camme di un motore diesel Liebherr D9508.

di KISSsys. In abbinamento alle frizioni è possibile ottenere la distribuzione della potenza e le varie riduzioni negli stadi satellitari (per esempio, nel gruppo di Ravinaux).

Per esempio, è stato creato un modello completo di questo tipo di cambio auto-

matico per una grande casa automobilistica tedesca.

Per i cambi a doppia frizione, le frizioni possono essere non solo rappresentate come aperte e chiuse, ma anche prese in considerazione nei calcoli cinematici con scorrimento o carico predeterminato.

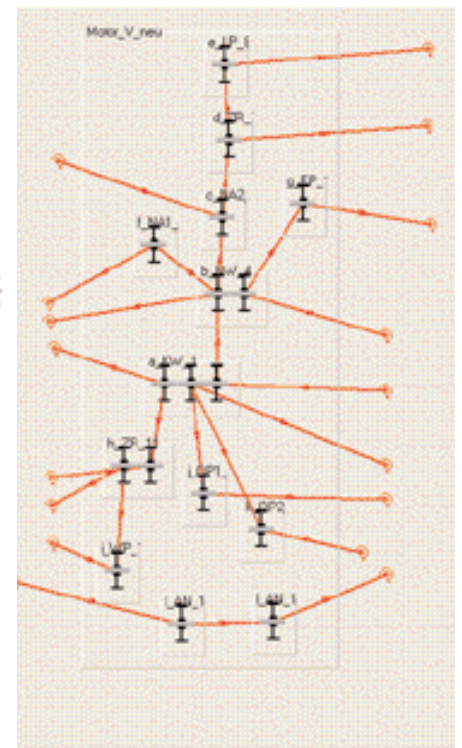
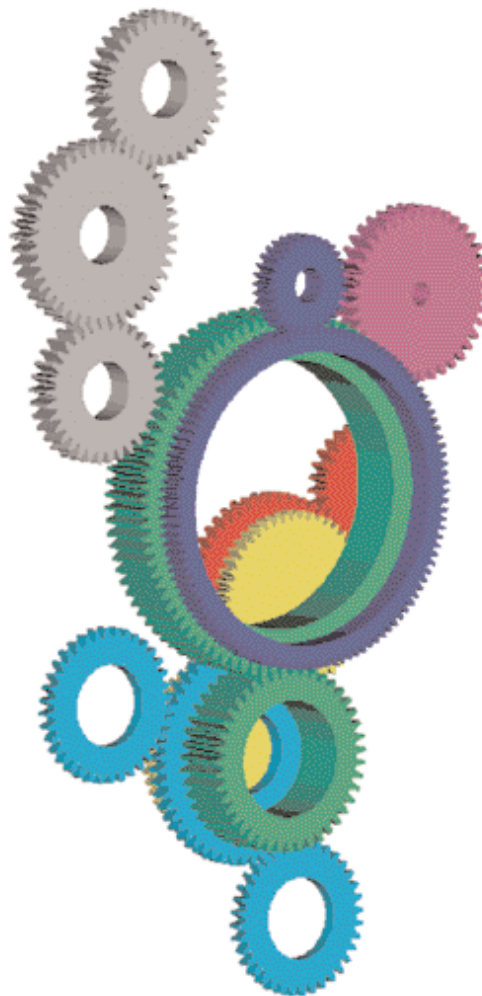


Fig. 5 - Rappresentazione in 3D della trasmissione a ingranaggi e del flusso di potenza, schematizzato con KISSsys.

MOTOR V	Kurbelwelle_1	Kurbelwelle_2	Kurbelwelle_3	Nockenwelle_4	Nockenwelle_5	Nebentrieb1_6	Zwischenw_7	Lufteinstr_8	Nebentrieb1_9	Luftpumpe_10	Zwischenw11_11	Zwischenw12_12	Luftepumpe
P [kW]	112.32	1	1	5	8.1	15.01	0.3	1.2	24.259	6.4099	1	1	
T [Nm]	520.52	-4.3496	4.2496	43.436	0.89212	93	8.43486	-42.386	-309	-76	4.5293	4.5293	2.5
n [1/min]	2292	2292	2292	-1130	-1100	2968.7	-2292	2292.9	2295	4803.4	-2110.2	-2110.2	361
S. Zahnen (T_A)	4.3564	21.642	150.95	2.3221	3.3041	3.3041	9.7655	7.3866	2.2218	3.4956	1.9232	119.92	121
S. Zahndicke (T)	2.1235	4.3637	9.9134	1.1611	1.6521	1.6521	1.9543	1.9909	1.1071	1.52	4.1728	8.8793	8.8
S. Fasson (T_B)	4.1728	246.2	1200.7	2.8533	5.9125	3.3547	5.2391	5.2712	2.9525	5.9125	246.2	306.05	576
				Kurbelw.	Mut/M12	M12/2R	2R/1P	Mut/M11	M11/1P	KW/2R			2R/1P
Achsenabstand [mm]				21.4	4.6	6.7	7.2	4.5	6.79	12.11			112
				28.75	208.25	139	138.5	229.5	182	144			134
Sevordringfaktor				1	2	2	2	2	5	3.9			
PfWend [s]				112.82	27.11	12.1	1.2	24.259	6.4099	3			
eff_A				2168	21235	28563	28203	21554	20956	18937			1.0
eff_B				0	6	0	0	6	0	3			
eff_C				21688	21326	28563	28203	21554	20956	18937			1.8
Bele b [mm]	30	18	15	30	23.5	25	24.8	25	27	23.5	15	18	
mm	6			816145	613596	6107367	6097302	612596	61421				
mm	6			820151	624564	621751	621751	623614	62276				

Fig. 6 - Interfaccia utente per il calcolo dei comandi ausiliari dei motori diesel; le cifre in rosso sono gli input richiesti, le cifre in nero sono i risultati. Le celle in azzurro sono i pulsanti funzionali.

Modello KISSsys di una trasmissione per albero a camme

Il comando dell'albero a camme di un motore è costituito da più ingranaggi e, oltre al controllo effettivo del motore, comanda diversi ausiliari, fra i quali pompe idrauliche, compressor, pompe acqua e generatori. Questi ausiliari possono variare sensibilmente in base alla funzione del motore. Quindi, prima che un motore sia approvato per una nuova applicazione, è necessario verificare che le sue varie parti siano state dimensionate in modo adeguato. Normalmente un comando è costituito da 12 a 20 ingranaggi con i relativi alberi e cuscinetti (figg. 4 e 6). Se i calcoli dei vari elementi vengono eseguiti singolarmente, lo sforzo è di una certa entità e, per effetto della complessità, suscettibile di errori.

Liebherr Machines di Bulle, Svizzera, ha utilizzato KISSsys per due anni per la progettazione delle trasmissioni a ingranaggi di motori diesel utilizzati come motori primari in una vasta gamma di impieghi. Gli specifici requisiti di impiego dell'energia fornita hanno subito variazioni.

Con l'aiuto di KISSsys, è possibile analizzare configurazioni specificamente studiate per il cliente e controllare rapidamente e in modo affidabile le interfacce critiche.

Il rischio di errori risulta molto ridotto e il tempo di calcolo è minimo. Ogni singolo controllo può richiedere meno di 15 minuti! La figura 4 riporta un esempio di comando ad albero a camme con pompe idrauliche e un compressore.

Il modello KISSsys (figura 5, con un'ulteriore distribuzione di potenza) gestisce il flusso di potenza dall'albero motore principale, attraverso il treno di ingranaggi, fino ai comandi ausiliari e agli alberi a camme. Gli ausiliari sono rappresentati da un compressore d'aria, una pompa a iniezione, una pompa acqua e un'unità idraulica. Tramite l'interfaccia utente del modello (una tabella tipo Excel come quella riportata nella figura 6) vengono inseriti i requisiti di potenza dei diversi ausiliari. Ulteriori informazioni utili, come la velocità nominale del motore o i fattori applicativi (la necessità di prendere in considerazione le irregolarità di vario tipo della coppia nel calcolo della ruota dentata), vengono inoltre definite direttamente in base ai casi particolari. Usando pulsanti funzionali, è possibile eseguire i calcoli per l'intero sistema o analizzarli e modificarli in dettaglio per le singole coppie di presa (aprendo la finestra di calcolo degli ingranaggi di KISSsoft). Un altro pulsante avvia la generazione di un record ge-

nerale che documenta i dati di sistema e il calcolo della resistenza in base alle norme ISO sulle ruote dentate. Il report può essere generato in inglese, tedesco, francese, italiano o spagnolo.

Considerazioni conclusive

Gli esempi considerati dimostrano la possibilità di ottenere un incremento dell'efficienza nella progettazione delle trasmissioni e nel controllo di nuovi requisiti delle trasmissioni già esistenti. Le potenzialità di KISSsys sono state dimostrate da un buon numero e una grande varietà di progetti. Il numero degli utenti di KISSsys e i campi di applicazione sono in continua e costante crescita, soprattutto ora che l'attuale concetto software di lavoro a livello di sistema (anziché a livello di elemento macchina) si è diffuso fra gli esperti.

Il tempo necessario per una prima analisi qualitativa e quantitativa di una soluzione si è notevolmente ridotto, specialmente nei casi in cui devono essere prese in considerazione diverse varianti della stessa soluzione. Questo porterà in futuro alla possibilità di eseguire analisi a più varianti che a sua volta consentirà di ottenere una progettazione finale più equilibrata.