

**MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
Szerszámgépek Tanszéke**

**FORGÁCSOLÓ SZERSZÁMGÉPEK
FOKOZATOS FŐHAJTÓMŰVEI**

Oktatási segédlet

Miskolc, 2002

**MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
Szerszámgépek Tanszéke**

**FORGÁCSOLÓ SZERSZÁMGÉPEK
FOKOZATOS FŐHAJTÓMŰVEI**

Oktatási segédlet

Az oktatási segédletet Dr. Tajnafői József és Dr. Takács Ernő egyetemi jegyzetei alapján összeállította, szerkesztette:

Dr. Jakab Endre

Miskolc, 2002

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés	1
1. Fokozatos főhajtóművek funkcióvázlatai blokkvázlatai)	2
2. A kinematikai tervezést meghatározó technológiai jellemzők	3
3. Fokozatos főhajtóművek fordulatszámSORAI	4
4. A fokozatos hajtóművek kinematikai elemei	9
4.1 Fogaskerekes hajtóműegységek, kinematikai vázlatok	9
4.1.1 Állandó áttételű és cserekeres hajtóműegységek.....	10
4.1.2 Tolókeres hajtóműegységek.....	13
4.1.3 Tengelykapcsolós hajtóműegységek.....	15
4.1.4 Előtéttengelyes hajtóműegységek.....	16
5. Összetett hajtóművek	17
5.1 Szabályos hajtóművek.....	17
5.2 Túlfedett hajtóművek.....	23
5.3 Előtéttengelyes hajtóművek.....	25
5.4 Pólusváltós motorok alkalmazása.....	26
5.5 Közös fogaskerekes hajtóművek.....	27
5.6 A fogaskerekek fogszámának meghatározása.....	29
5.7 Fokozatos főhajtóművek teljesítmény- és nyomatékviszonyai.....	32
6. Fokozatos főhajtómű tervezése (Példa)	34
6.1 A főhajtómű szabályozhatóságának meghatározása.....	34
6.2 A fokozatszám.....	35
6.3 Hajtóműegyenletek.....	35
6.4 Szerkezeti- és fordulatszámábrák, kinematikai vázlat.....	35
6.5 A fogszámok meghatározása.....	37
6.6 A fordulatszámhibák számítása.....	39
6.7 A hajtómű teljesítmény- és nyomatékviszonyai.....	40
6.8 További megoldásváltozatok.....	41
7. Az ERI 250 NC esztergagép főhajtóműve	42
7.1 Szerkezeti kialakítás, kinematikai viszonyok	43
Irodalom	47

FORGÁCSOLÓ SZERSZÁMGÉPEK FOKOZATOS FŐHAJTÓMŰVEI

Forgómozgást létrehozó mechanikus főhajtóművek kinematikai elemei

Bevezetés

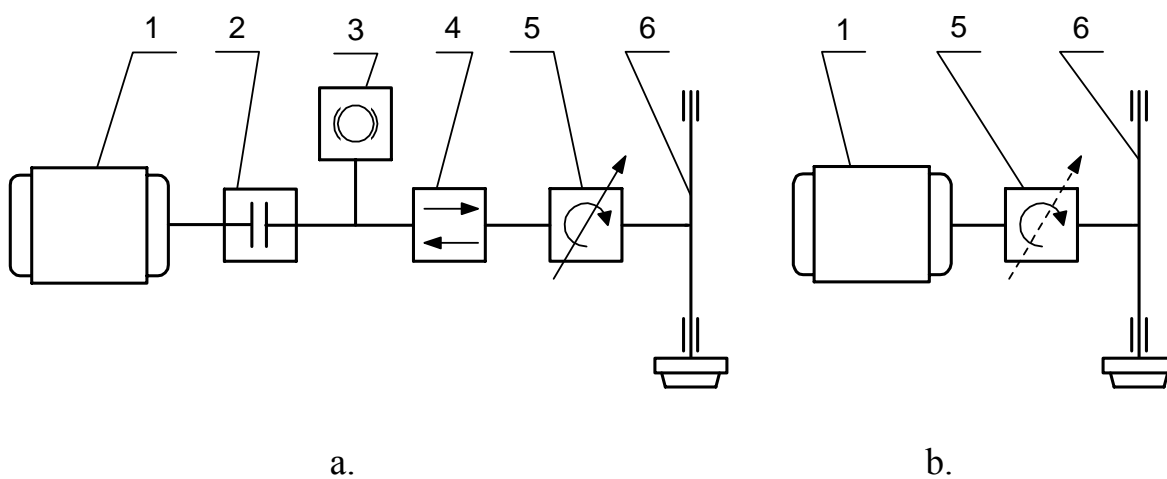
A megmunkáló gépek körében a fémforgácsoló szerszámgépek a legfontosabb gépcsoportot képezik. A relatív mozgásokat létrehozó elemi mozgások teljesítményigénye nagyon különböző. *A legnagyobb teljesítményigényű mozgásokat forgácsoló főmozgásoknak nevezik*, amelyek teljesítménye legalább két nagyságrenddel haladja meg az előtoló mozgásokét. A forgácsoló főmozgást főhajtóművek biztosítják, ezért szerepük a gépeken belül kiemelt. A munkadarab megmunkálási pontossága a főhajtómű és a főorsó működésétől ugyancsak nagymértékben függ. A korábban szinte kizárólagos fokozatos főhajtóművek elméleti alapjait és gyakorlati alkalmazásait magas szinten mutatja be TAJNAFŐI, J. és TAKÁCS, E. az [1, 2] egyetemi jegyzetekben. Az [1, 2]-ben leírtak ma is helytállóak és alkalmazottak, ezért a fokozatos főhajtóművek kinematikai viszonyainak bemutatásához ezeket a műveket vettük alapul. Ugyanakkor felhasználtuk az elismert német szerzők, [6, 7, 8] összefoglaló műveit is, amelyek a német szerszámgépipar értékes tapasztalataiból is táplálkoztak. A mechanikus és elektromechanikus főhajtásoknál mindig forgó mozgású hajtóművekkel dolgozunk. Ez egyrészt azzal magyarázható, hogy a forgó mozgások előállítása villamos forgó motorokkal egyszerű. Továbbá az egyenes vonalú mozgásokhoz is forgó mozgású hajtóműveket célszerű alkalmazni és csak a kinematikai lánc végére épített forgó/haladó mozgás-átalakító mechanizmus (forgattyús, lengőhimbás, fogaskerék - fogasléc, stb.) biztosítja a haladó mozgást. A forgó mozgású szerszámgépek és főhajtások jelentősége és kiemelt szerepe abból adódik, hogy csak folytonos forgó mozgásoknál használhatók ki a különböző minőségű szerszámok (gyorsacél, keményfém, kerámia, stb.) optimális és gazdaságos vágósebességei.

Mechanikus, sokfokozatú főhajtóműveknél a fordulatszám változtatása alapvetően mechanikai szerkezetekkel történik. A sokfokozatú főhajtóműveket a számjegyvezérlésű (NC) szerszámgépeknél kiszorították a korszerű, fokozat nélküli hajtások, ezért jelentőségük csökkent. Természetesen vannak továbbra is olyan területek, ahol a fokozatos hajtóművek továbbra is gazdaságosak, továbbá a hagyományos szerszámgépek még hosszú ideig szolgálják a termelést. A korszerű fokozat nélküli hajtásoknál is gyakran található kis fokozatszámú hajtómű, amelyek tervezéséhez az itt megismertek alapul szolgálnak.

1 Fokozatos főhajtóművek funkcióvázlatai (blokkvázlatai)

Az 1.a, b ábrák a forgó főmozgású, az 2. ábra a haladó főmozgású mechanikus fokozatos hajtóművek funkcióra jellemző vázlatokat szemléltetik, amelyeket szokás blokkvázlatoknak is nevezni.

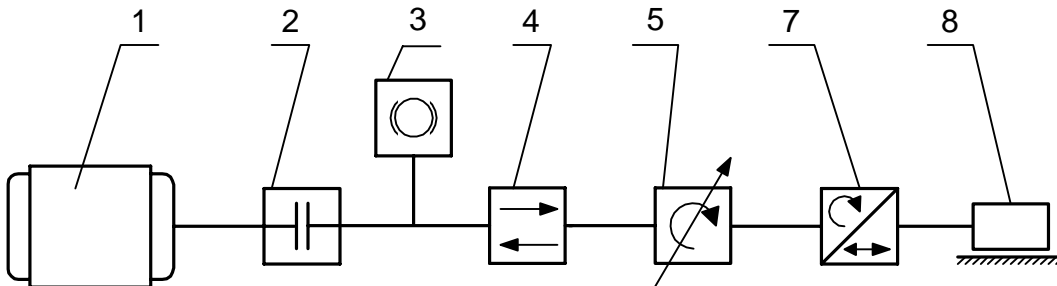
Az ábrák jelölései: 1- főmotor állandó, vagy fokozatosan állítható fordulatszámú, 2- tengelykapcsoló, 3- fék, 4- irányváltó, 5- a forgó mozgás nagyságát beállító fokozatos vagy fokozat nélküli mechanikus hajtómű, esetleg állandó áttétel, 6- főorsó (forgó szán), 7- forgó/egyenes vonalú mozgás-átalakító mechanizmus (forgattyús-himbás, fogaskerék- fogasléc, orsó- anya, stb.), 8- haladó mozgású szán. Az 1- főmotor és a mechanikus hajtómű között rendszerint állandó áttételű ékszíjhajtás, vagy fogaskerekes hajtás található, amelyet itt nem ábrázoltunk. A motor tengelye párhuzamos, vagy merőleges lehet a főorsó tengelyére.



1. ábra: Forgó főmozgású, fokozatos főhajtóművek funkcióvázlata

Az 1.a ábra szerinti funkcióvázlat az egyetemes szerszámgépek főhajtásaira jellemző. A hajtás célgépi, vagy speciális megmunkáló egységeknél egyetlen állandó áttételre egyszerűsödik, ami lehet fogaskerekes (cserekerekes is) pl. célgépeknél, vagy lapos szíjas (esetenként cserélhető szíjtárcsákkal) pl. célgépi finomfűrő, vagy furatköszörű egységeknél (1.b ábra). Ez esetben a fordulattípus megváltoztatására nincs szükség az állandó technológia következtében. A fordulattípus változtatása szükség esetén motorral, vagy reverzáló készülékkel történik. A főorsó fékezéséről a motorral egybeépített erőzáró (súrlódó) fék gondoskodhat, amely rugós működtetésű. A motor indításakor a rugószorítást (a fékezést) elektromágnes oldja.

A 2. ábra a haladó főmozgású mechanikus hajtóművek blokkvázlatát szemlélteti. Ha az alternáló mozgást olyan 7 önirányváltó szerkezet hozza létre-, mint amilyenek a különböző forgattyús mechanizmusok-, a 4 irányváltó szerkezet elmarad. A haladó főmozgás létrehozásában a jövőben számítani lehet a forgó szervomotoros és a lineáris motoros hajtások megjelenésére.



2. ábra: Haladó főmozgású fokozatos hajtómű funkcióvázlata

2 A kinematikai tervezést meghatározó jellemzők

A *forgácsoló sebesség* a szerszám vagy a munkadarab d átmérőjéből és n fordulatszámából határozható meg. A forgácsoló sebességet és a fordulatszámot egyszerűen v és n betűk jelölik:

$$v = \frac{d\pi n}{1000} \quad (\text{m/perc}), \text{ köszörülésnél } v = \frac{d\pi n}{1000 \cdot 60} \quad (\text{m/sec}). \quad (1)$$

A behelyettesítés mértékegységei: d (mm), n (f/perc).

A megmunkálást célszerűen a szerszámra jellemző gazdaságos forgácsoló sebességgel végzik, amelynél a megmunkálási és szerszám költségek a legkisebbek. A gazdaságos forgácsoló sebesség értékét a szerszámgepen alkalmazott szerszám és a munkadarab anyagminősége, alakja és mérete, a megmunkálás fajtája és módja, a kívánt felületminőség határozza meg elsődlegesen. Ennek megfelelően a főhajtóműveknél több forgácsoló sebesség beállítása, vagy folyamatos változtatása szükséges egy v_{\min} - v_{\max} forgácsoló sebesség tartományban, amelynek szélessége egyetemes szerszámgépeknél a sokoldalú megmunkálási feladatok miatt nagyobb, célgépeknél, szűkített rendeltetésű gépeknél kisebb.

A megmunkálandó, vagy a szerszám átmérőket a d_{\min} - d_{\max} intervallummal jelöljük ki. A két tartomány felvétele után meghatározhatók a szükséges fordulatszámok legkisebb (n_{\min}) és legnagyobb (n_{\max}) értékei abból a feltételből, hogy:

- a legnagyobb szerszám, vagy munkadarab átmérőn is biztosítani kell a v_{\min} , legkisebb forgácsoló sebességet (nagyláshoz) és, hogy
- a legkisebb szerszám, vagy munkadarab átmérőn is biztosítani kell a v_{\max} , legnagyobb forgácsoló sebességet (simításhoz):

$$n_{\min} = \frac{1000 \cdot v_{\min}}{d_{\max} \pi}, \quad n_{\max} = \frac{1000 \cdot v_{\max}}{d_{\min} \pi}. \quad (2)$$

A fordulatszámok legnagyobb és legkisebb értékeinek hányadosa a fordulatszám vagy teljes szabályozhatóság (S_z), amely a sebesség szabályozhatóság (S_{z_v}) és az átmérő szabályozhatóság (S_{z_d}) szorzataként is számítható:

$$S_z = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} \frac{d_{\max}}{d_{\min}} = S_{z_v} S_{z_d}. \quad (3)$$

A forgácsoló sebességek és az átmérők minimális és maximális értékei tervezési alapparaméterek. Természetesen egy szerszámgépen akár zérus értékek is elérhetők, példaként említhető a keresztesztergálás, vagy a maximálisnál nagyobb sebességek is kialakulhatnak nagyobb átmérőknél, vagy pl. be nem tervezett, magasabb gazdaságos forgácsoló sebességű szerszámoknál. A szabályozhatóság igen eltérő lehet még azonos géptípusoknál is. Egyetemes szerszámgépeknél szokásos értékei $\sim 80 \div 250$ között találhatók.

A legkisebb és legnagyobb fordulatszámok közötti tartományban a fordulatok fokozatosan vagy fokozat nélkül állíthatók be. A főhajtásnál alkalmazott aszinkron motorok miatt először a mechanikus fokozatos és mechanikus fokozat nélküli főhajtóművek terjedtek el. A villamos motorok fokozat nélküli fordulatszám változtatásának különböző megoldásai vezettek el a fokozat nélküli elektromechanikus főhajtóművek és villamos főhajtások széleskörű alkalmazásához.

3 Fokozatos főhajtóművek fordulatszámsorai

Geometriai sorként kialakított fordulatszámsorok

A mechanikus fokozatos főhajtóművek fordulatszámsorait geometriai sorként képezik. Ennek előnye az, hogy az egymás melletti fordulatszámok százalékos fordulatszám esésének mértéke állandó, amelyet a behajtó fordulatszám változása sem módosít. Célszerűsége technológiailag indokolt és azzal függ össze, hogy különböző szerszámoknál a szerszám élén csak egy meghatározott, a továbbiakban v_2 -vel jelölt, gazdaságos vágósebességtől való Δv százalékos sebességcsökkenést engednek meg. A Δv független attól milyen átmérőn, milyen szerszámmal, milyen forgácsoló sebességgel dolgozunk. A fokozatos főhajtóművek fordulatszám sorait

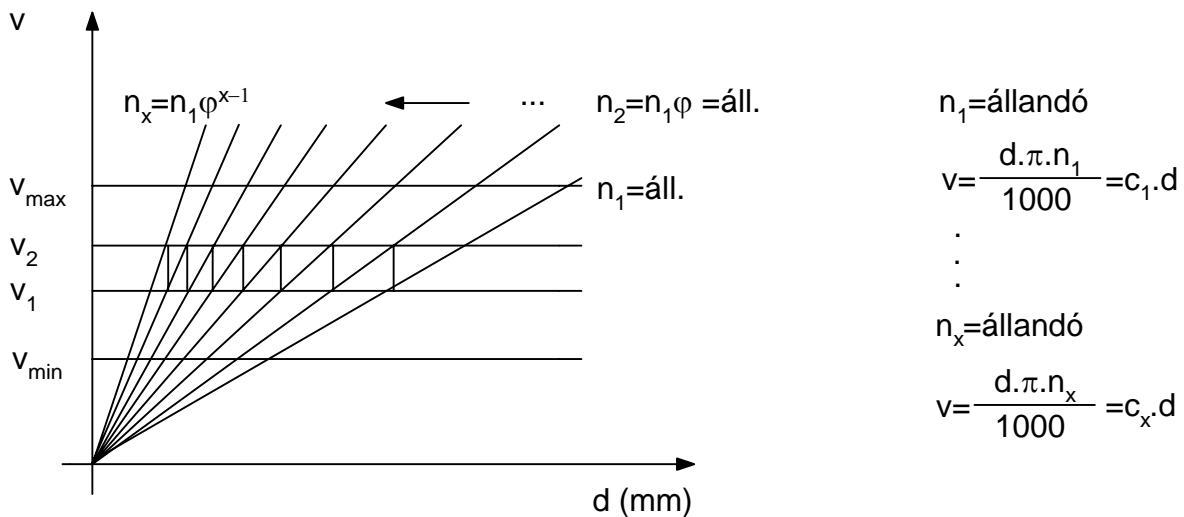
úgy tervezik meg, hogy ugyanazon átmérőnél két egymás melletti fordultnál az n_x magasabb fordulatról az n_{x-1} alacsonyabb fordulatra kapcsolva a Δv százalékos sebesség csökkenés álljon elő és fordítva. Ez egyben azt is jelenti, hogy a forgácsoló sebesség a v_2 magasabb értékről a v_1 alacsonyabb, de még megengedett értékre változik. A fokozatos fordulatszám sor $n_1, n_2, n_3, \dots, n_z$ állandó értékű tagjai geometriai sort alkotnak. Az egyes fordulatszámokat az alábbi módon képezzük:

$$n_1 = n_{\min}, \quad n_2 = n_1 \varphi, \quad n_3 = n_2 \varphi = n_1 \varphi^2, \dots, n_z = n_1 \varphi^{z-1} = n_{\max}. \quad (4)$$

A (4) egyenletekben a geometriai sor szorzótényezőjét, a φ -t fokozati tényezőnek nevezik, z a fordulatfokozatok száma. Az n_1 a legkisebb az n_z a legnagyobb fordulatszám. Az új jelölésekkel a szabályozhatóság kifejezhető a fokozatszámmal és a fokozati tényezővel:

$$Sz = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_z}{n_1} = \frac{n_1 \varphi^{z-1}}{n_1} = \varphi^{z-1}. \quad (5)$$

Átalakítással kapjuk, hogy: $\varphi = \sqrt[z-1]{Sz}, \quad z = \frac{\lg Sz}{\lg \varphi} + 1. \quad (6)$



3. ábra: A v-d diagram

A fokozatszám meghatározott szabályozhatóságnál a φ fokozati tényező értékétől függ. A leírtakat a v-d diagram (3. ábra) szemlélteti. Mivel egy beállított n_x fordulatszám állandó, a megmunkált átmérő csökkenésével (például hosszsztergálásnál újabb és újabb fogásvételekkel) a forgácsolási sebesség is csökken. Elérve a megengedett v_1 alsó határértéket Δv százalékos sebesség-

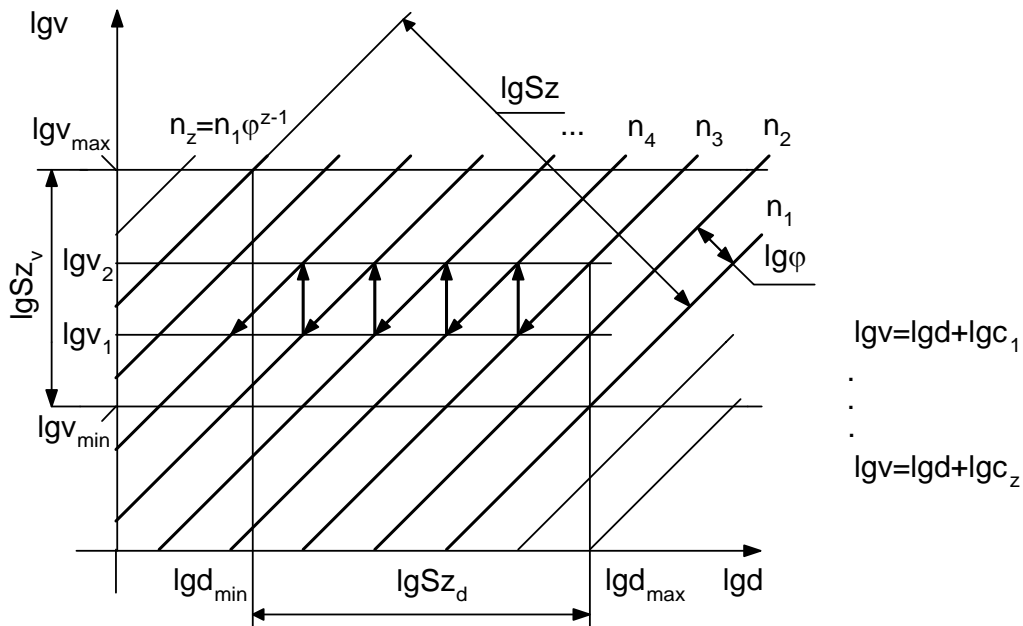
csökkenés áll elő. Ekkor a fordulatszámot eggyel magasabb fokozatra, $n_x \varphi$ -re kapcsolva ismét a v_2 gazdaságos forgácsoló sebességgel dolgozunk. Látható, hogy kisebb átmérők felé haladva a fordulatszám fokozatos növelésével a gazdaságos vágósebesség adott határon belül tartható. A százalékos sebességcsökkenés:

$$\Delta v(\%) = \frac{v_2 - v_1}{v_2} 100\% = \frac{n_x \varphi - n_{x-1}}{n_x \varphi} 100\% = \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) 100\%, \text{ illetve} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{100}{100 - \Delta v}. \quad (8)$$

Még szemléletesebb a logaritmusos v - d diagram (4. ábra), amelyet szerszámgepeken használnak a beállítandó fordulatszám gyors meghatározására. Az ábra a gépeken gyakran az óramutató járásával egyező irányban 45° -kal elforgatott helyzetű. Az ábrán az x helyébe a továbbiakban használt z jel került, ami a fokozatos hajtómű fokozatszámára utal.

Megjegyezzük, hogy más szerszámanyag esetén a v - d diagramban más és más a v_2 és a v_1 értéke, de 3. és 4. ábrán látható fűrészdiagram jelleg változatlan.



4. ábra: Logaritmusos v - d diagram

A φ fokozati tényezőket és a szabványos fordulatszámokat a Renard sor alapján határozták meg és szabványosították (MSZ 2345, vagy DIN 804 és DIN 323). A Renard sorok decimál geometriai sorok is egyben, mivel a 10 különböző hatványait

is tartalmazzák és amelyek szorzásával a Renard sor tetszőlegesen bővíthető. A sorok képzésének alapja az, hogy az 1 és 10 közötti számokat 20 vagy attól kevesebb (10, 5, 4,...) tagú geometriai sorra bontjuk.

A 20 tagú sor fokozati tényezője és a százalékos fordulatszámesés:

$$R_{20/1}, \quad \varphi = \sqrt[20]{10} = 1,12, \quad \Delta v \approx 10\%.$$

A szabványos fordulatszámok kerekített értékek:

...100, 112, 125, 140, 160, 180, 200, 224, 255, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, (1000),....

Hasonlóképpen állíthatók elő a nagyobb fokozati tényezőjű, ritkább sorok:

$$R_{20/2}, \quad \varphi = \sqrt[2]{\sqrt[20]{10}} = 1,26 = 1,12^2, \quad \Delta v \approx 20\%.$$

...112, 140, 180, 224, 280, 355, 450, 560, 710, 900, (1120)....,

$$R_{20/3}, \quad \varphi = \sqrt[3]{\sqrt[20]{10}} = \sqrt{2} = 1,41 = 1,12^3, \quad \Delta v \approx 30\%$$

...11,2, 16, 22,4, 31,5, 45, 63, 90, (125)....,

$$R_{20/4}, \quad \varphi = \sqrt[4]{\sqrt[20]{10}} = 1,58 = 1,12^4, \quad \Delta v \approx 40\%,$$

...112, 180,280, 450,710, (1000)....,

$$R_{20/6}, \quad \varphi = \sqrt[6]{\sqrt[20]{10}} = 2 = 1,12^6 \quad \Delta v \approx 50\%$$

...11,2, 22,4, 45, (90)....

Látható, hogy a fokozati tényezők a $\varphi=1,12$ hatványai, az alacsonyabb tagszámú, ritkább sorok tagjai a 20 tagú sorból kiválaszthatók, vagy képezhetők. A φ fokozati tényezőket a szabvány kerekítve használja ($\varphi_{szabv}=1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 2$) és a szabványos, névleges fordulatszámokat is ez alapján adja meg. Ezért a fordulatszámsorok a geometriai sorhoz képes némi eltéréssel rendelkeznek. A névleges értékektől való eltérést végül a tényleges fogszám viszonyok és motorfordulatszám adja. A motor fordulatszáma terheléstől függően változik. Tervezési paraméterként a motor névleges nyomatékát és ahhoz tartozó névleges fordulatszámot tekintik. Az 1. táblázatban a fordulatszámsorok úgy választékoltak, hogy a motorok névleges fordulatszámai is benne legyenek a motor kb. 6 %-os szlípjénél. Ez lehet pl. a 710 és a 355 f/perc. A tényleges fordulatok a magyar gyakorlat szerint ± 3 %-kal térhetnek el a táblázatban megadott névleges értékektől.

Minél finomabb felbontású fordulatszámsort választunk, annál inkább biztosítható az optimális vágósebesség. Szélső esetben a fordulatszámok fokozat nélkül

változtathatók, ami a CNC szerszámgépekre jellemző. Ekkor az optimális, gazdaságos vágósebesség folyamatosan biztosítható és a szerszám élettartam jól tervezhető és követhető. A fenti fokozati tényezőkkel képzett paramétersorokat a műszaki élet más területein is alkalmazzák.

Szabványos fordulatszámok

1. táblázat

Névleges fordulatszámok (f/perc)									
Alapsor R20	R20/2 ...710...	R20/3 ...710...			R20/4 ...710...(355)...		R20/6 ...710...		
$\varphi=1,12$	$\varphi=1,25$	$\varphi=1,4$			$\varphi=1,6$		$\varphi=2$		
100				1000					
112	112	11,2			112		11,2		
125			125						
140	140			1400		140			1400
160		16							
180	180		180		180			180	
200				2000					
224	224	22,4				224	22,4		
250			250						
280	280			2800	280				2800
315		31,5							
355	355		355			355		355	
400				4000					
450	450	45			450		45		
500			500						
560	560			5600		560			5600
630		63							
710	710		710		710			710	
800				8000					
900	900	90				900	90		
1000			1000						

A hajtóművek fordulatszámsorai többségében szimmetrikusak, kihagyás nélküliek. Aszimmetrikus fordulatszámsorral kialakított hajtóműveket akkor építenek, ha a megmunkálás gyakorisága a fordulatszám tartomány valamely részén rendszeresen nagyobb, mint azon kívül. Ekkor a kis fokozati tényezőjű sorból, a ritkábban használatos fordulatszám tartományban, egyes tagokat (például minden másodikat) elhagynak és konstrukciósan sem valósítanak meg. Példa a revolveresztergák köréből hozható.

Számtani sorként kialakított fordulatszámsorok

A szomszédos fordulatszámok különbsége, a d állandó, amelynek meghatározása:

$$n_1, n_2 = n_1 + d, n_3 = n_2 + d = n_1 + 2d, n_z = n_1 + (z - 1)d, \text{ azaz } d = \frac{n_z - n_1}{z - 1}.$$

A számtani sor szerint kialakított fordulatszám sor hátránya, hogy az egyik fokozatról a másikra átkapcsolva a százalékos fordulatszámesés mértéke változó, ezért hajtóművekben nem alkalmazzák

$$\frac{n_i - n_{i-1}}{n_i} 100 \% \neq \text{állandó}.$$

További hátrány hogy változó behajtó fordulatszámnál a fordulatszám különbség is változik. A fentiekből adódóan az optimális vágósebességtől való eltérés nagy átmérőknél túl nagy, kis átmérőknél pedig szükségtelenül kicsi.

4 A fokozatos hajtóművek kinematikai elemei

A következőkben a fokozatos főhajtóművek megismeréséhez csak a minimálisan szükséges ismeretanyagot tekintjük át. Számos részletet és további megoldásokat a hivatkozott irodalmak tartalmazznak.

4.1 Fogaskerekes hajtóműegységek, kinematikai vázlatok, fordulatszámábrák

A fogaskerekes elemi hajtóművek, a hajtóműegységek a fokozatos és fokozat nélküli szerszámgép főhajtóművek építő moduljai, amelyeket összekapcsolva összetett hajtóművekhez jutunk. Az elemi hajtóművek két tengelyét, a behajtó és egy kihajtó tengelyt mindig egy pár fogaskerék (vagy szíjhajtás) kapcsolja össze. A vizsgálatok során a hajtóművekre jellemző következő ábrákat használjuk.

A kinematikai vázlat egyszerűsített, síkba terített vonalas vázlat, amellyel nemcsak az elemi hajtóművek, hanem az egész hajtómű, vagy akár az egész szerszámgép kinematikája-, nem léptékhelyesen-, szemléltethető. Az alkalmazott szimbólumok szabványosak (MSZ 14402).

A fordulatszámábra a hajtómű kinematikai elemzéséhez szükséges. Azon az egyes fogaskerékpárok hajtóviszonyai, az egyes tengelyek abszolút fordulatszámai, a szabályozhatóságok egyszerűen áttekinthetők, elemezhetők és szükség esetén módosíthatók.

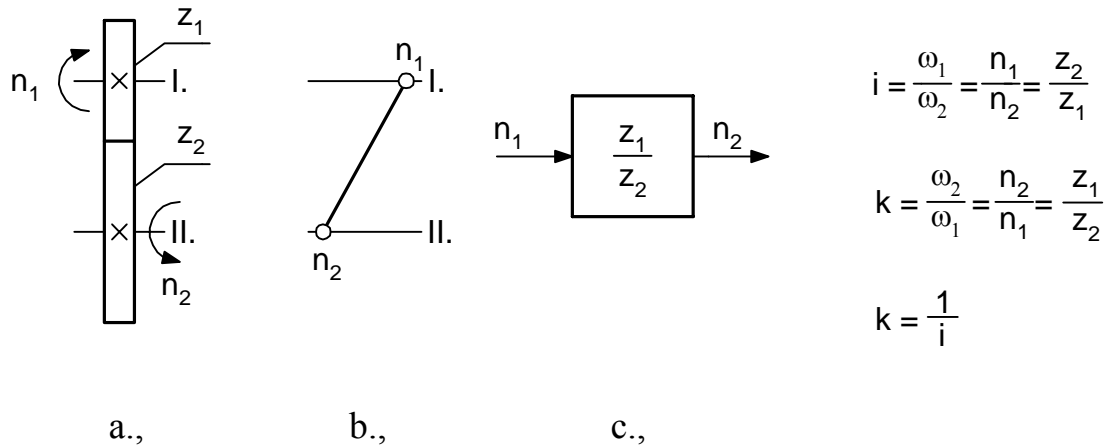
A hálózati ábra szimmetrikus, amelynél a bemenő fordulat a legkisebb és a legnagyobb kimenő fordulat között helyezkedik el. Alakjából megállapítható, hogy milyen jellegű a hajtómű (könnyű, gyorsfordulatú vagy nehéz, lassú fordulatú, stb.). Nem ad információt a tényleges fordulatszámokról és hajtóviszonyokról. Egy hálózati ábrához több fordulatszám ábra szerkeszthető, de ezek alapján épített hajtóművek kialakítása alapvetően nem különbözik. A hálózati ábrák lényegében szimmetrikus fordulatszámábrák, amelyek balra tolásával képezhetők a különböző fordulatszámábrák illetve hajtóművek.

4.1.1 Állandó áttételű és cserekerékes hajtóműegységek

Az 5.a,b,c ábra a legegyszerűbb állandó áttételű és tengelytávolságú, *fogaskerekes, alakzáró hajtáskapcsolat kinematikai vázlatát, fordulatszám ábráját* és *irányítástechnikai jelölését* mutatja. Más megoldásban az állandó áttétel, vagy cserélhető áttétel megvalósítható alak- vagy erőzáró szíjhajtással is.

A megoldás alkalmazható:

- cserekeres hajtásként, ha a gépen beállított fordulatszám hosszabb ideig szükséges (célgépek, automaták, fogazó gépek, stb.),
- fix áttételként a főhajtómű szerkezeti kialakítás javítása, a főorsóra történő ferdefogazatú fogaskerék áthajtás (a főorsóra csak egy fogaskerék ül fel), végfokozati lassítás vagy a motor utáni lassítás céljából, amelyek egyben a fordulatszám tartomány kijelölését, valamint a motor megfelelő elhelyezését is célozzák.



5. ábra: Állandó áttételű hajtómű egység

A z_1 fogs számú fogaskerék hajtja a z_2 fogs számú fogaskereket. A kapcsolódásra jellemző i módosítás, illetve k hajtóviszony összefüggéseket az 5. ábra mellett adtuk meg. A motor és/vagy hajtómű után igen gyakran ékszíj, Poly-V szíj, fogazott szíj, vagy lapos szíj hajtás található a motor kedvező elhelyezése céljából is, ami állandó áttételű hajtás. Ekkor a módosítás illetve a hajtóviszony mértéke az átmérők hányadosából számítható, ahol a D_1 a hajtó, D_2 a hajtott tárcsa átmérője:

$$i = \frac{D_2}{D_1}, \quad k = \frac{D_1}{D_2}.$$

További vizsgálatokban a k hajtóviszonyt használjuk, mivel a hajtó és a hajtott fogaskerekek fogs számainak arányaival a kimenő fordulatok közvetlenül kifejezhetők. Főhajtóművekben az egy fogaskerékpárra megengedett legkisebb és legnagyobb hajtóviszonyt célszerű korlátozni, mivel nagyobb lassítások kedvezőtlen szerkezeti méretekhez, nagyobb gyorsítások egyenetlen hajtáshoz vezetnek:

$$k_{\min} = \frac{1}{4}, \quad k_{\max} = 2. \quad (9)$$

A lassítások szerepe a főhajtóműben kiemelkedik, mivel a nyomatékok növelése leggazdaságosabban ma is fogaskerékajtással biztosítható.

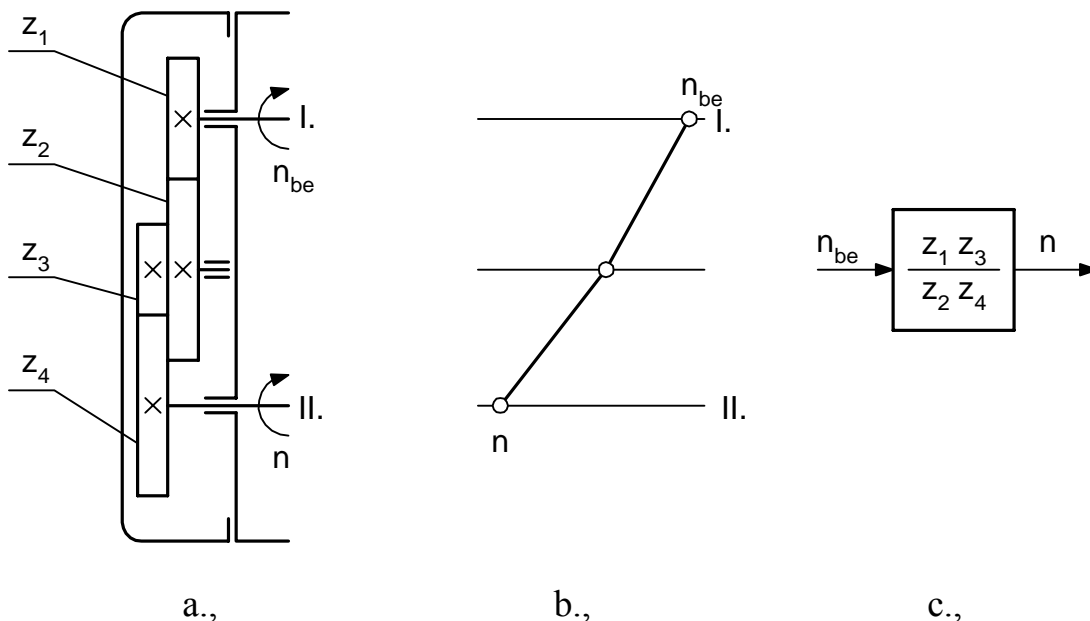
A kimenő II. tengely fordulatszáma:

$$n_2 = n_1 \frac{z_1}{z_2} = n_1 k = n_1 K. \quad (10)$$

Az 5.b ábra a fordulatszám változását mutatja. Az 5.c ábra szerint a fogaskerékpár *irányítástechnikai szempontból* olyan arányos tag, amelynek állandósult állapotbeli átviteli (erősítési) tényezője K , és megegyezik a k hajtóviszonnyal. Ezt a gondolatot alkalmazzuk a hajtómű egységeknél és az összetett hajtóműveknél is, amikor a különböző fordulatszámoknak különböző fogaskerék kapcsolatok, mozgáskapcsolatok (átviteli, vagy erősítési tényezők) felelnek meg állandósult állapotban. Ekkor az átviteli tényezők oszlopmátrixszal adhatók meg [2].

Két cserekerékpárral (6.a,b,c ábra) nagyobb eredő hajtóviszony valósítható meg. Alkalmazása csak kis teljesítményű és nyomatékú főhajtóművekben, leggyakrabban mellékajtóművekben található. A kimenő II. tengely fordulatszáma:

$$n = n_{be} \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} = n_{be} k_1 k_2 = n_{be} k = n_{be} K. \quad (11)$$

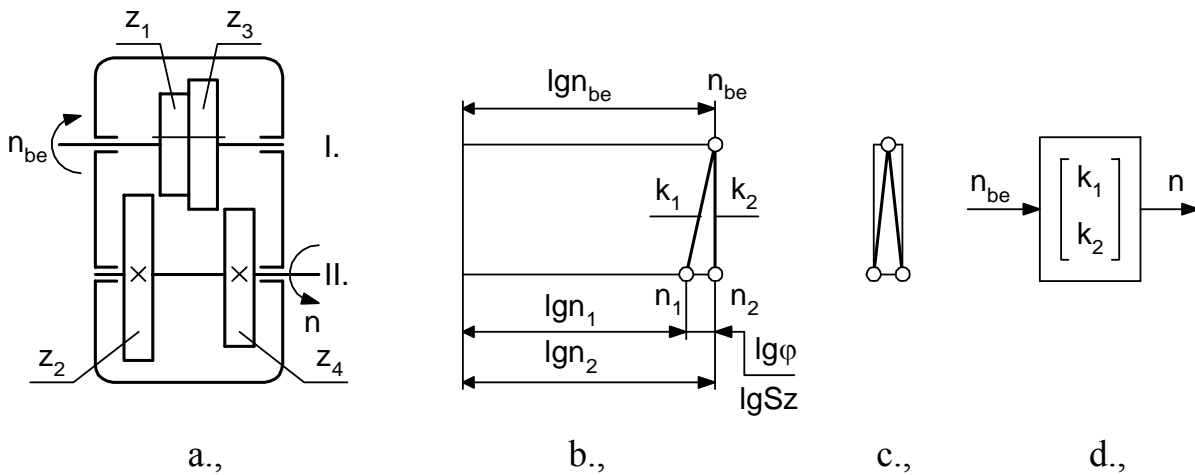


6. ábra: Két cserekerékpárral épített hajtómű

4.1.2 Tolókerekes hajtóműegységek

A fokozatos elemi hajtóművek 2, 3 ritkábban 4 fokozatúak. A négyfokozatú elemi hajtómű tolókerekes megoldásban 2+2 építésű, alkalmazására kis fokozatszámú hajtóművekben (pl. gyalugépek, fűrőgépek), olykor a hozzákapcsolódó elemi hajtóművel közös kerekes megoldásban kerül sor.

Szerszámgép hajtóművekben leginkább a tolókerekes megoldások terjedtek el, amelyek axiális irányú fogaskerék mozgatással hozhatók üres, vagy a kívánt kapcsolási helyzetbe. Az elemi hajtómű egységek rendszerint szerelt tolótömbös kivitelűek. A tolókerekes megoldás előnyei: jó hatásfok, csak a nyomatékközlésben résztvevő fogaskerékpárok kapcsolódnak, a tolótömb mind a hajtó, mind a hajtott tengelyen elhelyezhető, kis fordulatszámoknál nagy nyomatékok vihetők át, a kis szerkezeti méretű hajtómű tervezése szempontjából kedvező. Hátrányként említhető az, hogy a kapcsolás csak a hajtómű nyugalmi állapotában végezhető, ami a mellékidőket növeli. A kapcsolási idő csökkentésére alakultak ki a fordulatszám előválasztós megoldások, amelyeknél az előre beállított fordulatszámok sorban, automatikusan, válthatók, pl. hidraulikusan.

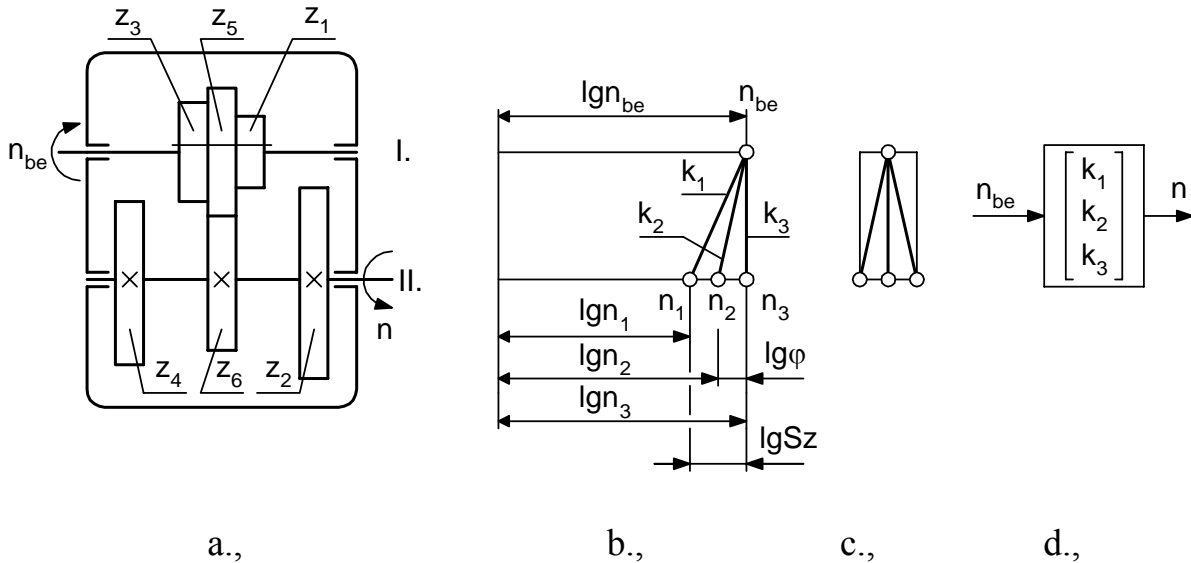


7. ábra: Kétfokozatú hajtómű egység

A 7.a,b,c,d és a 8.a,b,c,d ábrák a két- és háromfokozatú hajtóműegységek kinematikai vázlatát, egy lehetséges fordulatszámábráját, hálózati ábráját, valamint irányítástechnikai jelölését szemléltetik.

Az egyenes fogazatú fogaskerekek *funkció-összevonással* megoldják a fogaskerekes kapcsolatot és tengelykapcsolóként is szolgálnak. Egyszerű, üzembiztos, jó hatásfokú, nagy teljesítmény átvitelére alkalmas szerkezetek. Az átkapcsoláshoz a tengely-agy kötés siklóreteszes, bordás, vagy polygon, a fogak oldalt legömbölyítettek. Az átkapcsolás történhet kézzel, vagy automatikusan

hidraulikus hengerrel, ami a korszerű CNC szerszámgépénél is alkalmazott megoldás. Az átkapcsolás során mindig csak egy fogaskerékpár kapcsolódhat. A hajtóműegységen belül a fogaskerekek m modulja és z fogsorszámösszege ($z=z_1+z_2=z_3+z_4=z_5+z_6$) azonos, ebből adódóan a tengelytávolság állandó. Az egymással kapcsolódó fogaskerékpárok a z_1 - z_2 , z_3 - z_4 , z_5 - z_6 .



8. ábra: Háromfokozatú hajtómű egység

A fordulatszámábrák szerkesztése:

- A hajtómű tengelyeinek megfelelő számú vízszintes, párhuzamos egyenest húzunk azonos távolságokra.
- A fordulatszámnak megfelelően függőleges, párhuzamos egyeneseket húzunk az első és utolsó tengely között, $lg\varphi$ távolságokra.
- A háló jobb felső metszéspontját az n_{be} bemenő fordulatszámra jelöljük ki, amely a nulla fordulattól $lg n_{be}$ távolságra van.
- A hajtó és hajtott tengelypárokat a fogaskerék áttételeknek megfelelő, a hajtóviszonyokra jellemző egyenesekkel kötjük össze. Lassításkor a hajtott tengely fordulatszáma a behajtó fordulatszám pontjához képest balra, gyorsításkor jobbra, $k=1/1$ -nél pedig függőleges egyenesre esik. Megjegyezzük, hogy egyetemes szerszámgépéknél amennyiben mód van rá a jó hatásfokú $1/1$ hajtóviszonyt illetve lassításokat alkalmazzák.

Következtetések:

- A kimenő tengely fordulatszámai egymástól $lg\varphi$ távolságra helyezkednek el a geometriai sor következtében.

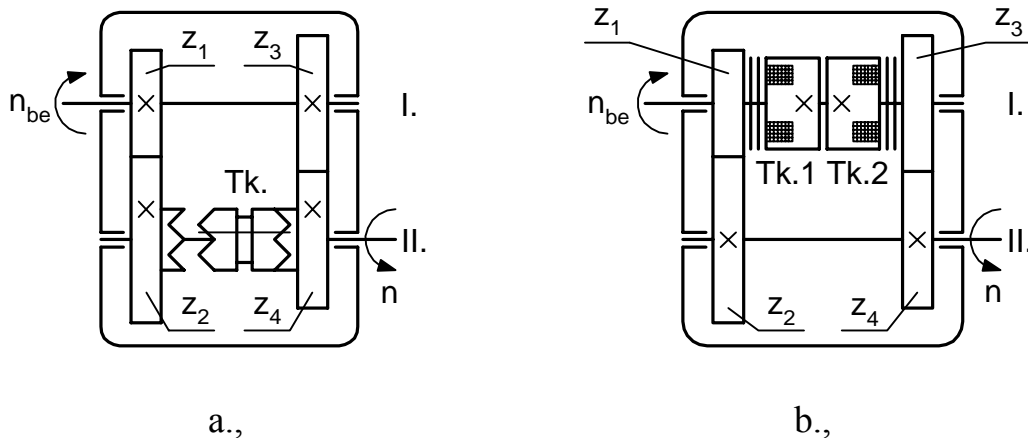
- A fordulatszámok $\lg n_z \dots \lg n_1$ távolságra vannak a nulla fordulattól. A szélső, $n_z - n_1$ fordulatszámértékek közötti távolság a szabályozhatóság logaritmus: $\lg Sz = \lg n_z - \lg n_1$. Későbbiekben a $\lg n_i$ koordinátákat már nem tüntetjük fel.

A hálózati ábrákat a 7.c és 8.c ábrákon rajzoltuk fel. Az elemi hajtóművek mozgáskapcsolatát leíró függvények:

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = n_{be} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = n_{be} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = n_{be} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

4.1.3 Tengelykapcsolós hajtóműegységek

A kétfokozatú elemi hajtóműveket *tengelykapcsolós* megoldásban a 9.a,b ábrák szemléltetik. Hasonlóan alakíthatók ki a háromfokozatú elemi hajtóművek tengelykapcsolós változatai. A z_2 és z_4 fogaskerekek a II. tengelyen szabadon foroghatnak. Attól függően, hogy a Tk. tengelykapcsoló a z_2 vagy a z_4 fogaskereket kapcsolja a II. tengelyhez, két különböző kimenő fordulatszámot kapunk.



9. ábra: Kétfokozatú tengelykapcsolós hajtómű egységek

A tengelykapcsoló lehet:

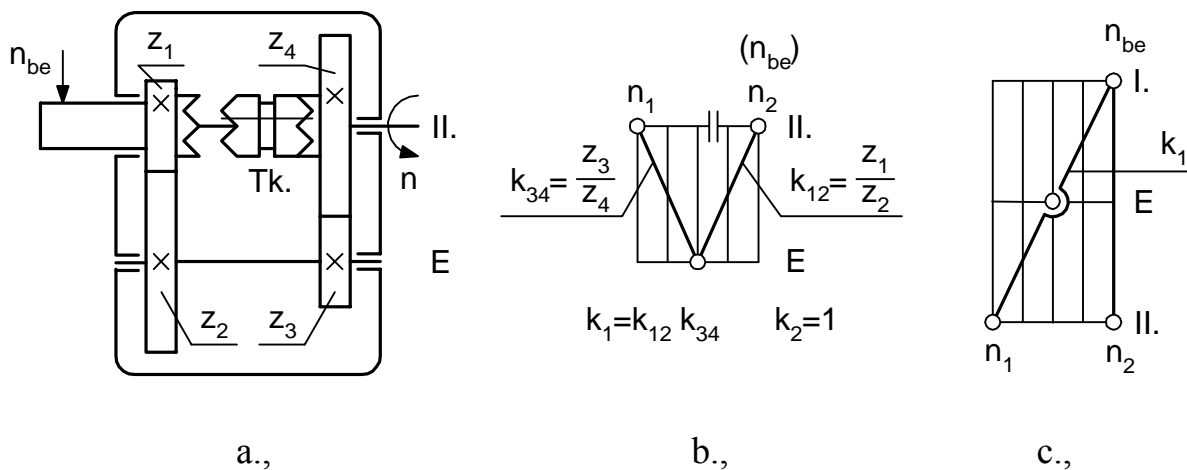
- *alakzáró, körmös* (9.a), vagy
- *erőzáró, súrlódó lemezes, elektromágneses, hidraulikus működtetéssel* (9.b).

Az alakzáró körmös kapcsoló csak álló (esetleg alacsony fordulátú) tengelyeknél kapcsolható, példák elsősorban a nagyobb teljesítményű főhajtóműveknél található. Súrlódó lemezes, erőzáró tengelykapcsolók előnye, hogy a forgás közbeni automatikus fordulatszámváltás végezhető, a kapcsolási idők rövidek. E

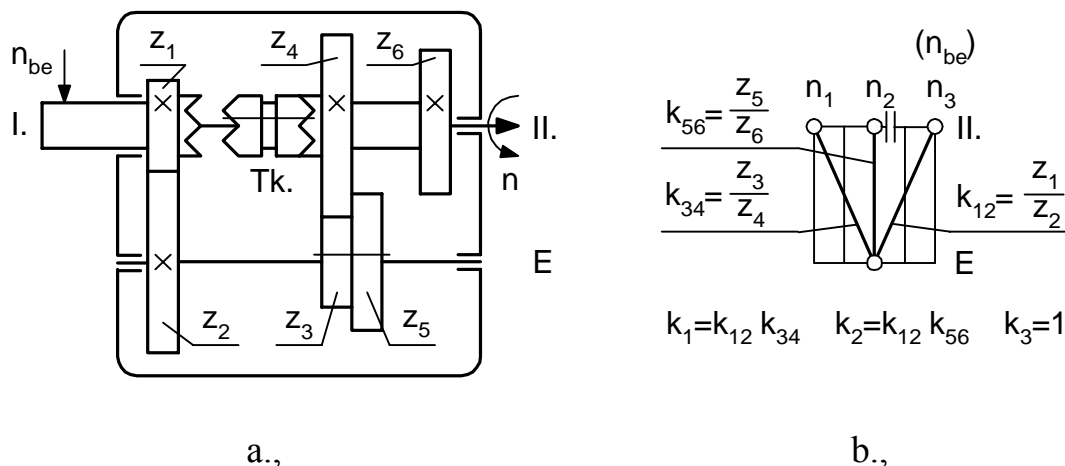
megoldások hátránya az állandó fogaskerék kapcsolat, minden fogaskerékpárhoz egy tengelykapcsoló szükséges, nagy a súrlódási veszteség és kopás, elektromágneses tk.-nál a járulékos hőtermelés. A hajtómű szerkezeti méretei a tolókeres megoldáshoz képest nőnek, elsősorban axiális irányban, a hajtómű drágább. A tengelykapcsolókat a magasabb fordulató (kisebb nyomatékú) tengelyen helyezik el, szerkezetépítési okokból kerülhetnek át a hajtott tengelyre. A súrlódó lemezes tengelykapcsolók felhasználhatók fékezésre is kinematikai rövidzár létrehozásával.

4.1.4 Előtétengelyes hajtóműegységek

Feladatuk a nagy lassítások megengedett határon belüli megosztása, nagy szabályozhatóság megvalósítása.



10. ábra: Egyszerű előtét egység kinematikai vázlata és fordulatszámábrája



11. ábra: Kettős előtét egység kinematikai vázlata és fordulatszámábrája

Az egyszerű és kettős előtét egységek kinematikai vázlatain (10.a és 11.a ábrák) jól látható, hogy a kétfokozatú és háromfokozatú elemi hajtóművet helyettesítik. Az egyszerű és kettős előtét hajtómű egységek kimenő fordulatszámait a 10.b és 11.b ábrák mutatják. A fordulatszámábra lehetséges másfajta ábrázolását a 10.c ábra szemlélteti.

A kimenő tengely fordulatszámai egyszerű és kettős előtétnél a (12) egyenletekhez hasonlóan írhatók föl.

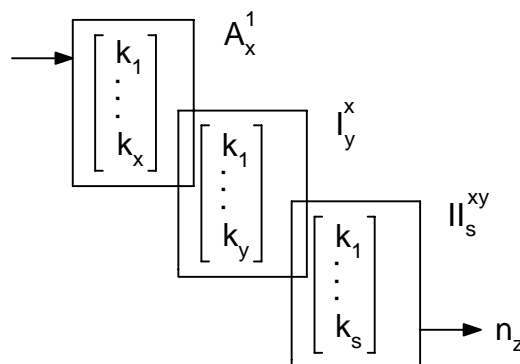
5 Összetett hajtóművek

5.1 Szabályos hajtóművek

A hagyományos szerszámgépek főhajtóművei sokfokozatúak. Az összetett hajtóműveket a két tengelyes elemi hajtóművek *sorba kapcsolásával* kapjuk, amelyek törvényszerűségeit Tajnafői, J. mutatta ki [1]. Szabályos összetett hajtóművet, azaz kihagyás nélküli geometriai fordulatszámstort kapunk, ha a sorba kapcsolt elemi hajtóműveknél fennáll, hogy:

az egymás után következő részhajtóművek fokozati tényezője azonos az előző részhajtómű fokozati tényezőjének annyiadik hatványával, amennyi annak tagszáma. Ez továbbá azt is jelenti, hogy egy részhajtómű fokozati tényezője azonos a legkisebb fokozati tényezőjű hajtómű egység fokozati tényezőjének-, ami egyben a teljes fordulatszámstort fokozati tényezője is-, annyiadik hatványával, amennyi az előző hajtóműegységek tagszámainak szorzata.

A 12. ábrán három hajtóműegységet (A, I, II) sorban kapcsolunk össze.



12. ábra: Hajtómű egységek sorba kapcsolása

Az egyes egységek tagszáma (fokozatszám) rendre x , y , s és az úgynevezett rendűségeik 1 , x , xy . A szabályos hajtómű egyenletében az egyes szorzótényezők:

A_x^1 -alapsor, I_y^x -első szorzósor, Π_s^{xy} -második szorzósor, ahol lábindexben a tagszámok, felső indexben a rendűségek szerepelnek. Az alapsor kiemelt, mivel rendűsége 1. Az E_{xys}^1 eredmény sor lábindexe mutatja, hogy az eredő fordulatszám sor tagszáma az egyes hajtóművek tagszámainak szorzata. A felső index szerint az eredmény sor rendűsége 1, azaz a fordulatszám sor kihagyás nélküli, φ szorzótényezőjű geometriai sor. A leírt törvényszerűségeket a (13) hajtómű egyenlet foglalja össze:

$$A_x^1 \cdot I_y^x \cdot \Pi_s^{xy} = E_{xys}^1. \quad (13)$$

A fokozati tényezőkre fennáll, hogy:

$\varphi_A = \varphi^1 = \varphi$ - az alapsor fokozati tényezője (itt az első hajtómű egység),
 $\varphi_I = \varphi^x$ - az első szorzósor fokozati tényezője (második hajtómű egység),
 $\varphi_{II} = \varphi_I^y = \varphi^{xy}$ - a második szorzósor fokozati tényezője (harmadik hajtómű egység).

Hajtómű változatok

Azonos eredmény sor többféle geometriai sor szorzásával is előállítható. A változatokat a tagszám és rendűség változatokból képezzük permutáció számítással:

- a tagszámváltozatok száma: $p!/q!$,
- a rendűségváltozatok száma: $p!$,
- az összes változat száma: $(p!)^2/q!$.

A sorba kapcsolt hajtómű egységek száma p , az azonos tagszámú hajtómű egységek száma q . A z fokozatszámú hajtómű fordulatszámait n_z -vel jelöljük.

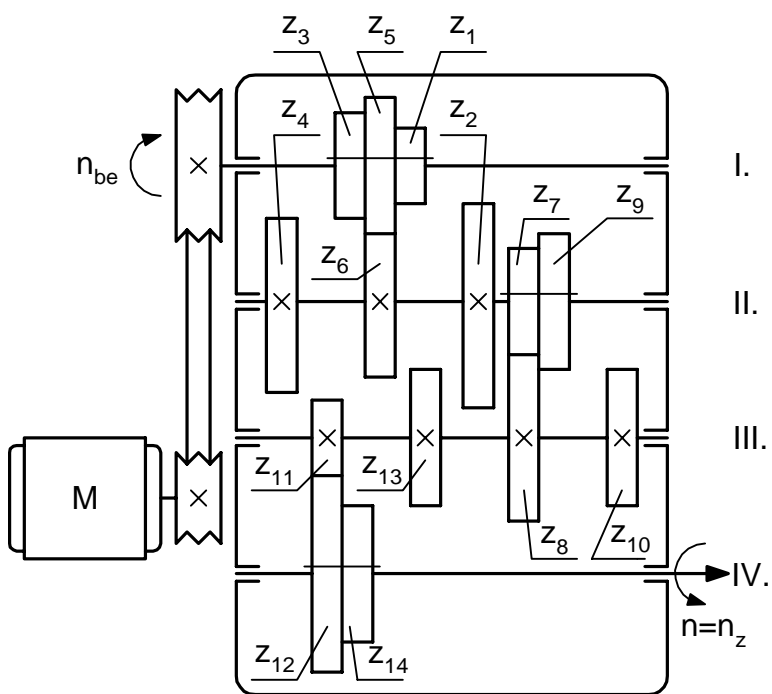
A leírtak bemutatására és megértésére a $3 \times 2 \times 2 = 12$ fokozatú, szabályos hajtóművet vesszük alapul, ahol $p! = 3! = 6$ és $q! = 2! = 2$. A lehetséges három $(p!/q! = 6/2 = 3)$ tagszámváltozat:

$$1. A_3^1 \cdot I_2^3 \cdot \Pi_2^6 = E_{12}^1, \quad 2. A_3^1 \cdot I_2^3 \cdot \Pi_2^6 = E_{12}^1, \quad 3. A_3^1 \cdot I_2^3 \cdot \Pi_2^6 = E_{12}^1. \quad (14)$$

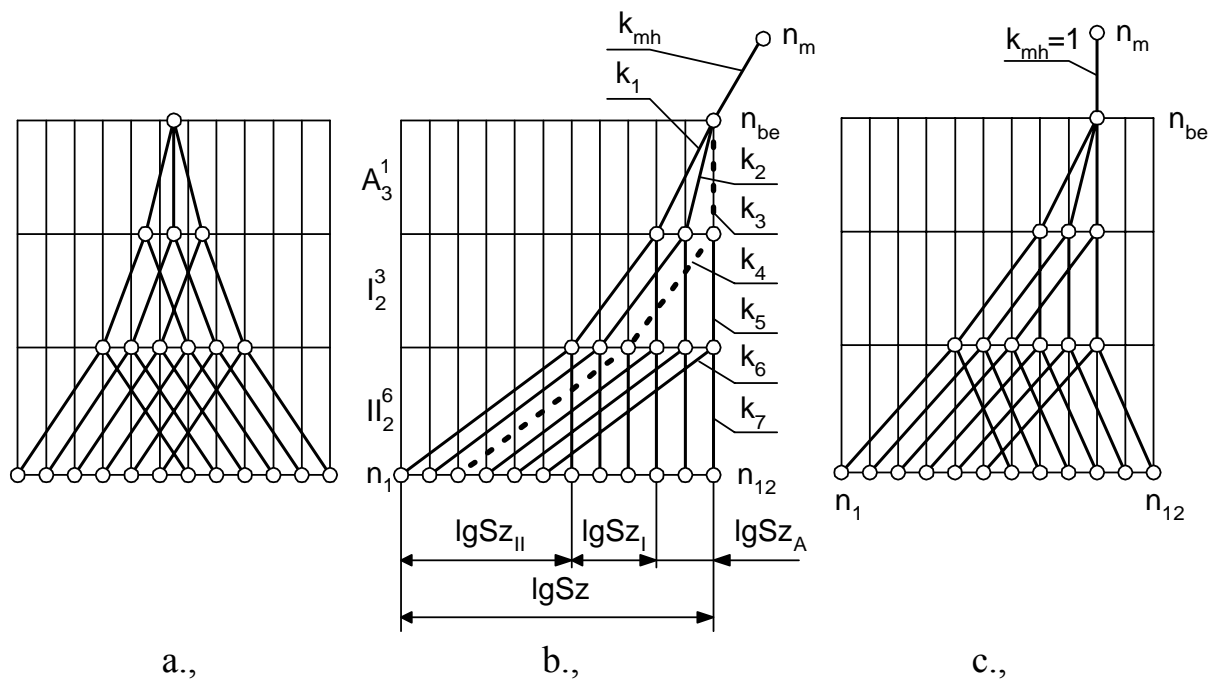
A tagszámváltozatok mindegyikéhez hat $(p! = 3! = 6)$ rendűségváltozat tartozik, így az összes változat száma: 18. Vizsgáljuk meg a $3 \times 2 \times 2$ tagszámváltozathoz tartozó rendűségváltozatokat (15), amihez hasonlóan írhatók fel a további tagszámváltozatok és azok rendűségváltozatai is.

$$\begin{array}{ll} \mathbf{1.1.} & A_3^1 \cdot I_2^3 \cdot \Pi_2^6 = E_{12}^1, & \mathbf{1.4.} & I_3^2 \cdot \Pi_2^6 \cdot A_2^1 = E_{12}^1, \\ \mathbf{1.2.} & A_3^1 \cdot \Pi_2^6 \cdot I_2^3 = E_{12}^1, & \mathbf{1.5.} & \Pi_3^4 \cdot A_2^1 \cdot I_2^2 = E_{12}^1, \\ \mathbf{1.3.} & I_3^2 \cdot A_2^1 \cdot \Pi_2^6 = E_{12}^1, & \mathbf{1.6.} & \Pi_3^4 \cdot I_2^2 \cdot A_2^1 = E_{12}^1. \end{array} \quad (15)$$

Az **1.1.** változat *kinematikai vázlatát* a 13. ábra mutatja, amelyen megrajzoltuk az I. tengely ékszíjhajtását is.



13. ábra: 12 fokozatú hajtómű kinematikai vázlata



14. ábra: 12 fokozatú hajtómű hálózati- és fordulatszámábrái

Az **1.1.** változat *hálózati és két különböző fordulatszám ábráját* a 14.a,b,c ábrák szemléltetik. A 14.a hálózati ábra jellege könnyű és gyorsjáratú hajtóműre utal.

Az **1.4.** változat *hálózati és egy fordulatszám ábrája* a 15.a,b ábrákon láthatók. A 15.a hálózati ábra jellege nehéz, lassújáratú hajtóműre utal. A motor után elhelyezkedő első részhajtómű széles terpesztése utal a fellépő nagy nyomatékokra. A 14.b fordulatszámábrán a 13. ábra szerinti fogaskerék kapcsolódásoknak megfelelő $k_3 - k_4 - k_6$ hajtóviszonyokat szaggatott vonallal jelöltük. A hajtóviszonyok a 13 és a 14.b ábrák jelölései alapján a fogszámokkal kifejezve rendre:

$$k_1 = \frac{z_1}{z_2}, \quad k_2 = \frac{z_3}{z_4}, \quad k_3 = \frac{z_5}{z_6}, \quad k_4 = \frac{z_7}{z_8}, \quad k_5 = \frac{z_9}{z_{10}}, \quad k_6 = \frac{z_{11}}{z_{12}}, \quad k_7 = \frac{z_{13}}{z_{14}}.$$

A tengelypárok közötti hajtóviszony értékek a hajtóműegyenlet tagszáma és rendütségei alapján határozhatók meg. Az **1.1.** változatnál az A_3^1 részhajtómű egységben három fordulatszám kapcsolható. Az egymás melletti magasabb és alacsonyabb fordulatok hányadosa $\varphi^1 = \varphi$, ami a 14.b ábrában a $lg\varphi$ távolságban mutatkozik meg. Az 1/1 áttétel, vagy lassítás esetén az egyes hajtóviszonyok:

$$k_1 = \frac{1}{\varphi\varphi} = \frac{1}{\varphi^2}, \quad k_2 = \frac{1}{\varphi^1} = \frac{1}{\varphi}, \quad k_3 = \frac{1}{\varphi^0} = \frac{1}{1}.$$

A I_2^3 hajtóműegységben két fordulatszám kapcsolható, amelyek $lg\varphi^3 = 3 \cdot lg\varphi$ távolságra helyezkednek el, a II_2^6 hajtóműegységben ugyancsak két fordulatszám kapcsolható, amelyek távolsága $lg\varphi^6 = 6 \cdot lg\varphi$ (14.b ábra). Az egyes hajtóviszonyok:

$$k_4 = \frac{1}{\varphi^3}, \quad k_5 = \frac{1}{\varphi^0} = \frac{1}{1}, \quad k_6 = \frac{1}{\varphi^6}, \quad k_7 = \frac{1}{\varphi^0} = \frac{1}{1},$$

A hajtómű fordulatszámait a behajtó fordulatszám és a hajtóviszonyok szorzataival:

$$n_1 = n_{be} k_1 k_4 k_6, \quad n_2 = n_{be} k_2 k_4 k_6, \quad \text{stb.}$$

A 14.b ábrán bejelöltük az egyes részhajtóművek és az összetett hajtómű szabályozhatóságát, amelyek közötti összefüggések:

$$lg Sz = lg Sz_A + lg Sz_I + lg Sz_{II}, \quad \text{azaz} \quad Sz = Sz_A Sz_I Sz_{II}, \quad \text{ahol}$$

$$Sz_A = \frac{n_{be} k_3}{n_{be} k_1} = \frac{k_3}{k_1}, \quad Sz_I = \frac{k_5}{k_4}, \quad Sz_{II} = \frac{k_7}{k_6}.$$

A részhajtóművek szabályozhatóságát a hajtóviszonyok legnagyobb és legkisebb értékeinek hányadosa adja. A 14.b,c fordulatszámábrák elejére a motor és a hajtómű közötti állandó áttételt is megrajzoltuk, amelynek hajtóviszonya: k_{mh} .

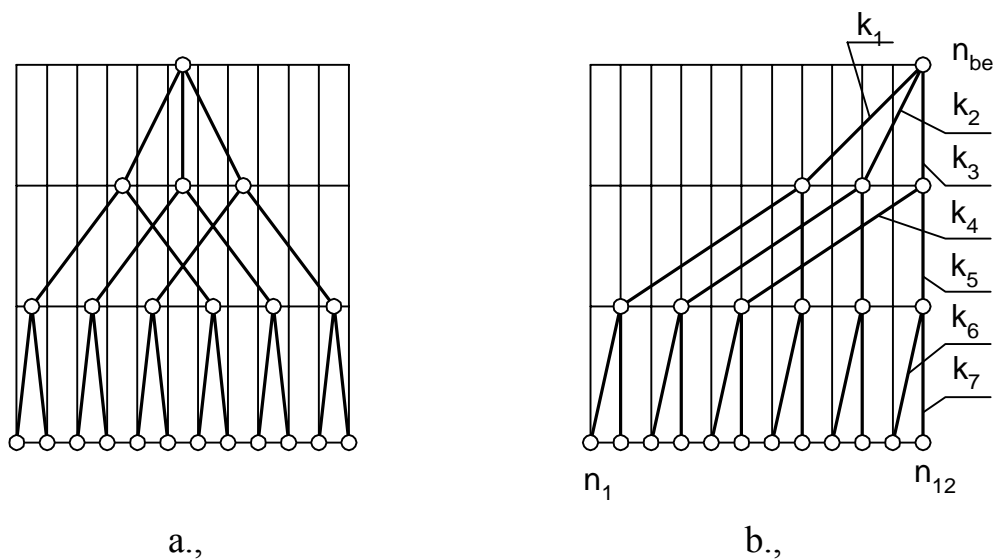
Az optimális hajtómű

A két változat (1.1. és 1.4.) alapján belátható, hogy a különböző tagszám és rendűség változatok eltérő kinematikai felépítésű hajtóműveket eredményeznek. Ezek közül a műszaki és gazdasági követelményeknek legjobban megfelelő-, az optimális-, megoldást kell kiválasztani. Az optimális hajtóművet minimális számú szerkezeti elem, ugyanannál a teljesítménynél a lehető legkisebb szerkezeti méretek és jó hatásfok jellemzi. Ezeknek a feltételeknek az a hajtómű tesz eleget, amelynél:

- a behajtó tengelytől számítva az egymás után következő hajtómű egységek tagszáma csökkenő rendűségük növekvő,
- a legmagasabb fordulatszám minden tengelyen azonos, nincs gyorsítás,
- az egyes tengelyeken megvalósított fordulatszámok az alapsor fokozati tényezőjével követik egymást, azaz kihagyás nélküliek.

A leírtak szerint a 14.a,b ábrák az optimális hajtóműre, a 15.a,b ábrák pedig a kevésbé megfelelő megoldásra jellemzők.

A fogaskerekek méreteit-, adott teljesítménynél és fogaskerék anyagnál-, alapvetően két körülmény befolyásolja: a nyomatékok és a hajtóviszonyok nagysága. A hajtóviszonyok értékét elsősorban azért korlátoztuk $k_{\min}=1/4$, $k_{\max}=2$ értékben a főhajtóműveknél, hogy ne legyenek túlzottan nagy fogaskerék méretek. (Mellékhajtóművekben a kis teljesítmények és nyomatékok miatt a hajtóviszonyok értékei kisebbek illetve nagyobbak is lehetnek.)



15. ábra: 12 fokozatú hajtómű hálózati és fordulatszám ábrái

A kis terhelő nyomatékok érdekében a tengelyeket a lehető legnagyobb fordulatszámmal kell járatni, amelynek felső határát a fogaskerék pontossági

osztálya és élettartama alapján megengedett legnagyobb kerületi sebesség határozza meg. A tengelyek azonos, maximális fordulatszáma azáltal biztosítható, hogy minden hajtómű egységben van $k=1/1$ hajtóviszonyú fogaskerék kapcsolat és nincs gyorsítás. A főhajtóművekben gyakran alkalmazott egyetlen végfokozati (nagy) lassítás egyik célja éppen az, hogy az előtte lévő tengelyek magas fordulatszámmal forogjanak. A megoldás-, amint már szó volt róla-, a fordulatszám tartomány kijelölésére alkalmas, továbbá ferde fogazatú hajtáskapcsolat megvalósítására ad lehetőséget. A ma épített fokozatos főhajtóműveknél a magas fordulatszámok megvalósítása gyakran szükségessé teszi a gyorsító áttételek beépítését is.

A szabályos hajtóművel elérhető legnagyobb szabályozhatóság

A különböző hajtóművekre a fenti k_{\min} , k_{\max} határértékek figyelembevételével a legnagyobb szabályozhatóság meghatározható [5.1]. A hajtómű legnagyobb szabályozhatóságát az utolsó hajtómű egység rész-szabályozhatósága szabja meg. Felírva pl. a három hajtómű egység sorba kapcsolásával felépített teljes hajtómű és az utolsó hajtómű (részhajtómű) egység szabályozhatóságát jutunk eredményre. Az

$$Sz = \varphi^{(z-1)} \quad (5) \text{ és az}$$

$$Sz_{II} = Sz_r = \varphi^{(s-1)} = \varphi^{xy(s-1)} = \varphi^{\frac{z}{s}(s-1)} \quad (16)$$

egyenletek logaritmusát véve, átalakítások után kapjuk, hogy a teljes szabályozhatóság:

$$Sz = \frac{1}{\varphi} Sz_{II}^{\frac{s}{s-1}} \quad (17)$$

Az s a legmagasabb rendű sor tagszáma, az Sz_{II} pedig annak szabályozhatósága. Szabályos hajtóművekkel viszonylag kis szabályozhatóság érhető el, ahogy ezt az alábbi példa is bizonyítja. A nagyobb szabályozhatóság érdekében utolsó hajtómű egységként kétfokozatút ($s=2$) kell választani, amint az a (17) összefüggésből látszik. A gyorsítás nélküli és a gyorsításos esetben a szabályozhatóságok:

$$k_{\min} = \frac{1}{4}, \quad k_{\max} = \frac{1}{1} \text{-nél az } Sz_{II} = Sz_r, \text{ meg} = 4, \quad Sz = \frac{16}{\varphi}, \text{ illetve } Sz_{\max} = 16, \quad (18)$$

$$k_{\min} = \frac{1}{4}, \quad k_{\max} = \frac{2}{1} \text{-nél az } Sz_{II} = Sz_r, \text{ meg} = 8, \quad Sz = \frac{64}{\varphi}, \text{ illetve } Sz_{\max} = 64.$$

Az $Sz_{r,\text{meg}}$ a részhajtóműre (itt az Sz_{II} -re) megengedett legnagyobb szabályozhatóságot jelenti. Minél kisebb a φ , annál nagyobb az Sz értéke. Szélső

érték (Sz_{\max}) a $\varphi=1$ -nél adódik, ami már a fokozatnélküli hajtóművel kombinált hajtómű esete.

A leírtak a 14.b fordulatszámára alapján is beláthatók. Ha gyorsítást nem engedünk meg ($k_{\max}=1:1$, $k_{\min}=1/4$) az utolsó részhajtómű $Sz_{r,meg}$ megengedett legnagyobb szabályozhatósága 4 (lásd a (18) összefüggést). Az utolsó részhajtómű előtt lévő hajtóműrészek együttes szabályozhatósága maximálisan csak $4/\varphi$ lehet, mivel ekkor kapunk szabályos kihagyás és túlfedés nélküli fordulatszámot.

Hasonló gondolatmenettel $k_{\max}=2/1$ gyorsításnál és $k_{\min}=1/4$ lassításnál az utolsó részhajtómű legnagyobb szabályozhatósága 8 (lásd a (18) összefüggést), az előtte lévő hajtóműrészeké pedig $8/\varphi$. Az előzőeket számszerűen is kifejezve:

$$Sz = \frac{4}{\varphi} \cdot 4 = \frac{16}{\varphi}, \quad Sz = \frac{8}{\varphi} \cdot 8 = \frac{64}{\varphi}.$$

5.2 Túlfedett hajtóművek

Túlfedett hajtóművek alkalmazása a következő előnyökkel jár:

- Túlfedett hajtóművekkel igen nagy szabályozhatóság érhető el.
- A megengedettnél nagyobb mértékű lassítások elkerülését teszik lehetővé.
- Technológiailag kedvező lehet a fordulattartományok átfedése.

A túlfedett hajtóművek fordulatszámok száma mindig alacsonyabb, mint a sorba kapcsolt hajtómű egységek fokozatainak (tagszámainak) szorzata. Túlfedett hajtóműnél nem követjük a szabályos hajtómű kialakítás szabályait és megengedjük, hogy bizonyos fordulatszámok két különböző kinematikai láncon keresztül is előállíthatók legyenek. Így a hajtóviszonyok szorzataiban két vagy több helyen azonos érték adódik. A túlfedett hajtómű általános egyenlete:

$$A_x^1 \cdot I_y^x \cdot II_s^{xy-t} = E_{xys-t}^1, \text{ ahol } t \text{ a túlfedések száma} \quad (19)$$

A már példaként bemutatott 12 fokozatú hajtóműnél két fordulatszámot két-két hajtóviszony szorzattal előállítva eredményül 10 fokozatú hajtóművet kapunk. A hajtómű kinematikai vázlata azonos a 13. ábra szerintivel (az ábrán a hajtóviszonyok nem léptékhelyesen rajzoltak), ezért újra nem rajzoljuk fel. A 16.a,b hálózati és fordulatszám ábrán a leírtak jól követhetők, a hajtómű egyenlete:

$$A_3^1 \cdot I_2^3 \cdot II_2^{6-2} = E_{12-2}^1.$$

A 16. ábra jelölései:

- Sz a túlfedett hajtómű szabályozhatósága,

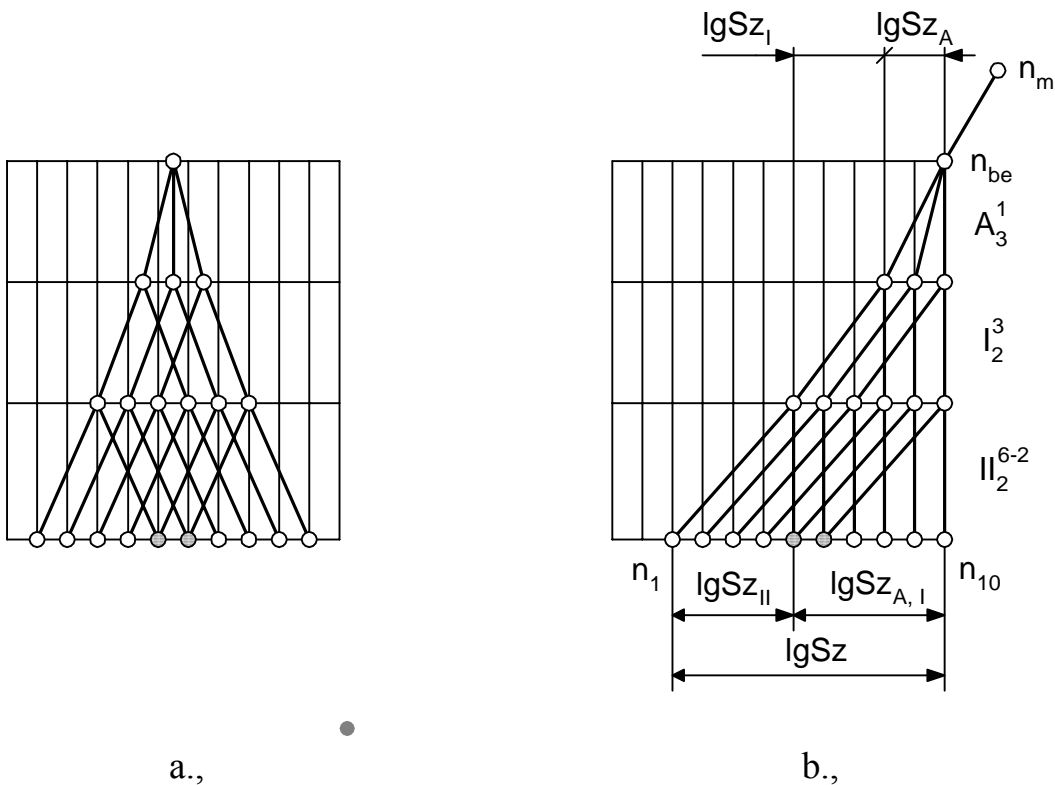
- Sz_A az A hajtómű egység szabályozhatósága,
- Sz_I az I hajtómű egység szabályozhatósága,
- Sz_{II} az utolsó (túlfedett), II hajtómű egység szabályozhatósága,
- $Sz_{A,I} = Sz_A Sz_I$ az utolsó hajtómű egység előtti hajtómű szabályozhatósága.

A túlfedett n_5 és n_6 fordulatszámok két-két különböző hajtási láncon keresztül valósíthatók meg. Látszólag indokolatlannak tűnik több fogaskerékpár alkalmazása kevesebb fordulatszámhoz, azonban ezzel érhetőek el a fejezet elején említett előnyök.

A túlfedett hajtóművel elérhető legnagyobb szabályozhatóság

Túlfedett hajtóművel igen *nagy szabályozhatóság* érhető el [1], amit az $Sz_{r,meg}$ egy kétfokozatú részhajtómű megengedett legnagyobb szabályozhatóságával kifejezve:

$$Sz_t = Sz_{A,I} Sz_{II} = \frac{1}{\varphi} Sz_I^{\frac{y}{y-1}} Sz_{II} = \frac{1}{\varphi} Sz_{r,meg}^3 \quad (20)$$



16. ábra: 10 fokozatú, túlfedett hajtómű hálózati és fordulatszám ábrája

A teljes szabályozhatóság:

$$k_{\min} = \frac{1}{4}, k_{\max} = 1 \text{-nél az } Sz_{r,\text{meg}} = 4, Sz_t = \frac{64}{\varphi}, \text{ illetve } Sz_{t,\text{max}} = 64, \quad (21)$$

$$k_{\min} = \frac{1}{4}, k_{\max} = 2 \text{-nél az } Sz_{r,\text{meg}} = 8, Sz_t = \frac{512}{\varphi}, \text{ illetve } Sz_{t,\text{max}} = 512.$$

A leírtak a 16. ábra alapján is beláthatók. Itt egy szabályos hajtómű és egy túlfedett részhajtómű egység összekapcsolásáról van szó. Ha gyorsítást nem engedünk meg ($k_{\max}=1$, $k_{\min}=1/4$), akkor az utolsó részhajtómű $Sz_{r,\text{meg}}$ megengedett legnagyobb szabályozhatósága 4, míg az előtte lévő hajtóműrészeké a szabályos hajtóműveknek megfelelően $16/\varphi$. A teljes szabályozhatóság:

$$Sz_t = \frac{16}{\varphi} 4 = \frac{64}{\varphi}.$$

Hasonló gondolatmenettel $k_{\max}=2/1$ gyorsításnál és $k_{\min}=1/4$ lassításnál az utolsó részhajtómű $Sz_{r,\text{meg}}$ megengedett legnagyobb szabályozhatósága 8, az előtte lévő hajtóműrészeké pedig a szabályos hajtóműveknek megfelelően $64/\varphi$. A teljes szabályozhatóság:

$$Sz_t = \frac{64}{\varphi} 8 = \frac{512}{\varphi}.$$

5.3 Előtétengelyes hajtóművek

Az előtétengelyes hajtóművek előnyei:

- Nagy fordulatszám szabályozhatóság.
- Elkerülhetők a megengedettnél nagyobb mértékű lassítások.

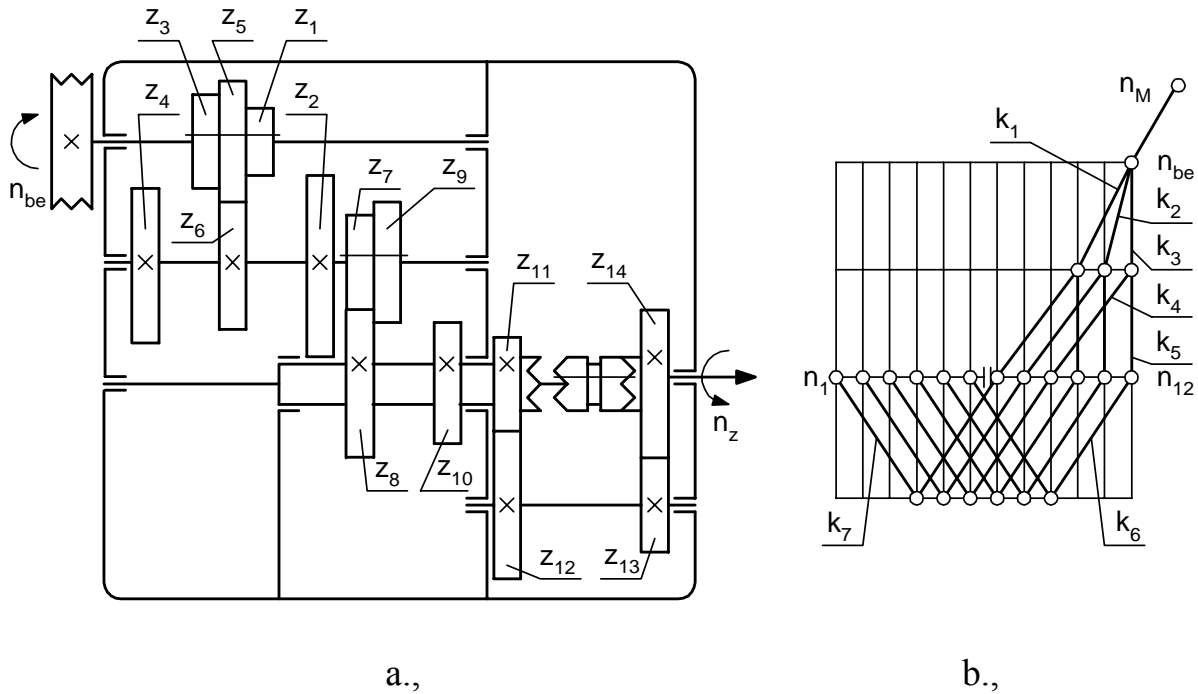
A szabályos hajtómű végére a feladattól függően a 10. ábra szerinti egyszerű, vagy a 11. ábra szerinti kettős előtét hajtóműegység kerül, amelyek az elemi kétfokozatú és háromfokozatú hajtóműveket helyettesítik. A 13. ábra szerinti hajtómű utolsó, kétfokozatú egységét helyettesítsük a 10. ábra szerinti egyszerű előtéttel. A megoldás kinematikai vázlata és fordulatszámábrája a 17.a,b ábrákon látható.

Az előtétengelyes hajtóművel elérhető legnagyobb szabályozhatóság

Az előtétengelyes hajtóművel ugyancsak nagy *szabályozhatóság* érhető el. A 10. és a 11. ábrák szerint az előtétengelyes hajtómű egységben $1/4$ - $1/4$ legkisebb lassító hajtóviszonyok kapcsolhatók sorba, így az $Sz_{r,\text{meg}}$ megengedett legnagyobb szabályozhatóság: $Sz_e=16$ lehet. A hajtómű teljes szabályozhatósága-, ami a

szabályos hajtóművekhez hasonlóan számítható-, egyszerű ($s=2$) és kettős ($s=3$) előtételnél [1]:

$$Sz = \frac{1}{\varphi} Sz_e^{\frac{s}{s-1}}, \quad Sz = \frac{256}{\varphi}, \quad \text{illetve} \quad Sz = \frac{64}{\varphi}. \quad (22)$$



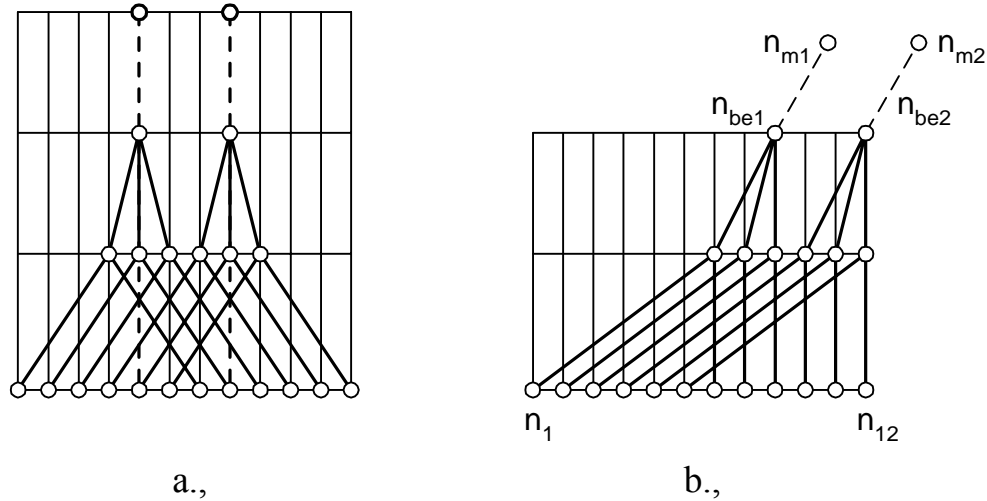
17. ábra: 12 fokozatú, előtétetes hajtómű kinematikai vázlatja és fordulatszámábrája

5.4 Pólusváltós motorok alkalmazása

Az összetett hajtóművek valamely hajtómű egysége helyettesíthető két, ritkábban három fordulátú pólusváltós (Dahlander) aszinkron motorral. Ezáltal a hajtómű mérete, a fogaskerekek száma csökkenthető. A motorok elméleti szinkron fordulatszáma pl. 3000/1500, 1500/750, 3000/1500/750 f/perc lehet. A helyettesíthetőség feltétele, hogy a hajtóműegység fokozati tényezője 2 legyen, mivel a motor fordulatszámok is $\varphi_m=2$ fokozati tényezővel követik egymást. Csak olyan hajtóműegységet lehet helyettesíteni, ahol az alapsor fokozati tényezőjét a hajtómű egység rendűségére (r) hatványozva 2-t kapunk:

$$2 = \varphi^r, \quad \text{vagy} \quad \varphi = \sqrt[r]{2}.$$

Például $\varphi=2$ -nél a rendűség 1, $\varphi=1,41$ -nél a rendűség 2, $\varphi=1,26$ esetén a rendűség 3, stb. kell, hogy legyen. A 12 fokozatú hajtómű (14) egyenleteiből az 1. hajtóműegyenletet elemezve megállapíthatjuk, hogy az I. hajtómű egységet $\varphi=1,26$ esetén helyettesítheti kétfordulatú, pólusváltós aszinkronmotor (M).



18. ábra: Kétfordulatú motorral kombinált hajtómű hálózati- és fordulatszám ábrája

A hajtóműegyenlet:

$$A_3^1 \cdot I_2^3 \cdot II_2^6 = E_{12}^1 \text{ helyett } I_2^3 \cdot A_3^1 \cdot II_2^6 = M \cdot A_3^1 \cdot II_2^6 = E_{12}^1, \quad (23)$$

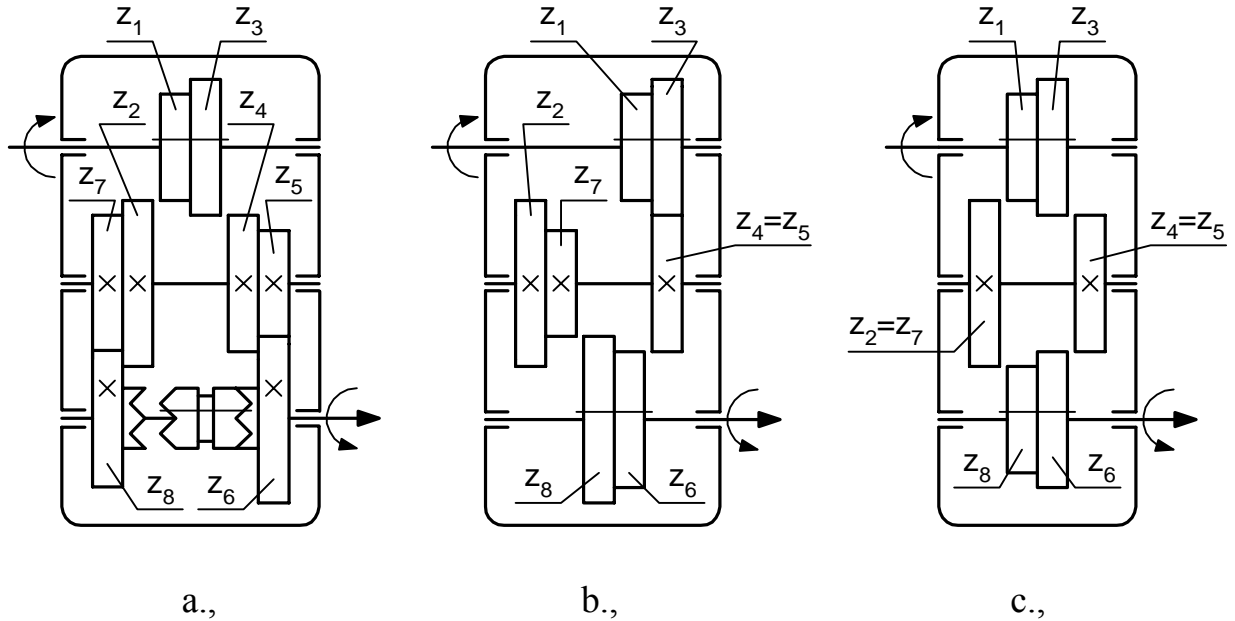
amelyhez tartozó hálózati és fordulatszám ábrákat a 18.a,b ábrák szemléltetik. A II. hajtóműegységet $\varphi=1,12$ -nél helyettesítheti kétfordulatú pólusváltós motor.

5.5 Közös fogaskerekes hajtóművek

A hajtómű szerkezeti méretének csökkentésére alkalmazzák a közös fogaskerekes hajtást, amelynél a közös kerék egyik funkciójában hajtó, másikban hajtott szerepet tölt be [1]. Alapvető feltétel, hogy a részhajtóművekben egyforma modulú fogaskerekek legyenek. Vizsgáljuk meg a $2 \times 2 = 4$ fokozatú hajtómű *közös kerék nélküli, egy- és két közös kerekes* megoldásait, amelyek kinematikai vázlatait a 19.a,b,c ábra szemlélteti. Az egy közös kerekes megoldásban a hajtómű szélességi mérete egy fogaskerék szélességgel, két közös keréknél kettővel csökken. Megemlítjük, hogy a közös kerekes hajtásnál a megoldásváltozatok száma növekszik attól függően, hogy melyik két fogaskereket vonjuk össze.

A 19.a ábra szerinti hajtómű hajtóviszonyai:

$$k_1 = \frac{z_1}{z_2}, \quad k_2 = \frac{z_3}{z_4}, \quad k_3 = \frac{z_5}{z_6}, \quad k_4 = \frac{z_7}{z_8}. \quad (24)$$



19. ábra: Egy- és két közös fogaskerekes hajtóművek

Az egyes egységeken belüli fogszám összegek következőképpen írhatók fel:

$$z_1 + z_2 = z_3 + z_4, \quad (25)$$

$$z_5 + z_6 = z_7 + z_8. \quad (26)$$

Egy közös kerekes megoldás

Ha a z_4 és a z_5 közös kerék, akkor:

$$z_4 = z_5. \quad (27)$$

A (25) és a (26) egyenletek alapján felírható összefüggés:

$$z_5 + z_6 = (z_3 + z_4) \frac{k_3 + 1}{k_3(k_2 + 1)}. \quad (28)$$

Egy közös keréknél a második hajtómű egység fogszám összegét tehát az első hajtómű egység felvett fogszám összege ($z_3 + z_4 = z_1 + z_2$) és a közös fogaskerékkel létrehozott hajtóviszonyok (k_2 és k_3) határozzák meg.

Két közös kerekes megoldás

Két közös keréknél írható, hogy:

$$z_4 = z_5, \text{ és } z_2 = z_7. \quad (29)$$

A (28) egyenlethez hasonlóan írható a másik közös kerékre:

$$z_7 + z_8 = (z_1 + z_2) \frac{k_4 + 1}{k_4(k_1 + 1)}. \quad (30)$$

Végül a (26), (28) és (30) szerint:

$$\frac{k_3 + 1}{k_3(k_2 + 1)} = \frac{k_4 + 1}{k_4(k_1 + 1)}. \quad (31)$$

A négyfokozatú hajtómű $A_2^1 \cdot I_2^2 = E_4^1$ egyenlete, illetve a szerkezeti, vagy fordulatszám ábra alapján írható:

$$k_2 = k_1 \varphi, \quad k_4 = k_3 \varphi^2. \quad (32)$$

A (31) és (32) egyenletekből adódik, hogy két közös kerék alkalmazásakor csak egy hajtóviszony vehető fel szabadon a többi hajtóviszony a feltételek által meghatározott. Célszerű pl. a tervezést a legkisebb fordulatszámot meghatározó eredő hajtóviszony felvételével indítani.

5.6 Fogaskerekek fogszámának meghatározása

A fogaskerekek fogszámának meghatározása a fordulatszámábra alapján végezhető el. A számításokhoz figyelembe veendő szempontok:

- A hajtómű egységen belüli tengelytávolság állandó, a fogaskerekek modulja azonos.
- A fogszámokat korlátozzuk, értékük $z_{\min}=16 \div 18$, $z_{\max}=80 \div 100$.
- A szabványos fordulatszámoktól való eltérések minimálisak legyenek.

A számításokat példaként a 13. ábra szerinti 12 fokozatú hajtómű első hajtómű egységére mutatjuk be. A 14.b fordulatszámábra szerint:

$$z_1 + z_2 = z_3 + z_4 = z_5 + z_6.$$

A hajtóműegység hajtóviszonyai $\varphi=1,26$ fokozati tényezőnél:

$$k_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{1}{\varphi^2} = \frac{1}{1,26^2} = \frac{1}{1,58} = 0,633 \cong \frac{14}{22}, \quad 14 + 22 = 36,$$

$$k_2 = \frac{z_3}{z_4} = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,26} = 0,794 \cong \frac{4}{5}, \quad 4 + 5 = 9,$$

$$k_3 = \frac{z_5}{z_6} = \frac{1}{\varphi^0} = 1 = \frac{1}{1}, \quad 1+1=2.$$

A k_1, k_2, k_3 hajtóviszonyokat olyan egész számok hányadosaként kell megadni, amelyek a legkisebb közös többszörös egész számú szorzásával határozhatók meg. A fogszámokat úgy kell megválasztani, hogy a fogszámokból visszaszámítható visszaszámolható hajtóviszonyok a lehető legkisebb mértékben térjenek el az elméleti hajtóviszonyok értékeitől. A legkisebb közös többszörös, a 36 kétszeresét véve megfelelő fogszámokhoz juthatunk:

$$z_1 = 28 \cdots \cdots z_3 = 32 \cdots \cdots z_5 = 36$$

$$z_2 = 44 \cdots \cdots z_4 = 40 \cdots \cdots z_6 = 36.$$

A fordulatszámhiba meghatározása

a., A kiszámított fogszámok alapján ellenőrizhető, hogy a tényleges hajtóviszonyok milyen mértékben térnek el az elméleti értékektől és, hogy az egyes fordulatszámoknál ez milyen mértékű fordulatszám eltérést okoz. A végső fordulatszám eltérések az összes részhajtóműre elvégzett számítások alapján állapíthatók meg!

$$k_{v1} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{28}{44} = \frac{1}{1,5714} = 0,636, \text{ kismértékű negatív irányú az eltérés,}$$

$$k_{v2} = \frac{z_3}{z_4} = \frac{32}{40} = \frac{1}{1,25} = 0,8, \text{ kismértékű negatív irányú az eltérés,}$$

$$k_{v3} = \frac{z_5}{z_6} = \frac{36}{36} = 1, \text{ azaz nincs eltérés, mivel } k_{v1}=k_1.$$

A H_n százalékos fordulatszámhiba nagysága az eredő n_e elméleti és az n_v valóságos fordulatszámok ismeretében számítható, negatív az eltérés, ha a valós fordulatszám az elméletitől kisebb:

$$H_n = -\frac{n_e - n_v}{n_e} 100\% = -\frac{k_e - k_v}{k_e} 100\%.$$

Elméleti fordulatszámoknak a 1. táblázatban megadott szabványos, névleges fordulatszámok tekinthetők. A gyakorlat számára elegendő, ha a hibaszámításnál ezekkel az értékekkel számolunk. Elfogadható ha a H_n fordulatszámhiba nagysága a megengedett $\pm 3\%$ -on belül van:

$$H_n \leq \pm 3\%.$$

Az n_e az elméleti és az n_v fordulatszámokat a motor névleges fordulatszámának és egyes fordulatszámokat létrehozó kinematikai lánc elméleti és valóságos hajtóviszonyainak szorzatából is megkaphatjuk. (Megjegyzés: az aszinkronmotorok névleges fordulatszáma különböző névleges teljesítményeknél más és más érték adott „szinkron” fordulatszámú motornál.) Ez azt is jelenti, hogy a hibaszámításhoz elegendő csak az egyes fordulatszámokhoz tartozó kinematikai láncok eredő k_e elméleti és k_v valós hajtóviszonyaival számolni. Ekkor a szabványos fordulatra kerekítés hibáit kiküszöböljük. A 13. ábra szerinti példánkban:

$$n_{e1} = n_m k_1 k_4 k_6, \quad n_{v1} = n_m k_{v1} k_{v4} k_{v6},$$

.

.

$$n_{e12} = n_m k_3 k_5 k_7, \quad n_{v12} = n_m k_{v3} k_{v5} k_{v7}.$$

b., Háromfokozatú tolókerekes egységek fogszámainak meghatározása után ellenőrizni kell, hogy a tolótömb kapcsolható-e, azaz a fogaskerekek fejkörei nem ütköznek-e? Ez a probléma kis fokozati tényezőknél, azaz kis fogszám különbségeknél lép fel és azt az említett példánál a k_1 és k_3 hajtóviszonyok z_1 és z_3 fogaskerekeinél kell ellenőrizni. Határesetben:

$$\frac{m(z_3 + 2)}{2} + \frac{m(z_6 + 2)}{2} = \frac{m(z_5 + z_6)}{2}, \text{ azaz } \Delta z = z_5 - z_3 = 4.$$

A $\Delta z=4$ fogszám különbség csak akkor engedhető meg, ha a fejköröket legyengítjük, más esetben a $\Delta z \geq 5$ az előirt fogszám különbség. Példánkban:

$$\Delta z = z_5 - z_3 = 36 - 32 = 4,$$

tehát az adott fogszámoknál a fejkörök legyengítése, vagy a fogszámok kismértékű növelése a járható út. Ha a fogszám különbség elérése nagy fogszám összegekhez vezetne, akkor más fordulatszámábrát, más tagszám sorrendet választhatunk, vagy a 3 fokozatú egységet nyújtott kivittel készíjük, esetleg 2+1 egységre bontjuk.

A főhajtómű szerkezeti kialakításának néhány szempontja

A $1/4 \leq k \leq 2/1$ hajtóviszony értékeket túllépni a már leírt okok miatt nem ajánlatos, a k értéke minél inkább közelítsen 1-hez. Az összetett, soktengelyes hajtóművet az optimális hajtóműtörvény szerint kialakítva az adódik, hogy az első részhajtóművek fokozatszámai a magasabbak és a hajtóviszonyok 1-hez a lehető legközelebb eső értékek. Következésképpen a behajtás oldali rész tengelyeinek fordulatszámai magasak, a forgatónyomatékok (fogórok) és a fogaskerekek méretei, a tengelytávolságok kicsik, és minimális fogszámok és modulok választhatók. Ugyanolyan terhelőnyomatéknál a fogórok és a csapágyterhelések

ekkor viszonylag nagyra adódnak. A kis értékű hajtóviszonnyal (a nagy fordulatszám csökkentéssel) rendelkező, kis fokozatszámú (2 fokozat) részhajtóműnek a hajtómű végfokozatában való elhelyezésével a végfokozatban lépnek fel a nagy nyomatékok és itt adódnak nagyra a fogaskerék méretek, ami a hajtómű szerkezeti kialakítása szempontjából kedvező megoldás. Az alámetszések elkerülése végett a minimális fogszám (20°-os kapcsolószögénél és evolvens fogazásnál) 17 illetve 14-től kisebb érték lehetőleg ne legyen. A szilárdságilag szükséges és elégséges mudulnál nagyobb érték választása növeli a fogaskerék átmérőket és a hajtómű szerkezeti méreteit. A szilárdságilag helyesen kialakított tengelyek hajlító és csavaró igénybevételéből adódó alakváltozásainak a fogazat kapcsolódásra és ezáltal a teherbírásra gyakorolt hatását is vizsgálni célszerű. A tengelyre épített fogaskerék furata és foglába közötti anyagvastagság minimálisan a modul háromszorosa (3m), vagy annál nagyobb legyen. Ha ez nem oldható meg, akkor a fogaskerék és a tengely egy anyagból készül.

5.7 Fokozatos főhajtóművek teljesítmény- és nyomatékviszonyai

Az egytetemes szerszámgépek forgácsolási teljesítményét a számított legnagyobb forgácsoló nyomaték és az un. n_{kr} kritikus fordulatszám (méretezési fordulatszám) határozza meg, amelyet az $n_1 \div n_z$ fordulatszám tartományból kell kiválasztani. A méretezési n_{kr} *kritikus fordulatszám* megválasztását a különféle munkadarab- és szerszámanyagok, illetve a technológia befolyásolja.

Belátható, hogy a legkisebb fordulatszámokat az alacsony vágósebességű szerszámok (gyorsacél), vagy technológiák (menetvágás nagy átmérőn) igénylik.

A *maximális nyomatékot* a nagyoló megmunkálás technológiájának figyelembevételével határozzák meg, amit nagy forgácskeresztmetszet, forgácsoló erő és megmunkálási átmérő jellemez. A legnagyobb M_{cmax} forgácsoló nyomatékot a legkisebb fordulaton is biztosítani kell. Jobb minőségű szerszámokkal (pl. keményfém) történő nagyolásnál-, ahol magasabb a forgácsoló sebesség-, a maximális forgácsoló nyomatékra ugyancsak szükség van. A méretezés fordulatszámát tehát nem a ritkán előforduló esetre (nagyolás M_{cmax} nyomatékkal a legkisebb fordulaton), hanem a fentiek figyelembevételével kell meghatározni. A forgácsolási teljesítményt ezért az n_1 legkisebb fordulatonnál magasabb n_{kr} fordulatszám ($n_{kr} > n_1$) határozzák meg. A méretezés fordulatszáma a kialakult gyakorlat szerint a (33) összefüggéssel számítható:

$$n_{kr} = n_1 \sqrt[4]{S_z}, \quad (33)$$

ahol az S_z a fokozatos főhajtómű szabályozhatósága, amelynek értékét a legnagyobb és a legkisebb fordulatszámok hányadosa adja. A kritikus fordulatszám közelítően úgy is meghatározható, mint a legkisebb fordulatszámtól számított

$(\frac{Z}{4} + 1)$. fordulatszám.

Például egy 12 fokozatú hajtóműnél $n_{kr}=n_4$, azaz a legkisebbtől számított negyedik fordulattal méretezünk.

A kritikus fordulatszám szolgál alapul a hajtómű szilárdsági méretezéséhez is. A hajtómű kimenő tengelyén, a főorsón szükséges teljesítmény a (2) szerint:

$$P_{c\max} = M_{c\max} \omega_{kr} = M_{c\max} n_{kr} \frac{2\pi}{60} \approx \frac{M_{c\max} n_{kr}}{9,55}. \quad (34)$$

A szükséges motorteljesítményt a (34) egyenlet alapján határozzuk meg és a kiszámított értékhez legközelebbi, nagyobb teljesítményű motort választjuk:

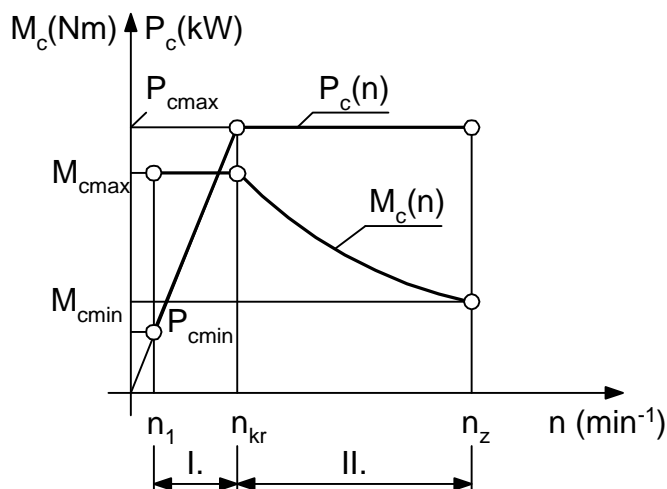
$$P_m \geq P_{csz} = \frac{P_{c\max}}{\eta_{mech}},$$

ahol a mechanikai hatásfok $\eta_{mech} \approx 0,75 - 0,8$ értékre vehető fel.

A fokozatos hajtómű teljesítmény- és nyomaték határadiagramjai a fordulatszámok függvényében a 20. ábrán láthatók. A forgácsoláskor fellépő értékek ezen határgörbék alatt, a mindenkor munkapontban helyezkednek el. A diagram két részre bontható aszerint, hogy a nyomaték, vagy a teljesítmény állandó:

I. $M_{c,\max} = \text{állandó}, \quad P_c = C_1 n, \quad n_1 \leq n \leq n_{kr},$

II. $P_{c,\max} = \text{állandó}, \quad M_c = C_2 \frac{1}{n} \text{ (hiperbola)}, \quad n_{kr} \leq n \leq n_z.$



20. ábra: A fokozatos főhajtómű teljesítmény- és nyomaték határadiagramjai

Az I. tartomány maximális nyomatékára méretezik a hajtóművet. Megjegyezzük, hogy a motor névleges teljesítménye ettől nagyobb nyomatékok elérését is lehetővé teszi az I. tartományban. A szerkezet túlterhelésből adódó tönkremenetelének elkerülése pl. erőzáró szíjhajtás, vagy nyomatékhatároló tengelykapcsoló beépítésével oldható meg.

6 Fokozatos főhajtómű tervezése (Példa)

Készítse el egy szerszám gép fokozatos főhajtóművének kinematikai tervezését az alábbiakban megadott adatok alapján:

- Átmérőtartomány: $d_{\min} \div d_{\max} = 7 \div 28$ mm
- Sebességtartomány: $v_{\min} \div v_{\max} = 6 \div 22$ m/min
- Fokozati tényező: $\varphi = 1,41$
- Motortípus: normál aszinkron

Határozza meg a hajtómű kinematikai jellemzőit! Vizsgálja meg, hogy az ismert kinematikai korlátok $k_{\min} = 1/4$ és $k_{\max} = 2/1 = 2$ figyelembevételével a feladat szabályos hajtóművel (gyorsítás nélkül, vagy gyorsítással), túlfedéses, vagy előtétes hajtóművel oldható meg. Válassza ki a megfelelő megoldást és:

- írja fel a változat hajtómű egyenletét,
- rajzolja meg a kinematikai vázlatát és fordulatszám ábráját,
- rajzolja meg a hajtómű teljesítmény- és nyomaték határdiagramjait.

6.1 A főhajtómű szabályozhatóságának meghatározása

A főhajtómű S_z szabályozhatósága kétféle módon is meghatározható. A (2) összefüggésekből a legkisebb és a legnagyobb fordulatszám:

$$n_{\min} = \frac{1000 \cdot v_{\min}}{d_{\max} \pi} = \frac{1000 \cdot 6}{28 \cdot \pi} = 68,2 \text{ min}^{-1},$$

$$n_{\max} = \frac{1000 \cdot v_{\max}}{d_{\min} \pi} = \frac{1000 \cdot 22}{7 \cdot \pi} = 1004 \text{ min}^{-1}.$$

A (3) összefüggésekből a szabályozhatóságok:

$$S_{z_d} = \frac{28}{7} = 4, \quad S_{z_v} = \frac{22}{6} = 3,67.$$

$$Sz = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1004}{68,2} \cong 14,67, \text{ vagy } Sz = Sz_d Sz_v = 4 \cdot 3,67 \cong 14,68.$$

6.2 A fokozatszám

A (6) összefüggésekből meghatározható a z fokozatszám:

$$z = \frac{\lg Sz}{\lg \varphi} + 1 = \frac{\lg 14,68}{\lg 1,41} + 1 = 8,82, \text{ felfelé kerekítéssel } z=9.$$

A szabványos fordulatszámok

A kiszámolt szélső fordulatszám értékek alapján a szabványos fordulatszámok felírhatók:

$$63, 90, 125, 180, 250, 355, 500, 710, 1000.$$

A szabvány szerinti fordulatszámokból számítható szabályozhatóság:

$$Sz = \frac{1000}{63} = 15,87,$$

ami nagyobb, mint a kiinduló adatok alapján számított érték (14,68).

6.3 Hajtóműegyenletek

A 9 fokozatú hajtómű két darab 3 fokozatú elemi hajtómű sorba kapcsolásával építhető meg, azaz: $9=3 \times 3$. A hajtóműre mindössze egy tagszám változat és annak két rendűség változata írható fel, amelyekre jellemző hajtóműegyenletek:

$$1. A_3^1 \cdot I_3^3 = E_9^1, \quad 2. I_3^3 \cdot A_3^1 = E_9^1.$$

Az optimális hajtómű törvényei alapján az **1.** változatot választjuk ki megvalósításra.

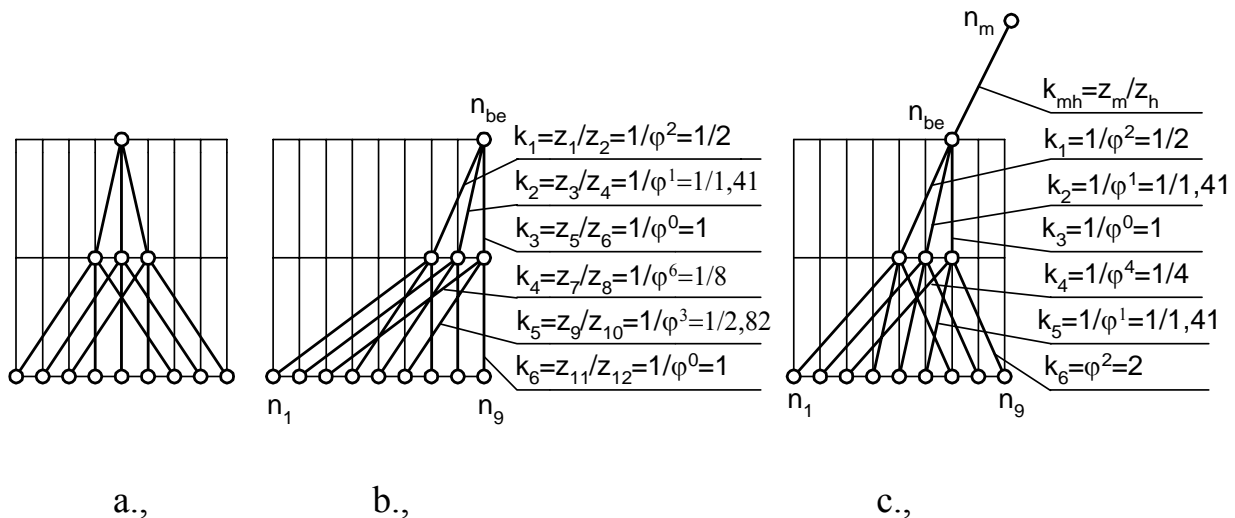
6.4 Szerkezeti- és fordulatszámábrák, kinematikai vázlat

A hajtómű szerkezeti és két különböző fordulatszám ábráját a 21. ábra szemlélteti. A 21.b fordulatszám ábrán látható, hogy szabályos, gyorsítás nélküli hajtómű alkalmazása esetén a k_4 hajtóviszony kapcsolásánál a megengedettnél nagyobb mértékű lassítás lépne fel:

$$k_4 = \frac{1}{\varphi^6} = \frac{1}{1,41^6} = \frac{1}{8} < \frac{1}{4} = k_{\min}.$$

Gyorsító hajtóviszony alkalmazása

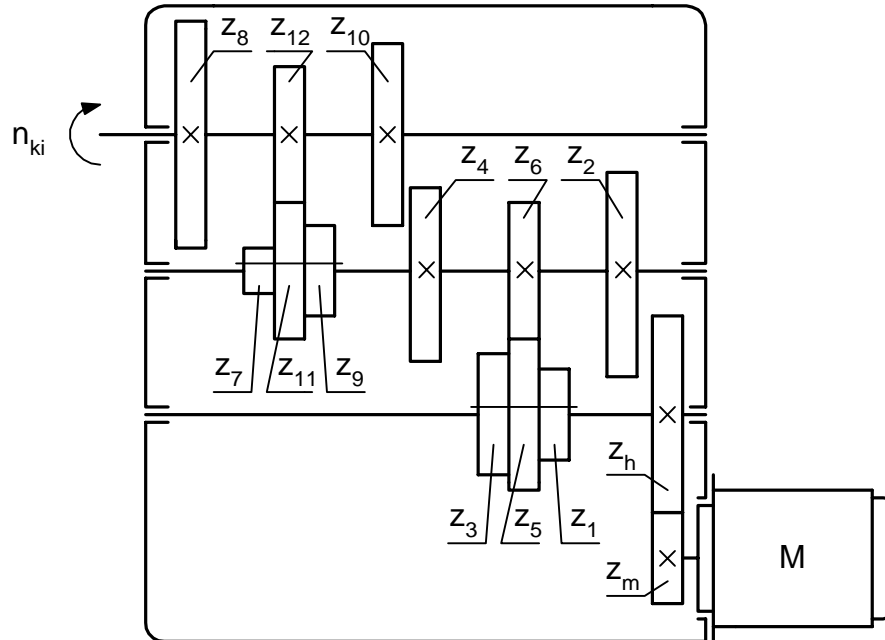
A nagymértékű lassítás elkerülésére legegyszerűbb megoldás a gyorsító hajtóviszony beépítése ($k_{\max} \leq 2$). A meghatározott fordulatszám sor elérésére, a gyorsítások ellensúlyozására a motor és hajtómű közé, a két elemi hajtómű egység közé, vagy a hajtómű végére lassító hajtóviszonyt építenek be. A második és harmadik esetben a motor és hajtómű között gyakran ékszíjhajtás is található. E megoldások jellemzőek például az oszlopos fűrógépek főhajtóműveire. A hajtómű elejére beépített állandó értékű k_{mh} lassító hajtóviszony esetén a hajtómű szerkezeti elemeit nagyobb nyomatékra kell méretezni, míg a hajtómű végére építéssel ez elkerülhető. A második esetben a hajtómű magasabb fordulaton járatható. Mivel a motor fordulatszáma a terheléstől függ, ezért csak névleges terhelésnél (nyomatéknál) érhetők el a leírt fordulatszámok.



21. ábra: A 9 fokozatú hajtómű szerkezeti- és fordulatszám ábrái

A 21.c fordulatszám ábrán a hajtóviszonyok a megengedett értékeket nem lépik túl. A második részhajtóműben a $\varphi^2=2$ gyorsítás alkalmazásával a $k_4=1/\varphi^4=1/4$ megengedett lassításhoz jutunk. A szükséges állandó értékű k_{mh} lassítást a hajtómű elejére helyeztük. A 21.c fordulatszám ábrának megfelelő hajtómű kinematikai vázlatát a 22. ábra szemlélteti.

Megjegyzés: A 22. ábrán a főhajtómű házának körvonalrajza nem követi a már említett oszlopos fűrógépek főhajtóművének kialakítását, amelyek a vízszintes síkban (a tengelyekre merőlegesen) osztottak.



22. ábra: 9 fokozatú hajtómű kinematikai vázlata

6.5 A fogszámok meghatározása

A 7. fejezetnek megfelelően határozzuk meg a 22.c ábra szerinti főhajtómű fogaskerekeinek fogszámát és a H_n százalékos fordulatszámhibák értékeit.

Az első részhajtómű fogaskerekeinek fogszáma és a valós hajtóviszonyok

A fogszámok 6. fejezetbeli példához hasonlóan számíthatók:

$$k_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{1}{\varphi^2} = \frac{1}{1,41^2} = 0,500 = \frac{1}{2}, \quad 1 + 2 = 3,$$

$$k_2 = \frac{z_3}{z_4} = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,41} = 0,707 \cong \frac{15}{21}, \quad 15 + 21 = 36,$$

$$k_3 = \frac{z_5}{z_6} = \frac{1}{\varphi^0} = 1 = \frac{1}{1}, \quad 1 + 1 = 2.$$

A legkisebb közös többszörös 36, ami fogszám összegnek kevés, ezért vegyük ennek kétszeresét, ami 72. A fogszám összeg, 72 alapján a fogaskerekek fogszámai:

$$z_1 = 24, \dots z_3 = 30, \dots z_5 = 36,$$

$$z_2 = 48, \dots z_4 = 42, \dots z_6 = 36.$$

Az első részhajtómű valós hajtóviszonyai:

$$k_{v1} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{24}{48} = \frac{1}{2} = 0,500,$$

$$k_{v2} = \frac{z_3}{z_4} = \frac{30}{42} = \frac{1}{1,4} = 0,714,$$

$$k_{v3} = \frac{z_5}{z_6} = \frac{36}{36} = 1.$$

A második részhajtómű fogaskerekeinek fogszáma és a valós hajtóviszonyok

A fogsámok:

$$k_4 = \frac{z_7}{z_8} = \frac{1}{\varphi^4} = \frac{1}{1,41^4} = 0,250 = \frac{1}{4}, \quad 1 + 4 = 5,$$

$$k_5 = \frac{z_9}{z_{10}} = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,41} = 0,707 \cong \frac{25}{35}, \quad 25 + 35 = 60,$$

$$k_6 = \frac{z_{11}}{z_{12}} = \varphi^2 = \frac{2}{1}, \quad 2 + 1 = 3.$$

A legkisebb közös többszörös 60. Legyen a fogsám összeg 90, mivel a kétszeres érték, a 120 már túl nagy fogsám összeget adna. A fogsámok:

$$z_7 = 18, \dots z_9 = 37, \dots z_{11} = 60,$$

$$z_8 = 72, \dots z_{10} = 53, \dots z_{12} = 30.$$

Látható, hogy a k_5 hajtóviszonyt megvalósító fogaskerekek fogsámainál kerekítéseket kellett alkalmazni a legkisebb közös többszörös 1,5-el való szorzása miatt. Amennyiben a fordulatszámok hibája a megengedett határok között marad, úgy ez nem jelent problémát.

A második részhajtómű valós hajtóviszonyai:

$$k_{v4} = \frac{z_7}{z_8} = \frac{18}{72} = \frac{1}{4} = 0,25,$$

$$k_{v5} = \frac{z_9}{z_{10}} = \frac{37}{53} = \frac{1}{1,432} = 0,698,$$

$$k_{v6} = \frac{z_{11}}{z_{12}} = \frac{60}{30} = 2.$$

A választott aszinkronmotor névleges fordulatszáma legyen: 1440 min^{-1} .

A k_{mh} állandó hajtóviszony értéke és azt megvalósító fogaskerekek fogszámai meghatározhatók, figyelembe véve a φ^2 gyorsítás ellensúlyozását, a hajtómű legnagyobb (1000 min^{-1}) és a motor névleges (1440 min^{-1}) fordulatszámát:

$$k_{mh} = \frac{1}{\varphi^2} \frac{1000}{1440} = \frac{1}{1,41^2} \frac{1000}{1440} = 0,347 = \frac{1}{2,88} \cong \frac{10}{29},$$

$$k_{v,mh} = \frac{z_m}{z_h} = \frac{20}{58} = 0,348, \quad (z_m = 20, \quad z_h = 58).$$

6.6 A fordulatszámhibák számítása

A valós hajtóviszonyok alapján kiszámíthatók a tényleges fordulatszámok. A szabványos névleges (elméleti) és a valós fordulatszámokból meghatározhatók a százalékos fordulatszámhibák. A számítást csak a legkisebb fordulatszámnál mutatjuk be, a többi értéket csak közöljük.

$$n_{v1} = n_m k_{vmh} k_{v1} k_{v4} = 1440 \cdot 0,348 \cdot 0,5 \cdot 0,25 = 62,64 \text{ min}^{-1},$$

$$H_1 = - \frac{n_{el} - n_{v1}}{n_{el}} 100\% = - \frac{63 - 62,64}{63} 100\% = -0,57 \%.$$

$$n_{v2} = 89,45 \text{ min}^{-1}, \quad H_2 = -0,6 \%,$$

$$n_{v3} = 125,28 \text{ min}^{-1}, \quad H_3 = +0,22 \%,$$

$$n_{v4} = 174,89 \text{ min}^{-1}, \quad H_4 = -2,84 \%,$$

$$n_{v5} = 249,74 \text{ min}^{-1}, \quad H_5 = -0,1 \%,$$

$$n_{v6} = 349,78 \text{ min}^{-1}, \quad H_6 = -1,47 \%,$$

$$n_{v7} = 501,12 \text{ min}^{-1}, \quad H_7 = +0,22 \%,$$

$$n_{v8} = 715,6 \text{ min}^{-1}, \quad H_8 = +0,79 \%,$$

$$n_{v9} = 1002,24 \text{ min}^{-1}, \quad H_9 = +0,22 \%.$$

A valós fordulatszámoknak az elméleti fordulatszám értékektől való százalékos eltérése a megengedett $\pm 3 \%$ -os tűréshatáron belül van, ezért a kiszámított fogaskerek fogszámai megfelelnek.

Továbbiakban olyan megoldásokat mutatunk be, amelyeket a példa szerinti feladat megoldása nem indokol, de más esetekben szóba jöhető megoldást jelentenek.

6.7 A hajtómű teljesítmény- és nyomatékviszonyai

A maximális forgácsoló nyomaték értéke:

$$M_{c\max} = 180 \text{ Nm}.$$

A méretezési n_{kr} kritikus fordulatszám a (33) összefüggés alapján:

$$n_{kr} = n_1 \sqrt[4]{Sz} = 63 \cdot \sqrt[4]{15,87} \approx 126 \text{ min}^{-1}.$$

A legközelebbi szabványos fordulatszám: 125 min^{-1} , azaz $n_{kr}=125 \text{ min}^{-1}$.

A szükséges hasznos teljesítmény:

$$P_{c\max} = \frac{M_{c\max} n_{kr}}{9,55} = \frac{180 \cdot 125}{9,55} \approx 2400 \text{ W} = 2,4 \text{ kW}.$$

A szükséges motorteljesítmény:

$$P_m = \frac{P_{c\max}}{\eta_{\text{mech}}} = \frac{2,4}{0,8} = 3 \text{ kW}.$$

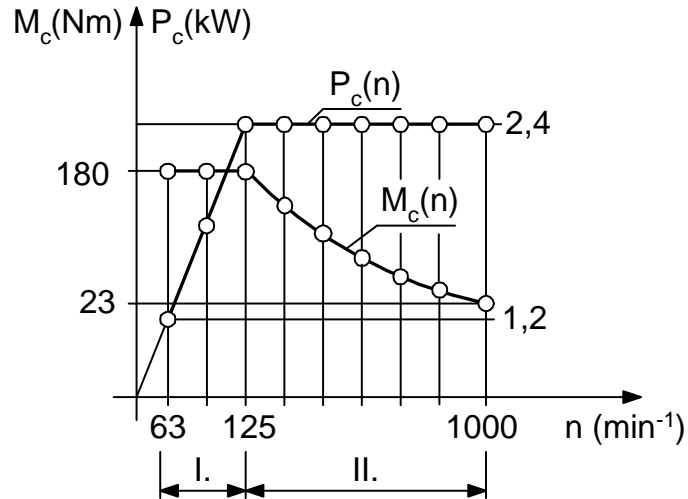
A választott zárt aszinkronmotor [3]:

$$Vz100Lh, \quad P_m = 3 \text{ kW}, \quad n_{\text{névl}} = 1440 \text{ min}^{-1}, \quad \text{pl. IM 3011, IP44, IC01}.$$

A hajtómű teljesítmény és nyomaték határdiagramja a 23. ábrán látható. Az ábra szélső sarokpontjainak értékei:

$$P_{c\min} = \frac{M_{c\max} n_1}{9,55} = \frac{180 \cdot 63}{9,55} \approx 1200 \text{ W} = 1,2 \text{ kW},$$

$$M_{c\min} = \frac{9,55 P_{c\max}}{n_{\max}} = \frac{9,55 \cdot 2400}{1000} \cong 23 \text{ Nm}.$$

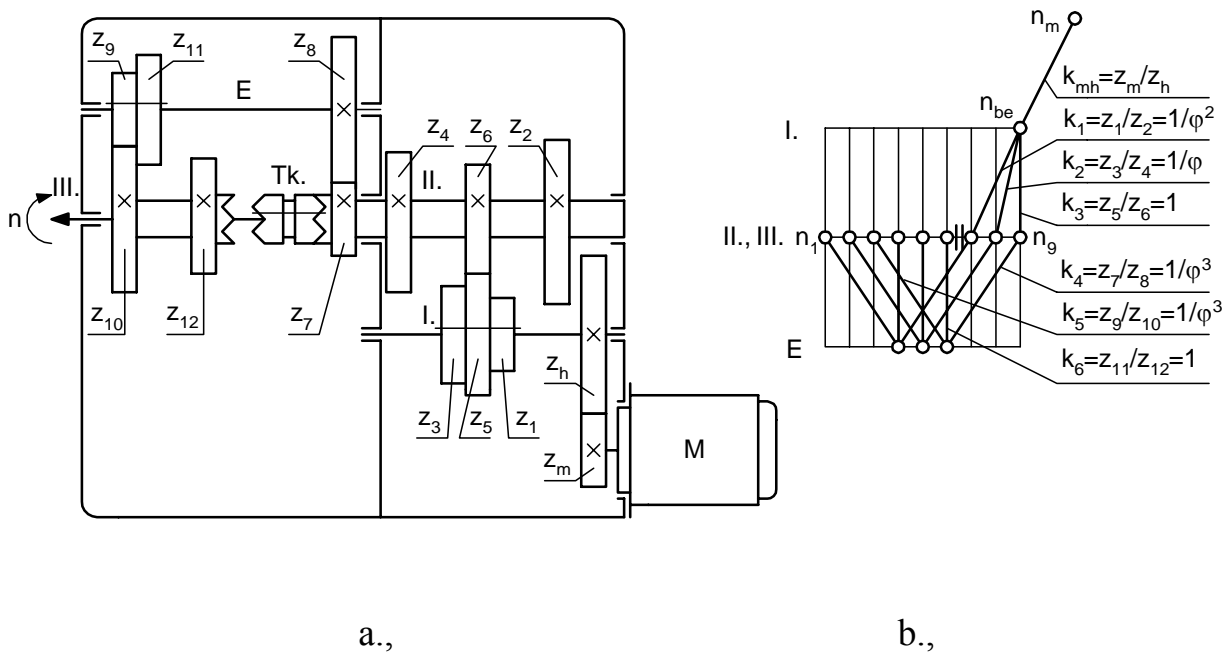


23. ábra: A 9 fokozatú főhajtómű teljesítmény- és nyomaték határdiagramjai

6.8 További megoldásváltozatok

Előtétengelyes főhajtómű

Ha az előző feladatnál nem használjuk ki a gyorsítás lehetőségét, akkor a 21.b ábra szerinti túlzott lassítás kettős előtéttel elkerülhető.



24. ábra: A 9 fokozatú kettős előtétes főhajtómű kinematikai vázlata és fordulatszámábrája

Az előtétengelyes főhajtómű kinematikai vázlatát és fordulatszámábráját a 23. ábra szemlélteti. A 24.a ábrán a kettős előtét hajtóműegység 11.a ábra szerinti kinematikai vázlata szerepel. A 24.b fordulatszám ábráról leolvasható, hogy a 21.b fordulatszám ábrán látható $1/\varphi^6=1/8$ értékű, meg nem engedett lassítást itt két, sorba kapcsolt $1/\varphi^3=1/2,82$ lassítás valósítja meg, szorzatuk: $1/\varphi^3 \cdot 1/\varphi^3=1/\varphi^6$.

Túlfedett főhajtómű

Ha a példa hajtóműben az átmérőtartományt $d_{\min} \div d_{\max}=5 \div 28$ mm-re változtatjuk, akkor a fokozatszám $z=10$ -re módosul. Ekkor az optimális hajtómű egyenlete:

$$A_3^1 \cdot I_2^3 \cdot II_2^{6-2} = E_{12-2}^1$$

lesz és a 16. ábra szerinti megoldáshoz jutunk.

Dahlander motoros főhajtómű

Az $A_3^1 \cdot I_3^3 = E_9^1$ hajtóműegyenlettel jellemzett főhajtóműben egyik részhajtómű sem helyettesíthető pólusváltós (Dahlander) motorral, mivel egyik hajtómű egység sem rendelkezik $\varphi=2$ fokozati tényezővel. Ugyanez igaz a 9.7.1 és a 9.7.2 fejezetekben ismertetett előtét és túlfedett főhajtóművekre is.

7. Az ERI-250 NC esztergagép főhajtóműve

Az ERI-250-es esztergagéppel kezdődött a számjegyvezérlésű szerszámgépek hazai gyártása. A Csepeli Szerszámgyárban a 70-es évek elejétől, a Krupp céggel kooperációban, gyártott számjegyvezérlésű, ERI-250 tárcsaeszterga (rövideszterga) az ETL-250 ütközős programvezérlésű és az ERS-250 szakaszvezérlésű tárcsaesztergák továbbfejlesztése révén jött létre. Mindhárom gép főhajtóműve azonos kialakítású volt. Bemutatását az indokolja, hogy egy kiforrott ugyanakkor az automatizálási igényeket is az adott korban kielégítő fokozatos hajtóműről van szó. Az ERI-250 NC esztergagépek a kissorozatú munkadarabok, az ETL-250 és ERS-250 esztergagépek az ismétlődő kissorozatú, illetve a közepes- és nagyszorozatú alkatrészek gazdaságos gyártását szolgálták.

A toronyrevolver jellegű esztergagépet a gyors szerszámcsere és a mellékidők csökkentése érdekében 10 pozíciós szerszám revolverfejjel látták el.

7.1 Szerkezeti kialakítás, kinematikai viszonyok

Szerkezeti kialakítás

A főhajtómű síkba terített szerkezeti rajza (25. ábra) olyan fokozatos főhajtóművet mutat, amelynek főorsóját precíziós gördülő főorsó-csapágyak vezetik meg. A mellső radiális és axiális megtámasztást kétsorú hengergörgős és kétoldalú ferdehatásvonalú axiális golyóscsapágy biztosítja. A főorsó végét radiális irányban kétsorú hengergörgős csapágy támasztja meg.

A DIN 55021 A-6 (MSZ 5038-52) szabvány szerinti meredekkúpos főorsó végződés a munkadarab befogó készülék (tokmány) felfogására szolgál. A vonóékes, nagy szorítóerejű tokmány működtetése hidraulikus. A különböző átmérőjű munkadarabok befogásához a tokmánypofákat kézzel kell átállítani a megfelelő átmérő tartományba.

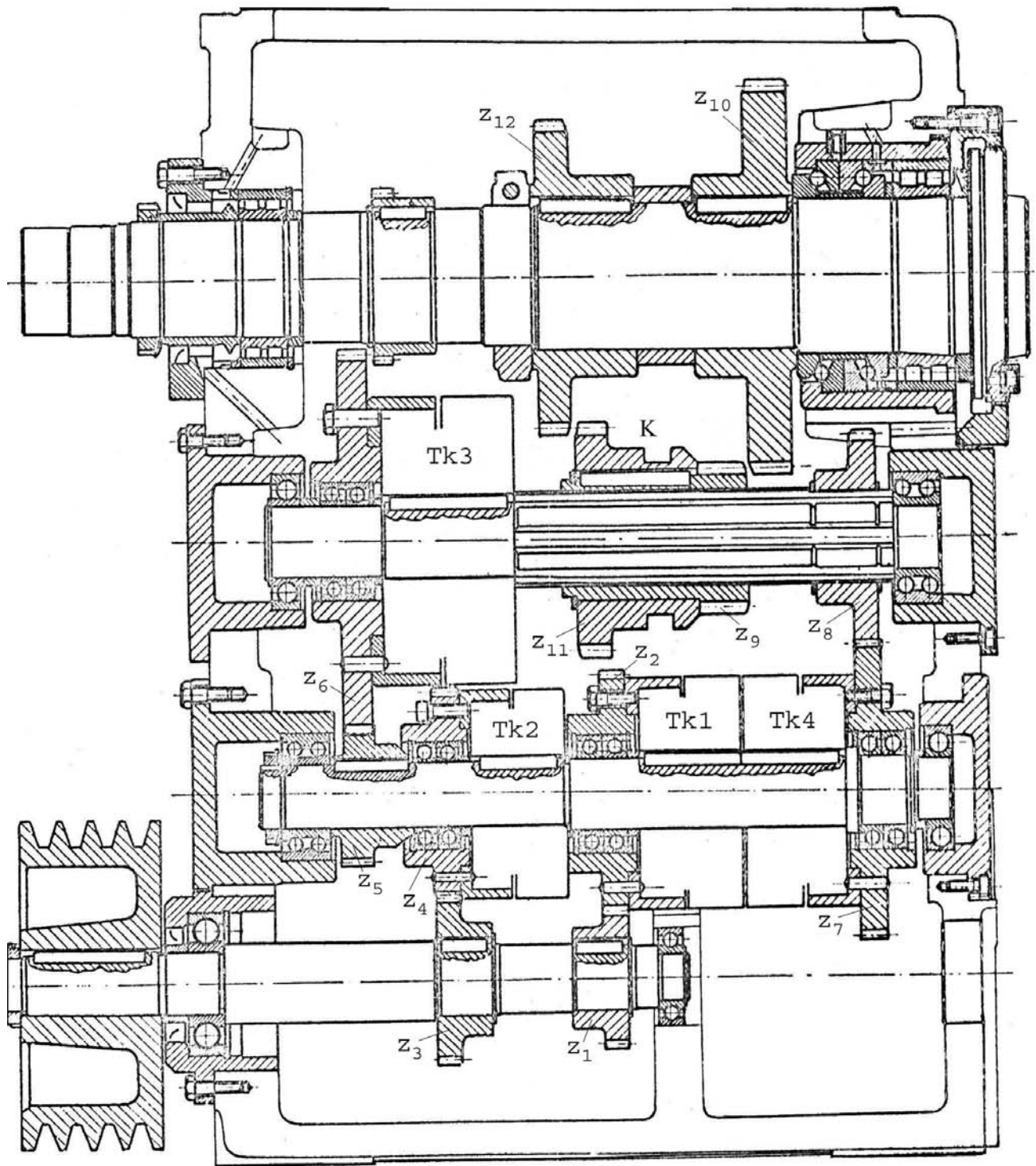
A főhajtómű fogaskerekeinek és csapágyainak kenése kényszerolajozású, és a gép mellett külön elhelyezett olajtartályból történik.

A fogaskerekes hajtóművet kétfordulatú, 2/4 pólusra kapcsolható aszinkronmotor (Dahlander motor) lassító hajtóviszonyú ékszíjhajtáson keresztül hajtja meg. A hajtóműben 3 darab kétfokozatú elemi hajtóművet kapcsoltak sorba, így $2 \times 2 \times 2 = 16$ fokozatú hajtóművet kapunk. Az egyes fokozatok kapcsolása az első hajtóműegységben a Tk1 (k_1) és Tk2 (k_2), a másodikban a Tk3 (k_3) és Tk4 (k_4) csúszógyűrű nélküli elektromágneses tengelykapcsolókkal, a harmadiknál a K kézi kapcsolású tolótömbbel hozható létre. A két fogaskereket tartalmazó tolótömb és a tengely bordás kötéssel kapcsolódik egymáshoz. A kézzel kapcsolható egy-egy fordulatszám tartományon belüli fordulatszámok elektromágneses tengelykapcsolókkal, és/vagy a motorpólusok számának (2, 4) megváltoztatásával automatikusan kapcsolhatók. A Tk3 és Tk4 tengelykapcsolókkal kinematikai rövidzár hozható létre a főorsó fékezése céljából, miközben a Tk1 és Tk2 tengelykapcsolók kikapcsolt állapotúak. A főorsó elfordulását mérő forgó impulzusadó (ROD) a főorsóról levezetett meghajtásáról 1:1 hajtóviszonyú, hézagtelenített fogaskerékpár gondoskodik.

Kinematikai viszonyok

A $2 \times 2 \times 2 = 16$ fokozatú főhajtómű 10 fordulatszámfokozatra átfedett, ezáltal elkerülhető a nagymértékű végfokozati lassítás, továbbá az automatikusan kapcsolható fordulatszám tartományok a technológiai feladatoknak jobban megfelelnek. A hajtómű egyenlete:

$$A_2^1 \cdot \underline{I_2^2} \cdot II_2^4 \cdot III_2^{8-6} = E_{16-6}^1.$$



25. ábra: Az ERI 250 NC esztergagép főhajtóműve

Az I_2^1 részajtómű egységet kétfordulatú Dahlander motorral helyettesítették, ami $\varphi=1,41$ fokozati tényezőjű ajtómű esetén lehetséges. Ekkor ugyanis $\varphi^2=1,41^2=2$ szabályozhatóság teljesül a motorra. A ajtómű átalakított egyenlete:

$$\underline{M} \cdot A_2^1 \cdot II_2^4 \cdot III_2^{8-6} = E_{16-6}^1.$$

A ajtómű szerkezeti- és fordulatszámábráját a 26.a, b ábra mutatja. A 26.b fordulatszámábrán bejelöltük az egyes ajtóviszonyokat, a kézzel kapcsolható fordulatszám tartományokat és a túlfedést, továbbá megadtuk a fordulatszámokat.

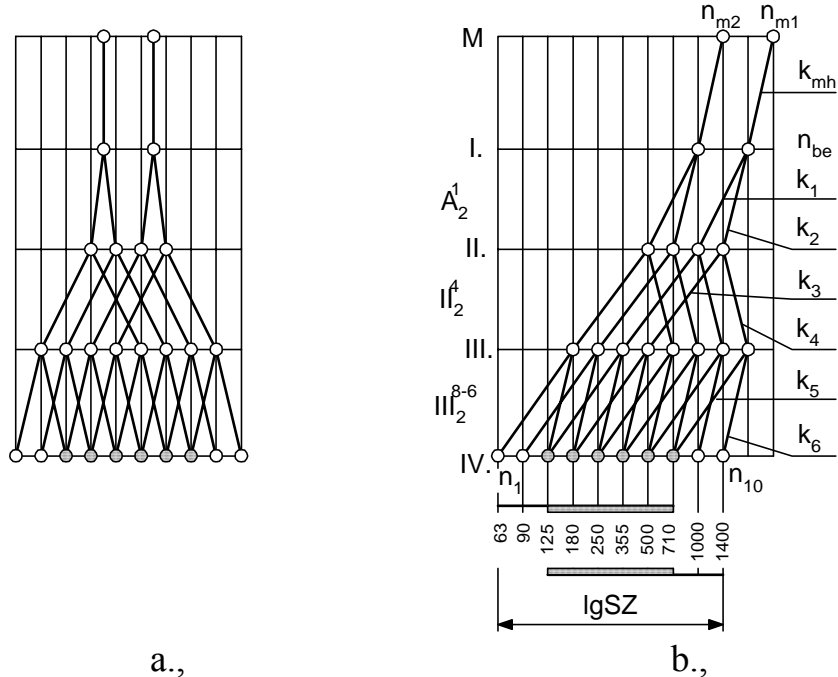
A ajtómű Sz szabályozhatósága: $Sz = \frac{1400}{63} = 22,2$.

Az egyes ajtóviszonyokat elméleti értékei:

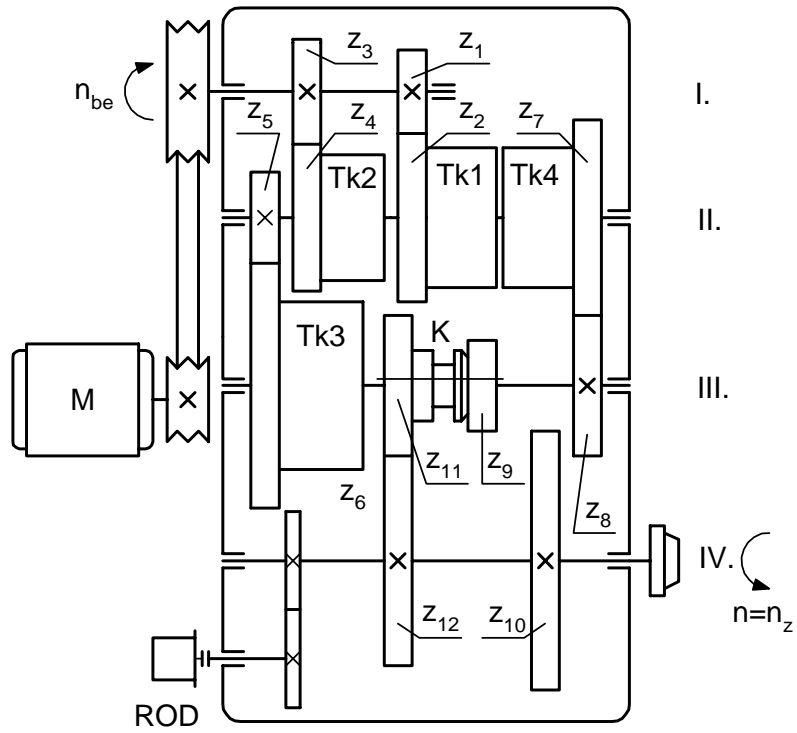
$$k_{\epsilon} = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,41}, \quad k_1 = \frac{1}{\varphi^2} = \frac{1}{1,41^2} = \frac{1}{2}, \quad k_2 = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,41}, \quad k_3 = \frac{1}{\varphi^3} = \frac{1}{1,41^3} = \frac{1}{2,82},$$

$$k_4 = \frac{\varphi}{1} = \frac{1,41}{1}, \quad k_5 = \frac{1}{\varphi^3} = \frac{1}{1,41^3} = \frac{1}{2,82}, \quad k_6 = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,41}.$$

A főajtómű szerinti kinematikai vázlat a 27. ábrán látható.



26. ábra: Az ERI 250 NC esztergagép főajtóművének hálózati- és fordulatszám ábrája



27. ábra: Az ERI 250 NC esztergagép főhajtóművének kinematikai vázlata

Irodalom

- [1] Tajnafői, J.: *Szerszámgéptervezés I.*
Kézirat, Tankönyvkiadó, Bp., 1973
- [2] Takács, E.: *Szerszámgépek I.*
Kézirat, Tankönyvkiadó, Bp., 1976
- [3] *EVIG Gyártmányjegyzék '82*
- [4] *ERI 250 Esztergagép pályavezérléssel Katalógus*
- [5] Erdélyi, F.: *Szerszámgépek automatizálása II.*
Kézirat, Tankönyvkiadó, Bp., 1980
- [6] Milberg, J.: *Werkzeugmaschinen-Grundlagen*
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York, 1992
- [7] Spur, G.: *Werkzeugmaschinen I.-II.*
Vorlesungen WS 94/95, IWF/IPK, TU Berlin
- [8] Weck, M.: *Werkzeugmaschinen, Band 2*
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1979