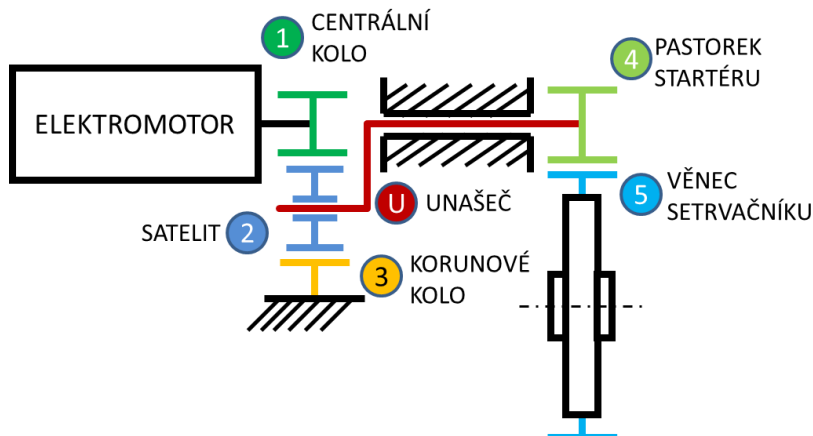


Doplňující podklady k řešení semestrálního projektu 6KT

Převodovka motorového startéru



Obecné informace:

- Počet zubů a jednotlivé průměry kola s vnitřním ozubením se označují zápornou hodnotou.
- Vůle mezi satelity v_{\min} se volí zpravidla 1 až 2 mm.
- Předpokládá se rovnoměrné rozložení sil mezi jednotlivými satelity.
- Doporučený počet satelitů $a_K = 2$ až 6, zpravidla 3.
- Tvrdost na boku zubu se odvíjí od počtu zátěžných cyklů daného kola/pastorku. Kolo s vyšším počtem cyklů má zpravidla vyšší tvrdost o cca. 20 až 60 HB než kolo s méně cyklů.

Doplňující vztahy:

Převodový poměr jednostupňového planetového převodu typu centrální kolo-unašeč v závislosti na počtu zubů centrálního a korunového kola [1] (str. 318):

$$i_{14} = 1 + \frac{|z_3|}{z_1}$$

Převodový poměr jednostupňového planetového převodu typu centrální kolo-unašeč v závislosti na počtu zubů centrálního kola a satelitu, počet zubů satelitu (odvozeno metodou dle okamžitého středu otáčení, viz [2] str. 750, př. 13-4) a otáčky satelitu (odvozeno dle vztahů v [1] str. 323):

$$i_{14} = \frac{2 \cdot (z_1 + z_2)}{z_1} \text{ odkud } z_2 = z_1 \cdot \left(\frac{i_{14}}{2} - 1 \right), \text{ kdy } n_2 = \frac{z_1 \cdot \frac{|z_3|}{z_2} \cdot n_1}{z_1 + |z_3|}$$

1. geometrická podmínka planetového mechanismu – podmínka stejných osových vzdáleností [1] (str. 325):

$$z_1 + 2z_2 = |z_3|$$

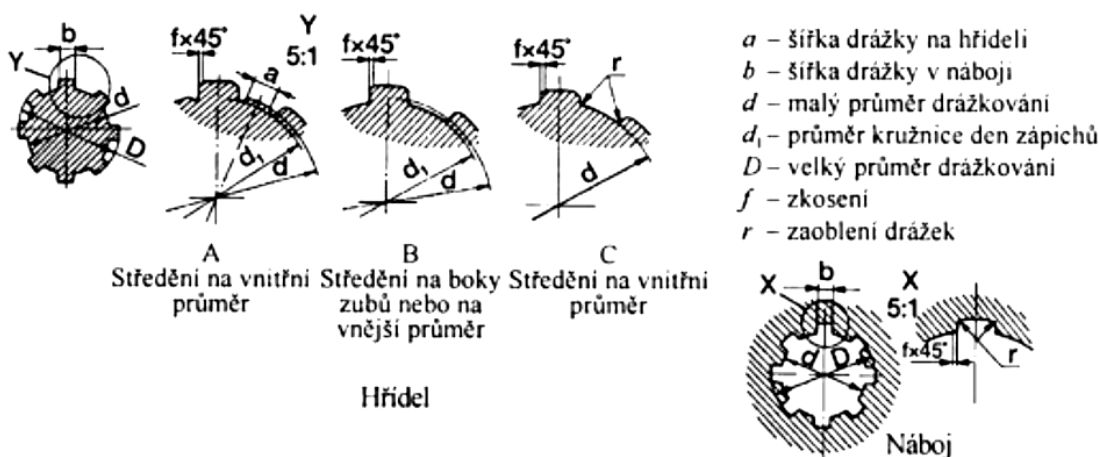
2. geometrická podmínka planetového mechanismu – podmínka smontovatelnosti [1] (str. 326):

$$z_1 + z_3 = N \cdot a_K, \text{ kde } N \text{ je celé číslo a } a_K \text{ je počet satelitů.}$$

3. geometrická podmínka planetového mechanismu – podmínka vůle mezi sousedními satelity [1] (str. 327):

$$\theta = \frac{360^\circ}{a_K} \geq \theta_{\min}, \text{ kde } \theta_{\min} = 2 \arcsin \left(\frac{d_{a2} + v_{\min}}{d_{w1} + d_{w2}} \right) \text{ a } v_{\min} \text{ je vůle mezi satelity.}$$

Drážkové spojení rovnoboké



a – šířka drážky na hřídeli
 b – šířka drážky v náboji
 d – malý průměr drážkování
 d_1 – průměr kružnice den zápchů
 D – velký průměr drážkování
 f – zkosení
 r – zaoblení drážek

Doporučená uložení drážkových spojení

Středění drážkového spojení		Pohyblivý spoj	Nepohyblivý spoj
Na vnitřní průměr: uložení rozměru	d b D	H7/f7, H7/g6 F10/e9, D9/f8, F8/h7 H12/a11	H7/js6 F8/js7, F8/k7, D9/k7 H12/a11
Na vnější průměr: uložení rozměru	D b d	H7/f7, H7/g6 F8/f7, F8/f8 H11/a11	H7/js6 F8/js7 H11/a11
Na boky zubů: uložení rozměru	b d D	D9/e8, F10/f8 H11/a11 H12/a11	F8/js7 H11/a11 H12/a11

Drsnost povrchu R_a (μm) se volí:

boky drážek	3,2 až 0,8
na středěném průměru	0,8 až 0,4
na nestředěném průměru	12,5 až 6,3

Dovolený tlak na boky zubů pro hřídel a náboj z oceli s $R_m \geq 500$ MPa a tvrzené boky s tvrdostí HRC ≥ 55

Náboj	Posuvnost	Druh zatížení	Dovolený tlak p_D (MPa) ¹⁾	
			netvrzené boky	tvrzené boky
posuvný na hřídeli	při zatížení	rázy	3 až 10	3 až 15
		proměnlivé	5 až 15	10 až 25
		stálé	10 až 20	20 až 35
	bez zatížení	rázy	15 až 30	20 až 40
		proměnlivé	20 až 40	30 až 55
		stálé	30 až 50	40 až 70
pevný na hřídeli	–	rázy	40 až 70	60 až 90
		proměnlivé	60 až 100	80 až 130
		stálé	80 až 150	120 až 200

¹⁾ Nižší hodnoty pro nedostatečné mazání, malou povrchovou tvrdost boků zubů, popř. drážek a malou přesnost obrobení.

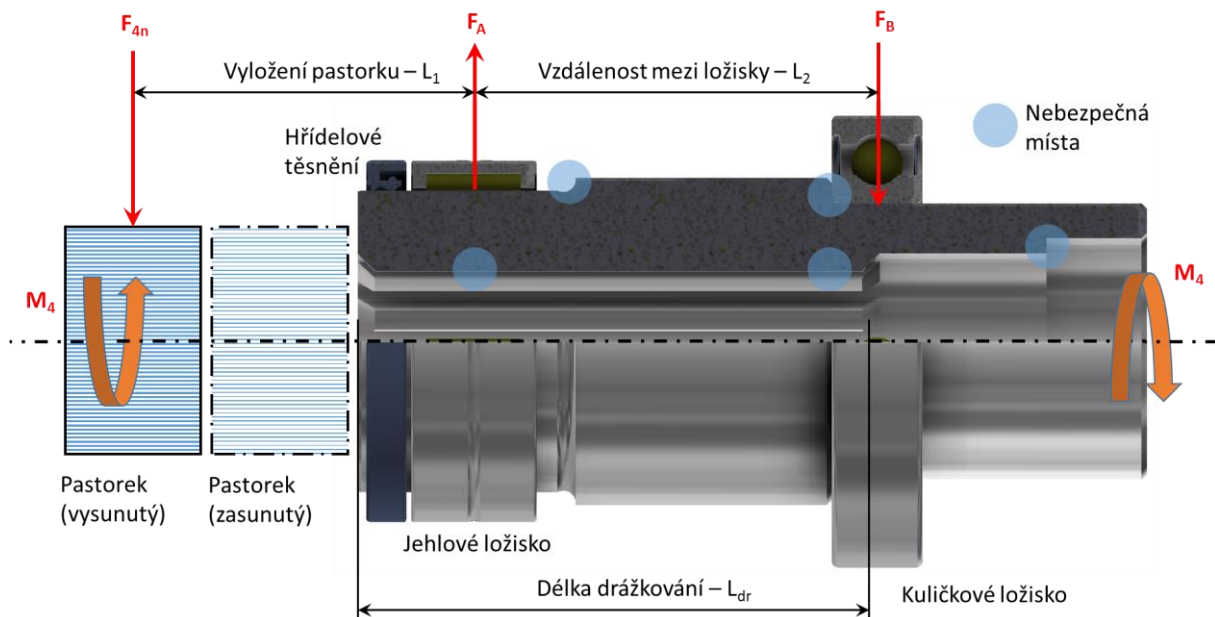
Rozměry pro rovnoboké drážkování:

Rozměry v mm

$z \times d \times D$	Počet zubů z	d	D	b	d_1 min.	a min.	f		r max.
							jmenovitý rozměr	mezní úchylka	
Lehká řada									
6 × 23 × 26	6	23	26	6	22,1	3,54	0,3	+0,2	0,2
6 × 26 × 30	6	26	30	6	24,6	3,85	0,3	+0,2	0,2
6 × 28 × 32	6	28	32	7	26,7	4,03	0,3	+0,2	0,2
8 × 32 × 36	8	32	36	6	30,4	2,71	0,4	+0,2	0,3
8 × 36 × 40	8	36	40	7	34,5	3,46	0,4	+0,2	0,3
8 × 42 × 46	8	42	46	8	40,4	5,03	0,4	+0,2	0,3
8 × 46 × 50	8	46	50	9	44,6	5,75	0,4	+0,2	0,3
8 × 52 × 58	8	52	58	10	49,7	4,89	0,5	+0,3	0,5
8 × 56 × 62	8	56	62	10	53,6	6,38	0,5	+0,3	0,5
8 × 62 × 68	8	62	68	12	59,8	7,31	0,5	+0,3	0,5
10 × 72 × 78	10	72	78	12	69,6	5,45	0,5	+0,3	0,5
10 × 82 × 88	10	82	88	12	79,3	8,62	0,5	+0,3	0,5
10 × 92 × 98	10	92	98	14	89,4	10,08	0,5	+0,3	0,5
10 × 102 × 108	10	102	108	16	99,9	11,49	0,5	+0,3	0,5
10 × 112 × 120	10	112	120	18	108,8	10,72	0,5	+0,3	0,5
Střední řada									
6 × 11 × 14	6	11	14	3,0	9,9	–	0,3	+0,2	0,2
6 × 13 × 16	6	13	16	3,5	12,0	–	0,3	+0,2	0,2
6 × 16 × 20	6	16	20	4,0	14,5	–	0,3	+0,2	0,2
6 × 18 × 22	6	18	22	5,0	16,7	–	0,3	+0,2	0,2
6 × 21 × 25	6	21	25	5,0	19,5	1,95	0,3	+0,2	0,2
6 × 23 × 28	6	23	28	6,0	21,3	1,34	0,3	+0,2	0,2
6 × 26 × 32	6	26	32	6,0	23,4	1,65	0,4	+0,2	0,3
6 × 28 × 34	6	28	34	7,0	25,9	1,70	0,4	+0,2	0,3
8 × 32 × 38	8	32	38	6,0	29,4	–	0,4	+0,2	0,3
8 × 36 × 42	8	36	42	7,0	33,5	1,02	0,4	+0,2	0,3
8 × 42 × 48	8	42	48	8,0	39,5	2,57	0,4	+0,2	0,3
8 × 46 × 54	8	46	54	9,0	42,7	–	0,5	+0,3	0,5
8 × 52 × 60	8	52	60	10,0	48,7	2,44	0,5	+0,3	0,5
8 × 56 × 65	8	56	65	10,0	52,2	2,50	0,5	+0,3	0,5
8 × 62 × 72	8	62	72	12,0	57,8	2,40	0,5	+0,3	0,5
10 × 72 × 82	10	72	82	12,0	67,4	–	0,5	+0,3	0,5
10 × 82 × 92	10	82	92	12,0	77,1	3,00	0,5	+0,3	0,5
10 × 92 × 102	10	92	102	14,0	87,3	4,50	0,5	+0,3	0,5
10 × 102 × 112	10	102	112	16,0	97,7	6,30	0,5	+0,3	0,5
10 × 112 × 125	10	112	125	18,0	106,3	4,40	0,5	+0,3	0,5
Těžká řada									
10 × 16 × 20	10	16	20	2,5	14,1	0,3	0,3	+0,2	0,2
10 × 18 × 23	10	18	23	3,0	15,6	0,3	0,3	+0,2	0,2
10 × 21 × 26	10	21	26	3,0	18,5	0,3	0,3	+0,2	0,2
10 × 23 × 29	10	23	29	4,0	20,3	0,3	0,3	+0,2	0,2
10 × 26 × 32	10	26	32	4,0	23,0	0,4	0,4	+0,2	0,3
10 × 28 × 35	10	28	35	4,0	24,4	0,4	0,4	+0,2	0,3
10 × 32 × 40	10	32	40	5,0	28,0	0,4	0,4	+0,2	0,3
10 × 36 × 45	10	36	45	5,0	31,3	0,4	0,4	+0,2	0,3
10 × 42 × 52	10	42	52	6,0	36,9	0,4	0,4	+0,2	0,3
10 × 46 × 56	10	46	56	7,0	40,9	0,5	0,5	+0,3	0,5
16 × 52 × 60	16	52	60	5,0	47,0	0,5	0,5	+0,3	0,5
16 × 56 × 65	16	56	65	5,0	50,6	0,5	0,5	+0,3	0,5
16 × 62 × 72	16	62	72	6,0	56,1	0,5	0,5	+0,3	0,5
16 × 72 × 82	16	72	82	7,0	65,9	0,5	0,5	+0,3	0,5
20 × 82 × 92	20	82	92	6,0	75,6	0,5	0,5	+0,3	0,5
20 × 92 × 102	20	92	102	7,0	85,5	0,5	0,5	+0,4	0,5
20 × 102 × 115	20	102	115	8,0	94,0	0,5	0,5	+0,3	0,5
20 × 112 × 125	20	112	125	9,0	104,0	0,5	0,5	+0,3	0,5

Další podrobnosti ČSN ISO 14 (01 4942) a 01 4940.

Návrhové schéma duté hřídele unašeče, působící síly a momenty, nebezpečná místa



Obecná doporučení pro návrh a kontrolu duté hřídele unašeče:

- Prvotní návrh průměru hřídele uvažuje dutou hřídel s poměrem vnějšího a vnitřního průměru $D/d = 2$. Tento poměr je pouze návrhovou hodnotou a je dále ovlivněn konstrukčním řešením hřídele (ložiska, drážkování, osazení, zápichy, apod.).
- Šířku ozubení výstupního pastorku startéru volte jako $0.6 \cdot d_4$, kde d_4 je průměr roztečné kružnice pastorku startéru.
- Vyložení pastorku (vzdálenost od středu šířky pastorku po střed šířky prvního ložiska) při jeho vysunutí ze startéru je vhodné volit v rozmezí $l_1 = (1.5 \text{ až } 2) \cdot d_4$.
- vzdálenost mezi ložisky hřídele je vhodné volit v rozmezí $l_2 = (1.5 \text{ až } 2) \cdot l_1$.
- Při návrhu je vhodné uvažovat předběžné hodnoty koncentrátorů napětí. Jako konzervativní hodnota koncentrace napětí pro drážkování hřídelů je uvažován součinitel tvaru 3.5 pro normálové a 5 pro smykové napětí. Součinitel vrubu pro drážkování odpovídá přibližně 90 % součinitele tvaru (konzervativní přístup). Možné je navíc uvažovat i návrhový součinitel do hodnoty 2.
- Efektivní rozměr pro určení hodnoty součinitele vlivu velikosti tělesa k_b pro duhou hřídel je $d_e = \sqrt{D^2 - d^2}$
- Uvažujte spolehlivost pro výpočet ložisek či korigované meze únavy 90 %.
- Středění rovnobokého drážkování je z důvodu kalení hřídele na vnitřní průměr. Vhodné je drážkování volit na základě návrhového vnitřního průměru hřídele, který by měl být podobný hodnotě středního průměru drážkování. Provádí se pouze kontrola na otláčení boků drážek. Pro funkci vysunutí a zasunutí pastorku s dostatečnou tuhostí je vhodné volit velkou délku drážkování přibližně $L = l_1 + 0.5 \cdot l_2$
- Při kontrole hřídele v nebezpečných místech posuzujte bezpečnosti k MSP dle HMH i Langerova kritéria, a MSU dle Gerberova kritéria. Pro bezpečnost dle Langerova kritéria platí: $k_k = Re / (\sigma_a + \sigma_m)$.

Koncentrace napětí pro rovnoboké drážkování (v místě velkého průměru drážkování D) [4]

$$\alpha_\tau = 6.083 - 14.775 \left(\frac{10r}{D} \right) + 18.25 \left(\frac{10r}{D} \right)^2 \quad \text{kde } r \text{ je zaoblení drážek, } \alpha_\sigma = \frac{2}{3} \cdot \alpha_\tau \text{ (odhad), } \beta = 0.9 \alpha \text{ (odhad)}$$

Rovnoboké drážkování – doplňující vztahy:

Střední průměr drážkování: $D_s = \frac{D+d}{2}$, síla působící na drážkování: $F = \frac{2 \cdot M_k}{D_s}$

Účinná plocha drážek na délce 1 mm: $A_f = 0.75z \cdot h' = 0.75z \cdot \left(\frac{D-d}{2} - 2f \right)$, kde f je zkosení drážek.

Tlak v drážkování: $p = \frac{F}{A_f \cdot L}$

Kontrola na otlačení: $p_D \geq p = \frac{4 \cdot M_k}{(D+d) \cdot 0.75z \cdot \left(\frac{D-d}{2} - 2f \right) \cdot L}$

Návrh minimálního vnějšího průměru duté hřídele – doplňující vztahy:

Modul průřezu v krutu pro dutou hřídel: $W_k = \frac{J_p}{r} = \frac{2}{D_h} \cdot \frac{\pi}{32} \cdot (D_h^4 - d_h^4) = \frac{\pi}{16} \cdot \left(D_h^3 - \frac{d_h^4}{D_h} \right)$

po dosazení $d_h = 0.5D_h$ je $W_k = \frac{\pi}{16} \cdot \left[D_h^3 - \frac{(0.5D_h)^4}{D_h} \right] = \frac{\pi}{16} \cdot D_h^3 \cdot (1 - 0.5^4) = \frac{15}{256} \cdot \pi \cdot D_h^3$

obdobně modul průřezu v ohybu pro dutou hřídel, kde $D/d=2$ je $W_o = \frac{15}{512} \cdot \pi \cdot D_h^3$

Minimální vnější průměr duté hřídele, kde $D/d=2$, je dle teorie HMH (k MSP) je potom:

$$D_h = \sqrt[6]{\frac{M_o^2 \cdot \left(\frac{512}{15} \right)^2 \cdot \alpha_\sigma^2 + 3 \cdot M_k^2 \cdot \left(\frac{256}{15} \right)^2 \cdot \alpha_\tau^2}{\pi^2 \cdot \sigma_{red}^2}}$$

Minimální vnější průměr duté hřídele, kde $D/d=2$, je dle Gerberova kritéria ve spojení s teorií HMH (k MSÚ) je:

$$D_{MSU} = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{k_n^2 \cdot Rm^2 \cdot \left[\left(\frac{512}{15} \right)^2 \cdot \beta_\sigma^2 \cdot M_o^2 \cdot Rm^2 + 12 \cdot \left(\frac{256}{15} \right)^2 \cdot \beta_\tau^2 \cdot \sigma_{co}^2 \cdot M_k^2 \right] + \frac{512}{15} \cdot \beta_\sigma \cdot k_n \cdot M_o}{\pi \cdot \sigma_{co} \cdot Rm^2}} + \frac{512}{15} \cdot \beta_\sigma \cdot k_n \cdot M_o}{\pi \cdot \sigma_{co}}}$$

$$D_{MSU} = \frac{4 \cdot \sqrt[3]{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sqrt{k_n^2 \cdot Rm^2 \cdot \left(\beta_\sigma^2 \cdot M_o^2 \cdot Rm^2 + 3 \cdot \beta_\tau^2 \cdot \sigma_{co}^2 \cdot M_k^2 \right)} + \frac{\beta_\sigma \cdot k_n \cdot M_o}{\pi \cdot \sigma_{co}}}}{\sqrt[3]{15}}$$

po zjednodušení: $D_{MSU} = \frac{4 \cdot \sqrt[3]{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sqrt{k_n^2 \cdot Rm^2 \cdot \left(\beta_\sigma^2 \cdot M_o^2 \cdot Rm^2 + 3 \cdot \beta_\tau^2 \cdot \sigma_{co}^2 \cdot M_k^2 \right)} + \frac{\beta_\sigma \cdot k_n \cdot M_o}{\pi \cdot \sigma_{co}}}}{\sqrt[3]{15}}$

Návrh uložení hřídele unašeče a těsnění – obecné pokyny:

- K určení modifikované trvanlivosti ložisek je možné využít SKF kalkulátor dostupný na adrese <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/> (L_{10mh} musí být větší než požadovaná trvanlivost)
- Ložiska je možné volit z katalogů SKF: kuličková ložiska viz http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_01_Kulickova%20loziska.pdf, jehlová ložiska viz <http://www.exvalos.cz/soubory/File/Jehlova%20loziska%20SKF.pdf>
- Pro redukci rozměrů volit jehlová ložiska bez vnitřního kroužku (označení HK, NK, RNA, atd.) – je nutné ale volit příslušný materiál hřídele, který umožní povrchové kalení na min. 58 HRC.
- Je vhodné volit utěsněná ložiska s trvalou náplní (označení zpravidla 2SR), jinak je nutné do konstrukce zahrnout dodatečná těsnění. Lze použít např. katalog SKF http://www.skf.com/binary/151-129139/10919_CZ_lowres.pdf
- Při využití SKF kalkulátoru je potřebné uvažovat maximální provozní teplotu, jako mazivo volit originální plastické mazivo ložisek bez kontaminace nečistotami (utěsněná ložiska) – k tomu je nutné případně zvolit vhodné těsnění (pro ložiska bez těsnění).
- Jako plastické mazivo pro jehlová ložiska volit SKF LGWA 2 s kinematickou viskozitou 185 mm²/s při 40°C a 15 mm²/s při 100°C. Pro kuličková ložiska je zpravidla kalkulátorem předvyplněno mazivo MT47 nebo MT33 (dle vnějšího průměru ložiska).

Použitá literatura:

1. BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů. 5.*, přeprac. vyd. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL, 1990, 707 s. Technický průvodce. ISBN 80-03-00426-8.
2. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). *Konstruování strojních součástí. 1.* vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
3. ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky pro školu a praxi. 1.* vyd. Praha: Scientia, 2004, 753 s. ISBN 80-7183-312-6.
4. PILKEY, Walter D, Deborah F PILKEY a Rudolph Earl PETERSON. *Peterson's stress concentration factors. 3rd ed.* Hoboken: John Wiley, 2007, 522 s. ISBN 978-0-470-04824-5.