

ÚJV 2382•R

ČESKOSLOVENSKÁ AKADEMIE VĚD
ÚSTAV JADERNÉHO VÝZKUMU

J. BLAŽEK

XENONOVÁ STABILITA REAKTORU A2

PODKLADY PRO VOLBU KONCEPCE
REGULACE REAKTORU A2

ŘEŽ 1970

INFORMAČNÍ STŘEDIŠKO PRO JADERNOU ENERGII



ÚJV 2382·R

J. BLAŽEK

XENONOVÁ STABILITA REAKTORU A2

PODKLADY PRO VOLBU KONCEPCE
REGULACE REAKTORU A2

ŘEŽ 1970

CZ 7000078

Úvod.

Jedno z důležitých hledisek pro volbu koncepce regulace výkonového reaktoru s velkou aktivní zónou je skutečnost, zda uvažovaný reaktor je stabilní vzhledem ke xenonovým oscilacím. Tvoření jódu 135 a selenu 135 při štěpení a jejich vyhořívání při pohlcování neutronů, působí jako v prostoru rozložená zpětná vazba, která se může stát příčinou xenonové nestability. Pokud se tato nestabilita projevuje jen na celkovém výkonu reaktoru, stačí spolehlivý provoz zajistit běžný regulátor výkonu. Avšak pro dostatečně velkou aktivní zónu, případně neutronový tok, může dojít k tomu, že při neustálém celkovém výkonu reaktoru stoupá výkon jen v určité části reaktoru, zatímco v jiné části klesá. Takové lokální zvýšení výkonu může způsobit poškození aktivní zony. Podle toho v jakých částech reaktoru dochází k těmto změnám, mluvíme u válcového reaktoru o azimutálních, axiálních a radiálních vidích. Výsledky výpočtů uvedené v této zprávě se týkají stability l. azimutálního a l. axiálního vidu.

Rozhodnout o tom, zda je reaktor stabilní, můžeme pouze fyzikálními výpočty a jejich výsledek můžeme ověřit až na realizovaném reaktoru. Protože případná xenonová nestabilita klade zvýšené nároky na regulační systém reaktoru, který v takovém případě musí zajistit možnost nezávislé regulace výkonu v jednotlivých částech reaktoru, byly současně s fyzikálními výpočty statiky aktivní zony prováděny i výpočty xenonové stability.

V této stručné zprávě jsou uvedeny výsledky výpočtů xenonové stability týkající se varianty označené v ÚJV číslem 1102. Tato varianta aktivní zony byla vybrána jako optimální a tvoří podkladový materiál pro vypracování projektu reaktoru A2. Při výpočtech stability se měnilo zatížení paliva a teplotní koeficient.

Výpočty byly prováděny na základě tří výzkumných zpráv ÚJV J. Blažek, M. Krejčí : "Xenonová stabilita reaktoru A2, část I.-III " (ÚJV 1535, 1860, 2120 R). V souhlase s těmito zprávami existují dva programy pro číslicový počítač GIER. První program 421U používá metody vidů, která je popsána ve zprávě č. 1860. Ve druhém programu 865 U je použito

variační metody syntézy toku, která je popsána v závěrečné zprávě číslo 2120.R.

K rozhodnutí o tom, zda je reaktor stabilní je v obou metodách použite první metody Ljapunova, t.zn., jsou vypočtena všechna vlastní čísla a stabilitu posuzujeme podle vlastního čísla s největší reálnou částí. Při stanovení meze stability sledujeme změny dvou vlastních čísel; největší reálné vlastní číslo označené β^* a vlastní číslo s největší imaginární částí označené $\beta + i\omega$. Je-li reaktor daleko od meze stability je vlastní číslo s největší reálnou částí rovno číslu β^* . Při přibližování se k mezi stability zůstává číslo β^* téměř beze změny, avšak velmi rychle se zvětšuje hodnota β . Perioda xenonových oscilací T je dána vzorcem $T = 2\pi/\omega$.

Zadané parametry reaktoru A2

Potřebné konstanty k výpočtu xenonové stability 1. azimutálního a 1. axiálního vidu jsou uvedeny v tabulce 1. V první části tabulky jsou uvedeny fyzikální parametry optimální varianty pro nominální zatížení 30.8 MW/t, což odpovídá střední hodnotě toku tepelných neutronů v buňce, která je umístěna v ose reaktoru, rovné $2.646 \cdot 10^{14} \text{ n cm}^{-2} \text{ sec}$. Protože xenonová stabilita závisí na absolutní hodnotě toku, byl stacionární stav vypočten ještě pro 50%, 150% a 200% zatížení, i když poslední dva stavy nemohou být ve skutečnosti realizovány. Fyzikální parametry, které se mění se zatížením jsou uvedeny v druhé části tabulky 1.

Rozložení tepelného a rychlého neutronového toku ve vlastní aktivní zóně (bez reflektoru) je uvedeno na obr.1.

Výsledky.

V tabulkách 2. a 3. jsou schematicky znázorněny tvary 1. azimutálního a 1. axiálního vidu a dále jsou zde uvedeny vlastní hodnoty pro 100% zatížení, které byly vypočteny oběma programy. Počet vlastních hodnot závisí na počtu diferenčních rovnic, kterými nahrazujeme v obou programech 421 U a 865 U diferenciální rovnice. Na vliv počtu těchto rovnic můžeme

usuzovat ze srovnání přesného analytického řešení ustáleného stavu z řešení používajícím diferenční rovnice. Tote srovnání je provedeno v tabulce 4 a je z něho patrné, že při 8 bodech v aktivní zóně je maximální chyba 3,5%. Jiný způsob, jak posoudit vliv počtu diferenčních rovnic je provést výpočet vlastních čísel pro různý počet diferenčních rovnic a zhodnotit jejich vliv na dosažené výsledky. Pro program 421 U to bylo provedeno a výsledky jsou v tabulce 5. Jak byly voleny difference je vidět z tabulky 6. Z tabulky 5. je patrné, že nejdůležitější vlastní čísla β^* a $\beta + i\omega$ nezávisí příliš silně na zvoleném počtu bodů. V dalších tabulkách 7,8 jsou uvedeny nejdůležitější vlastní čísla pro různá zatížení paliva.

Bude-li mít reaktor kladný teplotní koeficient, nebezpečí vzniku xenonových oscilací se zvětší. Přestože se u reaktoru typu A2 nepředpokládá vzrůst reaktivity se vzrůstem výkonu, byla pro úplnost zkoumána xenonová stabilita reaktoru pro různé hodnoty teplotního koeficientu.

V L 2 byl zaveden parametr α , který je dán poměrem relativních přírůstků multiplikačního koeficientu a výkonu k jejich vlastním nominálním hodnotám. To znamená, že pro reflektor je $\alpha = 0$. Závislost nejdůležitějších vlastních čísel β^* a $\beta + i\omega$ na parametru α je uvedena pro jednotlivé vidy a pro dvě různá zatížení v tab. 9. a 10. Současně je tato závislost vynesena graficky na obr. 2. a 3. Pro malé α má největší vlastní číslo hodnotu okolo $\beta^* = -0.104$, což znamená, že nejpomalejší přechodový proces je určen časovou konstantou ~ 10 hod která se přibližně rovná časové konstantě rozpadu jodu. Se zvětšujícím se α se toto vlastní číslo nemění, ale rychle vzrůstá reálná část β imaginárního vlastního čísla $\beta + i\omega$. První azimutální vid je nestabilní při $\alpha = 0.065$, což velmi přibližně odpovídá změně multiplikačního koeficientu k na 1°C $\Delta k \approx 2 \cdot 10^{-4}$ $1/^\circ\text{C}$. Pro axiální vid jsou tato čísla rovna $\alpha = 0.056$ a $\Delta k \approx 1.7 \cdot 10^{-4}$ $1/^\circ\text{C}$. To znamená, že axiální vid je méně stabilní než azimutální vid. Tato skutečnost je výhodná z toho důvodu, že větší poruchy v rozložení xenonu vzniknou v azimut. rozložení, a to vždy při výměně článku během převezu.

Abychom měli jistotu, že určená mez stability není mezi stability jiného vidu, musíme kontrolovat tvar vidu. Na obr. 4. a 5 jsou uvedeny tvary 1. azimutálního a 1. axiálního vidu pro β blízké mezní hodnotě.

V zahraniční literatuře jmenovitě v práci R.M. Pearce : Analog Simulation of Xenon Instability, AECL-1185, Chalk River, Ontario 1961, jsou uvedeny hodnoty tlumení 1. azimutálního vidu pro reaktor CANDU, který se svými rozměry blíží reaktoru A2. Hodnoty $\beta = -0,12 \text{ hod.}^{-1}$ až $-0,105 \text{ hod.}^{-1}$ pro toky $0,75 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ až $1,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ jsou vcelku v dobré shodě s našimi výsledky, kdy $\beta = 0,104 \text{ hod.}^{-1}$ pro střední tok přes buňku rovnající se $2,646 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$. Prakticky to znamená, že libovolná porucha se zmenší e-krát přibližně za 10 hod. a za 24 hod. se prakticky utlumí.

Závěr.

Z uvedených výsledků a na základě všech předchozích výpočtů, které se týkaly dřívějších variant reaktoru A2 včetně sestaveného analogového modelu, lze tvrdit, že všechny vidy budou stabilní a že regulační systém regulující pouze celkový výkon reaktoru bude z hlediska xenonové stability postačující.

Literatura

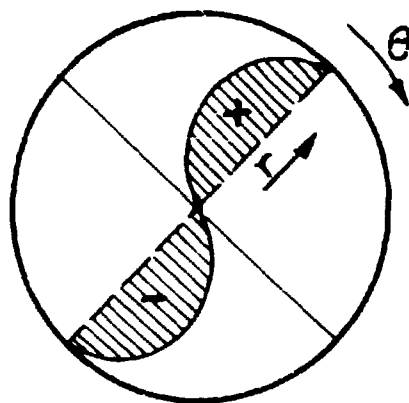
- L [1] J. Blažek, M. Krejčí : "Xenonová stabilita reaktoru A2, část 1".
Práce ÚJV 1535.
- L [2] J. Blažek, M. Krejčí : " Xenonová stabilita reaktoru A2, část 2".
Práce ÚJV 1860.
- L [3] J. Blažek, M. Krejčí : "Xenonová stabilita reaktoru A2, část 3 ".
Práce ÚJV 2120.

Tab.1. Fyzikální parametry optimální varianty 1102
reaktoru A2.

Zatížení	Veličina	Rozměr	1.pásmo	2.pásmo	3.pásmo	Reflektor
100%	L^2	cm^2	194.59	200.66	190.31	7085.83
	τ_{ef}	cm^2	194.73	194.73	193.93	116.38
	k_{ef}	-	1.0191	1.0510	1.0504	0.000
	D_t	cm	0.93102	0.93103	0.92447	0.8503
	Σ_a	cm^{-1}	0.00478	0.00464	0.00486	0.00012
	τ	cm^2	182.76	182.76	180.82	116.38
	$\beta \Sigma_s$	cm^{-1}	0.14273	0.14273	0.14273	0.17899
	W	-	0.06974	0.06974	0.07716	0.000
	δ	-	0.88955	0.86256	0.86014	1.000
	ϵ	-	1.0352	1.0352	1.0383	0.000
	p	-	0.88802	0.88802	0.87973	1
	V_u	cm^3	39.277	39.277	43.641	0.000
	V_b	cm^3	1310	1310	1310	1
	N_u	-	0.79433	0.79437	0.77087	0
	N_b	-	1.4481	1.44803	1.48131	1
	r_{kr}	cm	91.23	147.81	248.42	299.3

Zatížení	Veličina	Rozměr	1.pásmo	2.pásmo	3.pásmo	Reflektor
50%	L^2	cm^2	194.76	200.84	190.64	7055.83
	k_{ef}	-	1.0207	1.0528	1.0537	0
	Σ_a	cm^{-1}	0.00478	0.00464	0.00485	0.00012
	N_u	-	0.79461	0.79463	0.77146	0
	N_D	-	1.4475	1.44746	1.48011	-
	D_t	cm	0.93108	0.93109	0.92459	0.85030
	r_{kr}	cm	105.77	147.81	248.42	299.3
150%	L^2	cm^2	184.53	200.58	190.23	7055.83
	k_{ef}	-	1.0185	1.0502	1.0496	0
	Σ_a	cm^{-1}	0.00479	0.00464	0.00486	0.00012
	N_u	-	0.79424	0.79425	0.77073	0
	N_D	-	1.4483	1.44828	1.48159	-
	D_t	cm	0.931	0.931	0.92445	0.8503
	r_{kr}	cm	86.55	147.81	248.42	299.3
200%	L^2	cm^2	194.49	200.54	190.17	7055.83
	k_{ef}	-	1.0182	1.0499	1.0490	0
	Σ_a	cm^{-1}	0.00479	0.00464	0.00486	0.00012
	N_u	-	0.79418	0.79419	0.77062	0
	N_D	-	1.44842	1.44841	1.48180	-
	D_t	cm	0.93099	0.93099	0.93443	0.85030
	r_{kr}	cm	83.27	147.81	248.42	299.3
	β	-		0.06		
	β_x	-		0.003		
	σ_x	cm^{-2}		$2.4692 \cdot 10^{-18}$		
	σ_f	cm^{-2}		$4.00596 \cdot 10^{-22}$		
	λ_s	sec^{-1}		$2.86 \cdot 10^{-5}$		
	λ_x	sec^{-1}		$2.07 \cdot 10^{-5}$		
	N_{235}	cm^{-3}		$3.368 \cdot 10^{20}$		
	α_f^2	cm^{-2}		$4.565 \cdot 10^{-5}$		

Tab.2. 1. azimutální vid.



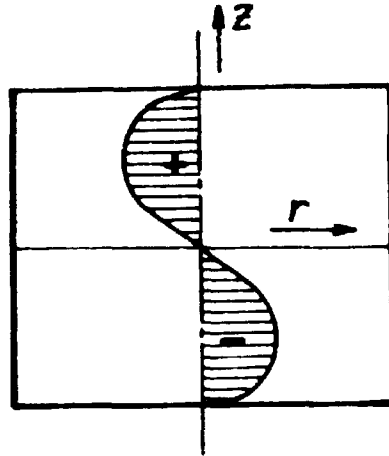
Program 865.
Vlastní hodnoty matice.

Re λ [1/hod]	Im λ [1/hod]
-0.10587	0
-0.10489	0
-0.10464	0
-0.10459	0
-0.10639	0
-0.1116	0
-0.20876	0
-0.28611	0
-0.3767	0
-0.71098	0
-0.90038	0
-1.0528	0
-1.1281	0
-1.1519	0

Program 421.
Vlastní hodnoty matice.

Re λ [1/hod]	Im λ [1/hod]
-0.11122	0
-0.10782	0
-0.10647	0
-0.10429	0
-0.1492	0
-0.10526	0
-0.10573	0
-0.12289	0
-0.11743	0.26093
-0.11743	-0.26093
-0.53813	0
-0.54605	0
-0.71737	0
-0.88294	0
-0.99814	0
-1.0677	0
-1.1403	0
-1.1260	0

Tab.3. 1. axiální vid.



Program 865.

Vlastní hodnoty matice.

Re λ [1/hod.]	Im λ [1/hod.]
-0.10581	0
-0.10566	0
-0.10632	0
-0.10463	0
-0.10719	0
-0.10977	0
-0.11758	0
-0.15926	0
-0.24694	-0.098438
-0.24694	0.098438
-0.40740	0
-0.60931	0
-0.7730	0
-0.87052	0
-0.96607	0
-1.0602	0

Program 411.

Vlastní hodnoty matice.

Re λ [1/hod.]	Im λ [1/hod.]
-0.10871	0
-0.10596	0
-0.10494	0
-0.10493	0
-0.10428	0
-0.10552	0
-0.10690	0
-0.11303	0
-0.12718	0
-0.23134	0.13490
-0.23134	-0.13490
-0.44464	0
-0.4506	0
-0.57613	0
-0.6965	0
-0.78569	0
-0.86341	0
-0.90445	0
-0.93014	0
-0.99074	0

Tab.4. Srovnání výsledků analytického výpočtu toku s výsledky dosaženými metodou syntézy toku pro jmenovitý ustálený stav.

r [cm]	0	50	91.23	120	141.81	180	210	248.42
Hustota tepelných neutronů. Analytické řešení	1.000	0.998	0.995	0.963	0.871	0.720	0.563	0.425
Hustota tepelných neutronů. Numerické řešení	1.000	0.9982	0.9921	0.9573	0.8641	0.7169	0.5458	0.4253
Hustota rychlých neutronů. Analytické řešení	1.0095	1.0075	0.999	0.964	0.889	0.769	0.590	0.270
Hustota rychlých neutronů. Numerické řešení	1.0095	1.0073	1.0041	0.9705	0.9019	0.7675	0.612	0.2601

Tab.5. Závislost nejdůležitějších vlastních čísel na počtu
diferenčních rovnic - 421U.

Rozdělení poloměru reaktoru	Azimutální vid		Axiální vid	
	β^*	$\beta + i\omega$	β^*	$\beta + i\omega$
1+4	-0,10828	-0,13287+i.0,26196	-0,10753	-0.23606+i.0.13921
1+5	-0,10822	-0,11118+i.0,26354	-0,10753	-0.2316 +i.0,13632
1+6	-0,10562	-0,11101+i.0,26306	-0,10557	-0.23116+i.0,13500
1+7	-0,10544	-0,11356+i.0,26370	-0,10543	-0.23183+i.0,13555
1+8	-0,10522	-0,11657+i.0,26488	-0,10494	-0.23435+i.0,13696
1+9	-0,10429	-0,11743+i.0.26093	-0,10428	-0.23134+i.0,1349

Tab.6. Rozdělení poloměru reaktoru.

Počet bodů	Souřadnice r [cm]
1+4	0,50, 91.23, 147.81, 248.42
1+5	0,50, 91.23, 147.81, 200, 248.42
1+6	0,50, 91.23, 147.81, 180, 200, 248.42
1+7	0,50, 91.23, 120, 147.81, 180, 220, 248.42
1+8	0,30, 60, 91.23, 120, 147.81, 180, 220, 248.42
1+9	0,30, 60, 91.23, 120, 147.81, 170, 200 230, 248.42

**Tab.7. Přehled reálných vlastních čísel
pro různé zatížení - 865 U.**

Zatížení	Azimutální vid		Axiální vid	
	[1/hod]	[1/hod]	[1/hod]	[1/hod]
50%	-0,10382	-0,2000+1.0,080145	-0,10470	-0,18463+1.0,10013
100%	-0,10367	Neexistuje	-0,10464	-0,24668+1.0,099658
150%	-0,10434	Neexistuje	-0,10461	-0,3052 +1.0,050156
200%	-0,10434	Neexistuje	-0,10460	-0,2523+1. 0,01719

**Tab.8. Srovnání vlastních čísel s největší reálnou částí
vypočtených programy 421 U a 865 U.**

Zatížení	Azimutální vid		Axiální vid	
	421U	865U	421U	865U
50%	-0,10438	-0,10470	-0,10440	-0,10470
100%	-0,10429	-0,10435	-0,10428	-0,10464
150%	-0,10479	-0,10434	-0,10425	-0,10461
200%	-0,10425	-0,10434	-0,10423	-0,10460

Tab.9. Přehled nejdůležitějších vlastních hodnot - azimutální vid.

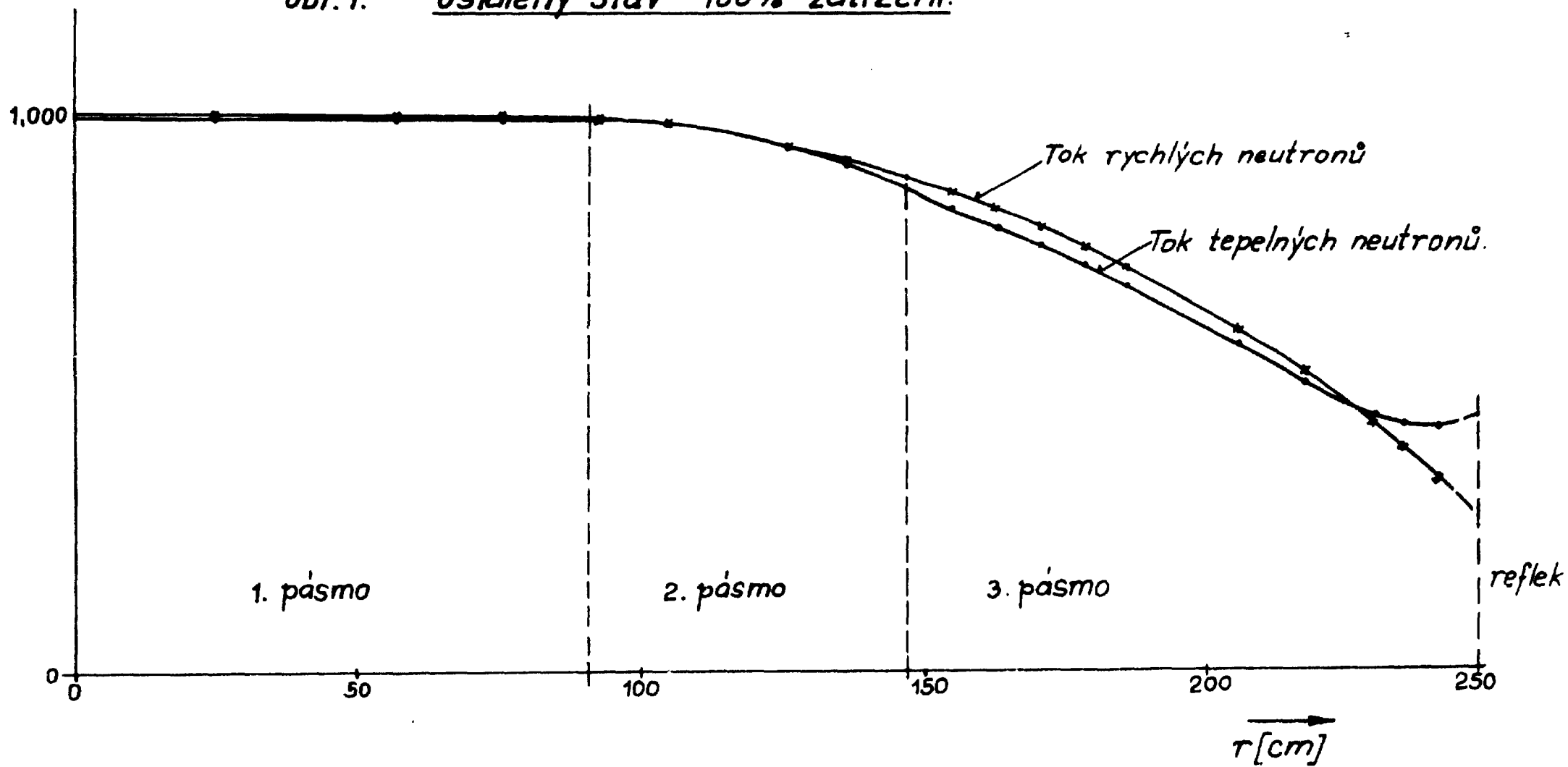
Zetížení:	50%			100%		
	Největší reálná vlastní hodnota β^* [1/hod]	Vlastní hodnota λ s $\text{Im}\lambda \neq 0$ a s největší reálnou částí [1/hod]		Největší reálná vlastní hodnota β^* [1/hod]	Vlastní hodnota λ s $\text{Im}\lambda \neq 0$ a s největší reálnou částí [1/hod]	
α		β	ω		β	ω
0,00	-0,10382	-0,200	0,08014	-0,10367	Neexistuje	
0,01	-0,10381	-0,1965	0,096392	-0,10435	-0,28780	0,04619
0,03	-0,10382	-0,17807	0,13679	-0,10436	-0,2524	0,1546
0,05	Nebylo počítáno			-0,10437	-0,17428	0,25022
0,06	-0,10382	-0,09972	0,21483	-0,10437	-0,099735	0,2938
0,07	-0,10382	-0,031332	0,24226	-0,10438	-0,02943	0,31576
0,08	+61,3	-0,13109	0,18763	Nebylo počítáno		

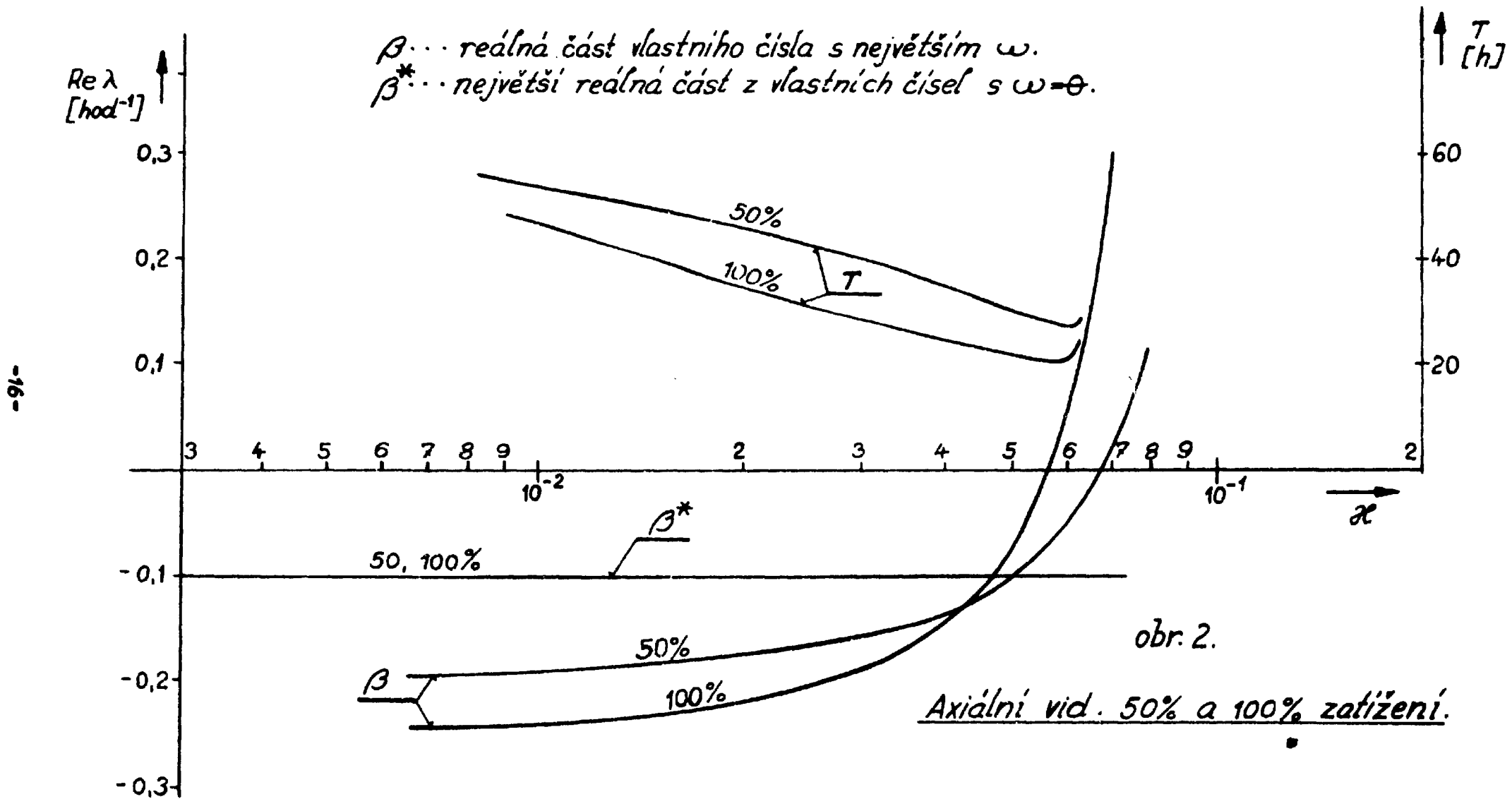
Tab.10. Přehled nejdůležitějších vlastních hodnot - axiální vid.

Zatížení	50%			100%		
	Největší reálná vlastní hodnota β^* [1/hod]	Vlastní hodnota λ $I_{\lambda} \neq 0$ a s největší reálnou částí [1/hod]		Největší reálná vlastní hodnota β^* [1/hod]	Vlastní hodnota λ $I_{\lambda} \neq 0$ a s největší reálnou částí [1/hod]	
α		β	ω		β	ω
0,00	-0,10470	-0,18463	0,10013	-0,10464	-0,24668	0,09966
0,01	-0,10469	-0,18010	0,11664	-	-	-
0,03	-0,10470	-0,15670	0,15759	-0,10464	-0,19327	0,21312
0,05	-0,10471	-0,10195	0,2079	-0,10464	-0,07568	0,29021
0,06	-0,10471	-0,04495	0,23430	-0,10465	+0,04834	0,30364
0,07	+0,0205	-0,11324	0,00336	-0,10465	+0,29986	0,1095

-4-

Obr. 1. Ustálený stav - 100% zatížení.

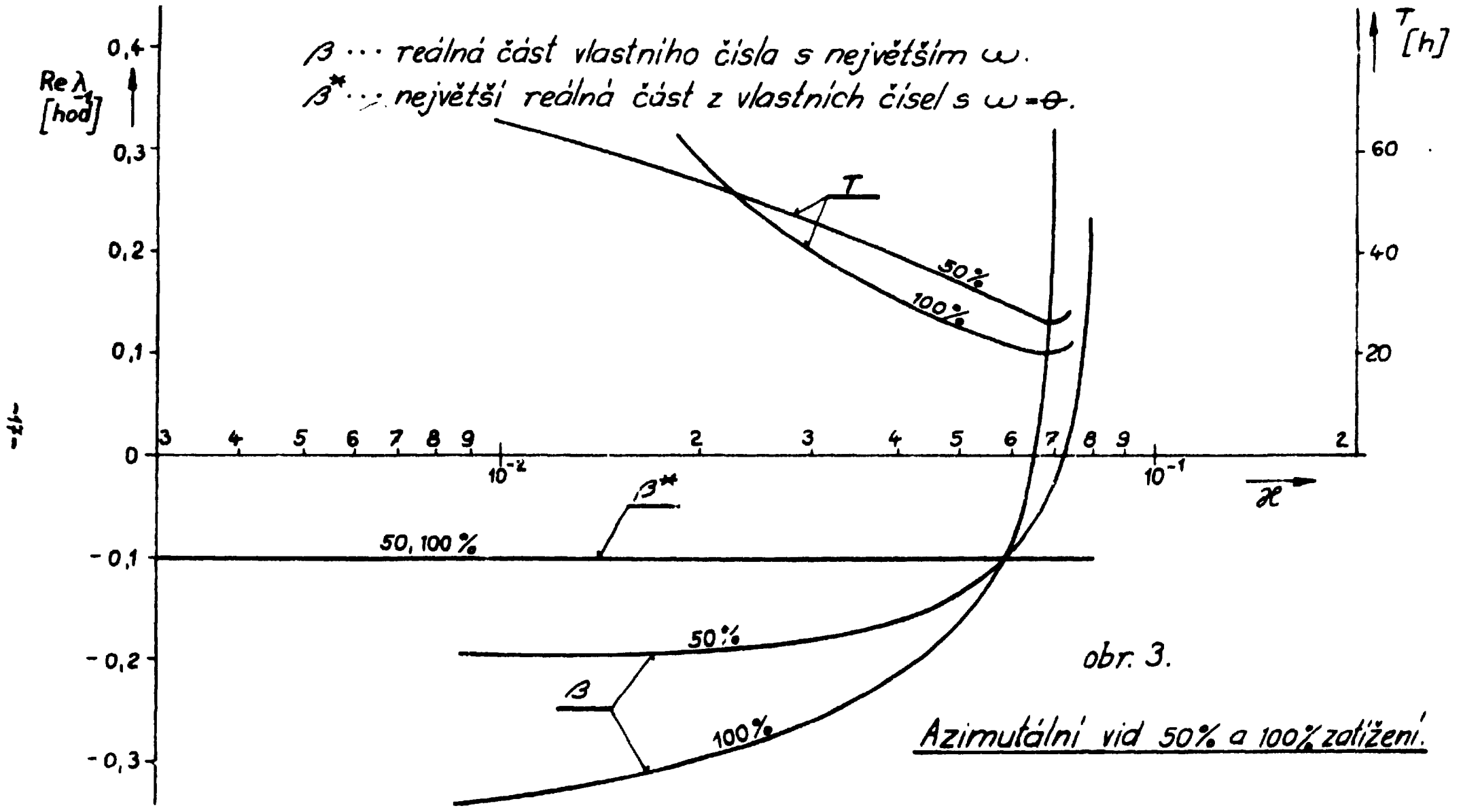




obr. 2.

Axiální vid. 50% a 100% zatížení.

β ... reálná část vlastního čísla s největším ω .
 β^* ... největší reálná část z vlastních čísel s $\omega = \theta$.

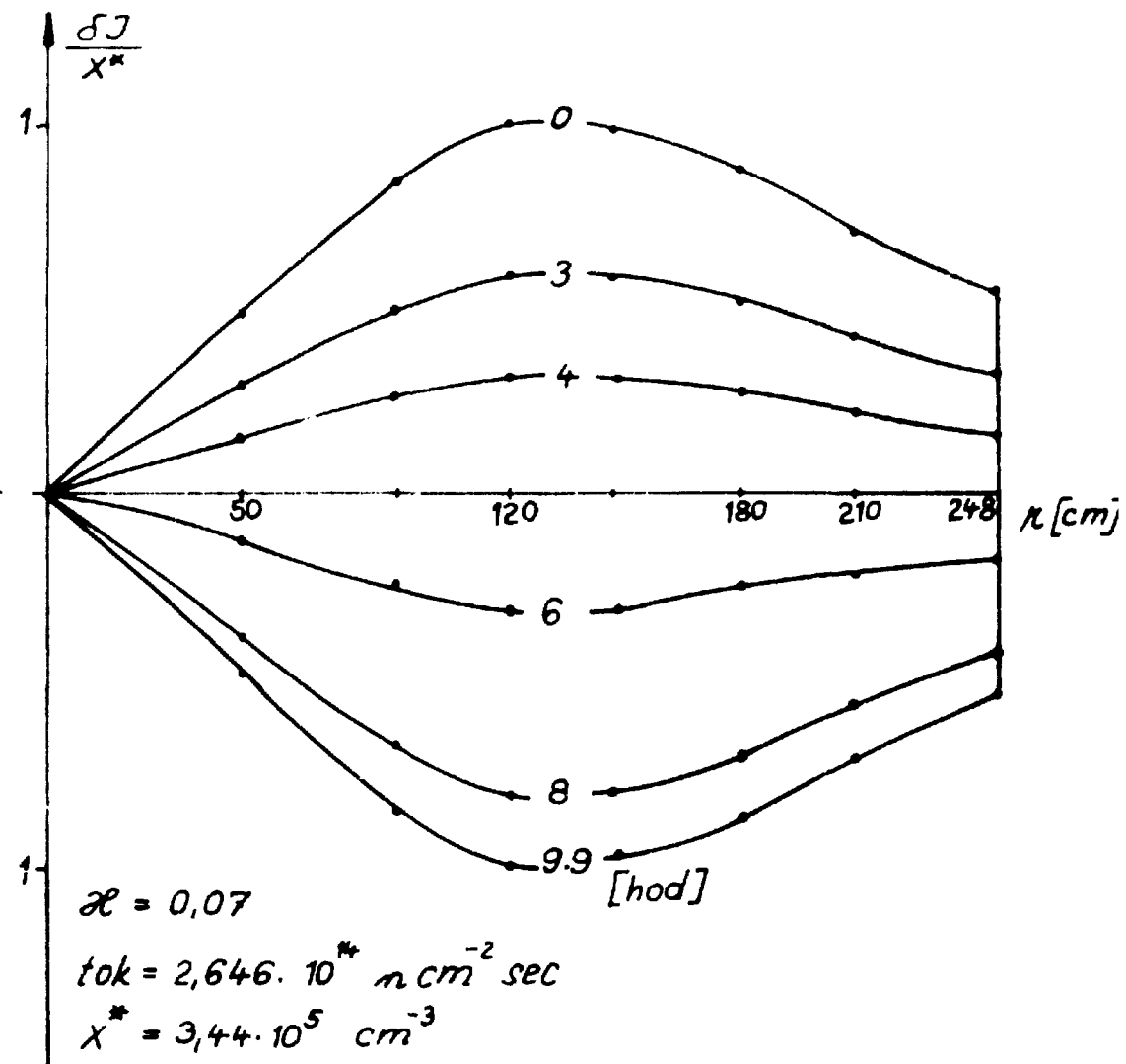
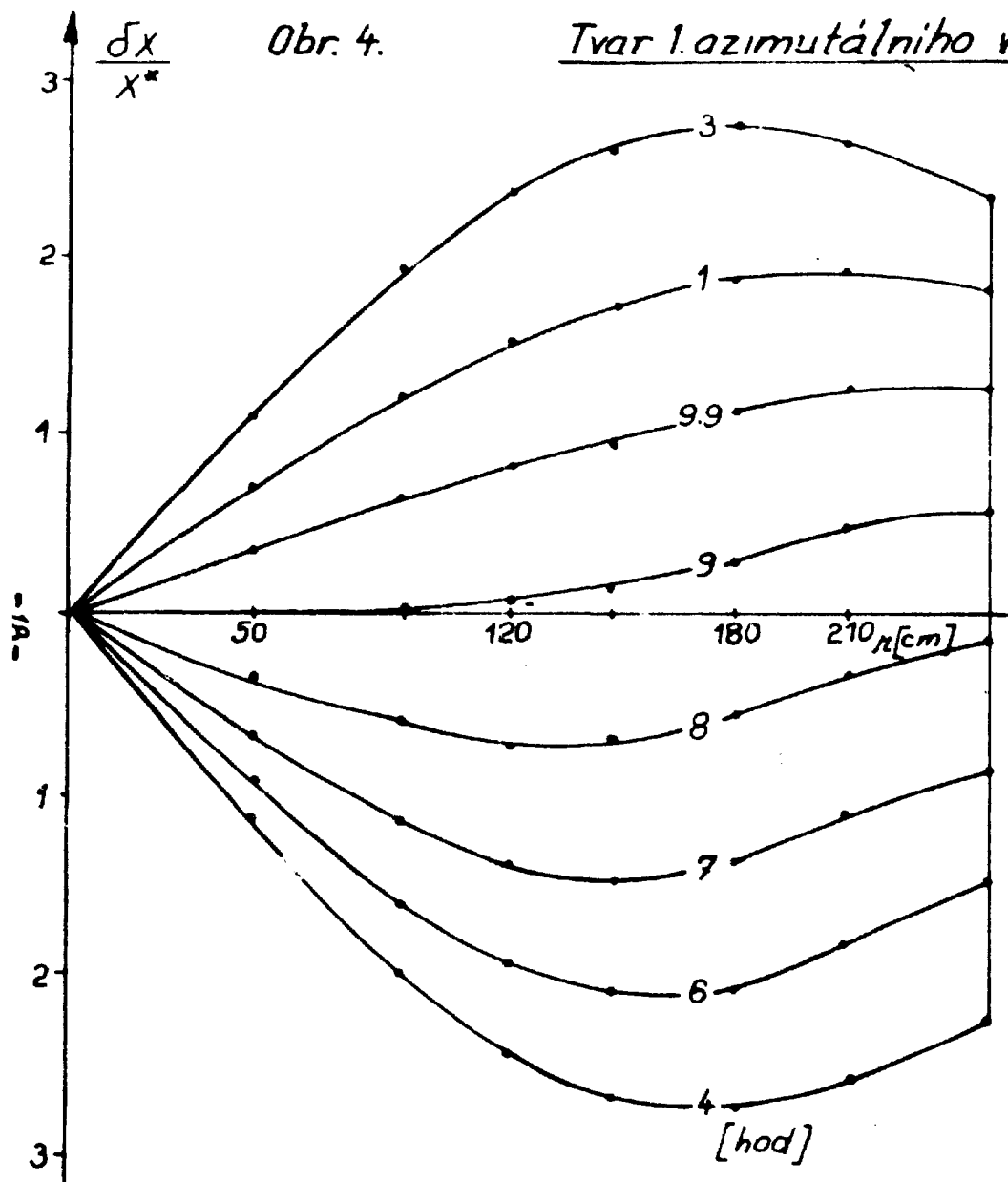


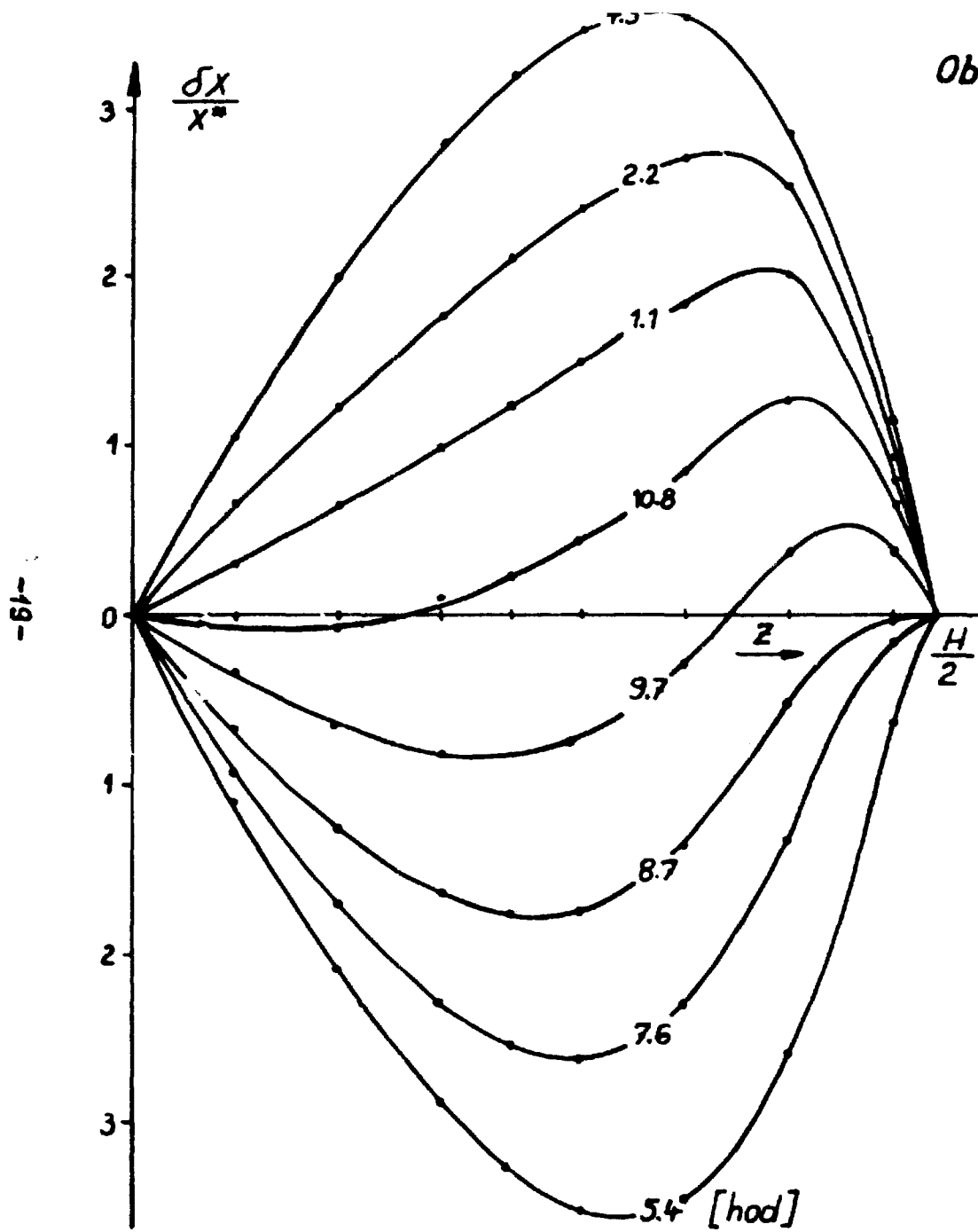
obr. 3.

Azimutální vid 50% a 100% zatížení.

Obr. 4.

Tvar 1. azimutálního vidu





Obr. 5. Tvar 1. axiálního vidu.

