

Ústav fyziky plazmatu ČSAV

L. Bárdoš, J. Ďatlov, V. Kopecký, L. Kryška  
J. Musil, F. Žáček

Experimentální zařízení

TOKAMAK TM-1-MH

Prosinec 1977

Ústavní zpráva 35/77

## Úvod

Tokamak TM-1-MH je experimentální zařízení, určené pro základní výzkum mikrovlnného ohřevu plazmatu v toroidálních nádobách typu Tokamak. Základem zařízení je magnetická nádoba Tokamak TM-1-VČ, předaná z Ústavu atomové energie I.V. Kurchatova v Moskvě do ÚFP ČSAV v květnu 1976 na základě Smlouvy o spolupráci a dělbě práce v oblasti vysokofrekvenčního ohřevu plazmatu, uzavřené mezi ústavu v roce 1974.

Součásti vakuového systému, energetika, ovládání, blokování a diagnostické prvky byly zkonstruovány a zhotoveny v ÚFP ČSAV. Pro účely výzkumu mikrovlnného ohřevu byl změněn systém zavádění vf energie do zařízení. Do lineru byly zabudovány dvě šroubicové struktury pro zpomalování vln.

Zařízení je instalováno v hale Tokamak ÚFP ČSAV v areálu ČSAV na Mazance v Praze 8. Do provozu bylo uvedeno ve spolupráci se sovětskými specialisty v září 1977.

Cílem prací na tomto zařízení, prováděných v rámci státního plánu základního výzkumu I-2-1/1 "Vysokofrekvenční ohřev plazmatu v toroidálních nádobách", je zjištění podmínek účinné absorpce vysokofrekvenčních vln v oblasti mezi dolní hybridní a elektronovou cyklotronovou frekvencí a výzkum možnosti vybuzení toroidálního proudu pomocí vysokofrekvenčních vln /1/.

## 1. Magnetická nádoba Tokamak

Magnetická nádoba je klasickým typem Tokamaku. Má tyto principiální části (obr. 1):

1. Jho transformátoru typu EI z listové oceli. Průřez magnetického obvodu ve střední části je  $1,5 \times 10^5 \text{ mm}^2$ .
2. Plášť, který je vyroben z mědi o síle 20 mm a má tvar toroidu o velkém poloměru 40 cm s dvěma vývody pro napájení vakuových čerpacích jednotek. Vnitřní průměr pláště je 245 mm. Plášť je elektricky rozdělen a to jednak příčně na dvě části, aby nevytvářel závit na krátko a jednak má podélný řez, aby pronikalo magnetické pole. Na povrchu pláště jsou měděné trubky, kterými se při prohřívání lineru pouští chladicí voda. Vakuové těsnění pláště dovoluje dosáhnout vakua lepšího než  $10^{-5}$  Torr.
3. Liner (komora) je zhotoven z vlnovce z nerez oceli o síle 0,2 mm a má stejně jako plášť tvar toroidu s dvěma vývody pro připojení čerpacích jednotek a diagnostických prostředků. Průměr komory je 200/230 mm. Liner je celosvařovaný s výjimkou teflonových těsnění na diagnostických přírubách. Liner se nachází uvnitř pláště a je od něho elektricky izolován. Vakuové těsnění lineru dovoluje dosáhnout vakua lepšího než  $10^{-6}$  Torr.
4. Cívky pro vytváření magnetického pole  $H_0$  jsou v počtu 28 rozmístěny rovnoměrně po obvodu pláště. Každá cívka je v hliníkovém plášti a má 8 závitů z měděného pasu  $30 \times 3 \text{ mm}^2$ . Cívky jsou spojeny do serie.

5. Závity vytvářející magnetické pole  $H_z$  (dynamická kompensace) jsou v počtu 4 uloženy izolovaně mezi linerem a pláštěm podél toroidu a jsou upevněny k vnitřnímu povrchu pláště. Jsou propojeny do serie s cívkami pro vytváření elektrického pole  $E_0$ .

6. Závity vytvářející horizontální a vertikální kompen-  
sační pole  $H_h$  a  $H_v$  (kontinuální kompensace) jsou umístěny podél toroidu na čtyřech stranách pláští cívek. Jejich zapojení je uvedeno na obr. 2.

7. Cívky pro vytváření elektrického pole  $E_0$  jsou rozmís-  
těny rovnoměrně po jhu transformátoru. Mají 12 sekcí po 4 zá-  
vitech, zhotovených z měděného pásku  $20 \times 2 \text{ mm}^2$ . Propojení sekcí  
je patrné z obr. 1.

8. Cívky pro indukční ohřev lineru se skládají ze dvou  
sekcí po 12 závitech spojených paralelně. Jsou zhotoveny z ka-  
belu o průřezu  $50 \text{ mm}^2$ .

9. Clona vymezuje příčný rozměr plazmatu a je umístěna  
uvnitř lineru izolovaně od jeho povrchu v místech mezi cívka-  
mi č. 12 a 13. Clona je zhotovena z molibdenového plechu.

10. Tryska. Pro vytváření primárního plazmatu a tím usnad-  
nění průrazu pracovního plynu se používá jednoduchá elektrono-  
vá tryska - přímo žhavené wolframové vlákno umístěné ve stínu  
vymezující clony. Vlákno má záporný potenciál vůči lineru.

## 2. Vakuový systém

System čerpání Tokamaku tvoří dvě nezávislé části:

- a) čerpací systém lineru,
- b) čerpací systém pláště.

Konstrukce uvedených systémů je navržena tak, aby bylo možno dosáhnout v lineru vakuum lepší než  $10^{-6}$  Torr a v plášti lepší než  $10^{-5}$  Torr. System pro čerpání lineru je proto sestaven z vypékateľných vakuových součástí. Zapínání difuzních vývěv dvou systémů je možné pouze po otevření vodního chlazení vývěv (automatické blokování).

Celý čerpací systém je elektricky izolován od komory Tokamaku soustavou keramických a teflonových izolátorů. Kromě elektrické izolace jsou použity rovněž toubakové vložky (izolace mechanických otřesů). Schéma vakuového systému je uvedeno na obr. 3.

### 2.1 Čerpací systém lineru

Předvakuum (lepší než  $10^{-2}$  Torr) je vytvořeno rotační vývěvou RV1 ( $25 \text{ m}^3/\text{hod}$ ) a přes elektromagnetický průchozí ventil P1 je rozváděno ke dvěma difuzním vývěvám DV1 a DV2 ( $2000 \text{ l/s}$ ), blokováným průchozími elektromagnetickými ventily B1 a B2. Napouštěcí ventil N1 rotační vývěvy RV1 se zavírá automaticky při spuštění vývěvy. Po vypnutí vývěvy se N1 automaticky otevře.

Předčerpávané difuzní vývěvy DV1 a DV2 jsou spojeny s linerem přes kovové vypékateľné mechanické ventily K1 a K2. Pro odstranění vlivu nečistot jsou použity dvojice vymrazovaček

V1, V2 a V3, V4. Čerpání je od lineru odizolováno keramickými izolátory I1 a I2.

Pro přímé předčerpávání lineru rotační vývěvou RV1 je zapojena odbočka s kovovým ventilem K3 a vymrazovačkou V5. Pro umožnění spojení předvakuového systému lineru a pláště je zařazen mechanický spojovací ventil SV.

Měření úrovně předvákua je umožněno měrkami M1 nebo M2 (termočláanky) pro měření vysokého vakua jednotlivých vývěv DV1 a DV2 slouží měrky M4 a M5 (triody).

Napouštění lineru pracovním plynem (zpravidla  $H_2$ ) je prováděno z rezervoáru R, po otevření ventilu NV. Měrkou M7 se měří tlak v lineru. Ovládání rychlosti napouštění plynu, tedy také tlaku v lineru, je zabudováno přímo v rezervoáru R. V případě vodíku je použit niklový filtr, ohřivaný odporově, který se zvyšováním teploty propouští větší množství vodíku. Pro budoucnost se počítá se složitějším systémem umožňujícím impulzní napouštění.

## 2.2 Čerpací systém pláště

Předvakuum pláště je vytvářeno rotační vývěvou RV2 ( $25 \text{ m}^3/\text{hod}$ ), přes elektromagnetický průchozí ventil P2. Difuzní vývěva DV3 ( $2000 \text{ l/s}$ ) je od předvákua oddělována elektromagnetickým ventilem B3. Úroveň předvákua je měřena měrkou M3 (termočlánek). Difuzní vývěva DV3 je s pláštěm propojena přes velký deskový ventil VD (ovládaný elektromotorem), vymrazovačku V6 a izolátor I3. Úroveň vakua v plášti je měřeno triodovou měrkou M6.

Pro umožnění přímého předčerpání pláště pouze rotační vývěvou RV2 je zařazena spojka s mechanickým ventilem SK a izolátorem I4.

### 2.3 Obvyklý postup čerpání

Ovládání čerpacího systému je vyvedeno na panelu, umístěném na vakuovém stojanu 3, viz obr. 4. Není-li přestávka od posledního čerpání větší než týden, vakuum v plášti nebývá horší než  $10^{-1}$  Torr a v lineru cca  $10^{-2}$  Torr. V tomto případě je obvyklý následující postup čerpání:

1. Všechny ventily jsou zavřené, kromě napouštěcích ventilů rotaček N1 a N2 (před spuštěním jsou vždy otevřené).
2. Zapnout motory rotaček RV1 a RV2, ventily N1 a N2 se přitom zavírají automaticky.
3. Otevřít ventily P1 a P2 - otevírají se elektromagneticky. Na měrkách M1 (nebo M2) a M3 sledovat dosažení předvakua alespoň  $10^{-1}$  Torr (asi 15 dílků na měř. přístroji).
4. Otevřít ventily B1, B2, B3 a po dosažení předvakua lepšího než  $10^{-1}$  Torr otevřít také deskový ventil pláště VD.
5. Zapojit vytápění difuzních vývěv DV1, DV2 a DV3. Zapojení je možné pouze po otevření chladicího vodního okruhu vývěv.
6. Zalít vymrazovačky V1, V2, V3 a V4 tekutým dusíkem.
7. Po dosažení vakua řádu alespoň  $10^{-5}$  Torr na měrkách M4, M5 a M6 otevřít kovové ventily K1 a K2. Při čerpání lineru lze použít jenom jednu difuzní vývěvu DV1 nebo DV2 (obvykle s lepším vakuem). Přitom se otevírá jeden z příslušných ventilů K1 nebo K2.

8. Úroveň vakua v lineru se měří měrkou M7, v plášti M6.

Při vypínání čerpání se postupuje obráceně s tím, že ventily B1, B2 a B3 se vypínají až po ochlazení vývěv DV1, DV2 a DV3, tj. zhruba po hodině od vypnutí topných těles.

#### 2.4 Postup při některých haváriích

A. Vypadnutí sítě. Při vypadnutí napětí v síti se automaticky zavírají ventily B1, B2, B3, P1, P2 a otevírají se napouštěcí ventily N1 a N2. Tím se vysokovakuový systém automaticky oddělí od předvakua a napustí se rotační vývěvy RV1 a RV2.

Pokud by došlo k opětovnému zapojení sítě, došlo by k napuštění celého systému vzduchem, možnému poškození oleje difuzních vývěv a znečištění komory Tokamaku. Motory rotačních vývěv a topení difuzních vývěv se po zapojení sítě nezapínají automaticky.

Je nutné: okamžitě po vypnutí sítě vypnout vypínač B1, B2 a P1, P2, dále vypínač B3 a P2. Po zapnutí sítě se pak postupuje stejně jako při zapínání čerpání.

B. Průraz lineru. Při eventuelním průrazu lineru dojde ke spojení s vakuovým obvodem pláště. Za normálních okolností je vakuum v plášti natolik dobré, že ke značnému zhoršení vakua lineru nemůže dojít.

Při větších haváriích, kdy by eventuelně došlo ke vzniku velkých trhlin lineru je nutné: okamžitě zavřít ventily K1 a K2, pak VD a ukončit čerpání obvyklým postupem. Oprava vyžaduje rozebrání celého systému komor Tokamaku.



C. Poškození vakuových stojanů. Při poškození a poklesu vakua v kterémkoli vakuovém stojanu může dojít ke znečištění komor Tokamaku.

Je nutné: neprodleně uzavřít oddělovací ventily mezi stojanem a komorou, tj. K1 nebo K2, u pláště VD.

## 2.5 Vypékání vakuového systému

Pro dosažení co nejlepšího vakua a dobré čistoty lineru je vysokovakuová část čerpacího systému lineru opatřena soustavou pro ohřev stěn. Je známo, že ohřátí stěn vakuové komory způsobuje uvolňování zbytkových absorbovaných plynů a částečně také pevných částecí. Při soustavném odčerpávání vývěvou se může zlepšit až o řád. Nejvyšší teplota ohřevu závisí pouze na použitých konstrukčních materiálech vakuového systému.

Pro daný případ je:

komora lineru:	max. 350°C	norm. 300°C
vakuové stojany:	max. 300°C	norm. 200-250°C
přívody a spoje:	max. 300°C	norm. 150°C

Teploty stěn se měří termočlánky chromnikl-konstantan v nejnebezpečnějších (z hlediska poškození) bodech, zejména v blízkosti přírub.

Systém vypékání je ovládán ze společného pultu, kde je vyvedena rovněž indikace příslušných teplot. Schéma vypékacího systému je na obr. 5.

Ohřev komory lineru je prováděn indukčním způsobem, tj. pomocí transformátoru Tokamaku, kde do primárního vinutí je přiváděn proud cca 300 A (asi 150 V, 50 Hz) a sekundární vinutí

je vlastně jediný závit tvořený komorou lineru. Regulace proudů primárního vinutí je prováděna indukčním měničem (boosterem). Příslušná místa na plášti jsou přitom chlazena průtokem vody, aby nedošlo k poškození těsnění pláště a přívodů diagnostiky. Bez tohoto chlazení se vypékání lineru nesmí provádět.

Ohřev vakuových stojanů je prováděn soustavou odporových spirál navinutých na povrchu stěn. Příruba nejbližší k difuzní vývěvě je chlazena vodou (gumové těsnění), zatímco ostatní příruby lze ohřát na cca  $400^{\circ}\text{C}$  (měděná těsnění). Spirály jsou spojeny v systému ovládaném společně vstupním autotransformátorem (třífázový, každá fáze 20 A), pro každý stojna zvlášť. Autotransformátory jsou mimo pult vypékání.

Ohřev přívodních trubíc a ventilů je prováděn rovněž odporovými spirálami, jejichž proud je ovládán příslušnými autotransformátory s vyvedením detekce proudů. Autotransformátory i příslušné ampérmetry jsou vyvedeny na pultu vypékání. Normální úroveň proudu do jednotlivých spirál je kolem 5 až 6 A.

Rozmístění odporových spirál na stojanech a přívodech, spolu s vyznačením měřených bodů je zobrazen na schématu nad pultem vypékání.

### 3. Energetické zdroje

#### 3.1 Kondenzátorová baterie

Při návrhu kondenzátorové baterie pro experimentální zařízení Tokamak TM-1, byly vzaty za základ parametry baterie používané v ústavu I.V. Kurčatova. Celková kapacita této kondenzátorové baterie je 0,18 F (1200 ks kondenzátorů s kapacitou 150 uF). Baterie pro provoz zařízení TM-1-VČ byla nabíjena maximálně na napětí 2 kV. Energie baterie byla tedy

$$\frac{1}{2} CU^2 = 360 \text{ kJ} \quad (3.1)$$

Jako stavební prvek projektované kondenzátorové baterie byl zvolen rázový kondenzátor 450 uF/2 kV (RTAJ 1-2/450, ZEZ Žamberk). Podle našich kontrolních měření parametry těchto kondenzátorů zcela vyhovují požadavkům kladených na ně při provozu kondenzátorové baterie. K dosažení potřebné kapacity je zapotřebí 400 ks uvažovaných kondenzátorů. Z konstrukčního hlediska i z hlediska minimálního zatížení jednotlivých spínacích prvků, je kondenzátorová baterie rozdělena na 12 nezávislých sekcí (8 sekcí po 33 kondenzátorech, 4 sekce po 34 kondenzátorech). Blokové zapojení je znázorněno na obr. 6. ; výhodou tohoto řešení je ta skutečnost, že každým ze spínacích prvků jednotlivých sekcí může procházet maximální proud

$$I_M = \frac{1}{12} \sqrt{\frac{C}{L}} U_B = 1346 \text{ A} \quad (3.2)$$

kde  $U_B$  je napětí kondenzátorové baterie ( $U_B = 2000 \text{ V}$ )

$C$  je kapacita celé baterie ( $C = 0,18 \text{ F}$ )

$L$  indukčnost vinutí ( $L = 2,76 \text{ mH}$ )

Naproti tomu, při jednoduchém paralelním řazení (tj. všechny kondenzátory v baterii jsou spojeny paralelně a spínány paralelní kombinací spínacích prvků) by mohl nastat havarijný případ, že sepne pouze jeden spínací prvek, kterým může pak procházet proud

$$I_M = \sqrt{\frac{C}{L}} U_B = 16,15 \text{ kA} \quad (3.3)$$

To znamená, že v tomto případě by musel být každý ze spínacích prvků dimensován na maximální proud, který může dát kondenzátorová baterie do předpokládané zátěže (vinutí cívek).

#### Generování proudového impulsu

Připojením kondenzátorové baterie k induktivní zátěži (vinutí cívek) vznikne oscilační obvod, jehož základní parametry jsou určeny kapacitou  $C$  kondenzátorové baterie, indukčností vinutí  $L$  a seriovým odporem  $R$ . Pro výše uvedené hodnoty  $L$  a  $C$  bude délka periody  $T \approx 140 \text{ ms}$  ( $f = 7 \text{ Hz}$ ). Příslušné průběhy proudů a napětí během první půlperiody jsou znázorněny na obr. 7. Pro jednoduchost zde předpokládáme  $R = 0$  (odpor vedení a vinutí). Na skutečné velikosti tohoto odporu pak bude záležet do jaké míry budou kmity tlumené. Při vlastním provozu s experimentálním zařízením Tokamak TM-1-MH bude periodický (sinusový) průběh proudového impulsu.

Vzhledem k tomu, že při provozu se využívá proudového impulsu pouze v první půlperiodě, je žádoucí s ohledem na zahřívání vinutí, odpojit kondenzátorovou baterii od zátěže po

ukončení první púlperiody, tj. při průchodu proudy nulou.

### Spínací prvek

Na místě vlastního spínacího prvku byl použit tyristor T400 typ 223. Výrobce ČKD Praha, závod polovodiče uvádí pro tento typ tyristoru maximální provozní napětí 3 kV. Při zatížení konstantním stejnosměrným blokovacím nebo závěrným napětím je nutno snížit uvedenou hodnotu o 60%. Tento stav nastává vždy při nabíjení kondenzátorové baterie. To znamená, že uvedený typ tyristoru vyhoví pro provozní napětí baterie  $U_B = 2$  kV, ale nelze s tímto typem počítat do budoucna při případném zvýšení napětí  $U_B$ . Bližší údaje týkající se vlastního spínání baterie pomocí tyristorů jsou uvedeny v příloze I a v práci /2/.

### Bezpečnostní a jisticí obvody kondenzátorové baterie

Bezpečnost pracovníků proti nežádoucímu vstupu do prostoru kondenzátorové baterie a k vlastnímu zařízení je jištěna bezpečnostními dveřními kontakty. Je tak zajištěno, že při vstupu nepovolané osoby do uvedených prostor nastane automatické vybití kondenzátorové baterie.

Vlastní kond. baterie je proti havarijním stavu jištěna jednak časovou ochranou, jednak přepětovou ochranou. Funkce jednotlivých ochran je popsána dále v rámci popisu funkce ovládacího pulsu. Podrobné zapojení jak bezpečnostních a jisticích obvodů, tak vlastního ovládání kond. baterie je uvedeno v příloze II.

### 3.2 Tvarovací LC-linky

Zapojení LC linek pro tvarování impulzu pro vybuzení pole  $E_0$ , stejně jako bezpečnostních a jisticích obvodů je původní /3/. Pouze ovládací povely pro provoz jsou odvozeny automaticky od obvodů kondenzátorové baterie. Je ovšem možný i provoz samostatný, ale tento se předpokládá pouze za účelem kontroly.

Vzhledem k tomu, že ve vlastních LC linkách byly použity nové cívky, jsou na obr. 8 uvedeny i hodnoty indukčností. Propojení bezpečnostních a jisticích obvodů LC-linek s analogickými obvody kondenzátorové baterie je rovněž uvedeno v příloze II. Na tomto místě je nutné podotknout, že jak jednotlivé sekce kondenzátorové baterie, tak LC-linky jsou, v souladu s bezpečnostními předpisy, vybaveny mechanickými spinači, které zkratují baterii a LC linky, pokud tyto nejsou právě v provozu.

### 3.3 Zdroje pro kompenzační vinutí a trysku

Nedílnou částí energetického systému zařízení Tokamak jsou dva zdroje pro kompenzační vinutí a jeden zdroj pro trysku. Provoz uvedených zdrojů je automaticky svázán s provozem kondenzátorové baterie a LC-linek. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o stejnosměrné zdroje není nutné na tomto místě podrobně vysvětlovat jejich funkci. Zapojení zdrojů jsou uvedena v příloze II.

#### 4. Ovládací pult zařízení Tokamak

Z hlediska provozu kondenzátorové baterie a LC-linek jsou podstatnou částí ovládacího pultu tři panely. Jedná se o panel sloužící k ovládání kondenzátorové baterie, dále o panel pomocí něhož se ovládají LC-linky a konečně o generátor spouštěcích impulzů s možností vzájemného posuvu v čase. Provoz kondenzátorové baterie a LC-linek může být automatický nebo manuální. Pod pojmem automatický provoz se zde rozumí, že funkce obvodů ovládajících LC-linky jsou odvozeny od funkcí obvodů ovládajících kondenzátorovou baterii. Při provozu manuálním je možno nezávisle ovládat provoz kondenzátorové baterie a LC linek.

Jednotlivé funkční bloky jsou ovládány příslušnými tlačítky. Aby byla zaručena správná následnost funkcí jednotlivých bloků, je každý následující povel (stisknutí tlačítka) vázán na to, zda byla splněna předcházející podmínka (povel). Bez splnění této podmínky nelze dále pokračovat v provozu baterie a LC-linek. Jednotlivé funkční kroky a povelů jsou světelně indikovány na příslušných panelech.

Dále jsou popsány funkce jednotlivých bloků při automatickém provozu v závislosti na časovém průběhu jednotlivých povelů. Činnost je možno sledovat na blokovém zapojení na obr. 9. Názvy ovládacích povelů jsou zde uvedeny v shodě s nápisy na ovládacím pultu.

"Síť". Do obou panelů (označených 01 a 02) se přivede napětí pro ovládání relé, stykačů, pomocných zdrojů a světelné signalizace.

"OVLÁDÁNÍ". Příprava k činnosti jednotlivých funkčních bloků. Tento povel je závislý na stavu bezpečnostních dveřních kontaktů.

"ODPOJENÍ ZKRATU". Rozpojení vybíjecích spínačů na jednotlivých sekcích kondenzátorové baterie a na obou LC-linkách. Rozpojení zkratu může nastat jen tehdy, jsou-li všechny bezpečnostní dveřní kontakty sepnuty.

"VN START". Zapnutí nabíjecích zdrojů kond. baterie a LC-linek. Nabíjení může být zahájeno pouze v tom případě, jestliže jsou všechny mechanické a elektromagnetické spínače zkratující kond. baterii a LC linky rozepnuty. Průběh nabíjení kond. baterie je možno sledovat na ampérmetru M1, kontaktním voltmetru M2 a na voltmetru M3 (měří napětí pouze na sekci č.2). Podobně voltmetry M4 a M5 je možno sledovat průběh nabíjení LC-linek. Po dosažení napětí asi 1600 V na kond. baterii objeví se na výstupech bloků "nabití na 80%" (jsou zapojeny ve všech sekcích kond. baterie) signály, které jsou přivedeny do bloku "časová ochrana I". Tento stav je též světelně indikován. Pokud od tohoto okamžiku není uskutečněn výstřel do 3 minut, pak se automaticky vypne nabíjecí zdroj a jednotlivé sekce se vybití do vybíjecích odporů. Podobně tomu tak bude i u LC-linek. V případě, že napětí na některé ze sekcí nedosáhne výše uvedené velikosti je z bloku "časová ochrana I" přiveden blokovací signál do bloku "generátor spouště" impulzů. V tomto případě je tak blokováno sepnutí tyristorů a vybití baterie a LC-linek se provede ručně povel "STOP ODPOJ".

"VN STOP". Tento povel umožňuje v jakémkoliv okamžiku přerušit nabíjení.



"STOP ODPOJ". Stejně jako předešlý povel je i tento pouze pomocný. Umožňuje kdykoliv vypnout nabíjecí zdroje a vybití kond. baterii a LC linky do vybíjecích odporů.

Po dosažení předem zvolených napětí na kond. baterii a LC linkách (nastavuje se jednak pomocí kontaktního voltmetru v případě kond. baterie, jednak pomocí potenciometrů /ARIPOTŮ, v případě LC-linek) uvede signál z odporového děliče  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  v činnost blok "porovnávací obvod". Výstupní signál z tohoto bloku je povel pro vypnutí nabíjecího zdroje a rozepnutí spinačů  $S_4$ ,  $S_5$ . Podobně tomu tak bude i u LC-linek. Po rozepnutí spinačů  $S_4$ ,  $S_5$  je napětí na kond. baterii signalizováno již pouze voltmetrem M3.

"PŘÍPRAVA STARTU". Po realizaci tohoto povelu se připraví k činnosti spouštěcí obvody tyristorů a ignitronů. Pokud by tento povel byl vynechán, potom nelze přivést z bloku "generátor spoušť, imp." spouštěcí impuls k řídicím elektrodám tyristorů. Zároveň s tímto povellem je uveden v činnost blok "časová ochrana II". Pokud nebude vyslán do 20 sekund spouštěcí impuls pro výstřel Tokamaku, potom díky funkci bloku "časová ochrana II" a "ovládání vybíjecího spinače" nastane automatické vybití baterie a LC-linek.

"START". Tímto povellem je přiveden spouštěcí impuls z bloku "generátor spoušť, imp." jednak do bloku "tvarovací obvod", jednak do dvou nezávislých bloků "zpožďovací obvod". Z těchto bloků jsou pak přivedeny spouštěcí impulsy k řídicím elektrodám tyristorů a ignitronů.

Vzhledem k indukčnímu charakteru zátěže přebíjí se jak kond. baterie, tak LC linky záporně. Toto napětí je automaticky vybito do vybíjecích odporů v souladu činností bloku "časová ochrana II" (viz povel "PŘÍPRAVA STARTU"). Výstupní signál z tohoto bloku je pak přiveden do bloku "zpoždovací obvod". V důsledku toho je asi 30 sekund po automatickém vybití baterie a LC linek jsou připojeny automaticky nabíjecí zdroje (spínače S4, S5 u kond. baterie) a pracovní cyklus může znovu pokračovat.

Aby nenastala havarijní situace, že by nabíjení po dosažení zvolené hodnoty nebylo přerušeno je v ovládacích obvodech kondenzátorové baterie a LC-linek zapojen blok "přepěťové ochrany". Tento blok je v případě kondenzátorové baterie ovládán napětím z odporového děliče  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ . Pokud bude na uvedeném děliči napětí vyšší než asi 2,5 kV, potom díky činnosti bloku "přepěťová ochrana" nastane vypnutí nabíjecího zdroje a rozepnutí spínačů S4, S5. Zcela analogicky je tomu tak i v případě LC-linek.

Jak bylo již dříve uvedeno, funkce zdrojů pro kompenzační vinutí a pro trysku jsou odvozeny od povelů na ovládacím panelu. Při povelu "VN START" se zapne VN zdroj pro trysku. Zdroj pro žhavení trysky se zapíná automaticky signálem "NABÍJENÍ SKONČENO". Při povelu "PŘÍPRAVA STARTU" jsou pak uvedeny v činnost zdroje pro kompenzační vinutí. Tyto zdroje se automaticky vypnou synchronně s vybitím, na obrácenou polaritu nabitým kond. baterie a LC-linek. Funkci uvedených zdrojů je možné kontrolovat na příslušných měřicích přístrojích v ovládacím panelu.

## 5. Vysokofrekvenční ohřev plazmatu

Vysokofrekvenční ohřev plazmatu v Tokamaku TM-1-MH se bude provádět na frekvenci splňující podmínku  $\omega_{LH} < \omega < \omega_{ce}$ , kde  $\omega_{LH}$  je dolní hybridní frekvence,  $\omega_{ce}$  je elektronová cyklotronová frekvence. To znamená, že plasma se bude ohřívat nad dolní hybridní resonancí. Experiment je navržen tak, že v plazmatu se budou budit zpomalené vlny ve směru toroidálního magnetického pole. Předpokládá se, že takto zpomalené vlny jejichž fázová rychlost  $v_\phi$  bude srovnatelná s tepelnou rychlostí elektronů  $v_{Te} \approx v_\phi$  budou interagovat s plazmatem a v důsledku jejich Landanova útlumu na elektronech budou předávat svou energii elektronům plazmatu. Tento způsob ohřevu je perspektivní pro ohřev plazmatu ve velkých toroidálních zařízeních. Zde doba termalizace plazmatu je kratší než doba udržení a to umožní, aby energie dodaná elektronům se srážkami předala iontům a tím ohřála i iontovou komponentu plazmatu. Navíc se dá očekávat, že na rozdíl od ohřevu na dolní hybridní resonanci  $\omega = \omega_{LH}$ , který vede převážně k ohřevu periferie plazmatického sloupce, při ohřevu na frekvenci  $\omega > \omega_{LH}$  zpomalené vlny budou pronikat do celého objemu plazmatu.

### 5.1 Zpomalovací struktura

Zpomalené vlny se v Tokamaku budou budit pomocí šroubovicových zpomalovacích struktur vložených do lineru. V lineru Tokamaku jsou uloženy dvě šroubovice (viz obr. 10) následujícího provedení a rozměrů.

Šroubovice je tvořena bowdenem o průměru 3,4 mm vloženém v křemenné šroubovici vytvořené z křemenné trubičky o průměru  $\phi$  8/6 mm. Šroubovice takto vytvořená má vnitřní průměr  $\phi_i = 160$  mm a vnější průměr  $\phi_e = 177$  mm, viz obr. 11. Jelikož clona vymežující průřez plazmatického prstence má ve vertikálním směru otvor o rozměru 150 mm a v horizontálním směru otvor o rozměru 160 mm vložená šroubovice leží ve stínu clony a nejsou tedy v přímém kontaktu s prstencem horkého plazmatu.

Šroubovice jsou napájeny koaxiálně a koaxiální vstupy jsou umístěny symetricky kolem vertikální osy procházející příčným řezem lineru, viz obr. 12. Šroubovice jsou označeny jako vnitřní, a vnější, viz obr. 10. Vnitřní šroubovice je pravotočivá ve směru kladné osy  $\odot$  a její krok na vnitřní straně lineru je  $p = 11$  mm. Vnější šroubovice je směrem od koaxiálního vstupu vinuta proti směru kladné osy  $\odot$  a v tomto směru je opět pravotočivá. Vnější šroubovice má na vnitřní straně lineru krok  $p = 20$  mm. Konce obou šroubovic jsou vakuově těsně zapojeny.

Konstrukce koaxiálního vstupu je detailně uvedena na obr. 13. Křemenná šroubovice je prodloužena až do koaxiálního vstupu. Použitý koaxiál má střední vodič o průměru 8,7 mm a vnitřní průměr sousého válce 20 mm. Šroubovice zasahující do tohoto válce je rozšířena tak, že její vnější průměr je 20 mm, viz obr. 12. Přítomnost křemenného skla v koaxiálu se respektuje zmenšením středního vodiče koaxiálu na průměr 6,6 mm. V tomto koaxiálním vstupu křemenná trubice je utěsněna gumovým těsněním. Tato konstrukce umožňuje přivést šroubovici do lineru na atmosferickém tlaku. Takové provedení má zásadní význam pro zavedení mikro-

vlnného výkonu až do šroubovice bez průrazů na vstupu středního vodiče koaxiálu do lineru, tj. v prostoru stínu clony. Uvedená konstrukce umožňuje velmi jednoduchou úpravou udělat v křemenné šroubovici přetlak nebo naopak tento prostor vyčerpat a tím zvýšit průraznou pevnost a zabránit nežádoucím průrazům /5/.

Mikrovlnný ohřev se bude provádět na frekvenci  $f = 1,25$  GHz s impulzy dlouhými 0,5 - 1 msec o výkonu 50 - 100 kW. Mikrovlnný výkon se do šroubovice přivádí pomocí vlnododové trasy zakončené přechodem na koaxiál.

## 5.2 Vlnovodová trasa (pro $\lambda = 24$ cm)

Generátorem vf výkonu je magnetron Tesla-VUVET typu 70 SA 51, který je schopen v trvalém provozu generovat vf výkon na kmitočtu cca 1250 MHz. V provozu s impulzy o délce cca 1 msec a s činitelem plnění  $10^{-2} - 10^{-3}$  je schopen dát 30 - 40 kW vf výkonu v impulzu /6/. Magnetron pracuje v II -vidu, nejbližší rušivý vid je frekvenčně vzdálen 30% a dle údajů /6/ jej lze provozovat až do 12 kV, 6 A bez dosažení rušivého vedlejšího vidu.

Jelikož katoda při impulzním provozu je podstatně méně přiřhávána zpětným bombardováním, je třeba magnetron více žhavit, a to asi 12 - 14  $V_{eff}$ .

Magnetron je upevněn v držáku, doporučeným výrobcem. Vf výkon je vyvázan do vlnovodu o vnitřních rozměrech 102x229mm. Magnetické pole magnetronu je generováno válcovou cívkou protékanou stejnosměrným proudem asi 2 A. V přívodech žhavení a katody jsou koaxiální čtvrtvlnné tlumivky, zamezující vyzařování vf výkonu na pracovní frekvenci magnetronu. Katodový vývod je chlazen vzduchovým ventilátorem. Plášť magnetronu je chlazen vodou k odvedení vzniklého tepla převážně od žhavené katody.

Magnetron je od zátěže oddělen ferritovým izolátorem (viz obr. 14), který byl bez vodního chlazení zkoušen na 1 - 2 kW středního výkonu. Zpětný útlum izolátoru je cca 10 db, průchozí cca 1 db. Za izolátorem je umístěn proměnný výkonový útlum, používající jako útlumového media vody. Velikost útlumu je dálkově nastavována elektrickým posuvem se zpětnou indi-

kací polohy na ovládacím panelu. Maximální útlum je větší než 10 db /7/. Za útlumem je zařazena směrová odbočnice o vyvázání 38,5 db v ose širší stěny vlnovodu a 57 db u kraje širší stěny. Směrovost odbočnice je větší než 20 db /8/, Odbočnice umožňuje měření dopadajícího a odraženého výkonu. Posledním prvkem vlnovodové trasy je přechod vlnovod koaxiál s přizpůsobovacím místem, dálkově ovládaným a se zpětnou indikací posuvu.

Na 50Ω koaxiálním kabelu s polyetylenovou izolací a vnitřním Cu vodičem o  $\phi$  5 mm je použito koaxiálních konektorů Tesla-Pardubice. Před vstupním konektorem do vf struktury Tokamaku je úsek vedení s pružným vnitřním vodičem k vyloučení podélných i příčných tlaků na střední vodič.

K ověření funkce magnetronu je možno použít koaxiální zátěže k vyloučení rizika poškození vf struktury Tokamaku.

#### Blokové schéma napájení a ovládání vlnovodové trasy

Magnetron je žhaven ze žhavicího transformátoru s izolací 15 kV, jehož primár je napájen z regulačního transformátoru. Na primár žhavicího transformátoru je připojen motorek chladícího ventilátoru magnetronu.

Zdrojem impulzů anodového napětí pro magnetron je modulátor s triodou s velkou strmostí. Trioda je v klidovém stavu zavřená a otvírá se po dobu impulzu. Modulátor je schopen dát impulzy asi 12 kV/8 A, což s rezervou vyhovuje pro magnetron 70 SA 51. Tvar napětí impulzu je vyveden z modulátoru ke kontrole na oscilograf.

Průběh amplitudy dopadajícího a odraženého výkonu je možno sledovat na oscilografu.



## 6. Diagnostika

Základními makroskopickými parametry zařízení jsou toroidální elektrický proud tekoucí plazmatickým prstencem a nerezovým linerem jakožto sekundárním vinutím transformátoru Tokamaku a napětí na plazmatickém prstenci. Při snaze dosáhnout optimální stabilní režim (minimální hodnotu koeficientu stability) je tedy nutno měřit především tyto dva parametry. Snahou je dostat co největší toroidální proud při co nejnižším napětí na prstenci, stabilním po celou dobu trvání pulsu (překročení meze stability se projeví především na průběhu napětí na plazmatickém prstenci a to ostrými přerušovanými špičkami). Mimo těchto parametrů vlastního zařízení lze měřit (transformátorem proudu) i vlastní proud LC linek tekoucí primárním vinutím Tokamaku. Polohu prstence vzhledem k ose výbojové komory lze přitom sledovat ve dvou příčných řezech pomocí dvou systémů magnetických sond, umístěných v mezeře mezi linerem a Cu pláštěm.

Hlavní fyzikální parametry popisující vlastnosti plazmatu jsou elektronová hustota, teplota elektronů a iontů, energetický obsah jednotky objemu plazmatu a případně procento ionizace. Tyto parametry lze měřit v současném uspořádání mikrovlnným interferometrem, měřením diamagnetického efektu plazmatu, analýzou energie vyletujících neutrálů a optickými měřeními. Mimo to jsou v lineru umístěny v různých místech dvě langmuirovské stíněné sondy ve vysokofrekvenčním provedení, umožňující sledovat šíření ohřevové vlny od mikrovlnné struktury podél plazmatického prstence. Pro všechny tyto účely je zařízení opatřeno diagnostickými vstupy, zachycenými na schematickém obrázku 1.

Dvě dvojice (vysílací a přijímací) kruhových trychtýřů o průměru cca 25 mm označených na obr. 1 jako 1-1', 2-2', jsou určeny pro milimetrovou diagnostiku. Třetí dvojice 3-3' slouží pro zavedení elektrických, případně magnetických sond do komory. Vakuové průchočky všech těchto 6-ti vstupů jsou tvořeny nere-zovými trubičkami o vnitřním průměru 5 mm, těsněnými na své vnější straně na Cu plášť gumovým těsněním. Uvnitř jsou mikrovlnné trasy (1-1', 2-2') těsněny silným sevřením slídových okének mezi dvě měděná mezikruží, vývody sond jsou utěsněny pouhým sevřením plochého gumového těsnění, jímž jsou malými otvory protaženy střední vodiče sond. Poněvadž je k těsnění použito gummy, musí být průchočky po dobu ohřevu lineru chlazeny protékající vodou. Vstupy 4,5 jsou určeny pro koaxiální napájení zpožďovacích mikrovlnných struktur (v důsledku použití gumového těsnění opět chlazeny vodou), 6,7 jsou kruhová okénka pro optickou diagnostiku (6 je safírové, 7 křemenné o tloušťce 15 mm). V případě, že bude třeba provést sondování po celém průměru plazmatického prstence (při použití ať již optické či korpuskulární diagnostiky), bude možné v čerpáčním rameni nainstalovat podlouhlé okénko označené jako 8. Nyní stručně o možnostech jednotlivých diagnostických metod v současném uspořádání experimentu.

### 6.1 Měření toroidálního proudu

Toto měření se provádí Rogowského páskem, který obepíná v příčném řezu celou výbojovou komoru a to vně Cu pláště (plášť není v azimutálním směru elektricky uzavřen). Současně s prou-

dem protékajícím plazmatickým prstencem je tedy měřen i proud tekoucí nerezovým linerem. Obě složky lze však velmi dobře na časovém průběhu odlišit. Napětí indukované v cívce je integrováno pasivním RC obvodem s časovou konstantou 48 ms ( $R = 100 \text{ k}$ ,  $C = M 47$ ), což je hodnota pro délky pulsu kolem 6 ms zcela postačující. Poněvadž není znám počet závitů cívky, byla provedena absolutní kalibrace obdélníkovým proudovým impulsem. Citlivost je  $1 \text{ mV}/240 \text{ A} = 4 \text{ mV}/1 \text{ kA}$ , časové rozlišení v intervalu 10 us - 10 ms (což našim účelům plně vyhovuje).

### 6.2 Napětí na plazmatickém prstenci

Toto napětí  $U$  se snímá pomocí jednoho závitu vodiče umístěného na výbojové komoře vně pláště. Lze jej zapsat pomocí jednoduchého vztahu:

$$U = L \frac{dI}{dt} + R J, \quad (6.1)$$

kde  $L$  je indukčnost prstence,  $J$  protékající proud,  $R$  odpor prstence. Při odhadu  $L$  a znalosti  $J$  lze odtud tedy vyčíslit vodivost plazmatu a tudíž i "efektivní" elektronovou teplotu (tato "efektivní" hodnota může být proti skutečné teplotě vlivem těžších příměsí až několikanásobně snížena).

### 6.3 Sledování polohy plazmatického prstence

Při provozu Tokamaku je vhodné znát polohu plazmatického prstence uvnitř komory, aby bylo možno nastavit vhodné hodnoty kompenzačních polí  $H_h$  a  $H_v$  a posoudit stabilitu plazmatic-

kého prstence. K tomu slouží polohové sondy - cívky o několika desítkách závitů  $N$  a ploše několika  $\text{cm}^2$  ( $A$ ) umístěné na povrchu lineru a orientované tak, aby měřily pole proudu  $B_\varphi$ .

V přiblížení přímého válce protékaného proudem  $I$  měří sondy  $1_1$  a  $2_2$  při posunu proudového kanálu o  $\delta r$  pole  $B_{\varphi_1}$  a  $B_{\varphi_2}$

$$B_{\varphi_1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi (r + \delta r)}, \quad B_{\varphi_2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi (r - \delta r)} \quad (6.2)$$

Odtud

$$\frac{\delta r}{r} = \frac{B_{\varphi_2} - B_{\varphi_1}}{B_{\varphi_2} + B_{\varphi_1}} \quad (6.3)$$

Napětí na výstupu cívky je

$$E = \frac{d\phi}{dt} = AN \frac{dB_\varphi}{dt} \quad (6.4)$$

Abychom dostali hodnotu úměrnou  $B_\varphi$ , musíme na výstupu provést integraci, v našem případě pasivním RC členem s časovou konstantou  $\tau = 0,2$  s. Většinou stačí sledovat pouze hodnotu úměrnou  $B_{\varphi_2} - B_{\varphi_1}$ , ze které lze usoudit na směr pohybu prstence plazmatu.

V zařízení TM-1-MH je umístěno 6 párů polohových sond a to čtyři páry v horizontální rovině po  $90^\circ$  po obvodu toroidu (pro sledování radiálního posuvu plazmatického prstence) a dva páry sond pro sledování vertikálního posuvu, vzdálené od sebe na  $180^\circ$ .

#### 6.4 Mikrovlnná diagnostika

Měření lze provádět sondováním napříč plazmatuckého prstence a to ve dvou svislých drahách: po průměru a po tě-  
tivě vzdálené od středu o 35 mm směrem k hlavní ose zařízení.  
Rozměry kruhových trychtýřů a kruhových vlnovodů, které je  
napájí (viz výše), dovolují použít k sondování vlnových délek  
8 mm a kratších. Z důvodů technického vybavení a dostupnosti  
mikrovlnných generátorů se v současné době na zařízení prová-  
dí interferometrická měření elektronové hustoty po průměru na  
vlnové délce 8 mm (37,5 GHz). Interferometrickým měřením fáze  
prošlé vlny lze zjistit elektronovou hustotu lineárně ustřed-  
něnou podél dráhy mikrovlnného svazku. Chceme-li stanovit  
střední hustotu po celém příčném průřezu (údaj potřebný např.  
při výpočtu teploty z údaje diamagnetického signálu), musíme  
znát tvar rozložení hustoty po poloměru. Tak např. pro rozlo-  
žení tvaru kvadratické paraboly je střední elektronová hustota  
po celém objemu plazmatu rovna 75% hustoty zjištěné interfero-  
metricky.

Použití vlnové délky 8 mm v současné době znamená silné  
omezení co se týče maximálně měřitelných hustot (cut off hus-  
tota je  $1,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ). Poněvadž kvasistacionární hustota na  
ose Tokamaku se pohybuje kolem hodnoty  $2-4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , znamená  
to nutně přejít na vlnovou délku 4 mm.

#### 6.5 Diamagnetická měření

Tato měření v toroidální konfiguraci Tokamaku se silným  
podélným proudem představují značně komplikovanou záležitost.

Magnetická sonda určená pro snímání diamagnetického efektu způsobeného příčným kinetickým tlakem plazmatu snímá totiž i "paramagnetický" efekt toroidálního proudu, který je dokonce mnohem silnější. Podle /4/ lze celkovou (tzn. i měřenou) změnu toku podélného magnetického pole  $\Delta\phi$  zapsat ve tvaru:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c \cdot H_0} (I^2 - 2\pi a^2 p) \quad (6.5)$$

kde  $H$  je toroidální magnetické pole,  $I$  toroidální proud, a poloměr plazmatu  $a$   $p$  kinetický tlak ( $\pi a^2 p = \frac{2}{3} W$ ), kde  $W$  je za předpokladu isotropního rozdělení rychlostí částic obsah energie v jednotce délky plazmatického prstence). Z uvedeného vztahu je tedy v principu možné (za předpokladu znalosti  $I = I(t)$ ) numericky či graficky vyčíslit  $p$  a při znalosti hustoty tedy ( $T_e + T_i$ ). Tato vyhodnocení však zatím prováděna nebyla. Diamagnetická cívka připravená pro měření má 28 závitů, které jsou pro vyloučení náhodných nehomogenit rozloženy rovnoměrně podél celého toroidu (vždy jeden závit pod jednou cívkou hlavního magnetického pole). Ke kompenzaci změn vertikálního pole při tomto uspořádání sondy slouží jeden zpětný závit podél toroidu, ke kompenzaci změn hlavního magnetického pole kompenzační cívka přiložená k cívce identické s cívkami hlavního pole, umístěné však v napájecím obvodu hlavního pole mimo zařízení.

## 6.6 Měření energie neutrálu

K tomuto účelu je připraven analyzátor energie neutrálu s plynným terčíkem, dodaný z FTI Leningrad. Měření doposud prováděna nebyla, analyzátor bude připojen v místě čerpacího stojanu označeného na obr. 1 jako 8. Jedná se o 5-ti kanálový analyzátor s elektrostatickým či magnetickým vychylováním, s možností měření energií neutrálu vznikajících v plazmatu na základě nábojové výměny v rozmezí od asi 100 eV do několika keV.

## 6.7 Optická měření

Optická měření lze provádět v místech tří okének 6,7,8, viz obr. 1. V současné době je možno provádět měření časového průběhu jednotlivých čar pracovního plynu či příměsí během pulsu výboje zfokusováním obrazu křemenného okénka 7 na šterbinu monochromátoru SPM 2 s křemenným hranolem. Disperse přístroje, pracujícího v oblasti vlnových délek 200 - 1500 nm, je v závislosti na vlnové délce 0,05 - 6 nm/0,1 mm (v okolí čáry  $H\beta$ , tj. 486,1 nm. jejíž "vyhořívání" se při práci na vodíku především sleduje, je disperse 0,9 nm/0,1 mm).

Pro měření teploty iontů z dopplerovského rozšíření čar příměsí bude použito mřížkového spektroskopu PGS s dispersí 0,35 nm/mm.

## 6.8 Langmuirovské sondy

Pro sledování amplitudy, případně šíření ohřevové vlny

jsou v lineru umístěny dvě langmuirovské sondy. Jejich přesná poloha  $S_1$  a  $S_2$  je zachycena na obr. 1. Sondy jsou vedeny těsně po povrchu lineru v jeho dolní části, v posledním úseku (40-50 mm) jsou od něho zvednuty na 12 mm (zůstávají tedy ve stínu clony a to zhruba 10 mm). Střední vodič sond tvoří Mo drát o  $\phi = 0,5$  mm, vyčnívající z vnější stínící nerez trubičky o  $\phi = 3$  mm na vzdálenost 7 mm.

### 6.9 Měření proudu LC-linky

Pro nastavování tvaru pulsu proudu z LC-linek byl zkonstruován měrný transformátor proudu se železným jádrem s dobrou elektrickou izolací a stínícím krytem proti rušivým signálům.

Primár transformátoru tvoří 1 závit ve formě přímého vodiče  $\phi$  10 mm, sekundární vinutí tvoří 2 cívky o 240 závitů z Cu drátu o  $\phi$  1 mm. Na výstup sekundárního vinutí je připojen bezindukční odpor 2 ohmy, z jehož konců je napětí vedeno na diferenciální zesilovač oscilografu. Transformátor je konstruován tak, aby pracoval jako samointegrující.

Provedené zkoušky ukázaly, že transformátor přenáší bez zkreslení tvar proudového impulsu délky několika ms při proudu do 1 kA. Navíc není citlivý na elektrostatické přechodové jevy, které zkreslují zobrazení impulsu při měření měrnými odpory. Z kalibračních měření plyne citlivost měrného transformátoru 4,4 V/1 kA.



## 7. Provoz a první výsledky

Zařízení Tokamak TM-1-MH pracuje v impulsním režimu zdrojem toroidálního magnetického pole je kondensátorová baterie, která se vybíjí do cívek rovnoměrně rozložených podél toroidální komory. Půlperioda proudu tekoucího těmito cívkami je 65 msec. V maximu proudu, kdy magnetické pole je maximální a téměř konstantní se do Tokamaku přivádí impuls z tvarovací LS linky o délce  $\tau \approx 6$  msec. Časové umístění tohoto impulsu je řízeno časovou centrálou. Vzhledem k začátku proudu v cívkách toroidálního pole tento impuls je posunut cca o 30 msec, viz obr. 16. Proud v cívkách toroidálního pole byl měřen Rogovského páskem umístěným na 29 cívce; signál byl pasivně integrován ( $RC = 1$  sec) na oscilografu. Proud LC linky byl měřen samointegrujícím transformátorem.

K vytvoření proudu výboje jsou k dispozici dvě tvarovací LC linky, jejichž impulsy mohou být časově vzájemně posunuty. To umožňuje vytvářet tvarovaný impuls proudu přiváděného do primárního vinutí transformátoru. Použití zapojení umožňuje rovněž nabíjet tvarovací LC linky na různá napětí.

Cílem prvních experimentů prováděných na Tokamaku TM-1-MH bylo nalezení optimálních režimů stabilního provozu a nastavení základních diagnostických prostředků umožňujících měřit základní makroskopické parametry, tj. proud výboje  $I$ , napětí na plazmatickém závitu  $U$  a polohy plazmatického závitu v lineru, dále střední elektronovou hustotu  $N$  a vyhoření pracovního plynu. Elektronová hustota se měřila mikrovlnným interferometrem pracujícím na frekvenci  $f = 37,5$  GHz. Vyhoření pracovního plynu se

sledovalo pomocí časové závislosti intensity čáry  $H_{\beta}(4860 \text{ \AA})$ .

Typický režim výboje Tokamaku (výstřel 861) je uveden na obr. 17. Oscilogramy zeshora dolů znázorňují časové průběhy hustoty, intensity čáry  $H_{\beta}$ , napětí na plazmatickém závitu  $U$  a proudu výboje  $I$ . Plazma bylo vytvořeno ve vodíku při tlaku  $p = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$  a magnetickém poli  $B_T = 12 \text{ kG}$ . Mikrovlnný interferogram ukazuje, že téměř po celou dobu výboje hustota vytvořeného plazmatu je vyšší než  $N_c$ , tj.  $N > N_c \approx 1,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .

Hlavní překážkou dosažení stabilního režimu výboje v Tokamaku je vznik disruptivní nestability. Tato nestability vzniká při zvyšování proudu výboje  $I$ . Vznik disruptivní nestability je ilustrován na obr. 18. Zde jsou uvedeny tři dvojice oscilogramů proudu výboje  $I$  a napětí na plazmatickém závitu  $U$  pro tři různé hodnoty napětí na tvarovací lince  $U_{LC} = 1,75; 2 \text{ a } 2,5 \text{ kV}$ . Všechny výboje byly provedeny ve vodíku při tlaku  $p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$  a magnetickém poli  $B_0 = 12,4 \text{ kG}$ . Disruptivní nestabilita se objevuje při  $U_{LC} = 2,5 \text{ kV}$  a vyznačuje se zápornými špičkami na průběhu napětí. Ve srovnání s obrázkem č. 17 průběh napětí na plazmatickém závitu  $U$  má již typický charakter známý z provozu na dobře pracujících zařízeních Tokamak; rovněž absolutní velikost napětí je ve srovnání s obr. 17 značně nižší  $U < 5 \text{ V}$ .

Dosavadní experimenty ukázaly, že stabilní režim v Tokamaku TM-1-MH je v okolí tlaku vodíku  $p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$ . Posud dosažené maximální hodnoty proudu  $I_{\max} \approx 10 \text{ kA}$  při  $U = 3 + 4 \text{ V}$ .

Obr. 19 ukazuje časovou závislost intenzity čáry  $H_{\beta}$  (4860 Å) obr. 19a, čáry  $C_{III}$  (4647 Å) obr. 19b. Na obou obrázcích je zároveň uveden průběh proudu  $I$  ukazující délku výboje.

Po delším trénování Tokamaku (cca po 1200 výstřelech) se podařilo nalézt stabilní režim: při nízké hustotě plazmatu, nižší než je hustota kritická, tj. při  $N < N_c \approx 1,7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Interferogram získaný v takovém plazmatu na  $f \approx 37,5 \text{ GHz}$  je uveden an obr. 20a. Tento interferogram byl změřen při tlaku vodíku  $p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$ ,  $B_{\theta} = 12,4 \text{ kG}$ ,  $U_{LC} = 1,4 \text{ kV}$ . Pro srovnání je na obr. 20b uveden interferogram v hustém  $N > N_c$  plazmatu. Tento byl získán při tlaku vodíku  $p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$ ,  $B_{\theta} = 12,4 \text{ kG}$ ,  $U_{LC} = 2,0 \text{ kV}$ .

Kromě uvedených měření se začalo studium šíření a odrazu řádné vlny ( $\vec{E} \parallel \vec{B}$ ,  $\vec{k} \perp \vec{B}_{\theta}$ ) opět na frekvenci  $f = 37,5 \text{ GHz}$ . První výsledky získané na řídkém  $N < N_c$  plazmatu jsou uvedeny na obr. 21. První oscilogram ukazuje interferogram, druhý časový průběh odraženého výkonu a třetí časový průběh prošlého výkonu. Tyto výsledky byly získány při tlaku vodíku  $p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$ ,  $B_{\theta} = 12,4 \text{ kG}$  a  $U_{LC} = 1,7 \text{ kV}$ .

Výše uvedené výsledky ukazují, že na Tokamaku TM-1-MH se podařilo vytvořit plazma s parametry dosahovanými na tomto zařízení v I.A.E. I.V. Kurčatova v Moskvě. Existence stabilního režimu umožňuje v roce 1978 začít vlastní studium ohřevu elektronů plazmatu pomocí zpomalených vln buzených zpomalovací šroubovicí. Současně bude třeba věnovat se zvýšení

proudu výboje, tj. nalézt stabilní režimy bez disruptivních nestabilit při větších proudech.

Literatura

- /1/ Klíma R.: Plasma Phys. 15 (1973) 1031
- /2/ Kryška L.: Spínání kondenzátorové baterie pro experimentální zařízení Tokamak TM-1. Interní zpráva ÚFP č.30/76
- /3/ Dokumentace k zařízení Tokamak TM-1-VČ, díl I. IAE Moskva
- /4/ Artsimovich L.A.: Nuclear Fusion 12 (1972) 215
- /5/ Musil J., Žáček F.: PV-5029-77
- /6/ Frič V.: řešení TÚ ČSAV 12/76
- /7/ Ďatlov J., Musil J.: Absorpční prvek vlnovodního útlumového členu. PV-1456-76
- /8/ Kryška L.: Výkonný vlnovodný odbočný člen pro pásmo vlnovodního ohřevu. Řešení TÚ ÚFP ČSAV



## PŘÍLOHA I.

### Volba spínacího prvku

Pro spínání kondenzátorové baterie je v zásadě možno použít elektromagnetických tak bezkontaktních spínačů. Vzhledem k tomu, že u elektromagnetických spínačů lze velmi těžko dosáhnout synchronního chodu při paralelním řazení, musel by být takový spínač dimenzován na proud větší než 16 kA. Elektromagnetický spínač na tak velký stejnosměrný proud by musel být pro tento účel zvláště vyvíjen. Navíc velkou nevýhodou elektromagnetických spínačů je nutnost údržby kontaktů. Tyto dva hlavní nedostatky elektromagnetických spínačů vedly k rozhodnutí použít bezkontaktních spínačů.

Bezkontaktních spínačů vhodných pro spínání kondenzátorové baterie je celá řada (ignitrony, tyratrony, tyristory, triaky, jiskřiště). Vzhledem k tomu, že je vyžadovaná vysoká provozní spolehlivost, bylo upuštěno od vlastního vývoje a byla dána přednost průmyslově vyráběným spínacím prvkům.

Z uvedených druhů spínacích prvků, které mají požadované parametry jsou v ČSSR průmyslově vyráběny pouze tyristory (ČKD Praha, závod polovodiče). Tato skutečnost byla také důvodem, proč na místo spínacích prvků byly navrženy tyristory.

Při použití tyristoru jako spínacího prvku je také splněn požadavek na automatické odpojení kondenzátorové baterie při průchodu proudu nulou.

### Volba vhodného typu tyristoru

Vhodnost toho či onoho typu tyristoru je závislá v našem případě v zásadě na dvou parametrech:

1. napětí kondenzátorové baterie  $U_B = 2000 \text{ V}$ ,
2. amplituda proudu v každé sekci  $I_M = 1346 \text{ A}$ .

Velikost napětí  $U_B$  již samo o sobě zúžilo volbu pouze na tyristor T 400 typ 223. Výrobce ČKD Praha, závod polovodiče uvádí pro tento typ tyristoru  $U_{RRM} = U_{DRM} = 3000 \text{ V}$ . Při zatížení konstantním stejnosměrným blokovacím nebo závěrným napětím je nutno snížit uvedenou hodnotu přibližně na 60%. Tento stav bude právě v našem případě nastávat při nabíjení kondenzátorové baterie. Snížená velikost napětí  $U_{RRM}$  a  $U_{DRM}$  bude ovšem stále vyhovující při napětí  $U_B = 2000 \text{ V}$ . Na tomto místě je ovšem nutno zdůraznit, že s uvažovaným typem tyristoru nelze do budoucna počítat s případným zvýšením napětí  $U_B$ .

Další důležitou otázkou je proudová zatižitelnost tyristoru. Z údajů, které výrobce udává nelze přímo usuzovat na vhodnost daného typu tyristoru v předpokládaném režimu (tj. amplituda proudu  $I_M = 1346 \text{ A}$ , délka pulsu 70 ms, doba mezi dvěma po sobě následujícími pulsy 5 min.). Tato otázka je podrobně analyzovaná v práci /2/, kde je ukázáno, že uvažovaný typ tyristoru vyhoví po stránce proudové zatižitelnosti i v případě dvojnásobně kapacity kondenzátorové baterie (tj. 0,36 F). Dalším faktorem, se kterým je nutno počítat při provozu obvodů s polovodičovými ventily je komutační jev.



Na konci komutace klesá totiž propustný proud tyristoru na nulu, nezaniká však, ale přechází do záporných hodnot a potom prudce klesá na nulu. Pokud je v obvodu tyristoru zapojena indukčnost, tak se prudkým poklesem proudu uvolní magnetická energie nahromaděná v indukčnosti. Uvolněním energie vzniká přepětí, které se objeví na svorkách tyristoru a superponuje se na závěrné napětí.

Jako ochrana proti tomuto přepětí je nejpoužívanější a nejúčinnější seriový RC-člen, připojený paralelně přímo k tyristoru. Připojením RC-členu k tyristoru vznikne spolu s indukčností komutačního obvodu RLC obvod, jak je patrné z náhradního schematu na obr. 1\*. Energií nahromaděnou v komutační indukčnosti na konci komutace

$$W_K = \frac{1}{2} L I_{KM}^2 \quad (4)$$

musí kondenzátor absorbovat a to tak, aby na RC-členu a tím i na tyristoru nakmitnuté napětí nepřevýšilo hodnotu opakovatelného závěrného napětí tyristoru.

Uvedený způsob ochrany byl také použit k ochraně tyristorů spínajících kondenzátorovou baterii. Přesné hodnoty velikostí R a C nebylo možné s dostatečnou přesností určit předem a bylo proto nutné tyto hodnoty určit experimentálně při provozu kondenzátorové baterie (s podstatně sníženým napětím  $U_B$ ).

Vzhledem k tomu, že jednotlivé sekce jsou z hlediska zátěže (vinutí na Tokamaku) propojeny paralelně, je nutno zajistit bezvadný synchronní chod tyristorů. Zde právě vystupuje do

popředí jedna z nepříjemných vlastností tyristorů. K tomu, aby tyristor přešel z nevodivého stavu do vodivého, je nutné zajistit, aby napětí  $U_{KA}$  v nevodivém stavu bylo alespoň tak veliké, jako je napětí ve stavu vodivém (propustné napětí). Vzhledem k rozptylu parametrů tyristorů, bude uvedené napětí různé pro jednotlivé tyristory. Dle měření je propustné napětí  $U_T$  v intervalu 2,5 - 5 V. Pokud nyní například sepne o něco dříve tyristor s nejnižší hodnotou napětí  $U_T$ , objeví se toto napětí i na ostatních tyristorech. Protože napětí  $U_T$  dalších tyristorů je vyšší, nemohou přejít do vodivého stavu.

Z tohoto důvodu nejsou katody jednotlivých tyristorů připojeny přímo k zátěži, ale přes pomocné indukčnosti  $L_n$  ( $n=1-12$ ). Tyto indukčnosti spolu s indukčností zátěže  $L_o$  tvoří induktivní dělič napětí. Je tak zajištěno, že napětí  $U_{KA}$  jednotlivých tyristorů bude v uvažovaném případě mít hodnotu

$$U_{KA} = U_{T_{\min}} + \frac{L_n}{L_o} U_B \quad (5)$$

kde  $U_{T_{\min}}$  je nejmenší hodnota propustného napětí ( $U_{T_{\min}} \approx 2,5$  V)

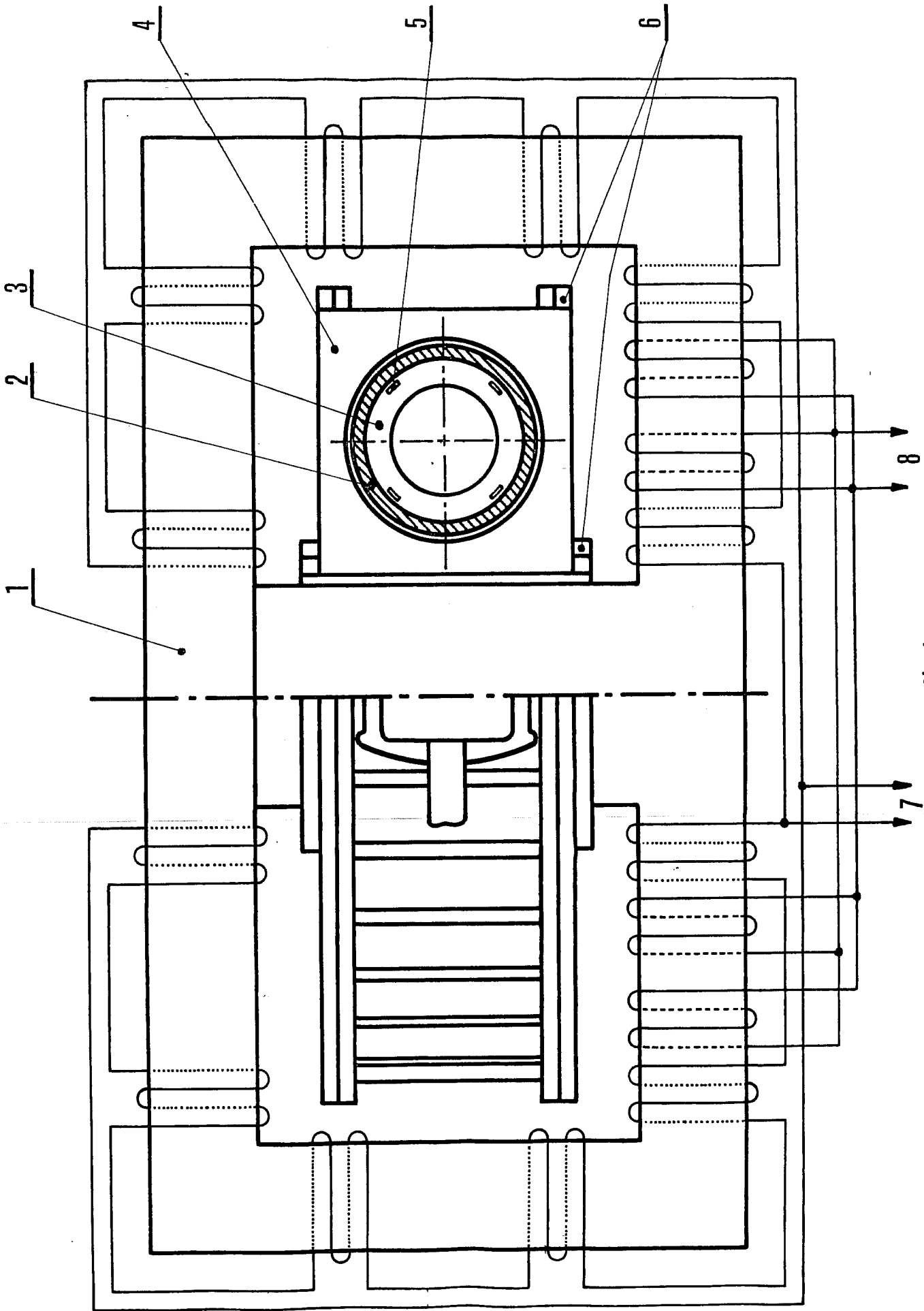
$L_n$  je indukčnost pomocných cívek ( $L_n \approx 10 \mu\text{H}$ )

$L_o$  je indukčnost zátěže ( $L_o \sim 2,8$  mH)

$U_B$  je napětí kondenzátorové baterie ( $U_B \sim 2$  kV)

Tímto způsobem je tak, zajištěno, že v případě, kdy sepne o něco dříve tyristor s nejmenší velikostí  $U_T$ , bude napětí  $U_{KA}$  ostatních tyristorů dostatečné, aby mohly přejít do vodivého stavu.

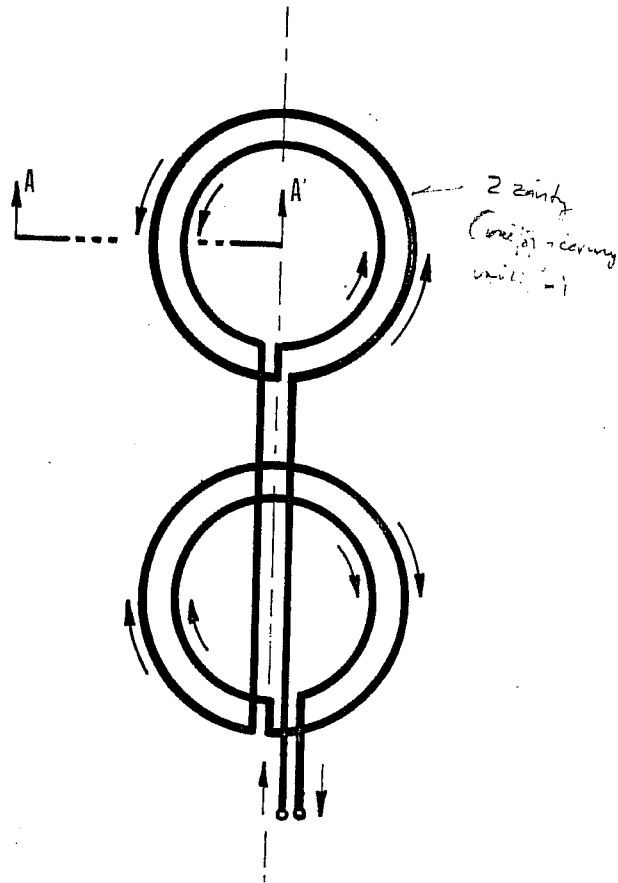
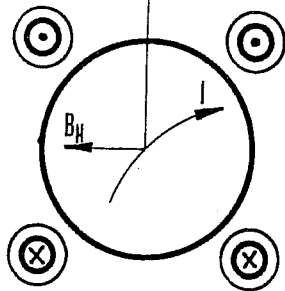
SCHEMA TOKAMAKU



# ZAPOJENÍ KOMPENZAČNÍCH VINUTÍ

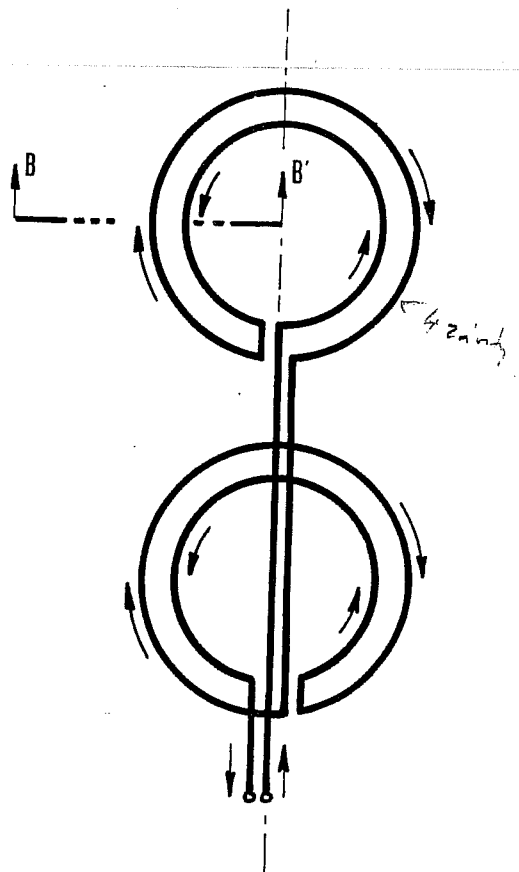
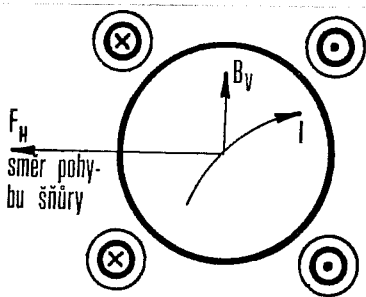
STACIONÁRNÍ VERTIKÁLNÍ KOMPENSACE POLOHY ŠNŮRY (horiz. mp. pole =  $\Delta h$ )

Řez A-A' směr pohybu šňůry

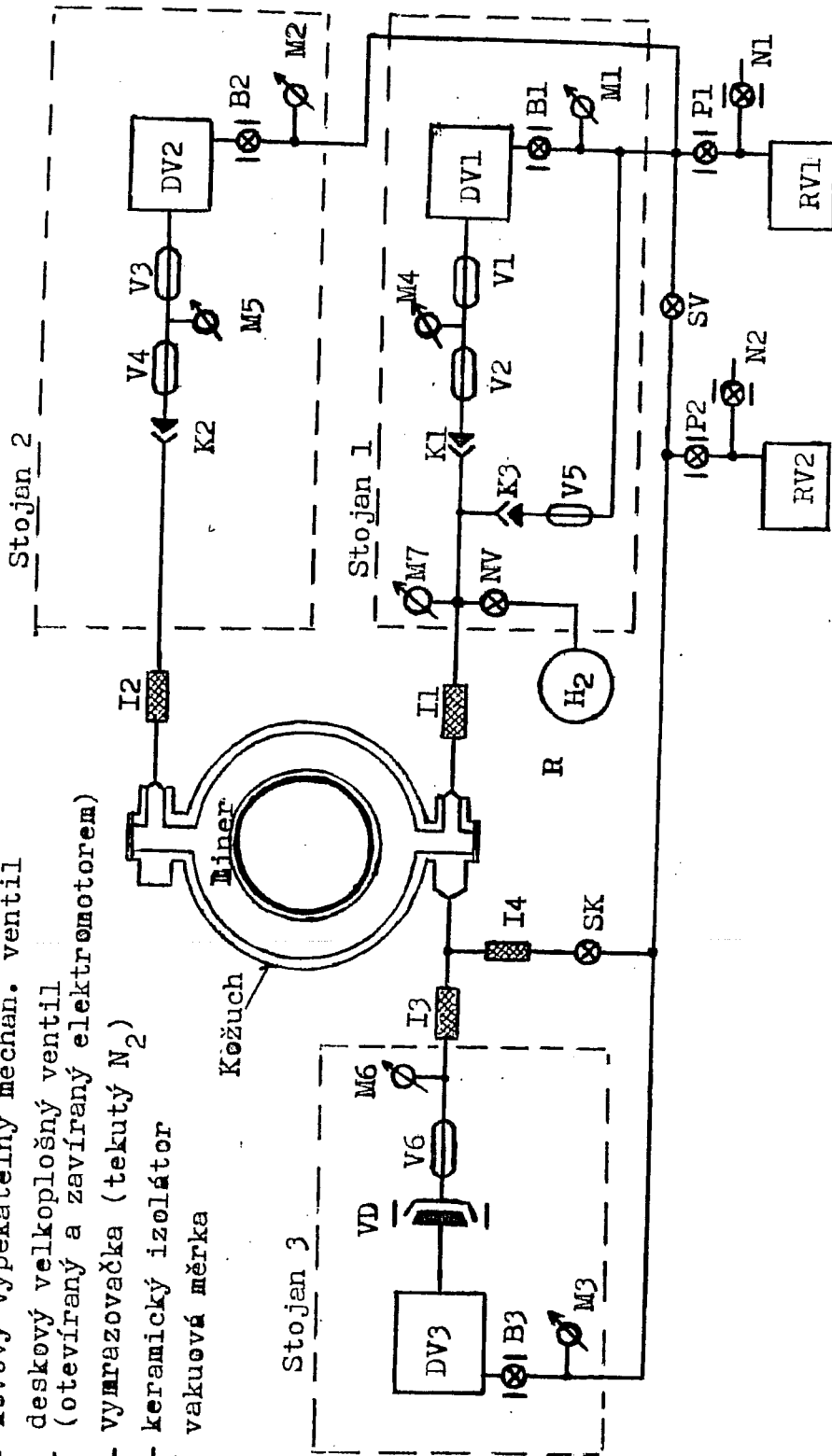


STACIONÁRNÍ HORIZONTÁLNÍ KOMPENSACE POLOHY ŠNŮRY (vertik. mp. pole =  $\Delta R$ )

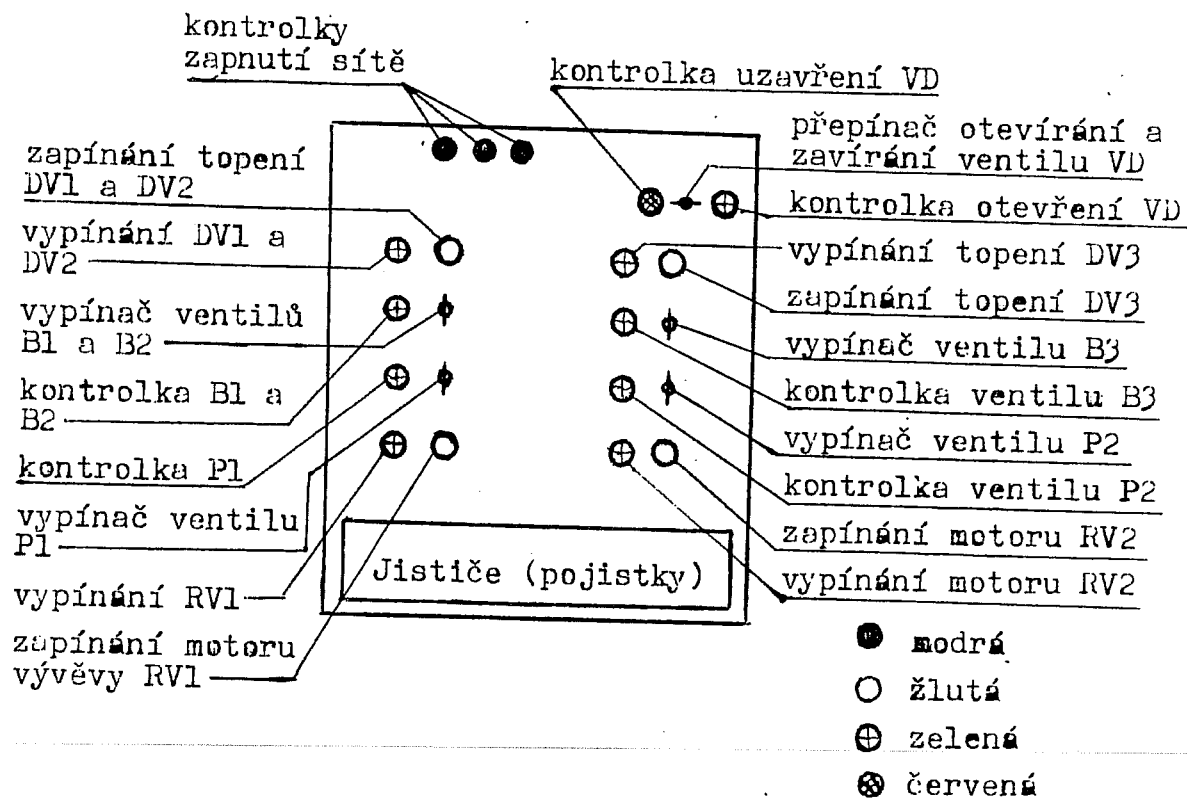
Řez B-B'



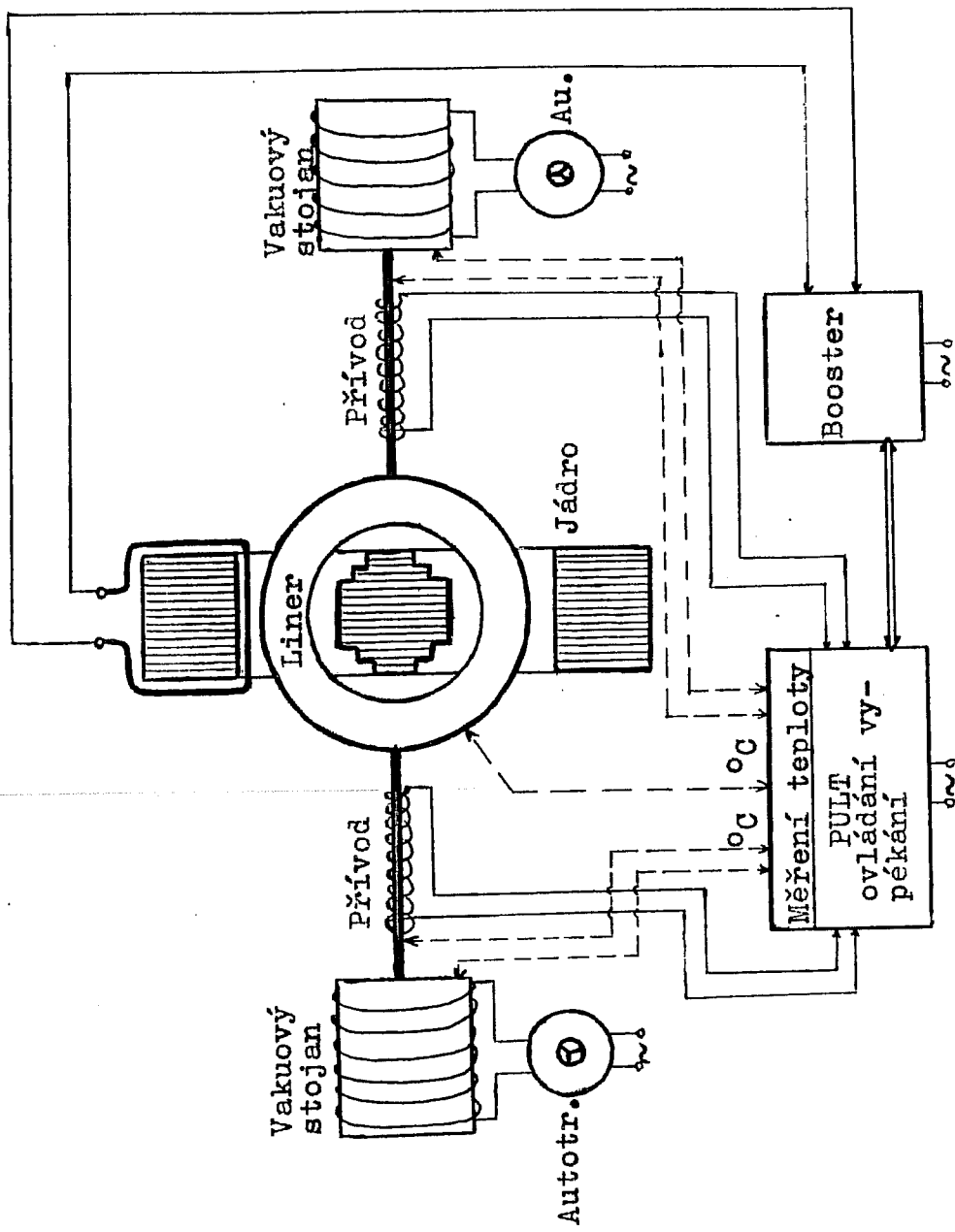
- ⊗ mechanický ventil
- ⊗| elektromagneticky ovládaný ventil
- ⇐ kovový vypékateľný mechan. ventil
- ⊏ deskový veľkoplášňový ventil (otevrievaný a zavíraný elektromotorom)
- ⊏ výmrazovačka (tekutý N<sub>2</sub>)
- ⊏ keramický izolátor
- ⊏ vakuová miera



Schema vakuového systému TOKAMAKU

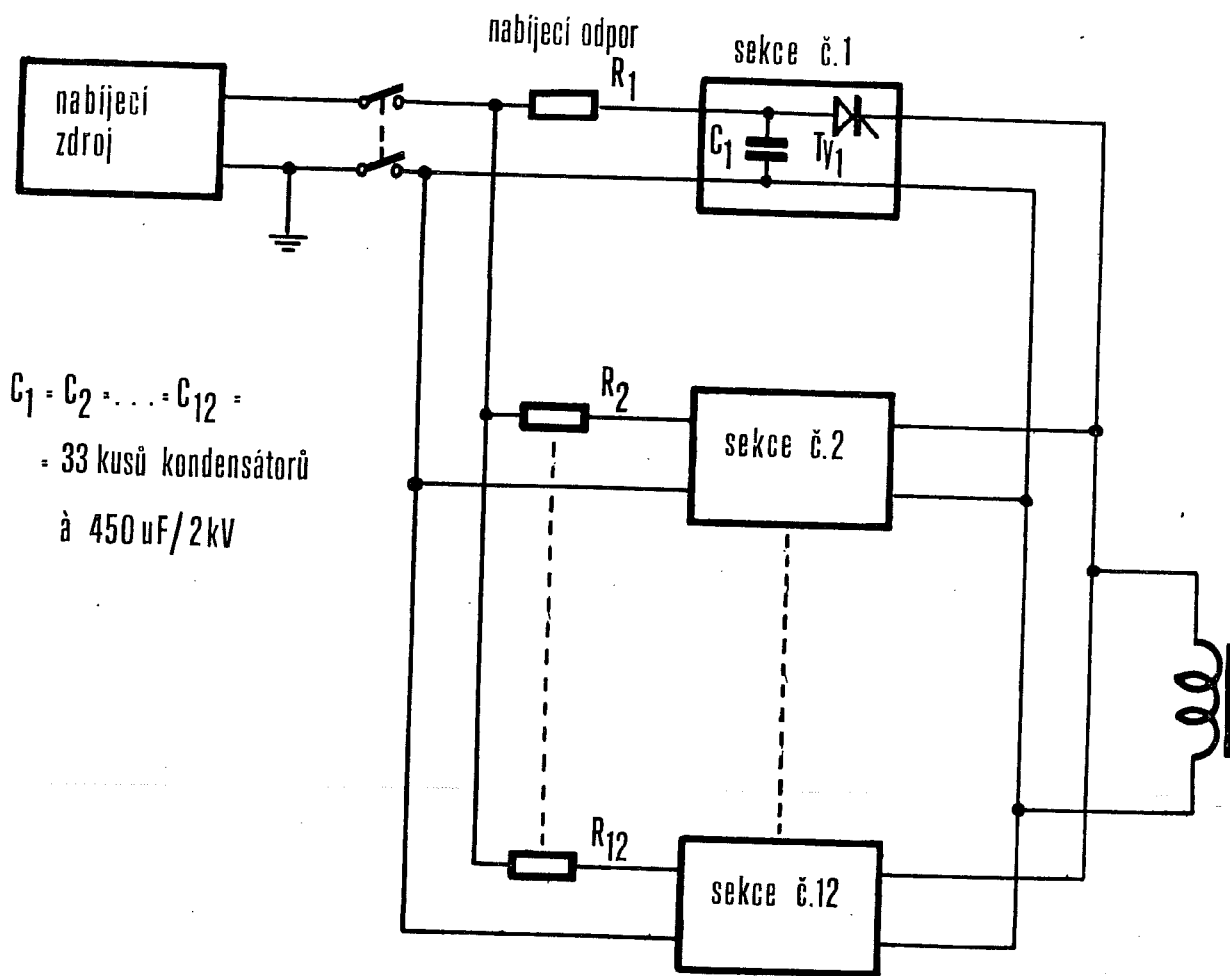


Rezmístění ovládacích prvků a kontrolky na  
panelu zapínání čerpacího systému TOKAMAKU



Principiální schéma vypékání vakuového systému TOKAMAKU

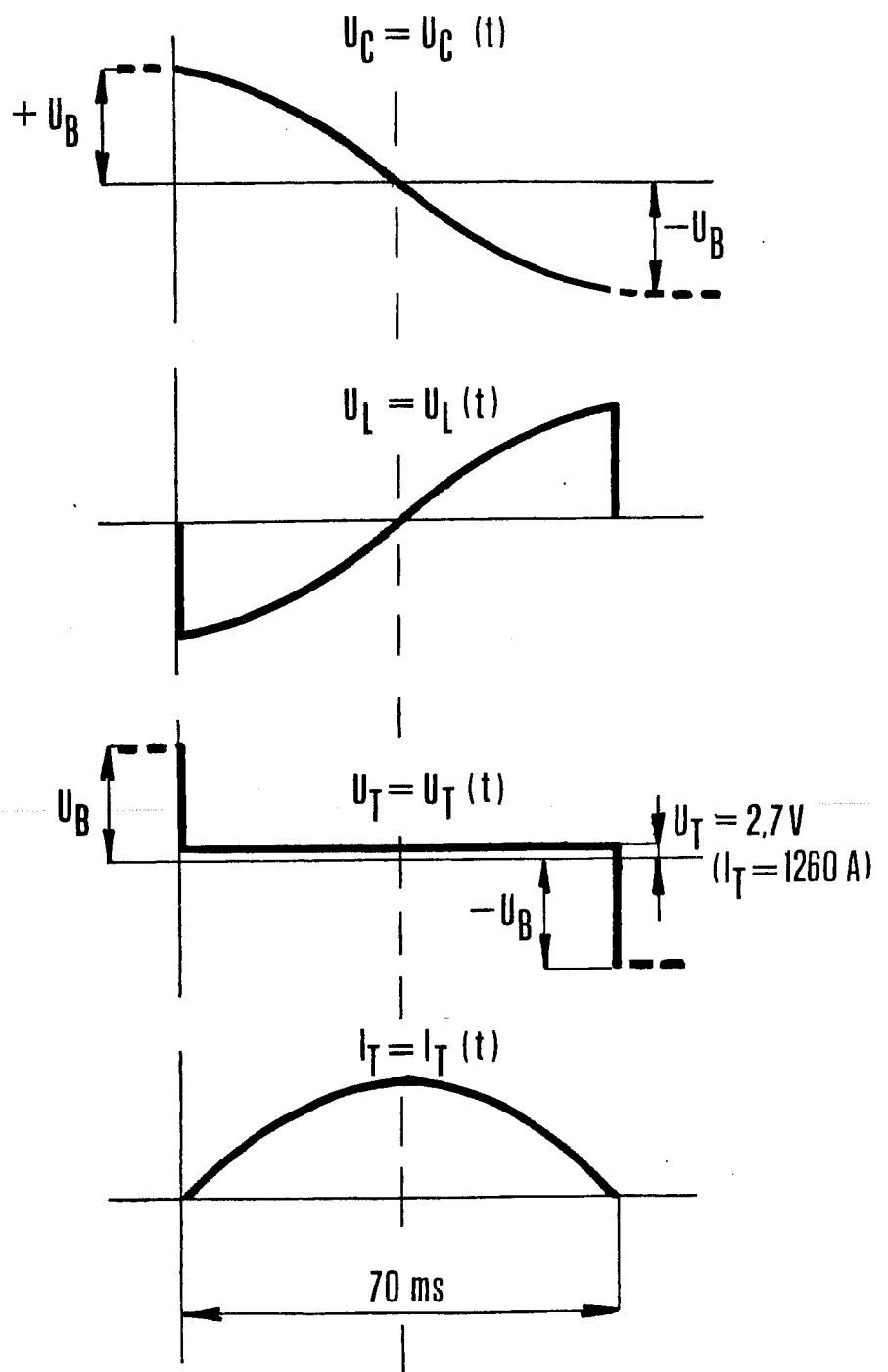
# BLOKOVÉ ZAPOJENÍ KONDENSÁTOROVÉ BATERIE



Obr. 6

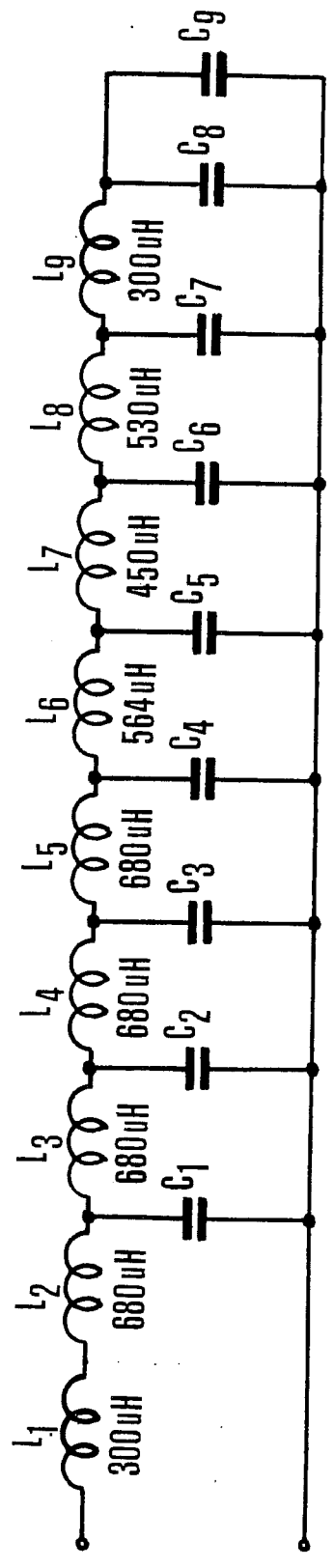


# PRŮBĚHY PROUDU A NAPĚTÍ



Obr. 7

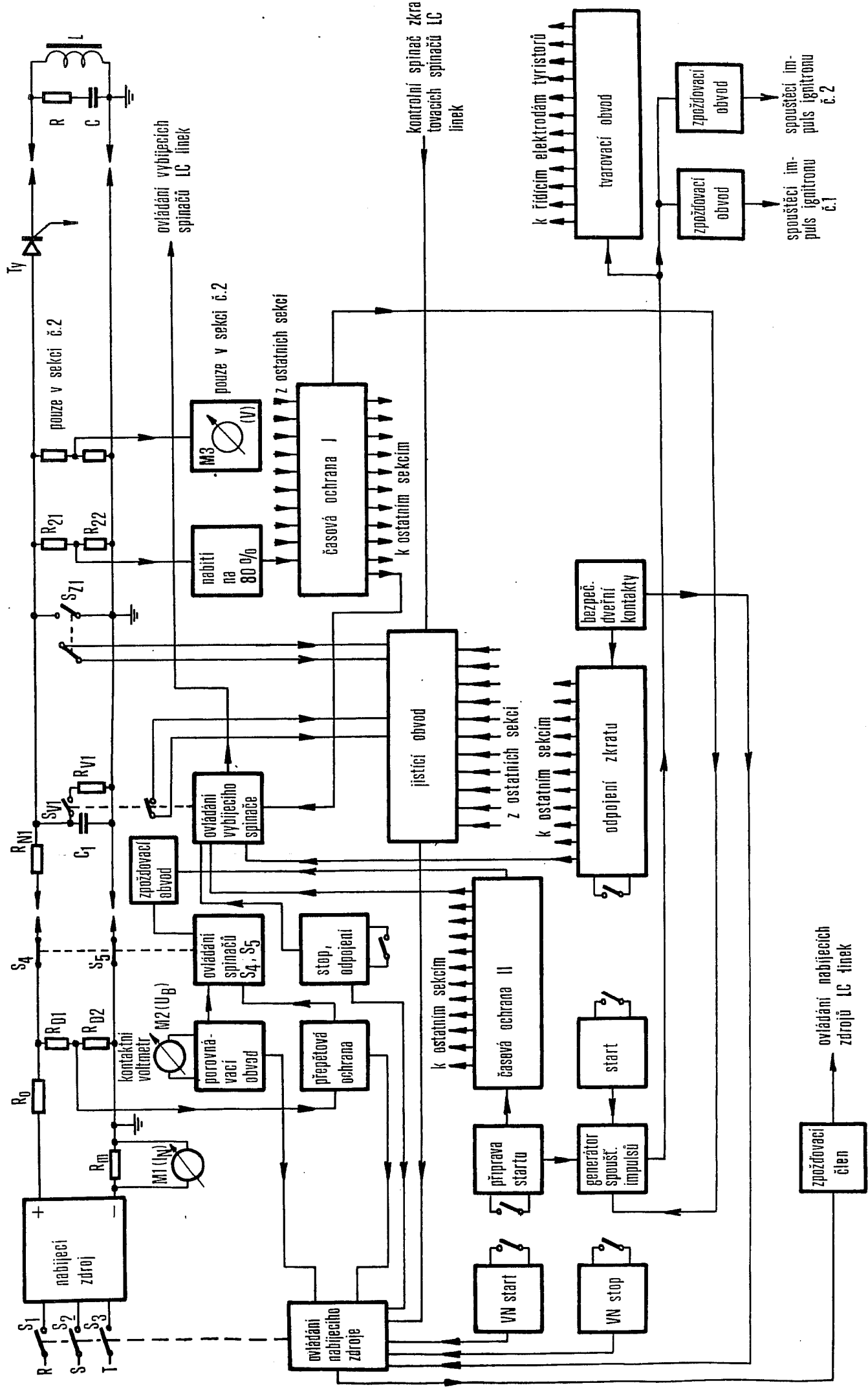
# LC -- LINKY



$$C_1 = C_2 = \dots = C_9 = 150 \mu\text{F}$$

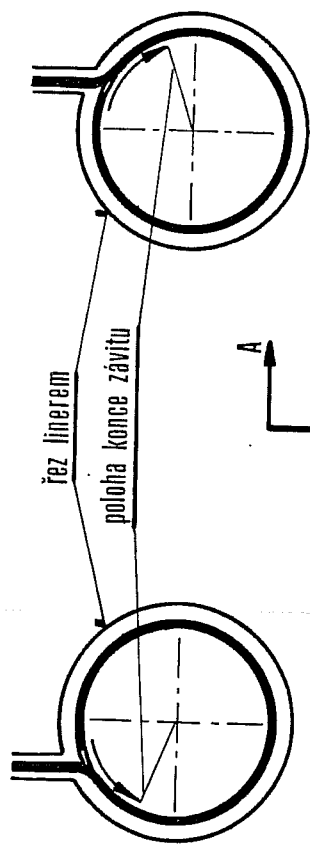
Obr. 8

# BLOKOVÉ SCHÉMA OVLÁDÁNÍ BATERIE



PŮDORYS POLOVINY LINERU SE SCHEMATICKÝM ZOBRAZENÍM UMÍSTĚNÍ ŠROUBOVIC

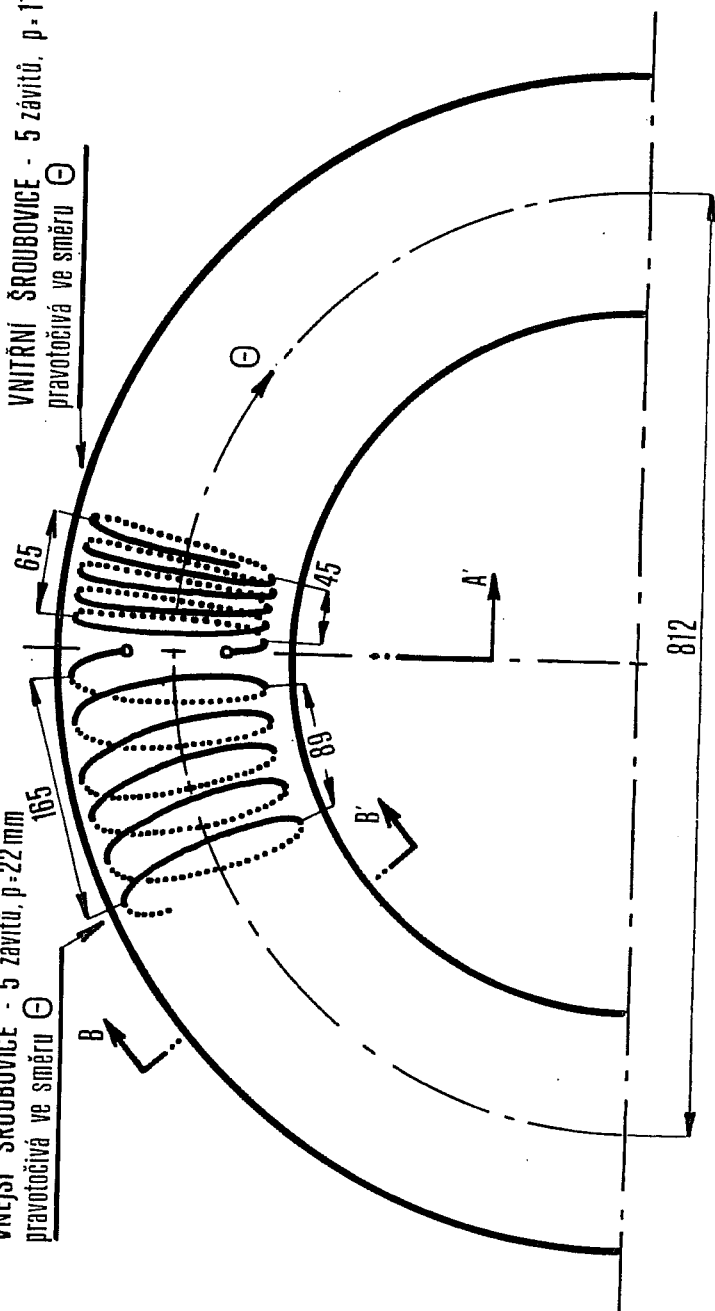
pohled B-B'



pohled A-A'

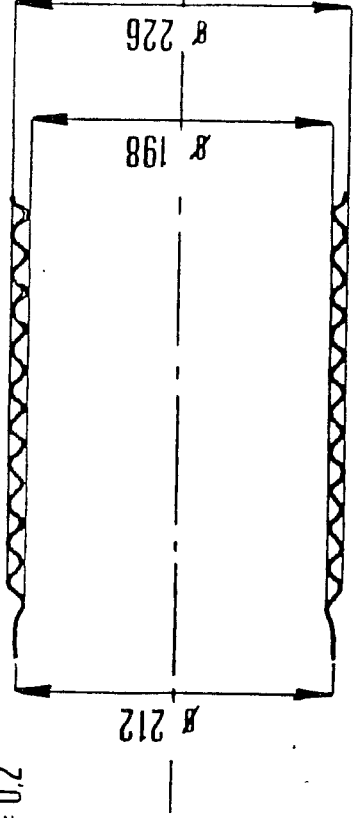
VNĚJŠÍ ŠROUBOVICE - 5 závitů,  $p=22$  mm  
pravotočivá ve směru  $\ominus$

VNITŘNÍ ŠROUBOVICE - 5 závitů,  $p=11$  mm (krok)  
pravotočivá ve směru  $\omin�$



# ŘEZ LINEREM

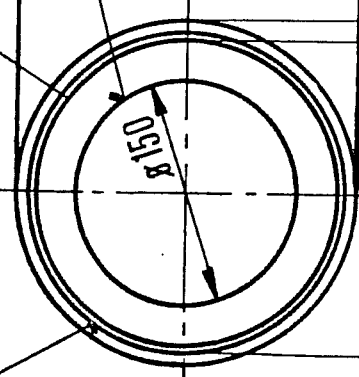
nerezový vlnovec  $\neq 0,2$



obrys vlnovce

vnější

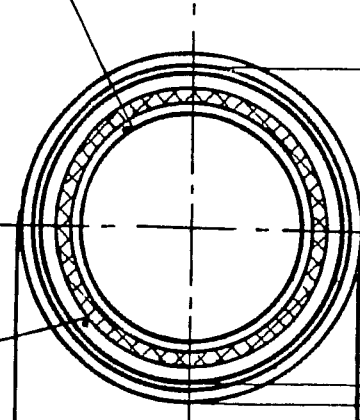
vnitřní



křemenná šroubovice  $\varnothing 177/160$

Mo clona

Mo clona

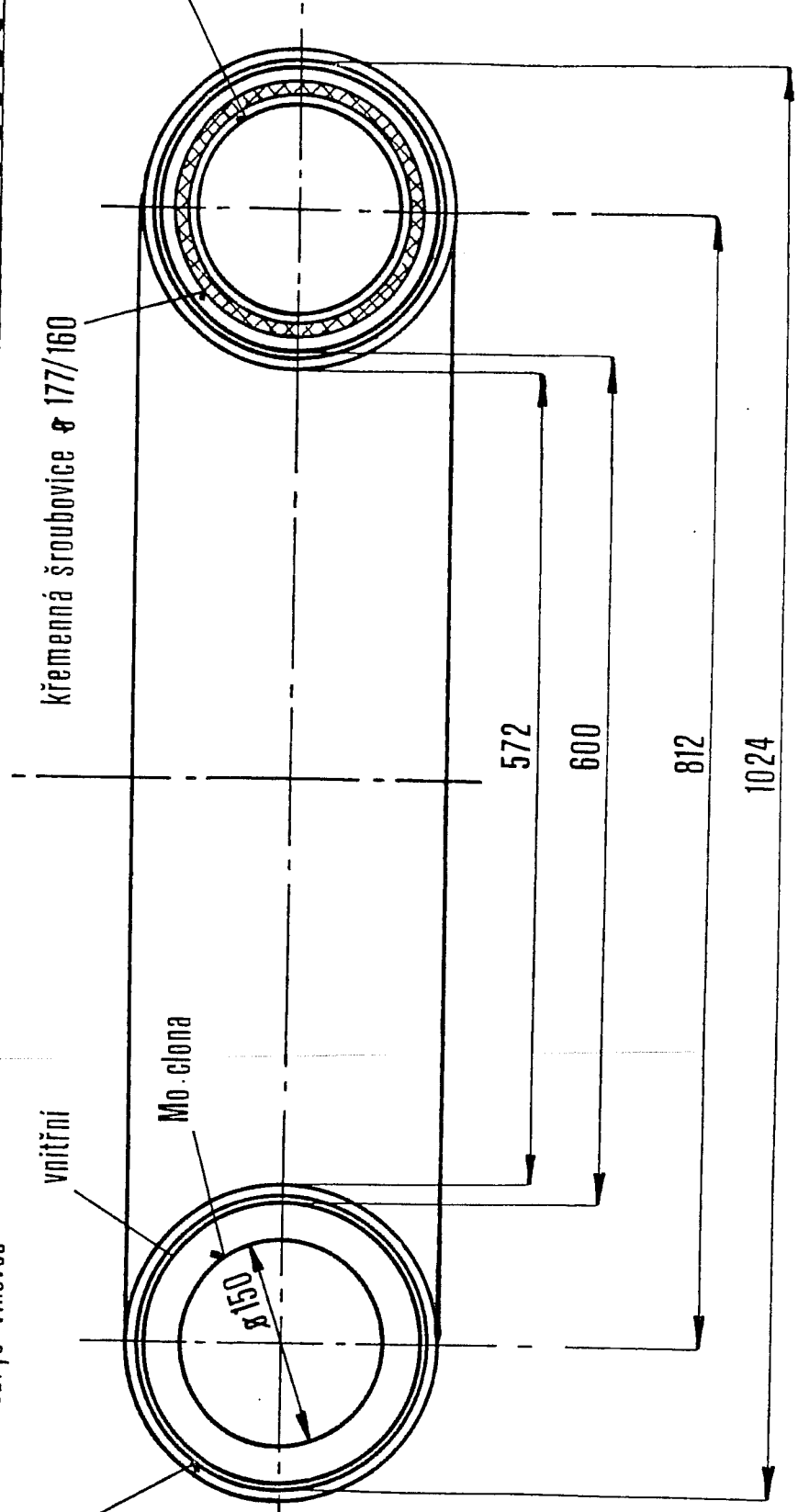


572

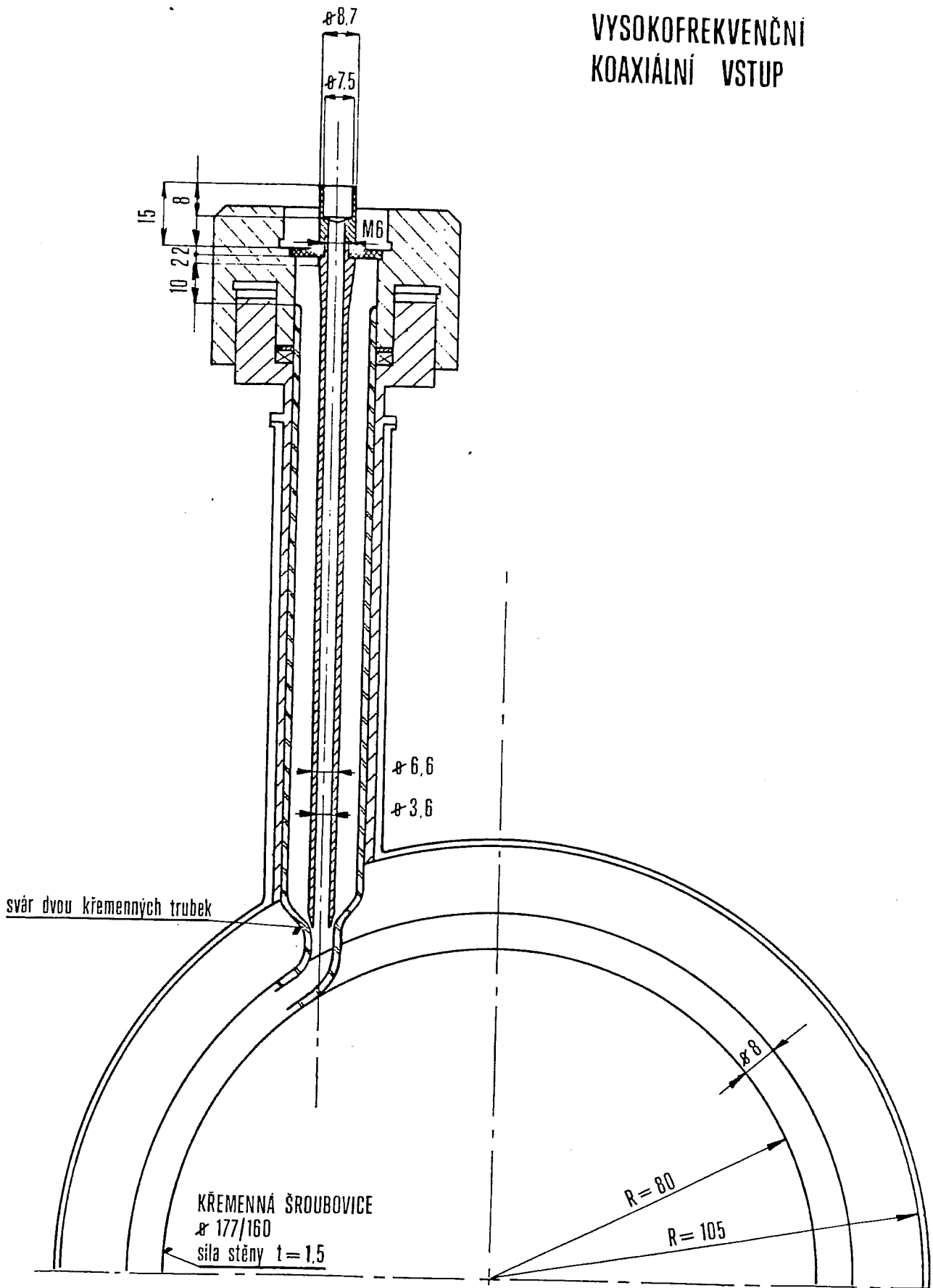
600

812

1024



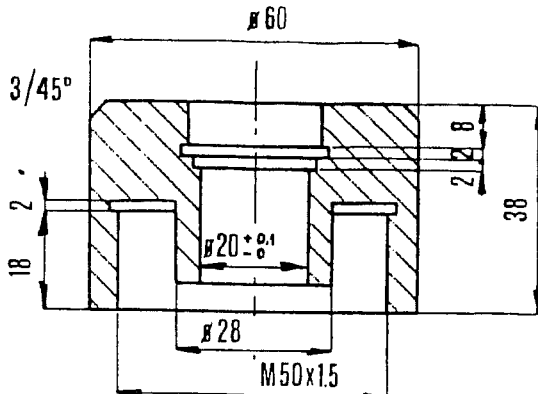
# VYSOKOFREKVENČNÍ KOAXIÁLNÍ VSTUP



Obr. 12

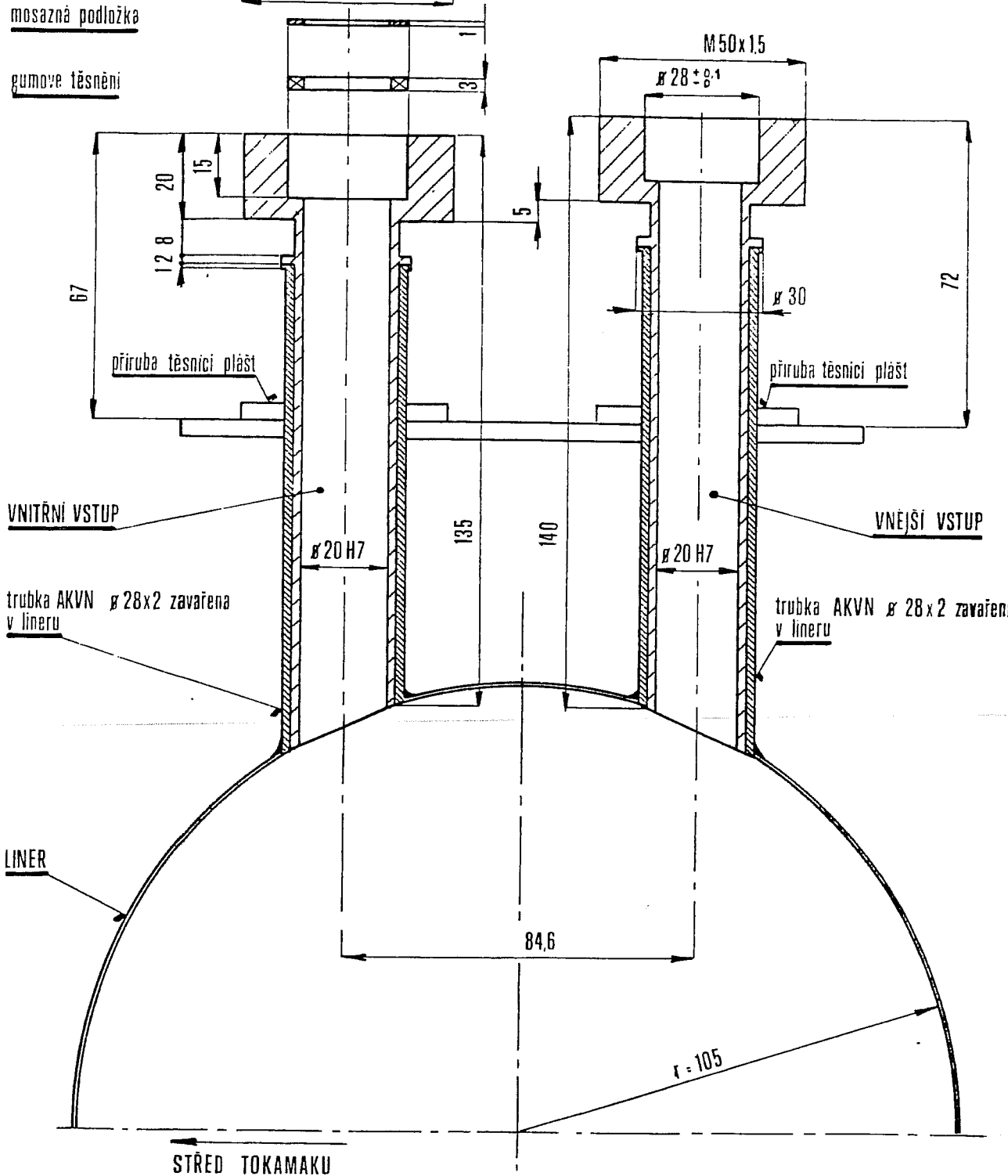
# DETAILY VYSOKOFREKVENČNÍHO KOAXIÁLNÍHO VSTUPU

těsnicí matice



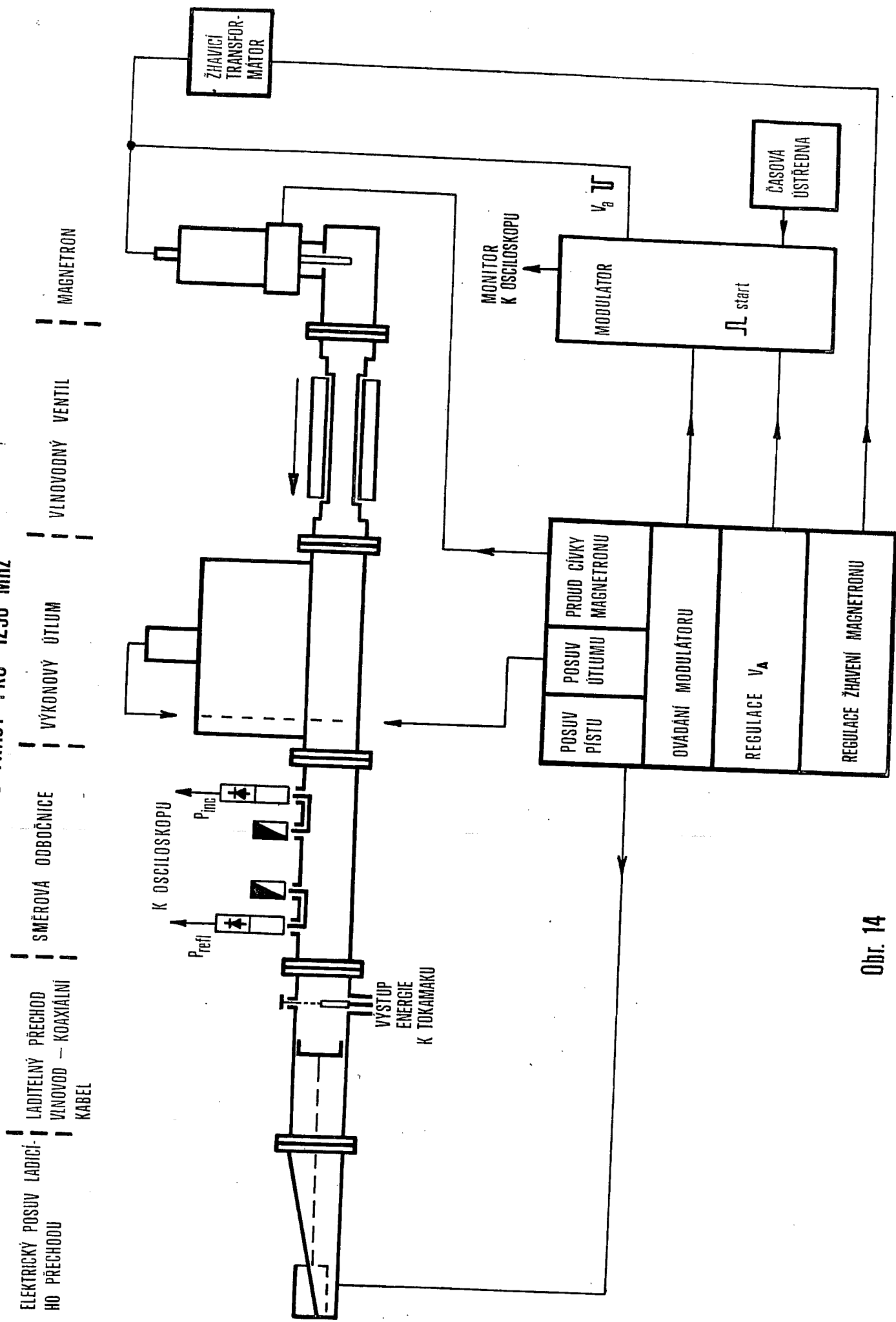
mosazná podložka

gumové těsnění



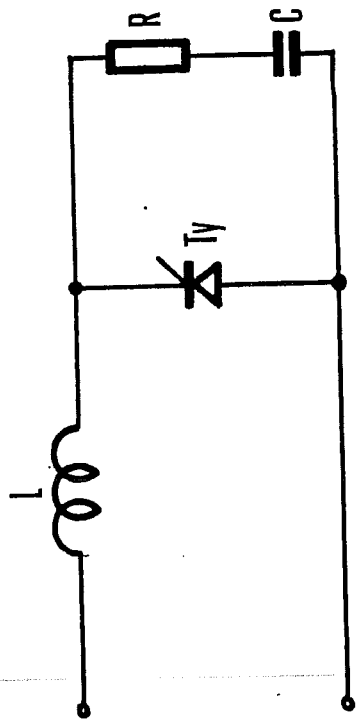
Obr. 13

# SCHEMA VLNOVÉ TRASY PRO 1250 MHz



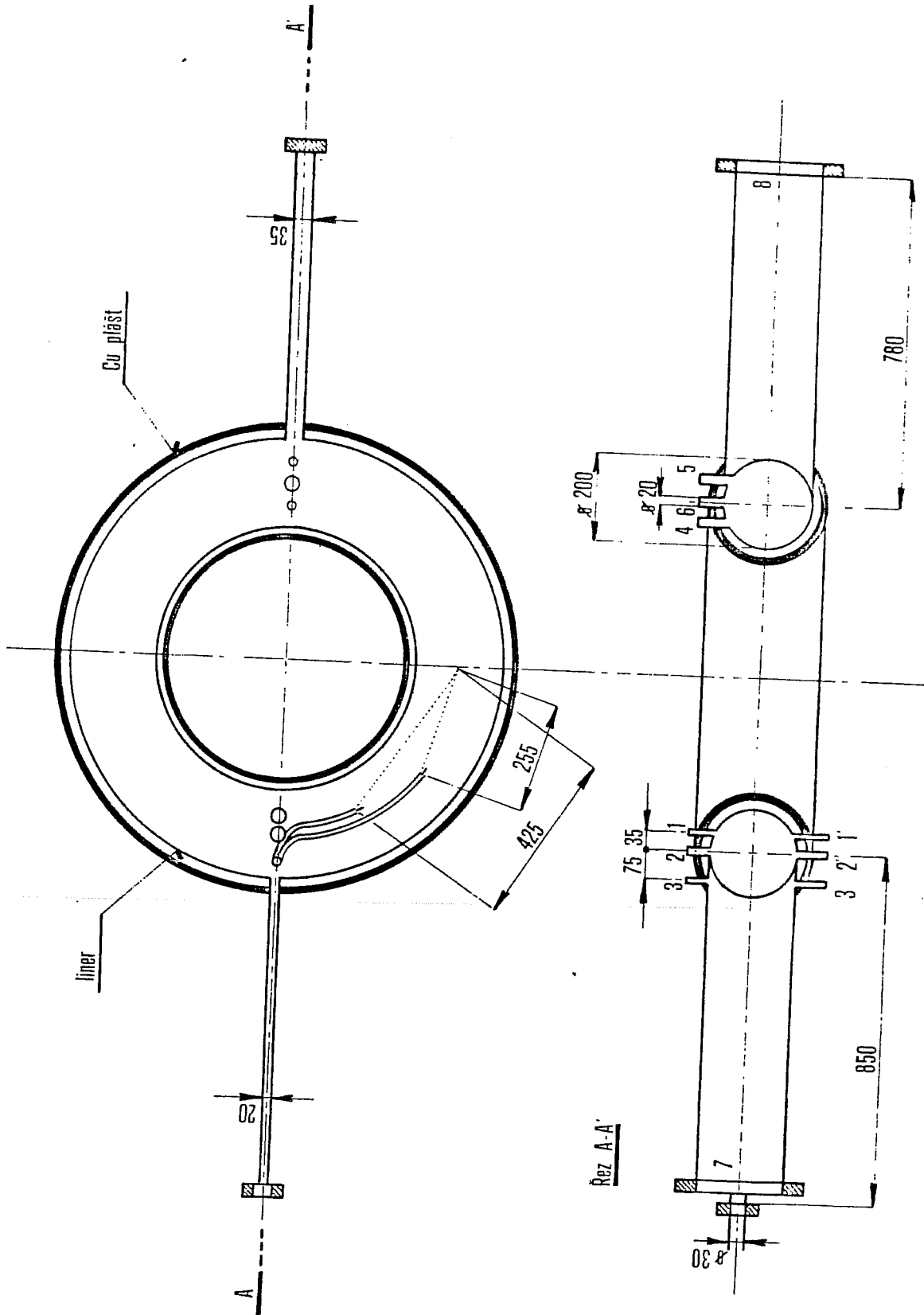
Obr. 14

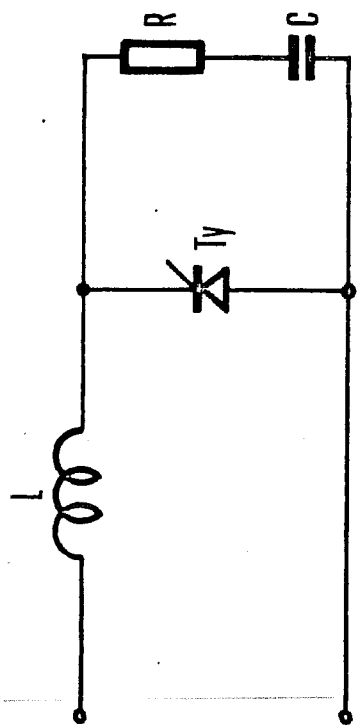




Obr. 1\*

# DIAGNOSTICKÉ VSTUPY

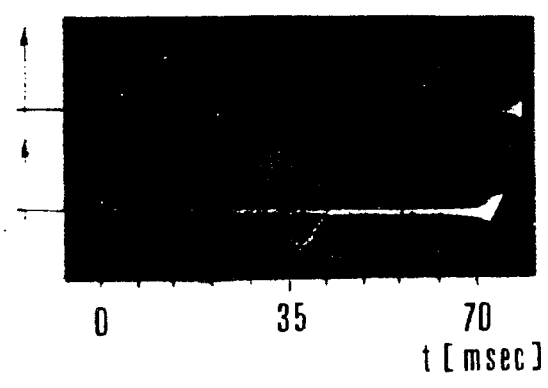




Обр. 1\*

$$U_{LC} = 1,5 \text{ kV} ; U_C = 1,9 \text{ kV}$$

proud v cívkách  
vytvářejících B  
proud tvarovací  
LC linky



citlivost  
01 V/cm  
05 V/cm

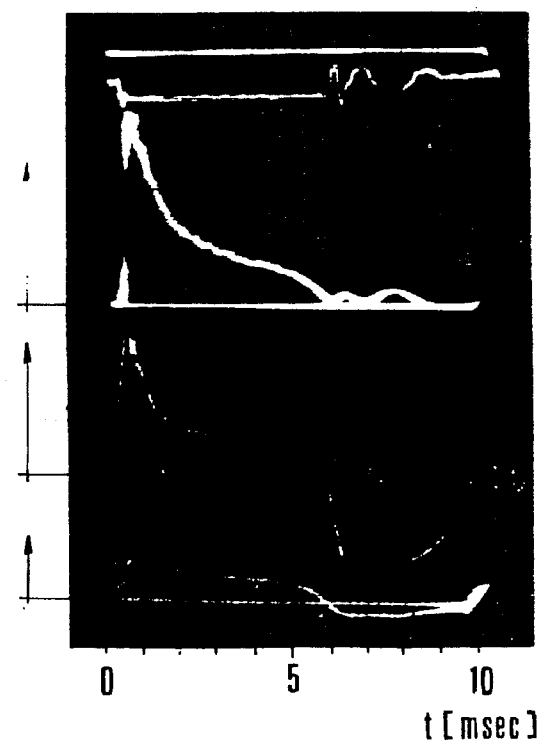
OBR. 16

8 mm  
interferogram

$H_B (4860 \text{ \AA})$

U

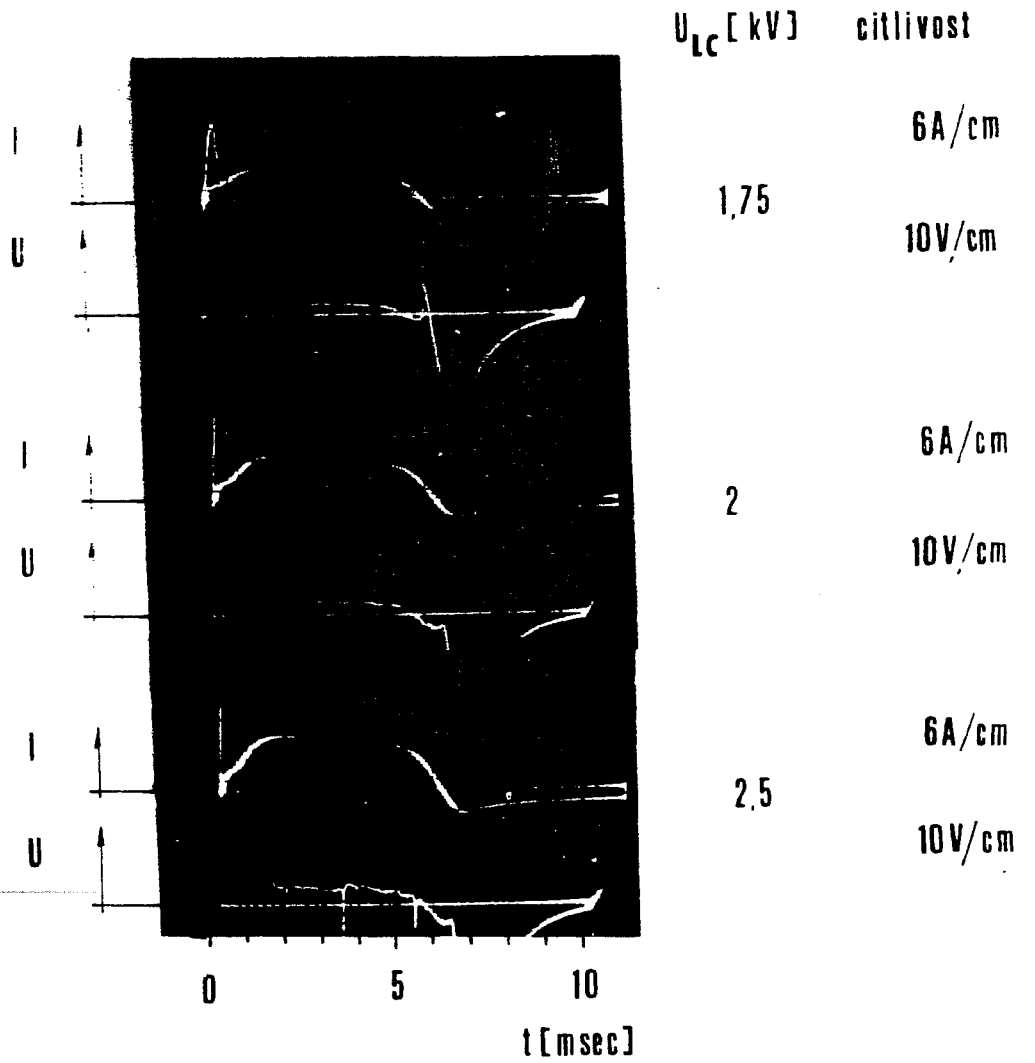
I



citlivost  
25 mV/cm  
0,5 V/cm  
10 V/cm  
25 mV/cm

OBR. 17

$p = 2 \cdot 10^{-4}$  Torr ;  $U_c = 1,9$  kV



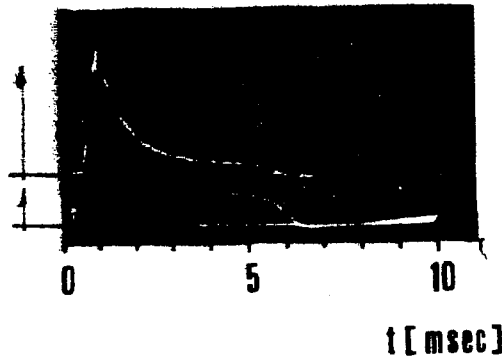
OBR.18

$p = 4 \cdot 10^{-4}$  Torr

$U_c = 1,8$  kV,  $U_{LC} = 1,5$  kV

citlivost

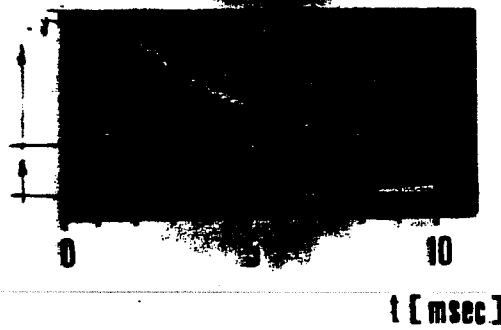
$H_{\beta}$  (4860 Å)



1 V/cm

25 mV/cm

$C_{III}$  (4647 Å)



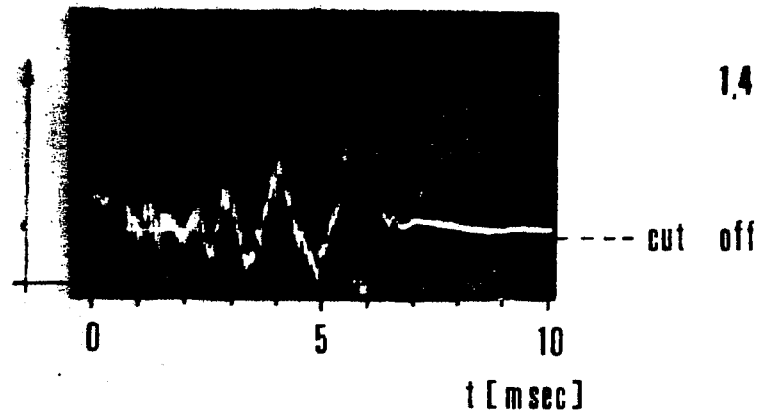
1 V/cm

25 mV/cm

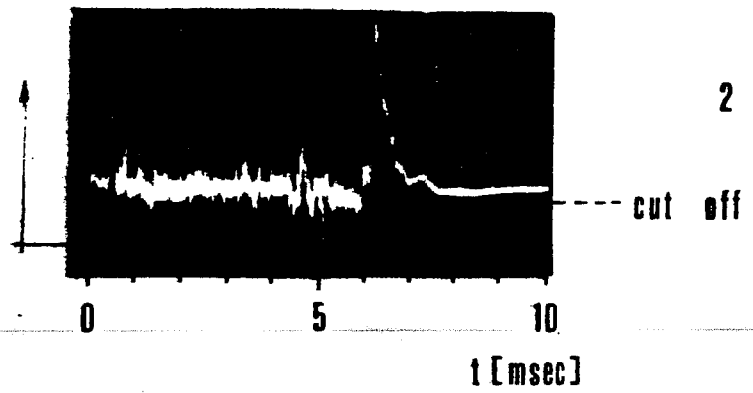
$U_c = 1.9 \text{ kV}, p = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Torr}$

$U_{LC} [\text{kV}]$

8 mm  
interferogram



8 mm  
interferogram



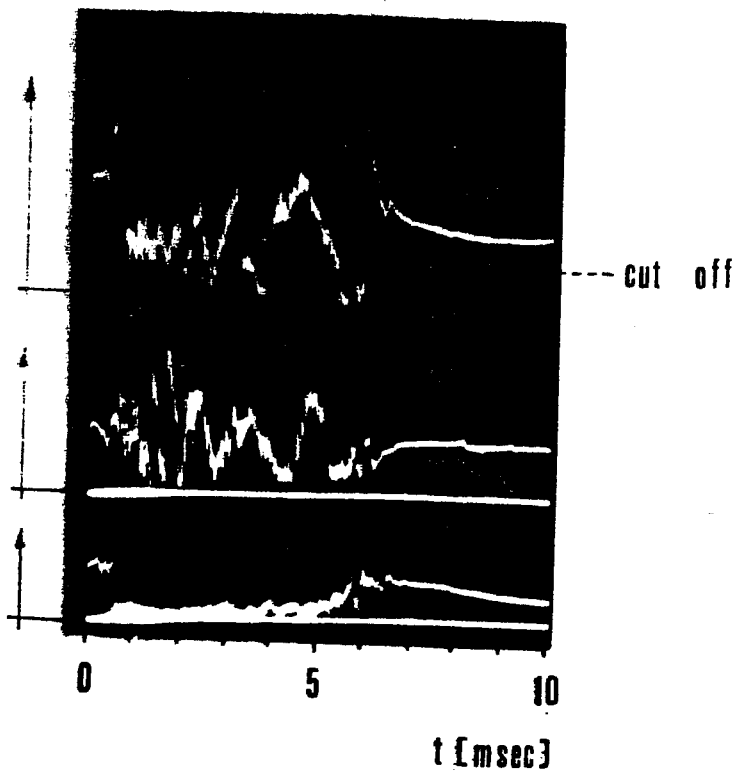
OBR. 20

$p = 2.10^{-4}$  Torr.  $U_C = 1.9$  kV.  $U_{LC} = 1.75$  kV

8mm  
interferogram

$P_{refl}$

$P_{trans}$



OBR. 21