

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Synchrotrón AV SSSR na energie do 10 BeV

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 2 (1957), No. 1, 67--68,69--76

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137170>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1957

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# SYNCHROFÁZOTRON AKADEMIE VĚD SSSR NA ENERGIE DO 10 BeV<sup>1)</sup>

*Krátký popis, základní parametry a dílce synchrofázotronu na 10 BeV. O jednotlivých otázkách projektu a stavby tohoto urychlovače bylo podrobně pojednáno v řadě referátů na Všesvazové konferenci o fyzice částic vysokých energií, v sekci urychlovačů.*

## Úvod

Rozvoj nukleární fyziky je přímo spjat s pokroky v urychlovací technice. Fysikové se přirozeně snaží dostat urychlovače částic, které by jim dodávaly co možná největší energie. Stavba urychlovače protonů na energie až 10 BeV byla navržena Akademií věd SSSR. V době, kdy návrh byl podán, měl Sovětský svaz již jisté zkušenosti ve stavbě a využití urychlovačů protonů a elektronů na energie set milionů eV. Tyto zkušenosti umožnily vypracovat projekt a postavit gigantický urychlovač protonů na energie až 10 BeV<sup>2)</sup>.

Na stavbě synchrofázotronu, který je dále popisován, se zúčastnili vědci a inženýři různých speciálních oborů. Ve Fyzikálním ústavě P. N. Lebeděva AV SSSR byly vypracovány fyzikální základy urychlovače [1]. Ve vědeckém výzkumném institutu elektrofyzikálních přístrojů MEP SSSR a v Radiotechnické laboratoři AV SSSR byly vypracovány projekty a základní přístrojové vybavení urychlovače. V Charkovském fyzikálně technickém institutu AV USSR byl postaven lineární urychlovač — injektor<sup>3)</sup>.

Zvláště je nutno se zmínit o velké pozornosti a podpoře, kterou synchrofázotronu na 10 BeV v prvních letech stavby věnoval zesnulý prezident AV SSSR akademik S. I. Vavilov, a o pomoci, kterou trvale poskytoval ředitel Fyzikálního ústavu P. N. Lebeděva AV SSSR akademik D. V. Skobelcyn.

Urychlovač je postaven ve znovuzřízené Elektrofyzikální laboratoři AV SSSR, která byla v těchto dnech předána Spojenému ústavu nukleárních výzkumů. Stavba urychlovače je toho času hotova a provádějí se již jen práce na konečné úpravě.

V dalším se uvádí jen krátký popis tohoto obrovského zařízení. Podrobně bylo o něm referováno na Všesvazové konferenci o fyzice částic vysokých energií v Moskvě v roce 1956.

## Základní charakteristiky

Urychlovač, o němž je v dalším řeč, je, podobně jako všechny urychlovače na energie větší než 1000 MeV, které jsou již v provozu, nebo které jsou ve stavbě, synchrofázotronem. Princip, na němž je funkce synchrofázotronu založena, je jak známo charakterizován tak zvaným autofázováním částic, které se pohybují v proměnném magnetickém poli po stále nebo téměř stále „rovnovážné“ dráze. Frekvence urychlovacího napětí se musí měnit úměrně rychlosti protonů. Částice se pohybují ve vakuové komoře, umístěné

<sup>1)</sup> V. I. Veksler, D. B. Jefremov, A. L. Minc, M. M. Vejbsajn, F. A. Vodopjanov, M. A. Gašev, A. I. Zejdlic, P. P. Ivanov, A. A. Kolomenskij, J. G. Komar, I. F. Malyšev, N. A. Monoszon, I. Ch. Něvjažskij, V. A. Petuchov, M. S. Rabinovič, S. M. Rubčinskij, K. D. Sinělnikov, A. M. Stolov, *Synchrofázotron na energii 10 BeV AN SSSR*, Atomnaja energija, č. 4, 1956. Referát z Všesvazové konference o fyzice částic vysokých energií, Moskva, 1956.

<sup>2)</sup> Je to dnes největší urychlovač nabitých částic na světě. Druhý největší urychlovač na světě je berkeleyjský „bevatron“, (USA), který urychluje částice až na 6,2 BeV (1 BeV = 1 000 000 000 eV; místo BeV se používá také znaku GeV). *Pozn. překl.*

<sup>3)</sup> Než se částice zavedou do urychlovače na vysoké energie, urychlují se zpravidla předběžně na energie řádově do 10 MeV. Předběžné urychlení částic se děje obvykle v lineárních urychlovačích — injektorech. *Pozn. překl.*

mezi póly prstencového magnetu. Magnet sestává ze čtyř kvadrantů (střední poloměr je 28 m), oddělených osmimetrovými příkými mezerami. V jedné z těchto mezer je umístěna soustava, již se částice do urychlovače zavádějí, v dalších dvou mezerách jsou urychlovací elektrody. Čtvrtá mezera konečně slouží k vyvádění urychlených částic ze synchrořázotronu.

Protony se předběžně urychlují v lineárním urychlovači (injektoru) na energii 8,5—9 MeV, načež projdou 10 m dlouhou příkýmou drahou. Na této cestě dochází k fokusaci protonového svazku dvojitým magnetickým korektorem, magnetickou čočkou a justačným kondensátorem. Svazek částic se pak stáčí otočným fokusačným magnetem o 75° a zavádí se do vakuové komory synchrořázotronu. Vakuová komora má aperturu<sup>4)</sup>  $200 \times 36$  cm. Úhrnná délka komory je 204 m.

Výpočty ukazují, že poloha protonového svazku při vstupu do vakuové komory musí být nařizena s přesností na několik úhlových minut. K tomuto seřizení slouží elektrostatický inflektor, sestávající z pěti otočných desek, k nimž se přivádí stálé stabilizační napětí, regulovatelné do 100 kV. Částice se zavádějí do komory, jakmile intenzita magnetického pole v mezeře magnetu dosáhne 150 Oe. Urychlování končí při intenzitě magnetického pole rovné 13.000 Oe. Částicím se uděluje přírůstek energie ve dvou trubcích, umístěných ve dvou diametrálně položených mezerách mezi kvadranty magnetu. Efektivní amplituda urychlovacího napětí se může měnit od 3 do 8 kV. Urychlovací cyklus trvá asi 3,3 vteřiny, opakuje se každých 12 vteřin.

Po urychlení může být protonový svazek vyveden do speciálních terčů buď v bezprostřední blízkosti elektromagnetu urychlovače (do mezer a kolem okének v jármu magnetu), nebo ve zvláštním pavilonu.

Základní parametry urychlovače byly propočítány na podkladě teorie synchrořázotronu, vypracované ve Fysikálním ústavu P. N. Lebeděva AV SSSR [3]. Tato teorie umožnila stanovit přípustné tolerance pro základní parametry urychlovače, stanovit příčiny možných ztrát částic při urychlování, určit optimální podmínky pro zavádění částic, určit nutnou konfiguraci magnetického pole a řešit mnoho jiných otázek, jež souvisely s projektem a stavbou urychlovače a s jeho uvedením do provozu. Řada složitých úloh, spojených se zaváděním částic a s jejich ztrátami při rezonančním zvětšování amplitudy kmitů, byla řešena na modelu, který dával protonový svazek s energií až 180 MeV [2, 3].

Sovětská teorie synchrořázotronu je známa; používá se jí v mnoha laboratořích při propočtech všech nových urychlovačů. Omezíme se proto na kvalitativní popis pohybu částic.

Pohyb částic v cyklických urychlovačích lze rozložit do tří složek:

1. Pohyb po konstantní rovnovážné oběžné dráze s rezonanční frekvencí oběhu. Částice by při oběhu po rovnovážné dráze byla stále v rezonanci s frekvencí urychlovacího pole.

2. Mírné kmitání kolem rovnovážné dráhy, které je spojeno s odchylkou od přesné resonance. Toto kmitání se nazývá radiálně fázové, neboť odchylka od resonance vede ke změně fáze vysokofrekventního pole, které částice při každém průchodu mezerou urychluje. Perioda fázových kmitů se mění od 500 do 1500 mikrosekund, což je sto až dvatisíckrát více, než činí perioda oběhu. Říká se, že částice se při odchylce od rovnovážné dráhy pohybuje po okamžité dráze, která kolem rovnovážné dráhy kmitá.

3. Rychlé kmitání kolem okamžité dráhy s periodou od 7 do 2 mikrosekund.

Je tedy pohyb částice v synchrořázotronu takový:

Okamžitá dráha mírně kmitá kolem pevné rovnovážné dráhy, která probíhá uprostřed vakuové komory. Částice kromě toho rychle kmitají kolem okamžité dráhy.

<sup>4)</sup> Obsah příčného řezu. Pozn. překl.

Aby rovnovážná dráha byla stálá, musí být změny intenzity magnetického pole a frekvence urychlovacího pole synchronisovány. Chyba  $\Delta f$  ve frekvenci vede k posunu dráhy podle poloměru. Pro ilustraci uveďme, že v synchrofázotronu na 10 BeV vede chyba  $\pm 0,1\%$  ve frekvenci k posunu dráhy o  $\Delta r = \pm 6$  cm.

Radiálně fázové kmity se obvykle během urychlování tlumí. V našem případě se jejich amplituda mění od 50 cm na začátku urychlování do 1 cm při jeho ukončení.

Obtíže při spouštění synchrofázotronu jsou spojeny zejména s okolností, že amplituda radiálních kmitů může při jakémkoli buzení vzrůst do té míry, že nakonec dojde ke ztrátám částic ze svazku.

U synchrofázotronu je třeba zvláštních opatření pro odstranění vyšších harmonických magnetického pole, které vznikají při pulsaci usměrněného proudu, jímž se napájí vlnití magnetu. Vysvětluje se to tím, že frekvence radiálně fázových kmitů se neustále mění, a že může dojít k resonanci s buzením. Zejména resonance s druhou harmonickou (1200 Hz) může vést k obzvláště velkým ztrátám částic.

Ke ztrátám částic může dojít nejen pulsací napětí magnetického pole, ale i výkyvy v amplitudě nebo frekvenci urychlovacího elektrického pole. Zvláště nebezpečné je — jak ukazuje teorie i zkušenost — šumové rozkmitání při poměrně dlouho trvajícím urychlování. Toto rozkmitání je jak námo úměrné  $\sqrt{t}$ , kde  $t$  je doba urychlování.

Pro stanovení přípustných tolerancí má velký význam teorie volných kmitů a numerické charakterisování vlivů různých excitací na pohyb částic. V sovětských theoretických pracích byly zkoumány prosté parametrické resonance, uvažovány souvislosti mezi radiálními a vertikálními kmity a vliv nelineárnosti. Výsledkem bylo vymezení jisté efektivní oblasti bez resonancí, kde  $0,55 < n < 0,75$ .<sup>5)</sup>

S druhé strany může být resonancí s volnými kmity, které jsou pro urychlovací proces velmi nebezpečné, využito pro zvýšení efektivnosti zavádění částic, a to oblasti resonančních hodnot  $n$  u okraje magnetu. Velmi významné je pro tento účel, že konfiguraci magnetického pole lze měnit speciálními vnutitými.

Základní theoretické a technické problémy spojené se stavbou synchrofázotronu na 10 BeV, jež bylo třeba vyřešit, jsou tyto:

- Stavba elektromagnetu se systémem napájení;
- konstrukce vakuové komory s příslušnou čerpací soustavou;
- konstrukce systému vysokofrekvenčního urychlování a zavádění částic do urychlovače;
- bylo třeba dále vykonat mnoho theoretických a experimentálních prací, jež mají obecný význam pro stavbu velkých cyklických urychlovačů, na příklad:
  - vypracování method pro propočítání elektromagnetů;
  - vypracování method pro korigování a regulování magnetického pole;
  - vypracování teorie a schemat velkých transformačních zařízení;
  - vypracování method sledování frekvence urychlovacího napětí za intenzitou magnetického pole;
  - vypracování method zesilování vysokofrekvenčních kmitů při změně frekvence v širokých mezích atd.

### Elektromagnet a jeho napájení

Rozměry, váha a napájecí výkon elektromagnetu prudce rostou s růstem energie, na kterou se mají částice urychlit. Při dané maximální intenzitě magnetického pole, daných tolerancí pro magnetické charakteristiky a pro sledování frekvence urychlovacího napětí za magnetickým polem roste váha magnetu přibližně s 2,5tou mocninou, energie magnetického pole pak s třetí mocninou maximální energie, na kterou se částice urychlují.

<sup>5)</sup>  $n$  je jistý parametr, na němž závisí únik částic během urychlování, t. j. intenzita vyváděného svazku částic. Pozn. překl.

Stavba obyčejných synchronfázotronů na velké energie urychlovaných částic naráží proto především na technické a ekonomické obtíže, spojené s výrobou velkých elektromagnetů a s konstrukcí příslušných napájecích soustav.

Rozměry a váhu elektromagnetu a výkon napájecího proudu lze zmenšit jen zvýšením maximální intenzity magnetického pole a připuštěním větších tolerancí v konstrukci zařízení a v celém jeho pracovním režimu. Značnější zvýšení intenzity magnetického pole nad velikost, jež byla pro popisovaný urychlovač zvolena, neposkytuje však významnějšího ekonomického efektu, neboť má za následek velké zvětšení váhy elektromagnetu i výkonu napájecí soustavy. Kromě toho by vznikly značné obtíže pokud jde o korekce magnetického pole. Váha elektromagnetu a výkon napájecí soustavy — dvou elementů, které jsou v celé stavbě synchronfázotronu nejdražší — lze proto zmenšit jen připuštěním větších tolerancí.

Tolerance i relativní velikosti apertury urychlovače na 10 BeV jsou značně menší než u jiných analogických urychlovačů. Připuštění poměrně velkých tolerancí vedlo k větším požadavkům na kvalitu elektromagnetu a k vypracování speciálních method pro přesné korigování magnetického pole.

Pro korigování magnetického pole byly vypracovány tyto soustavy:

- Soustava odmagnetování, která odstraňuje rušivý efekt zbytkové magnetisace;
- soustava kompenzace dynamických poruch magnetického pole;
- soustava korekcí polohy střední roviny magnetického pole;
- soustava regulování ukazatele spádu magnetického pole;
- soustava korekcí azimutální nehomogenosti a
- soustava rozšíření pracovní oblasti pole při velkých indukcích, která kompenzuje vliv efektu nasycení.

Výsledky předběžných zkoušek byly uspokojivé [4, 5].

Každý ze čtyř kvadrantů elektromagnetu sestává z dvanácti bloků. Váha jednoho bloku je 750 tun. Vnější průměr elektromagnetu je 72 m. Elektromagnet s vinutím váží 36,000 tun [6].

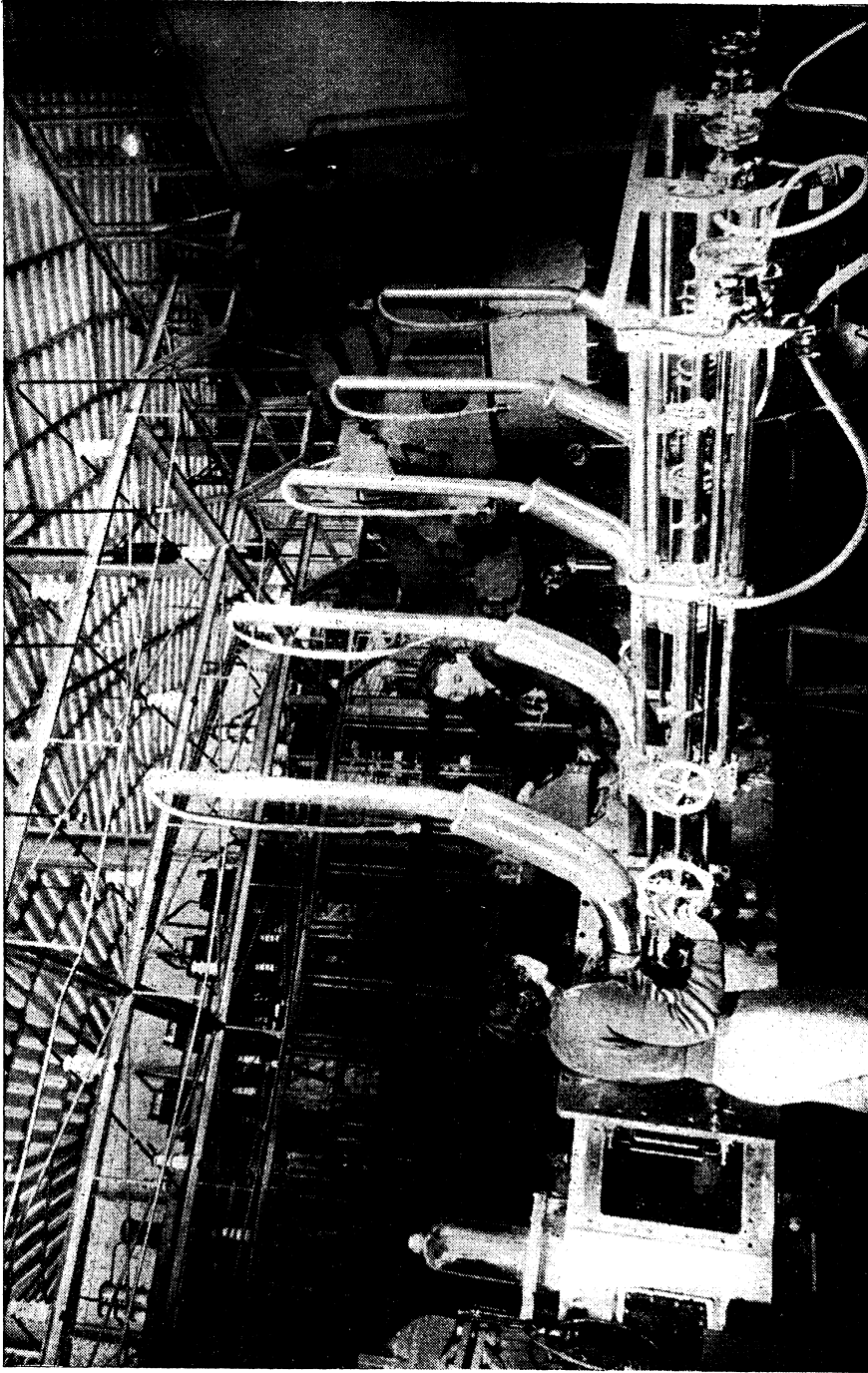
Pro napájení magnetu byla zvolena soustava, v níž se energie hromadí v rotujících setrvačnicích. Mechanická energie se přeměňuje v elektrickou pomocí synchronních strojů, spojených přímo s ignitrony. V periodě narůstání magnetického pole předává napájecí soustava energii magnetickému poli elektromagnetu, iontové měniče pracují v usměrňovacím režimu a synchronní stroje pracují jako generátory. Jakmile se dosáhne maximálního napětí magnetického pole — 13.000 Oe — převedou se měniče v invertorový režim a energie, nahromaděná v elektromagnetu se vrací synchronním strojům, které pak pracují jako motory a přeměňují energii magnetického pole v kinetickou energii setrvačnickových mas. V takové soustavě odebírají elektromotory ze sítě jen proud nutný pro nahrazení ztrát v soustavě.

Hlavní data o napájecí soustavě:

Maximální výkon je 140.000 kVA, maximální proud 12.800 A, maximální napětí 11.000 V. V soustavě jsou čtyři paralelně spřažené agregáty. Ignitronů je 96.

Velký špičkový výkon zařízení vyžaduje velké množství paralelně pracujících ignitronů. Při tom vzniká řada problémů, spojených s nutností rozdělovat zatížení na jednotlivé ignitrony rovnoměrně. Dále je třeba co nejvíce potlačovat nebezpečné harmonické magnetického pole, což vyžaduje, aby se do vinutí elektromagnetu přivádělo usměrněné napětí s velmi malými pulzacemi.

Tento problém byl řešen použitím synchronních strojů s dvěma soustavami třífázových vinutí na každém stroji, navinutých ve vzájemné fázi 30 elektrických stupňů. Každá soustava vinutí napájí jedno můstkové měničové schéma [7]. Pro další zmenšení



*Obr. 2. Zaváděcí zařízení. Před vstupem do urychlovací komory musí protonový svazek projít soustavou kondenzátorů s napětím 100000 V.*

pulsací magnetického pole byla vypracována zvláštní soustava, která vytlačuje pulsující část magnetického toku z pracovního prostoru do rozptylové oblasti pole.

Při vypracování napájecí soustavy byla věnována velká pozornost tomu, aby byl zmenšen vliv náhodných poruch v pracovním režimu. Náhodných poruch (zpětného zápalu, vynechání fáze a p.) je třeba zvláště se vyvarovat v režimu-invertování, neboť vedou ke ztrátě stability soustavy. Je třeba použít zvláštních opatření, aby se zařízení uvedlo uměle do stabilního režimu, jakmile se tyto poruchy odstraní.

### Vakuová soustava

Hlavní problémy při stavbě vakuové komory synchrofázotronu jsou spojeny s jejími velkými rozměry (objem komory je asi  $160 \text{ m}^3$ ), s vysokým vakuem (řádu  $10^{-6} \text{ mm Hg}$ ) a s okolností, že proměnné magnetické pole vylučuje použití masivních kovových prvků v konstrukci komory.

Úloha byla řešena dvoukomorovým systémem, sestávajícím z vnitřní vysokovakuové komory a z vnější předvakuové komory. To umožnilo vyložit horizontální povrchy vysokovakuové komory, jimiž jde magnetický tok, tenkými ( $0,15 \text{ mm}$ ) pláty z nerezavějící oceli. Pláty jsou uloženy na izolovaných dílcích takových rozměrů, při nichž poruchy magnetického pole, vznikající vírovými proudy, jsou v přípustných mezích. Horizontální části vysokovakuové komory jsou upevněny přímo k pólovým nástavcům elektromagnetu.

Pólové nástavce elektromagnetu jsou zároveň konstrukčními prvky předvakuové komory a jsou zpevněny pláty z textolitu a z gumy. Boční stěny této komory jsou z duraluminia a jsou potaženy gumou. V předvakuové komoře se obvykle udržuje tlak řádově  $1 \text{ mm Hg}$ . K ochraně proti mechanickým poruchám vysokovakuové komory při havarijním zvýšení tlaku v předvakuové komoře se používá ochranné soustavy s uzavěry a diafragmaty [8].

Vysokovakuová komora se vyčerpává 56 difusními vývěvami. Výkon každé vývěvy je  $5000 \text{ l/sec}$  [9]. Vysokovakuová soustava je opatřena ventily, které ji spojují se soustavou pro centrální přísun kapalného dusíku.

Předvakuová komora se vyčerpává 16 vývěvami typu VN-6.

### Zavádění a urychlování částic

Stavba vysokofrekvenční soustavy pro urychlování protonů, pro zavádění částic do urychlovače a pro řízení těchto dějů si vyžádala řešení řady radiotechnických a elektro-nických problémů. Především bylo třeba vypracovat radiotechnickou soustavu k vytvoření elektrického pole s frekvencí, měnící se v širokých mezích, jež by zabezpečovala nutný přírůstek energie částic. Byla zvolena soustava, sestávající z frekvenčně modulovaného oscilátoru a širokopásmových vysokofrekvenčních zesilovačů.

Jako urychlovacích prvků bylo po prvé použito elektrod ve formě elektronek s postupnou vlnou, jež se ukazují nejefektivnějšími pro synchrofázotrony na velké energie. Urychlovací soustava byla vyzkoušena na zmíněném již modelu na  $180 \text{ MeV}$ .

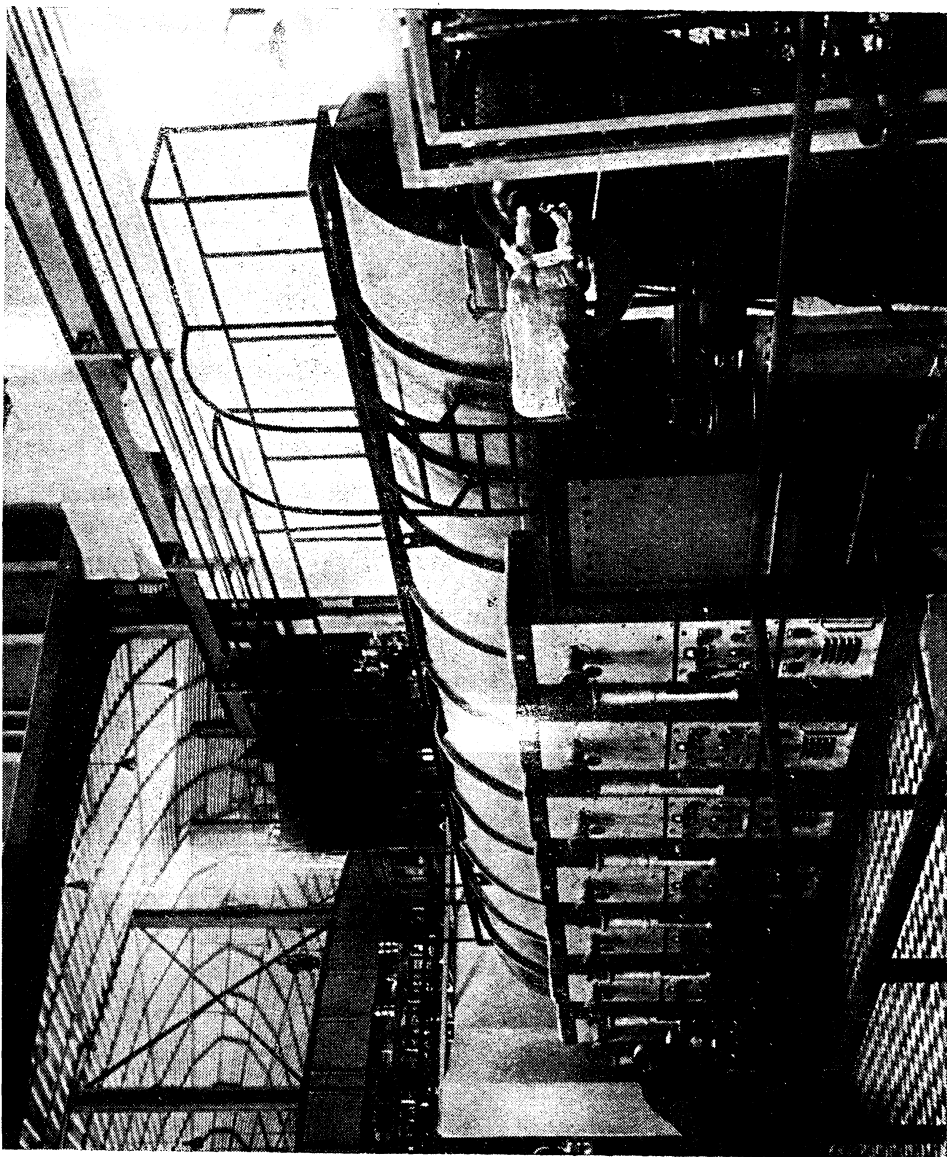
Bylo třeba dále konstruovat oscilátor, jehož frekvence by se měnila od  $0,182 \text{ MHz}$  do  $1,5 \text{ MHz}$  v soulase s intenzitou magnetického pole s přesností nejméně na  $10^{-3}$ . Před volbou oscilátoru byly srovnány různé metody širokopásmové modulace frekvence. Zvolena byla metoda stabilisace modulační charakteristiky oscilátoru pomocí negativní zpětné vazby přes přesný frekvenční detektor. Oscilátor, postavený pro synchrofázotron na  $10 \text{ BeV}$ , má frekvenční pásmo od  $0,15$  do  $1,5 \text{ MHz}$ .

Stabilita modulační charakteristiky oscilátoru byla podrobena zkoušce po dobu více než  $100$  hodin; přesnost se ukázala lepší než  $\pm 7 \cdot 10^{-4}$ .

Experimentální výzkumy ukázaly, že relativní hladina parazitní frekvenční modulace v pásmu od 600 do 2000 Hz na frekvencích, splývajících s harmonickými napájecí sítě, je nižší než  $5 \cdot 10^{-7}$ , a spektrální hustota šumové modulace v témž pásmu frekvencí že je menší než  $0,05 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ .

Frekvence oscilátoru se řídí intenzitou magnetického pole v mezeře elektromagnetu.

V první variantě byl použit pomocný elektromagnet, umístěný bezpečně s ohledem na vyzařování ze stroje. Vinutím tohoto pomocného elektromagnetu prochází budící proud hlavního elektromagnetu. V mezeře pomocného elektromagnetu je umístěna cívka osci-



*Obr. 3. Do synchrotrónu musí protony vstoupit již s jistou počáteční energií. Za tím účelem jsou předběžně urychlovány v lineárním urychlovači na energii kolem 8–9 MeV. Na obraze pohled na lineární urychlovač.*



lačního obvodu, která má ferritové jádro. Změna napětí magnetického pole má za následek změnu magnetické permeability jádra a tedy také změnu frekvence kmitů oscilátoru.

V druhé variantě se používá integrátorového snímače magnetického pole, sestávajícího z indukční cívky, umístěné v mezeře hlavního nebo pomocného elektromagnetu, a elektrického integrátoru, jehož výstupní napětí řídí frekvenci oscilátoru.

V obou variantách se dosahuje souhlasu odpovídajících si hodnot frekvence urychlovacího pole a intenzity magnetického pole s přesností lepší než  $\pm 10^{-3}$  pomocí funkcionální transformace signálu, jímž se řídí frekvence oscilátoru [10, 11].

Frekvenčně modulované kmitů oscilátoru se zesilují do 20.000 V mnohokaskádními širokopásmovými zesilovacími o výkonu 200 kW. Zesilování se děje ve všech kaskádách kromě kaskády koncové, která určuje základní odběr elektrické energie z napájecí sítě. Koncová kaskáda je konstruována jako rezonanční zesilovač.

Kapacita oscilačního obvodu koncové kaskády (1500 pF) je vytvořena elektronkou s postupnou vlnou, a indukčnost cívky s ferritovým jádrem. Automatické ladění oscilačního obvodu do resonance s frekvencí zesilovacích kmitů se provádí změnou magnetické permeability jádra cívky předmagnetováním v poměru asi 1 : 100. Proud procházející vinutím při předmagnetování se reguluje automaticky změnami intenzity, jež přicházejí ze snímače, který reaguje na nesouhlas oscilačního obvodu s frekvencí urychlovacího pole.

Ukázalo se účelným použít blokového systému řazení vysokofrekvenčních zesilovačů, neboť napětí, přiváděné k oběma urychlovacím elektrodám, se sčítá. Umístěním dvou urychlovacích elektrod do protilehlých mezer mezi kvadranty hlavního elektromagnetu se dosáhlo snížení kmitového výkonu na polovinu ve srovnání s variantou, ve které urychlovací elektroda je jen v jedné mezeře mezi kvadranty hlavního elektromagnetu. Tím se také snížila váha ferritu (na dvě tuny).

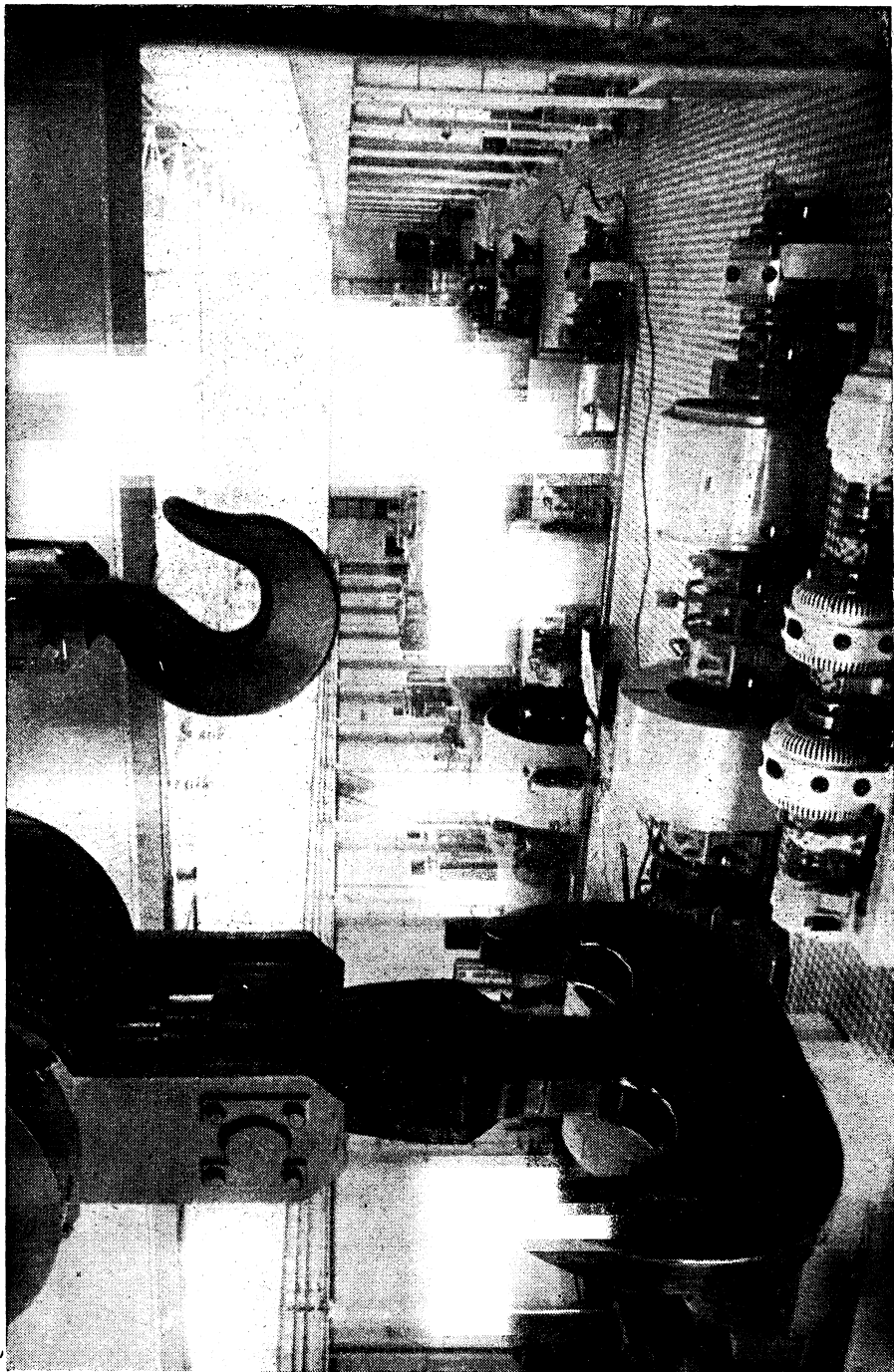
Při určení indukčnosti s ferritovým jádrem, zařazené do obvodu výstupní kaskády vysokofrekvenčního zesilovače, bylo třeba podrobně zkoumat chování ferritů v silných vysokofrekvenčních polích. Na podkladě těchto výzkumů byla proměnná indukčnost provedena jako část koaxiálního vedení, částečně naplněného ferritem [12, 13, 14].

Pro signály, jimiž se zapíná nebo vypíná injektor, vysokofrekvenční urychlovací napětí atd. bylo třeba propracovat snímače magnetického pole nového typu. Potřebná přesnost tu činí  $\pm 10$  mikrosekund, což odpovídá relativní přesnosti  $\pm 3 \cdot 10^{-4}$  a absolutní přesnosti  $\pm 4 \cdot 10^{-8}$  Oe. Okamžité hodnoty intenzity magnetického pole se indikují transformací změn této intenzity ve změny frekvence elektrických kmitů. Z těchto změn elektrických kmitů se formují impulsy, těsně sprážené s okamžitými hodnotami měnící se frekvence a tím také s intenzitou magnetického pole. Bylo dosaženo řídicích impulsových signálů, které zabezpečují přesnost zapínání soustavy zaváděcí a urychlovací lepší než  $\pm 3 \cdot 10^{-4}$  [15].

Pro přesná měření okamžitých frekvencí urychlovacího vysokofrekvenčního napětí byly vypracovány nové měřicí metody, zabezpečující přesnost lepší než  $5 \cdot 10^{-4}$ .

Použití elektromagnetu s časově se měnícím magnetickým polem si vynutilo také vypracování nových metod pro dynamické měření intenzity magnetického pole. Bylo nutno zkonstruovat speciální aparaturu pro přesná měření okamžitých hodnot napětí magnetického pole od 150 Oe do 13.000 Oe s přesností na  $10^{-4}$ . Nejlepší se ukázala metoda, založená na jevu jádrové magnetické resonance.

Pro krátkost tohoto článku se nemůžeme zabývat ostatními, rovněž velmi důležitými zařízeními stroje (lineárním pomocným urychlovačem, soustavou zavádění částic do stroje a j.). Chceme však v závěru poznamenat, že synchrotrón na 10 BeV je dílem společné práce mnoha vědeckých a technických kolektivů a organizací, které do tohoto



*Obr. 4. Pohled do hlavní strojovny s agregáty, které napájíji vinutí elektromagnetu synchrotrónu.*

složitého díla vložily mnoho úsilí a práce. Dnes se konají na tomto stroji zkušební práce a můžeme očekávat, že v nejbližší době bude urychlovač uveden do plného provozu.

Volně přeložil Dr Josef Veselka

#### LITERATURA

- [1] V. I. Veksler, A. A. Kolomenskij, V. A. Petuchov, M. S. Rabinovič, *Fyzikální osnovy sooruzenija sinchrofazotrona na 10 BeV* (Doklad na Vsesojuznoj konferencii po fizike častic vysokich energij, Moskva, 1956).
- [2] L. P. Zinovčev, V. A. Petuchov, *Experimentalnyje issledovanija na moděli bolšogo uskoritelja častic na energiju protonov 10 BeV*, tamtéž.
- [3] I. S. Danilkin, M. S. Rabinovič, *Někotoryje voprosy teorii cikličeskich rezonansnych uskoritelj v svjazi s experimentami na sinchrofazotroně na 180 MeV*, tamtéž.
- [4] A. A. Žuravlev, J. G. Komar, I. A. Mozalevskij, N. A. Monoszon, A. M. Stolov, *Magnitnyje charakteristiki sinchrofazotrona na 10 BeV*, tamtéž.
- [5] M. D. Veselov, A. A. Žuravlev, I. A. Mozalevskij, E. A. Mjae, A. M. Stolov, S. V. Fedukov, *Metody i rezultaty experimentalnogo issledovanija magnitnogo polja sinchrofazotrona na 10 BeV*, tamtéž.
- [6] J. G. Komar, N. A. Monoszon, N. S. Strelcov, G. M. Fedotov, *Někotoryje osobennosti konstrukcij elektromagnita sinchrofazotrona na 10 BeV*, tamtéž.
- [7] M. A. Gašev, J. G. Komar, N. A. Monoszon, A. M. Stolov, F. M. Spevakova, *Sistěma pitanija elektromagnita sinchrofazotrona na 10 BeV*, tamtéž.
- [8] J. G. Komar, I. F. Malyšev, Ja. L. Michelis, A. V. Popkovič, *Vakuumnaja kamera sinchrofazotrona na 10 BeV*, tamtéž.
- [9] S. A. Vekšinskij, *Vakuumnyje otkačnyje agregaty dlja uskoritelj, tamtéž.*
- [10] A. L. Minc, M. S. Rubčinskij, M. M. Vejsbejn, F. A. Vodopjanov, A. A. Kuzmin, V. A. Uvarov, *Sistěmi svjazi častoty uskorjaščego polja i naprjaženosti magnitnogo polja v sinchrofazotronach, tamtéž.*
- [11] F. A. Vodopjanov, *Zadajuščij generator v sistěme svjazi f i H sinchrofazotrona na 10 BeV, tamtéž.*
- [12] J. M. Lebeděv-Krasin, *Uskorjajuščije elementy sinchrofazotrona i osnovnyje voprosy ich pitanija naprjaženjem vysokoj častoty, tamtéž.*
- [13] I. Ch. Nėvjažskij, G. M. Drabkin, V. F. Trubeckoj, A. S. Těmkin, *Primeněnije induktivnostj s ferritovymi serděčnikami v konturach možnogo kaskada sinchrofazotrona na 10 BeV, tamtéž.*
- [14] L. M. Gurevič, B. M. Gutněr, G. M. Drabkin, N. K. Kaminskij, *Automatičeskaja nastrojka kontura okoněčnogo kaskada vysokočastotnogo generatora sinchrofazotrona na 10 BeV, tamtéž.*
- [15] A. L. Minc, S. M. Rubčinskij, M. M. Vejsbejn, A. A. Vasiljev, *Sistěma upravljenija processami inžekcii i uskorenija častic v sinchrofazotronach, tamtéž.*