

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

A. M. Kugušev
Ultrakrátké vlny

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 5-6, 610--630

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137354>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

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>

ULTRAKRÁTKÉ VLNY

Popovův objev bezdrátové telegrafie se stal základem nové rozsáhlé oblasti vědy a techniky, která je nyní obvykle nazývána radioelektronikou.

Význam radiofysiky a radiotechniky v životě dnešní lidské společnosti je neobvyčejně veliký. Oblast praktického a vědeckého použití radiotechniky je velmi široká. Uvedme na příklad jen některé formy radiofikace: telefonní a telegrafní radiové spojení, automatika, vysokofrekventní ohřev, reaktivní technika, rychlé počítací stroje, radiogeodesie, radiometeorologie, radioastronomie, výzkum atomového jádra, studium biologických procesů, použití vysoké frekvence v medicíně atd. Tento výčet zdaleka nevyčerpává všechny možnosti.

Vývoj radiotechniky je možno rozdělit na tři hlavní období.

První období (1895—1918) se vyznačuje používáním dlouhých radiových vln a jediným způsobem jejich použití — v bezdrátové telegrafii.

Druhé období (1918—1940) je charakterisováno vznikem radioelektroniky, používáním elektronek nejdříve v přijímačích, později ve vysilačích, vznikem radiotelegrafie a používáním krátkých radiových vln. Rozšířené pásmo radiových vln a zvýšená citlivost přijímačů umožnily překlenout radiovým spojením všechny potřebné vzdálenosti na zeměkouli. Vzniklo mnoho nových praktických způsobů radiového přenosu.

V třetím, současném období rozvoje radiotechniky se prakticky používá ultrakrátkých vln, rozvíjí se televise, a radioelektroniky se mnoha dalšími způsoby prakticky využívá. Toto období je charakterisováno také pokrokem vědy ve výzkumu vzájemného působení elektronů a radiových vln a dále rozvojem fyziky pevné fáze. Na tomto základě se nyní řeší úloha buzení nejkratších radiových vln a nahrazování vakuových elektronických přístrojů polovodičovými elektronickými přístroji. Další rozvoj těchto odvětví radiotechniky umožní od základu změnit dnešní radiovou aparaturu, zvýšit její provozní spolehlivost a učinit ji dostupnější pro nejšířší použití.

Vlastnosti ultrakrátkých vln

Pásmo radiových vln zahrnuje oblast od 1 mm do několika kilometrů délky. Podle mezinárodní úmluvy se radiové vlny dělí na dlouhé vlny od 100 do 20 000 m, krátké vlny od 10 do 100 m a ultrakrátké vlny od 1 mm do 10 m.

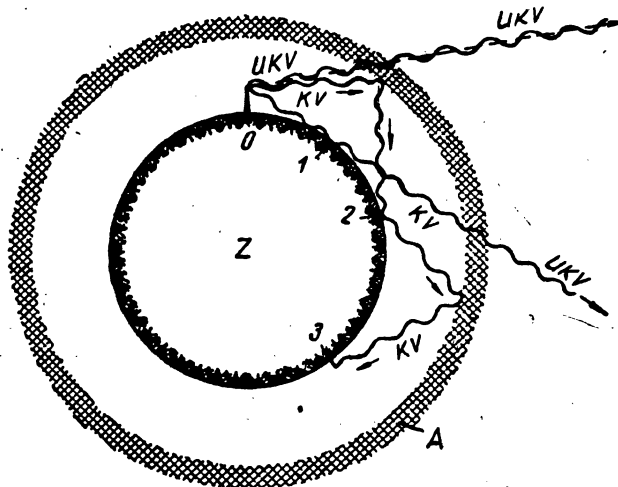
Ultrakrátké vlny se dále dělí na metrové, decimetrové, centimetrové a milimetrové.

Radiové vlny stejně jako vlny světelné jsou elektromagnetické vlny, vznikající kmitavým pohybem elektrických nábojů.

Protéká-li vodičem střídavý elektrický proud, vznikají v okolním prostředí elektromagnetické vlny, protože ve vodiči nastává kmitavý pohyb velkého množství volných elektronů, které se vždy nacházejí v krystalické struktuře vodiče. Délka vlny a frekvence elektromagnetických vln nebo střídavého proudu souvisí vzájemně vztahem $\lambda \cdot f = 3 \cdot 10^8$, kde λ je délka vlny v metrech a f frekvence elektromagnetických vln. $3 \cdot 10^8$ m/sec je rychlost šíření elektromagnetických vln ve volném prostředí.

V souhlase s tímto vztahem je nutno pro vybuzení ultrakrátkých elektromagnetických vln napájet vodič střídavým proudem o frekvenci mnoha milionů Hz; na př. pro vlnu 1 m je potřebná frekvence střídavého proudu rovna 300 milionů Hz, pro vlnu 1 cm 30 miliard Hz.

Ultrakrátké vlny se na rozdíl od delších vln neodrážejí (s výjimkou vln 5—7 m) od horních ionisovaných vrstev zemské atmosféry a neohýbají se následkem difrakce podle povrchu Země. Proto není možno uskutečnit radiové spojení ultrakrátkými vlnami kolem Země v přírodních podmínkách. Na druhé straně jen



Obr. 1: Šíření radiových vln kolem Země.

01 - maximální dosah přenosu na ultrakrátkých vlnách (UKV), 03 - maximální dosah přenosu na krátkých vlnách (KV), A - ionisované vrstvy atmosféry, Z - Země.

ultrakrátkými vlnami je uskutečnitelné radiové spojení s tělesy ve vesmíru (obr. 1).

Vzdálenost, na níž se ultrakrátké vlny šíří od vysílače, závisí na rozměrech vysílací a přijímací antény a je o něco větší než geometrický horizont, určený pouze zakřivením zemského povrchu. Příčinou toho je, že spodní vrstvy atmosféry (troposféra) mají větší hustotu a vlhkost, a tedy větší dielektrickou konstantu, a proto se v nich elektromagnetické vlny šíří menší rychlostí než ve vyšších vrstvách. Následkem toho se radiový paprsek ohýbá ve svislé rovině (refrakce) a zdánlivě se zvětšuje vzdálenost horizontu. Tento jev je patrný zvláště při výrazně nehomogenní atmosféře, na př. při slunečném počasí nad hladinou moře, kdy zakřivení radiového paprsku prudce vzrůstá a kdy se současně zvětšuje vzdálenost zdánlivého horizontu. Proto je možný na př. občasný příjem televizního vysílání televizního střediska daleko za dosahem jeho normální působnosti. Avšak tímto způsobem nelze uskutečnit trvalé radiové spojení na velké vzdálenosti. Při vzniku radiových vln působením střídavého proudu procházejícího antenou se energie střídavého proudu mění v energii elektromagnetické vlny, šířící se do prostoru. Vysílací výkon je tím větší, čím vyšší je frekvence střídavého proudu při daných rozměrech antény a tedy čím je elektromagnetická vlna kratší.

Nejjednodušší antenou je vodič o délce rovné délce jedné půlvlny, v jehož středu je umístěn zdroj střídavého proudu. V radiotechnice se taková antena nazývá půlvlnový vibrátor. Střídavý proud protékající antenou mění svou velikost od

maxima ve středu vodiče (u zdroje) do nuly na koncích vodiče. Vysílací výkon této anteny ve wattech se vyjadřuje vzorcem $P = 70 I^2$, kde I je proud.

Vysílací výkon bude při určitém proudu týž bez ohledu na frekvenci. Rozdíl je jen v různé potřebné délce vysílací anteny.

Pro frekvenci 50 Hz by antena musela být dlouhá 3000 km. Je tedy vzhledem ke svým rozměrům antena tohoto druhu pro průmyslové kmitočty nepoužitelná. Kromě toho by v takto dlouhém vodiči byly značné ztráty oteplením a užitečný vysílací výkon by byl jen nepatrnou částí vynaložené energie.

I pro frekvenci odpovídající středním vlnám je nutno použít anteny mnohem kratší než je délka vlny, protože se účinnost vysílání zmenší.

Naproti tomu pro pásmo ultrakrátkých vln stačí poměrně krátké anteny a problém vysílání těchto vln je tedy značně jednodušší. Rovněž směrové radiové vysílání úzkým paprskem, pro něž je třeba anteny o délce mnohem větší než je délka vlny, lze ultrakrátkými vlnami snáze uskutečnit.

V tak zvaném volném prostoru, to jest v prostředí bez plyných kapalin nebo tuhých těles, se elektromagnetické vlny šíří rychlostí $3 \cdot 10^8$ m/sec. Obecně jejich rychlost závisí na dielektrické a magnetické vodivosti prostředí. Ve vzduchu je rychlost elektromagnetických vln přibližně stejná jako ve volném prostoru, v jiných používaných izolantech je mnohem menší.

Ve většině praktických případů je možno předpokládat, že přenos elektromagnetické energie probíhá i na poměrně velké vzdálenosti v krátkém okamžiku. Na příklad linkou dlouhou 100 km se energie přenese za $1/3$ milisekundy. Proto při nízké frekvenci je v každém okamžiku totéž napětí na začátku a konci linky. Jinak je tomu při vysoké a zejména při ultravysoké frekvenci.

Uvažujme na příklad linku dlouhou 0,5 m, tvořenou dvěma paralelními vodiči ve vzduchu, která je na jednom konci připojena na zdroj střídavého napětí o frekvenci 300 MHz. Podél vedení se šíří elektromagnetická energie na vlně délky 1 m. Doba přenosu energie s jednoho konce linky na druhý je při rychlosti $3 \cdot 10^8$ m/sec rovna $1/6$ stomiliontiny sekundy. Tato nepatrná hodnota je však v daném případě rovna jedné půlperiodě napětí zdroje. To znamená, že v okamžiku, kdy elektromagnetická vlna dojde na konec linky, bude mít svorkové napětí zdroje na začátku linky opačnou polaritu. Při ultravysoké frekvenci je tedy doba přenosu elektromagnetické energie podél vedení (třeba i nepatrné délky) řádově stejná jako perioda elektrického proudu.

Theoreticky je ovšem možno dostat opačnou polaritu napětí na konci vedení i při přenosu vlnami nízké frekvence — avšak v tomto případě musí být vedení velmi dlouhé. Přitom vznikají ve vodičích značné ztráty a napětí v koncových bodech se liší nejen polaritou, ale i velikostí. Na příklad při frekvenci 50 Hz je napětí na konci vedení dlouhého 3000 km i při použití nejlepšího měděného vodiče menší než $1/100$ napětí zdroje.

Odpor uzavřené vodivé smyčky, jejíž délka je rovna čtvrtině, je při ultrakrátkých vlnách velmi značný, avšak odpor těžé smyčky na konci otevřené velmi malý. Je tedy možno při přenosu ultrakrátkými vlnami používat jako izolátorů kovové podpěry. Není však prakticky možný přenos elektromagnetické energie venkovním vedením. Je nutno použít koaxiálního kabelu nebo vlnovodu.

Při ultravysoké frekvenci se výrazně projevuje tak zvaný povrchový jev (skin-efekt) — proud prochází jen tenkou povrchovou vrstvou vodiče.

Doba průchodu elektronů mezi elektrodami v elektronce je při ultravysoké frekvenci řádově stejná jako perioda ultravysokých kmitů. Obyčejná trioda se proto nehodí pro generaci ultravysokých frekvencí.

Kvalitativní zvláštnost střídavého proudu ultravysoké frekvence je možno ukázat i na příkladu transformátoru. Jak známo, rozměry transformátoru se zmenšují při zvyšování frekvence tím, že se zmenšuje počet závitů a rozměry železného jádra. Transformátory pro vysoké frekvence obvykle nemají železného jádra. Na příklad napětí několika desítek tisíc voltů dává transformátor, tvořený kartonovým válcem vysokým 1 m s vinutím.

Pomocí ultrakrátkých vln je možno dosáhnout větší účinnosti při transformaci napětí. Proto lze snáze postavit röntgenovou aparaturu pro výrobu nejtvrděších paprsků, která by na příklad při napětí několika desítek kilovoltů a při nízké frekvenci zaujímalu plochu několika desítek čtverečních metrů.

Jiným zařízením, pomocí něhož lze při použití ultravysoké frekvence získat vysoké napětí, je nejjednodušší antena ve formě měděné tyče, jejíž délka je na příklad pro vlnu 20 cm asi 10 cm. Potenciální rozdíl mezi oběma konci tyče je několik set kilovoltů při napětí zdroje 10 kV.

V pásmu ultrakrátkých vln je možno zvláště dobře pozorovat natažení roviny polarisace magnetovaných těles při průchodu elektromagnetické vlny. Na základě tohoto jevu byly zkonstruovány přepínače pro obvody ultravysoké frekvence, které nemají prakticky žádnou setrvačnost. Nejjednodušším příkladem takového zařízení je úsek vlnovodu, vyplněný ferritem, který představuje tak zvané magnetodielektrikum ve formě lisovaného prášku z kysličníků železa a některých jiných kovů. Prochází-li cívkou dostatečně velký proud, natočí se rovina polarisace elektromagnetické vlny, šířící se v pravoúhlém vlnovodu, o 90° a vlna se v takovém vlnovodu nemůže dále šířit.

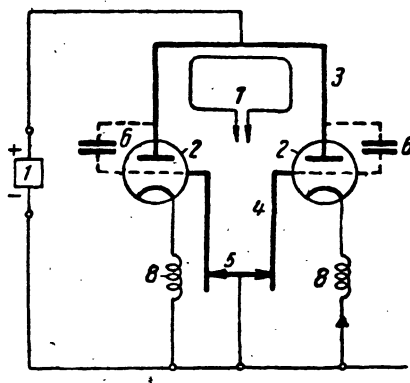
Ultrakrátké vlny mají dále tu důležitou vlastnost, že pomocí nich je uskutečnitelné mnohokanálové spojení a přenos širokopásmových signálů. Každý elektrický signál je totiž složitým střídavým proudem o mnoha frekvencích. Na příklad pásmo televizního signálu sahá od stovek do milionů Hz. Pro přenos elektrických signálů bez velkého zkreslení musí nosná frekvence, modulovaná signálem a vysílaná antenou, 10 až 20krát přesahovat pásmo frekvencí signálu.

Tato vlastnost ultrakrátkých vln umožňuje také použít nových způsobů modulace — frekvenční a impulsní. To zajišťuje radiovému spojení široký rozvoj, zvláště pokud se týče příjmu bez poruch, rychlosti přenosu zpráv a j.

Zdroje ultravysoké frekvence

Nejjednodušším zdrojem ultravysoké frekvence je vakuová trioda.

Trioda, připojená k elektrickému rezonančnímu obvodu, vyvolává v něm střídavý proud na úkor energie stejnosměrného zdroje připojeného mezi anodu a katodu elektronky. Čím menší je



Obr. 2: Schema triodového generátoru ultravysoké frekvence.

1 - zdroj konstantního proudu pro napájení anody, 2 - triody, 3 - anodový obvod, tvořící část indukčnosti celého obvodu, 4 - mřížkový obvod, tvořící část indukčnosti celého obvodu, 5 - posuvná spojka pro měnění vlnové délky buzených kmitů, 6 - kapacity obvodu, 7 - antenní obvod, 8 - pomocné indukčnosti v katodových obvodech.

kapacita a indukčnost rezonančního obvodu, tím vyšší je frekvence vznikajícího střídavého proudu. Anoda a mřížka musí být připojeny k uzlům obvodu s opačnou polaritou napětí.

Fysikálně lze vysvětlit tento jev tak, že elektrický obvod, tvořený indukčností a kapacitou, má určitý vlastní kmitočet. Projde-li obvodem proudový impuls, nebo dostane-li obvod napěťový impuls, vznikne v obvodu střídavý elektrický proud o frekvenci rovné vlastnímu kmitočtu obvodu.

Aby byla indukčnost a kapacita obvodu co nejmenší, to jest aby vyráběná frekvence byla co nejvyšší, má rezonátor triodového generátoru ultravysoké frekvence pouze jeden závit, tvořený vodivou smyčkou, a kondensátor je představován elektrodami lampy.

Tímto generátorem lze získat střídavé proudy od frekvencí několika Hz do 2—3 miliard Hz. Pro stabilní amplitudu a frekvenci kmitů je vhodný pro bezdrátovou telefonii a pro přenos jiných složitých signálů.

Pro nejkratší vlny a velké výkony musí mít trioda zvláštní konstrukci. Indukčnost a kapacita elektronky musí být co nejmenší a jsou částmi rezonátoru.

Rezonátorem splňujícím tyto podmínky je na příklad úsek koaxiálního kabelu, to jest dvou nebo tří soustředných postříbřených měděných trubek. Měníme-li délku úseku, měníme velikost indukčnosti a kapacity a v důsledku toho se plynule mění délka vznikající vlny, která je rovna přibližně čtyřnásobku délky úseku.

Dnešní úroveň radiotechnického průmyslu umožňuje výrobu generátorů ultravysoké frekvence na pásmo metrových vln, sestávajících z triody speciální konstrukce a z rezonátoru ve formě úseku koaxiálního kabelu, na libovolný výkon potřebný pro radiopřijímače a jiná zařízení.

Triodami speciální konstrukce (*obr. 2*) lze získat i vlny kratší než 1 m — až do 10 cm. Výkon těchto kmitů je však velmi malý — řádu 1—0,1 W. Příčinou toho je, že doba přeletu elektronů od kathody k mřížce a dále k anodě představuje značnou část periody vyráběných kmitů. V důsledku toho část elektronů, vyslaných kathodou při kladném potenciálu mřížky, přichází k mřížce v okamžiku, kdy již tato má potenciál opačného znaménka. Elektrony se proto vracejí zpět na kathodu a amplituda kmitů ultravysoké frekvence se zmenšuje.

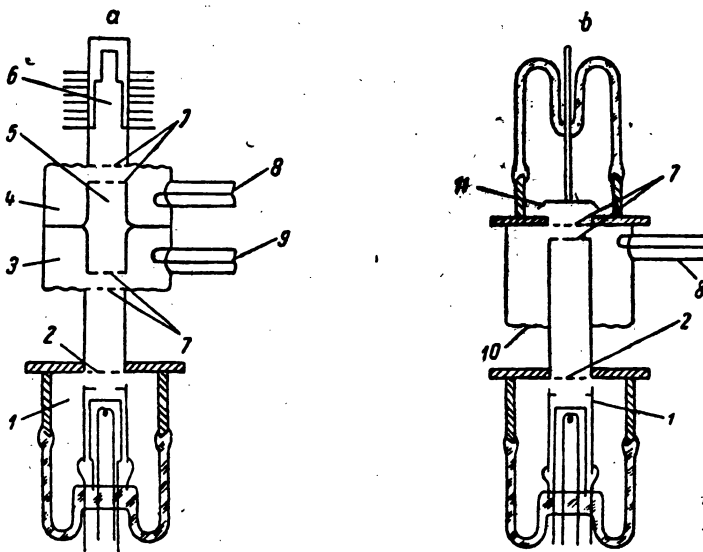
Pro generaci decimetrových vln většího výkonu byly sestrojeny nové typy vakuových elektronických přístrojů: reznatron, klystron a mnoharezonátorový magnetron. Prvé dva přístroje jsou lampy s mnoha mřížkami, spojené s obvodem rezonátoru ve formě krátkého uzavřeného válce. Vnitřní povrch válce představuje indukčnost a vnější povrch tvoří kapacitu rezonančního obvodu.

Mechanismus generace v reznatronu je jen málo odlišný od mechanismu generace triodou.

Mechanismus generace klystronem má své zvláštnosti (*obr. 3a*). Elektronům, vyslaným kathodou v různých časových okamžicích, udělí střídavé elektrické pole prvního rezonátoru různou rychlost. Pak projdou úsekem, v němž na ně nepůsobí elektrické pole (»oblast seskupení«), a vytvoří skupiny, které přicházejí v týchž časových okamžicích do druhého rezonátoru. Procházejí-li skupina elektronů elektrickým polem ve štěrbině druhého rezonátoru v té části periody, kdy pole brzdí elektrony, odevzdávají elektrony část své kinetické energie rezonátoru a tím v něm vyvolají elektromagnetické kmity. Kinetická energie pohybujících se elektronů je dodávána zdrojem konstantního napětí. Střídavé napětí v pevném obvodu se získá buď pomocným zdrojem nebo zpětnou vazbou s druhým rezonátorem. Elektrony, které prošly druhým rezonátorem, dopadají na pomocnou elektrodu spojenou s kladným pólem zdroje.

Pro generaci velmi vysokých frekvencí malého výkonu (vlny od 10 do 1 cm a kratší) se používá tak zvaného odrazového klystronu s jedním rezonančním obvodem (obr. 3b). Elektrony se odrážejí od sběrací elektrody, procházejí oblastí seskupení zpět k rezonátoru, kterým procházejí v brzdné půlperiodě jeho střídavého elektrického pole.

Pro generaci centimetrových vln (od 10 cm do 10 mm a dokonce 4–5 mm) velkého výkonu se používá mnohorezonátorového magnetronu. Tento generátor může dávat kmity o výkonu stovek až tisíců kW.



Obr. 3: Řez dvourezonátorovým (a) a odrazovým (b) klystronem.

- 1 - elektronové dělo, 2 - urychlující mřížka, 3 - první rezonátor, 4 - druhý rezonátor, 5 - prostor vrstvení, 6 - kolektor, 7 - mřížka rezonátoru, 8 - výstup ultravysoké frekvence, 9 - vstup ultravysoké frekvence, 10 - ohebné diafragma, 11 - reflektor.

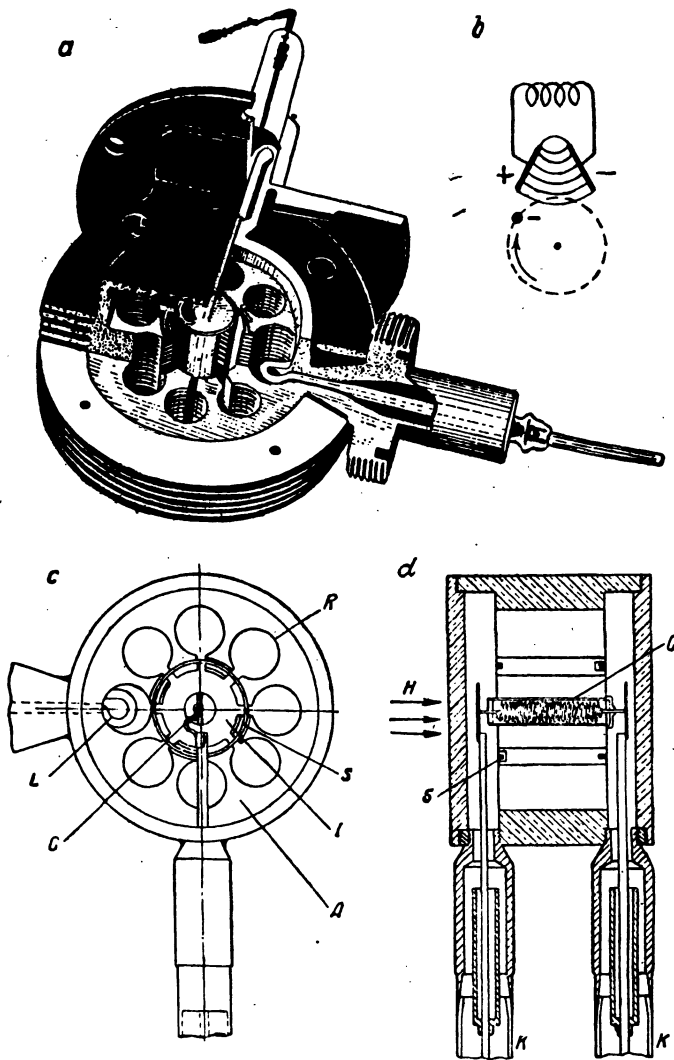
Magnetron má mohutnou válcovou katodu (obr. 4), umístěnou uvnitř měděné válcové anody. Drážkování na vnitřním povrchu anody tvoří elektromagnetické rezonátory. Při generaci je magnetron umístěn mezi póly silného magnetu a napájí se stejnosměrným proudem vysokého napětí.

Buzení kmitů v magnetronu je založeno na tom, že dráha elektronu, pohybujícího se určitou rychlostí, se ve stejnosměrném magnetickém poli změní v kruhovou, při čemž počet otáček elektronu za sekundu může být až několik miliard. Představme si elektrický kmitavý obvod, složený z tlumivky a kondensátoru. Pohybuje-li se elektron v elektrickém poli tak, že je jím brzděn, odevzdává mu část své kinetické energie (obr. 4b). Je-li frekvence otáček elektronu rovna vlastní frekvenci kmitavého obvodu, odevzdává elektron při každé otáčce část své kinetické energie. Poloměr otáčení elektronu se zvětšuje a elektron nakonec dopadne na některou elektrodu kondensátoru.

V magnetronu je několik vzájemně vázaných rezonátorů, jejichž elektrická pole jsou koncentrována ve štěrbinách a magnetická v otvorech. V prostoru mezi elektrodami se pohybuje velké množství elektronů. Je tedy fyzikální proces generace značně složitější než proces popsaný u jednoho elektronu.

Působením střídavého elektrického pole ve štěrbinách, stejnosměrného elektrického a magnetického pole se oblak elektronů, který má nehomogenní paprskovitou strukturu, otáčí. Konce paprsků procházejí štěrbinami v okamžiku, kdy elektrické pole ve štěrbinách působí proti pohybu elektronů. V tomto okamžiku se kinetická energie elektronů mění v elektromagnetickou energii rezonátoru.

Elektrony, jejichž fáze pohybu nesplňuje výše uvedenou podmínku, jsou automaticky odstraňovány, protože již při první polovině otáčky neodevzdávají, nýbrž



Obr. 4: Magnetron na vlnovou délku 10 cm.

a - celkový pohled s výřezem, *b* - schema buzení kmitů, *c* - bokorys, *d* - řez, *A* - anoda, *C* - katoda, *H* - magnetické pole, *I* - elektronový prostor, *K* - vývody katody, *L* - obvod zátěže, *R* - rezonátor, *S* - vodiče.

přijímají kinetickou energii, jejich poloměr otáčení se zmenšuje a elektrony se vrací na katodu.

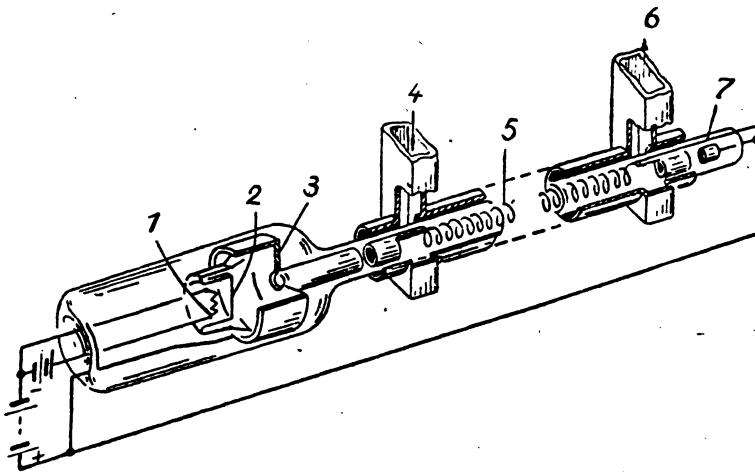
Magnetron má tedy na rozdíl od obyčejných generátorů střídavého proudu s rotorem ve formě elektromagnetu, otáčejícího se obvykle nejvýše rychlostí 50 ot/sec, rotor ve formě oblaku elektronů, otáčejícího se rychlostí několika miliard ot/sec.

První magnetron tohoto typu, bez něhož dnes nelze postavit výkonný vysílač ultrakrátkých centimetrových vln, byl sestaven M. A. Bonč-Brujevičem, P. F. Alexejevem a D. J. Maljarovem r. 1938.

Dnes již existují i magnetrony, u nichž se frekvence vyráběných kmitů může podobně jako u triody plynule měnit, avšak jen v malých mezích. Změny indukčnosti resonátoru se přitom dosahuje pomocí měděných jader, která se pro zkrácení vlnové délky zasunují a pro prodloužení vysouvají z cívky. Jádru působí jako závit nakrátko, kterým se mění indukčnost, protože v něm vzniká střídavý proud opačného směru než v cívce, což vede k zmenšení celkového magnetického toku.

Pro generaci a zesílení velmi vysokých frekvencí, odpovídajících vlnám 30—10 cm a kratším, se nyní konstruuji nové elektronické vakuové přístroje — elektronky s postupnou vlnou a elektronky vlnové. Vzájemné působení toků elektronů a elektromagnetického pole se v těchto elektronkách děje na dlouhém úseku dráhy elektronů a proto je zesílení takto získané značně větší, než při použití obyčejné triody nebo pentody.

Princip zesílení v lampy s postupnou vlnou je tento (obr. 5): Elektrony, soustředěné do úzkého svazku magnetickým polem cívky, navinuté na trubku, se pohybují nějakou počáteční rychlostí uvnitř drátěné spirály od katody ke kolektoru. Jejich počáteční rychlost je dána kladným potenciálem trubkové anody, která spolu s katodou tvoří tak zvané elektronové dělo. Na vstupní konec spirály se přivádí vysokofrekvenční napětí zesilovaného signálu. Působením tohoto napětí se podél spirály pohybuje elektromagnetická energie. Přitom mezi závitů vzniká střídavé elektrické pole. Elektrony, brzděné tímto polem, mu odevzdávají



Obr. 5: Schema zesílení v elektronce s postupnou vlnou.

1 - přehříváč, 2 - katoda elektronového děla, 3 - anoda elektronového děla, 4 - vstup, 5 - spirála, 6 - výstup, 7 - kolektor.

část své kinetické energie. Tím se zmenšuje rychlost elektronů a zvětšuje se amplituda vysokofrekvenčního napětí na výstupním konci spirály.

Dnešní konstrukce zesilovačů ultravysoké frekvence tohoto druhu mají koeficient zesílení 100. Kromě toho mají tyto přístroje další cenné vlastnosti: nepropouštějí silný signál, mají velmi široký rozsah a přeladění je prakticky bez setrvačnosti v mezích téměř celé oktávy.

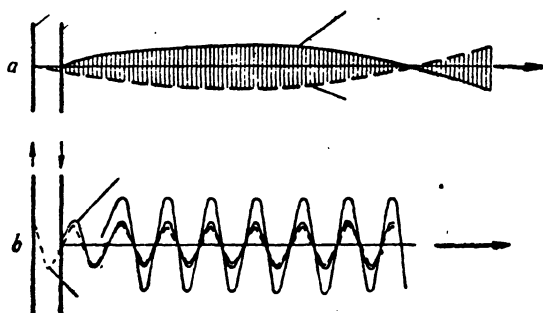
Přenos ultrakrátkých vln a napájecí zařízení

Přenos elektromagnetické energie od zdroje k spotřebiči se může dít buď pomocí spojovacích vodičů nebo bezdrátově radiovými vlnami. Drátový přenos je vhodný pro proudy stejnosměrné a nízkofrekvenční střídavé, kdežto bezdrátový přenos se hodí pro střídavé proudy vysoké a ultravysoké frekvence. Při přenosu vysokofrekvenčních proudů po drátech vznikají různé technické potíže, způsobené ztrátami energie vyzařováním (jestliže vzdálenost mezi vodiči je větší než asi desetina vlnové délky), dále zvětšením aktivního odporu vodičů následkem zvětšení skinefektu při ultravysoké frekvenci a konečně odrazem energie zátěží při délce vedení řádově stejné s délkou vlny.

Mechanismus ztrát vyzařováním energie je možno vyšetřovat na příklad na dvou paralelních vodičích v malé vzdálenosti od sebe, vedoucích proudy opačného směru (obr. 6). Jak známo, vznikají při průchodu střídavého proudu vodičem v okolí vodiče elektromagnetické vlny. V našem případě budou elektromagnetické vlny obou vodičů v protifázi. Následkem toho se obě vlny ruší a v prostoru kolem vodičů nenastává pohyb elektromagnetické energie.

Je-li vzdálenost vodičů rovna značné části délky vlny, na příklad jedné půl vlně, pak vlny vysílané oběma antenami se v některých směrech skládají a nastává vyzařování elektromagnetické energie.

Narazí-li elektromagnetická vlna na vodivou překážku, téměř všechna elektromagnetická energie se odrazí a jen část proniká do vodivého prostředí, kde se mění v teplo. Hloubka vodivé vrstvy, v níž se prostupující elektromagnetická energie zmenší asi pětkrát, se nazývá ekvivalentní hloubkou vnikání elektromagnetického pole nebo střídavého proudu do vodiče. Je tím menší, čím je materiál vodivější a čím je frekvence střídavého proudu vyšší. Na příklad při střídavém proudu průmyslové frekvence je ekvivalentní hloubka vnikání v mědi rovna



Obr. 6: Vyzařování dvou vodičového vedení.

a - dlouhá vlna (energie se nevyzařuje), *b* - ultrakrátká vlna (energie se vyzařuje), plná čára - vlna příslušející prvnímu vodiči, čárkovaná čára - vlna příslušející druhému vodiči.

10 mm, kdežto při střídavém proudu o frekvenci 50 miliard Hz je ekvivalentní hloubka vnikání v téměř vodiči rovna jedné tisícině milimetru. Proud ultravysoké frekvence prochází tedy jen tenkou povrchovou vrstvou vodiče, což má za následek značný vzrůst odporu vodiče, protože využitá část průřezu vodiče je jen malou částí celkového průřezu. V důsledku toho se velmi zvětší ztráty energie.

Pro zmenšení ztrát energie se vodiče vysokofrekvenčních napájecích zhotovují z tenkých

proužků nebo lanek ze slabých drátků, vzájemně izolovaných nebo z tenkostěnných měděných trubek. Části napaječů vedoucí proud ultravysoké frekvence se chrání vhodnými nátěry proti korozi.

Elektromagnetická vlna, pohybující se podél vedení, se může na jeho konci odrazit. Odražená vlna se skládá podél vedení s postupnou vlnou, která má obecně jinou fázi, a vznikají místa s velkými proudy a malými napětími a naopak. Vzdálenost mezi maximální a minimální hodnotou proudu nebo napětí je rovna jedné půlvlně, a v bodech, kde napětí dosahuje maxima, má proud minimum. Vznik přepětí vyžaduje zesílení izolace, vznik velkých proudů zvětšení průřezu vodiče.

Tyto jevy nenastanou, je-li délka vedení mnohem menší než délka vlny.

Největší nerovnoměrnost napětí a proudu vzniká ve vedení při chodu naprázdno nebo nakrátko, kdy se veškerá energie odrazí a amplituda odražené a postupné vlny je stejná.

Přiložíme-li napětí na vedení o délce rovné $1/4$ vlny, které je na konci nakrátko, neprotéká jím proud. Můžeme proto považovat odpor takové smyčky za nekonečně velký. Připojení této smyčky do obvodu s proudem příslušné frekvence nemá vliv na změnu proudu v obvodu.

Na tomto jevu jsou založeny tak zvané kovové izolátory. Ztráty energie však nevznikají pouze v ideálních vodičích. Ve skutečnosti i v měděných smyčkách vznikají malé ztráty při průtoku proudu. Nebude tedy odpor čtvrtvlnového vedení nekonečně veliký, ale bude dostatečně velký, takže je možno čtvrtvlnového vedení použít jako izolátoru. Proud v něm bude menší než v izolátoru z dobrého dielektrika.

Odpor čtvrtvlnového vedení naprázdno je theoreticky roven nule. Připojíme-li tedy takové vedení k nějaké lince, spojíme ji nakrátko. Ve skutečnosti ovšem není odpor roven nule, ale při ultravysoké frekvenci má hodnotu velmi blízkou nule.

Čtvrtvlnové vedení nakrátko je ekvivalentní elektrickému obvodu, složenému z paralelně spojené tlumivky a kondensátoru, je-li velikost indukčnosti a kapacity volena tak, že proud tlumivky je co do velikosti roven proudu kondensátoru a v obvodu není aktivního odporu. Výsledný proud obvodu je pak vždy roven nule.

Čtvrtvlnové vedení naprázdno je ekvivalentní elektrickému obvodu se seriově spojenou tlumivkou a kondensátorem, je-li velikost indukčnosti a kapacity volena tak, že napětí na tlumivce a kondensátoru jsou stejně velká a v obvodu není aktivního odporu. Pak výsledné napětí na svorkách obvodu je vždy nulové.

Popsané jevy mohou theoreticky nastat i při nízké frekvenci, ale prakticky se nevyskytují, protože délka čtvrtvlnového vedení je v tomto případě velmi značná a v důsledku toho má vedení velký elektrický odpor, takže vznikají takové ztráty energie, že resonance nenastává.

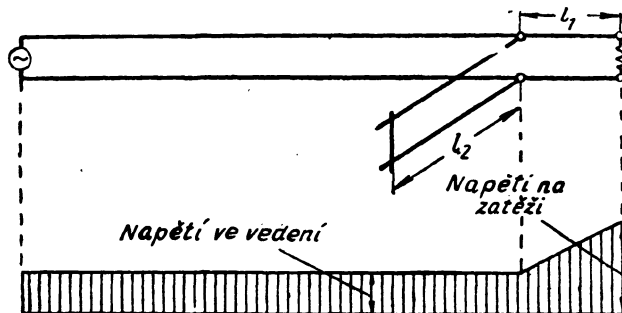
Ve vedení zatíženém aktivním odporem bude mít napětí i proud konstantní velikost, jestliže nenastává na konci vedení odraz energie. To bude tehdy, když velikost zátěžného odporu bude rovna tak zvanému vlnovému odporu vedení, který závisí na průřezu vodiče. Taková zátěž je pro praxi většinou nejvýhodnější.

Aby i v těch případech, kdy není možno volit průřez vedení takový, aby jeho vlnový odpor byl roven odporu zátěže, nevznikalo stojaté vlnění a tedy ani přepětí, používá se tak zvaného přízůsobovacího zařízení.

Obecně je takové zařízení představováno reaktančním odporem, to jest odporem nepohlcujícím energii. Je to na příklad kapacita nebo indukčnost, která se umístí v určité vzdálenosti od zátěže. Toto zařízení kompenzuje energii odraženou zátěží, takže podíl větší části vedení bude pouze postupné vlnění.

Pro ultravysokou frekvenci se místo kondensátoru a tlumivky používá kovové smyčky příslušné délky (obr. 7). Je-li smyčka l kratší než $1/4$ vlny, má induktivní charakter, je-li její délka v mezích od $1/4$ do $1/2$ vlny, má kapacitní charakter.

Za účelem zmenšení potíží při přenosu elektromagnetické energie ultrakrátkých vln se používá buď koaxiálních kabelů nebo vlnodů ve tvaru měděných trub



Obr. 7: Schema přizpůsobovacího zařízení.

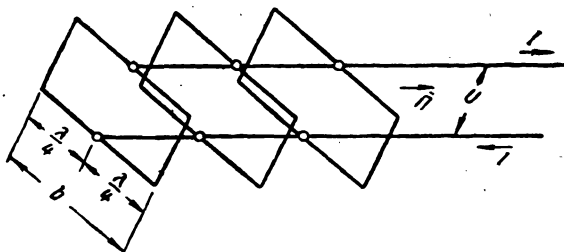
s přizpůsobovacím zařízením, zmenšujícím odraz energie. V obou případech je prostor, v němž se pohybuje elektromagnetická energie, omezen plochami vedoucími proud, a je tudíž vyloučeno vyzařování energie.

U koaxiálního kabelu prochází proud vnitřním povrchem trubky a vnějším povrchem vnitřního vodiče. U vlnodů pravoúhlého průřezu tvoří vodiivé plochy vnitřní povrch stěn.

Při přenosu elektromagnetické energie vlnovodem se lze snadno přesvědčit o tom, že energie se nešíří vodičem, nýbrž dielektrikem, které ho obklopuje, a vodič pouze udává směr šíření energie od zdroje k zátěži. Jen malá část energie prochází vodičem a mění se v teplo. V koaxiálním kabelu se vodiče upevňují buď pomocí dielektrických podložek, nebo pomocí »kovových izolátorů«. Dielektrických podložek se používá v ohebných vysokofrekvenčních kabelech, jejichž vnitřní vodič je spleten z tenkých měděných drátků a vnější z měděného pleťva.

Následkem skinefektu vzrůstají při ultravysoké frekvenci značné ztráty ohřevem vodiče. Na příklad v měděném koaxiálním kabelu o délce 35 m a poloměru vnitřního vodiče 8 mm se při vlně 10 cm změní polovina přenášené energie v teplo, kdežto při nízké frekvenci jsou v téměř případech ztráty zanedbatelné.

Velké ztráty ve vedení při ultravysoké frekvenci jsou nežádoucí nejen proto, že se nevyužije zcela energie vyrobená generátorem, ale i proto, že při velkých



Obr. 8: Schema přenosu elektromagnetické energie vlnovodem.

l - vodiče, b - průřez vlnovodu, \rightarrow - směr šíření elektromagnetické energie.

výkonech je nutno vodiče uměle chladit, čímž se konstrukce napájecího vedení stává složitější. Dále je nutno při velkých výkonech zabránit průrazu kabelu při přepětí. Pro zmenšení ohřevu kabelu je nutno zvětšit průřez, pro zamezení průrazu je třeba zvětšit vzdálenost mezi vodiči. Tyto rozměry však nesmějí být větší než příslušná část vlnové délky, a proto čím kratší je vlnová délka, tím menší výkon lze přenášet. Při malé vlnové délce není přípustná vzdálenost dostatečně bezpečná s ohledem na průraz. V tomto případě je nutno použít jiné konstrukce napájecího vedení, na příklad vlnovodu.

Vlnovody pro přenos decimetrových a centimetrových vln jsou obvykle měděné trubky pravoúhlého nebo kruhového průřezu. Proti koaxiálnímu kabelu má tento vlnovod řadu výhod: má menší ztráty energie, může přenášet při stejných rozměrech větší výkon, nemá ztráty v izolátorech a jeho konstrukce je jednodušší.

Vlnovod pravoúhlého průřezu je možno si představit (*obr. 8*) jako dva rovnoběžné vodiče (l), k nimž je připojen nekonečný počet čtvrtvlnových smyček. Příčný průřez (b) vlnovodu souvisí s délkou vlny. Při daném průřezu existuje pro každý vlnovod kritická vlnová délka, kterou ještě může přenášet. Vlnovod je nevhodný pro krátké a dlouhé vlny, neboť jeho potřebné rozměry ho činí v těchto případech prakticky nepoužitelným.

Výkon přenášený vlnovodem je rovněž omezen nebezpečím průrazu a přípustným oteplením vodičů. Pro přenos velkých výkonů se proto používá vlnovodů plněných suchým vzduchem, případně pod zvýšeným tlakem.

Vlnovody možno též konstruovat z dielektrika o malých dielektrických ztrátách při ultravysoké frekvenci. Je-li dielektrická konstanta použitého materiálu značně velká, elektromagnetické vlny přenášené vlnovodem se odrážejí od bočních stěn a neunikají do okolního prostoru.

Dnes se pracuje na konstrukcích nových systémů napájecích vedení pro ultravysoké frekvence. Problém přenosu elektromagnetické energie ultravysoké frekvence kanály na velké vzdálenosti s dostatečnou účinností není však dosud uspokojivě vyřešen.

Anteny

Nejjednodušší antenou je půlvlnový vibrátor, to jest vodič o délce rovné přibližně polovině vlnové délky. Aby antena byla tužší a pro lepší přenosové podmínky se často používá smyčkového vibrátoru (*obr. 9*).

Vibrátory vysílací a přijímací stanice musí být stejně uloženy, na př. oba vodorovně. Jsou-li navzájem kolmé, není mezi nimi možné elektromagnetické spojení.

Půlvlnový vibrátor nevysílá elektromagnetické vlny stejně ve všech směrech —

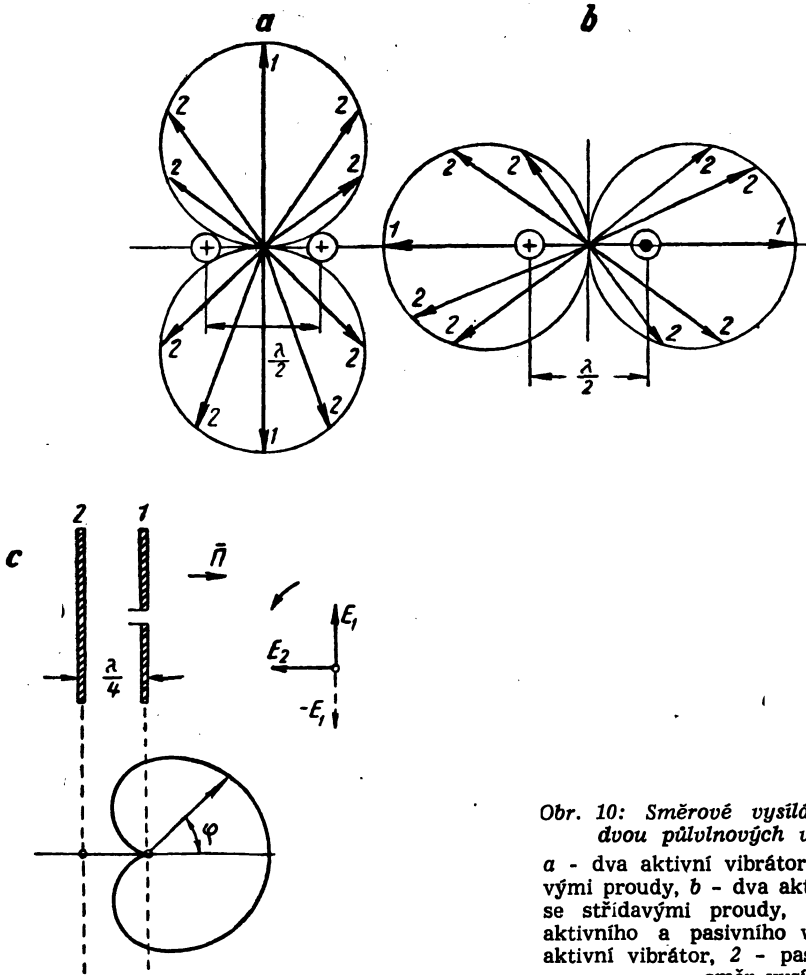


Obr. 9: Půlvlnové vibrátory (dipóly).

a - obyčejný vibrátor, b - smyčkový vibrátor, l - kabel, šipky vyznačují směr proudu v určitém okamžiku.

podél anteny se vlny vůbec nešíří, kolmo na antenu je vysílaný výkon maximální. Každá antena je charakterisována stupněm směrového účinku. Anteny na dlouhé vlny jsou jen málo směrovány, krátkovlnné anteny mají obvykle určitý směrový účinek. Ultrakrátkovlnnými antenami lze snadno dosáhnout výrazného směrového účinku.

Princip směrového působení půlvlnových vibrátorů lze nejnázorněji objasnit na dvou paralelních vibrátorech se synfázními proudy, to jest proudy o téže velikosti a směru v každém okamžiku.



Obr. 10: Směrové vysílání soustavou dvou půlvlnových vibrátorů.

a - dva aktivní vibrátory se synfázovými proudy, b - dva aktivní vibrátory se střídavými proudy, c - soustava aktivního a pasivního vibrátoru, 1 - aktivní vibrátor, 2 - pasivní vibrátor, \rightarrow - směr vysílání.

Intensita vysílání v různých směrech se zakresluje do diagramu směrového účinku, v němž jsou délky poloměrů úměrné intenzitě vysílání. Diagram jednoho půlvlnového vibrátoru v rovině kolmé k jeho ose má tvar kruhu. Diagramem dvou půlvlnových paralelních vibrátorů v příkladu výše uvažovaném je osmička. Při synfázních proudech bude v obou vibrátorech maximální výkon vysílán ve směru

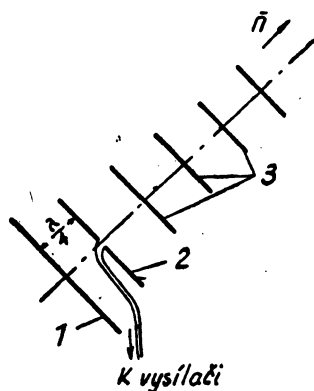
kolmém k rovině, v níž leží vibrátory, kdežto podél této roviny jsou vlny vysílané vibrátory v protifázi a vzájemně se ruší.

Směrového účinku dvou vibrátorů lze dosáhnout také tak, že napájíme jen jeden z nich — aktivní, zatímco druhý — pasivní — umístíme paralelně s ním ve vzdálenosti $\lambda/4$. V pasivním vibrátoru se indukuje proud zpožděný o čtvrt periody za proudem v aktivním vibrátoru. Dráha vlny vysílané pasivním vibrátorem bude o $\lambda/4$ delší, takže v nějakém dost vzdáleném bodě bude pole tohoto vibrátoru ve fázi s polem aktivního vibrátoru a výsledné pole bude dvojnásobné (obr. 10).

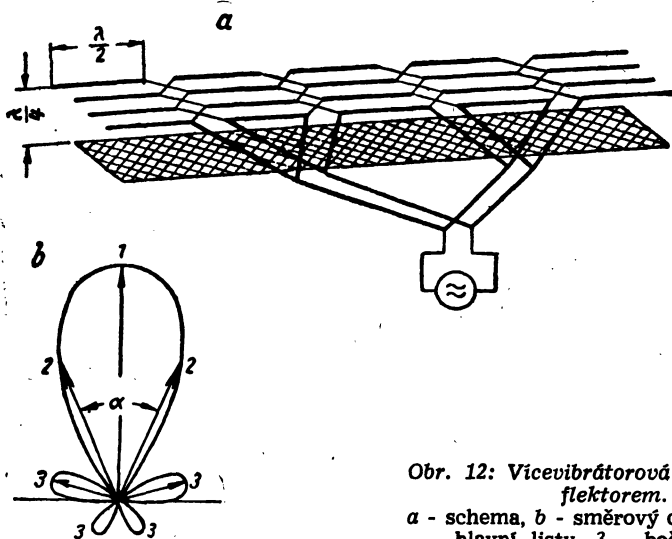
Jako směrové anteny pro metrové vlny se používá tak zvaného vlnového kanálu. Sestavá z jednoho aktivního vibrátoru, a z několika pasivních, z nichž jeden, tak zvaný reflektor, se umístí do vzdálenosti $\lambda/4$ od aktivního a spolu s ostatními pasivními vibrátory, umístěnými na opačné straně aktivního vibrátoru, slouží k usměrnění energie do požadovaného směru (obr. 11).

Výrazného směrového účinku se dosáhne antenou s velkým počtem vibrátorů, které jsou umístěny ve dvou paralelních rovinách (obr. 12). Vibrátory v jedné rovině jsou aktivní, zatímco stejný počet vibrátorů v druhé rovině, vzdálené o $\lambda/4$ od prvé, je pasivní. Čím větší je počet vibrátorů, tím výraznější je směrový účinek anteny.

Diagram směrového účinku této anteny má kromě hlavního listu, ukazujícího směr vysílání maximálního výkonu, několik tak zvaných bočních listů. Vysílání v těchto směrech je nežádoucí a nazývá se proto parasitní.



Obr. 11: Schema anteny „vlnový kanál“.
1 - reflektor, 2 - aktivní vibrátor, 3 - směrovače, → - směr vysílání.



Obr. 12: Vícevibrátorová antena s reflektorem.
a - schema, b - směrový diagram (1, 2 - hlavní listy, 3 - boční listy).

Úhlová šířka hlavního listu diagramu je rovna délce vlny dělené rozměrem anteny. Čím větší jsou rozměry anteny, tím užší je radiový paprsek a tím více je vysílaná energie koncentrována.

Pro vysílání na vlnách centimetrového a decimetrového rozsahu se používá anten parabolického typu. V ohnisku paraboloidu je umístěn půlvlnový vibrátor nebo trychtýř vlnovodu. Radiové vlny, odražené povrchem paraboloidu, se šíří v úzkém paprsku, jehož úhlová šířka je rovna délce vlny dělené průměrem paraboloidu.

Vyřízneme-li na vodivé ploše ohraničující prostor s elektromagnetickým polem úzkou štěrbinu kolmo ke směru povrchových proudů, vznikne ve štěrbině střídavé elektrické pole, které je zdrojem proudů na vnější straně kovové stěny. Tyto proudy vyvolávají v okolním prostoru elektromagnetické pole a nastává vyzařování energie. Na tomto principu jsou založeny difrakční anteny. Délka štěrbiny je rovna jedné půlvlně. Štěrbiny stejně jako vibrátory mohou mít směrový účinek. Štěrbinových anten se používá pro centimetrové vlny. Často též slouží jako základní vysílač v kombinaci s paraboloidem.

Pro vysílání decimetrových a centimetrových vln se používá též dielektrických anten. Nejjednodušší antenou tohoto typu je dielektrický sloupek, uvnitř kterého se budí elektromagnetické pole. Rychlost šíření elektromagnetických vln je uvnitř sloupku menší než ve volném prostoru. V důsledku tohoto rozdílu rychlostí se vysílaná energie koncentruje v ose sloupku.

Štěrbinové a dielektrické anteny mají velký význam pro reaktivní letadla a řízené rakety.

Dnešní úroveň techniky ultrakrátkých vln umožňuje stavbu anten směrového účinku se šířkou paprsku menší než jeden stupeň, jimiž je možno zjistit polohu předmětu s přesností na minuty. Ve speciálních antenách se používá kmitajícího paprsku, při čemž příjem takového paprsku je velmi dokonalý, zvláště při použití ferritů. Ferrity umožňují velmi rychlé řízení letadel a raket elektrickými parametry anténní napájecí soustavy prakticky bez setrvačnosti.

Příklady praktického použití ultrakrátkých vln

Televize má dnes nesmírný význam v kultuře, vědě a v národním hospodářství. K dalšímu rozvoji televise přispívá rozvoj techniky ultrakrátkých vln, impulsní techniky a nových elektronických přístrojů.

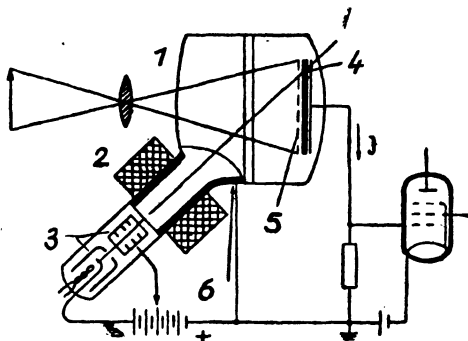
V dalším vysvětlíme princip přenosu obrazu v televizi (*obr. 13*).

Vysílaný obraz se optickým objektivem promítá na dielektrickou destičku pokrytou mosaikou drobných fotočlánků. Na druhé straně destičky je tenká kovová vrstva. Po mosaikové destičce, umístěné v elektronové vysílací trubici — ikonoskopu, neustále probíhá po řádcích elektronový paprsek. Vnitřní povrch trubice je opatřen kovovým povlakem, který představuje anodu pro elektrony, vysílané mosaikou při ozáření elektronovým paprskem.

V elektrickém obvodu, tvořeném mosaikovou destičkou, kovovým povlakem trubice a vnějším ohmickým odporem na vstupu zesilovače, vznikají v okamžicích, kdy konec elektronového paprsku přechází s osvětleného bodu mosaiky na neosvětlený a opačně, impulsy elektrického proudu. Tyto tak zvané videoimpulsy, moduluující ultrakrátkovlnné kmity vysílače se směrovou antenou, pracují na vlnách centimetrového pásma. V televizním středisku se stejné anteny používá pro příjem. Po detekci a zesílení videoimpulsy moduluují kmity vysílané výkonným vysílačem metrových vln s nesměrovanou antenou. V televizním přijímači se za-

chycují elektromagnetické vlny, vyslané antenou televizního střediska, a po detekci a zesílení se mění elektrické signály ve světelný obraz na stínítku obrazovky. Na stínítku je fluoreskující plátno, které svítí v místech, na něž dopadá po řádcích elektronový paprsek synchronně s paprskem vysílače. Intenzita dopadajícího paprsku se mění podle amplitudy videoimpulsů, která je úměrná osvětlení vysílaného obrazu.

Při vysílání ze studia televizního střediska odpadá translace na centimetrových vlnách.



Obr. 13: Schema televizního přenosu.

- 1 - objektiv, 2 - vychylovací cívky, 3 - elektronový projektor,
4 - signální destička, 5 - mosaika, 6 - kolektor.

Vysílací antena televizního střediska se umísťuje ve velké výšce, aby se dosáhlo velkého akčního radia. Jako spojovacího vedení mezi antenou a vysílačem ultravysoké frekvence, jehož délka činí několik set metrů, se za účelem zmenšení ztrát používá koaxiálních kabelů nebo vlnodů a přizpůsobovacích zařízení.

Vysílač ultravysoké frekvence se skládá s mnohakaskádního generátoru s nezávislým buzením a z modulátorů obrazu a zvuku. Velký počet kaskád generátoru je nutný pro zabezpečení stability vysílané frekvence, bez níž je nemožný dobrý příjem signálů obrazu a zvuku, protože přijímač je naladěn na příjem zcela určité vlnové délky.

Budičem napájecího generátoru je vysokofrekvenční generátor o malém výkonu. Pro stabilisaci vyráběných kmitů se do kondensátoru jeho kmitavého obvodu vkládá destička z křemenného krystalu. Kaskády hlavního generátoru jsou vybaveny vhodně nařízenými resonátory a elektronkami speciální konstrukce. Kaskádami se zvýší frekvence kmitů budiče na ultravysokou a výkon se zvětší na několik kW.

Modulátor signálů obrazu je v podstatě výkonový zesilovač videoimpulsů, který mění amplitudu kmitů ultravysoké frekvence podle velikosti videoimpulsů. Modulátor zvuku mění frekvenci vysílaných kmitů podle amplitudy zvukových vln, přicházejících z mikrofону.

K pomocnému a kontrolnímu zařízení televizního střediska náleží impulsní generátory, synchronisující práci vysílací a přijímací trubice, a regulátory zesílení signálů zvuku a obrazu.

Ultrakrátkých vln je v televizi nutno používat proto, že televizní signál pohyblivého obrazu má velmi široké frekvenční spektrum — od desítek do několika milionů Hz. Pro kvalitní přenos se totiž obraz rozkládá na 625 sloupců a 625 řádků, po nichž postupně probíhá elektronový paprsek. Maximální počet impulsů vysíla-

ných do modulátoru je tedy $\frac{625 \times 625}{2}$. Při pohyblivém obrazu je doba přípustná k proběhnutí paprsku po obraze rovna $\frac{1}{25}$ sekundy. Maximální počet impulsů za sekundu je tedy $\frac{625 \times 625 \times 25}{2} = 5$ milionů Hz.

Při přenosu nehybného obrazu může být počet impulsů mnohem menší. Je určen dobou přípustnou pro přenos jednoho obrazu. Proto je možno na příklad fototelegramy vysílat na krátkých nebo dokonce i na dlouhých vlnách.

Ultrakrátkých vln je nutno použít také tehdy, má-li se vysílání šířit jen v určitém směru, zvláště při retranslaci přenosů jiných televizních středisek a v radioreléových linkách.

Dnes bylo v rozvoji televise dosaženo četných úspěchů. Byly zkonstruovány nové typy vysílacích trubíc — ortikon a superortikon, které mají mnohem větší citlivost než ikonoskop. Nevyžadují tak intenzivního osvětlení vysílaného objektu. Citlivější vysílací trubice spolu s úspěchy translace na centimetrových vlnách umožnily vysílání z prostoru mimo studio. Velkých úspěchů bylo dosaženo i v konstrukci přijímacích trubíc. Jsou již rozšířeny obrazovky s průměrem stínítka 400 mm a byly již vyrobeny obrazovky s pravouhlým stínítkem o úhlopříčce 500 mm a více. Úspěšně se řeší i problém televizního přijímače s velkým plátnem a s použitím optické projekce.

Aby bylo možno vysílat televizní pořady na velké vzdálenosti, je nutno použít retranslace pomocí radioreléových linek.

Radioreléová linka se skládá z vysílače a koncového přijímače, mezi nimiž je několik retranslačních aparatur se směrovými antenami. Aparatury se umísťují na věžích vysokých asi 60 m ve vzdálenosti kolem 60 km od sebe.

Radioreléová linka decimetrového a centimetrového pásma umožňuje nejen přenos několika televizních pořadů, ale zároveň přenos několika set rozhlasových pořadů. Další výhodou je to, že není prakticky možné rušení nebo odposlouchávání.

V současné době jsou v provozu radioreléové linky délky několik set kilometrů a pracuje se na projektech radioreléových linek délky několika tisíc kilometrů.

Použití ultrakrátkých vln pro radiové spojení je omezeno akčním radiem ultrakrátkých vln. Přesto však možnost současného vysílání mnoha stanic v poměrně úzkém frekvenčním rozsahu a možnost použití širokopásmové modulace činí ultrakrátkovlnné radiové spojení v mnoha případech nenahraditelným.

Radiového spojení ultrakrátkými vlnami se používá především pro oblastní a polní spojení, spojení s letadly a pod.

Na použití ultrakrátkých vln je založena radiová telefonie s frekvenční modulací. Při tomto způsobu modulace se podle frekvence a síly zvuku mění frekvence vysílaných kmitů. Příjem frekvenčně modulovaných signálů není téměř rušen atmosférickými a průmyslovými vlivy, protože přijímač nereaguje na změnu amplitudy přijímaných kmitů. Radiového vysílání na ultrakrátkých vlnách se proto používá především ve velkých městech. Frekvenční modulace je možná jedině na ultrakrátkých vlnách, protože vyžaduje značně širší spektrum signálu než amplitudová. Vzhledem k vysoké kvalitě vysílaného zvuku při frekvenční modulaci je tato vhodná zejména při přenosu hudby, zpěvu a pod.

Radiolokátory slouží ke zjišťování polohy předmětů, na příklad letadel nebo lodí. Pracují spolehlivě i v noci nebo v mlze. Dnešní radiolokátory určují polohu s velkou přesností, nedosažitelnou nejlepšími optickými dálkoměry.

Vysílač radiolokátoru vysílá radiové vlny, jejichž část odražená od hledaného

předmětu je zachycována přijímačem. Podle doby, která uplyne od vyslání signálu, šířícího se rychlostí 300 000 km/sec, do jeho zachycení přijímačem se zjistí vzdálenost hledaného objektu. Směr odraženého paprsku určuje úhlové souřadnice objektu. Radiolokátor umístěný v letadle umožňuje zjistit polohu města, jednotlivých budov, mostů a pod.

Dnešní radiolokační zařízení pracují na vlnách centimetrového a decimetrového pásma. To umožňuje vysílání a příjem velmi úzkých paprsků a krátkých impulsů. Existují také radiolokátory, které automaticky sledují pohyb hledaného objektu, jakmile se dostane do oblasti jejich působení, a pravidelně oznamují souřadnice jeho polohy.

Radiolokace umožňuje automatické navádění rakety na cíl. Na stínítku radiolokačního indikátoru je přitom možno pozorovat polohu řízené rakety a jejího cíle v podobě dvou svítících teček. Automatické navádění rakety na cíl se provádí pomocí radiolokátoru v hlavici rakety.¹⁾

Použití radiolokace v řízení dopravy prakticky zamezuje havariím.

Radiolokátorů se rovněž používá k vyhledávání deštových mraků pro účely krátkodobých předpovědí počasí a j.

Radiolokace není možná bez ultrakrátkých vln nejen proto, že používá úzce směřovaných radiových paprsků, ale i proto, že pro přesné měření vzdáleností je třeba impulsů ultravysoké frekvence o délce kolem jedné mikrosekundy, při čemž frekvenční spektrum takového signálu je velmi široké — několik milionů Hz.

Radiolokace má nesmírný význam pro navigaci. Pomocí speciálního radiolokátoru v letadle může pilot přesně určit polohu letadla bez jakýchkoli pozemních orientačních bodů.

Pomocí radiových majáků, vysílajících směřované signály, může být letadlo dovedeno i při špatné viditelnosti k letišti a přistát.

Na radiolokaci je založena velmi přesná dálkoměrná soustava. V »impulsní kruhové soustavě« se poloha lodí nebo letadla určuje měřením vzdáleností hledaného objektu od dvou radiových majáků. Při použití ultrakrátkých vln možno měřit vzdálenosti do 500 km s maximální chybou 20 m.

V »impulsní hyperbolické soustavě« se poloha určuje z rozdílů vzdáleností od tří pozemních stanic, vysílajících synchronisované vysokofrekvenční signály. Při vysílání na velmi dlouhých a krátkých vlnách možno měřit vzdálenosti mnoha tisíc km s chybou ± 20 km.

Radiolokace se rovněž používá pro přesné měření vzdáleností v geodesii.

Ultrakrátké vlny se šíří horními ionisovanými vrstvami zemské atmosféry. To umožňuje řízení kosmických raket radiem a příjem radiových signálů vyslaček umístěných v těchto raketách. Tak je možno získat informace o vesmíru.

Je nedaleko doba, kdy radiolokace a telemechanické řízení radiem umožní uskutečnit lety raket, z počátku bez lidí, později i s lidmi, za účelem vědeckých bádání ve vesmíru.

Radiové spojení s kosmickými raketami je uskutečnitelné prostřednictvím ultrakrátkých vln při vysílacím výkonu pouze 2 W. Tento výkon je mnohem menší, než výkon potřebný pro pozemní radiové spojení na stejnou vzdálenost. Je to proto, že při pozemním radiovém spojení se radiové vlny mnohokrát odrážejí od ionisovaných vrstev atmosféry a povrchu Země, při čemž vznikají velké ztráty energie.

¹⁾ Viz na př. I. Kučerov: *Rakety řízené radiem*, v tomto časopise, č. 1, 1956.

Maximální vzdálenost, na kterou lze dnes navázat radiové spojení ultrakrátkými vlnami, činí kolem 3 miliard km. Doba k tomu potřebná je 3 hodiny.

Při řízení kosmických raket je třeba provádět složité matematické výpočty, vyžadující dlouhé doby. Proto i při použití nejlepších mechanických počítačích strojů přicházejí řídicí signály při velmi rychlém pohybu rakety příliš pozdě. Tento nedostatek mohou odstranit pouze elektronické počítačové stroje.

V dnešní vědě a technice, v letectví, v nukleární fyzice, ve statistice a v mnoha jiných oborech se vyskytují výpočtářské úlohy, k jejichž vyřešení běžnými způsoby je třeba několikaměsíční práce velkého počtu pracovníků. Elektronický počítačový stroj vyřeší takovou úlohu během několika minut s požadovanou přesností. K jeho obsluze je třeba pouze několika lidí.

Elektronické stroje mohou řešit nejen matematické, ale i logické úlohy. Byl již zkonstruován elektronický stroj pro automatický překlad textu v jednom jazyce do jiného.²⁾ »Slovník« tohoto stroje představuje signály kodované podle určitého systému.

Další zdokonalení elektronických strojů, především nahrazení vakuových přístrojů polovodiči, zvýší jejich provozní spolehlivost, zmenší těžkopádnost a umožní jejich použití pro nejrůznější účely.

Každý elektronický přístroj je v podstatě proměnný řízený odpor. Ve vakuovém přístroji se změny odporu dosahuje změnou toku elektronů emitovaných žhavenou katodou. V krystalickém polovodiči existuje také řízený tok elektronů, avšak k jeho vzniku není třeba umělého zdroje, vyžadujícího poměrně mnoho energie. V polovodiči, obsahujícím určité příměsi, jsou vždy elektrony, schopné pohybu uvnitř krystalické mřížky.

První zprávy o možnosti náhrady vakuových elektronických přístrojů v radiových zařízeních zprvu bodovými, posléze plošnými germaniovými přístroji, se objevily teprve v letech 1948—1951. Výhodou polovodičů kromě dlouhé životnosti, zabezpečující vysokou provozní spolehlivost zařízení, je, že spotřebují velmi malý výkon. V zařízeních s vakuovými přístroji o malých výkonech se značná část energie spotřebuje na žhavení katody. Vzhledem k tomu, že toho u polovodičů není třeba a že účinnost řídicích obvodů je při použití polovodičů značně vyšší, je celková spotřeba energie aparatury s polovodičovými elektronickými přístroji 50—100krát menší, než u aparatury s vakuovými přístroji.

Při použití plošné krystalické triody jako zesilovače a generátoru nízkofrekvenčního proudu lze získat výchozí výkon několik desítek wattů při účinnosti do 50 %. Krystalické tetrody lze použít jako zesilovače a generátoru vysoké frekvence do 50—100 milionů Hz s výchozím výkonem řádu tisíciny wattu.

Plošnou triodou lze dosáhnout minimálního potřebného zesílení při napájecím napětí pouze 0,3—1 V.

Rozměry germaniových triod jsou velmi malé — samy triody 1—3 mm³ a triody s hermetickým obalem 1 cm³.

Pro napájení krystalických triod se používá zdrojů o malém výkonu a napětí 1 V i menším. V elektrolytu může být krystal germania anodou galvanického článku. To umožňuje výrobu elektrických článků s použitím laciných radioaktivních materiálů. V dohledné době mohou být vyrobeny polovodičové elektronické zesilovače, tvořící jediný konstrukční celek se zdrojem napájení. Tyto zesilovače mohou pracovat nepřetržitě po řadu let.

Dosud není rozřešen problém elektronických polovodičových přístrojů pro výrobu a zesílení výkonných kmitů celého pásma radiových frekvencí včetně

²⁾ Viz na př. *Elektronické překládání*, v tomto časopise, č. 1, 1956.

ultravysokých. Nejsou dosud nalezeny krystalické elektronické přístroje, které by nahradily vakuové elektronové trubice.

K vyřešení problému výroby polovodičových přístrojů s velkým výkonem nutno především vyřešit problém odvádění tepla. Obtíže spočívají v tom, že teplota germaniového krystalu nesmí překročit 70° C, protože jinak ztrácí usměrňovací schopnost. Pokusně byly již sestrojeny výkonné usměrňovače na 200 A s vodním chlazením, u nichž průměr germaniové destičky je 15 mm a tloušťka 0,4 mm. Je možno předpokládat, že v blízké době polovodičové usměrňovače naleznou široké použití nejen v radiopřijímačích, ale i v zařízeních o velkém výkonu, kde nahradí kenotrony, iontové vakuové gazotrony a jiné usměrňovače, které předčí lepší účinností a jinými důležitými vlastnostmi.

Všechna tělesa vesmíru vysílají elektromagnetické vlny širokého pásma, které zahrnuje jak světelné, tak radiové vlny. Díky schopnosti ultrakrátkých vln proniknout ionosférou je možno ultrakrátkovlnným přijímačem se směrovou antenou zachytit radiové vysílání nebeských těles. Na tom je založena radioastronomie.*) Pomocí výkonných radioteleskopů ve tvaru parabolických zrcadel o průměru několik desítek metrů konají astronomové důležitá pozorování těles ve vesmíru při jakémkoli počasí v kteroukoli denní dobu. Byly tak získány cenné informace o vesmíru, kterých nemohlo být dosaženo obvyklými optickými přístroji. Bylo na příklad objeveno radiové záření Měsíce na vlně 12 mm, radiové vysílání Galaxie a Metagalaxie, při čemž bylo objeveno i mnoho tak zvaných radiových hvězd, vysílajících pouze neviditelné záření. Dále bylo objeveno radiové záření na vlně kolem 20 cm, vysílané mezihvězdným plynem, tvořeným silně zředěným vodíkem.

Jinou novou vědou, vzniklou na základě rozvoje techniky ultrakrátkých vln, je radiospektroskopie, zabývající se výzkumem mikrokosmu.

Na základě pohlcování radiových vln milimetrového, centimetrového a částečně decimetrového pásma molekulami různých látek určuje radiospektroskopie složení těchto látek.

Radiospektroskop se skládá z generátoru ultrakrátkých vln a zátěže, kterou je na příklad rezonátor, do něhož se zavádí zkoumaná látka. Frekvence kmitů, vyráběných generátorem, se periodicky mění v mezích určitého pásma radiových vln. Zjišťuje se délka vlny, která je zkoumanou látkou nejvíce pohlcována. Pohlcování určité vlnové délky nějakou látkou nastává v důsledku resonance vysílané frekvence s vlastní frekvencí molekul zkoumané látky.

Praktický význam radiospektroskopie kromě analýsy a jiných vědeckých účelů je v tom, že umožňuje zvolit pro radiové spojení a radiolokaci nejvýhodnější vlnové délky, nepohlcované zemskou nebo kosmickou atmosférou.

Na principu pohlcování radiových vln určité délky nějakou látkou je založeno stabilizační zařízení generátorů milimetrových vln. Generátor dané frekvence je spojen s rezonátorem naplněným plynem, který pohlcuje frekvenci generátoru nebo její vyšší harmonickou. Pohlcování energie je sledováno regulátorem, který je automaticky uveden v činnost změnou frekvence generátoru, vyvolanou jakoukoli příčinou. Protože při daném tlaku a teplotě plynu je frekvence jím pohlcovaných téměř konstantní, udrží se uvedeným způsobem frekvence generátoru ultrakrátkých vln velmi přesně — odchylky nejsou větší než 0,005 %.

Molekulární hodiny založené na podobném principu jsou dnes nejpřesnějším přístrojem na měření času.

Ultrakrátkých vln se používá také při vědeckých výzkumech atomového jádra,

*) Viz na př. *Radiová astronomie v tomto časopise*, č. 2, 1956.

na příklad v lineárním urychlovači. Generátor ultravysoké frekvence budí ve vakuové komoře střídavé elektrické pole tvaru dlouhého válce. Částice, které střídavé elektrické pole udělí mnohonásobné zrychlení, se pohybuje podél osy vakuové komory. Současně se zvyšováním rychlosti částice se zvyšuje i její kinetická energie, potřebná k uskutečnění nukleární reakce.

Jiný typ urychlovače, synchronofazotron obsahuje výkonný lampový generátor vysoké frekvence, který vytváří ve vakuové komoře urychlující elektrické pole. Částice se působením silného magnetického pole pohybují ve vakuové komoře po spirále. Vlivem elektrického pole nabývají velké rychlosti a velké energie.³⁾

Elektrony atomů dielektrika, nacházejícího se ve střídavém elektrickém poli, se sice nemohou volně pohybovat jako u kovů, ale přesto mění svou polohu. Přitom dielektrikum pohlcuje elektromagnetickou energii, která se mění v teplo. Množství pohlcené energie se zvětšuje se vzrůstem frekvence střídavého pole. Přitom není nutný přímý styk polepů kondensátoru s ohřivaným tělesem. Teplo se vyvíjí uvnitř ohřivaného předmětu a nepřivádí se vnějším prostředím jako při jiných způsobech ohřevu.

Indukčního ohřevu proudem vysoké frekvence se velmi používá pro ohřev dřeva, plastických hmot a jiných materiálů. Použití ultravysokých frekvencí umožnilo ohřev v případech, kdy ostatní metody selhaly. Zvláštností ultravysokofrekvenčního ohřevu dielektrika je možnost silného prohřátí vnitřních částí tělesa při poměrně slabém oteplení vnějších vrstev.

Vysokofrekvenčního indukčního ohřevu se používá i pro ohřev kovových detailů, které se umísťují do magnetického pole cívky, jíž protéká střídavý proud vysoké frekvence. Vlivem skin efektu se ohřívají jen povrchové vrstvy tělesa. Proto se tohoto způsobu používá při povrchovém kalení kovových předmětů. Velmi složité ocelové součásti mohou být zakaleny rychle a přesně do požadované hloubky jedině pomocí indukčního ohřevu proudem vysoké frekvence.

Vysokofrekvenční ohřev našel použití také v medicíně jako tak zvaná krátkovlnná a ultrakrátkovlnná terapie.

Účelem tohoto článku bylo podat stručný výčet možností použití ultrakrátkých vln. Snad i to málo, co zde bylo řečeno, ukáže čtenáři nesmírný význam ultrakrátkých vln jak pro dnešní potřeby praxe, tak pro nejbližší budoucnost.

Zpracováno podle A. M. K u g u š e v, *Ultrakrótkije volny i ich primeneniye*, Izd. »Znanije«, Moskva 1955.

Marta Kubiková

³⁾ Viz na př. A. A. Kolomenskij, N. B. Rubin, *Urychlovače nabitých částic*, v tomto časopise, č. 1, 1956.