

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Stanislav Kubík

Elektrické modely [Dokončení]

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 2 (1957), No. 5, 568--576

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137196>

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>

v urychlování částic v plasmatu mohou mít některé druhy nestabilností vlákná plasmatu. Zejména může urychlování elektronů silně ovlivnit nestabilitost, spojená s podélným magnetickým polem v plasmatu, které může samovolně vzniknout vírovou torsní deformací plasmatického vlákna. Tento jev byl pokusně zjištěn. Dojde-li po druhém stlačení ještě k několika radiálním kmitům vlákna plasmatu, může se urychlování částic několikrát opakovat. Experimentálně se zatím dosáhlo nejvýše tří následujících kmitů. To lze takto vyložit: V jistém okamžiku dojde k vzájemnému působení plasmatu se stěnami výbojové komory, jež způsobí vypařování materiálu, z něhož je stěna této komory zhotovena. Tím se dostane do prostoru komory značné množství vedlejších plynů.

Takový je hrubý náčrt dějů při mohutných impulsních výbojích v plynech s malou hustotou. Další vývoj v tomto směru závisí podstatně na tom, podaří-li se vytvořit podmínky, za nichž vlákno plasmatu může během narůstání proudu mnohokrát kmitat aniž se dotkne stěn výbojové trubice. Jsou však vážné pochybnosti, že se to podaří.

Přes to nelze úplně zavrhnout pokusy v tomto směru. Zároveň však je třeba pečlivě zkoumat i jiné varianty řešení úlohy, jak dosáhnout thermonukleárních reakcí velké intensity. Velmi zajímavé jsou ty varianty, v nichž by bylo možno využít stacionárních dějů.

Volně přeložil dr. Josef Veselka

ELEKTRICKÉ MODELÝ

(Dokončení)

Na základě tohoto jednoduchého schematu je možno vyslovit následující závěry: K modelování stacionárních procesů, popisovaných soustavou n lineárních algebraických rovnic je možno použít el. obvodu, sestávajícího z $(n + 1)$ napěťových transformátorů. K zadání absolutních členů a koeficientů rovnice je nutno mít $n(n + 1)$ izolovaných cívek. Počet vývodů u každé cívky určuje možnost stanovení číselných hodnot koeficientů a absolutních členů (na př. pro zadání koeficientů od nuly do 100 % po 0,1 % je nutno mít 1000 vývodů v každé cívce.

Měření hledaných hodnot $\frac{\Phi_x}{\Phi_0} = x$ se nahrazuje měřením napětí na pomocných cívkách z_1 a z_2 na základě rovnice $U = k\Phi$. Dále jsou používány transformátory proudu. Na obr. 4 je mechanická příhradová soustava a její elektrický model. Určení zatížení v staticky neurčitých konstrukcích znamená řešit soustavu lineárních algebraických rovnic. Vychází se z analogie matematických výrazů pro velikost potenciální energie pružného deformovaného nosníku (V) a energie, vyvinuté ve vodiči průchodem proudu.

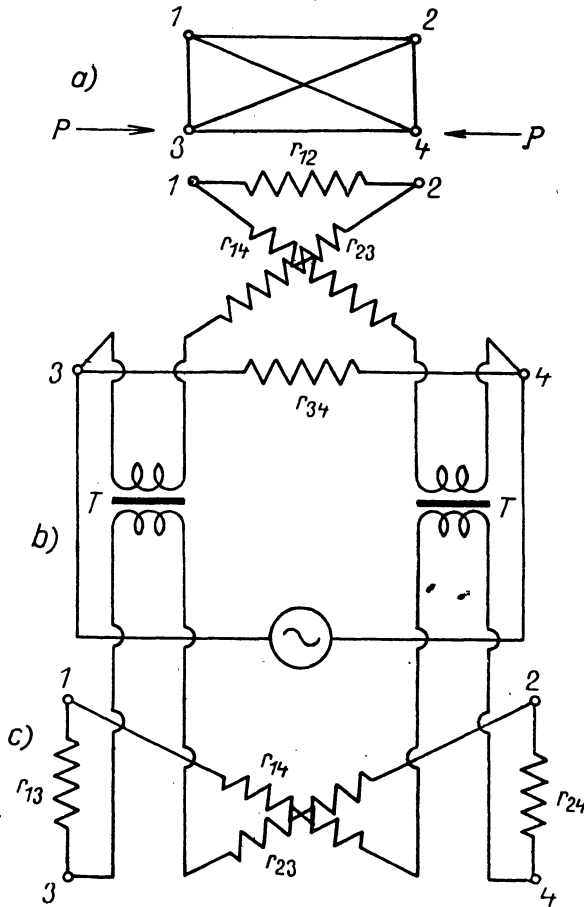
$$V = \frac{1}{2} p^2 \delta, \quad W = I^2 r ;$$

V — potenciální energie prodlouženého nosníku;

p — napětí v prodlouženém nosníku;

$\delta = \frac{L}{EF}$ — deformace nosníku, způsobená podélnou silou;

- L a F — délka nosníku a jeho příčný průřez;
 E — model pružnosti materiálu nosníku;
 W — energie el. proudu;
 I — intenzita proudu;
 r — odpor vodiče;



Obr. 4. Příkladová soustava (a) a její elektrický model (b a c) z odporů r a transformátorů T .

Napětí v jednotlivých nosnicích soustavy rozložíme na vertikální a horizontální složky. Tomu odpovídají dvě elektrická schemata: 4 b) — pro horizontální složky, 4 c) — pro vertikální složky.

Každému nosníku st , který spojuje libovolné uzly s a t , odpovídají dva různé odpory r_{st} na schemech b a c, zapojené mezi body s a t . Velikosti r_{st} jsou úměrné

$$\delta_{st} = \frac{L_{st}}{E_{st} F_{st}}.$$

Každé rozvětvení proudu na schematu *b* je spojeno s odpovídajícím rozvětvením na schematu *c* pomocí transformátoru s převodem, který je dán výrazem

$$\frac{I_{st,v}}{I_{st,h}} = \operatorname{tg} \alpha,$$

$I_{st,v}$ — intenzita proudu v r_{st} na schematu *c*;

$I_{st,h}$ — intenzita proudu v r_{st} na schematu *b*;

α — úhel, který svírá nosník *st* s vodorovnou osou.

$I_{st,v}$ bude úměrný vertikální složce napětí v nosníku *st*, $I_{st,h}$ bude úměrný složce horizontální. Odtud vyplývá, že je-li nosník vodorovný, nejsou odpovídající body na modelu (*obr. 4b*) mezi sebou spojeny, t. j. proud mezi těmito body je roven nule. Analogicky tomu uzly spojené vertikálními nosníky se na modelu (*obr. 4c*) nespojí odpory.

Vše, co bylo řečeno, se vztahuje na vnější síly, t. j. na modelech 4 b) a 4 c) k bodům, ke kterým je připojeno zatížení, se přivádí proudy, úměrné vertikálním a horizontálním složkám těchto zatížení. Proto v soulase s *obr. 4*, je k bodům 3 a 4 na modelu *b* přiveden proud z generátoru střídavého proudu.

Je známo, že namáhání v staticky neurčité soustavě se rozdělí tak, že odpovídá rovnicím rovnováhy v každém uzlu a podmínce, že potenciální energie soustavy

$$V = \frac{1}{2} \sum_{st} \delta_{st} (p_{st,h}^2 + p_{st,v}^2),$$

má minimální hodnotu, t. j.

$$\frac{\delta V}{\delta p_{st,h}} = 0, \quad \frac{\delta V}{\delta p_{st,v}} = 0,$$

$p_{st,h}$ — horizontální složka namáhání p_{st} v nosníku *st*, $p_{st,v}$ — vertikální složka téhož namáhání.

Rozdělení proudů v elektrických schemech *b*) a *c*) se děje podle prvního Kirchhoffova zákona (v uzlu $I = 0$) a dále platí, že celková energie el. proudu celé soustavy

$$W = \sum_{st} r_{st} (I_{st,h}^2 + I_{st,v}^2),$$

má minimální hodnotu, t. j.

$$\frac{\delta W}{\delta I_{st,h}} = 0, \quad \frac{\delta W}{\delta I_{st,v}} = 0.$$

Je tedy vidět, že dvě rovnice, napsané pro každý uzel schemat *b* a *c* podle Kirchhoffova zákona, odpovídají rovnicím rovnováhy, napsaným pro každý uzel konstrukce (suma horizontálních a vertikálních složek namáhání v příslušném uzlu je rovno nule) a též podmínky o minimu energie si navzájem odpovídají. Jevy v elektr. modelech *b*) a *c*) věrně obráží rozdělení namáhání v konstrukci a proto poměry, které existují v konstrukci, můžeme si přesně zjistit změřením odpovídajících veličin na modelech.

Další velkou skupinou jsou modely založené na principu odporových sítí, jejichž pomocí se řeší na příklad přechodové stavy veličin, měnících se v prostoru a času. Dále

je možno modelovat na př. Laplaceovu rovnici pomocí elektrolytické vany a pomocí el. modelů řešit diferenciální a intergrodiferenciální rovnice i nelineární. Není posláním tohoto článku probírat tyto jednotlivé způsoby el. modelování, ale jen upozornit na problematiku, se kterou se specialisté v tomto oboru setkávají a na nejjednodušších příkladech vysvětlit princip el. modelování fyzikálních jevů. Dnes již existuje rozsáhlá literatura o tomto novém oboru a čtenář, který by měl bližší zájem, může v ní najít rozsáhlá a podrobná pojednání.

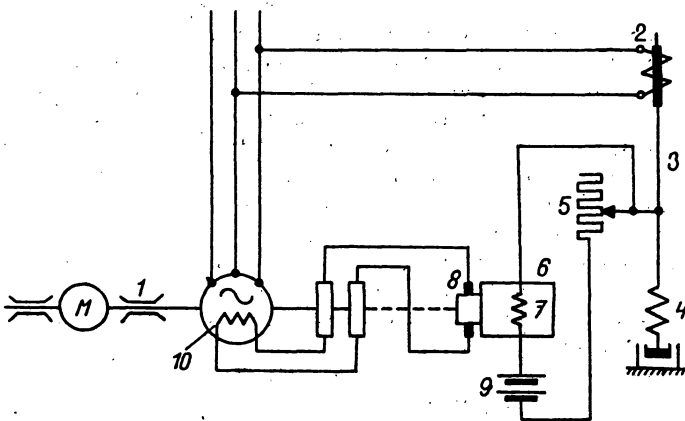
Při analýze mnohých složitých fyzikálních jevů se setkáváme s procesy, které souvisí s jednostranným předáváním signálů, s přeměnou energie jedné formy v jinou. V každém bodě dané oblasti existují mnohé veličiny, spojené navzájem soustavou rovnic.

Při výzkumu elektromagnetického pole v nepohybující se souřadné soustavě je možno ve smyslu Maxwellových rovnic každému bodu prostoru v určitém okamžiku připsat šest hodnot složek magnetického a elektrického pole. Při vyšetřování pružné soustavy těles, na základě rovnic pružnosti a také při výzkumu pohybu těles v kapalinách a plynech se setkáváme s podobnými případy. Elektrický model těchto procesů pro každý elementární kvádr sestává z určitého počtu jednotlivých článků obvodu, které jsou navzájem spojeny někdy transformátorky a jindy zesilovači.

Použití elektronických zesilovačů šlo cestou vypracování modelů obvodů se soustředěnými parametry, ve kterých jsou procesy popisovány obyčejnými diferenciálními rovnicemi (s jednou nezávisle proměnnou).

Tyto modely došly velkého použití při návrhu a analýze soustav automatické regulace a řízení. Každá regulační soustava obsahuje v tom či jiném tvaru elementy přeměny energie — zesilovače.

Na obr. 5 je schema regulace napětí generátoru. Je vidět, že tato regulační soustava sestává prakticky ze čtyř oddělených, směrových aktivních čtyřpólů — zesilovačů (aktivní čtyřpól obsahuje zdroj): Tento směrový čtyřpól má vstupní mechanický obvod a výstupní obvod elektrický. Základním zdrojem energie je stejnosměrná síť (9).



Obr. 5. Schema regulace napětí generátoru.

M — motor (turbina); 1 — synchronní generátor; 2 — vinutí elektromagnetu měřícího zařízení regulátoru; 3 — kotva měřícího zařízení; 4 — pružina a tlumič; 5 — reostat; 6 — budič; 7 — budící vinutí; 8 — vinutí kotvy; 9 — zdroj proudu budícího obvodu; 10 — budící vinutí generátoru.

1. Elektromagnet (2) — jádro (3). Změna napětí sítě způsobí změnu polohy jádra (3) regulátoru, ale změna polohy jádra nikterak nezmění velikost napětí. sítě.

Tento směrový čtyřpól má vstupní elektrický obvod a výstupní mechanický obvod s dvěma póly. Jedná se tedy zde o přeměnu formy energie. Základním zdrojem energie je zde střídavá síť.

2. Jádro (3) — reostat (5). Přemístění jádra (3) má za následek posuv reostatu (5) a způsobí změnu intenzity proudu v budícím obvodu (7) budiče (6), opačného vlivu však není. Změna intenzity proudu v budícím obvodu nijak nemůže mít vliv na polohu jádra.

3. Budící vinutí (7) — vinutí kotvy (8). Budící proud mění intenzitu proudu v obvodu kotvy, opačného vlivu není. Zdrojem energie je motor M , otáčející kotvou.

4. Budící vinutí (10) — vinutí statoru (1) generátoru. S měnícím se proudem v budícím obvodu generátoru se mění napětí na jeho svorkách, zpětného vlivu však prakticky není. Základním zdrojem energie je mechanický motor (M) — turbína.

V popsaném zařízení jsou tedy čtyři zesilovače se dvěma vedlejšími zdroji energie: zdrojem budícího proudu (9) a motorem (M). Budeme toto zařízení modelovat pomocí zesilovačů. Na obr. 6 je schema elektronického modelu pro soustavu dvou rovnic.

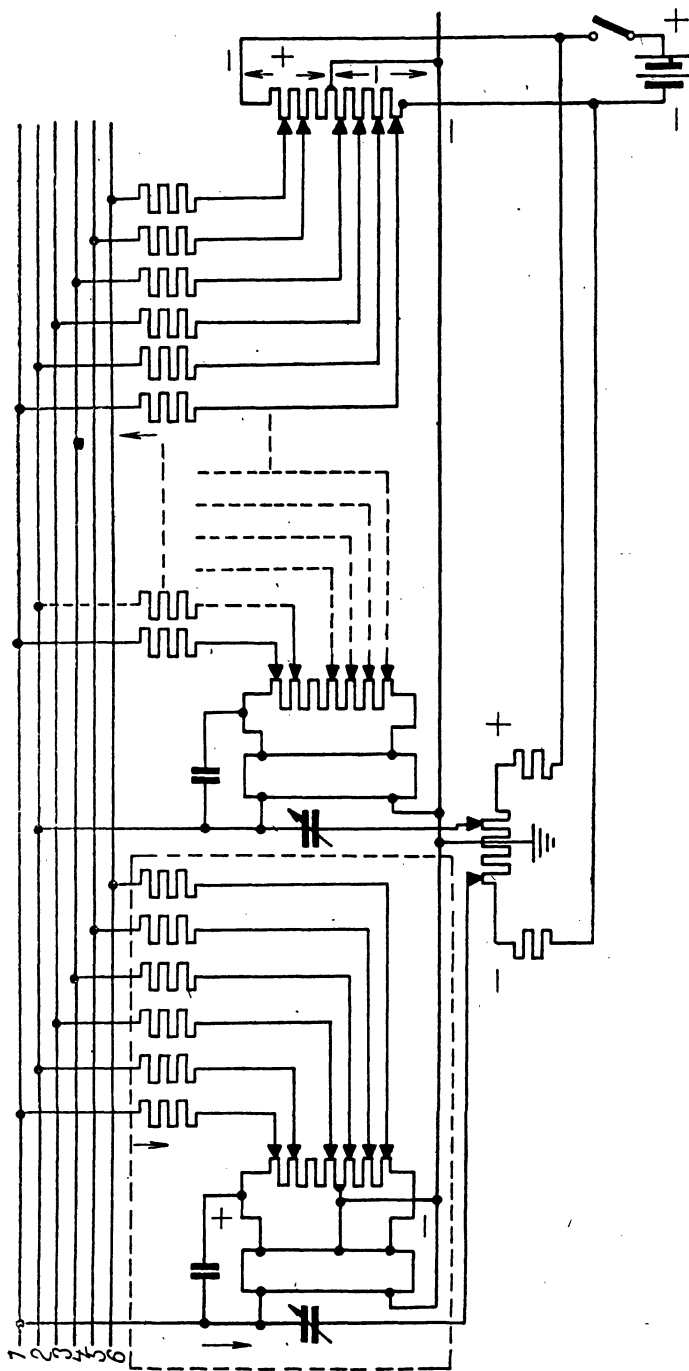
Hledanými veličinami jsou zde napětí na výstupu zesilovačů. Napětí lze snadno měřit, měnit i určit jeho průběh. Koeficienty se určí pomocí děličů napětí, zabudovaných na výstupu zesilovačů nebo pomocí odporů, případně vazebních kondenzátorů.

Jednotlivé prvky modelu umožňují prováděti různé matematické operace s napětími. Je možno získat napětí, rovné součtu mnoha daných napětí nebo vytvořit napětí, rovné derivaci nebo integrálu. Pomocí nelineárních funkcionálních měničů je možno získat napětí, které je danou funkcí nějakého jiného napětí. Všechny tyto operace se uskutečňují velmi rychle, během několika tisícín vteřiny.

V modelovacích zařízeních jsou speciální řídicí panely a komutátory, které umožňují sestavit strukturální schema ze stávajících prvků podle dané soustavy rovnic. Jindy se tato schemata sestavují podle určité soustavy pro pohodlný výběr prvků (tak je tomu na př. u maticových modelů).

V modelovací praxi se používá také spojování modelu s reálnými objekty. Tak se postupuje na př. při projektování a výzkumu automatických pilotů. Na modelu se vymodelují rovnice pohybu letadla a připojí se k němu skutečný automatický pilot. Do tak vzniklé soustavy se zavedou elektrické proudy, odpovídající silám větru, změnám atmosférického tlaku, různým rušením a dalším časově proměnným veličinám, které působí na letadlo při letu. Je ovšem možné nahradit automatického pilota v uvedené soustavě při jeho projekci elektrickým modelem. Pomocí elektrických modelů je možno v dynamických regulačních soustavách určovat stabilitu dané soustavy a vliv změny parametrů na stabilitu, stanovit oblasti parametrů, které zabezpečují stabilitu, vyšetřit vliv změny parametrů soustavy a jejich kombinací na tvar přechodných procesů, určit optimální hodnoty parametrů regulovaného objektu, což umožní upřesnit strukturální schema regulační soustavy, určit amplitudu překývnutí, frekvenci kmitů, dobu trvání přechodného stavu a další data.

Model umožňuje vizuálně přešetřit veliké množství variant a tyto případně zaregistrovat na oscilogramech. Vedle toho je modelů hodně používáno pro vyšetřování přechodných stavů ve strojích a přístrojích, pro výpočet proudů nakrátko, přepětí v elektrických zařízeních a pod. V některých případech se dají na modelech podrobně vyšetřit i nestabilní procesy při zavedení časově proměnného měřítka pro všechny proměnné veličiny. Při nestabilních procesech totiž hledané veličiny s časem rychle rostou a získat řešení úlohy pomocí modelu bez takového proměnného měřítka je velmi obtížné.



Obr. 6. Schema elektronického modelu soustavy regulace napětí generátoru. Obdělníky jsou zesilovače.

V technice a fyzice je potřeba řešit různorodé úlohy. Schematicky je možno je klasifikovat na př. tímto způsobem:

Na fyzikální soustavu Φ působí nějaké síly s . Systém reaguje na toto působení ve formě p . Celý tento proces je popsán rovnicemi y . Při jednoznačné souvislosti Φ , s , p a y je možno získat jednu z nich pomocí ostatních známých. Dostaneme tak čtyři typy úloh:

Prvá (přímá). Je dána soustava (Φ), rovnice (y) procesu a síly, které působí (s). Je potřeba určit reakci soustavy (p).

Druhá (zpětná). Je dána soustava (Φ), rovnice (y) procesu a reakce (p). Je potřeba najít, jaké jsou působící síly (s).

Třetí (inverzní). Jsou dány rovnice (y) procesu, působící síly (s) a reakce (p). Je potřeba určit podle daných vlastností soustavy (Φ) konstanty soustavy.

Čtvrtá (induktivní). Jsou dány vlastnosti soustavy (Φ), působící síly (s) a je známa reakce (p). Je potřeba sestavit nebo zpřesnit rovnice procesu (y).

Pátá (přístrojová). Jsou známy vlastnosti soustavy, rovnice, působící síly a reakce. Jakou doplňkovou soustavu je nutno připojit k základní, aby spolu reagovaly daným způsobem na známé působící síly.

Všechny tyto typy úloh kromě čtvrté (induktivní) mohou být řešeny pomocí elektrických modelů. K řešení úlohy čtvrtého typu je účelné provést experimenty s reálnou fyzikální soustavou nebo provést výzkum pomocí modelu, odpovídajícího podmínkám fyzikální podobnosti.

Je zřejmé, že najít fyzikální zákon, určit typ rovnic, popisujících daný proces, je nejlepší na samotném objektu. Avšak i v tomto případě může značně pomoci metoda elektrické analogie jako pomocný prostředek. Rovnice mohou být uskutečněny ve tvaru el. modelů a s jejich pomocí je možno srovnat známou reakci modelu a objektu.

Matematika umožňuje nejlepším způsobem zobecnit vlastnosti fyzikálních soustav a lakonicky vyjádřit nejsložitější závislosti. Elektrické modelování pomáhá plně využití matematiky v inženýrské práci. V současné době je principiálně možno sestavit el. schéma pro všechny známé rovnice matematické fyziky.

Matematika, jak známo, se rozvíjela s růstem a rozvojem užitých věd. Modelování, astronomie, mechanika, geodesie, hydrotechnika, tepelná technika, aeromechanika, optika, elektrotechnika a jiné technické vědy přinesly vznik nových pojmů, nových definic. Všechny mohou být názorně zobrazeny pomocí elektrických modelů.

Skalární, vektorová i tenzorová pole, n -rozměrné oblasti a křivočaré souřadnice, konformní zobrazení, pojem divergence, rotoru, základních čísel a funkcí, logická spojení a další — toto vše může být použito a znázorněno v elektrických modelech.

Theorie a praxe elektrického modelování má velký methodologický význam, protože umožňuje zobrazit mechanické, hydraulické, akustické a jiné obvody a soustavy elektrickými modely, které snadněji než jiné mohou být realizovány a sledovány experimentálně.

Elektrické modelování dovoluje také stanovit „vzájemnou záměnnost“ zařízení různé fyzikální podstaty, což umožňuje řešit úlohy záměnou jedněch zařízení jinými.

Vedle elektrického modelování se používá k řešení matematických a fyzikálních úloh matematických číslicových strojů*). Hranice mezi procesem elektrického modelování a procesem počítání (procesem řešení určitých matematických úloh) se velmi často stírá. Matematických strojů je možno použít i pro překlad z jednoho jazyka do druhého**). Přestávají však v tomto případě býti počítacími stroji a stávají se stroji logického typu.

*) Viz na př. článek *Elektronické počítačící stroje* v tomto časopise, roč. I (1956), č. 3.

***) Viz článek *Elektronické překládání*, tamtéž, č. 1.

Na závěr poukážeme na některé zvláštnosti modelování. Tyto zvláštnosti sestávají:

1. Ve spojení elektrického modelu části nějaké soustavy s reálnými články této soustavy. Proces v modelu musí při tom probíhat v přirozeném měřítku času. Je potřeba speciálních prvků pro spojení mezi modelem a reálnými články soustavy. Vnější poruchy, působící na model, mohou být též reálné.
2. V sestavení schematu elektrického modelu podle strukturního principu. Určitému počtu článků a prvků reálné soustavy musí odpovídat v strukturním schematu analogické články a prvky v modelu této soustavy. Musí být vyvedeny pro vnější působení.

Výzkumník musí mít možnost vizuálně pozorovat reakci modelu na libovolnou danou změnu v těchto článcích a prvcích a také její reakci vlivem jiných druhů poruch.

Rychlost reakce může být velmi velká. Reakce se musí projevit v daném čase — někdy během zlomků vteřiny, někdy je možno připustit miluty i více.

Praxe použití elektrických modelů pro výzkum fyzikálních jevů, provádění inženýrských výpočtů a pro pedagogické účely ukázala účelnost rozvoje několika směrů při realizaci modelů.

Jeden z nich je dán snahou vytvořit stále působící modely konkrétních objektů, představujících stálý zájem v dané oblasti vědy a techniky, na př.: modely masivních betonových zařízení (mostů, hrází), modely tepelných pochodů u vysokých nebo martinských pecí, radiových vlnovodů a pod. Počet modelů, které jsou sestrojovány pro jednotlivé, velmi důležité úkoly, je velmi veliký.

Jiný směr je dán přáním vytvořit universální modely, vhodné pro řešení určité třídy matematických úloh, na př. diferenciálních rovnic matematické fyziky, integrálních rovnic, obyčejných lineárních diferenciálních rovnic atd. Tyto modely jsou nazývány v důsledku svého určení diferenciálními analyzátoři (elektronintegrátory, matematickými stroji), pokud jsou používány pro číselnou integraci diferenciálních nebo řešení jiných rovnic.

Oby tyto směry jsou nutné. Universální modely — diferenciální analyzátoři — mají velmi přesné, složité a drahé prvky. Modely konkrétních objektů obsahují obyčejně značně velký počet prvků, avšak velmi jednoduchých a často stejných co do velikosti.

S diferenciálním analyzátořem může pracovat jen odborná síla a příprava před započítím vlastního řešení je značná.

Pro práci s modely konkrétních objektů je nutná kvalifikace specialisty v daném odvětví techniky. Je při tom obyčejně potřeba znát pouze fyzikální zákony sledovaného jevu. Nejlépe je, pracuje-li s modelem inženýr-specialista. Geometrická názornost modelu, jednoduchá analogie mezi parametry modelu a objektu, jednoduchost měřících method pro hledané veličiny a další přednosti modelů vytváří všechny podmínky k širokému používání modelů konkrétních objektů.

Reléová číslicová zařízení je možno používat k reprodukci nelineárních procesů pravděpodobnosti, biofyziky a pod.

Uvedeme ještě několik příkladů, kde mohou být s úspěchem použity elektrické modely.

V oblasti elektrotechniky zajímavé úlohy představuje výzkum skinefektu v masivních vodičích při jednofázovém proudu, přechodných stavů v el. strojích a přístrojích při zkratech, úlohy z praxe indukčního kalení kovových odlihtů, určování el. polí v elektronkách s prostorovými náboji a difusí iontů, tepelných polí v el. pecích, výpočty složitých izolátorů a kabelů.

Také strojaři a tepelní technici mohou řešit celou řadu aktuálních problémů pomocí elektrických modelů. Je to na př. výpočet tepelné stability zařízení, analýza tepelných

procesů v masivních betonových stavbách, řešení strojírenských otázek v podmínkách věčného mrazu (výběr základů atd.) a další. V metalurgii je to zkoumání procesu ochlazování odlitků a válcovaného materiálu, při kterém vznikají bunkry, usazeniny, průhyby, často vedoucí ke zmetkům.

Nebylo úkolem tohoto článku seznámit čtenáře s celou metodikou elektrického modelování a nebylo také možno se dotknout všech oblastí tohoto nového oboru. V rozsáhlé literatuře, která dnes existuje, najde ten, kdo se blíže zajímá o tento obor, potřebné údaje. Je také těžké vyčíslit všechny úlohy, při kterých je účelné použití elektrických modelů. Nesporné však je, že metoda elektrického modelování může a také jistě sehraje velkou roli ve všech oblastech vědy a techniky.

Použitá literatura

- L. I. Gutenmacher, *Električeskije modely*, Moskva 1949 Leningrad.
L. I. Gutenmacher, *Električeskije modelirovanije*, Izdatel'stvo „Znanije“, Moskva 1955.

Stanislav Kubík

THEORIE MAGNETO-HYDRODYNAMICKÝCH VLN A JEJÍ APLIKACE V ASTROFYSICE

A. HRUŠKA

Theorie magneto-hydrodynamických vln je poměrně velmi mladým odvětvím fyziky. Již název nám napovídá, že zde jde o kombinaci hydrodynamiky a teorie elektromagnetického pole. Předmětem teorie magnetohydrodynamických vln (dále zkráceně M-H vln) je pohyb vodivého kontinua v magnetickém poli a vlivy pohybu tohoto kontinua na magnetické pole, na vznik elektrických proudů a pod. Teorie M-H vln vznikla z potřeb astrofyziky, a právě zde se v poslední době značně uplatňuje. Řada otázek ze sluneční fyziky a problémů týkajících se mezihvězdné hmoty vede totiž právě na teorii M-H vln. Ta byla matematicky formulována po prvé Alfvénem v roce 1942. Experimentálně byla existence M-H vln dokázána Lunquistem r. 1952. Od té doby se zájem astrofysiků a teoretických fyziků o M-H vlny neustále zvyšuje, takže v současné době vychází v různých časopisech měsíčně značné množství prací týkajících se této problematiky. Většina z nich se zabývá řešením rozličných speciálních případů. Ty jsou často velmi komplikované po matematické stránce a nebudeme se zde proto jimi zabývat. Omezíme se pouze na nejelementárnější otázky teorie M-H vln, aby si čtenář mohl učinit alespoň přibližnou představu o celé problematice.

Nejprve si povšimneme vzniku M-H vln, dále probereme M-H vlny v různých prostředích a v závěru si ujasníme aplikace teorie M-H vln na vybrané partii sluneční fyziky.

1. Vznik M-H vln, základní vztahy

Mějme na mysli vodivou kapalinu o permeabilitě μ , pohybující se rychlostí v v magnetickém poli intenzity H . Pohybem kapaliny vzniká elektrické pole o intenzitě E . V absolutní soustavě elektromagnetické, kterou budeme dále užívat, platí

$$E = \mu v \times H.$$