

OBSAH

	Předmluva	11
	Seznam použitých symbolů	14
1.	Úvod	17
2.	Fyzika částic a fenomenologie sdílení tepla	20
2.1.	Měrná tepelná vodivost a kapacita pevné látky	20
2.1.1.	Fononová vodivost	20
2.1.2.	Elektronová tepelná vodivost	21
2.1.3.	Měrná tepelná kapacita pevné látky	21
2.1.4.	Měrná tepelná vodivost plynů	22
2.2.	Sdílení tepla konvekci a zářením	23
2.2.1.	Konvekce a sdílení tepla	23
2.2.2.	Záření a sdílení tepla	24
2.3.	Fenomenologická teorie vedení tepla	25
2.3.1.	Veličiny a pojmy fenomenologického popisu vedení tepla	25
2.3.2.	Vedení tepla v izotropní pevné látce a Fourierův zákon	28
2.3.3.	Formulace Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla v pevné látce	29
2.3.4.	Okrajové podmínky	31
2.3.5.	Některé problémy související s okrajovými podmínkami	33
2.3.6.	Bezrozměrné parametry v rovnicích	36
2.3.7.	Zjednodušení problému vedení tepla pro případ okrajových podmínek nezávislých na čase	37
2.3.8.	Laplaceova rovnice a ustálené rozložení teploty v objektu	38
3.	Modelování sdílení tepla v konstrukcích elektroniky	39
3.1.	Konstrukční model sdílení tepla	40
3.2.	Hledisko fyziky v modelování sdílení tepla	41
3.3.	Hledisko matematiky v modelování sdílení tepla	43
3.4.	Hledisko kybernetiky v modelování sdílení tepla	43
3.5.	Obvody se soustředěnými parametry a modelování sdílení tepla	46

3.6.	Statistika a konstrukční modelování sdílení tepla	46
4.	Některá řešení jednoduchých okrajových úloh Fourierovy rovnice vedení tepla	48
4.1.	Řešení Fourierovy rovnice pro prostor, který je vyplněn pevnou látkou a ohraničen dvěma rovnoběžnými rovinami s konečnou distancí	48
4.1.1.	Řešení okrajových úloh pro vrstvu pevné látky při počáteční teplotě konstantní nebo nulové	50
4.1.2.	Řešení okrajové úlohy pro vrstvu pevné látky při nulové počáteční teplotě. Odezva výstupního tepelně izolovaného rozhraní na skok teploty na vstupním rozhraní	51
4.1.3.	Tyč konečné délky	54
4.1.4.	Řešení Fourierovy rovnice pro poloprostor vyplněný pevnou látkou	54
4.1.5.	Řešení pro poloprostor a impuls	57
4.2.	Řešení okrajové úlohy Fourierovy rovnice vedení tepla pro vrstvu pevné látky v integrálním zobrazení	59
4.2.1.	Řešení v Laplaceově integrálním zobrazení	59
4.2.2.	Neohraničená rovinná vrstva pevné látky konečné tloušťky	60
4.3.	L-operátorový přenos objektu a teplotní přechodová charakteristika	62
4.3.1.	Platnost součinu $v(p) = w(p) \cdot S(p)$ pro kompaktní objekt na základě principu superpozice	67
4.4.	F-operátorový přenos objektu a teplotní frekvenční charakteristika	70
4.4.1.	F-operátorový přenos objektu	70
4.4.2.	Frekvenční charakteristiky objektu	71
4.4.3.	Objekt jako teplotní frekvenční filtr	72
4.5.	Diferenční matematické modely odvozené z parciálních diferenciálních rovnic	73
4.5.1.	Systém obyčejných diferenciálních rovnic jako dynamický model odpovídající Fourierově parciální diferenciální rovnici	73
4.5.2.	Tvoření druhých diferenčních poměrů vzhledem k prostorovým proměnným. Algebraický lineární systém pro Laplaceovu rovnici	75
4.5.3.	Diferenční matematický model odpovídající Fourierově rovnici (dynamický model)	81
4.5.4.	Diferenční matematický model odpovídající Laplaceově rovnici (statický model)	86
5.	Modely o konečném počtu prvků. Diskretizace spojitě úlohy vedoucí na náhradní systémy se soustředěnými parametry	88

5.1.	Formulace náhradních tepelných obvodů	88
5.1.1.	Zvláštnosti problému modelování sdílení tepla v konstrukcích elektroniky	88
5.1.2.	Termofyzikální vlastnosti kompaktního hmotného prostorového útvaru	89
5.1.3.	Fiktivní dělení objektu na prostorové sekce. Přiřazení náhradních uzlů a náhradních obvodových prvků sekcím	89
5.1.4.	Formulace tepelného náhradního obvodu a systému n rovnic pro n sekcí objektu. Systémy obyčejných diferenciálních rovnic	93
5.1.5.	Sestavení náhradního odporového obvodu – statického modelu vedení tepla v objektu	96
5.2.	Problém správnosti náhradního tepelného obvodu se soustředěnými tepelnými odpory a kapacitami	98
5.2.1.	Obvodová interpretace při odvozování Fourierovy parciální diferenciální rovnice. Fyzikální absurdita náhradního obvodu se soustředěnými tepelnými odpory a kapacitami	98
5.2.2.	Historie řetězcových elektrických obvodových modelů vedení tepla	100
5.2.3.	Náhradní tepelný obvod s tepelnými odpory a tepelnými kapacitami odpovídajícími sekcím stejnoměrně děleného objektu. Řešení náhradního obvodu a řešení Fourierovy rovnice . . .	102
5.3.	Dynamické vlastnosti série n stejných přenosových bloků . .	113
5.4.	Bloková schémata s bloky charakterizovanými L-operátorovými přenosy. Souvislost se strukturou sekcí nebo sestavy a s prvkovými náhradními obvody se soustředěnými parametry	116
5.5.	Optimální náhradní dvoukapacitní tepelné obvody pro jedno-rozměrné vedení tepla vrstvou pevné látky ve směru kolmém k jejím rovinám	121
6.	Modely o několika prvcích – zjednodušené náhradní tepelné obvody WC	126
6.1.	Formulace jednoduchých tepelných náhradních obvodů . . .	126
6.1.1.	Jednoduché náhradní prvkové obvody a jejich užitečnost . .	126
6.1.2.	Jednoduché náhradní obvody formulované pro skutečnou strukturu konstrukce	127
6.1.3.	Náhradní schémata s přenosem ve tvaru racionální lomené funkce. Heavisideův rozklad přenosu	128
6.2.	Náhradní schéma objektu, získané rozkladem přesného přenosu, jako nekonečná série přenosových bloků bez vztahu ke struktuře objektu	130
7.	Modely o jednom obvodovém prvku a jedné smyčce	135

7.1.	Statický jednoprvkový model reprezentovaný tepelným odporem	136
7.2.	Nejjednodušší tepelný dynamický model objektu, náhradní obvod s jednou smyčkou WC	139
7.2.1.	Formulace a tvary náhradního modelu 1. řádu	139
7.2.2.	Řešení impulsového zatěžování pomocí modelu 1. řádu	141
7.2.3.	Přímkový grafický model 1. řádu	147
8.	Identifikace dynamických modelů sdílení tepla	149
8.1.	Identifikace jako etapa modelování jevu	149
8.2.	Identifikace podle přechodové charakteristiky objektu	150
8.3.	Identifikace podle frekvenční charakteristiky objektu	152
8.4.	Identifikace k určení materiálové konstanty κ	155
9.	Fyzické modely sdílení tepla	156
9.1.	Analogie různých fyzikálních jevů a teorií	156
9.2.	Spojité elektrický analogon pro integraci Laplaceovy rovnice	157
9.3.	Diskrétní elektrický analogon pro integraci Laplaceovy rovnice. Odporová síť	159
9.4.	Diskrétní elektrické analogony RC	160
9.4.1.	Přímé elektrické diskretní analogony	160
9.4.2.	Diskrétní nepřímé elektrické analogony s operačními zesilovači	162
9.5.	Podobné modely	164
9.5.1.	Nástin klasické teorie podobnosti	164
10.	Laboratorní praxe modelování sdílení tepla v konstrukčním výzkumu elektroniky	168
10.1.	Předmět experimentu. Typické problémy a směry vývoje	168
10.2.	Práce se vzorky a modely v laboratoři	169
10.3.	Měření termických veličin pro modelování	170
10.3.1.	Měření oteplení a teploty mikrotermočlánky	171
10.3.2.	Měření měrné tepelné vodivosti v laboratorních podmínkách	175
10.3.3.	Použití teplotní přechodové charakteristiky vrstvy k stanovení teplotní vodivosti jejího materiálu	178
11.	Konstrukční modelování sdílení tepla v praxi a některé provedené jednoduché modely. Stav a směry vývoje	184
11.1.	Konstrukce v elektronice a jejich vztah k modelování sdílení tepla	186
11.2.	Ukázky modelů a modelových řešení	190
11.2.1.	Statický model oteplení a výkonové zatížitelnosti hybridní destičkové integrované součástky	190
11.2.2.	Statický model oteplení rezistoru	192

11.2.3.	Dynamický model 1. řádu oteplování rezistoru. Přímkový diagram oteplování rezistoru	197
11.2.4.	Modelové řešení zatěžování vrstvého rezistoru pravoúhlými periodickými impulsy výkonu pomocí modelu 1. řádu	201
11.2.5.	Dynamický model 2. řádu pro řešení oteplování bodu na vrstvomém zdroji tepla	205
11.2.6.	Modelové řešení zkušebních periodických impulsů výkonu pomocí nekaskádního modelu 2. řádu	208
	Literatura	212
	Tabulky	222
	Summary	240
	Резюме	241
	Rejstřík	242

Modelování tepelně technických problémů má svou historii, která se objevuje především v literatuře. Tam také lze sledovat značnou univerzálnost této metody: K modelování se přistupuje někdy zcela obecně jako k metodologickému problému poznání vědy i praxe. Modelování je ovšem především využíváno jako konkrétní prostředek. V posledních letech lze zaznamenat velký rozvoj modelování, který byl umožněn rozvojem elektroniky a výpočetní techniky. Modeluje se ve fyzice, v technice, biologii, ekologii, sociologii a metodika proniká do dalších oblastí.

Pro současnou dostupnost a výkonnost technických prostředků modelování se často ztrácí bezprostřední souvislost modelů s modelovanými jevy. Neželi se mnohdy problém zobrazení. Nerozlišuje se přesnost a správnost zobrazení. Proto jedním z hlavních úkolů této práce je vyjasnit pojem správnosti zobrazení. Autor spatřuje důvod k tomu také ve skutečnosti, že modely jsou převážně pojímány buď jako problémy matematiky a numerické matematiky, nebo teorie obvodů a teorie systémů, bez teoreticky podloženého vztahu k realitě problému. Pak modely, byť i ve své vědní disciplíně dobře propracované, nemusí být nutně správným zobrazením problému.

Po druhé světové válce se velmi rychle rozvíjela teoretická a experimentální práce v oboru sdílení tepla s termofyzikálními vlastnostmi látek a bylo publikováno i mnoho prací. Avšak v tomto nadbytku dílčích prací není patrna vědecká kooperace, která by byla podřízena nějaké koncepci, ať už technického nebo poznávacího zaměření. Zjevně naopak je, že mnohá zařízení, v nichž je sdílení tepla, zejména nestacionární, pro funkci důležité, nejsou navržena dobře. Nabídneme-li do záklusů vývoje, zjistíme, že takové výrobky nebyly navrhovány žádnou racionální a tím méně inženýrskou nebo vědeckou metodou. V této souvislosti se může mluvit o stavbách a vytápění, o kotlech a jiných energetice-