

Libor Gajdošík

Metody analýzy lineárních obvodů

1. díl

Praha 2011



Libor Gajdošík

Metody analýzy lineárních obvodů – 1. díl

Neprošlo jazykovou, typografickou ani odbornou korekturou.

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Autor a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Libor Gajdošík 2011

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Gajdošík Libor: Metody analýzy lineárních obvodů – 1. díl

BEN – technická literatura, Praha 2011

1. vydání

ISBN 978-80-7300-428-6 (tištěná kniha)

ISBN 978-80-7300-430-9 (elektronická kniha v PDF)

Obsah

Předmluva	6
Seznam použitých symbolů	7
1 Úvod.	11
1.1 Teorie elektrických obvodů.	11
2 Základní pojmy teorie obvodů.	17
2.1 Elektrický proud.	17
2.2 Elektrické napětí.	22
2.3 Elektrický odpor.	27
2.4 Elektrický výkon.	31
2.5 Elektrická kapacita.	32
2.6 Elektrická indukčnost.	36
2.7 Kirchhoffovy zákony.	51
2.8 Napájecí zdroje elektrických obvodů.	57
2.9 Lineární modely skutečných zdrojů.	61
2.10 Ideální obvodové prvky.	69
2.11 Základní topologické pojmy.	74
3 Popis časově proměnných veličin.	81
3.1 Základní pojmy a číselné charakteristiky.	81
3.2 Operátorová metoda	87
3.3 Symbolická metoda.	93
3.4 Souvislost operátorových a komplexních imitancí.	101
4 Harmonický ustálený stav.	103
4.1 Elektrické výkony.	103
4.2 Výkonové a impedanční přizpůsobení.	109
4.3 Rezonanční obvody	112
4.3.1 Podmínky rezonance	112
4.3.2 Činitel jakosti	113
4.3.3 Šířka propustného pásma.	114
4.3.4 Sériový rezonanční obvod	114
4.3.5 Rezonanční křivky sériového rezonančního obvodu	116
4.3.6 Paralelní rezonanční obvod	122

4.3.7	Rezonanční křivky paralelního rezonančního obvodu . . .	122
4.3.8	Další model paralelního rezonančního obvodu	128
4.3.9	Složené rezonanční obvody	131
4.3.10	Vázané rezonanční obvody	133
4.4	Fázorové diagramy	150
4.4.1	Zjednodušené metody řešení.	156
4.5	Obvody s nastavitelnými parametry	158
5	Metody úplného řešení.	169
5.1	Přímá aplikace Kirchhoffových zákonů.	169
5.2	Metoda smyčkových proudů.	172
5.2.1	Odvození metody smyčkových proudů.	173
5.2.2	Pravidla pro sestavování rovnic.	175
5.2.3	Možnosti volby nezávislých smyček.	176
5.2.4	Pravidla pro sestavování matic.	180
5.3	Metoda uzlových napětí.	183
5.3.1	Odvození metody uzlových napětí.	183
5.3.2	Pravidla pro sestavování rovnic.	185
5.3.3	Možnosti volby referenčního uzlu.	186
5.3.4	Pravidla pro sestavování matic.	190
5.4	Metoda řezů.	193
5.4.1	Odvození metody řezů.	193
5.4.2	Pravidla pro sestavení rovnic.	195
5.4.3	Možnosti volby systému nezávislých řezů.	197
5.4.4	Pravidla pro sestavování matic.	201
5.5	Metoda přemístění zdrojů	204
5.6	Porovnání základních metod.	209
5.7	Řešení obvodů s časově proměnnými zdroji	209
5.8	Obvody s řízenými ideálními zdroji	214
5.9	Incidenční matice	216
5.9.1	Incidenční matice uzlů	216
5.9.2	Incidenční matice smyček	217
5.9.3	Incidenční matice řezů	217
5.9.4	Vztahy mezi incidenčními maticemi	219
5.9.5	Vztahy mezi incidenčními a imitančními maticemi	219
6	Metody částečného řešení.	223
6.1	Základní vztahy pro řešení elektrických obvodů.	223
6.2	Metoda úměrných veličin.	228
6.3	Transfigurace n ramenné hvězdy a n úhelníku.	230
6.4	Převody dvojpólů RL a RC	237
6.5	Princip superpozice.	238
6.5.1	Příklady k principu superpozice	240
6.6	Princip reciprocity.	245
6.7	Princip kompenzace.	248
6.8	Théveninova věta.	250

6.9	Nortonova věta.	256
6.10	Millmanova věta	258
6.11	Tellegenova věta	259
7	Neharmonický ustálený stav	263
7.1	Metoda Fourierovy řady	263
7.2	Metoda Laplaceovy transformace.	272
8	Řešení přechodných dějů	277
8.1	Metoda aplikace základních zákonů	278
8.1.1	Přechodné děje v obvodu se stejnosměrným zdrojem . . .	278
8.1.2	Integrátory a derivátory.	285
8.1.3	Přechodné děje v obvodu s harmonickým zdrojem	295
8.2	Metoda stavové proměnné	306
8.2.1	Příklady na metodu stavových proměnných	309
8.2.2	Sestavení stavových rovnic	316
8.3	Impulsová a přechodová charakteristika	320
8.4	Metoda Duhamelova integrálu	325
8.5	Metoda operátorových imitancí	334
9	Další možnosti použití základních metod	345
9.1	Obvody s rozloženými prvky	345
9.2	Elektrofyzikální analogie	351
9.2.1	Analogie elektrických a magnetických obvodů	351
9.2.2	Elektromechanické analogie	354
9.2.3	Elektrotepelná analogie	356
9.3	Dualita v elektrických obvodech	357
	Rejstřík	367
	Literatura	371

Předmluva

Tato kniha podává ve dvou dílech přehled metod užívaných k řešení lineárních elektrických obvodů. Zájemce může pochopit podstatu dané metody, doví se podmínky použití a získá odkazy na další zdroje. Metody jsou doplněny v nezbytném množství řešenými příklady pro vyjasnění dané věci. Kniha by měla sloužit jako přehled základních informací o daném problému. Je určena všem které tyto věci zajímají. Kniha obsahuje i jistý podíl matematiky, což dnes nebývá příliš populární, ale bez něho nelze podat solidní a věcně správné vysvětlení.

První díl knihy je zaměřen na základní metody užívané pro řešení lineárních elektrických obvodů. V první kapitole je popsáno členění teorie lineárních obvodů, její souvislost s teorií elektromagnetického pole, omezení která tyto teorie mají a vztah těchto teorií k poznávání světa. Ve druhé kapitole jsou vysvětleny základní pojmy, veličiny a zákony užívané v teorii obvodů. Vychází se z obecných definic veličin, aby bylo možné ukázat jejich vztah k teorii elektromagnetického pole. U jednotek veličin je ukázán jejich vztah k základním jednotkám soustavy SI pomocí jednotkových rovnic. V dalších kapitolách jsou popsány různé metody řešení elektrických obvodů a v závěru knihy je kapitola o možnostech využití popsaných metod řešení i v jiných oblastech elektrotechniky, či v neelektrotechnických oborech. Tím je upozorněno na to, že teorie lineárních obvodů používá dobře propracované metody, které jsou použitelné i jinde a může mít proto širší využití.

Elektrotechnika a tedy i teorie lineárních obvodů jsou z hlediska historie poměrně mladé vědy. Základy lze sledovat od třetí čtvrtiny 18. století, kdy byl zkonstruován kondenzátor. V průběhu 19. století fyzikové objevili základní zákony Ohmův a oba Kirchhoffovy, ze kterých mohla vycházet teorie lineárních obvodů. Další metody řešení vypracovali již většinou elektrotechnikové, podle toho jak si to žádala praxe v průběhu 19. a 20. století. U metod řešení nebo významných zapojení jsem se snažil pokud možno uvést také jejich autory s odkazem na původní zdroje, aby tito badatelé jejichž dílo je užitečné mnohým, nebyli zapomenuti.

V elektrotechnické literatuře je určitá rozmanitost značení veličin a užívání schématických značek. Pokud jde o značení symbolů veličin, orientaci obvodových veličin a názvosloví snažil jsem se dodržet normy ČSN IEC 27-1 a 27-2+2A, ČSN IEC 50(131)+A1, ISO 31, schémata podle ČSN IEC 617, případně další mezinárodní dohody.

Kapitola 1

Úvod.

1.1 Teorie elektrických obvodů.

Teorie elektrických obvodů se zabývá výpočty, analýzou a syntézou (návrhem) elektrických obvodů. Dělí se na dvě části - teorii nelineárních a teorii lineárních obvodů. Za základ slouží teorie lineárních obvodů, protože její metody řešení, lze využít při řešení úloh v teorii nelineárních obvodů (např. metoda lineari-zace) a také i v jiných oborech - elektroakustice, mechanice, tepelné technice. Teorie lineárních obvodů se zabývá pouze obvody ve kterých platí mezi proudem a napětím na obvodových prvcích vztahy lineární úměrnosti. Teorii lineárních obvodů lze rozdělit na dvě části - analýzu a syntézu.

- Analýza se zabývá úlohami typu kdy pro daný elektrický obvod a konkrétní hodnoty obvodových prvků a napájecích zdrojů se mají zjistit hodnoty napětí a proudů v libovolné části elektrického obvodu. Úlohy tohoto typu mají jednoznačné řešení.

Analýza lineárních obvodů patří k nejlépe teoreticky propracovaným partiím a je nezbytným základem pro ostatní části teorie obvodů. Metody analýzy lineárních obvodů jsou využívány i v jiných oborech - v elektroakustice, mechanice, tepelné technice.

- Syntéza lineárních obvodů řeší úlohy opačného typu než analýza. Pro zadané požadavky na funkci a chování lineárního obvodu je cílem najít vhodný obvod a potřebné hodnoty obvodových prvků. Tento typ úlohy obecně nemá jednoznačné řešení, dané požadavky lze realizovat obecně několika obvody s různou strukturou.

Metody teorie obvodů jsou založeny na dvou Kirchhoffových zákonech a Ohmově zákonu. Tyto zákony ale mají svá omezení platnosti a z toho plyne i omezení platnosti použití metod teorie obvodů při řešení úloh. Z poznávacího hlediska je teorie obvodů speciální částí teorie elektromagnetického pole, kdy jde o případy stacionárních a kvazistacionárních dějů v elektrických obvodech se soustředěnými prvky. Pojem obvod se soustředěnými prvky znamená splnění podmínek

kvazistacionarity, což bude vysvětleno dále. Teorie elektromagnetického pole je schopna řešit obecnější úlohy než teorie obvodů a používá složitější matematický aparát - soustavu integrálních a diferenciálních rovnic. Pro výpočty v teorii obvodů se z praktických důvodů užívají metody založené na využití Kirchhoffových zákonů a Ohmově zákonu. Přes svá omezení, jsou metody teorie obvodů pro řešení praktických úloh vhodnější, protože přesnost dosažených výsledků je vyhovující a při použití metod elektromagnetického pole by vynaložená námaha na získání řešení nebyla úměrná dosaženým výsledkům.

Pro objasnění vztahu mezi teorií elektrických obvodů a teorií elektromagnetického pole je vhodné zmínit se o rozdělení elektromagnetických dějů z hlediska jejich časových změn.

Stacionární děje. Jsou to děje nezávislé na čase. Jedná se jevy, které vyvolává stacionární elektrické pole. Je to časově neproměnné pole, které vyvolává stálý tj. stacionární pohyb elektrického náboje ve vodiči. V teorii obvodů odpovídá stacionárním dějům problematika elektrických obvodů při stejnosměrném proudu.

Kvazistacionární děje. (téměř stacionární) Jsou to děje popsané časově proměnnými veličinami elektrického a magnetického pole, jejichž časové změny jsou zanedbatelné ve srovnání s rychlostí, kterou se děj šíří. Rychlost šíření je v tomto případě rychlost šíření elektromagnetických vln v daném prostředí. Veličiny zde vyjadřujeme jako funkce času a popsaný děj má ráz elektrických kmitů. Uvažujeme technicky nejvýznamnější případ tj. sinusový průběh veličiny z hlediska času. V teorii obvodů odpovídá kvazistacionárním dějům elektrický obvod při časově proměnném proudu v rozsahu kmitočtů od jednotek Hz do rádiových kmitočtů v oblasti GHz. Aby byla splněna podmínka kvazistacionarity je třeba aby geometrické rozměry elektrického obvodu a jeho prvků byly zanedbatelné ve srovnání s vlnovou délkou obvodových veličin. Splnění podmínek kvazistacionarity předpokládají Kirchhoffovy zákony.

Nestacionární děje. Jsou to časově proměnné děje popsané veličinami, jejichž časové změny jsou srovnatelné s rychlostí, kterou se děj šíří. Jde tedy o obecnější případ než u kvazistacionárních dějů. Veličiny kterými je děj popsán jsou funkcemi geometrických souřadnic i času a uvažovaný děj má ráz vlnění. Pokud uvažujeme sinusový časový průběh veličin, lze konstatovat, že děj je nestacionární tehdy, když geometrické rozměry soustavy ve které děj probíhá jsou srovnatelné s vlnovou délkou příslušející uvažovanému ději. Nestacionární děje nelze v obecném případě řešit metodami teorie elektrických obvodů. Pro jejich řešení je třeba užít obecně Maxwellovy rovnice. Jedná se o řešení vlnodů, antén, a šíření elektromagnetických vln. V teorii elektrických obvodů se vyskytuje pouze jediný případ, který patří k nestacionárním dějům a pro jehož řešení, za splnění jistých podmínek, lze užít metod, které používá teorie elektrických obvodů a to je odvození takzvaných telegrafních rovnic pro homogenní vedení.

Nyní je třeba objasnit vztah Kirchhoffových zákonů, Ohmova zákona a teorie elektromagnetického pole. První Kirchhoffův zákon se týká větvení elektrického proudu v uzlu obvodu. Předpokládá, že elektrický proud teče jen v kovových vodičích a neteče prostorem mimo ně. Proud v kovových vodičích je označován jako vodivý proud. Předpoklad se vyjadřuje rovnicí kontinuity, která říká, že množství elektrického náboje který do uzlu v daném okamžiku přiteče, ve stejném okamžiku z uzlu vyteče. Předpoklad se zdá přirozený, ale platí jen pro tak nízké kmitočty kdy lze zanedbat střídavý proud tekoucí elektrickou kapacitou mezi uzlem a zemí. Pro první Kirchhoffův zákon zanedbáváme v Maxwellově rovnici zákona celkového proudu ve vakuu Maxwellův proud, což je právě proud tekoucí zmíněnou kapacitou mezi uzlem a zemí.

Druhý Kirchhoffův zákon se týká sčítání elektrických napětí ve větvích obvodu, které na sebe navazují a tvoří uzavřenou smyčku. Napětí na větvích obsahující spotřebiče, jsou vyvolána příslušnými proudy tekoucími větvemi. Tyto proudy jsou vyvolány přítomností zdrojů, které svými stálými napětími udržují tyto proudy. Elektrické napětí je definováno obecně jako práce vykonaná v elektrickém poli při přemístění kladného náboje, dělená tímto nábojem. Druhý Kirchhoffův zákon vyjadřuje, že algebraický součet napětí zdrojů je roven algebraickému součtu napětí na spotřebičích, tedy vyjadřuje vlastně rovnost dodané a spotřebované práce. Předpoklady pro platnost druhého Kirchhoffova zákona nejsou příliš zjevné. Uvažují se jen napětí na vnějších svorkách prvků kterými jsou zapojeny do obvodu, tedy u zdrojů je smyčka uvažována mimo vnitřek zdroje, mimo působíště elektromotorických sil. Předpokládá se, že tato napětí jsou soustředěna v daných místech obvodu tj. mezi svorkami obvodových prvků a tedy se zanedbávají geometrické rozměry obvodových prvků a celého obvodu vzhledem k vlnové délce střídavých veličin. Dále se předpokládá, že plochou uvažované smyčky neprochází časově proměnný magnetický tok, který by jinak vyvolával na svorkách obvodových prvků ve smyčce napětí. Proto pro druhý Kirchhoffův zákon uvažujeme, že Maxwellova rovnice, zvaná Faradayův indukční zákon, je rovna nule.

Ohmův zákon vyjadřuje lineární úměrnost mezi napětím a proudem v jistém látkovém prostředí. Je to zákon jehož platnost je vázána na jistý materiál (kovové vodiče, elektrolyty) a dané fyzikální podmínky (konstantní teplota). Ohmův zákon a Kirchhoffovy zákony lze formálně odvodit z Maxwellových rovnic. Historicky ale byly tyto zákony objeveny před vznikem Maxwellovy teorie a tedy tato teorie je musí v sobě zahrnovat.

Teorie elektromagnetického pole se zabývá elektromagnetickými ději v širšího a obecnějšího hlediska. Byla vytvořena v letech 1855 až 1865 anglickým fyzikem a matematikem J.C. Maxwellem [1]. Ten vytvořil matematický popis výsledků pokusů, které provedli předchozí badatelé. Pozorované jevy byly makroskopického charakteru. V době vzniku této teorie ještě nebyla prokázána částicová stavba hmoty. Elektron jako první elementární částici objevil až r. 1896 anglický fyzik J.J. Thomson a existenci atomů teoreticky zdůvodnil až r. 1907 německý fyzik A. Einstein. Objev elektronu pak vedl ve 20. století k objevu dalších elementárních částic a k mnohem hlubšímu poznání stavby hmoty, což si následně vynutilo přehodnocení názorů nejen ve fyzice a dalších přírodních vědách, ale

i ve filozofickém chápání světa. Pro teorii elektromagnetického pole znamenaly objevy diskrétního charakteru hmoty omezení platnosti. Tato omezení budou teď vysvětlena.

Pojem makroskopické jevy znamená, že jevy jsou vyvolané působením dostatečně velké počtu částic hmoty, takže lze zanedbat diskrétní charakter vlastností těchto částic tj. rozměry atomů, elementární náboj a můžeme považovat s vyhovující přesností, že veličiny tj. délkové rozměry, elektrický náboj, se mohou měnit libovolně, tedy spojitě. V teorii elektromagnetického pole se délkové rozměry, energie a elektrický náboj se uvažují ve výpočtech jako spojitě proměnné a pro matematický popis se užívá infinitezimálním počtu. Používat spojitě proměnné a diferenciály pro popis veličin které mají diskrétní charakter, není teoreticky v pořádku, ale pokud se pohybujeme v makroskopických velikostech je tento popis vyhovující. Hmota existuje ve dvou základních formách - jako látka tvořená atomy a jako pole. Elektromagnetické pole chápeme jako prostředníka mezi interakcemi (interakce = vzájemné působení) hmotných objektů. Pole bývá často znázorňováno pomocí svého geometrického modelu tj. siločar, či indukčních čar.

V případech obou forem své existence má hmota diskrétní charakter. V případě látky je hmota systém elementárních částic, v případě pole je hmota systém nejmenších energetických kvant. Teoreticky lze dokázat, že překročí-li rozměry disktrétního systému jistou kvantitativní hranici, je možno s vyhovující přesností systém považovat za spojitý, tedy že se změnila kvalitativní vlastnost. Aby byla zachována oprávněnost použití infinitezimálního počtu, je nutno chápat diferenciály délky, plochy, objemu, energie, náboje jako nejmenší možné změny, při kterých se ještě s dostatečnou přesností neprojeví diskrétní charakter popisované veličiny. Proto velikosti diferenciálů z fyzikálního hlediska jsou zde určeny několikanásobkem nejmenšího kvanta příslušné veličiny, aby změna veličiny o příslušné nejmenší kvantum mohla být považována za spojitou. Například při meziatomové vzdálenosti v látce (řádově 10^{-10} m) lze nejmenší vzdálenost, jejíž změnu lze považovat ještě za spojitou, uvažovat stonásobek meziatomové vzdálenosti a tedy 10^{-8} m bude představovat z fyzikálního hlediska diferenciál délky. Jako elementární elektrický náboj je uvažován elektrický náboj elektronu $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Elektrický náboj se mění v celistvých násobcích elementárního náboje. Tedy pro nejmenší elektrický náboj, jehož změnu lze považovat za spojitou, je možno uvažovat například stonásobek náboje elektronu, tedy náboj $1,6 \cdot 10^{-17}$ C. Coulombův zákon platí jen pro vzdálenosti větší než je dosah jaderných sil tj. 10^{-15} m. Pro úplnost je třeba dodat, že v letech 1968 až 1995 byla experimentálně potvrzena existence částic hmoty zvaných kvarky. Tyto částice nesou elektrický náboj menší než je náboj elektronu. Jsou to náboje $-1/3 e$ a $+2/3 e$. Částice jako například neutron (s nulovým elektrickým nábojem) nebo proton (s nábojem $+e$) jsou tvořeny právě kvarky. Elektrotechnik se ale při své praxi s kvarky běžně nesetká a pro něj zůstane elementárním nábojem náboj elektronu.

Elektrony si vyměňují energii prostřednictvím fotonů, které vyzařují nebo pohlcují. Energie elektromagnetického vlnění (světlo, rádiové vlny) tvořeného fotony se může měnit jen v násobcích hodnot určených Planckovou konstantou.

Planckova konstanta má velikost $h \cdot 6,65 \cdot 10^{-34}$ J.s a má fyzikální rozměr stejný jako moment hybnosti. Kvantová energie je určena vztahem $W = h \cdot f$ kde f je kmitočet elektromagnetického vlnění. Diskrétní charakter energie se projevuje zejména při velmi vysokých kmitočtech (infračervené záření, viditelné, ultrafialové, rentgenové, gama) a hodnotách energií atomární úrovně, lze ho zanedbat pro běžné rádiové kmitočty do oblasti GHz a hodnoty energií užívané v elektrotechnice. Praktická zkušenost však dokazuje, že metody užívané v teorii elektromagnetického pole jsou pro řešení běžných technických úloh i přes svá principiální omezení zcela vyhovující.

Je užitečné si vyjasnit přístup experimentálních věd a tedy i teorie obvodů k poznávání světa. Je třeba si uvědomit, jak jsou zde základní pojmy jako například definice, axiom a model chápány. To je dáno jednak odlišným přístupem těchto oborů k poznávání světa a do jisté míry také zvyklostmi a historickou tradicí.

Definici se v matematice zavádí určitý přesný pojem. Například „rovnoběžníku, jehož všechny čtyři strany jsou stejně dlouhé budeme říkat kosočtverec“. Naproti tomu ve fyzice se zavedení pojmu týká vždy nějaké veličiny a tedy definice fyzikální veličiny kromě zavedení pojmu musí také obsahovat:

1. Vztah nově definované veličiny k základním veličinám dané soustavy.
2. Předpis (matematický vzorec), který umožňuje určit hodnotu nově definované veličiny na základě již dříve definovaných veličin.

Tento předpis určuje také přímou metodu měření dané veličiny, určuje její fyzikální rozměr, jednotku a vztah této jednotky k základním jednotkám dané soustavy. Toto chápání definice je konvencí, která se vytvořila ve fyzice. Neujasněním uvedeného chápání definice se stává, že za definice jsou někdy považovány samostatné věty typu: „Energie je schopnost systému konat práci.“ nebo „Elektrická kapacita je schopnost soustavy přijmout a uchovat elektrický náboj.“. Tyto věty přispívají k objasnění daných pojmů, nejsou to však jejich definice, protože neurčují vztah definované veličiny k základním veličinám, ani neobsahují předpis pro výpočet z veličin dříve definovaných. Nyní je třeba ujasnit význam základních veličin. Základní veličiny mají stejný význam jako primitivní pojmy (axiomy) v jakémkoli deduktivním systému. Skutečnost, že nelze definovat základní veličiny není nedokonalost fyziky. Chceme-li se vyhnout definicím v kruhu, pak v dané soustavě zvolíme určitý soubor veličin za základní a tyto veličiny budou nedefinované. Základní veličiny jsou něčím apriorně jednou pro vždy daným. Z historického hlediska bylo vytvořeno ve fyzice několik soustav s různými soubory základních veličin, každý měl své výhody a nedostatky. Například soustava CGS, MKSA, Planckova. V současné době je upřednostňována soustava SI.

Axióm je v matematice chápáno tvrzení, které bylo přijato bez důkazu (je to tedy přijatý předpoklad) jako základ axiomaticky budované teorie. Pomocí předem stanovených pravidel (pravidel logiky) lze ze soustavy axiomů odvodit

všechna ostatní tvrzení teorie. Axiomem se původně rozumělo zřejmě pravdivé tvrzení. Dnes se požaduje pouze to, že v teorii postavené na axiomech nesmí dojít ke sporu, pak se považuje systém axiomů za pravdivý. Kromě podmínky bezespornosti musí být systém axiomů nezávislý (žádný axiom nelze odvodit z ostatních) a úplný (z daného systému axiomů lze dokázat všechny teoremy dané teorie, nebo přidání dalšího nezávislého axiomu vede ke sporu). Příkladem axiomaticky budované teorie je Euklidova geometrie.

Axiomem ve fyzice se rozumí zřejmě pravdivé tvrzení jehož pravdivost plyne z dosavadní experimentální zkušenosti. Za axiomy lze v tomto smyslu považovat například zákony termodynamiky, zákon zachování hmoty, zákon zachování energie.

Model v technických a přírodních vědách je přírodní nebo umělý objekt, který je v nějakém vztahu se zkoumaným objektem nebo nějakou jeho částí a je schopen za určitých podmínek zastoupit studovaný objekt. V teorii obvodů máme například obvodový model kondenzátoru, tj. elektrický obvod, který napodobuje určité vlastnosti reálného kondenzátoru. Zkoumání modelu umožňuje získat poznání o zkoumaném objektu. Z toho plyne, že zde je model vždy chudší než objekt který modeluje. Při vytváření modelu dochází k eliminaci částí a vlastností původního objektu považovaných pro daný účel za nepodstatné.

Systém Maxwellových rovnic tedy vytváří určitý model pozorované fyzikální reality. Má tedy jen omezenou platnost. Teorie obvodů je vybudována na soustavě, která má také omezenou platnost. Je to opět model fyzikální reality, který má tedy ještě omezenější platnost, protože je pouze zjednodušením Maxwellova modelu. První Kirchhoffův zákon vyjadřuje zákon zachování hmoty, druhý Kirchhoffův zákon vyjadřuje zákon zachování energie a Ohmův zákon je materiálový poznatek a tedy mají v tomto fyzikálním smyslu axiomatický charakter. Pokud ale chápeme Kirchhoffovy zákony a Ohmův zákon jako zákony odvozené z nadřazeného modelu, z Maxwellovy teorie, nelze je proto považovat za axiomy teorie elektrických obvodů. Kirchhoffovy zákony, přestože vyjadřují zákon zachování hmoty a energie, mají díky své formulaci omezenou platnost. Platnost Ohmova zákona je omezena jen na určité materiály. Omezenost platnosti modelů není důvodem k jednoznačnému preferování složitějších modelů, které jako speciální případ obsahují jednodušší modely s omezenějším rozsahem platnosti. Může se stát, že tyto jednodušší modely poskytují vyhovující výsledky a při užití složitějšího modelu by vynaložená námaha na získání řešení nebyla úměrná dosaženým výsledkům. To je právě případ teorie obvodů, která přes svá omezení je pro praxi důležitá.