

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Stanislav Koc
Mikrominiaturizace

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 8 (1963), No. 6, 332--337

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137631>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1963

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>

MIKROMINIATURIZACE

STANISLAV KOC, Praha

ÚVOD

Co znamená tento odborný název, který se v posledních letech objevil v elektrotechnické literatuře, jehož samotné vyslovení dělá často veliké potíže? Většina lidí, kteří se již s tímto výrazem setkali, by asi stručně odpověděla, že je to snaha dělat elektronická zařízení co nejmenší. Vzhledem k tomu, že tato charakteristika je velmi zplošťující, není-li nutno označit ji přímo za nesprávnou, pokusíme se v dalším pojednání stručně shrnout cíle, dosavadní výsledky i různé vedlejší důsledky této nově se tvořící tendence.

VÝVOJOVÉ ETAPY

Úspěchy elektrotechniky je možno hodnotit z mnoha hledisek. V posledních letech se obrátil zájem i na počet součástek, jež je možno umístit v určitém prostoru. Pomocí tohoto parametru lze zjistit, že běžná zařízení v letech před rokem 1940 obsahovala několik součástek na dm^3 (na př. rozhlasový přijímač s asi 50 součástkami zabíral kolem 20 dm^3). Do roku 1950 se podařilo zavedením miniaturních elektronek dosáhnout hodnot několika desítek součástek na dm^3 a po roce 1950 zavedením tištěných spojů i objevem a rozšířením průmyslové výroby polovodičových prvků bylo umožněno umístit až stovky součástek v dm^3 (např. naslouchací přístrojky, kapesní tranzistorované přijímače). Jako vrchol klasického pojetí miniaturizace je možno uvést radiotelefon amerického námořnictva (tzv. Tinkertoy), v němž v době, kdy budoucnost tranzistoru byla ještě téměř fantazií nebo alespoň nejistá, tj. v letech 1950—53, bylo dosaženo stěsnanosti několika set součástek na dm^3 při použití pouze vakuových elektronek.

Již na základě jednoduchých úvah lze přijít k závěru, že největší překážkou zmenšování rozměrů při běžných výrobních postupech je pouzdření jednotlivých součástek a jejich vzájemné propojování. Vždyť relativní využití objemu, tj. poměr objemu aktivní oblasti k celkovému objemu, je u většiny součástek kolem 10^{-3} — 10^{-5} a jen výjimečně na příklad u hmotových miniaturních odporů dosahuje řádu desetin. Odstraníme-li jakoukoliv povrchovou ochranu a zkrátíme-li na krajní možnou míru přívody nejmodernějších subminiaturních součástek, je možno umístit až 10 000 součástek v dm^3 . Ochranu a současně mechanickou pevnost zajistíme např. zalitím do vhodné plastické hmoty. Další podstatné zlepšení uvedených parametrů při užití těchto klasických postupů lze těžko předpokládat.

Výše uvedené jednoduché úvahy se znalostí tištěných spojů byly kolébkou tzv. 2D-technologie. Myšlenka byla velmi jednoduchá: dát všem součástkám jen dva prostorové rozměry (dimenze). Podklad tvoří tenká destička izolantu o normalizovaných rozměrech, na níž je vhodným nanášecím postupem vytvořen odpor (popř. až čtyři odpory) nebo kondenzátor (popř. i dva kondenzátory) nebo do středního otvoru je vložen např. běžný, ale nezapouzdřený tranzistor. Přívody jednotlivých destiček jsou pak vyvedeny na okrajové zářezy, jež po vhodném seřazení příslušných destiček-součástek proletujeme s průběžnými vodiči, čímž vznikne potřebné elektrické zapojení. Tak vznikl *mikromodul* s hustotou 10—20 tisíc součástek na dm^3 . Soustavnou prací se podařilo přizpůsobit těmto podmínkám i tvar dalších součástek (indukčnosti, pásmové filtry), jež ovšem mnohdy pracují na nových nekonvenčních fyzikálních principech. Tímto způsobem vytvořili již v amerických laboratořích RCA na základě čtvercové normy $8 \times 8 \text{ mm}$ v mikromodulovém provedení téměř všechny běžné radiotechnické obvody a počítají v letech 1962—63 se započítím sériové výroby.

Řekli jsme, že se pracuje na čtvercové normě. V úvahu přicházejí totiž jen dvě možnosti: čtverec a kruh, jenž se však přes některé zdánlivé přednosti ukázal jako méně vhodný.

Jako příklad dosažených výsledků uveďme sčítací počítač „stroj“ se 7 desetinnými místy umístěný v objemu čtyř krabiček od zápalek (napájecí napětí 3 V, operační doba 1 μsec).

Přestože se obě uvedené vývojové etapy (klasická subminiaturizace a mikromodulová technika) v konečné dnešní formě ve vnějším vzhledu liší jen nepatrně, je přechod od klasického k dvojrozměrnému pojetí jednotlivých součástek základním přínosem. Třetí vývojová etapa — *částečný mikroobvod* — představuje jen logické dovršení myšlenky 2D. V tomto případě všechny snadno slučitelné prvky (odpory, malé kapacity, spoje) jsou vytvořeny na jediné nosné izolační destičce, v jejichž výřezech a otvorech jsou vloženy větší součástky (C, L, tranzistory). Při základních rozměrech $12,5 \times 12,5 \times 0,25 \text{ mm}$ se dosahuje hustoty set tisíc součástek na dm^3 .

Dalšího pokroku lze dosáhnout pouze odstraněním jakéhokoliv nosného a spojovacího materiálu, tj. mechanickou tuhost celku i mezipoje musí zajišťovat pouze materiál, jenž se aktivně účastní elektrické funkce. Tím se dostáváme k *obvodům v pevné fázi*, jejichž jediným oficiálně známým výrobcem je americká firma Texas Instruments. Základ tvoří blok polovodiče, v němž pomocí speciálních technologií (leptání, fotomaskování, fotogravírování, napařování ve vakuu, slévání, difúze) jsou vytvářeny předpoklady pro správnou funkci jednotlivých pasívních i aktivních částí bez vnějších mezipojů. Jako dosažený výsledek lze uvést fungující část matematického počítače s 85 součástkami a objemem $0,32 \text{ cm}^3$ ($\approx 250\,000$ součástek na dm^3), přičemž ovšem objem materiálu skutečně se účastnícího provozu jednotky je pouze asi tisícina uvedené hodnoty. Jako teoretická hodnota stěsnanosti se uvádí několik set miliónů součástek na dm^3 .

Uvedené etapy jsou tedy podloženy dosaženými výsledky a ty jsou velmi nadějně. V dalším rozboru uvidíme, že jsou mnohdy na hranicích možností při užití současných

principů jednotlivých součástí. Přesto však se lidská fantazie nedá omezovat a klade si další cíle, jichž se jistě časem podaří dosáhnout. Britská Standard Research Laboratory nastiňuje možnost dosáhnouti hustot 10^{12} součástí na dm^3 pomocí mikroelektronooptických zařízení, jež by byla obdobou elektronek s užitím studené emise či tunelových jevů při elektrodových vzdálenostech řádu mikronu. Technické provedení bude zatím narážet na obtíže s reprodukovatelným prostorovým rozmístováním elektrod s přesností tisícín mikronu.

Pro názornější představu o jednotlivých uvedených etapách jsou tyto etapy shrnuty i s případnými typickými představiteli v diagramu I, kde je pro srovnání uveden i lidský mozek s hustotou 10^{10} buněk na cm^3 .

OMEZUJÍCÍ FAKTORY

Nejznatelnějším důsledkem zmenšování rozměrů je ta skutečnost, že člověk přestává mít zajištěnu *bezpečnou manipulaci s jednotlivými výrobky*. Jak plyne z diagramu I, je možno ještě např. pomocí „jemných“ zapracovaných rukou skládat jednotlivé části mikromodulů, avšak při ještě vyšších hustotách součástí je tato manipulace i za použití speciálních pomůcek nepřesná, takže je nutno považovat za základní operační jednotku více prvků (mikroobvod), popř. v ještě vyšším stadiu i celý díl zařízení s celou řadou nejen pasivních, ale i aktivních prvků.

Mnohem zásadnější omezující problém je však skryt v *odvodu tepla*. S funkcí elektrotechnických zařízení je totiž spojena i spotřeba energie, kterou je třeba ve většině případů opět odvést ve formě tepla. Vezmeme-li v úvahu, že většina součástí je schopna spolehlivého provozu jen v určitém teplotním rozmezí, pak kumulace funkčních oblastí do stále menšího a menšího prostoru zvyšuje hustotu uvolňovaného tepla a zhoršuje možnost jeho odvedení. Vždyť např. osminásobným zvětšením určitého objemu s danou hustotou uvolňovaného tepla (tj. např. co nejtěsnějším spojením osmi stejných součástí) se povrch sdílející teplo s okolím jen zečtyřnásobí, což znamená, že pro dosažení rovnováhy se vnitřní teplota součástí zvýší. Tím se ovšem vytváří hranice dosažitelné stěsnanosti v zařízeních, i když by jiné faktory, např. možnost manipulace s jednotlivými součástkami, byly ještě zdaleka výhodné. Tuto překážku můžeme překonat pouze realizací nových typů aktivních prvků s minimální energetickou spotřebou. Proto také objev a rozšíření tranzistoru umožnily rychlý rozvoj miniaturizace, třebaže vlastní velikost prvních tranzistorů (dokonce i dnešních) se podstatně nelišila od subminiaturních elektronek. Rozhodující byla o jeden až dva řády nižší spotřeba energie. A zde jsme se poprvé přesvědčili, jak omezený by byl výklad slova mikrominiaturizace pouze jako snahy o malý rozměr. Jde nejen o malý rozměr, ale i malou spotřebu, což má okamžité i další význam, a to ekonomický, a v případě velmi rozšířeného (rozhlasové a televizní přijímače) nebo rozsáhlého zařízení (automatizace) nutno mít na mysli i význam národohospodářský.

Do výčtu omezujících faktorů je ovšem nutno zahrnout i potřebu mezipojů a při-

vodů napájecích zdrojů nebo vnějších pracovních signálů a pouzření mezicelku či konečného zařízení.

EKONOMICKÉ I DALŠÍ DŮSLEDKY, MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ MIKROMINIATURIZACE

Vyšší stadia mikrominiaturizace, tj. mikromoduly (MM), mikroobvody (MO) a obvody v pevné fázi (OPF) umožňují vedle naprosto samozřejmé automatizace výroby jednotlivých funkčních prvků odstranění dosavadního individuálního postupu při výrobě konečného zařízení, jenž záleží v zapojování dílčích součástí do příslušného obvodového schématu. Tím mizí z výrobního řetězce téměř poslední přímý lidský zásah během vzniku elektronického přístroje, což se nutně projeví jednak v *nižší zmetkovitosti*, jednak ve *vyšší spolehlivosti*. Tyto dva faktory se výrazně projeví při výrobě velkých sérií mezicelků či konečných zařízení, kdy je nutno si všimnout i dalšího důsledku plné automatizace výroby mikrominiaturních elektronických zařízení, a to *nízké ceny*. Jak ještě v dalším uvidíme, bude podstata této nové výroby založena na náročných metodikách vyžadujících často nákladná zařízení a pečlivé dodržování výrobní disciplíny. Odtud plyne poměrně vysoká cena výrobků, kterou lze snížit pouze velkou sériovostí.

Do úvah o ceně mikrominiaturního zařízení je třeba zahrnout i závažný problém, který vzniká na tomto stupni vývoje při opravách součástí, jež se z rozličných důvodů zničily nebo vybočily mimo přípustné tolerance. Vzhledem k nemožnosti individuální manipulace s jednotlivými prvky bude nutno vyměňovat celé mezicelky, takže dojde k současnému znehodnocení celé řady dalších třeba i bezvadných součástí. I tuto skutečnost je třeba uvážit při ekonomickém rozboru přínosu mikrominiaturizace.

Na druhé straně dochází v některých případech k nepřímému snížení ceny mikrominiaturních zařízení tím, že není třeba např. skladovacího prostoru pro jednotlivé součástky, odstraní se částečně mrtvé časy vzniklé distribucí (výběr, dodávání, skladování součástí), urychlí se doba potřebná k realizaci nových návrhů ve výrobě.

Současně jsme se dostali k velmi vážnému úkolu. Ještě v etapě MM mají jednotlivé součástky možnost samostatné existence a jsou tedy k dispozici pro případnou syntézu nových nebo ne běžných obvodů. V dokonalejším stadiu MO a OPF ztrácejí součástky svou samostatnou existenci a jakákoliv dodatečná úprava nebo změna v zapojení či hodnotách výrobku je prakticky nemožná. Z toho plynou dva důležité důsledky. Vyráběný MO či OPF musí být buď natolik *univerzální*, že bude vyhovovat značné většině uživatelů bez jakéhokoliv zásahu, nebo musí být součástí velkých zařízení, v nichž *se vyskytuje ve velkém počtu*. Jen v tomto případě je zajištěna velká sériovost a tím nízká cena. Čtenář si jistě všiml, že na těch místech, kde jsou uvedeny příklady dosažených výsledků MO a OPF, je vždy řeč o počítačích. To má důvod v právě uvažovaných souvislostech. Právě v matematických strojích je v široké míře splněna

podmínka, aby se určitý obvod v zařízení opakoval co nejvícekrát. Jiná zařízení (jako rozhlasové přijímače, televizory apod.) nejsou z tohoto hlediska vhodná a v těchto oblastech musíme počítat s „hybridním“ řešením. Další oblast, kde by se mikrominiaturizace mohla výrazně prosadit, se týká automatizace výroby a jednotné výrobní evidence, jimž však kapitalistické hospodářství nevěnuje pozornost a z nichž proto zatím zkušenosti chybějí.

Druhý důsledek vymizení samostatné existence jednotlivých součástek je zákonité sblížení až splynutí výrobce součástek s konstruktérem elektronických obvodů. Zmenšování rozměrů přináší celou řadu nových problémů vzájemného ovlivňování v obvodech a zachování určitých obvodových vlastností vyžaduje opět změnu tvaru, funkce nebo i principu jednotlivých součástek, pokud vůbec o nich (např. u OPF) můžeme mluvit. Už jednou jsme se dotkli toho, že při řešení úkolů mikrominiaturizace bude třeba velmi často zásadně změnit principy i těch nejběžnějších součástek. Abychom si udělali představu, připomeňme si, že např. proměnnou kapacitu již dnes realizujeme polovodičovým přechodem P—N a změnou jeho závěrného předpětí, filtry LC nahrazujeme piezoelektrickými nebo magnetostrickými jednotkami, chemické zdroje fotoelektrickými apod. I nad těmito problémy splyvání dvou pracovně dosud odlišných odvětví je třeba se zamyslet, neboť vedou-li tyto otázky v kapitalistickém systému k téměř neřešitelným rozporům (některé zahraniční publikace si této stránky všimají), nebude jejich řešení ani v socialistickém hospodářství jednoduché.

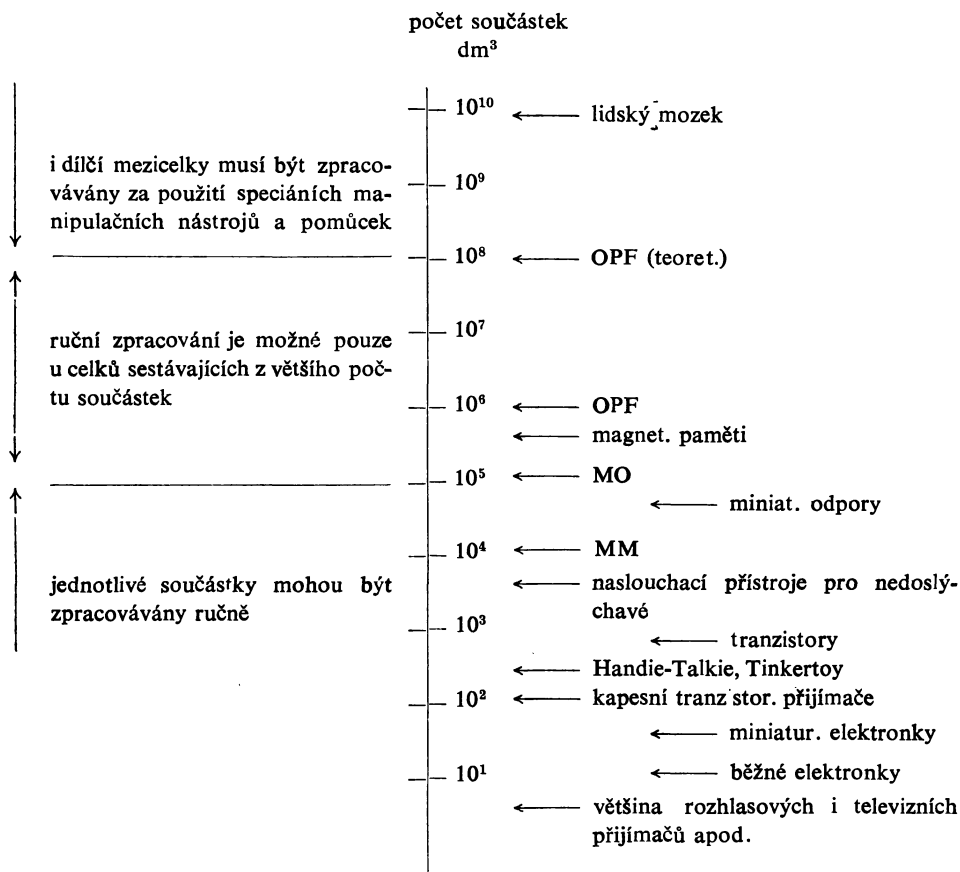
Ještě jedné stránky je třeba si všimnout. Zavedení rozmanitých a většinou náročných technologií a sblížení nebo splynutí obvodové syntézy s výrobou „součástek“ bude klást nové vysoké požadavky na kvalifikaci zúčastněných pracovníků. Toho by se měli všimnout včas představitelé našeho školství a zajistit předpoklady pro vhodnou výuku. Obzvláštní pozornost je třeba již nyní perspektivně věnovat spojení důkladných znalostí řešení elektronických obvodů s více než základními vědomostmi o fyzice pevné fáze.

ZÁVĚR

Výsledkem všech uvedených úvah je potvrzení námítky, že pojem mikrominiaturizace nelze zužovat jen na snahu o nejmenší prostorové rozměry daného elektronického zařízení. Těsně spjatými parametry jsou nízká spotřeba energie, malá zmetkovitost, vysoká spolehlivost, zlepšení provozních ukazatelů (rychlost, počet informací) a v neposlední řadě i cena. Vyřešení těchto úkolů souvisí jak s ekonomikou výroby, tak i provozu a závisí i na úrovni vědomostí zúčastněných pracovníků. Rozvoj mikrominiaturizace přináší s sebou problémy nejen z oblasti organizace výroby a ekonomiky, nýbrž zasahuje i do perspektiv školství. Jen důsledně uplatňovaná mikrominiaturizace může vést k zajištění takových úkolů, jako je plná automatizace výroby, evidence, výpočtové techniky, meziměstské a mezistátní telefonní volby aj., k jejichž řešení

dosud není možno v plném rozsahu přistoupit z důvodů jako např. prostorová či energetická náročnost, nespolehlivost či poruchovost dosavadních zařízení, nedostatek výrobních kapacit apod.

Diagram



Literatura

- [1] ŠAVEL J.: Slabopr. obzor 24, P 21 (1963).
 [2] Sborník z celostátní konference o mikrominiaturizaci. ČSTVS, n. p. Tesla Rožnov, 1962.
 [3] WALLMARK J. T.: Proc. IRE 48, 293 (1960).