

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Dušan Slavětínský

Řešení geometrických úloh při návrhu, vývoji a výrobě letounu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 30 (1985), No. 3, 150--157

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138975>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1985

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>

- [3] BARAŇÁKOVÁ, A.: *Metóda KOS a možnosti jej využitia v ASR MHD*. Zborník VÚD, Žilina — v tlači.
- [4] ČERNÝ, J.: *Matematické metódy koordinácie spojov na peážnom úseku*. Zborník VÚD, Žilina — v tlači.
- [5] TEGZE M., VLACH M.: *The matrix permutation problem*. Techn. U. Graz, Bericht 84 - 54, 1984.

Řešení geometrických úloh při návrhu, vývoji a výrobě letounu

Dušan Slavětínský, Kunovice

1. Použití geometrie při vývoji a výrobě letounu

Práce s geometrií hraje při vývoji a výrobě letounu velmi významnou roli. Většina součástí a dílců, z nichž je tvar letounu sestaven, nemá totiž tvar odvozený jen ze základních geometrických těles. Jejich značně složitější uspořádání je závislé na vnějším tvaru letounu, který na rozdíl od většiny jiných strojírenských výrobků není podřízen jen hlediskům estetickým a výrobním, ale má v první řadě význam funkční. Pro vytvoření představy o geometrické náročnosti konstrukce draku uvedu např. problém závěsů odklápacího krytu na části povrchu o dvojnásobném zakřivení. Kryt je zavěšen ve dvou nebo více závěsech. Osu otáčení krytu je nutno vyšetřit tak, aby při jeho pohybu nedocházelo ke kolizi nepřímkových okrajů krytu s okrajem otvoru a aby konstrukce závěsů byla ukryta pod povrchem, uvnitř draku. Osa má v prostoru zcela obecnou polohu, není rovnoběžná ani kolmá na žádnou ze vztažných rovin charakteristických pro danou část draku. Základny, jimiž je závěs upevněn k potahu, mohou mít buď přímo tvar odpovídající tvaru povrchu, nebo jsou-li dostatečně malé, může být tento tvar nahrazen rovinou tečnou k povrchu v bodě teoretického upevnění závěsu. Je zřejmé, že vyšetření tvaru závěsu, jeho nakreslení a zakótování i samotná jeho výroba jsou operace vysoce náročné z hlediska práce s geometrií.

Tradiční způsob zpracování geometrie při vývoji a výrobě letounu se nazývá plazměrová metoda. Spočívá v přesném narýsování zadané části letounu v tolika pohledech a řezech, kolik je nutných k jednoznačnému určení tvaru. Kresba se provádí ve skutečné velikosti, obvykle rytím do plechu. Nazývá se plaz. Prvotní výkresový podklad, který popisuje z hlediska geometrie příslušnou část letounu, je tzv. teoretický výkres. Tento výkres a plaz vznikají současně za vzájemné interakce. Z nakreslených plazů se pak snímají různé druhy plechových šablon, které jsou nedílnou součástí výkresové doku-

Předneseno na třetím semináři odborné skupiny pro deskriptivní geometrii, počítačovou geometrii a technické kreslení při MPS JČSMF, konaném ve dnech 8.—10. června 1983 v Luhačovicích.
Otištěno se souhlasem vedení n. p. LET Uh. Hradiště-Kunovice.

mentace a jsou jediným prostředkem používaným k přenášení geometrické informace z plazu do výrobního procesu.

Uvedená metoda má řadu nevýhod, pro které dnešním požadavkům kladeným na technickou přípravu výroby již nevyhovuje. Je velmi pracná a zdlouhavá a relativně málo přesná. Nakreslený plaz i ručně vyráběné šablony jsou ovlivněny subjektem pracovníka a jsou prakticky nereprodukovatelné. Nepřesnost metody je zdrojem řady technologických obtíží v celém dalším výrobním procesu.

Rozvoj výpočetní techniky a počítačové grafiky umožnil postavit práci s geometrií na zcela nový základ. Nové metody spočívají v nahrazení grafického vyšetřování tvarových závislostí výpočtem na samočinném počítači s využitím numerických metod a metod analytické geometrie. Základem různých geometrických výpočetních systémů je matematický model povrchu letounu. Skládá se obvykle ze souboru dat, jež jednoznačně určují geometrii povrchu jednotlivých drakových částí a ze souboru programů, které umožňují tuto geometrii zpracovávat. Hlavní výhodou řešení geometrických úloh na počítači ve srovnání s tradičními metodami je především nesrovnatelná rychlost zpracování úloh. Ta umožňuje jednak značně urychlit celý proces vývoje, jednak zvýšit kvalitu konstrukčních řešení zpracováním řady variant s výběrem nejlepšího řešení. Další výhodou je dosažení podstatně vyšší přesnosti, a tím i kvalitnějších pracovních výsledků.

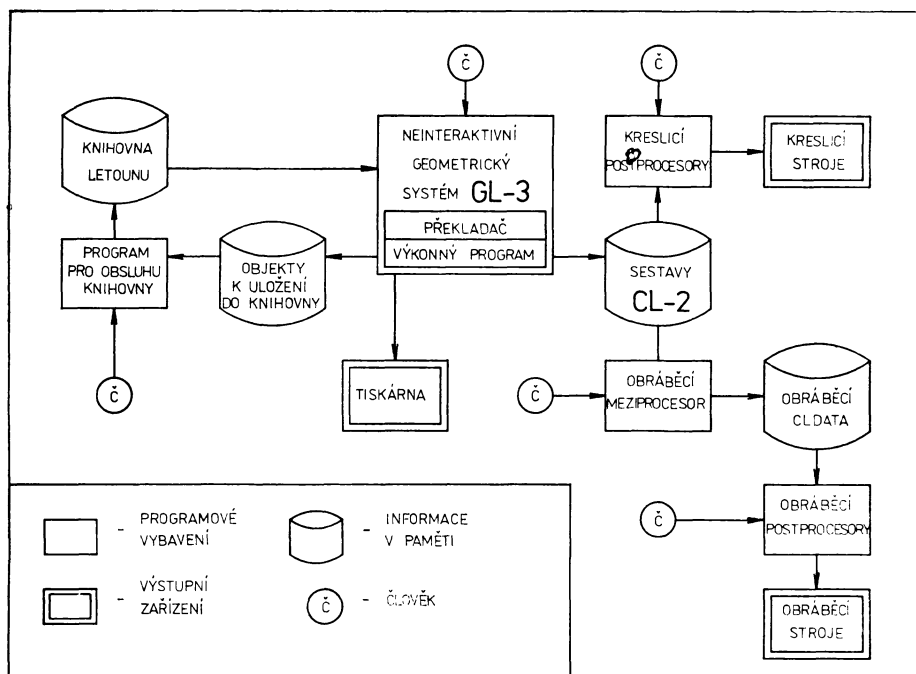
2. Systém etalonní geometrie

Konkrétní příspěvek k racionalizaci práce s geometrií je tzv. metoda etalonní geometrie, která je v současné době vyvíjena v n. p. LET Uh. Hradiště-Kunovice a je postupně zaváděna namísto původní metody plazmèrkové. Základem, na němž je nová metoda budována, je jednak nezbytné technické zařízení, jednak souběžně vyvíjená sada programů, zvaná systém etalonní geometrie.

Schéma navrženého systému je zobrazeno na obr. 1. Jeho základním prvkem je neinteraktivní geometrický systém „Geometrie letounu GL-3“. Je určen pro řešení geometrických problémů s povrchy i s obecnými geometrickými objekty v prostoru i v rovině. Kromě geometrických výpočtů umožňuje i vytváření grafických výstupů, popř. programování pro obrábění na NC strojích. Je používán širokým kádrem uživatelů jako základní nástroj pro zpracování geometrie výpočetní technikou. Sestává

- z geometrického jazyka GL-3, který byl pro tento účel navržen;
- z překladače, který převede geometrickou úlohu, připravenou v jazyce GL-3, do formátu zpracovatelného výkonným programem;
- z výkonného programu, který realizuje uživatelem zadané geometrické, aritmetické, kreslicí, organizační i jiné operace.

Knihovna letounu je komplex souborů, do nichž jsou ukládány informace o těch geometrických objektech, které mají relativně trvalý charakter a jsou často opakovaně využívány. (Povrchy jednotlivých částí letounu, roviny přepážek trupu, žeber křídla, nosníků, osy otáčení pohyblivých částí apod.). Tato knihovna je ústředním zdrojem geometrických informací pro všechny uživatele, kteří s geometrií letounu pracují.



Obr. 1.

Informace jsou dostupné ke čtení pro všechny uživatele prostřednictvím programů v jazyku GL-3.

Grafická sestava CL2 je soubor vytvořený činností systému GL-3 nebo jiného geometrického programu, který obsahuje informaci o geometrických tvarech a který je určen pro další zpracování kreslicí nebo obráběcí větví etalonní geometrie. Má úlohu jednotličného prvku, který spojuje geometrickou, kreslicí a obráběcí část systému.

Obráběcí meziprocessor je program, který slouží k připojení systému etalonní geometrie ke konkrétnímu, v organizaci již zavedenému systému NC obrábění. Zpracovává geometrické informace uložené v sestavě CL2, upravuje je pro potřeby obrábění, doplňuje technologickými funkcemi a převádí do formátu mezivýsledků příslušejícího danému obráběcímu systému (APT-CLDATA apod.).

Kreslicí postprocesory jsou programy, které tvoří spojovací článek mezi sestavou CL2 a řídicími jednotkami konkrétních kreslicích strojů. Zpracovávají sestavu CL2 do takového tvaru, který je srozumitelný kreslicím strojům.

3. Použité metody matematického vyjádření povrchů

Klíčovým momentem v návrhu systému etalonní geometrie byl výběr metod matematického vyjádření povrchů. Tyto povrchy jsou podle svého charakteru rozděleny do dvou skupin:

- povrchy typu „trup“,
- povrchy typu „křídlo“.

Po řadě úvah a zkoušek byly pro matematickou reprezentaci těchto povrchů použity metody dále popsané.

Povrch typu „křídlo“

je přímková plocha určená dvěma řídicími křivkami – definičními řezy ležícími v netotožných rovinách. Řídicí křivky jsou definovány množinami uzlových bodů, kterých musí být pro oba definiční řezy stejný počet a které musí být rozmístěny po obou křivkách podle stejného pravidla. Vzájemně odpovídající si body na obou křivkách určují tzv. definiční (uzlové) přímky.

Práce s povrchem tohoto typu není ve skutečnosti práce s povrchem v matematickém smyslu slova – povrch je suplován množinou uzlových přímek. Pracovní postupy jsou založeny na výpočtu průsečíků uzlových přímek se zadanou rovinou řezu a na proložení vzniklých bodů rovinného řezu křivkou – parametrickým kubickým spline. Veškeré další výpočty se provádějí na takto získaných křivkách.

Povrch typu „trup“

je nepřímková obecně tvarovaná plocha, která může obsahovat také hrany a zlomy (např. zasklení pilotní kabiny). Plocha tohoto typu je sestavena z množiny čtyřúhelníkových plátek, z nichž každý je popsán rovnicí třetího stupně. Koeficienty rovnic jednotlivých plátek jsou vypočteny tak, aby na hranicích dvou sousedních plátek se dosáhlo žádaného typu spojení – od spojitosti v druhé derivaci až po vytvoření hrany. Pro výpočet koeficientů plátek byla vybrána metoda B-spline.

Každý plátek je popsán bivariantní vektorovou funkcí skalárních argumentů

$$(1) \quad \bar{V} = \bar{V}(s, t)$$

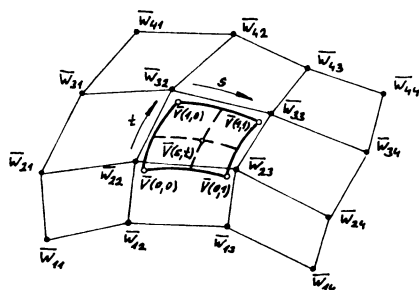
definovanou na uzavřené oblasti $s \in \langle 0, 1 \rangle$, $t \in \langle 0, 1 \rangle$ z roviny st . Funkci (1) je možno zapsat v maticovém tvaru

$$(2) \quad \bar{V}(s, t) = S \cdot B \cdot T'$$

kde

$$(3) \quad S = [s^3 \ s^2 \ s \ 1]$$

$$(4) \quad T = [t^3 \ t^2 \ t \ 1]$$



Obr. 2.

jsou vektory mocnin parametrů a matice B je matice koeficientů plátku. Tato matice má 16 prvků, každý její prvek je třírozměrný vektor. Při použití metody B -spline je jeden plátek jednoznačně určen 16 body, které samy na definovaném povrchu neleží, body tzv. řídicího polygonu. Polohové vektory \bar{W}_{ij} těchto vrcholů vstupují do matice W , která slouží k výpočtu matice koeficientů B .

$$(5) \quad B = A_B \cdot W \cdot A'_B$$

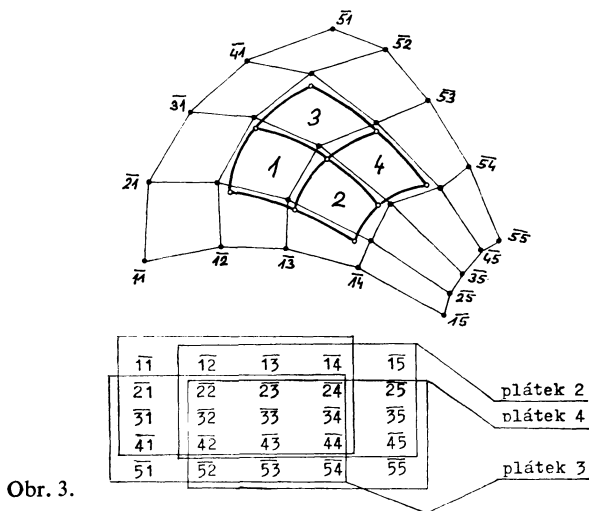
kde (podle obr. 2)

$$(6) \quad W = \begin{bmatrix} \bar{W}_{11} & \bar{W}_{12} & \bar{W}_{13} & \bar{W}_{14} \\ \bar{W}_{21} & \bar{W}_{22} & \bar{W}_{23} & \bar{W}_{24} \\ \bar{W}_{31} & \bar{W}_{32} & \bar{W}_{33} & \bar{W}_{34} \\ \bar{W}_{41} & \bar{W}_{42} & \bar{W}_{43} & \bar{W}_{44} \end{bmatrix}$$

a A_B je transformační matice B -spline

$$(7) \quad A_B = \frac{1}{6} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Pro definování povrchu složeného z více plátků je nutné vytvořit polygonovou síť o vrcholech \bar{W}_{ij} ($i = 1, n; j = 1, m$). Pak matice sousedních plátků mají vždy tři sloupce nebo tři řady vrcholů společné (obr. 3). (Pro zjednodušení zápisu jsou vrcholy označovány pouze indexy $\bar{W}_{ij} \rightarrow \bar{i}\bar{j}$.) Polygonová síť o rozměru $n \times m$ definuje $(n - 3) \times (m - 3)$ plátků a body polygonu po obvodu sítě určují okrajové podmínky.



Vzhledem k použitému třetímu stupni funkcí definujících povrch zajišťuje popsaná metoda spojitost na hranicích plátků až do druhé derivace. Avšak vhodným rozdělením povrchu na plátky – použitím plátků degenerovaných do trojúhelníků a křivek – lze na ploše vytvořit hrany a docílit výběhů těchto hran do hladké plochy.

4. Zkušenosti s použitím etalonní geometrie

Navržený systém etalonní geometrie není zatím realizován v plném rozsahu. Praktické používání dosud dokončených částí však dosáhlo k dnešku takové úrovně, že umožnilo z podstatné části vyloučit použití plazměrkové metody ze současně probíhajícího vývoje nového letounu. Pro tento letoun jsou matematicky definovány geometrické etalony povrchů většiny jeho částí, které budou nadále používány jako jediný platný zdroj informací o geometrii těchto částí. Nadále se již nepoužívají tradiční kovové plazy. Vyloučením ručních metod obrýsování se urychluje zpracování geometrie, zkvalitňují se výsledky práce a kromě toho se dospívá k úspoře pracovníků plazměrkového oddělení.

Praktický dopad využívání etalonní geometrie se projevuje nejvýrazněji jednak v práci konstruktéra, jednak v technické přípravě výroby. V konstrukci má práce s etalonní geometrií řadu úrovní, podle míry, do které jednotliví pracovníci novou metodu zvládl. Na nejnižší úrovni si pracovník připraví pro řešení konkrétního úkolu geometrické podklady a pomůcky (výpočty, kresby) v takovém rozsahu a složení, aby jeho další práci, prováděnou tradičními postupy, maximálně usnadnily. Na nejvyšší úrovni využívá etalonní geometrii nikoli k přípravě podkladů, ale k vlastnímu řešení zadané úlohy (početní řešení geometrie a kinematiky mechanismů apod.), popř. ke kreslení polotovarů vybraných výrobních výkresů.

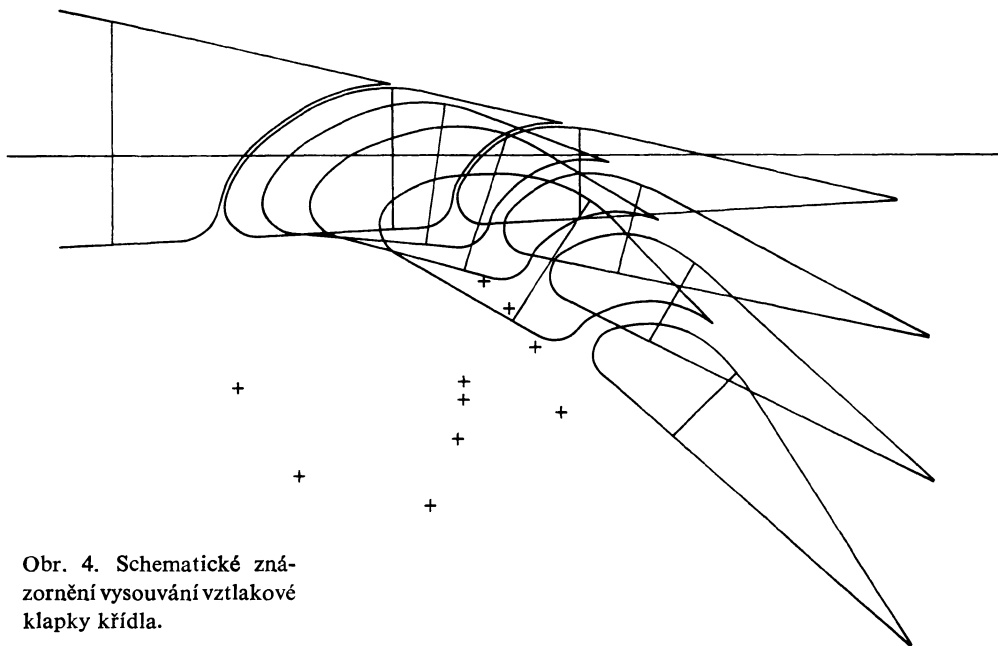
V technické přípravě výroby umožňuje použití etalonní geometrie převést podstatnou část výroby šablon, kleštin sestavovacích přípravků, tažných špalků a jiných výrobních pomůcek, jejichž tvar je dán tvarem povrchu příslušného konstrukčního celku, na číslicově řízené obráběcí stroje. Výhoda tohoto postupu tkví jednak ve zvýšené produktivitě výroby zmíněných pomůcek, v možnosti pružnějšího promítání konstrukčních změn do této výroby a hlavně v dosažení tvarové přesnosti při tradičních výrobních postupech zcela neobvyklé.

Jistým problémem, který zpomaluje rozšiřování aplikací etalonní geometrie jsou nové, vyšší nároky, které nová metoda klade na uživatele. Pracovník používající etalonní geometrii si musí běžné vědomosti, kterými je vybaven pro vykonávání své profese, rozšířit o řadu speciálních znalostí. Musí být schopen řešit geometrický problém algoritmizovat – rozčlenit jej na řadu jednoznačných kroků a nalézt logické vazby mezi nimi. Dále se musí seznámit se speciálním geometrickým jazykem, který mu umožní připravit řešený problém ke zpracování na počítači. Konečně musí zvládnout techniku práce s terminálem počítače, což je základní předpoklad úspěšné komunikace s výpočetním systémem.

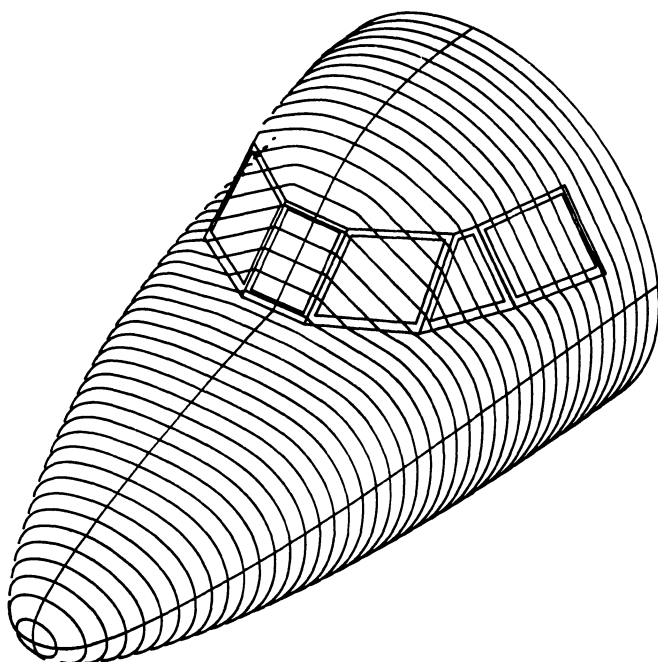
Ukazuje se, že racionalizační účinnost etalonní geometrie je tím vyšší, čím více pracovníků, kteří se ve svých profesích řešením geometrických úloh zabývají, je způsobilých touto metodou samostatně pracovat. Příliš se neosvědčilo dodavatelské zpracování geometrie, kdy řešení geometrických úloh je zadáváno specialistům. Při tomto způsobu práce často dochází ke komunikačním problémům, plynoucím z neznalosti aspektů strojového řešení geometrie na straně zadavatele a z nedostatečné znalosti kontextu řešeného problému na straně řešitele.

Použití etalonní geometrie nevyžaduje od uživatele naprosto žádné speciální znalosti

matematické. Důležitým předpokladem úspěšného využívání je však dobrá znalost geometrie rovinné i prostorové, zejména znalost řešení konstruktivních úloh. A předpokladem základním je dostatečně rozvinutá prostorová představivost uživatele. Při zpra-

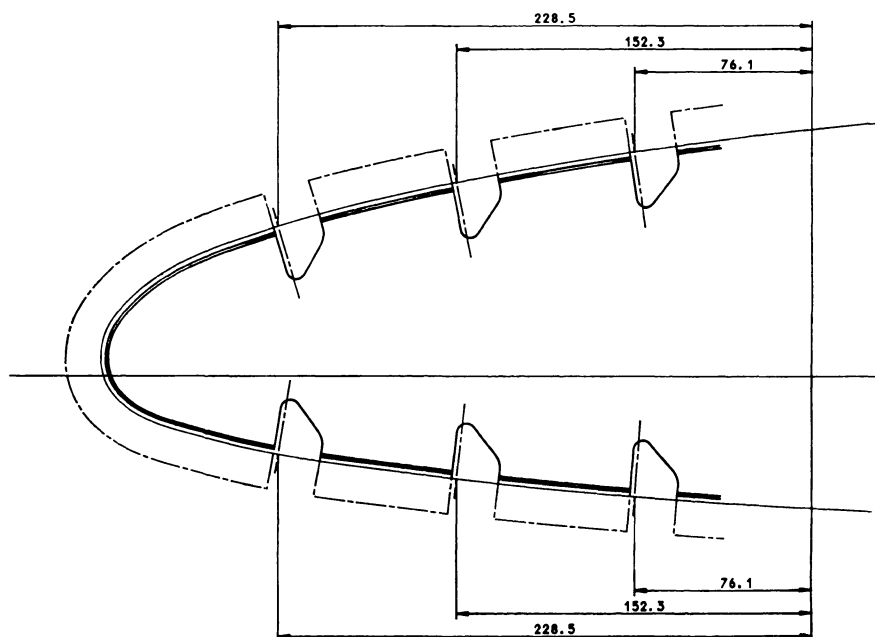


Obr. 4. Schematické znázornění vysouvání vztlakové klapky křídla.



Obr. 5. Řezy přední části trupu letounu.

cování úloh rostoucí složitosti se ukázalo, že faktorem, který limituje řešitelnost té či oné úlohy, nebývá nejčastěji nedokonalost programového aparátu nebo nedokonalá znalost příslušného geometrického jazyka, ale konečná prostorová představivost uživa-



Obr. 6. Polotovar konstrukčního výkresu žebra křídla.

tele, který úlohu řeší. A tento jev – vyčerpání prostorové představivosti řešitele – se projeví při použití etalonní geometrie podstatně častěji než při použití tradičních metod řešení. Je to tím, že etalonní geometrie dovoluje přímé řešení takových úloh, které se dříve pro svou složitost nebo pracnost, tradičními prostředky exaktně neřešily, ale obcházely se přijetím zjednodušujících předpokladů nebo dokonce výrobou fyzického modelu.

Náš názor na přípravu budoucích uživatelů, ať už systému etalonní geometrie nebo jiného geometrického či grafického systému, se dá shrnout takto:

1. *Uživatel musí být schopen vytvořit si představu o logickém postupu řešení dané úlohy. Jednotlivé kroky řešení musí umět vyjádřit vhodnými algoritmickými prostředky – příkazy geometrického nebo interaktivního grafického jazyka.*
2. *Není nutné pěstovat umění precizního ručního rýsování. (Tím není míněno běžné rýsování – kreslení výkresů.) Je však důležité, aby uživatel uměl vykreslovat postupy řešení geometrických úloh v axonometrii formou od ruky kreslených skic.*
3. *Je nutné klást zvýšený důraz na rozvoj prostorové představivosti uživatele. Geometrický systém je nástroj, který nabízí vysoké pracovní možnosti. Výsledky práce uživatele jsou úměrné tomu, do jaké míry mu prostorová představivost dovolí tyto možnosti využít.*