

613.693:518.7:612.821.1

PSYCHOFYZIOLOGICKÁ ODEZVA NA SIMULOVANÝ LET A ZPŮSOBY JEJÍHO MĚŘENÍ

Pplk. MUDr. Jiří ŠULC, CSc., pplk. ing. Jaromír CMÍRAL, CSc.

Ústav leteckého zdravotnictví, Praha

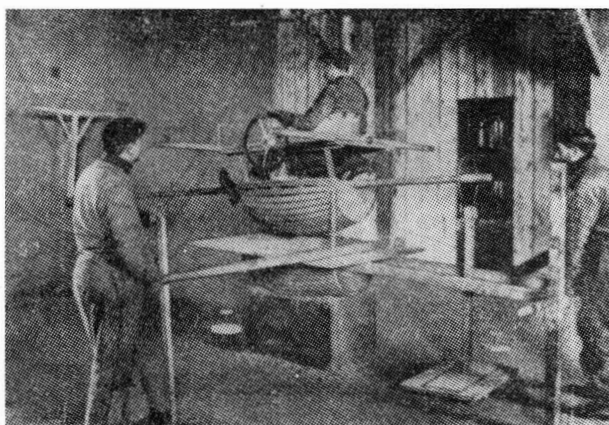
(náčelník: plk. MUDr. M. Haňka)

Během 70 let, jež uplynuly od chvíle, kdy neznámý fotograf pořídil první dokumentární snímek pilotního trenažéru (obr. 1), dosáhla technická úroveň těchto výcvikových zařízení obdivuhodné výše. Na nejmodernějších simulátorech dnes lze modelovat téměř bez jakéhokoli rizika působení prakticky všech druhů letových zátěží a připravovat letecké osádky na řešení i těch nejsložitějších situací. Mezi úspěšné světové výrobce pilotních trenažérů patří také naše republika. Jeden z nejdokonalejších československých výrobků, trenažér TL-39 (obr. 2 a 3), slouží ke zdokonalování dovedností a posilování návyků, potřebných pro pilotování letounu L-39 „Albatros“. Značná podobnost jeho „letových“ charakteristik se skutečným chováním letounu poskytuje navíc možnost cíleného studia některých složek psychofyziologické odezvy pilota na let.

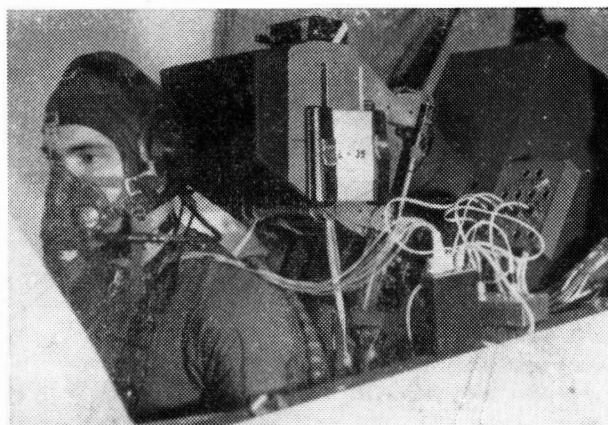
V předkládané práci referujeme o některých nových možnostech hodnocení fyziologických



Obr. 2 Pult instruktora u pilotního trenažéru TL-39



Obr. 1 Francouzský pilotní trenažér pro letoun Antoinette z r. 1910



Obr. 3 Pilot v kabině trenažéru TL-39, upravené pro snímání fyziologických charakteristik

a výkonových změn u letců během různě intenzivní zátěže za simulovaného letu.

Materiál a metodika

27 posluchačů Vysoké vojenské letecké školy Slovenského národního povstání, z nichž 13 bylo cvičeno na letounu L-39 a 14 létalo výhradně na letounu L-29, dostalo za úkol provést experimentální let na тренаžeru TL-39. Pokusu předcházela důkladná teoretická příprava na nastávající úkol a všichni probandi rovněž absolvovali krátký seznamovací let. Náležitá motivace byla podněcována oznámením, že jde o součást komplexního vyšetření posluchače, a proto záleží na dosažených výsledcích.

Experimentální let trval celkem 40–50 minut. Obsahoval 16 různě složitých etap, včetně etap tzv. operativního klidu před startem a fáze uklidnění po přistání. Schéma letu bylo následující (obr. 6, 7). Po startu stoupal posluchač předepsaným režimem postupně až do 4000 m, kde v 9. minutě provedl ustálenou zatáčku 360° s náklonem 45°. Potom podle pokynů řídicího létání pokračoval v letu, v jehož průběhu byl naváděn na vzdušný cíl. Mezi 24. až 26. minutou u něj experimentátor vyvolal postupně dvakrát iluzi náklonu podrážděním vestibulárního aparátu galvanickým proudem. Ve 28. minutě uvedl posluchač тренаžér do nestabilního letového režimu tím, že dostal příkaz ke strmému stoupání rychlostí 20 m/s. V okamžiku, kdy mu začala nebezpečně opadávat rychlost, nasimuloval instruktor visení otáček s následným vysazením motoru. Po vyřešení tohoto zvláštního případu za letu pilot provedl přiblížení k letišti rozpočtovým úhlem a zhruba ve 35. až 40. minutě zahájil sestup podle povelového navigačního přístroje „Jiskra“. Po dalších 10–15 minutách přistál.

Během všech 16 etap jsme na zapisovači Hel-

lige registrovali elektrokardiogram, pořízený ve svodovém korigovaném ortogonálním systému podle Franka [4], srdeční a dechovou frekvenci, minutový dechový objem a krevní tlak. V tomto sdělení analyzujeme pouze změny srdeční frekvence a vlny T elektrokardiogramu, vyhodnocované pomocí tzv. **sumárního EKG indexu W**, navrženého Simonovem a spolupracovníky [9]. K vlastnímu vyhodnocení průměrné délky intervalů RR a střední amplitudy sumárního vektoru vln T jsme zvolili 4sekundový vzorkovací úsek, jehož počátek se kryl se začátkem každé etapy. Index se počítá podle vzorce

$$W = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\overline{RR}_n}{\overline{RR}_k}\right)^2 + \left(\frac{\overline{T}_n}{\overline{T}_k}\right)^2}}$$

kde $\overline{RR}_k$ je průměrná hodnota intervalů RR ve 4sekundovém úseku kontrolní etapy (v ms),

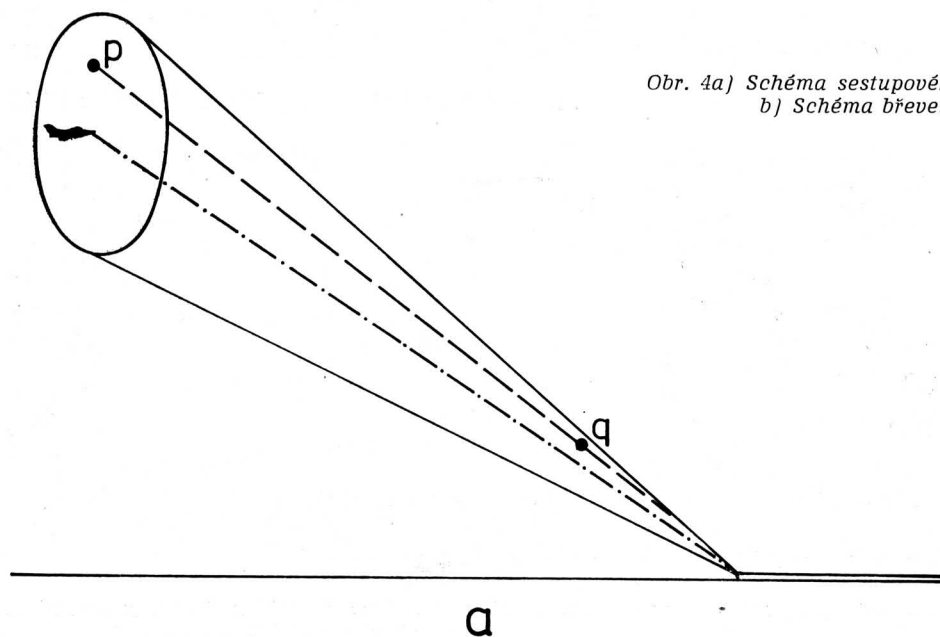
$\overline{RR}_n$ je průměrná hodnota intervalů RR ve 4sekundovém úseku n-té etapy (v ms),

$\overline{T}_k$ je průměrná hodnota amplitudy sumárního vektoru vln T ve 4sekundovém úseku kontrolní etapy (v mV),

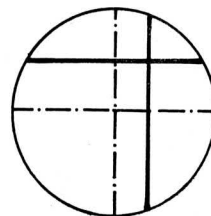
$\overline{T}_n$ je průměrná hodnota amplitudy sumárního vektoru vln T ve 4sekundovém úseku n-té etapy (v mV).

Významnost rozdílů indexu W v jednotlivých fázích letového úkolu jsme zjišťovali prostřednictvím Wilcoxonova testu při nulové hypotéze $W = \text{konst.}$

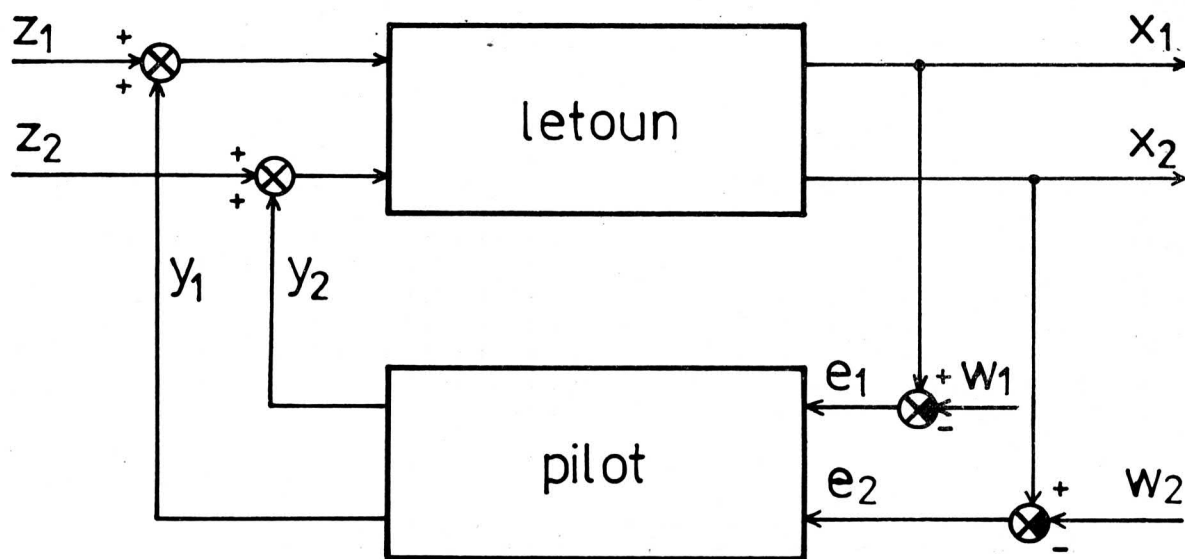
K testování **senzomotorických reakcí** jsme využili navigačního přístroje Jiskra, který se používá pro přesné provedení sestupového manévru. Přístroj má horizontální a vertikální pohyblivé břevno, poskytující pilotovi informa-



Obr. 4a) Schéma sestupového kužele pro přesné přistání
b) Schéma břevna na přístroji Jiskra



b



Obr. 5 Blokové schéma zpětnovazebního systému „pilot—letoun“

ce o poloze letounu (či тренаžeru) vzhledem k ideálnímu sestupovému paprsku. Kursová nebo výšková odchylka se ihned zobrazí ve formě direktivního signálu, tedy přesunu příslušného břevna do směru, kterým musí letec vychýlit řídicí páku, aby se znovu dostal na požadovanou trajektorii. Úkolem pilota je udržet průsečík obou břeven ve středu přístroje; jde v podstatě o kompenzační sledování optického podnětu (obr. 4b).

Navigační přístroj Jiskra má vysokou citlivost. Malá změna v řízení způsobuje poměrně velké odchylky. Kvalitu kompenzace významně ovlivňuje dosažená obecná úroveň senzomotorického návyku pilotování. Jinak řečeno, čím je pilot zkušenější v odhadu reakcí letounu na aktivní zásahy do řízení a čím dokonaleji zvládl dynamický stereotyp pilotáže, tím snadněji udrží břevna přístroje v požadovaném postavení.

Senzitivita přístroje se zvyšuje s přibližováním letounu k letišti. I když má pilot v bodě p na obraze 4a stejnou úhlovou chybu jako v bodě q, je pro vyrovnání chyby v místě p třeba většího zásahu do řízení, nežli v místě q. Z tohoto důvodu jsme úsek sestupu rozdělili do tří pásem: I. pásmo = 20 — 15 km, II. pásmo = 15 — 6,5 km a III. pásmo = 6,5 — 1 km před prahem dráhy.

Za současného uspořádání pokusného letu se může stát, že už při průletu I. pásmem naměříme velkou chybu. Zpravidla to však nesvědčí pro poruchu senzomotoriky, ale pro špatně provedený tzv. rozpočet na přistání (pilot se „netrefí“ do počátečního bodu sestupového paprsku).

Pilot je testován jako prvek zpětnovazebního systému „pilot—letoun“, který lze znázornit regulačním obvodem (obr. 5). Výstupní (tzv. regulované) veličiny soustavy x_1 , x_2 jsou v našem případě navigační údaje o poloze letounu vzhledem k letišti, jež jsou v navigačním při-

stroji srovnávány s hodnotami, předepsanými pro sestupový manévr (w_1 , w_2). Tyto tzv. řídicí veličiny odpovídají poloze letounu v ose sestupového kužele. Pilotovi jsou příslušné charakteristiky prezentovány navigačním přístrojem jako regulační odchylky e_1 , e_2 . Letec na ně reaguje zásahy do řízení, jež se na jeho výstupu projevují jako tzv. akční veličiny y_1 , y_2 . Kromě toho lze do obvodu zavádět poruchové veličiny z_1 , z_2 .

Přesnost řízení se posuzuje podle regulační chybové plochy v čase; příslušné hodnoty se snímají na výstupu analogového počítače trenážeru. Za hodnotící kritérium jsme zvolili tzv. střední absolutní odchylku D , která se vypočítá podle vzorce

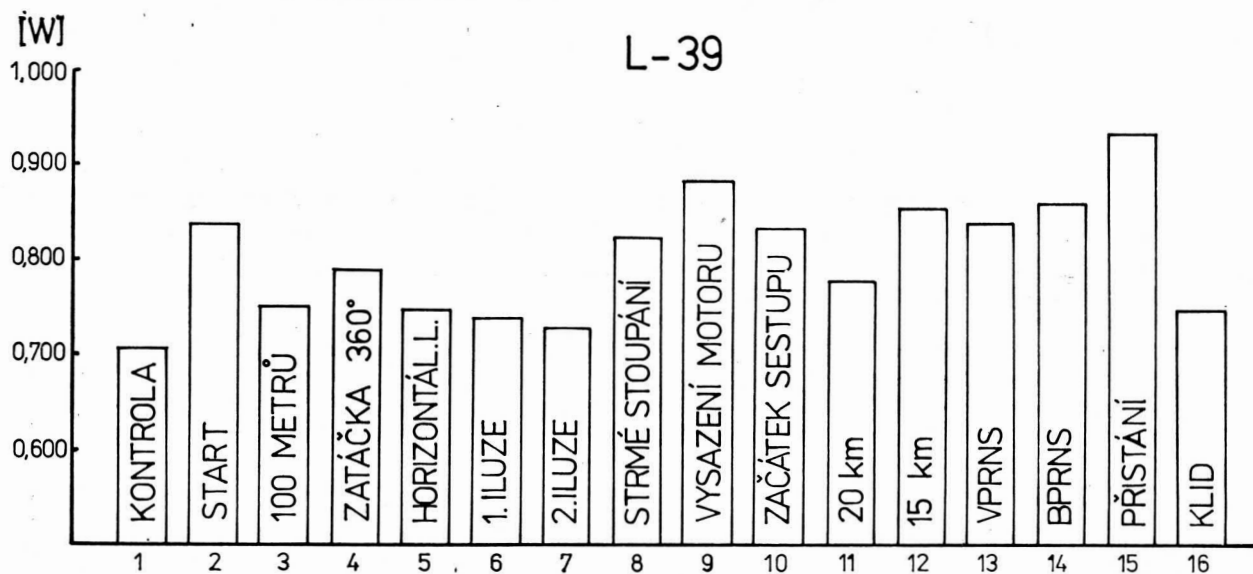
$$D = \frac{1}{T} \int_0^T (y - y') dt,$$

kde T je doba pozorování, y jsou okamžité hodnoty sledované veličiny (úhlové hodnoty) a y' jsou předepsané úhlové hodnoty. Důvodem pro použití střední absolutní odchylky místo běžnější střední kvadratické odchylky byla skutečnost, že v analogové technice mají kvadratické členy v oboru malých signálů poměrně velké chyby a v našem případě byla regulace optimální právě při nulové chybové hodnotě.

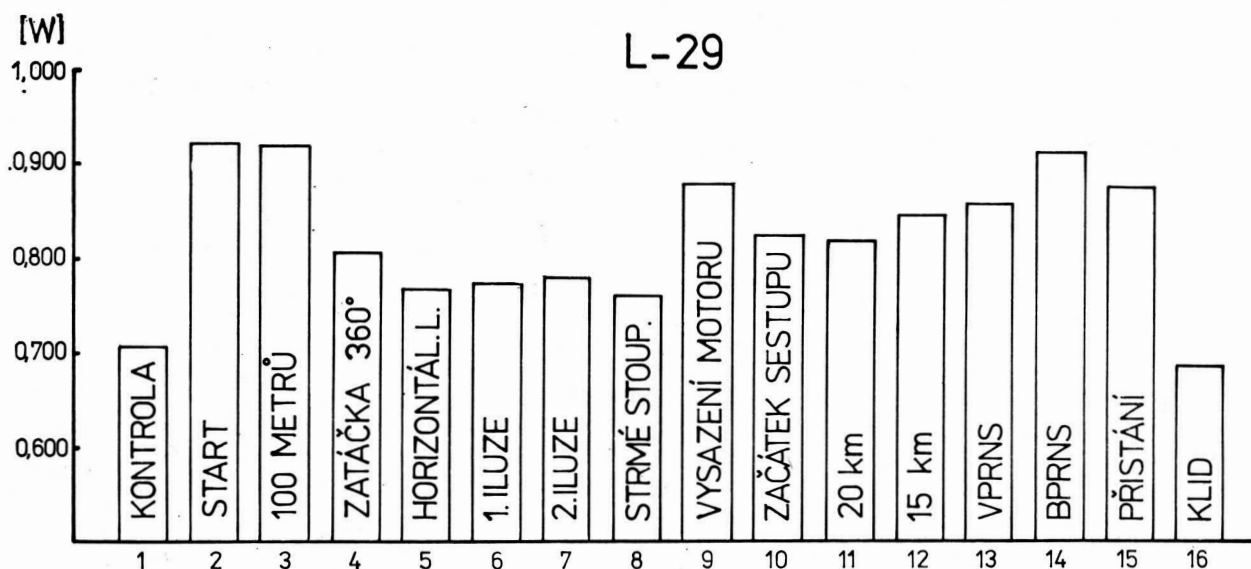
Sledováním kursové a výškové odchylky dostaneme kvantifikované hodnoty chyb D_1 pro kurs a D_2 pro výšku. Výsledná chyba D_0 je dána vztahem

$$D_0 = k_1 D_1 + k_2 D_2,$$

kde k_1 a k_2 představují váhové hodnoty, stanovené experimentálně. Jelikož chyby D_1 a D_2 se od sebe značně lišily, zvolili jsme velikost konstant k_1 a k_2 tak, aby střední hodnota chyb $k_1 D_1$ a $k_2 D_2$, zjištěná u osob perfektně ovládajících тренаžér (tj. dopouštějících se velmi malých odchylek) byla stejná.



Obr. 6 Průměrné hodnoty sumárního EKG indexu W u podskupiny posluchačů z letounu L-39



Obr. 7 Průměrné hodnoty sumárního EKG indexu W u podskupiny posluchačů z letounu L-29

Výsledky

Elektrokardiogram. Průměrné hodnoty sumárního EKG indexu W v jednotlivých etapách experimentu znázorňují obrázky 6 a 7. Z grafů je zřejmé, že trend pozorovaných změn je u obou podskupin posluchačů obdobný. Statistické zpracování výsledků (obr. 8) však ukazuje, že:

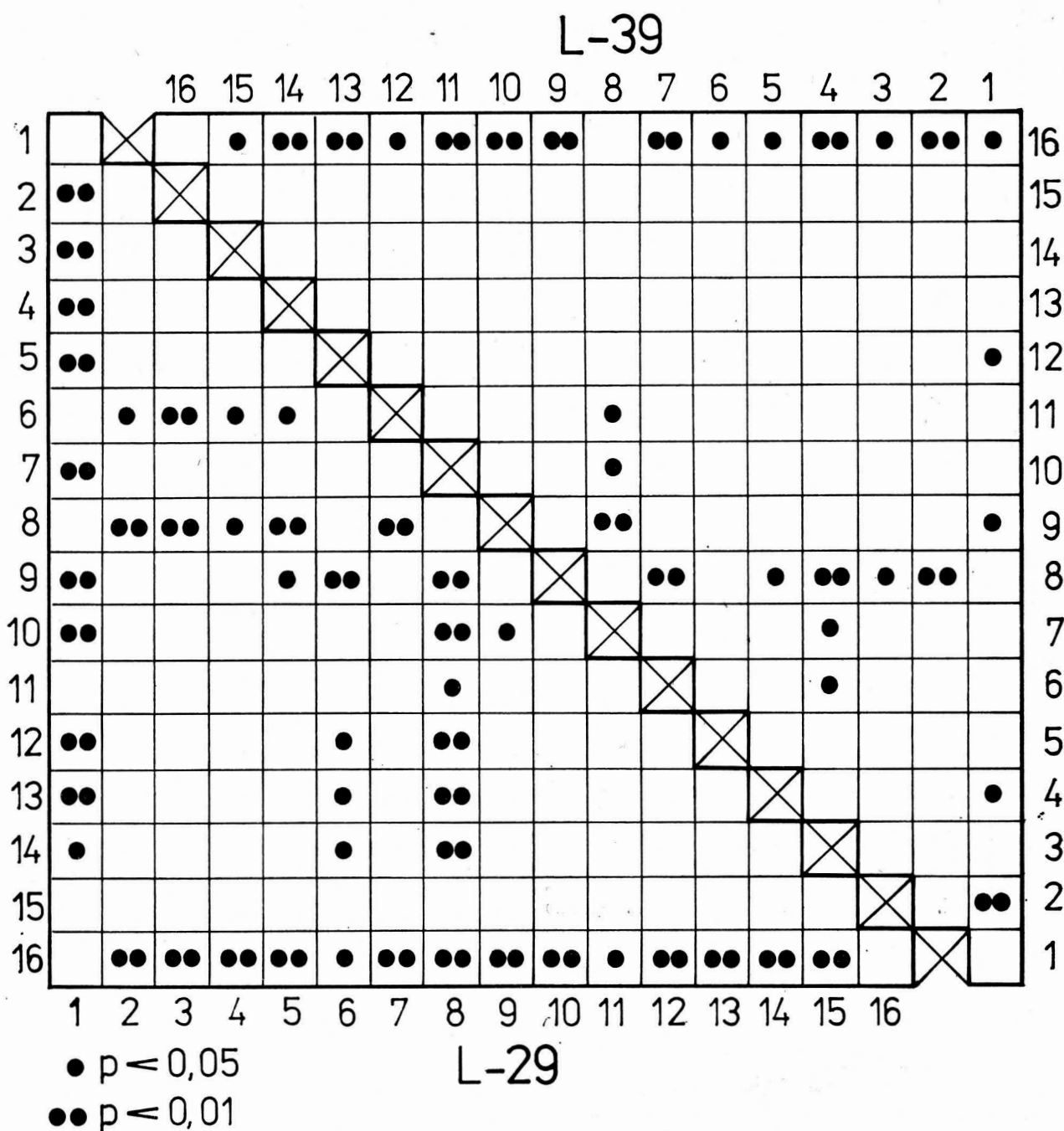
- sumární EKG index W citlivě reflektuje psychosomatickou odezvu na pracovní (v daném případě převážně informační) zátěž;

- pilotování trenážeru TL-39 představuje ve většině etap pro jedince cvičené na jiném typu letounu výrazně větší psychofyzilogickou zátěž, než pro osoby, které uvedený typ znají;

- v diferencování aktivace kardiovaskulárního aparátu je index W citlivějším ukazatelem, než samotná srdeční frekvence.

Statistická významnost indexu W v jednotlivých etapách experimentálního letu je vyšší, srovnáme-li jej s klidovými hodnotami po letu než s fází operativního klidu před startem. Tato skutečnost je dobře patrna zejména u posluchačů, cvičených na modernějším typu letounu. (Přitom srdeční frekvence byla v obou klidových etapách prakticky stejná!)

Jestliže přijmeme hypotézu autorů sumárního indexu W, podle níž vzestup tohoto ukazatele koreluje se vzrůstem emoční zátěže, lze pro obě podskupiny (i když v diferencované formě) považovat za nejnáročnější fázi vzlet, dále expozici zvláštního případu za letu a provedení sestupového manévru. Nečekaně nevýraznou fyziologickou reakci jsme naproti tomu zaznamenali na podráždění vestibulárního ústrojí galvanickým proudem (pozitivní odezva byla pouze u posluchačů z L-29 při prvním navození iluze náklonu).



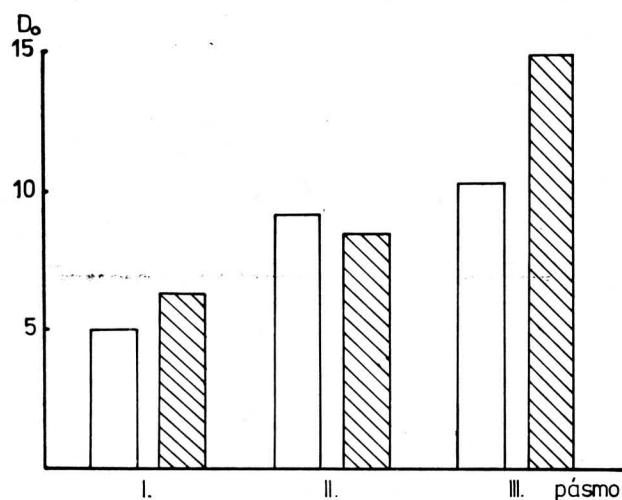
Obr. 8 Matice statistických významností změn indexu W

Senzomotorické reakce. Střední hodnoty chyby D_0 při kompenzačním sledování direktivního signálu ve dvou souřadnicích znázorňuje obrázek 9. Největší rozdíly — v neprospěch posluchačů cvičených na letounu L-29 — jsme zaznamenali v posledním, nejnáročnějším úseku sestupové glizády. Osvojení dynamického stereotypu pilotování letounu L-39 a trenažeru TL-39 se u osob, které zdárně dokončily celý sestupový manévry, projevilo jen nevýrazným absolutním přírůstkem D_0 proti II. fázi sestupu a podstatně nižší relativní velikostí chyby ve srovnání s nevycvičenými jedinci. Statistické hodnocení jsme neprováděli,

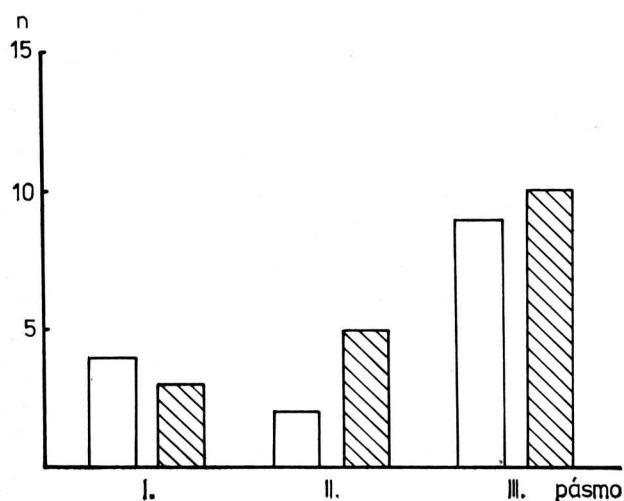
protože během sestupu „vypadly“ z paprsku 2/3 probandů (obr. 10).

Diskuse

Na studium fyziologické odezvy pilota během simulovaného letu se v posledních letech pohlíží jako na nadějnou metodu, prohlubující komplexní pohled na výkonnost letce. Soustavně se touto problematikou zabývají zejména odborníci v Sovětském svazu [11–14], ale i v dalších socialistických zemích (např. v NDR). Tato pracoviště se však na rozdíl od nás zaměřují převážně na výcvikový proces



Obr. 9 Střední hodnoty výsledné chyby D_0 u posluchačů z letounu L-39 (prázdné sloupce) a L-29 (šrafované sloupce)



Obr. 10 Počty probandů, kteří v jednotlivých pásmech sestupu vypadli ze sestupového kužele (symbolika jako na obr. 9)

u zkušených pilotů. Proto nebylo možné bez zásadních úprav převzít jejich pracovní metodiky a byli jsme postaveni před úkol nalézt vlastní postupy, respektující psychofyzilogické zvláštnosti výcviku ještě „nehotových“ letců.

Současná skladba experimentálního „letu“ je výsledkem série předchozího testování řady dílčích variant letových úloh, na jejichž navrhování se kromě pracovníků ústavu aktivně podíleli metodikové leteckého výcviku, učitelé létání z VVLŠ SNP a zkušební piloti. Má logickou návaznost na stupeň dosažených pilotních návyků u každého posluchače, i když není cvičen přímo na letounu L-39. S výjimkou poněkud modifikované techniky sestupu podle navigačního přístroje Jiskra neobsahuje žádný „umělý“ prvek, který by posluchač prováděl výhradně v laboratorní situaci. Zvolená koncepce sleduje perspektivní cíl porovnávání psychofyzilogické odezvy pilota v mode-

lových letech s jeho reakcemi v letech reálných. Proto se neorientujeme na kumulaci havarijních situací a nezvyklých letových režimů tak, jak je to obvyklé při provádění zdokonalovacího výcviku u profesionálních letců.

Druhým zásadním problémem, se kterým jsme se museli vyrovnat, byla volba dostatečně informativních psychofyzilogických charakteristik, podle kterých lze objektivně posuzovat, s jakým stupněm aktivace organismu (za jakou „fyzilogickou cenu“) pilot let provádí. V kosmické fyziologii a letecké inženýrské psychologii se v současné době tato otázka řeší prostřednictvím tzv. integrovaných psychofyzilogických ukazatelů [1, 5, 6]. Princip metody spočívá v přiřazování různých vah dílčím fyziologickým a výkonovým parametrům podle toho, zda za daných okolností sledované systémy zajišťují regulační nebo kompenzační funkce [10]. Výsledný psychofyzilogický index se dále porovnává s aktuálním průběhem letu.

Pro objektivní hodnocení odezvy organismu na let je velmi důležité odlišení reakcí na somatickou zátěž (přetížení, vibrace aj.) od reakcí psychických (emoce, informační zátěž). Klasické indikátory, jako jsou srdeční a dechová frekvence, krevní tlak, minutový dechový volum a další jsou, jak známo, v tomto směru velmi nespolehlivé. Proto jsme se chopili příležitosti ověřit si informační hodnotu tzv. sumárního EKG index W navrženého kolektivem, vedeným prof. P. V. Simonovem [9], i když jsme si byli vědomi toho, že po teoretické stránce není jeho koncepce plně dořešena. Sovětští autoři v něm zužitkovali poznatek, že v emoční zátěži se na rozdíl od zátěže fyzické mění amplituda vlny T dříve a výrazněji, než srdeční frekvence [2, 3, 7, 8]. Podle našeho názoru však uvedený poznatek příslušným způsobem nevyjádřili matematicky; váha obou charakteristik ve jmenovateli rovnice je stejná.

Přes tento nedostatek se potvrdilo, že zmíněný index má vyšší informační hodnotu, než samotná srdeční frekvence. V dalším výzkumu se proto zaměříme na jeho zdokonalení.

Let podle přístroje Jiskra v etapě přistávání dovoluje s vysokou spolehlivostí objektivizovat stupeň dosaženého senzomotorického návyku v pilotování. Hodnocení zásahů pilota do řízení je v zásadě analogické způsobu, jakým se vyhodnocuje pohyb letounu napříkladem ze záznamu havarijního zapisovače. Tím se vytvářejí příznivé předpoklady pro přímé zužitkování získaných charakteristik pro komplexní posouzení letu jak z hlediska psychofyzilogologa, tak metodika leteckého výcviku.

Dosavadní zkušenosti, získané při sledování psychofyzilogické odezvy organismu na simulovaný let nám prozatím nedovolují pracovat s integrovanými psychofyzilogickými charakteristikami. Přesto se domníváme, že i tyto dílčí poznatky rozšíří pohled leteckých lékařů,

ale i dalších specialistů, kteří se zabývají otázkami trenažérového výcviku, na další možnosti studia složitých vztahů člověka a techniky.

Souhrn

Autoři popisují metodiku simulovaného letu na pilotním trenažéru TL-39, navrženou pro komplexní testování úrovně profesionálních návyků u pilotních posluchačů. Diskutují možnosti objektivního hodnocení psychofyziologické odezvy letce na modelový let. Podrobně se zabývají informační hodnotou tzv. sumárního EKG indexu, navrženého P. V. Simonovem a spolupracovníky (1978) a testováním senzomotorických reakcí pomocí navigačního přístroje Jiskra.

Literatura

1. Beregovoj, G. T. - Zavalova, N. D. - Lomov, B. F. - Ponomarenko, V. A.: Experimentalno-psichologičeskije issledovanija v aviacii i kosmonavtike. Moskva, Nauka 1978. 304 s.
2. Fedorov, B. M.: Emocii i serdečnaja dejatel'nost'. Moskva, Medicina 1977. 216 s.
3. Frolov, M. V. - Sviridov, E. P.: Amplituda T-zubca EKG kak korreliat emocionalnogo naprjaženija. Žur. vysš. nerv. Dejat., 24, 1974, č. 5, s. 1052—1056.
4. Hospodář, J.: Možnosti využití ortogonálních svodových systémů EKG. Voj. zdrav. Listy, 47, 1978, č. 4, s. 177—184.
5. Chrunov, E. V. - Chačaturjanc, L. S. - Popov, V. A. - Ivanov, E. A.: Čelovek-operator v kosmičeskom polete. Moskva, Mašinostrojenije 1974. 400 s.
6. Chačaturjanc, L. S. - Grimak, L. P. - Chrunov, E. V.: Experimentalnaja psichofiziologija v kosmičeskich issledovanijach. Moskva, Nauka 1976. 400 s.
7. Simonov, P. V. - Frolov, M. V. - Sviridov, E. P.: Characteristics of the electrocardiogram under physical and emotional stress in man. Aviat. Space Environ. Med., 46, 1975, č. 2, s. 141—143.
8. Simonov, P. V. - Frolov, M. V. - Jevtušenko, V. F. - Sviridov, E. P.: Effect of emotional stress on recognition of visual patterns. Aviat. Space Environ. Med., 48, 1977, č. 9, s. 856—858.
9. Simonov, P. V. - Frolov, M. V. - Lužbin, N. A.: Psychophysiological forecasting of efficiency. Aviat. Space Environ. Med., 49, 1978, č. 11, s. 1319—1321.
10. Šulc, J.: Letecká fyziologie. Praha, Naše vojsko 1980. 284 s.
11. Žernavkov, V. F. - Kuzněcov, V. G. - Kirillova, Z. A. - Markarov, R. N. - Poljakov, V. N.: Modelirovanije uslovij razgermetizacii kabiny na pilotažnych trenažerach. Voj. med. Žurnal, 148, 1971, č. 10, s. 66—69.
12. Žernavkov, V. F. - Kuzněcov, V. G.: Psichofiziologičeskije principy kontrolja i ocenki gotovnosti letčika k poletam. Voj. med. Žurnal, 152, 1975, č. 1, s. 58—60.
13. Žernavkov, V. F. - Šalimov, P. M.: Značenie psichofiziologičeskogo normirovanija letnoj nagruzki v medicinskom normirovanii poletov. Voj. med. Žurnal, 154, 1977, č. 7, s. 60—64.
14. Žernavkov, V. F. - Karelina, L. N. - Petrov, J. P.: Psichofiziologičeskije osobennosti dejatel'nosti letčika pri kratkovremennom vozdejstvii intenzivnych svetovych stimulov. Kosm. Biol. aviakosm. Med., 12, 1978, č. 4, s. 27—31.