

MICHALAK Sławomir¹
 SZELMANOWSKI Andrzej
 BOROWSKI Jerzy

Problemy kompensacji błędów lotniczych układów kursowych w systemach zobrazowania nahałmowego stosowanych w środkach transportu lotniczego

Zintegrowane systemy awioniczne, systemy zobrazowania nahałmowego

Streszczenie

W referacie omówiono problemy sprawdzeń lotniczych systemów orientacji przestrzennej na przykładzie układu kursu i pionu IKW-8, zabudowanego na samolotach Su-22. Przeanalizowano trudności związane z wykorzystaniem aparatury typu SOUD (ZSRR) stosowanej do określania i usuwania dewiacji magnetycznej. Przedstawiono opracowaną w ITWL metodę zastosowania komputera do analizy widmowej dewiacji magnetycznej systemu kursowego. Przedstawiono możliwości budowy komputerowego systemu diagnostycznego służącego do określania i usuwania dewiacji magnetycznej. Na przykładzie układu kursowego GMK-3AE (zabudowanego na śmigłowcach Mi-17) omówiono problemy z kompensacją dewiacji magnetycznej w przypadku zastosowania tych układów w systemach zobrazowania nahałmowego. Wskazano na możliwości kalibracji elektronicznej oraz modyfikacji dotychczas stosowanego procesu określania dewiacji magnetycznej układu kursowego. Realizacja tego tematu została przyjęta do finansowania przez MNiSzW w ramach projektu badawczego rozwojowego.

COMPENSATION FOR ERRORS IN THE HEADING REFERENCE UNIT OF THE HELMET MOUNTED DISPLAY SYSTEM USED IN AIR TRANSPORT SYSTEMS

Abstract

What is dealt with in the paper are issues of checking the attitude/heading reference unit exemplified with the inertial attitude and heading system IKW-8 of the Su-22 fighter bomber. Analysed have been problems with operational use of any system of the SOUD type (USSR) to define and remove magnetic deviation. A method (developed in ITWL) of applying the computer to spectral analysis of magnetic deviations in the heading-system indications has been introduced and followed with a short study on the feasibility of a computer-based diagnostic system to automatically determine and eliminate the magnetic deviation. With the heading reference system GMK-3AE built in the Mi-17 helicopter used as an example, issues with the compensation for the magnetic deviation have been discussed for the case of these units being applied to the helmet-mounted display systems. Pointed out are possibilities of both electronic calibration and improvement in the hitherto performed process of defining magnetic deviation. This project has been financed by the Ministry of Science & Higher Education of Poland as a research project (R&D).

1. WPROWADZENIE

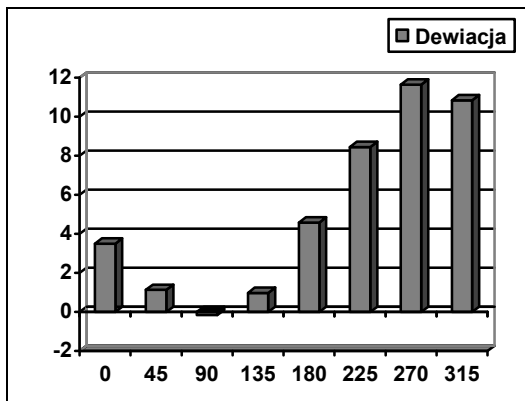
Jednym z podstawowych systemów współczesnego statku powietrznego jest system kursowy określający kierunek lotu, czyli kurs (Ψ). System kursowy stanowi podstawę nawigacji autonomicznej, umożliwiającej określenie położenia geograficznego na bazie informacji o prędkości i czasie lotu na danym kursie. Stąd błędy systemów kursowych, zwłaszcza w sytuacjach awaryjnych podstawowego systemu nawigacyjnego (np. systemu nawigacji inercyjnej), mają duży wpływ na wykonanie zadania i bezpieczny powrót [1].

Kurs magnetyczny określany przez system kursowy może zawierać błąd związany z oddziaływaniem własnego pola magnetycznego samolotu. Błąd ten w terminologii lotniczej nazywany jest dewiacją magnetyczną ($\Delta\Psi$). Typowy przebieg dewiacji magnetycznej zawiera składową stałą - dewiację okrężną A (stałą na wszystkich kursach ustawienia samolotu) oraz składowe będące przebiegami harmonicznymi - dewiację półokrężną B i C (zmieniającą się raz na pełny obrót samolotu) i dewiację ćwierćokrężną D i E (zmieniającą się dwa razy).

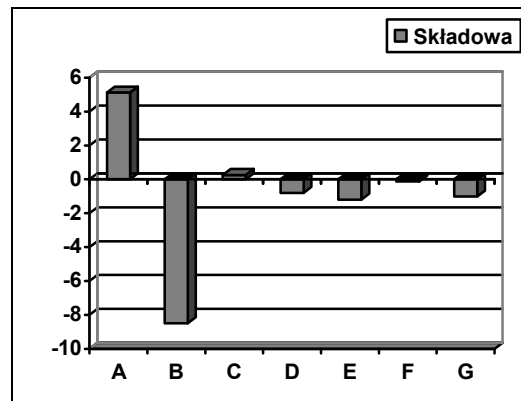
Wyniki prac dewiacyjnych wykonanych przez ITWL w ramach przedłużania ресурсu samolotów Su-22 wykazały, że wartość maksymalna błędu systemu kursowego typu IKW-8 może dochodzić do kilkunastu stopni, zaś przebiegi dewiacji magnetycznej mogą się znacznie różnić między sobą.

Przykładowy przebieg zawierający jako dominującą składową B dewiacji półokrężnej oraz jego składowe harmoniczne przedstawiono na rys. 1. i rys. 2.

¹Air Force Institute of Technology, POLAND; Warsaw 01-494, Księcia Bolesława 6. Phone: +48 22 685-10-43, 685-12-03, Fax: +48 22 685-10-43
 E-mail: andrzej.szelmanowski@itwl.pl

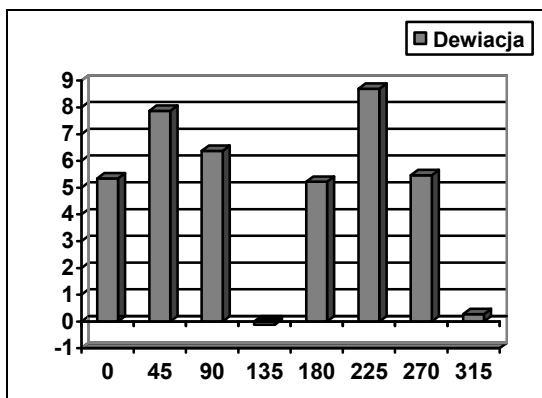


Rys. 1. Przebieg z dewiacją półokrężną

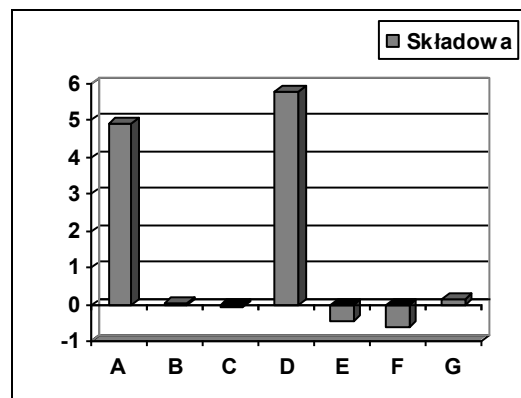


Rys. 2. Obliczone składowe dewiacji

Przykładowy przebieg zawierający jako dominującą składową D dewiacji ćwierćokrężnej oraz jego składowe harmoniczne przedstawiono na rys. 3. i rys. 4.



Rys. 3. Przebieg z dewiacją ćwierćokrężną



Rys. 4. Obliczone składowe dewiacji

Dla obu przebiegów występuje dość duża wartość składowej okrężnej A (rzędu 5°), charakteryzującej tzw. błąd montażowy związany z niedokładną zabudową nadajnika indukcyjnego ID-6 oraz składową stałą pozostałych błędów instrumentalnych w kanale magnetycznym IKW-8.

Wartości tych składowych można określić korzystając ze wzoru Smitha dla dewiacji mierzonej na kolejnych kursach ustawienia statku powietrznego:

$$\Delta\Psi(\Psi) = A + B \sin(1\Psi) + C \cos(1\Psi) + D \sin(2\Psi) + E \cos(2\Psi) \quad (1)$$

Przebieg ten przypomina rozkład widmowy Fouriera, który dla błędu systemu kursowego przedstawia składowe harmoniczne charakteryzujące wpływ poszczególnych składowych dewiacji magnetycznej w zależności od częstości ich zmian w zakresie pełnego kąta obrotu samolotu tj. od 0° do 360° [2].

2. ANALIZA WIDMOWA W IDENTYFIKACJI BŁĘDÓW UKŁADU KURSOWEGO

Alternatywną metodą określania składowych dewiacji magnetycznej może być metoda komputerowej analizy harmonicznych charakteryzujących kolejne składowe dewiacji układu. Pozwala ona na określenie wpływu wyższych harmonicznych rozkładu (w tym dewiacji półokrężnej i ćwierćokrężnej) na sumaryczny błąd systemu kursowego.

Występujące na pokładzie statku powietrznego nieskompensowane oddziaływanie pól magnetycznych generowanych przez urządzenia elektryczne włączane do pracy w zależności od warunków lotu (np. silniki elektryczne mechanizmów wykonawczych) oraz błędy instrumentalne układu kursowego w kanale kursu magnetycznego powodują, że rzeczywisty błąd systemu kursowego można przedstawić w postaci nieskończonej sumy współczynników we wzorze Smitha – wtedy otrzymuje się uogólnioną zależność:

$$\Delta\Psi(\Psi) = A + B \sin(1\Psi) + C \cos(1\Psi) + D \sin(2\Psi) + E \cos(2\Psi) + \dots \quad (2)$$

czemu z kolei odpowiada rozkład widmowy w postaci:

$$\Delta\Psi(f_s) = A_0 + B_1 \sin(f_1\Psi) + A_1 \cos(f_1\Psi) + B_2 \sin(f_2\Psi) + A_2 \cos(f_2\Psi) + \dots \quad (3)$$

Jak wykazały prace wykonane w ITWL, analiza widmowa adaptowana na potrzeby określania składowych harmonicznyczych w przebiegu błędu określania kursu może wykorzystywać algorytm szybkiej transformacji Fouriera typu FFT [2] zaimplementowany do systemu komputerowego w postaci:

$$\Delta\Psi(f_s) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=1}^{u=N} \Delta\Psi(\Psi_u) e^{j2\pi(u-1)(s-1)/N} = A_i(f_s) + j B_i(f_s) \quad (4)$$

gdzie poszczególne składowe harmonicznyczych można określić z poniższych zależności:

$$A_i(f_s) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=1}^{u=N} \Delta\Psi(\Psi_u) \cos[2\pi(u-1)(s-1)/N] \quad (5)$$

$$B_i(f_s) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=1}^{u=N} \Delta\Psi(\Psi_u) \sin[2\pi(u-1)(s-1)/N] \quad (6)$$

W typowym rozkładzie widmowym, gdy analizowane są przebiegi czasowe danego sygnału, zmienną niezależną jest częstotliwość zmian składowej harmonicznyczych w odniesieniu do ustalonego okresu czasu. Natomiast w przypadku analizy dewiacji magnetycznej wykorzystano rozkład widmowy przebiegu błędu określonego w funkcji częstotliwości zmian jego składowych harmonicznyczych w zakresie kąta pełnego (jeden obrót samolotu).

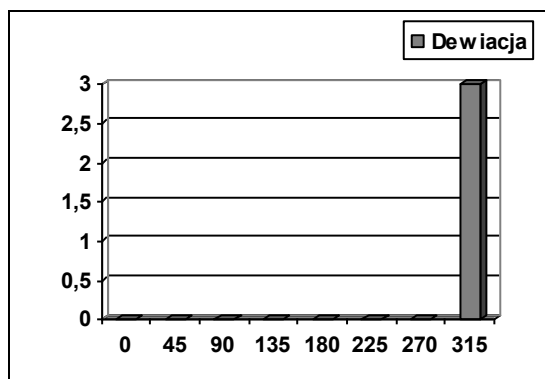
W miarę wzrostu liczby ustawień samolotu (kursów) obliczany przy wykorzystaniu komputera rozkład widmowy zawiera więcej składowych harmonicznyczych (A_i , B_i), które charakteryzują wpływ błędu instrumentalnego systemu kursowego lub anomalie magnetyczne pola wokół samolotu (np. od płaszczyzny dewiacyjnej).

3. PROBLEMY W KOMPENSACJI BŁĘDÓW UKŁADU KURSOWEGO IKW-8

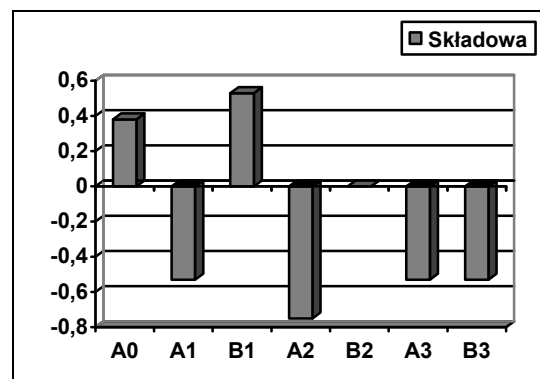
Prace prowadzone przez ITWL w ramach przedłużania resursu samolotów Su-22 wykazały istnienie problemów w określaniu i kompensacji błędu układu kursowego IKW-8 w kanale magnetycznym [1]. Należą do nich trudności związane ze sprawdzeniami bezwładnościowego systemu kursu i pionu IKW za pomocą aparatury Soud (produkcji byłego ZSRR), wymagającej dużych umiejętności i pracowitości od personelu technicznego [3]. Aparatura Soud umożliwia pomiar dewiacji magnetycznej w dwóch prostopadłych do siebie osiach czujnika (w kierunku podłużnym i poprzecznym do kierunku ustawienia samolotu na danym kursie).

Teoretycznie dzięki temu możliwe jest określenie wszystkich jej składowych (tj. dewiacji okrężnej, półokrężnej i ćwierćokrężnej) już dla trzech ustawień samolotu, zazwyczaj na kursach 0°, 90° i 180° [4]. W przypadku znajomości składowych dewiacji okrężnej i ćwierćokrężnej wystarczy pomiar na jednym kursie, aby określić wnoszącą największe błędy dewiację półokrężną. Jednak sam pomiar odbywa się w Soud na drodze pomiaru prądów płynących w cewkach czujnika pola magnetycznego. Jak wynika z danych zebranych w jednostkach eksploatujących aparaturę Soud, dużym problemem jest odpowiednia kalibracja jej układów pomiarowych oraz skomplikowane obliczenia potrzebne do określenia współczynników składowych dewiacji i poprawek potrzebnych do ich kompensacji [5].

Wykorzystanie komputera pozwala otrzymywać przebiegi dewiacji wyliczanej na podstawie jej składowych (rys. 5.) oraz analizować jej rozkłady widmowe (rys. 6.). Ułatwia to ocenę wielkości pola magnetycznego generowanego przez elementy żelazne samolotu, a także pozwala określić możliwości kompensacji błędu układu IKW-8.



Rys. 5. Przebieg dewiacji przekraczającej zakres kompensacji KM-2



Rys. 6. Rozkład widmowy dewiacji z wyższymi harmonicznymi

Rozkłady widmowe przebiegów dewiacji magnetycznej, otrzymane z wykorzystaniem algorytmów zaimplementowanych do komputera pozwoliły w sposób szybki na określenie wpływu poszczególnych składowych dewiacji na jej wartości maksymalne. Na tej bazie powstał opracowany w ITWL komputerowy system analizy widmowej dewiacji

magnetycznej w oparciu o zmodyfikowany algorytm FFT. Umożliwia on otrzymywanie składowych dewiacji półokrężnej i ćwierćokrężnej (pierwszej i drugiej harmonicznej), ale także składowych trzeciej i czwartej harmonicznej, charakteryzujących wpływy bardziej subtelne, wywołane np. błędami przyrządowymi (niedoregulowaniem lub niesprawnościami) w kanale "czujnik-kompensator-wskaźnik" [3].

Na bazie komputerowej aproksymacji błędów przekraczających możliwości korekcji systemu kursowego umożliwiło to "dopasowanie" poprawek do zakresu regulacyjnego kompensatora magnetycznego KM-2. Komputerowe składowanie przebiegu dewiacji magnetycznej może być także użyteczne w procesie szkolenia specjalistów eksploatujących systemy kursowe w zakresie określania i kompensacji jej składowych [4].

4. PROBLEMY KOMPENSACJI BŁĘDÓW UKŁADU KURSOWEGO GMK-3AE

Układ kursowy GMK-3AE stanowi element pokładowego wyposażenia nawigacyjnego m.in. śmigłowców Mi-17 eksploatowanych w Siłach Zbrojnych RP. W komplet układu kursowego GMK-3AE wchodzi: nadajnik indukcyjny ID-3, mechanizm korekcyjny KM-8, pulpit sterowania PU-26, agregat żyroskopowy GA-6, dwa wskaźniki UGR-4UK, automat uzgodnienia AS-1 oraz złącze kontrolne 2RM27BPN24G1W1. Mechanizm korekcyjny KM-8 (rys. 7.) przeznaczony jest do wprowadzania poprawek dla układu kursowego, zaś elementem przekazującym informację o kursie dla pilota jest wskaźnik UGR-4UK (rys. 8.). Dodatkowo układ kursowy GMK-3AE przekazuje sygnały kursu do pilota automatycznego AP-34B oraz dopplerowskiego miernika prędkości i kąta znoszenia DISS-15 [6].



Rys. 7. Widok mechanizmu korekcyjnego KM-8 dla układu GMK-3AE



Rys. 8. Widok fragmentu tablicy przyrządów ze wskaźnikiem UGR-4UK

Do wykonania prac dewiacyjnych (określenia i usunięcia błędów układu kursowego) przewiduje się specjalistyczną aparaturę kontrolno-pomiarową w postaci pulpitu PK-GMK. Dotychczas stosowana technologia wymaga, aby po wykonaniu prac dewiacyjnych układu kursowego GMK-3AE wykonane zostały aktualne wykresy poprawek i zamocowane w oprawkach umieszczonych na szkielecie osłony kabiny załogi.

W zmodernizowanej wersji śmigłowca wojskowego Mi-17-1V (z zabudowanym systemem nahlmowego wyświetlania parametrów lotu typu SWPL-1) zastosowano komputerowy układ przetwarzania informacji o kursie pozyskiwanym z układu GMK-3AE [7]. Przeznaczony do tego układ przetwarzania sygnałów UDS-1 podczas pracy nie wymaga żadnych regulacji, ani strojenia. Do odbioru sygnałów otrzymywanych z układu kursowego GMK-3AE przewidziane są dwie płytki elektroniczne (rys. 9. i 10.):

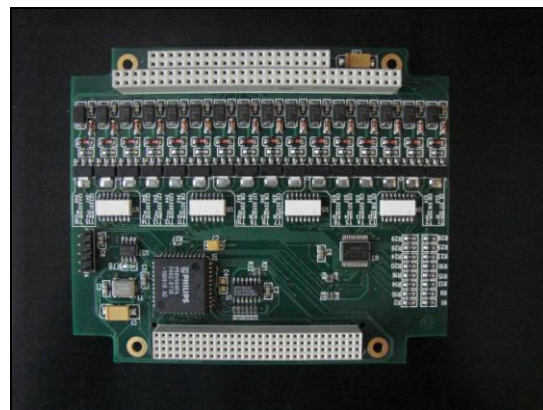
- płytki sygnałów analogowych UDS_ANB – do odbioru i dopasowania analogowych sygnałów trójfazowych (otrzymywanych z nadajnika indukcyjnego ID-3 i nadajników giroskopowych GA-6 wchodzących w skład układu kursowego GMK-3AE);
- płytki sygnałów binarnych UDS_B – do przetwarzania sygnałów binarnych o sprawności lub niesprawności układu kursowego GMK-3AE (wypracowywanych przez układ dopasowania sygnałów UDS-1).

Sygnały przygotowane w układzie dopasowania sygnałów UDS-1 w zakresie kursu z układu GMK-3AE są następnie przekazywane do komputera graficznego KG-1 na płytki resolwerów RES_1 i RES_2. W komputerze graficznym KG-1 następuje właściwa kalibracja torów pomiarowych, która obejmuje szereg czynności wymagających ustawiania śmigłowca na kursach magnetycznych oraz obsługi oprogramowania komputera graficznego KG-1 w zakresie wprowadzania poprawek na wskazania systemu kursowego.

Czynności przygotowawcze obejmują m.in. włączenie systemów pokładowych do pracy. Następnie, rozpoczynając od ustawienia śmigłowca na kursie magnetycznym 0°, należy wykonać kalibrację przy wykorzystaniu planszy MENU, obrazowanej na wyświetlaczu nahlmowym systemu SWPL-1.



Rys. 9. Widok płytki sygnałów analogowych UDS_ANB układu UDS-1



Rys. 10. Widok płytki sygnałów binarnych UDS_BIN układu UDS-1

Korzystając z opisu tej planszy, podświetlić pole „Kurs magnetyczny” i wcisnąć przycisk TRYB PRACY - pojawi się plansza wejściowa KM dla kalibracji toru pomiarowego kursu magnetycznego (rys. 11.). Na wybranym polu pojawi się wartość liczbowa odpowiadająca ustawieniu selsyna nadajnika z układu kursowego. Po akceptacji przyciskiem na pulpicie sterującym, wartość liczbową z pola dla kursu magnetycznego 0° pojawi się jako poprawka stała, natomiast w tym polu pojawi się wartość zerowa kursu magnetycznego. Następnie ustawiać śmigłowiec na kolejnych kursach magnetycznych co 15°. W polu roboczym planszy KM będą pojawiać się wartości liczbowe kursu magnetycznego pomierzone przez system SWPL-1. Po wypełnieniu wszystkich pól na planszy KM widok będzie podobny do przedstawionego na rys. 12.

Kalibracja kursu magnetycznego [°]			
Poprawka stała		0.0	
Śmigłowiec	SWPL-1	Śmigłowiec	SWPL-1
0	XXX	180	XXX
15	XXX	195	XXX
30	XXX	210	XXX
45	XXX	225	XXX
60	XXX	240	XXX
75	XXX	255	XXX
90	XXX	270	XXX
105	XXX	285	XXX
120	XXX	300	XXX
135	XXX	315	XXX
150	XXX	330	XXX
165	XXX	345	XXX

Zakończ Anuluj

Rys. 11. Widok planszy wejściowej KM dla kalibracji kursu magnetycznego

Kalibracja kursu magnetycznego [°]			
Poprawka stała		-0.07	
Śmigłowiec	SWPL-1	Śmigłowiec	SWPL-1
0	0.00	180	180.06
15	14.74	195	194.80
30	29.70	210	209.73
45	44.72	225	224.71
60	59.81	240	239.82
75	75.04	255	255.02
90	90.37	270	270.36
105	105.65	285	285.56
120	120.70	300	300.63
135	135.68	315	315.63
150	150.55	330	330.49
165	165.32	345	345.27

Zakończ Anuluj

Rys. 12. Widok planszy KM po wykonaniu kalibracji kursu magnetycznego

Po zatwierdzeniu wprowadzonych danych i wyjściu z trybu pracy KALIBRACJA, dane będą zapisane w pamięci stałej systemu. Jeśli różnica pomiędzy wartością kursu magnetycznego zadaną na kole dewiacyjnym, a wartością odczytaną przez system będzie istotnie znacząca, wówczas po zatwierdzeniu wartości pojawi się wartość liczbową pochyłona (kursywa). Należy wówczas ponownie sprawdzić ustawienie osi podłużnej śmigłowca na kursie magnetycznym, uaktywnić pole i zapamiętać wartość przez wciśnięcie przycisku TRYB PRACY. Na zakończenie należy sprawdzić wprowadzone dane podczas pracy systemu SWPL-1 w trybie NAWIGACJA podczas ponownego obracania śmigłowca na kole dewiacyjnym. Ustawiać śmigłowiec kolejno na kursach magnetycznych punktów kalibrowanych zgodnie ze wskazaniami wskaźnika kursu w kabinie i sprawdzić zgodność wskazań na wyświetlaczu nahałmowym ze wskazaniami wskaźnika kursu w kabinie.

5. PODSUMOWANIE

Opracowany w ITWL system komputerowej analizy dewiacji magnetycznej dla samolotów Su-22 bazuje na informacji otrzymywanej z kanału żyroskopowego (wzorca kursu stanowiącego kurs odniesienia) oraz z kanału magnetycznego (kurs obarczony dewiacją magnetyczną). Informacja ta może być podawana pośrednio (lub bezpośrednio w wersji rozwojowej) z układu IKW-8 do przenośnego komputera klasy PC, gdzie odbywa się proces obliczania wartości dewiacji magnetycznej

na poszczególnych kursach ustawienia samolotu, a dalej obliczane są składowe rozkładu widmowego i określane poprawki dla kompensacji dewiacji. Takie rozwiązanie pozwala na sprzęgnięcie komputera z informacją otrzymywaną z nadajnika ID-6 w celu dokładnego określania i usuwania błędu montażowego nadajnika oraz stałego błędu przyrządowego w kanale magnetycznym całego systemu. Z kolei sprzęgnięcie komputera z informacją otrzymywaną z kompensatora magnetycznego KM-2 pozwala na dokładne określanie zmiennych składowych dewiacji magnetycznej, a następnie usuwanie dewiacji półokrężnej i ćwierćokrężnej [4].

W technologii kalibracji systemu wyświetlania parametrów lotu SWPL-1 w zakresie przetwarzania kursu otrzymywanego z układu kursowego GMK-3AE powinny być zawarte informacje obejmujące m.in. zakresy przetwarzania danych, zakresy eksploatacyjne (obsługiwanie i użytkowanie na pokładzie) oraz parametry torów pomiarowych poszczególnych sygnałów i ich kalibracje. W czasie wykonywania prac dewiacyjnych na śmigłowcu, kalibrację kursu magnetycznego dla systemu SWPL-1 należy wykonywać bezpośrednio po kompensacji dewiacji układu GMK-3AE na kole dewiacyjnym. Podczas wykonywania kalibracji toru pomiarowego kursu magnetycznego systemu SWPL-1 szczególną uwagę należy zwracać na dokładne ustawianie osi podłużnej śmigłowca na wybranych kursach magnetycznych. Zaleca się, ze względu na oszczędności czasowe, wykonać kalibrację toru pomiarowego kursu magnetycznego jednocześnie dla zobrazowania 1 pilota i 2 pilota. Podana metodyka musi być wykonywana jednocześnie przez obsługę naziemną na stanowisku 1 pilota i 2 pilota.

Zastosowanie komputera w analizie widmowej przebiegów dewiacji magnetycznej systemu kursowego oraz określaniu współczynników dewiacji i poprawek, a także udział w samej jej kompensacji znajduje szczególne zastosowanie w odniesieniu do samolotów dużych, których obracanie i dokładne ustawianie na zadanym kierunku magnetycznym stwarza duże problemy organizacyjne i techniczne. Dzięki odpowiednim algorytmom obliczeniowym możliwa jest wstępna ocena skuteczności obliczonych poprawek zanim zostaną one wprowadzone do mechanizmu kompensatora magnetycznego, co zabezpiecza przed niepotrzebnym obracaniem samolotu i błędnym wykonaniem prac dewiacyjnych. Zaletą komputerowej analizy widmowej i aproksymacji dewiacji magnetycznej jest także możliwość wprowadzania "sztucznych" poprawek w celu usunięcia składowych dewiacji przekraczających możliwości regulacyjne kompensatora magnetycznego.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Darowski J., Klimaszewski S., Szymaniec R.: *Analiza niezawodności eksploatacyjnej i bezpieczeństwa lotów samolotów Su-22*, Warszawa, ITWL BT 12927/I 2000.
- [2] Drwał G., Grzymkowski R., Kapusta A., Słota D.: *Mathematica 3.0/2.2*, Gliwice, WPK JS 1998.
- [3] Instrukcja MON: *Bezwładnościowy układ kursu i pionu IKW-8. Opis techniczny*, Poznań, DWL Lot. 2728/88 1989.
- [4] Instrukcja MON: *Bezwładnościowy układ kursu i pionu IKW-8. Eksploatacja*, Poznań, DWL Lot. 2738/88 1989.
- [5] Instrukcja MON: *Samolot Su-22. Aparatura kontrolno-pomiarowa. Osprzęt*, Poznań, DWL Lot. 2783/89 1989.
- [6] Instrukcja MON: *Systemy kursowe GMK-1GE i GMK-1AE. Opis techniczny i obsługa*, Poznań, DWL Lot. 2251/83 1984.
- [7] Borowski J., Szporka Z.: *Sprawozdanie z pracy: System Wyświetlania Parametrów Lotu SWPL-1 dla śmigłowców Mi-17. Opis techniczny i Instrukcja Użytkowania*, Warszawa, BT ITWL 2011.