

Tadeusz JANIK

METODY ELIMINACJI ZAKŁÓCEŃ RADIOELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW STOSOWANYCH W URZĄDZENIACH FONICZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono problem zakłóceń radioelektrycznych silników prądu stałego, stosowanych w radiomagnetofonach. Dokonano analizy czynników będących źródłem zakłóceń, oraz określono sposoby ograniczenia poziomu zakłóceń do wartości dopuszczalnej.

METHODS OF ELIMINATING OF RADIO NOISE OF MOTORS APPLIED IN PHONIC DEVICES

Summary. The paper deals with the problem of radio noise in direct current motors applied in radio-magnetophones. The factors causing these interferences are analysed, and methods of restricting the level of disturbances to an admissible level are determined.

METHODEN FÜR DIE ELIMINATION DER RADIOELEKTRISCHEN STÖRUNGEN IN GLEICHSTROMMOTOREN, ANGEWANDT BEI PHONISCHEN ANLAGEN

Zusammenfassung. In diesem Artikel wurde das Problem der radioelektrischen Störungen in den Gleichstrommotoren dargestellt, welche die Anwendung in Radiotonbandgeräten haben. Es wurden die Quellen der Störungen analysiert und die methoden der Störungsbegrenzung zum zulässigen Wert bestimmt.

1. WSTĘP

Mikrosilniki prądu stałego stosowane w urządzeniach fonicznych są, jak wszystkie silniki komutatorowe, źródłem zakłóceń radioelektrycznych. Dążenie do zapewnienia niskiego poziomu zakłóceń jest szczególnie istotne w przypadku stosowania tych silników w niektórych typach radiomagnetofonów, w których na skutek bliskiego sąsiedztwa silnika i anteny ferrytowej odbiornika radiowego zakłócenia te są wyraźnie słyszalne w głośniku przy pracy odbiornika w zakresie fal długich i średnich.

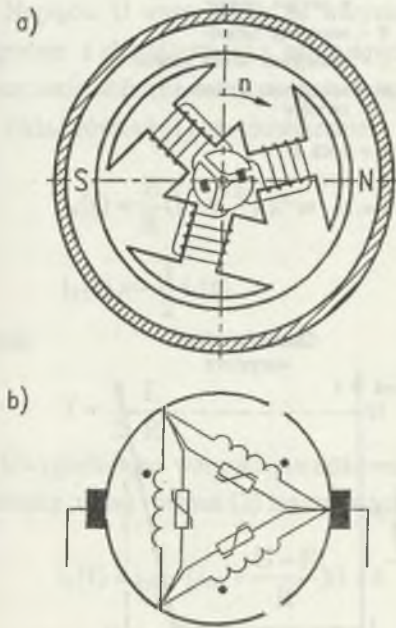
Zakłócenia radioelektryczne są emitowane ze źródła poprzez przewody zasilania w postaci prądów wysokiej częstotliwości oraz poprzez pole elektromagnetyczne. Zakłócenia emitowane poprzez przewody zasilania nie stwarzają problemów, gdyż można je skutecznie eliminować za pomocą filtrów LC. Zakłócenia emitowane w postaci fali elektromagnetycznej są na ogół wystarczająco tłumione dzięki metalowej obudowie silnika, stanowiącej ekran. Jednak w przypadku silników do radiomagnetofonów, gdzie dopuszczalny poziom zakłóceń jest szczególnie niski, tłumienie to może okazać się niewystarczające.

2. ANALIZA CZYNNIKÓW BĘDĄCYCH ŹRÓDŁEM ZAKŁÓCEŃ RADIOELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW W URZĄDZENIACH FONICZNYCH

Źródłem pola elektromagnetycznego, będącego przyczyną zakłóceń radioelektrycznych, jest prąd wysokiej częstotliwości. W przypadku silnika prądu stałego o pojawieniu się prądów wysokiej częstotliwości w uzwojeniu twornika decyduje proces komutacji. Przy przechodzeniu szczotki z jednej działki komutatora na następną zachodzi w zezwoju komutującym szybka zmiana kierunku prądu (występuje duża stromość prądu - di/dt). Jest to równoznaczne z pojawieniem się w widmie prądu wyższych harmonicznych, odpowiedzialnych za zakłócenia radioelektryczne. Prąd ten płynie przez uzwojenie silnika, stanowiące (z punktu widzenia zakłóceń radioelektrycznych) antenę nadawczą o własnościach kierunkowych. Jeżeli w pobliżu silnika znajduje się antena odbiorcza (np. antena ferrytowa odbiornika radiomagnetofonu), to indukuje się w niej napięcie wysokiej częstotliwości.

Mechanizm generowania prądów wysokiej częstotliwości w uzwojeniu silnika przeanalizowano ilościowo wykorzystując rozwiązanie konstrukcyjne silnika typu PRM-33-1,5, produkowanego w Z S E Małej Mocy EMA-SILMA w Sosnowcu.

Zjawisko generowania zakłóceń radioelektrycznych występuje również podczas pracy prądnicowej silnika przy biegu jałowym mimo zerowej wartości prądu w obwodzie zewnętrznym. Można to wyjaśnić, analizując szczegółowo zjawiska zachodzące w uzwojeniu silnika.



Rys. 1. Silnik PRM-33-1,5;
a) budowa, b) schemat uzwojenia

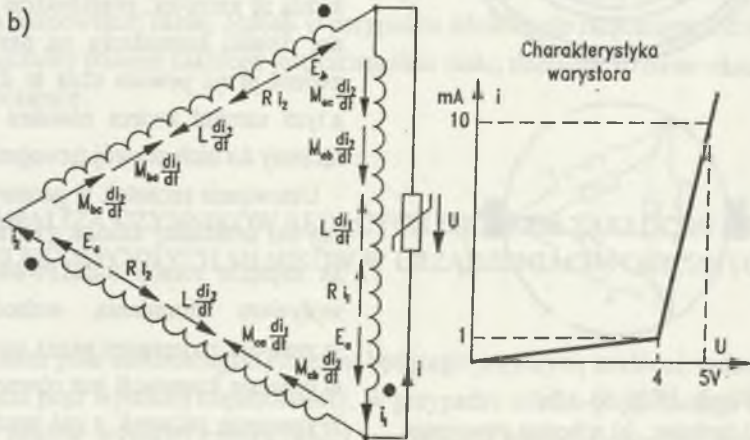
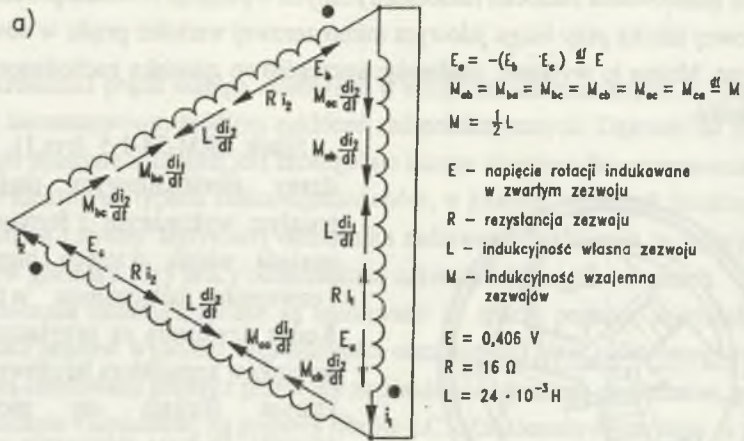
Fig.1. PRM-33-1.5 motor;
a) construction, b) winding diagram

Silnik PRM-33-1,5 (rys.1), wzbudzany pierścieniowym magnesem trwałym wykonanym z ferrytu baru, posiada wimik o trzech biegunach i uzwojeniu połączonym w trójkąt. Końce uzwojenia są przyłączone do wycinków komutatora tarczowego, po którym ślizgają się metalowe szczotki. Podczas wirowania wimnika każda ze szczotek, przechodząc z jednej działki komutatora na następną, zwiera przez pewien czas te działki, a tym samym zwiera również przyłączony do nich zewzów uzwojenia.

Ustawienie szczotek w geometrycznej osi neutralnej silnika gwarantuje, że napięcie rotacji indukowane pod wpływem strumienia wzbudzenia w zewzwoju zwierzanym przez szczotkę w procesie komutacji jest równe zero. Wysunięcie szczotek z osi neutralnej (w silnikach PRM-33-1,5 - o 15° przeciwnie do kierunku wirowania wimnika) powoduje, że w komutującym zewzwoju indukuje się napięcie, pod wpływem którego płynie prąd gwałtownie przerywany w chwili, gdy szczotka przestaje zwierać sąsiednie działki komutatora.

Zbocznikowanie zewzwojów warystorami wydłuża czas zaniku prądu, ograniczając jednocześnie przepięcia.

Korzystając z przedstawionego na rys.2 schematu zastępczego uzwojenia silnika w stanie zwarcia jednego z zewzwojów przez szczotkę oraz po ustąpieniu zwarcia, można wyznaczyć przebieg czasowy prądu zwarcia zewzwoju.



Rys.2. Schemat zastępczy uzwojenia silnika;
 a) w stanie zwarcia zezwoju, b) po ustąpieniu zwarcia
 Fig.2. Substitute diagram of of the motor winding;
 a) at the short-circuit of the coil, b) after its abatement

W stanie zwarcia (rys.2.a) obowiązuje układ równań :

$$E_a = R i_1(t) + L \frac{di_1}{dt} - (M_{ab} + M_{ac}) \frac{di_2}{dt} ,$$

$$E_b + E_c = 2R i_2(t) + L \frac{di_2}{dt} + (M_{ba} + M_{ca}) \frac{di_1}{dt} - (M_{bc} + M_{cb}) \frac{di_1}{dt} .$$

(1)

Przebieg prądu w zezwojach po ustąpieniu zwarcia opisuje układ równań:

$$E_a - Ri_1(t) - L \frac{di_1}{dt} + (M_{ab} + M_{ac}) \frac{di_2}{dt} = U, \quad (2)$$

$$-(E_b + E_c) + 2Ri_2(t) + 2L \frac{di_2}{dt} - (M_{ba} + M_{ca}) \frac{di_1}{dt} - (M_{bc} + M_{cb}) \frac{di_2}{dt} = U.$$

Napięcie U występujące na warystorze zależy od prądu, który przez niego płynie (zgodnie z charakterystyką napięciowo-prądową przedstawioną na rys.2.b). Dla uproszczenia obliczeń przyjęto, że jest ono stałe i wynosi 4,5 V.

Układ równań (1) ma rozwiązanie

$$i_1(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (3)$$

$$i_2(t) = -\frac{1}{2} i_1(t),$$

gdzie:

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{L}{R}.$$

Uwzględniając warunki początkowe dla chwili ustąpienia zwarcia zezwoju przez szczotkę, układ równań (2) ma rozwiązanie:

$$i_1(t) = i_{10} - (i_{10} + \frac{U - E}{R}) (1 - e^{-\frac{t - \Delta t_1}{T}}), \quad (4)$$

$$i_2(t) = -\frac{1}{2} i_1(t),$$

gdzie:

Δt_1 - czas zwarcia zezwoju przez szczotkę,

$$i_{10} = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T}}).$$

Efekt magnetyczny prądów $i_1(t)$ oraz $i_2(t)$ jest taki sam, jak pewnego prądu zastępczego $i_z(t)$ płynącego przez zwarty zezwój. Prąd ten w rozpatrywanym przypadku wyraża się zależnością:

$$i_z(t) = \frac{3}{2} i_1(t). \quad (5)$$

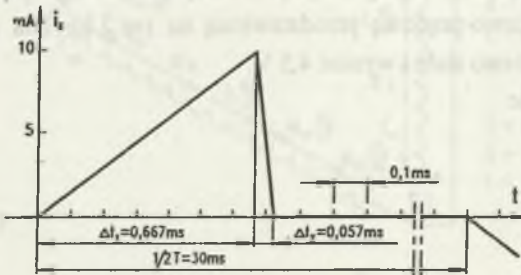
Uwzględniając parametry konstrukcyjne silnika oraz stan pracy (bieg jałowy przy pracy prądnicowej i $n = 1000$ obr/min), otrzymuje się dane liczbowe występujące

w rozwiązaniach równań:

$$E = 0,406 \text{ V}, \quad U = 4,5 \text{ V}, \quad R = 16 \Omega,$$

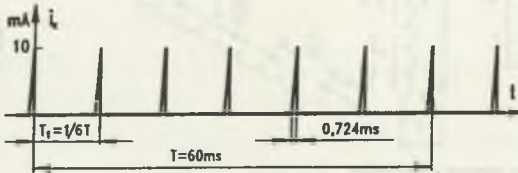
$$L = 24 \text{ mH}, \quad T = 2,25 \text{ ms}, \quad \Delta t_1 = 0,667 \text{ ms},$$

które po podstawieniu do wyrażeń (3) + (5) dają rozwiązanie przedstawione graficznie na rys.3.



Rys.3. Przebieg czasowy zastępczego prądu zwarcia zezwoju.

Fig.3. Flowsheet of the substitute current of the coil short-circuit.



Rys.4. Przebieg czasowy zastępczego prądu zwarcia uzwojenia

Fig.4. Time plot of substitute short-circuit current of the winding

Omawiane zjawisko występuje we wszystkich zezwojach 6 razy w czasie jednego obrotu wirnika. Skutek magnetyczny jest taki sam jak w przypadku, gdyby przez jeden nieruchomy zezwój płynął prąd o przebiegu przedstawionym na rys.4.

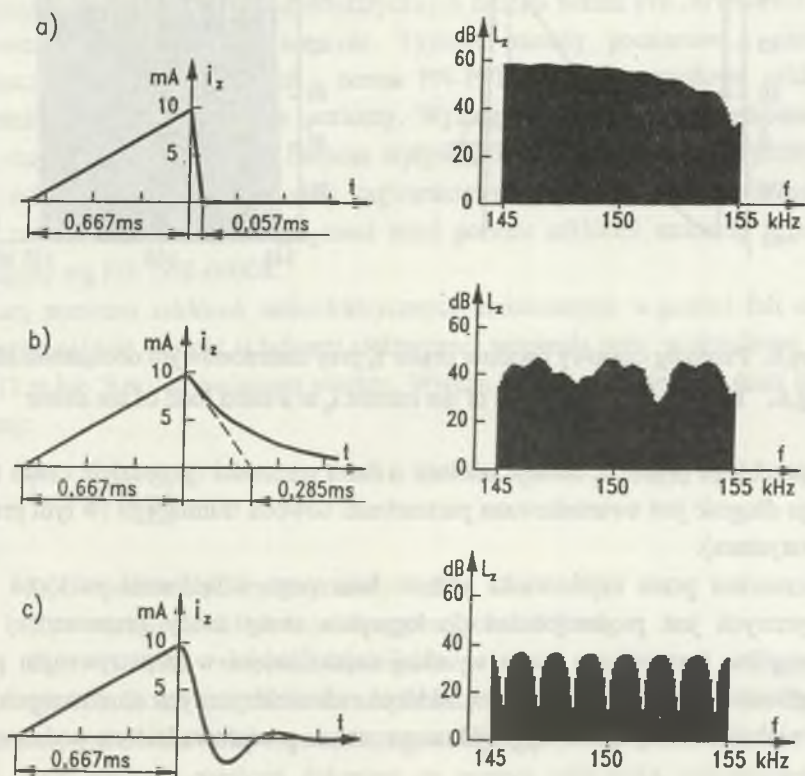
Duża stromość opadania prądu i_z po ustąpieniu zwarcia zezwoju powoduje, że można w tym prądzie wyróżnić harmoniczne o częstotliwościach mieszczących się w pasmie fal długich i wystarczająco dużej amplitudzie, aby mogły być przyczyną zakłóceń radioelektrycznych.

Badając wpływ obwodu tłumiącego przepięcia w zezwojach na poziom zakłóceń radioelektrycznych wyznaczono przebiegi czasowe prądu zastępczego i_z oraz dokonano analizy harmonic-

nych w pasmie częstotliwości $(150 \pm 5) \text{ kHz}$, przy zbocznikowaniu każdego z zezwojów:

- warystorem o napięciu charakterystycznym $U = 4,5 \text{ V}$,
- rezystorem o wartości rezystancji $R_b = 82 \Omega$,
- dwójnikiem RC o parametrach: $R = 510 \Omega$, $C = 150 \text{ nF}$.

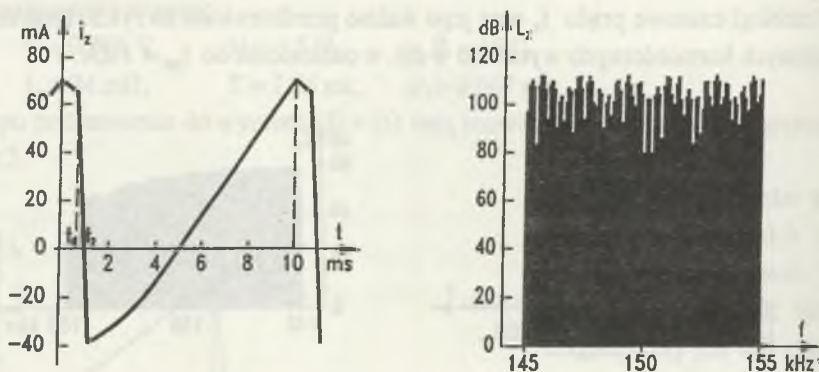
Przebiegi czasowe prądu i_z oraz jego widmo przedstawiono na rys.5. Poziom poszczególne harmoniczne wyrażono w dB, w odniesieniu do $i_{z0} = 1 \text{ nA}$.



Rys.5. Wpływ obwodu tłumiącego na przebieg czasowy i widmo prądu i_z ;
a) tłumik warystorowy, b) tłumik rezystorowy, c) tłumik RC

Fig.5. Influence of the attenuating circuit upon time-response and spectrum of the current i_z ;
a) varistor suppressor, b) resistor suppressor, c) RC suppressor

Podczas pracy silnika pod obciążeniem w jego uzwojeniu płynie prąd. W procesie komutacji występuje szybka zmiana kierunku prądu w zewojach. Dla określenia wpływu obciążenia na poziom zakłóceń radioelektrycznych emitowanych przez silnik wyznaczono przebieg prądu i_z przy znamionowym obciążeniu silnika ($I_N = 140 \text{ mA}$) i prędkości obrotowej wirnika $n = 1000 \text{ obr/min}$. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Przebieg czasowy i widmo prądu i_z przy znamionowym obciążeniu silnika.

Fig.6. Time-plot and spectrum of the current i_z at a rated load of the motor

W przebiegu prądu i_z istnieje odcinek o dużej stromości (przedziale czasu $t_1 - t_2$), którego długość jest uwarunkowana parametrami obwodu tłumiącego (w tym przypadku - warystora).

Odczuwana przez użytkownika sprzętu fonicznego uciążliwość zakłóceń radioelektrycznych jest proporcjonalna do logarytmu sumy mocy przenoszonej przez poszczególne harmoniczne prądu wysokiej częstotliwości w rozpatrywanym pasmie częstotliwości. Porównanie poziomu zakłóceń radioelektrycznych emitowanych przez silnik w stanie obciążenia i biegu jałowego można przeprowadzić na podstawie zależności:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{\sum_k I_{kN}^2}{\sum_k I_{k0}^2}, \quad (6)$$

gdzie:

I_{kN} - wartość skuteczna k-tej harmonicznej prądu i_z przy znamionowym obciążeniu silnika,

I_{k0} - wartość skuteczna k-tej harmonicznej prądu i_z przy biegu jałowym.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przy obciążeniu znamionowym poziom zakłóceń silnika rośnie o około 64 dB w stosunku do poziomu zakłóceń przy prądnicowym biegu jałowym.

3. METODA I WYNIKI BADANIA ZAKŁÓCEŃ RADIOELEKTRYCZNYCH

Metody pomiaru zakłóceń radioelektrycznych określa norma PN-78/T-04502 (Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Typowe metody pomiarowe), natomiast dopuszczalne poziomy zakłóceń - norma PN-79/E-06008 (Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Dopuszczalne poziomy. Wymagania i badania). Wymagania tych norm stosuje się w przypadku badania wpływu różnych urządzeń elektrycznych na pracę odbiorników radiowych. Aby zagwarantować poprawną pracę radiomagnetofonu, zamontowany w nim silnik musi mieć poziom zakłóceń znacznie niższy niż wymagany wg PN-79/E-06008.

Miarą poziomu zakłóceń radioelektrycznych emitowanych w postaci fali elektromagnetycznej jest wartość składowej elektrycznej natężenia pola w określonej odległości (1 m lub 3 m) od badanego obiektu. Wyraża się go najczęściej w skali logarytmicznej:

$$L_z = 20 \lg \frac{E_z}{E_0}, \quad (7)$$

gdzie:

- L_z - poziom zakłóceń wyrażony w dB,
- E_z - natężenie składowej elektrycznej pola zakłóceń,
- $E_0 = 1 \mu\text{V/m}$ - natężenie odniesienia.

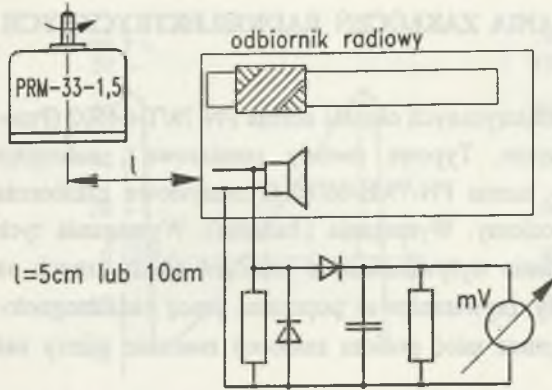
Z uwagi na znikomo małe wartości natężenia pola zakłóceń silników fonicznych nie można stosować do ich badań typowych przyrządów (np. miernika LMZ-4). W związku z tym oceny poziomu zakłóceń dokonano za pomocą odbiornika radiowego (wypożyczonego w antenę ferrytową), dostrojonego do częstotliwości 150 kHz (rys.7), podczas pracy prądnicowej badanego silnika (przy biegu jałowym lub w stanie zwarcia).

Pomiary przeprowadzono wokół silnika, w płaszczyźnie prostopadłej do jego osi. Odległość pomiarowa wynosiła 5 cm lub 10 cm. Przyjęto, że miarą poziomu zakłóceń jest wartość średnia wyprostowana napięcia wyjściowego wzmacniacza małej częstotliwości, wyrażona w dB

$$L_z = 20 \lg \frac{U_z}{U_0}, \quad (8)$$

gdzie:

- L_z - poziom zakłóceń,
- U_z - zmierzone napięcie zakłóceń,
- $U_0 = 1 \text{ mV}$ - napięcie odniesienia.



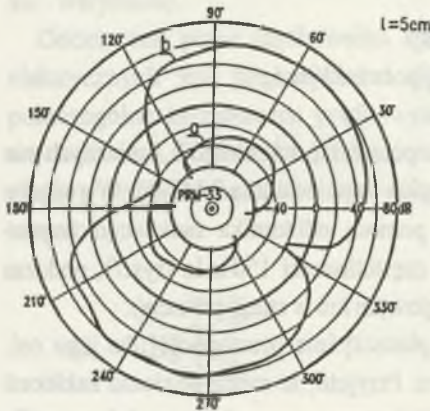
Rys.7. Schemat układu pomiarowego.

Fig.7. Diagram of a measuring system

Wartość dopuszczalną tak zdefiniowanego poziomu zakłóceń ustalono uwzględniając wymagania odbiorcy badanych silników fonicznych. W oparciu o badania partii 30 szt. silników, z których 50% zostało uznanych za "złe", a 50% za "dobre" ustalono, że przy przyjętym sposobie pomiaru dopuszczalny poziom zakłóceń (podczas pracy prądnicowej przy biegu jałowym) wynosi $L_z = 0$ dB.

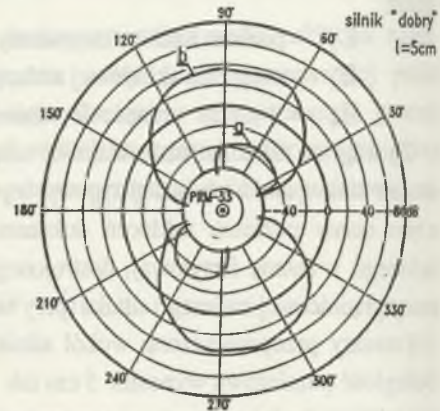
Przykładowe charakterystyki

kątowe poziomu zakłóceń radioelektrycznych dwóch silników ilustruje rys.8.



Rys.8. Porównanie poziomów zakłóceń silnika;
a) o dopuszczalnym poziomie,
b) o wysokim poziomie

Fig.8. Comparison of the levels of interference of the motor;
a) admissible level,
b) high level



Rys.9. Poziom zakłóceń silnika;
a) podczas biegu jałowego,
b) przy obciążeniu znamionowym

Fig.9. Level of interference of the motor,
a) in the course of idle running,
b) at rated load.

W toku badań sprawdzono wpływ:

- stanu pracy silnika (bieg jałowy i stan obciążenia),
- rodzaju obwodu tłumiącego przepięcia (warystory, dwójniki RC)

na poziom zakłóceń radioelektrycznych.



Rys.10. Wpływ obwodu tłumiącego na poziom zakłóceń;
 a) tłumik warystorowy,
 b) tłumik RC

Fig.10. Influence of the attenuating circuit upon the level of interference;
 a) varistor suppressor,
 b) RC suppressor

Rys.11. Wpływ kontaktu elektrycznego między obudową, a tarczą łożyskową na poziom zakłóceń;
 a) wykonanie fabryczne,
 b) po oczyszczeniu styku obudowa-tarcza,
 c) po zmniejszeniu luzu między obudową i tarczą łożyskową

Fig.11. Influence of the electric contact between the casing and the bearing plate upon the level of interference;
 a) made in the factory,
 b) after cleaning of the contact between the casing and the plate,
 c) after a reduction of the clearance between the casing and the bearing plate

Porównanie poziomu zakłóceń silnika pracującego przy biegu jałowym i obciążeniu znamionowym ilustruje rys.9. Przy obciążeniu silnika prądem $I_N = 140$ mA stwierdzono wzrost poziomu zakłóceń o $\Delta L = 65$ dB. Wartość ta jest zgodna z wynikami rozważań

teoretycznych, przedstawionych w punkcie 2. Na tej podstawie można przyjąć, że warunek

$$L_{z \text{ dop } 0} = 0 \text{ dB} \quad - \text{ przy biegu jałowym,}$$

jest równoważny warunkowi

$$L_{z \text{ dop } N} = 65 \text{ dB} \quad - \text{ przy obciążeniu znamionowym.}$$

W celu określenia wpływu obwodu tłumiącego przełączenia komutacyjne na poziom zakłóceń radioelektrycznych przeprowadzono badania porównawcze, zastępując wirniki z warystorami wirnikami wyposażonymi w tłumiki RC. Wyniki badań ilustruje rys.10. Obniżenie poziomu zakłóceń wynosi około 80 dB.

W toku badań stwierdzono, że ograniczenie poziomu zakłóceń za pomocą dwójników RC może być niewystarczające. Należy zatem zwrócić uwagę na odpowiednie ekranowanie silnika, "zamykające" pole zakłóceń wewnątrz jego obudowy. O właściwym ekranowaniu decyduje dobry kontakt elektryczny obudowy silnika z tarczą łożyskową (na całej długości jej obwodu). Znaczenie jakości tego kontaktu ilustruje rys.11. Przedstawione na nim pomiary dotyczą silnika, który został wstępnie zakwalifikowany do grupy "złych". Usunięcie nalotów tlenkowych ze stykających się z sobą powierzchni tarczy łożyskowej i obudowy obniżyło poziom zakłóceń o 50 dB. Po owinięciu tarczy łożyskowej folią aluminiową (co spowodowało, że pasowanie między tarczą łożyskową i obudową stało się ciaśniejsze) nastąpił dalszy spadek poziomu zakłóceń o 30 dB. Ostatecznie uzyskano obniżenie poziomu zakłóceń do wartości znacznie niższej od dopuszczalnej.

2. PODSUMOWANIE

Silnikom stosowanym w urządzeniach fonicznych (w szczególności w radiomagnetofonach) stawia się bardzo wysokie wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu zakłóceń radioelektrycznych. Proces ich generowania jest związany z występowaniem dużej stromości prądu w komutujących zezwojach uzwojenia. Zmniejszenie wpływu emi-towanego przez silnik pola zakłóceń można osiągnąć przez:

- takie usytuowanie silnika w obudowie urządzenia, aby oś anteny radioodbiornika była prostopadła do kierunku maksymalnego promieniowania pola zakłóceń przez silnik,
- obniżenie amplitudy wyższych harmonicznych prądu płynącego przez uzwojenie silnika (właściwy dobór elementów tłumiących przełączenia),

– skuteczne ekranowanie uzwojeń (zamknięcie ich w metalowej obudowie silnika, umożliwiającej przepływ prądów wirowych wysokiej częstotliwości, generowanych przez pole zakłóceń).

Jednoczesne zastosowanie przestawionych powyżej sposobów eliminacji zakłóceń radioelektrycznych pozwala obniżyć ich poziom do wartości niemierzalnych.

LITERATURA

- [1] Cioska A., Janik T.: Analiza przyczyn powstawania nadmiernych zakłóceń radioelektrycznych wytwarzanych przez silniki typu PRM-33-1,5 oraz opracowanie zaleceń w celu ich usunięcia. Opracowanie nr 12/214/87 Instytutu Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej. (praca nie publikowana)
- [2] Sochocki R., Życki. Z.: Maszyny elektryczne małej mocy. WNT Warszawa 1978
- [3] PN-78/T-04502 - Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Typowe metody pomiarowe.
- [4] PN-79/E-06008 - Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Dopuszczalne poziomy. Wymagania i badania.

Recenzent: Dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994 r.

Abstract

Small-power DC motors used in phonic devices (record-players, tape-recorders) are sources of radio noise. The problem of eliminating this phenomenon is particularly essential in the case of some types of tape-recorders, in which - due to the close neighbourhood of a motor and ferrite aerial of a radio set - interferences are distinctly noticeable in a loudspeaker when a radio set is operating within the range of long and medium waves.

In the paper a quantitative analysis of the generation of radio noises by a motor has been carried out, taking into account the structure of the motor, of PRM-33-1.5 type (Fig. 1). The spectrum of high-frequency current (in band of $150 \text{ kHz} \pm 5 \text{ kHz}$ - Fig.5) generated by the motor in the course of commutation has been determined. Additionally the influence of elements which suppress overvoltage caused by commutation (varistors, resistors, RC elements) upon the spectrum of the current generating radio noise is presented.

The intensity level of interference field required for the correct operation of radiomagnetophone is much lower than that permitted by Polish Standards and cannot be measured by means of typical devices measuring the intensity of the field of interferences. Therefore, in this paper a different way of evaluating the level of interference has been suggested (Fig. 7) in order to determine its admissible value and to investigate various ways of their reduction measurements as have been taken. Results of these measurements are gathered in Figs. 8-11, showing the distribution of the level of interference around the motor.

Basing on these investigations it has been found that the level of interference can be reduced to non-measurable values by:

- placing the motor in the device in such a way that the axis of the radio aerial would run perpendicularly to the direction of maximum radiation of the field of interference of the motor,
- reduction of higher harmonic amplitudes of the current flowing through the winding of the motor, which can be achieved by a proper choice of elements suppressing overvoltages,
- effective screening of the windings (placing in a closed metal casing of the motor, securing however a good electric contact between the body and bearing plate).