

Andrzej CZAPLA

PROBLEMY ZAPISU SYGNAŁÓW BIOLOGICZNYCH NA TAŚMĘ MAGNETYCZNĄ

Streszczenie. Opracowanie omawia możliwości zastosowania różnych metod rejestracji magnetycznej sygnałów biologicznych, wykorzystującej standardowe magnetofony dla potrzeb elektrofizjologii. Omówiono pojemność informacji dla poszczególnych metod rejestracji. Zwrócono uwagę na niedostatki bezpośredniego zapisu sygnałów biologicznych. Z metod przeciwdziałania tym niedostatkom szerzej omówiono metody modulacyjne, w szczególności wykazano pewne zalety modulacji FM. Omówiono wpływ nierównomierności przesuwu taśmy na dokładność zapisu sygnału zmodulowanego częstotliwościowo.

Nowoczesna elektrofizjologia, zarówno kliniczna jak i eksperymentalna, wprowadza do badania biopotencjałów różnego rodzaju metody matematycznej analizy statystycznej. Do najbardziej perspektywicznych należą metody wykorzystujące analizę widmową i korelacyjną.

W metodach tych koniecznością jest:

1. Wykonywanie skomplikowanych, czasochłonnych i wielokrotnie powtarzających się obliczeń najczęściej przy użyciu maszyn matematycznych lub odpowiednio zaadaptowanych systemów cyfrowych.
2. Przetwarzanie informacji biologicznej do postaci zrozumiałej maszynie matematycznej.
3. Gromadzenie (rejestrowanie) informacji biologicznej w blokach pamięci o dużej pojemności.

Tradycyjne formy rejestracji sygnałów biologicznych okazały się tu nie przydatne, chociażby ze względu na trudność przetwarzania sygnału zapisanego na papierze w sygnał elektryczny.

Najbardziej przydatna okazała się natomiast rejestracja na taśmie magnetycznej. Posiada ona szereg cennych zalet.

Do najważniejszych z nich należą:

1. Wysoka jakość zapisu odnośnie pasma częstotliwości, zniekształceń nieliniowych i poziomu szumów.
2. Długi czas ciągłego zapisu przy małym koszcie urządzenia i względnie małych rozmiarach.
3. Możliwość przechowywania zapisów na czas nieograniczony.
4. Nośnik po skasowaniu można wielokrotnie użyć do następnych zapisów.

5. Wielokrotne odtwarzanie nie powoduje pogorszenia jakości zapisu, ilość odtworzeń jest ograniczona tylko trwałością mechaniczną nośnika.
6. Łatwe przetwarzanie sygnału zapisanego w sygnał elektryczny.
7. Łatwość obróbki danych (redukcji, kompresji) np. przez przyspieszone odtwarzanie.

Bezpośredni zapis sygnałów biologicznych okazuje się mało przydatnym. Charakterystyka przenoszenia standardowego magnetofonu ($40 \div 12000$ /Hz) jest dla tych sygnałów charakterystyką filtra górnoprzepustowego, dolna granica częstotliwości sygnału biologicznego dochodzi bowiem do 0,1 Hz. Odtwarzanie sygnału z częstotliwością już poniżej 40 Hz jest niemożliwe, ponieważ wraz ze zmniejszeniem częstotliwości sygnału zapisywanego, napięcie wyjściowe głośnicy odtwarzającej spada i w zakresie infraniskich częstotliwości staje się porównywalne z szumami własnymi układu. Zjawiska te związane z fizyką samego procesu, zapis - odtwarzanie, nie będą tu rozpatrywane.

Współczesna technika rejestracji magnetycznej zna 3 sposoby przeciwdziałania temu niedostatkowi:

1. Transformacja zapisanego pasma częstotliwości.
Polega ona na tym, że zwiększając n razy prędkość przesuwu taśmy przy odtwarzaniu, zwiększamy n razy częstotliwość sygnału odtwarzanego f' w stosunku do nagrywanego f a z tym poziomem sygnału wyjściowego. Transformacja pasma wyrażona jest w tym przypadku równaniem:

$$f'_D \div f'_G = n(f_D \div f_G),$$

gdzie:

$f_D \div f_G$ - pasmo rejestrowanego sygnału.

Niedostatkami tej metody jest: konieczność przerabiania mechanizmu przesuwu taśmy, ograniczenia na wysokich częstotliwościach charakterystyki przenoszenia magnetofonu, niemożliwość odtworzenia składowej stałej, trudności w dalszej analizie sygnału.

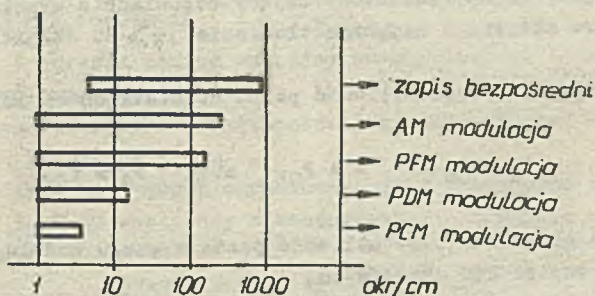
2. Zastosowanie specjalnych głośnic odtwarzających reagujących nie na zmiany strumienia magnetycznego w czasie a na jego wielkość. Problemowi temu poświęcona jest literatura (5). Konstrukcja takich głośnic z reguły jest znacznie bardziej skomplikowana od konstrukcji głośnic standardowych a ich zastosowanie wymaga uzupełnienia układu mechanicznego i elektrycznego magnetofonu dodatkowymi blokami.
3. Grupa metod najbardziej rozpowszechnionych w rejestracji sygnałów niskich i infraniskich częstotliwości - metody modulacyjne.

Najważniejsze typy modulacji to: modulacja amplitudowa (AM), modulacja częstotliwościowa (FM), częstotliwości impulsów (PFM), szerokości impulsów (PDM) i modulacja kodowa (PCM).

Przy wyborze typu modulacji, który chcemy zastosować do rejestracji informacji biologicznej, decydującymi są następujące kryteria:

1. Dynamika amplitudy sygnału biologicznego i zakres jej częstotliwości.
2. Dokładność odtwarzania (odporność na zakłócenia w procesie zapis-odtworzenie).
3. Prostota realizacji danego typu modulacji.
4. Ilość jednoczesnych odprowadzeń informacji od obiektu biologicznego.

Na rys. 1 przedstawione są pojemności zapisu różnych metod rejestracji - będące odzwierciedleniem informatywności tych metod.



Rys. 1

Rozpatrzmy po krótku poszczególne metody zapisu.

Bezpośredni indukcyjny zapis podlega największym zniekształceniom w procesie rejestracji magnetycznej, za to posiada największą pojemność informacji.

Jeśli długość zapisanej na taśmie magnetofonu fali

$$\lambda = \frac{U_z}{f},$$

gdzie:

U_z - prędkość przesuwu nośnika,

f - częstotliwość prądu zapisywanego sygnału,

to dla $U_z = 9,53$, $f = 10\ 000$ Hz pojemność zapisu L_0

$$L_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{10\ 000}{9,53} \approx 1000 \text{ okr/cm}$$

W przypadku AM modulacji, pasmo częstotliwości zmodulowanego sygnału zawarte jest

$$\text{od } f_D = f_0 - F_G \text{ do } f_G = f_0 + F_G$$

gdzie:

f_0 - częstotliwość nośna,

F_G - górna wartość graniczna częstotliwości sygnału modulującego.

Dla obliczenia możliwej pojemności zapisu, w tym przypadku przyjmujemy:

$$f_D = f_0 - F_G = 2F_G$$

W tym przypadku F_G jest o 1 oktawę niższa od częstotliwości f_D .

Filtracja f_D w procesie demulacji będzie możliwa, jeśli zastosowany będzie tu filtr dolnoprzepustowy dający odpowiednio wysokie tłumienie. Wykonanie filtra aktywnego dającego tłumienie $\tau > 40$ dB/oktawę jest zupełnie realne.

W ten sposób najwyższa częstotliwość pasma częstotliwości nośnej

$$f_G = f_0 + F_G = 4 F_G, \quad \text{stąd} \quad F_G = f_G/4$$

Wynika stąd, że graniczna częstotliwość pasma sygnału modulującego odpowiada gęstości zapisu 250 okresów/cm.

Mimo, że AM modulacja jest stosunkowo prosta w realizacji i dostatecznie informatywna, to w technice rejestracji magnetycznej ma ograniczoną możliwość zastosowania. Wpływają na to następujące fakty: amplituda odtwarzanych sygnałów zmienia się na skutek niejednorodnego pokrycia taśmy materiałem ferromagnetycznym, niejednakowej czułości taśmy, niedokładności pracy mechanizmów przesuwu taśmy, co w sumie jest źródłem dużego błędu (rzędu 10^{-1}).

Modulacja szerokości impulsu i kodowa modulacja odznaczają się największą odpornością na wszelkiego rodzaju zakłócenia mające miejsce w procesie zapis- odtwarzanie. Metody te są szeroko stosowane w telemetrii np. do wielokanałowego przesyłania informacji. Podobną rolę mogą spełnić w elektrofizjologii stosujące wielokanałowe odprowadzenia sygnałów bioelektrycznych od obiektów żywych (np. wielokanałowa EEG) i dają możliwość komutacyjnego zapisu tych sygnałów na jednej ścieżce magnetofonu.

W jednokanałowej elektrofizjologii nie są to metody najbardziej optymalne, Oznaczają się bowiem najmniejszą informatywnością, a do ich realizacji potrzebne są skomplikowane układy elektroniczne.

Modulacja częstotliwościowo-impulsowa stosowana jest najczęściej do zapisu na taśmie magnetyczną sygnałów niskiej i infraniskiej częstotliwości. Najefektywniejsza jest w układach jednokanałowych. Ważną jej zaletą jest

prostota i łatwość dokonania przetwarzania częstotliwość impulsów - sygnał, co ważne jest w metodach analogowych badania sygnałów biologicznych, oraz łatwość dokonania przetwarzania częstotliwość impulsów - kod, co ważne jest w badaniach sygnałów biologicznych z wykorzystaniem techniki cyfrowej.

Zasada modulacji częstotliwościowej w ogólnych zarysach polega na modulowaniu częstotliwości nośnej f_0 sygnałem modulującym (użytecznym) o paśmie częstotliwości $F_D - F_G$. Pasma częstotliwości sygnału modulowanego ($f_0 - f_G$) uzyskuje się tu znacznie szersze niż w przypadku AM modulacji, szczególnie przy dużych indeksach modulacji.

Niezbędna szerokość pasma zmodulowanego w ogólnym przypadku może być przedstawiona równaniem:

$$2 \Delta f_0 = 2K f_0 + h \cdot 2F_G; \quad K f_0 = F_G \cdot m,$$

gdzie:

$$K - \text{dewiacja częstotliwości nośnej} \\ m = \frac{K \cdot f_0}{F_G} - \text{współczynnik modulacji}$$

Współczynnik h - określa poziom względny częstotliwości bocznych, które ograniczają pasmo przenoszone.

Zwykle w układach telemetrii jednokanałowej wykorzystującej modulację częstotliwością h przyjmuje się $= 1$.

W tym przypadku szerokość pasma ograniczona jest składowymi bocznymi, których amplituda $A_h \approx 5\%$ amplitudy niemodulowanej częstotliwości nośnej.

$$(\text{przy } h = 0, \quad A_h \approx 20\%)$$

Jak już było powiedziane - dla pewnego odfiltrowania w procesie demodulacji sygnału użytecznego od częstotliwości nośnej musi być wypełniony warunek:

$$f_D = f_0 - \Delta f_0 \geq 2 F_G$$

Rozwiązując układ III równań

$$f_D = 2 F_G = f_0 - 2 \Delta f_0$$

$$2 \Delta f_0 = 2 K f_0 + 2 F_G$$

$$f_0 = f_D + \Delta f_0 = 2 F_G + K f_0 + F_G = K f_0 + 3 F_G$$

Otrzymamy:

$$f_G = \frac{f_G}{2} \frac{1-K}{2+K}$$

$$f_o = \frac{f_G}{2} \frac{3}{2+K}$$

Jak będzie jeszcze pokazane w układach modulacji częstotliwościowej dewiacja częstotliwości nośnej może być rzędu + 40% i więcej.

Jeśli obliczyć pojemność zapisu magnetycznego modulacji częstotliwościowej wg wyprowadzonych równań i dla dewiacji 40% to otrzymamy pojemność zapisu $L_c = 125$ okr/cm, tzn. dwa razy mniej niż dla AM-modulacji.

Zmniejszenie informatywności modulacji częstotliwościowej wykorzystanej w rejestracji magnetycznej kompensowana jest jej większą odpornością na różnego rodzaju zakłócenia. Głównym źródłem zniekształceń sygnału jest tu okresowa zmiana prędkości nośnika, występująca zarówno przy zapisie jak i przy odtwarzaniu a wywołana niesprawnościami mechanizmu przesuwu taśmy. Defekt ten nazywa się nierównomiernością przesuwu taśmy lub detonacją:

$$\rho = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\text{nom.}}}$$

gdzie:

ΔU_{\max} - maksymalne odchyłki prędkości zapisu,

$U_{\text{nom.}}$ - nominalna prędkość zapisu.

Ponieważ pasmo detonacji leży w obszarze niskich częstotliwości, jest to jedna z głównych przyczyn ograniczających zakres dynamiczny zapisu sygnału metodą modulacji częstotliwości impulsów.

Nierównomierność przesuwu taśmy magnetofonu spowoduje, że sygnał częstotliwości nośnej zapisany na taśmę będzie zmodulowany dwoma sygnałami - nieunikniona nierównomiernością przesuwu i modulującym sygnałem użytkowym. W najprostszym przypadku można założyć, że oba te sygnały modulujące mają przebiegi sinusoidalne.

Sygnał odtworzony U_{OD} można zapisać w następującej formie:

$$U_{\text{OD}} = U_o \cos(\omega_o t + \phi_m \sin \Omega_m t + \phi_N \sin \Omega_N t); \quad (1)$$

gdzie:

ω_o i U_o - częstotliwość i amplituda częstotliwości nośnej,

Ω_m - częstotliwość modulującego użytecznego sygnału,

Ω_N - częstotliwość nierównomierności przesuwu taśmy,

$\phi_m = \frac{\Delta \omega_o}{\Omega_m}$ - współczynnik modulacji od użytecznego sygnału,

$\phi_N = \frac{\Delta \omega_b}{\Omega_N}$ - współczynnik modulacji od nierównomierności przesuwu taśmy.

Po przekształceniach i uproszczeniach wyrażenie (1) można zapisać w formie

$$U_{\text{QD}} = U_0 \cos \omega_0 t + \frac{U_0 \phi_m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega_m)t - \frac{U_0 \phi_m}{2} \cdot \\ \cdot \cos(\omega_0 - \Omega_m)t + \frac{U_0 \phi_N}{2} \cos(\omega_0 + \Omega_N)t - \\ - \frac{U_0 \phi_N}{2} \cos(\omega_0 - \Omega_N)t.$$

Wynika stąd, że widmo sygnału odtworzonego zawiera składowe pochodne od pasożytniczej nierównomierności przesuwu taśmy (człony 4 i 5). Składowe te w ogólnym przypadku zawierają częstotliwości:

$$(\omega_0 \pm n \Omega_m); (\omega_0 \pm \Omega_N); (\omega_0 \pm \Omega_M \pm n \Omega_N) \text{ itd.}$$

Wielkość użytecznego sygnału odtworzonego jest proporcjonalna do dewiacji częstotliwości K a wielkość pasożytniczego odtworzonego sygnału do współczynnika nierównomierności przesuwu

$$\rho = \frac{\Delta U_{\text{max}}}{U_{\text{Nomin.}}}$$

Jeśli zakres dynamiczny układu do zapisu na taśmę magnetyczną sygnału zmodulowanego metodą modulacji częstotliwościowej określamy jako stosunek użytecznego sygnału wyjściowego do wielkości składowej pasożytniczej, to jego wielkość D można określić w następujący sposób:

$$D = 20 \lg \frac{K}{\rho}$$

Z ostatniego wyrażenia wynika, że przy ogólnie spotykanym współczynniku nierównomierności przesuwu taśmy wahającym się od 0,1 - 0,5% celem uzyskania zakresu dynamicznego większego od 40 dB, dewiacja K musi być wysoka (do 50%).

LITERATURA

- [1] Urbański B.: Magnetyczny zapis dźwięków i obrazów 1971 r.
- [2] Electronic Engineering 1968 r. nr 481, s. 145-149.
- [3] Шадрин В.И.: Магнитная запись в автоматике 1962.
- [4] Бабский Е.В.: Электронная аппаратура для электрофизиологических исследований 1969.
- [5] Механизация и автоматизация управления 1967. № 6 с. 45-47.

ВОПРОСЫ ЗАПИСИ БИО-СИГНАЛОВ НА МАГНИТНУЮ ЛЕНТУ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются вопросы применения магнитной регистрации в электрофизиологии, методы устранения недостатков непосредственной записи био-сигналов. Большое внимание уделяется модуляционным методам, в частности указывается на некоторые преимущества частотной модуляции. Рассматривается также влияние дефектов лентопротяжного механизма на точность записи частотно-модулированных сигналов.

PROBLEMS OF THE RECORDING OF BIOLOGICAL SIGNALS
ON MAGNETIC TAPE

S u m m a r y

This paper discusses the possibilities of recording biological signals in electrophysiology on standard tape recorders. The deficiencies of the direct recording of biological signals have been shown, as well as the advantages of FM modulation in all cases of tape recording.