

**Lukasz Cieszyński**  
Wydział Informatyki  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny  
lcieszynski@zut.edu.pl

## **Generowanie stymulacji świetlnych za pomocą diody LED na potrzeby interfejsu mózg-komputer**

**Słowa kluczowe:** aparatura stymulująca, SSVEP, interfejs mózg komputer, LED

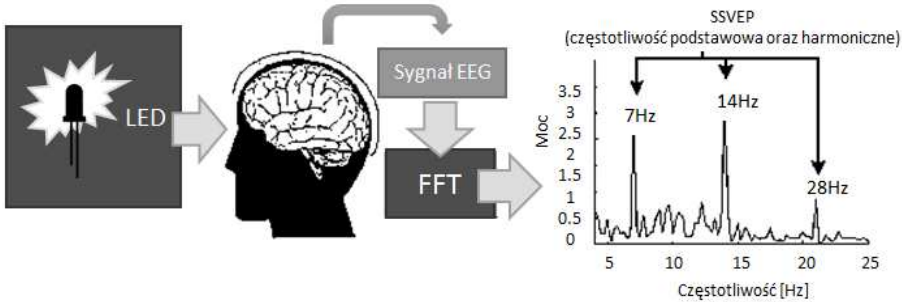
### **Wstęp**

Interfejs mózg-komputer BCI (Brain Computer Interface) stanowi układ do sterowania/komunikowania się człowieka z maszyną. Założeniem takiego systemu jest przekazywanie poleceń do urządzenia bezpośrednio za pomocą fal mózgowych. Ujmując to inaczej, interfejs ten jest w stanie zapewnić komunikację pomiędzy mózgiem użytkownika a komputerem, umożliwiając przekazywanie poleceń /instrukcji do maszyny bez pośrednictwa układu mięśniowego [1]. W ostatnich latach widać zintensyfikowanie prac na rozwoju tego typu rozwiązań. Należy zaznaczyć, że powstało wiele ich odmian opartych na różnych procesach zachodzących w mózgu człowieka. Jedną z nich stanowi BCI oparte na zjawisku występowania i detekcji wzrokowych potencjałów wywołanych stanu ustalonego SSVEP (Steady State Visually Evoked Potentials).

SSVEP można zdefiniować jako typ potencjałów wywołanych, generowanych przez centralny układ nerwowy w odpowiedzi na powtarzający się bodziec wzrokowy (np. migającą z daną częstotliwością diodę LED) [2]. W konsekwencji zainicjowania takiej stymulacji w sygnale EEG (Elektroencefalogram) rejestrowanym z kory wzrokowej można zaobserwować wyraźny wzrost mocy w paśmie częstotliwości odpowiadającym częstotliwości bodźca stymulującego [3].

Wyobraźmy sobie następujący eksperyment (Rys. 1). Podmiot badany podłączony jest do aparatury EEG i obserwuje migającą z częstotliwością 14 Hz diodę LED (stymulator). Rejestrowany sygnał z kory wzrokowej zostaje następnie oczyszczony z szumów i artefaktów (filtracja) oraz przetworzony (np. metodą FFT – Fast Fourier Transform). Tak przygotowany sygnał przedstawiony w formie wykresu (zależności mocy sygnału od częstotliwości) ukazuje występowanie maksymalnej amplitudy mocy sygnału dla częstotliwości zgodnej z częstotliwością stymulatora – w naszym przypadku będzie to 14 Hz. Ponadto, co

jest specyficzne dla SSVEP, możliwe jest również zaobserwowanie wysokiego poziomu mocy nie tylko dla częstotliwości podstawowej (tutaj 14 Hz), ale również przy częstotliwościach harmonicznymi (28 Hz) i subharmonicznych (7 Hz) [4-5] .



Rys. 1. Schemat powstawania SSVEP

Dysponując układem stymulującym (np. migającą z daną częstotliwością diodą LED lub ekranem LCD) w połączeniu z aparaturą do pomiaru EEG możliwe jest zrealizowanie interfejsów mózg komputer w oparciu o SSVEP.

Powyższy przykład jest najprostszym z możliwych, w którym układ stymulujący dostarcza tylko jednej częstotliwości. Niemniej jednak, w konstruowaniu interfejsów BCI, w praktyce wykorzystuje się kilka/kilkanaście częstotliwości. Liczba dostępnych częstotliwości zależy od liczby poleceń, która ma zostać dostarczona użytkownikowi interfejsu. Wykorzystanie kilku diod, gdzie każda pulsuje z inną częstotliwością, pozwala na przygotowanie np. układu sterowania robotem lub klawiaturą.

Zaletą systemów korzystających z SSVEP jest to, iż oparte o potencjały wzrokowe układy działają poza percepcją użytkownika i są skuteczne dla większości osób. Natomiast zastosowanie diod LED daje znaczący zbiór częstotliwości możliwych do wykorzystania w sterowaniu za pomocą interfejsu. Przy uwzględnieniu standardowego użytecznego zakresu częstotliwościowego sygnału EEG (5-30 Hz), diody LED pozwalają uzyskać około 80 możliwych częstotliwości stymulacji.

Autor w niniejszym artykule w części pierwszej przedstawi ogólny opis budowy i zasady działania interfejsu BCI opartego na SSVEP. W kolejnej części zwróci uwagę na zasadność stosowania diod LED jako źródła generowania stymulacji w takich systemach i wskaże przykładowe realizacje. Na koniec podsumuje prezentowany temat.

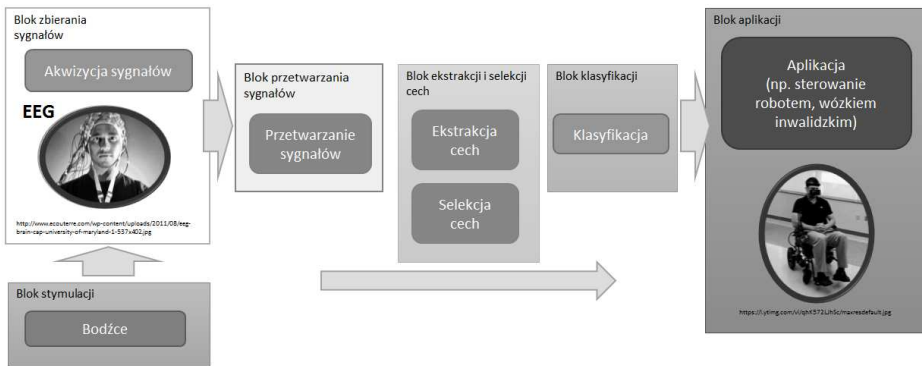
## Opis zagadnienia

W budowie interfejsu mózg-komputer wykorzystującego potencjały SSVEP możemy wyróżnić kilka bloków (Rys. 2): blok stymulacji (bodźce); blok zbierania sygnałów (EEG, akwizycja sygnałów); blok przetwarzania sygnałów (przetwarzanie sygnałów); blok ekstrakcji i selekcji cech; blok klasyfikacji (klasyfikacja) oraz blok aplikacji (aplikacja).

Blok stymulacji stanowi źródło generowania bodźców. Stosuje się głównie dwie metody stymulacji pozwalające na obserwację SSVEP: generowanie stymulacji na ekranie monitora (CRT lub LCD) oraz generowanie impulsów świetlnych za pomocą diod LED. Jednakże, badania pokazują, iż odpowiedzi mózgu na sygnały generowane za pomocą LED są znacznie silniejsze niż na sygnały generowane na ekranie monitora [6]. W konsekwencji zastosowania jednego czy też drugiego rodzaju stymulacji możliwe jest – np. przy wykorzystaniu sprzętu do nieinwazyjnych badań EEG – zarejestrowanie, z powierzchni głowy badanego podmiotu, aktywności elektrycznej mózgu zawierającej SSVEP (blok zbierania sygnałów).

Kolejnym etapem jest odpowiednie przetworzenie zebranych sygnałów. Tutaj pierwszym krokiem jest zwykle użycie filtracji dolnoprzepustowej. W dalszej części następuje detekcja i usuwanie artefaktów, które mogą wystąpić jako następstwa takich czynników jak np. ruchów głową, szyją bądź oczami; aktywności serca; interferencji z siecią; szumów od otaczających urządzeń elektrycznych; ruchów kabli lub szumów termicznych. Blok wstępnego przetwarzania sygnału odgrywa istotną rolę dla prawidłowego działania całego BCI. Jego poprawne wykonanie warunkuje w znacznym stopniu kolejne etapy.

W dalszej części – na tak przygotowanym materiale – przeprowadza się proces ekstrakcji i selekcji cech. Pierwszy z nich skupia się na wydobyciu z sygnału cyfrowego, przy użyciu odpowiednich algorytmów np. filtracji przestrzennej, analizy widma, cech w zwarty sposób opisujących ten sygnał. Celem tych operacji jest głównie dokonanie próby jak najefektywniejszego opisu ilościowego właściwości sygnału EEG. Niemniej jednak, w zależności od użytej metodologii ekstrakcji cech liczba wyselekcjonowanych cech może się znacząco różnić. W celu ich redukcji, czy inaczej ujmując na potrzeby wyboru najbardziej istotnych cech przeprowadza się proces selekcji cech. Istotą selekcji jest pozostawienie cech istotnych, czyli takich, które wnoszą najwięcej informacji do procesu klasyfikacji, a usunięcie tych, które nie powodują znaczącego zwiększenia dokładności klasyfikatora. Do poprawnego działania systemu mózg-komputer niezbędna jest skuteczna metoda selekcji cech sygnału EEG [7].



Rys. 2. Schemat budowy interfejsu BCI

Przedostatnim modulem BCI jest klasyfikacja. Tutaj następuje przydzielenie wybranym cechom odpowiednich poleceń/instrukcji – odpowiednich klas. Wykorzystuje się klasyfikatory różnego rodzaju: jak klasyfikatory liniowe (LDA, liniowy SVM) oraz nieliniowe (sieci neuronowe, klasyfikatory Bayesa czy też klasyfikatory kNN) [8, 9]. Literatura nie wskazuje na jakiś konkretny klasyfikator, który dawałby najlepsze wyniki działania systemu BCI. Pamiętać trzeba jedynie, iż większość klasyfikatorów wymaga ręcznej kalibracji w celu dopasowania parametrów do użytkownika. Poprawne przeprowadzenie procesu klasyfikacji pozwala na wygenerowanie z systemu BCI instrukcji/poleceń wprost do aplikacji.

Blok ostatni – aplikacja – odpowiedzialny jest za wykonywanie poleceń. Pisząc wprost to ten element systemu pozwala na bezpośrednią komunikację z urządzeniem przekazując mu jedną z instrukcji wypracowanej w drodze klasyfikacji. Odnosząc to do przykładu BCI opartego na SSVEP pozwalającego na sterowanie wózkiem inwalidzkim, blok aplikacji przekazuje komendę np. skrętu w prawo w chwili gdy użytkownik obserwuje diodę LED, dla której przypisana jest ta instrukcja.

Należy zauważyć, że aby interfejs BCI działał prawidłowo, pomimo zastosowania się do powyższych zaleceń dla każdego z bloków, konieczne jest każdorazowe skalibrowanie interfejsu przed jego użyciem przez użytkownika. Kalibracja polega na dostrojeniu całego systemu do indywidualnego podmiotu np. poprzez zidentyfikowanie częstotliwości dających najwyższą synchronizację przy SSVEP. Pamiętać należy, że wykrywalność SSVEP jest sprawą indywidualną dla każdej osoby. Ponadto zidentyfikowane najlepsze częstotliwości stymulacji dla tego samego podmiotu mogą być różne w zależności np. od pory dnia, stanu psychofizycznego badanego oraz od minimalnie innego umiejscowienia elektrod na głowie użytkownika [10].

W trakcie długotrwałych sesji użytkownika z interfejsem może też być konieczne dodatkowe dopasowanie systemu do pojawiających się zmian

w aktywności mózgowej użytkownika. Po pomyślnie przeprowadzonej kalibracji użytkownik może przejść do trybu użytkowania i rozpocząć praktyczne korzystanie z systemu.

## Przegląd literatury

Jednym z istotniejszych elementów BCI opartego o wywoływane potencjały wzrokowe jest blok stymulacji, czy też inaczej rzecz biorąc – aparatura stymulująca. Pod tym pojęciem należy rozumieć urządzenie (bądź zestaw urządzeń) generujących bodźce.

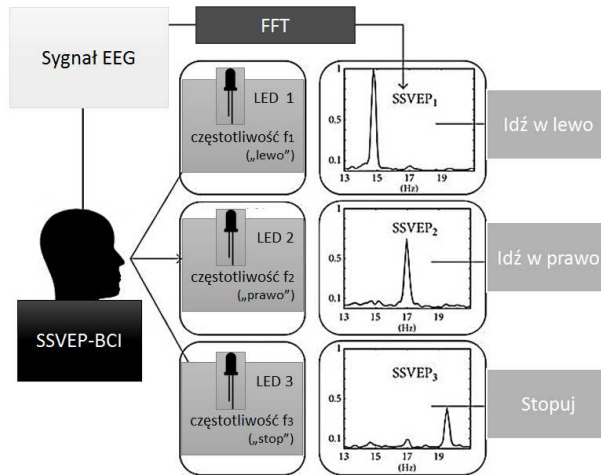
Rozpatrzmy przypadek BCI opartego na SSVEP, w którym bodźce są generowane przez migające ze stałą częstotliwością źródło światła. Jak zostało to już wspomniane i potwierdza to literatura [6], lepszymi stymulatorami są urządzenia mające jako źródło światła diody LED.

Chcąc wygenerować stymulację przy pomocy jednej diody LED w zakresie częstotliwości od 5 do 30 Hz możemy uzyskać około 80 różnych częstotliwości migania diody. Jest to znaczna liczba, która z powodzeniem może być wykorzystana do budowy interfejsu BCI.

Rysunek 3 przedstawia schematyczną konstrukcję systemu do sterowania (np. robotem czy małym pojazdem zdalnie sterowanym) wykorzystującego diody LED. Użytkownik ma zaprezentowane 3 diody LED – każda mrugająca z inną częstotliwością ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ). Dodatkowo każda z diod ma przypisane inne polecenie sterujące: „lewo”, „prawo”, „stop”. W momencie obserwacji diody LED<sub>1</sub> migającej z częstotliwością  $f_1$  w sygnale rejestrowanym z kory wzrokowej (za pośrednictwem urządzenia do pomiaru EEG), po odpowiednim przetworzeniu (filtracja, FFT), zaobserwować możemy wyraźny wzrost mocy w paśmie częstotliwości odpowiadającym częstotliwości  $f_1$  - czyli SSVEP<sub>1</sub>. Detekcja SSVEP<sub>1</sub>, dla omawianego interfejsu, tożsama jest z przekazaniem do sterowanego urządzenia komendy: „idź w lewo”. Analogicznie dzieje się to w momencie obserwacji przez użytkownika innej diody.

Wykorzystane w powyższym przykładzie diody LED, jako generatory stymulacji świetlnych w układach BCI, stanowią najprostsza konstrukcję. Niemniej jednak przy tworzeniu takich aparatów do stymulacji konstruktor musi zwrócić uwagę na kilka parametrów (Rys. 4). Najbardziej istotnym z nich jest kolor. Diody LED dostępne są w kilku kolorach – najczęściej spotkać możemy diody czerwone, zielone, niebieskie i białe. Z łatwością możemy zmienić ten parametr zastępując źródło światła jednego koloru źródłem światła o innej barwie. Każda z nich w innym stopniu pobudza ośrodek wzrokowy, dając w odpowiedzi mózgu odmienną wielkość amplitudy mocy. W literaturze [11-14] czytamy, iż najwyższą amplitudą sygnału cechują się wyniki dla barwy czerwonej (Autorzy rozpatrywali jedynie kolory: czerwony, zielony, niebieski oraz żółty). Jeśli do eksperymentu dodamy

diodę o białej barwie okazuje się, iż daje ona najlepsze wyniki [15]. Autorzy tłumaczą, że spektrum światła białego pokrywa spektra trzech kolorów podstawowych, a więc jednocześnie uaktywnia obecne w oku człowieka receptory światła zielonego, czerwonego oraz niebieskiego.



Rys. 3. BCI oparte na SSVEP wykorzystujące diody LED jako bodźce stymulacji



Rys. 4. Parametry urządzeń stymulujących opartych na diodach LED

Kolejnym parametrem jest rozmiar elementu generującego stymulację świetlną. Możemy go rozpatrywać jako rozmiar punktowy, czyli rozmiar pojedynczej diody. Tutaj mamy do dyspozycji LED o wymiarach od 1.8 do nawet 20 mm. Innym rozumieniem rozmiaru może być tutaj fakt, czy w aparaturze stymulującej wykorzystujemy pojedynczą diodę czy też zestaw diod w postaci panelu (np. 3x3 diody). Korzysta się także z rozwiązań, w których pojedynczą diodę umieszcza się

w obudowie o zadanych rozmiarach (np. 2x2 cm). W rezultacie daje to pole światła o rozmiarach obudowy. Badania pokazują, iż rozmiar powierzchni emitującej światło w układzie do stymulacji ma znaczenie dla detekcji SSVEP. W literaturze [16] możemy znaleźć prace potwierdzające fakt, że większy rozmiar bodźca daje większe pole światła, a co za tym idzie więcej światła dociera do podmiotu badanego. W odpowiedzi uzyskujemy odpowiednio większą amplitudę SSVEP. Ponadto, stwierdza się, że powierzchnia świecenia dla danego podmiotu może osiągać swoją wartość graniczną – powyżej której nie będzie znaczącej zmiany w amplitudzie SSVEP [17].

W badaniach prowadzonych nad kształtem obszaru świetlnego nie stwierdzono znaczącego jego wpływu na zarejestrowany paradygmat SSVEP [16] – jednak mogło to mieć również związek z całkowitą powierzchnią świecenia punktu.

Odległość przestrzenna pomiędzy źródłami stymulacji została również zbadana przez zespół Duszyk i in.. Badacze nie stwierdzili znaczącego wpływu odległości pomiędzy diodami LED na liczbę wykrywanych częstotliwości SSVEP. Jednakże inny zespół [18], prowadzący prace nad skonstruowaniem klawiatury opartej na paradygmacie SSVEP, rozpatrzył ten parametr pod kątem praktycznym. W eksperymentach przez nich prowadzonych użytkownicy zasugerowali odsunięcie od siebie poszczególnych klawiszy (zbudowanych z migających LED), co miało znacznie poprawić komfort pracy z takim interfejsem.

W literaturze [19] rozpatrywane są również konstrukcje wykorzystujące tak zwany „punkt skupienia”. „Punkt skupienia” jest realizowany poprzez umieszczenie w układzie stymulującym jednego dodatkowego obiektu, na którym użytkownik ma skupić swoją uwagę, co pozwala na zmniejszenie niepożądanych ruchów oczu. Przekłada się to na poprawę wyników w badaniach nad SSVEP.

Jako ostatni parametr należy rozpatrzeć warunki środowiskowe. Najbardziej istotnym wydaje się parametr oświetlenia otoczenia. Badania pokazują, iż zaciemnienie pomieszczenia ma pozytywny wpływ na liczbę identyfikowanych częstotliwości SSVEP [20].

## Podsumowanie

Układy korzystające z interfejsów BCI są coraz bardziej powszechne. Wykorzystanie tutaj potencjałów SSVEP daje zadowalające wyniki. Urządzenia służące do generowania bodźców świetlnych stosowane w takich BCI w większości przypadków oparte są na migających z daną częstotliwością diodach LED. Użycie LED w takich sytuacjach pozwala na uzyskanie stymulacji z dużego zakresu częstotliwości (80 możliwych do uzyskania częstotliwości z zakresu 5-30 Hz).

Ponadto, możliwe jest odpowiednie skonfigurowanie aparatury stymulującej w zależności od zastosowanego koloru, rozmiaru czy kształtu. Odległość

przestrzenna pomiędzy źródłami stymulacji, występowanie punktu skupienia czy oświetlenie otoczenia są kolejnymi czynnikami, które należy uwzględnić w eksperymentach nad SSVEP.

Cytowana literatura pokazuje, że najlepsze rezultaty otrzymuje się stosując biały i czerwony kolor światła przy jednoczesnym wykorzystaniu odpowiednio dużych obiektów (zestawów LED). Również zastosowanie punktu skupienia poprawia rezultaty. Ponadto w badaniach stwierdza się, iż zaciemnienie otoczenia badanego podmiotu także pozwala na uzyskanie lepszych wyników. Co więcej rozmieszczenie przestrzenne źródeł światła nie ma znaczącego wpływu na detekcję SSVEP. Odpowiednie rozmieszczenie wpływa jednak na zwiększenie komfortu użytkownika.

Dodatkowo połączenie kilku-kilkunastu pojedynczych diod w układzie stymulującym pozwala na zestawienie złożonych interfejsów (np. klawiatury).

## Literatura

1. Wolpaw JR, Birbaumer N, Mcfarland DJ, Pfurtscheller G, Vaughan TM (2002) Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology* 113: 767–79
2. Fernandez-Vargas J, Pfaff HU, Rodriguez FB, Varona P (2013) Assisted closed loop optimization of SSVEP-BCI efficiency. *Frontiers in Neural Circuits*, vol. 7
3. Vialatte FB, Maurice M, Dauwels J, Cichocki A (2010) Steady-state visually evoked potentials: focus on essential paradigms and future perspectives. *Progress in neurobiology*, vol. 90(4), pp. 418-438
4. Regan D (1989) *Human brain electrophysiology: evoked potentials and evoked magnetic fields in science and medicine*. Elsevier Press
5. Herrmann S (2001) Human EEG responses to 1-100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Experimental Brain Research*, vol. 137(3-4), pp.346-353
6. Zhenghua W et al. (2008) Stimulator selection in SSVEP-based BCI. *Medical engineering & physics*.30(8): 1079-1088.
7. Graimann B, Allison B, Pfurtscheller G (2010) *Brain-Computer Interfaces: Non-Invasive and Invasive Technologies*. The Frontiers Collection. Springer
8. Aloise F, Schettini F, Arico P, Salinari S, Babiloni F, Cincotti F (2012) A comparison of classification techniques for a gaze-independent P300-based brain-computer interface. *Journal of Neural Engineering*. 9(4): 045012
9. Lotte F, Congedo M, Lécuyer A, Lamarche F, Arnaldi B et al. (2007) A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of Neural Engineering*. Vol. 4, 2/2007



10. Paulus, W (2005) Elektroretinographie (ERG) und visuell evozierte Potenziale (VEP). In: Buchner, H., Noth, J. (eds.) *Evozierte Potenziale, neurovegetative Diagnostik, Okulographie: Methodik und klinische Anwendungen*, Thieme, Stuttgart - New York, pp. 57–65
11. Regan D (1966) An effect of stimulus colour on average steady-state potentials evoked in man. *Nature* 210, 1056-1057
12. Drew P, Sayres R, Watanabe K, Shimojo S (2001) Pupillary response to chromatic flicker. *Experimental Brain Research*. 136(2): 256-62
13. Gregory R, (1997) *Eye and brain the psychology of seeing*. Princeton: Princeton University Press
14. Tello RJMG, Müller SMT, Ferreira A, Bastos TF (2015) Comparison of the influence of stimuli color on Steady-State Visual Evoked Potentials. *Research on Biomedical Engineering* vol.31 no.3
15. Aljshamee M, Mohammed MQ, Choudhury RUA, Malekpour A and Luksch P (2014) Beyond Pure Frequency and Phases Exploiting: Color Influence in SSVEP Based on BCI. *Computer Technology and Application* 5,111-118
16. Duszyk A, Bierzyńska M, Radzikowska Z, Milanowski P, Kuś R, Suffczyński P, Michalska M, Łabecki M, Zwoliński P, Durka P (2014) Towards an Optimization of Stimulus Parameters for Brain-Computer Interfaces Based on Steady State Visual Evoked. *PLoS One*. 2014 Nov 14; 9(11) :e11 2099
17. Ng KB, Bradley AP, Cunnington R (2012) Stimulus specificity of a steady-state visual-evoked potential-based brain-computer interface. *Journal of Neural Engineering*, vol 9 (3)
18. Hwang HJ, Lim JH, Jung YJ, Choi H, Lee SW, Ima CH (2012) Development of an SSVEP-based BCI spelling system adopting a QWERTY-style LED keyboard. *Journal of Neuroscience Methods* 208 59–65
19. Meese TS, Summers RJ, Neuronal convergence in early contrast vision: Binocular summation is followed by response nonlinearity and area summation, *Journal of Vision* 9 (4), 7-7, 2009
20. Wang N, Qian T, Zhuo Q, Gao X (2010) Discrimination between idle and work states in BCI based on SSVEP. In *proc. 2nd International Advanced Computer Control Conference* 4: 355–358

## Streszczenie

Odpowiedź mózgu na bodziec powtarzany ze stałą częstotliwością (np. migające światło diody LED) nazywana jest potencjałem stanu ustalonego (SSVEP ang. Steady State Visually Evoked Potential). W konsekwencji takiej stymulacji w sygnale EEG (Elektroencefalogram) rejestrowanym z kory wzrokowej następuje wyraźny wzrost mocy w paśmie częstotliwości odpowiadającym częstotliwości bodźca stymulującego.

Posiadając układ stymulujący, wyposażony w migającą z daną częstotliwością diodę LED oraz wykorzystując aparaturę do pomiaru EEG (elektrody pomiarowe umiejscowione na czaszce podmiotu badanego) możliwe jest skonstruowanie interfejsu mózg-komputer (BCI ang. Brain-Computer Interface), który może być z powodzeniem wykorzystany np. jako układ sterujący wózkiem inwalidzkim dla osób niepełnosprawnych.

Użycie rozwiązania opartego na diodach LED, przy uwzględnieniu standardowego użytecznego zakresu częstotliwościowego sygnału EEG (5-30Hz), daje około 80 możliwych częstotliwości stymulacji. Stanowi to znaczny zbiór częstotliwości możliwych do wykorzystania na etapie uczenia się interfejsu BCI. Etap ten jest konieczny, aby wybrać charakterystyczne dla badanego podmiotu częstotliwości stymulacji dające jak najsilniejszą odpowiedź SSVEP.

W artykule autor przedstawi metodę komunikacji w interfejsie BCI opartą na SSVEP z wykorzystaniem diody LED ze wskazaniem na najbardziej istotne parametry budowy układów stymulacyjnych.

## Abstract

The response of the brain to a stimulus repeated with a constant frequency (eg. flashing LED), is called a Steady State Visually Evoked Potential (SSVEP). As a consequence of the stimulation, the EEG signal (electroencephalogram) recorded from the visual cortex shows a significant power increase in the frequency band corresponding to the stimulus frequency.

That means that using a stimulation equipment (with LED flashing with the given frequency) and EEG device recording signals from electrodes placed on the subject's skull, it is possible to construct the brain-computer interface (BCI). It can be used successfully e.g., as a control system for a wheelchair for disabled people.

BCI based on LEDs provides a high number of possible stimulation frequencies. Considering the classic EEG frequency band (5-30 Hz) at least 80 different stimulation frequencies can be delivered by a single LED. This large set of frequencies is used at the BCI learning stage. This stage is necessary in order to select specific stimulation frequencies, which give the strongest SSVEP for a specific subject.

In the article the author will present the method of communication in BCI interface based on the SSVEP using LEDs. The most important parameters of the stimulating systems will be indicated.

**Keywords:** stimulating equipment, SSVEP, brain-computer interface, LED