

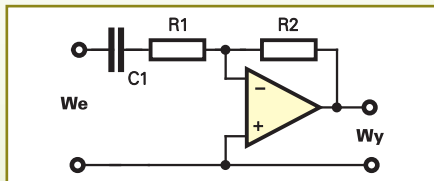
# Wzmacniacze operacyjne

## Odcinek 5

W piątym odcinku cyklu o wzmacniaczach operacyjnych nadal omawiamy podstawowe układy pracy.

### Układy pochodne

Zastanówmy się teraz, jak będzie się zachowywał układ z rysunku 37.



Rys. 37

Do wzmacniacza odwracającego z rysunku 16 dodajemy kondensator C1 w szereg z rezystorem R1. Całość przypomina trochę układ różniczkujący z rysunku 28. Tym razem przeanalizujemy działanie tylko z jednego punktu widzenia. Analogicznie jak w poprzednich przypadkach możemy zapisać wzór na wzmocnienie układu

$$G = R2 / (R1 + Xc)$$

Zarówno wzór, jak i rysunek 37 wskazują, że przy bardzo dużych częstotliwościach, gdy oporność kondensatora będzie pomijalnie mała, wzmocnienie wyniesie

$$G = R2 / R1$$

Dla bardzo małych częstotliwości oporność kondensatora będzie dużo większa od R1, wobec czego możemy pominąć R1 i zapisać

$$G = R2 / Xc$$

W tym zakresie wzmocnienie będzie rosło ze wzrostem częstotliwości (porównaj rysunek 29), bo reakcja kondensatora będzie maleć. Interesuje nas częstotliwość charakterystyczna, przy której liczbowe wartości R1 i Xc są równe (pomijamy tu zależności fazowe)

$$|R1| = |Xc|$$

Podstawiając  $Xc = 1 / 2\pi C1 = R1$  i przekształcając otrzymujemy (umowną) częstotliwość graniczną

$$fd = 1 / 2\pi R1 C1$$

Gdy zaznaczymy wzmocnienie i częstotliwość w skali logarytmicznej, przebieg cha-

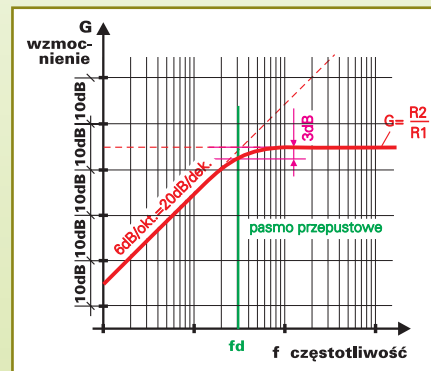
rakterystyki częstotliwościowej układu będzie wyglądał jak na rysunku 38. Otrzymaliśmy użyteczny filtr górnoprzepustowy. Powyżej częstotliwości granicznej, czyli w paśmie przepustowym, charakterystyka jest płaska, a wzmocnienie wynosi

$$G = R2 / R1$$

Poniżej częstotliwości granicznej

$$fd = 1 / 2\pi R1 C1$$

wzmocnienie zmniejsza się z szybkością 6dB/okt. (20dB/dek.). Zauważ, że wartość R2 nie wpływa na częstotliwość graniczną, a jedynie na wzmocnienie w paśmie przepustowym.

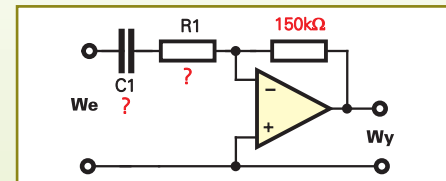


Rys. 38

Ponieważ chcę Ci wszystko przedstawić jak najprościej, pomijam zależności fazowe. Przyjmij więc na wiarę, że dla tej częstotliwości granicznej fg wzmocnienie jest  $\sqrt{2}$ , czyli 1,41 razy, inaczej mówiąc o 3dB mniej niż w paśmie przepustowym.

Porównaj teraz układy z rysunków 16, 28 i 37. Dodanie kondensatora C1 zmniejszyło wzmocnienie dla małych częstotliwości, czyli przekształciło szerokopasmowy wzmacniacz w filtr górnoprzepustowy. Układ taki jest bardzo często stosowany. W ramach gimnastyki szarych komórek do- bierz teraz wartości R1 i C we wzmacniaczu

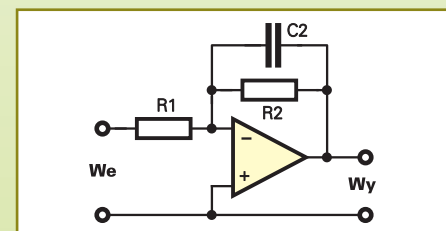
mikrofonowym z rysunku 39, by wzmocnienie w paśmie przepustowym było równe 30, a częstotliwość graniczna wynosiła 32Hz. Prawidłowe wartości znajdziesz na końcu tego artykułu.



Rys. 39

A teraz kolejny układ z rysunku 40. Nie będę pisał wzoru na wzmocnienie, bo nie chcę Cię przestraszyć (równoległe połączenie R2, C2). Domyślasz się, że ta krzyżówka integratora ze wzmacniaczem odwracającym dla prądu stałego (i bardzo małych częstotliwości) będzie miała wzmocnienie równe

$$G = R2 / R1$$



Rys. 40

bo oporność C2 będzie nieskończenie wielka. Natomiast przy dużych częstotliwościach wzmocnienie będzie spadać z szybkością 6dB/oktawę, bo oporność kondensatora C2 zmniejsza się ze wzrostem częstotliwości, podobnie jak w układzie z rysunku 32. Znów na jakiejś częstotliwości granicznej, liczbowo wartość rezystancji R2 będzie równa oporności Xc kondensatora C2. Nietrudno zgadnąć, że charakterystyka częstotliwościowa będzie wyglądać jak na rysunku 41.

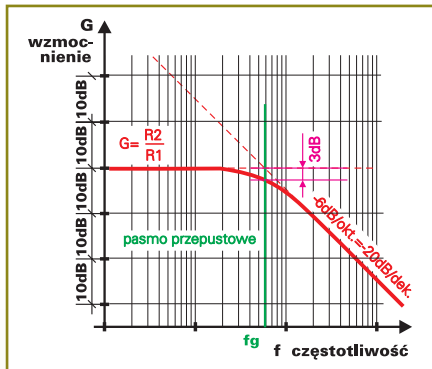
Otrzymaliśmy filtr dolnoprzepustowy o wzmacnieniu w paśmie przepustowym

$$G = R2 / R1$$

i częstotliwości granicznej

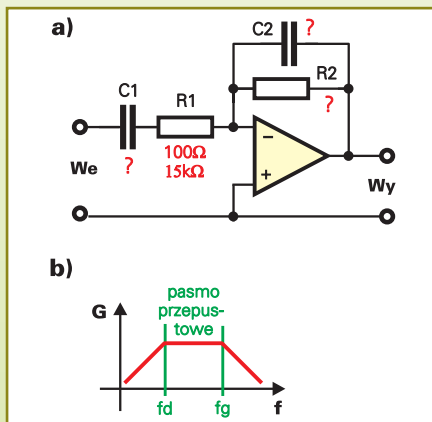
$$f_g = 1 / 2\pi R2 C2$$

Taki układ jest bardzo często stosowany do obciążenia niepotrzebnych wysokich częstotliwości.



Rys. 41

Zestawiając układ według rysunku 42 otrzymasz filtr pasmowy. W ramach rozrywki dobierz wartości elementów R2, C1, C2 tego układu, by dolna częstotliwość graniczna wynosiła  $f_d=50\text{Hz}$ , górna  $f_g=20\text{kHz}$ , a wzmacnienie  $G=5$ . Jak podobają Ci się wartości kondensatorów? A może lepiej byłoby zwiększyć R1 do, powiedzmy,  $15\text{k}\Omega$ . Sprawdź, czy Twoje wyliczenia zgadzają się z odpowiedzią podaną na końcu artykułu.

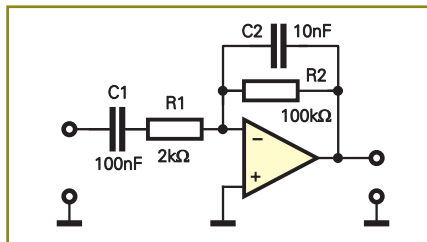


Rys. 42

Jeśli już rozumiałeś podane zależności, odpowiedz, jak będzie wyglądać charakterystyka, gdy częstotliwość  $f_d$  graniczna będzie wyższa niż  $f_g$ ? Przykład masz na rysunku 43a. Częstotliwość  $f_d$  wynosi  $795\text{Hz}$ , natomiast  $f_g$ :  $159\text{Hz}$ . Jakie będzie wzmacnienie w poszczególnych częściach pasma? Spróbuj narysować charakterystykę tego układu (znajdziesz ją na końcu artykułu, na rysunku 43b).

Na rysunku 44a znajdziesz kolejny układ. Nie ma on szerszego zastosowania. Nie będziesz także stosował wynalazku z rysunku 44b, choć czasem bywa spotykany

w praktyce (jest to w istocie integrator o zmodyfikowanej charakterystyce).



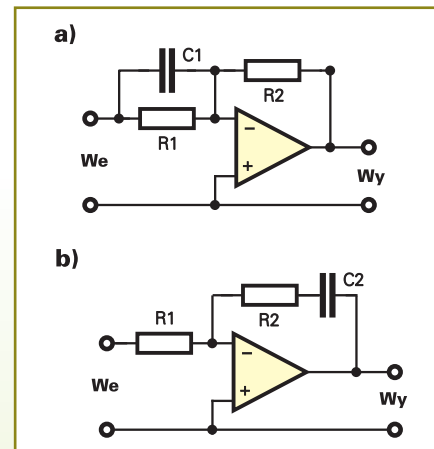
Rys. 43a

Spotyka się natomiast układy jak na rysunkach 45 i 46. Znajdziesz tam schemat i charakterystykę obliczoną z pomocą programu symulacyjnego. Te dwa przykłady pokazują, jak łatwo jest kształtować charakterystykę częstotliwościową, „doczepiając” do wzmacniacza odwracającego odpowiednie obwody RC. Przeanalizuj dokładnie rysunki 45 i 46, ponieważ prawdopodobnie będziesz kiedyś potrzebował układu o podobnej charakterystyce. Zwróć uwagę na wartości wzmacnienia i punkty załamania charakterystyki. Przykładowo na rysunku 46b wzmacnienie przy najmniejszych częstotliwościach (równe 100) wyznaczają rezystory R2 i R1. Przy zwiększaniu częstotliwości zmniejsza się reaktancja kondensatorów.

Pierwsze załamanie charakterystyki występuje wtedy, gdy reaktancja C2A staje się mniejsza od R2 (około  $0,15\text{Hz}$ ). Charakterystyka opada, bo zmniejsza się reaktancja C2A. Gdy przy większych częstotliwościach (około  $1\text{Hz}$ ) reaktancja ta stanie się mniejsza od R2A, charakterystyka trochę się prostuje, a wzmacnienie wyznaczone jest przez równoległe połączenie R2, R2A oraz R1. Jeszcze dalej (około  $10\text{Hz}$ ) charakterystyka znów zaczyna opadać, bo reaktancja C2B okazuje się mniejsza niż R2B. Przy częstotliwości około  $100\text{Hz}$  znów zaczyna się prostować, a wzmacnienie ustala teraz równoległe połączenie R2, R2A, R2B oraz R1. Powyżej  $10\text{kHz}$  wzmacnienie spada za sprawą C2C, by powyżej częstotliwości  $50\text{kHz}$  ustabilizować się na

poziomie wyznaczonym przez równoległe połączenie R2, R2A, R2B, R2C oraz R1.

Czy teraz już potrafisz zaprojektować wzmacniacz o charakterystyce jak na rysunku 47a, gdzie wypadkowe nachylenie charakterystyki wynosi  $3\text{dB/okt}$ . Taki właśnie filtr jest potrzebny, żeby szum biały zamienić na bardziej użyteczny szum różowy. Jak to zrobić? Masz jakiś pomysł? Na końcu artykułu, na rysunku 47b, znajdziesz przykład takiego filtra. Schemat nie jest mój, zaczerpnąłem go



Rys. 44

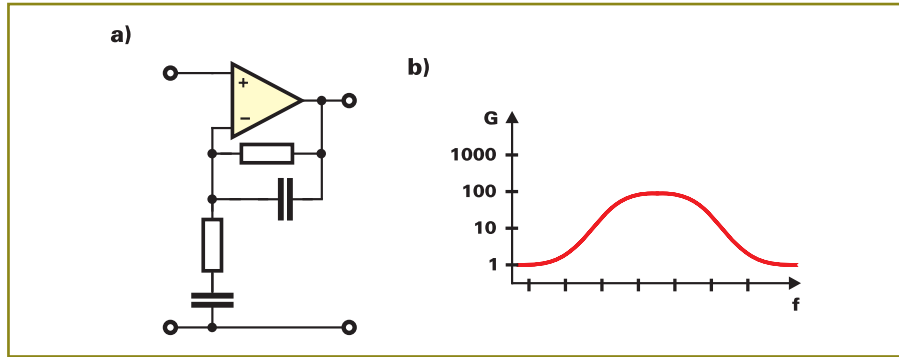
REKLAMA · REKLAMA · REKLAMA · REKLAMA · REKLAMA · REKLAMA

z jakiegoś starego angielskojęzycznego czasopisma, nie ręką więc za jego dokładność.

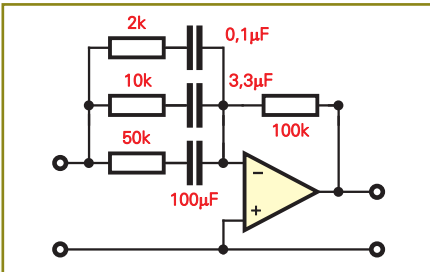
### Wzmacniacz nieodwracający

A teraz mam ważne pytanie. Czy tak samo można kształtować charakterystykę wzmacniacza nieodwracającego? Jak myślisz? Czy układy z **rysunku 48** będą mieć te same właściwości, jak analogiczne układy z rysunków 28, 32, 40?

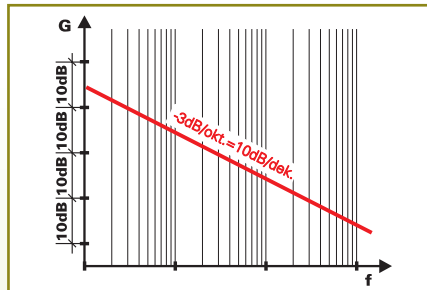
Jeśli uważasz, że wszystko będzie dokładnie tak samo, mylisz się! Charakterystyki będą trochę podobne, ale nie takie same. W szczególności nie musisz się wgłębiać, ale powinieneś pamiętać, że



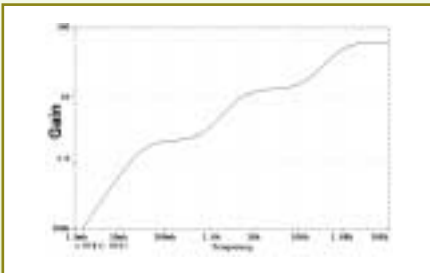
Rys. 49



Rys. 45a



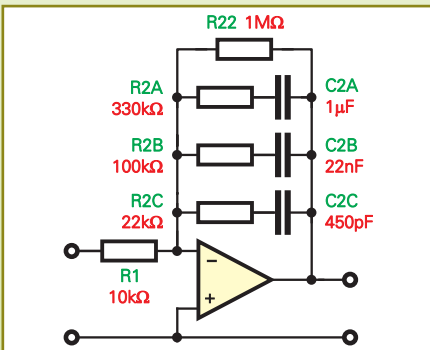
Rys. 47a



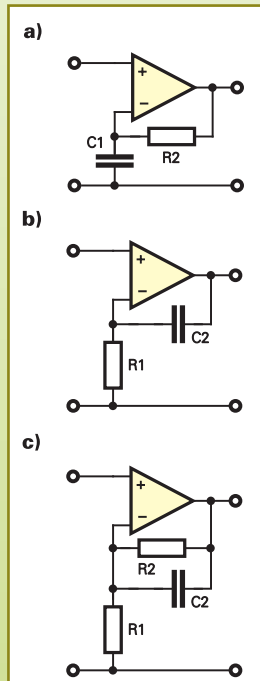
Rys. 45b

w przypadku wzmacniacza nieodwracającego wzmocnienie nie może być mniejsze od jedności. A to na przykład w przypadku filtrów jest istotną wadą. Tłumienie filtrów zapewne okaże się niewystarczające - zastanów się, jak będzie wyglądała charakterystyka filtru z rysunku 48c?

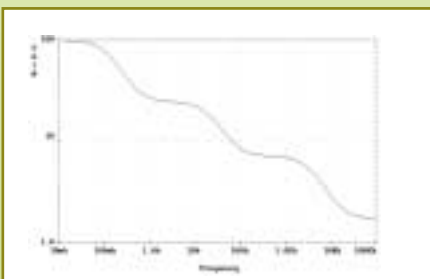
Obliczenia matematyczne są tu zdecydowanie trudniejsze. Jeśli więc będziesz chciał "bawić się" z charakterystyką w jakiś bardziej wymyślny sposób, stosuj wzmacniacz odwracający.



Rys. 46a



Rys. 48



Rys. 46b

równaniu z łatwością kształtowania charakterystyki częstotliwościowej i przejściowej.

Zapomnij więc o wynalazkach z rysunku 48. W praktyce będziesz wykorzystywał jedynie prosty układ z **rysunku 49a**. Tak jak we wcześniejszych układach dolną częstotliwość graniczną  $f_d$  obliczysz ze wzoru

$$f_d = 2\pi R1C1$$

natomiast górną

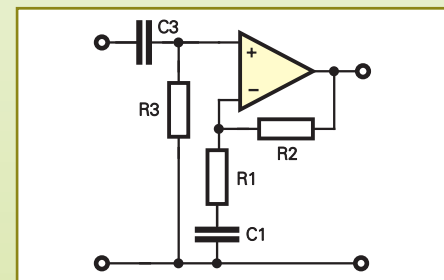
$$f_g = 2\pi R2C2$$

Wzmocnienie w paśmie przepustowym wynosi oczywiście

$$G = 1 + R2/R1$$

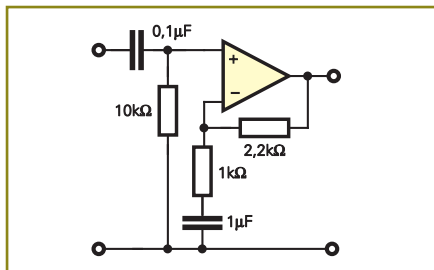
o ile  $f_d$  nie będzie większa od  $f_g$  (porównaj rysunek 43b). Pamiętaj, że wzmocnienie nie będzie mniejsze od jedności także poza pasmem przepustowym, jak pokazuje przykładowy **rysunek 49b**.

Często będziesz także stosował obwód wejściowy jak na **rysunku 50**. Właśnie w takiej konfiguracji pracuje zdecydowana większość... wzmacniaczy mocy audio. Powinieneś wiedzieć, że elementy  $R3C3$  tworzą dodatkowy filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej  $f = 1 / 2\pi R3C3$

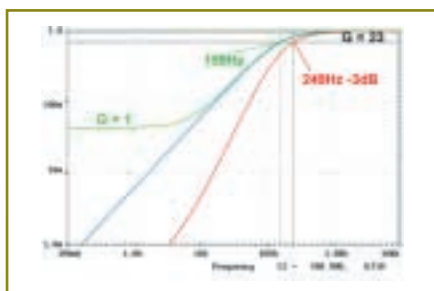


Rys. 50

Na **rysunku 51** znajdziesz konkretny przykład, z życia wzięty. Częstotliwości graniczne określone przez  $R1C1$  jak i  $R3C3$  są równe i wynoszą 159Hz. Wzmocnienie w paśmie przepustowym wyznaczone przez  $R2$  i  $R1$  wynosi 23. Kolor zielony ma charakterystyka wzmacniacza, gdyby  $C3$  miał bardzo dużą wartość (lub gdyby był zwarty) - wzmocnienie minimalne jest równe 1. Charakterystyka w kolorze niebieskim pokazuje przypadek, gdy pojemność  $C1$  jest bardzo duża, a pasmo ograniczone jest tylko przez  $R3$ ,



Rys. 51a



Rys. 51b

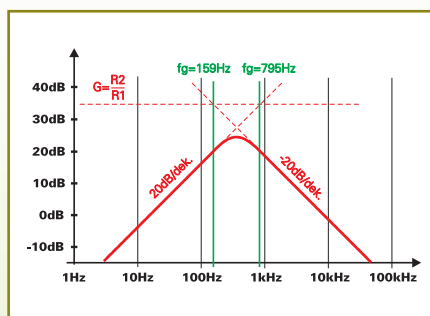
C3. Czerwony kolor ma charakterystyka wypadkowa układu z rysunku 51a. Obecność dwóch filtrów R1C1 i R3C3 powoduje, że charakterystyka zmienia się z szybkością 12dB/okt., czyli 40dB/dek. Ale zmieniła się też częstotliwość charakterystyczna, przy której wzmacnienie spada o 3dB: zamiast

159Hz wynosi teraz 249Hz. Jeśli więc chcesz, by wypadkowa charakterystyka przy spadku -3dB sięgała od dołu, powiedzmy, 20Hz, częstotliwości wyznaczone przez R1C1 i R3C3 powinny być przynajmniej o 1/3 mniejsze, czyli w tym wypadku nie wyższe niż 13Hz.

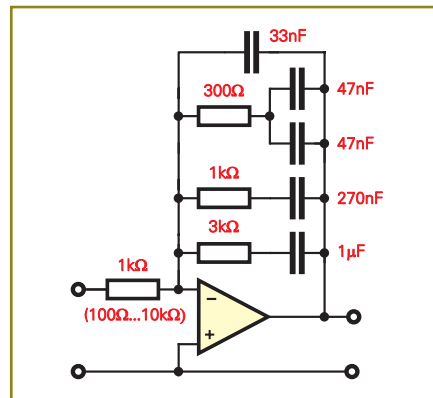
Tyle w tym odcinku. Na koniec jeszcze odpowiedzi na pytania z artykułu.

## Odpowiedź do rysunku 36 (EdW 1/2000)

Na wyjściach obydwu układów powinien wystąpić przebieg taki sam, jak na wejściach. Jednak w rzeczywistości ze względu na ograniczony zakres napięć wyjściowych oraz ograniczoną szybkość obu wzmacniaczy operacyjnych niektóre przebiegi (o dużym nachyleniu zboczy i dużych amplitudach) mogą zostać zniekształcone.



Rys. 43b



Rys. 47b Filtr 3dB/okt.

## Odpowiedź do rysunku 39

R1=5kΩ, C1=1μF.

## Odpowiedź do rysunku 42

Przy małej wartości R1=100Ω należy zastosować R2=510Ω (500Ω), C1=33μF (31,8μF), C2=15nF (15,58nF).

Tak duże wartości kondensatorów są w wielu przypadkach niepraktyczne, dlatego lepiej zwiększyć R1 do 15kΩ i wtedy: R2=75kΩ, C1=220nF, C2=100pF.

Piotr Górecki

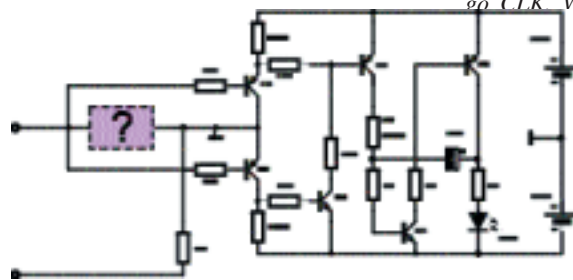
# Jak to działa?

Na rysunku pokazany jest nieskomplikowany układ, zasilany z dwóch baterii 1,5V. Żeby zadanie nie było zbyt łatwe, nie narysowano jednego elementu w miejscu oznaczonym znakiem zapytania.

Zadaniem uczestników konkursu jest odpowiedzieć na dwa pytania:

Jaki element powinien być umieszczony w miejscu oznaczonym znakiem zapytania?

Jaką funkcję pełni przedstawiony układ?



Odpowiedzi należy nadsyłać w terminie 45 dni od ukazania się tego numeru EdW.

Na kopercie lub kartce z odpowiedzią należy umieścić dopisek: **Jak2**. Nagrodami będą kity AVT lub książki.

## Rozwiązanie zadania z EdW 10/99

Zadanie tym razem było bardzo trudne, a nawet podchwytliwe. Schemat zaprezentowany w EdW 10/99 pochodzi z pewnego ograniczonego czasopisma, gdzie został opisany jako *przerzutnik typu latch, inaczej mówiąc przerzutnik D wyzwalany poziomem. WE2 ma pełnić rolę wejścia zegarowego CLK. WE1 to wejście danych, WY1 to wyjście Q, WY2 to Q̄. Gdy We2=H, WY1 powtarza stan wejścia WE1 - latch jest przezroczysty. Zmiana stanu na WE2 z H na L powoduje zatrzaśnięcie ostatniego stanu.*

Połowa nadesłanych odpowiedzi była właśnie taka - że jest to przerzutnik D. Najprawdopodobniej opinia taka spowodowana była obecnością charakterystycznego połączenia "na krzyż" bramek

NAND. Jednak mimo zewnętrznego podobieństwa układ wcale nie zachowuje się jak przerzutnik. Gdy na wejściu WE2 jest stan niski, na obu wyjściach WY1, WY2 pojawiają się stany wysokie. Kilka osób słusznie zaproponowało uproszczenie podanego układu, przy zachowaniu identycznych funkcji.

Jedynie trzy osoby po gruntownej analizie domyśliły się, że na schemacie musiał pojawić się błąd, i że wszystkie bramki powinny być bramkami NAND. Wtedy rzeczywiście układ będzie pełnił rolę przerzutnika latch, z aktywnym poziomem wysokim. Za taką wnikliwą analizę nagrody otrzymują: **Anna Michalska-Przybysz** ze Szczecina, **Krzysztof Żuber** z Urzędowa i **Przemysław Gędek** ze Strojca.

