

# Lampowy kompresor dynamiki sygnału audio



*Przeglądając moje zapasy lamp próżniowych stwierdziłem, że z wielu nie będę miał większego pożytku - nie nadają się do budowy wzmacniacza napięciowego.*

*Tak jest na przykład z pentodami regulacyjnymi: EF83, EF 183 i EF 89, których sporo zalega jeszcze w niejednej piwnicy. Co można zrobić z tymi lampami? Wyrzucić do śmieci? Zdecydowanie nie!*

**Rekomendacje:** *smakowity kąsek dla prawdziwych koneserów lampowej techniki audio, przeżywającej niezwykle renesans.*

Pentody regulacyjne były stosowane w układach ARW (automatycznej regulacji wzmacnienia) odbiorników radiowych i telewizyjnych. W EP3/2003 opisaliśmy działanie ARW przy okazji omawiania wskaźników dostrojenia (magicznych „oczek”). Przypomnijmy tylko, że zadaniem ARW jest regulowanie wzmacnienia wzmacniacza pośredniej częstotliwości w odbiorniku w zależności od wartości sygnału docierającego do odbiornika: silny sygnał - mniejsze wzmacnienie, słaby sygnał - duże wzmacnienie.

Jak realizowano lampowy układ ARW? Aby to wyjaśnić, należy poznać właściwości pentody regulacyjnej.

## Pentoda regulacyjna

Różnice między działaniem „zwykłej” pentody napięciowej i pentody regulacyjnej ilustrują (rys. 1) charakterystyki przejściowe (charakterystyką przejściową pentody jest zależność prądu anodowego napięcia siatki przy określonych napięciach na pozostałych elektrodach: anodzie, siatce ekranującej i siatce hamującej) obu tych lamp. Widać na nich wyraźnie, że lampa EF89 ma charakterystykę przejściową o znacznie mniejszym nachyleniu (wydłużoną). Jest to cecha wszystkich pentod regulacyjnych (zwanymi także selektodami albo pentodami z długą charakterystyką).

Wzmocnienie napięciowe pentodowego wzmacniacza oporowego oblicza się z zależności:

$$K_u = S_a \cdot R_a,$$

gdzie:

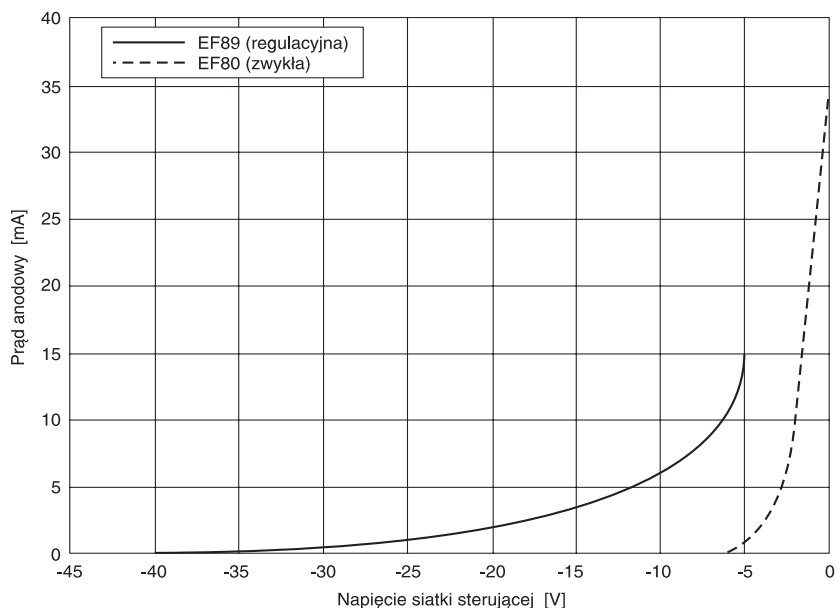
$K_u$  - wzmacnienie napięciowe w [V/V],

$S_a$  - nachylenie charakterystyki przejściowej (konduktancja wzajemna) w [mA/V],

$R_a$  - oporność obciążenia w [kΩ].

Nachylenie charakterystyki przejściowej jest definiowane jako stosunek zmiany prądu anodowego do zmiany napięcia na siatce sterującej przy ustalonych napięciach na pozostałych elektrodach.

Jak widać na rys. 1, dla przykładowej pentody zwykłej (EF80) parametr  $S_a$  nie zmienia się znacznie w zależności od napięcia siatki pierwszej (większe zmiany następują tylko w okolicy napięcia odcięcia) z racji dużej liniowości tej charakterystyki. Dla lampy regulacyjnej EF89 nachylenie zmienia się w szerokim przedziale wartości wraz ze zmianami napięcia siatki pierwszej, co świadczy o tym, że charakterystyka tej lampy cechuje się dużą nieliniowością. Z podanego wzoru wynika, że wzmacnienie napięciowe wzmacniacza ze zwykłą pentodą bardzo mało zależało od napięcia polaryzacji siatki sterującej. Wzmacniacz z pentodą regulacyjną wykazuje natomiast silną zależność wzmacnienia napięciowego w zależności od napięcia polaryzacji siatki (a więc pun-



Rys. 1. Charakterystyki przejściowe pentod: regulacyjnej i standardowej przy  $U_G=U_{s2}=200\text{ V}$  i  $U_{s3}=0\text{ V}$

ktu pracy na charakterystyce przejściowej). Zatem pentoda regulacyjna umożliwia skonstruowanie wzmacniacza, którego wzmocnienie napięciowe jest zależne od spoczynkowej wartości w punkcie pracy napięcia polaryzacji siatki sterującej.

Na rys. 2a przedstawiono uproszczony schemat takiego wzmacniacza, zaś na rys. 2b zilustrowano, w oparciu o charakterystykę przejściową lampy, przebiegi prądu anodowego (a więc i napięcia na obciążeniu) dla różnych spoczynkowych punktów pracy A i B. Przy takiej samej amplitudzie napięcia wejściowego i tym samym obciążeniu, wzmocnienie dla punktu B jest znacznie większe niż dla A.

Przy dużym ujemnym napięciu regulacyjnym  $U_{reg1}$  spoczynkowy punkt pracy lampy znajduje się w punkcie A. W otoczeniu tego punktu nachylenie charakterystyki jest małe, więc wzmocnienie też jest małe. Przy małym ujemnym napięciu regulacyjnym  $U_{reg2}$  punkt pracy przesuwamy do punktu B. Nachylenie charakterystyki w jego otoczeniu jest duże, więc wzmocnienie też jest duże.

Jak wspomniano wcześniej, lampy regulacyjne stosowano w układach ARW w odbiornikach AM. Regulowanym wzmacniaczem był najczęściej jeden stopień (pierwszy) wzmacniacza pośredniej częstotliwości. Czasami ARW obejmowała

także wzmacniacz wielkiej częstotliwości i inne stopnie wzmocnienia. Regulacyjne napięcie polaryzacji siatki takiego stopnia wzmocnienia uzyskiwano bezpośrednio z detektora albo z bardziej rozbudowanych układów, które umożliwiały uzyskanie ARW np. z progiem zadziałania. Tego rodzaju ARW, gdy źródło napięcia regulującego znajduje się za wzmacniaczami w.c.z. i p.c.z. jest regulacją wstecz. Detektor musiał być włączony tak, że uzyskiwano ujemne względem masy napięcie regulacyjne. Ponadto, napięcie to było odfiltrowywane tak, by składowa m.c.z. nie powodowała zmian wzmocnienia. W przeciwnym przypadku następowalaby niepożądana kompresja dynamiki sygnału, polegająca na tym, że głośnie fragmenty audycji byłyby nienaturalnie ściśnięte.

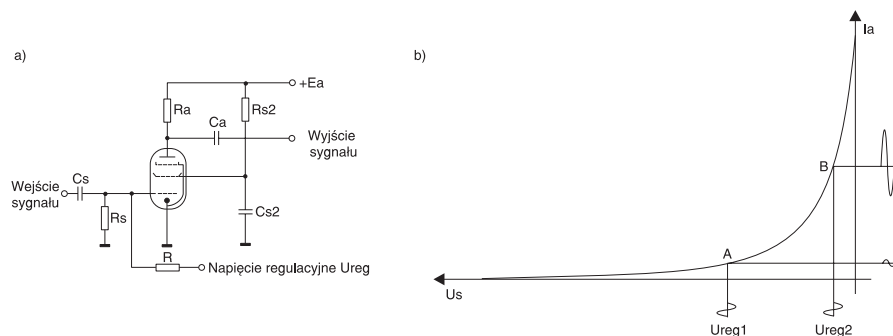
W nielicznych układach ARW obejmowała wzmacniacz małej częstotliwości-była to regulacja

w przód, gdyż napięcie regulacyjne było uzyskiwane przed wzmacniaczem m.c.z.

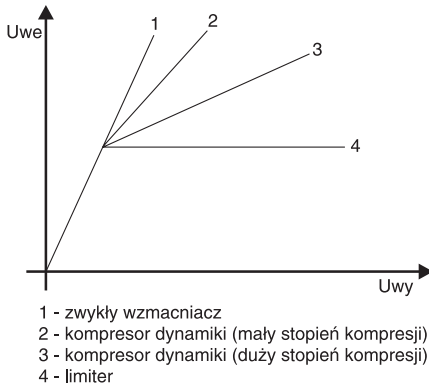
Pozostaje jeszcze wyjaśnić, dlaczego pentody regulacyjne nie nadają się do zwykłych układów wzmacniaczy napięciowych. Otóż w takich układach mamy jeden spoczynkowy punkt pracy, który jest ściśle ustalony, a zmienia się jedynie amplituda napięcia sterującego (regulacja potencjometrem siły głosu). Z rys.2b wynika, że we wzmacniaczu z pentodą regulacyjną wystąpiłyby znaczne zniekształcenia nieliniowe, gdyby amplituda napięcia sterującego miała dużą wartość. Takie pentody mogą ewentualnie pracować przy małych amplitudach sygnału sterującego, a więc we wzmacniaczach wstępnych. Jednak ze względu na znaczne szumy pentod nie jest to dobre rozwiązanie. Do stopni wstępnych można stosować pentody niskoszumne. Jednak do układów wzmacniaczy wstępnych lepiej używać układów triod.

### Kompresor

Pentody regulacyjne były stosowane we wzmacniaczach do automatycznej regulacji wzmocnienia. Postanowiłem je zastosować w układzie regulacji wzmocnienia - w lampowym kompresorze dynamiki sygnału akustycznego. Kompresor należy do tzw. procesorów dźwięku. Wzmocnienie kompresora maleje po przekroczeniu pewnej wartości sygnału sterującego. Wartość spadku wzmocnienia można regulować zmieniając stopień kompresji. Można także regulować próg zadziałania (poziom sygnału, przy którym zaczyna się kompresja), a ponadto czasu opóźnienia zadziałania i odpuszczenia. Chodzi



Rys. 2. Schemat wzmacniacza o regulowanym wzmocnieniu z pentodą regulacyjną (a) i przebiegi prądu anodowego dla różnych punktów pracy (b)



Rys. 3. Charakterystyki  $U_{wy}=f(U_{we})$  wzmacniacza i ograniczników różnego typu

o to, by kompresja nie następowała za szybko po przekroczeniu poziomu progu zadziałania i nie zanikała zbyt szybko, bo wówczas słychać wyraźne „pompowanie“ dźwięku, objawiające się chwilowym ściszeniem muzyki w takt np. uderzeń perkusji.

Kompresory są używane między innymi przy montażu audycji (stopniowo wychodzą z użycia, gdyż montaż audycji przeprowadza się obecnie komputerowo), a także przez niektórych gitarzystów.

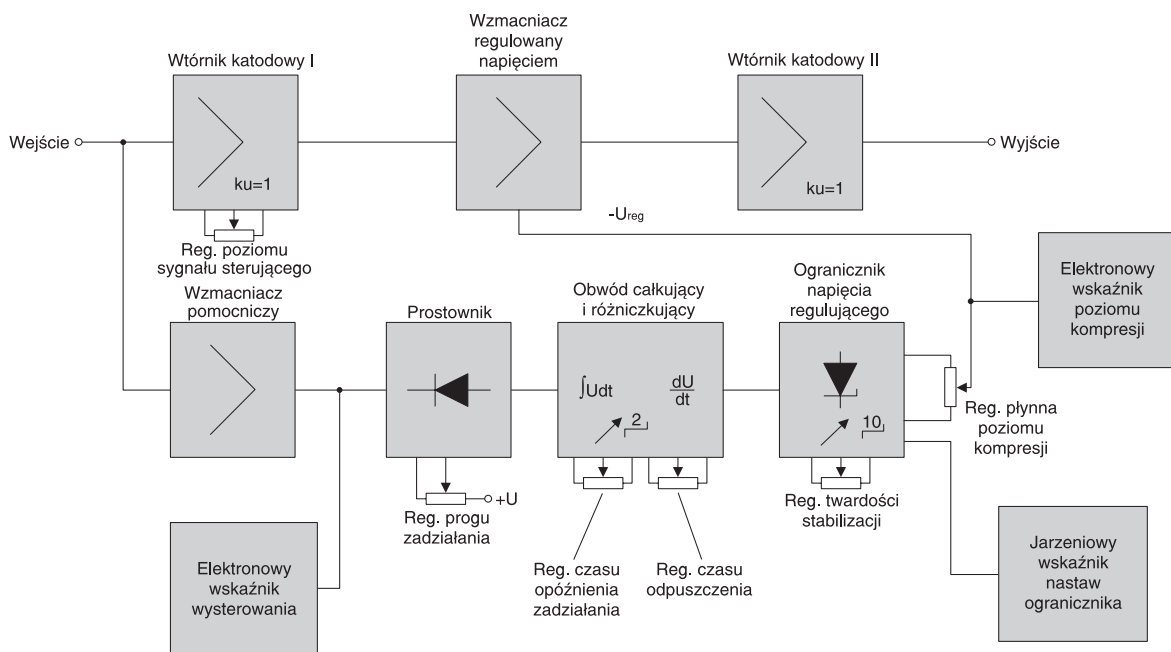
Pewną odmianą kompresora jest limiter. Tego rodzaju układy pracują w magnetofonach, gdzie przekroczenie dopuszczalnego poziomu zapisu powoduje wzrost zniekształceń. Charakterystyki kompresora dynamiki przedstawiono na rys. 3.

**Opis działania układu**

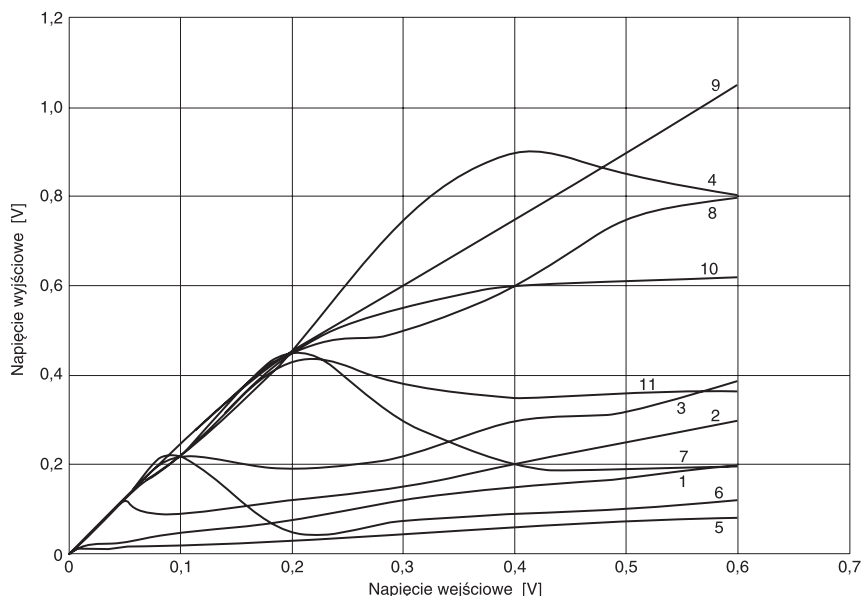
Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy prezentowanego kompresora dynamiki. Działa on następująco: sygnał wejściowy jest doprowadzony jednocześnie do wtórnika katodowego I. Przewidziano regulację poziomą sygnału doprowadzanego do wtórnika I. Sygnał z wtórnika I jest doprowadzony do wzmacniacza o wzmocnieniu regulowanym napięciem  $-U_{reg}$ , a stąd do wtórnika II i wyjścia. Opisaną wyżej ścieżką sygnału sterującego jest właściwie główną ścieżką kompresora. Napięcie regulujące  $-U_{reg}$  jest otrzymywane w innym obwodzie. Sygnał wejściowy jest doprowadzony do wzmacniacza pomocniczego. Po wzmocnieniu sygnał jest doprowadzony do elektronowego wskaźnika wysterowania (magicznego oka) i do prostownika. Możliwa jest regulacja poziomu napięcia, przy którym zaczyna się prostowanie. Oznacza to, że napięcie regulujące pojawia się na wyjściu prostownika dopiero po przekroczeniu pewnego poziomu sygnału wejściowego. W ten sposób jest możliwa regulacja progu zadziałania kompresji. Wyprostowany sygnał zostaje uśredniony w układzie całkującym i przechodzi przez układ różniczkujący. Poprzez zmianę parametrów tych obwodów jest możliwa regulacja czasu opóźnienia zadziałania (obwód całku-

jący) i odpuszczenia kompresji. Przewidziano regulację skokową (2-stopniową) i ciągłą stałych czasowych tych obwodów. Tak otrzymane napięcie regulacyjne jest poddawane ograniczeniu, przy czym przewidziano 10 nastaw ograniczania. Przełącznik nastaw ograniczania jest dwusekcyjny. Druga sekcja jest wykorzystana do sterowania pracą jarzeniowego wskaźnika nastaw (Nixie). Oprócz tego istnieje możliwość regulacji „twardości“ ograniczania-stabilizacji. Napięcie regulacyjne  $-U_{reg}$  może być płynnie regulowane. Poziom napięcia  $-U_{reg}$  jest wskazywany przez elektronowy wskaźnik poziomu kompresji (magiczne „oko“).

Może dziwić liczba zastosowanych elementów regulacyjnych do regulacji ciągłej i skokowej. Zależało mi jednak na tym, aby można było uzyskiwać różne charakterystyki kompresora - przedstawiono je na rys. 5. Widać, że prezentowany kompresor może pracować jako limiter (charakterystyki 2, 3 i 11) albo wręcz jako układ wyciszania (6, 7). Natomiast charakterystyki 8, 9 i 10 są zbliżone do charakterystyk typowego kompresora. W tab. 1 zamieszczono "nastawy" niektórych parametrów przy wyznaczaniu charakterystyk z rys. 5. Potencjometr czasu opóźnienia zadziałania był ustawiony we wszystkich przypadkach na minimalną wartość rezystancji



Rys. 4. Schemat blokowy lampowego kompresora sygnału audio



Rys. 5. Wybrane charakterystyki  $U_{wy} = f(U_{we})$  kompresora (sygnał testowy o częstotliwości 1 kHz)

(a więc i stałej czasu), potencjometr czasu odpuszczenia na maksymalną wartość, a przełącznik stałej czasowej (W1) na maksymalną wartość (kondensator C15).

Schemat elektryczny kompresora pokazano na rys. 6. Pierwsza część lampy V1 pracuje w układzie i wtórnika katodowego ( $K_u \approx 1V/V$ ). Potencjometr P1 umożliwi regulację poziomu sygnału doprowadzonego do wtórnika, a tym samym do wzmacniacza. Dzięki temu można dobrać poziom sygnału tak, aby nie występowały w kompresorze duże zniekształcenia nieliniowe przy dużej amplitudzie napięcia sterującego. Zastosowanie wtórnika I jest niezbędne, gdyż nie można potencjometru poziomu sygnału (siły głosu) P1 włączyć w obwodzie siatki pierwszej lampy V2. Takie włączenie powodowałoby niepożądaną zmianę barwy dźwięku pod-

czas regulacji wzmocnienia. Lampa V2 jest pentodą regulacyjną, pracującą w układzie wzmacniacza o wzmocnieniu regulowanym napięciem. Poprzez rezystor R4 jest podawane na siatkę tej lampy napięcie regulujące. Lampa V2 pracuje przy niskim napięciu anodowym i niskim napięciu siatki osłonnej (drugiej). Dzięki temu lampa pracuje z nieco „krótszą“ charakterystyką przejściową niż pokazano na rys. 1. Jest to istotne, ponieważ uzyskanie napięcia regulującego rzędu 20...30 V sprawiałoby duże trudności. Druga połowa lampy V1 pracuje we wtórniku II, który zapewnia małą rezystancję wyjściową układu. Lampa V3 stanowi dwustopniowy wzmacniacz pomocniczy. Sygnał z tego wzmacniacza jest podawany na dwa prostowniki: pierwszy z diodą D2, zasilający lampę V5 (wskaźnik wysterowania-

**WYKAZ ELEMENTÓW**

**Rezystory**

- R1, R8: 22kΩ/0,6W 1%
- R2, R6, R9, R16, R19: 510Ω/0,6W 1%
- R3: 10 kΩ/0,6W 1%
- R4, R5, R12, R13, R29: 470kΩ/0,6W 1%
- R7, R14, R17, R27: 1MΩ/0,6W 1%
- R10: 5,1kΩ/0,6W 1%
- R11, R20: 15 kΩ/0,6W 1%
- R15: 100kΩ/0,6W 1%
- R18, R22, R30: 47 kΩ/0,6W 1%
- R21: 560 kΩ/0,6W 1%
- R23, R24: 220 kΩ/0,6W 1%
- R25: 5,6 kΩ/0,6W 1%
- R26: 2,4 kΩ/0,6W 1%
- R28: 330 kΩ/0,6W 1%
- P1: 1MΩ potencjometr logarytmiczny
- P2, P3, P4: 1MΩ potencjometr liniowy
- P5: 47 kΩ potencjometr liniowy
- P6: 220 kΩ potencjometr liniowy
- P7: 1MΩ potencjometr montażowy

**Kondensatory**

- C1, C2, C4, C10: 47 nF/400V
- C3, C9, C11: 47μF/25V
- C5: 10μF/350V
- C6: 1μF/400V
- C7, C8: 22μF/400V
- C12, C18, C21: 100nF/400V
- C13: 150nF/400V
- C14: 1μF/100V
- C15: 4,7μF/100V
- C16, C17: 100μF/400V
- C19: 220μF/400V
- C20: 10nF/400V

**Półprzewodniki**

- D1, D2: 1N4007
- D3: C1V2
- D4: C2V4
- D5: C2V7
- D6: C3V9
- D7: C4V7
- D8: C5V6
- D9: C6V8
- D10: C8V2
- D11: C10
- D12: C12

Pr1: mostek prostowniczy 1A/800V

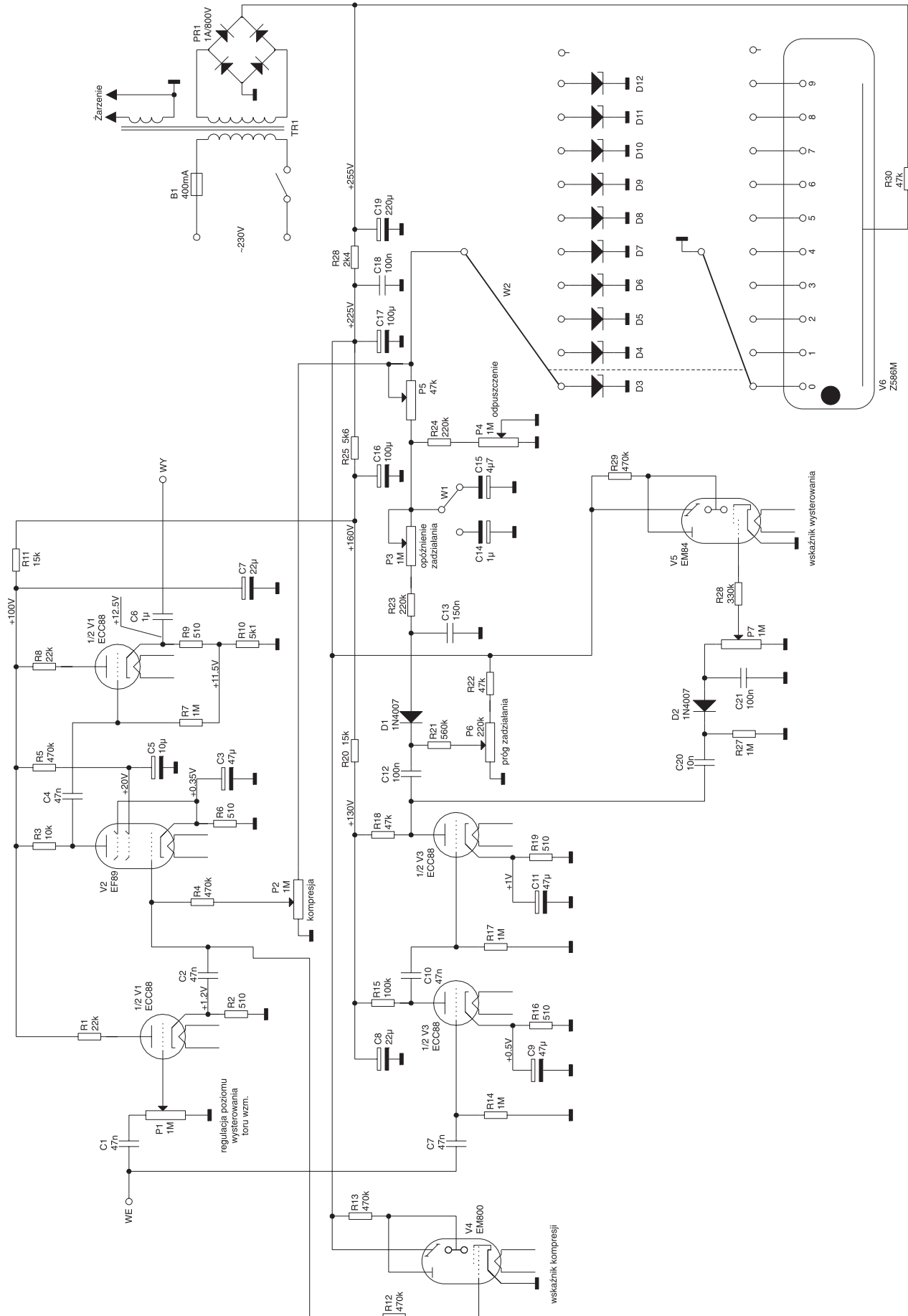
**Lampy**

- V1, V3: ECC88
- V2: EF89
- V4: EM800 lub EM 87
- V5: EM84, EM800 lub EM 87
- V6: Z566M lub LC-631

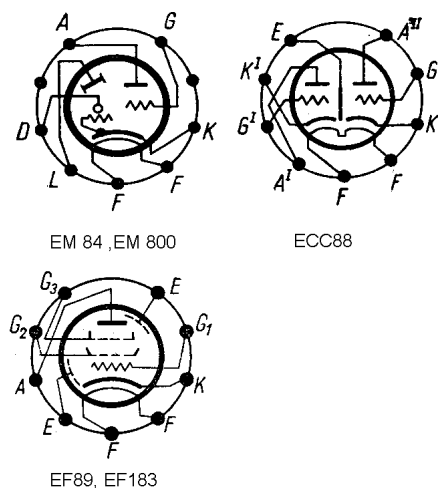
**Różne**

- 2 gniazda chinch
- B1: bezpiecznik 400 mA
- W1: przełącznik 2-pozycyjny 1-sekcyjny
- W2: przełącznik 12-pozycyjny 2-sekcyjny
- W3: 2-pozycyjny
- Transformator wg opisu

| Tab. 1. Nastawy parametrów regulatorów kompresora przy wyznaczaniu charakterystyk pokazanych na rys. 5 |                       |                |                       |                              |
|--|-----------------------|----------------|-----------------------|------------------------------|
| Nr charakterystyki   | Wskazanie lampy Nixie | Próg kompresji | Twardość ograniczania | Ustawienie poziomu kompresji |
| 1  | 0                     | 0 mV           | minimalna             | maksymalne                   |
| 2  | 0                     | 50 mV          | minimalna             | maksymalne                   |
| 3  | 0                     | 100 mV         | minimalna             | maksymalne                   |
| 4  | 0                     | 400 mV         | minimalna             | maksymalne                   |
| 5  | 9                     | 0 mV           | minimalna             | maksymalne                   |
| 6  | 9                     | 100 mV         | minimalna             | maksymalne                   |
| 7  | 9                     | 200 mV         | minimalna             | maksymalne                   |
| 8  | 9                     | 200mV          | maksymalna            | maksymalne                   |
| 9  | 9                     | 200mV          | maksymalna            | 1/2                          |
| 10   | 6                     | 200mV          | maksymalna            | 3/8                          |
| 11   | 9                     | 200mV          | maksymalna            | 3/8                          |



Rys. 6. Schemat elektryczny lampowego kompresora dynamiki sygnału audio



Rys. 7. Rozkład wyprowadzeń lamp próżniowych zastosowanych w urządzeniu

poziomu sygnału na wejściu), drugi z diodą D1, wytwarzający napięcie regulujące. Listki lampy V5 reagują stosunkowo wolno na zmiany sygnału sterującego, co jest spowodowane znaczną pojemnością kondensatora C21 i dużą opornością potencjometru P7.

Z potencjometru P6 jest uzyskiwane napięcie polaryzacji diody D1 (w kierunku zaporowym). To napięcie powoduje, że prostownik zaczyna przewodzić, gdy poziom sygnału przekroczy wartość napięcia polaryzacji. Innymi słowy, potencjometr P6 jest regulatorem progu zadziałania. Uzyskane napięcie regulujące jest filtrowane przez kondensator C13. Rezystor R23, potencjometr P3 i kondensator C14 (lub C15) tworzą obwód całkujący. Stała czasowa tego obwodu zawiera się od 0,22 s do 1,22 s (lub od około 1 s do około 5,7 s). Obwód odpuszczenia okreś-

lający czas (zależny od jego stałej czasowej) tworzą elementy: C14 (C15), R24, P4 i P2. Stała czasowa tego obwodu od ok. 0,18 s do 0,55 s (lub 0,84 s do 4 s).

Napięcie regulujące jest ograniczane za pomocą jednej z dziewięciu diod stabilizacyjnych. Przy ostatnim położeniu przełącznika W2 nie jest włączana żadna dioda. Uzyskuje się wtedy największą wartość napięcia regulującego (największa kompresja). Dzięki ograniczeniu napięcia regulującego uzyskuje się quasi-prostoliniową charakterystykę za kolanem (rys. 5). Szeregowo z diodą stabilizacyjną jest włączony potencjometr P5. Umożliwia on „osłabienie“ wpływu stabilizacji napięcia regulującego, przez co uzyskuje się większą lub mniejszą nierównomierność charakterystyki za kolanem. Potencjometr P2 umożliwia płynną regulację napięcia  $U_{reg}$ .

Lampa V4 jest w istocie wskaźnikiem napięcia regulującego. Pożądana jest duża czułość tej lampy. Z tego względu odpowiednie są lampy typu EM800 i EM87. Lampa Nixie V6 jest wskaźnikiem nastawy ogranicznika.

Układ jest zasilany z transformatora sieciowego. Wyprostowane przez mostek Graetz'a napięcie anodowe jest wygładzane w wieloogniowym filtrze RC, złożonym z elementów C7, C8, C16, C17, C18, C19, R11, R25 i R26.

### Montaż i uruchomienie

Układ modelowy zbudowano na podstawie z blachy ocynkowanej, wygiętej w „U“ grubości 1,5 mm. Szerokość podstawy 200 mm, długość 400 mm, wysokość 60

mm. Lampy V1, V2 i V3 powinny być ekranowane metalowymi kubkami. Przewody dołączone do siatek tych lamp także powinny być ekranowane.

Transformator sieciowy powinien dostarczać napięcie 6,3 VAC do żarzenia lamp (natężenie 2 A), napięcie anodowe 190 VAC (natężenie 60 mA). Rozkład wyprowadzeń lamp znajduje się na rys. 7.

Układ powinien działać po prawidłowym montażu. Należy jedynie potencjometr P7 ustawić tak, aby przy sygnale wejściowym 1 V (wartość skuteczna) i częstotliwości 1000 Hz świecą listki lampy V5 prawie zeszyły się. Po przekroczeniu napięcia sterującego 1 V i ustawieniu potencjometru P1 na maksimum, mogą wystąpić zniekształcenia nieliniowe. To niebezpieczeństwo będą sygnalizowały schodzące się listki lampy V5, dlatego warto przeprowadzić regulację P7 poziomu sygnału na siatce V5.

Jeśli ktoś nie chce „świecących bajerów“ może znacznie uprościć układ kompresora usuwając z niego elementy: V4, V5, V6, R12, R13, R27, R28, R29, R30, D2, P7, C20 i C21. Przełącznik W2 może być wtedy jednosekcyjny.

Działanie kompresora możemy wypróbować włączając go między źródło sygnału a wzmacniacz. Najlepiej, jeśli sygnał będzie się charakteryzował dużymi zmianami dynamiki. Wtedy będzie można łatwo zauważyć przy pewnych ustawieniach elementów regulacyjnych, że następuje wyrównanie dynamiki.

**Aleksander Zawada, AVT**  
[aleksander.zawada@ep.com.pl](mailto:aleksander.zawada@ep.com.pl)