

Inż. ALEKSANDER BANASZKIEWICZ

## UKŁAD ULTRALINEARNY WZMACNIACZA MOCY M. CZ.

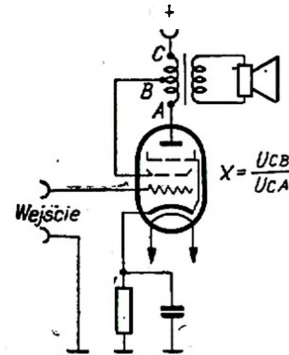
**W**DZIEDZINIE projektowania wzmacniaczy mocy m. cz. zyskał sobie prawo obywatelstwa i niemały rozgłos wprowadzony przed kilku laty układ, któremu jego amerykańscy popularyzatorzy nadali dość dziwną nazwę „ultralinearnego stopnia wyjściowego“. Pomijając kwestię trafności doboru tego określenia (które zresztą spotkało się z krytyką i zastrzeżeniami ze strony prasy angielskiej) — sam układ jest interesujący z dwóch względów. Po pierwsze dlatego, iż przy stosunkowej prostocie rozwiązania zapewnia wyraźną poprawę jakości działania wzmacniacza (czego potwierdzeniem jest stosowanie go w przemysłowych wzmacniaczach i radiodbiornikach), a po drugie — spotkał się, zwłaszcza początkowo, z dość rozbieżną oceną, w której obok głosów aprobaty nie brak było krytycznej i chłodnej rezerwy. Ponadto niektóre właściwości wzmacniacza związane z mechanizmem działania układu stały się przedmiotem dyskusji świadczącej o tym, że mimo pozorów prostoty działania zawiera on wiele niejasności i stwarza możliwość odmiennej interpretacji.

### Opis układu

Istota układu polega na zastosowaniu w stopniu końcowym wzmacniacza m. cz. pentody, której siatka ekranowa zasilana jest z odczepu pierwotnego uzwojenia transformatora wyjściowego — rys. 1.

Mamy tu zatem do czynienia ze sprzężeniem zwrotnym anoda-siatka ekranowa, gdyż część pierwotnego uzwojenia transformatora stanowi wspólne obciążenie zarówno dla anody jak i siatki ekranowej. Współczynnik sprzężenia zależy tu oczywiście od położenia odczepu i osiąga maksymalną wartość w jednym ze skrajnych położenia odczepu, tj. wówczas gdy siatka ekranowa jest podłączona do anody

(punkt A na rys. 1). W tym przypadku lampa pracuje jako trioda, natomiast w drugim skrajnym położeniu odczepu (punkt C na rys. 1) sprzężenie jest równe zero i lampa pracuje jako pentoda. Wynika stąd, że pomiędzy tymi dwoma skrajnymi przypadkami praca lampy jest pośrednia pomiędzy pracą w układzie triodowym i pentodowym. Istotnie,



Rys. 1. Schemat końcowego stopnia asymetrycznego w układzie wzmacniacza UL

zjęte oscylograficznie charakterystyki  $I_a$   $U_a$  lampy przy różnym współczynniku sprzężenia obrazują wyraźnie to przejście od warunków triody do pentody (rys. 2).

### Analiza pracy układu

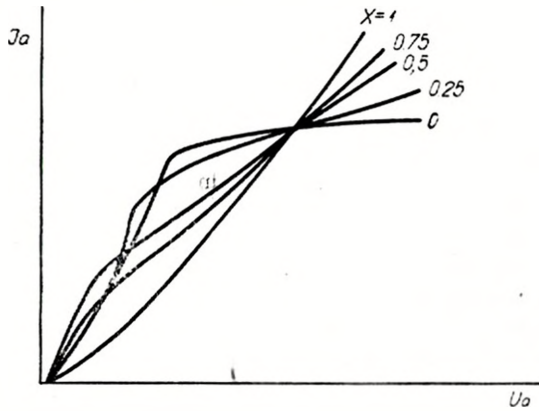
W celu określenia wzmocnienia omawianego stopnia przyjmujemy następujące oznaczenia:

- $u_s$  — napięcie wejściowe przyłożone na siatkę sterującą;
- $u_a$  — napięcie wyjściowe na oporniku obciążenia  $R_a$ ;
- $u_e$  — napięcie zmienne na siatce ekranowej;

$k$  — współczynnik wzmocnienia lampy  $= \frac{u_a}{u_s} = s \cdot \varrho$ ;

$$m = \frac{u_c}{u_s}, \quad \text{stąd} \quad \frac{u_a}{u_c} = \frac{k}{m};$$

$x$  — część napięcia wyjściowego lampy przyłożona na siatkę ekranową.



Rys. 2. Charakterystyki  $I_a - f(U_a)$  przy różnych wartościach  $x$  (przy przesuwaniu punktu cdczepu na uzwojeniu pierwotnym transformatora)

Prąd anodowy wywołany przez przyłożenie zmiennego napięcia wejściowego  $u_s$  na siatkę sterującą lampy jest równy

$$i_a'' = u_s \frac{k}{\rho + R_a}$$

Składowa prądu anodowego wywołana działaniem napięcia  $x \cdot u_a$  na siatkę ekranową wynosi:

$$i_a' = -x u_a \frac{k}{m(\rho + R_a)}$$

Całkowite napięcie wyjściowe jest sumą napięć wywołanych przepływem składowym prądu  $i_a'$  i  $i_a''$  przez oporność obciążenia i wyraża się zależnością:

$$U_a = \left[ U_s \frac{k}{\rho + R_a} - x U_a \frac{k}{m(\rho + R_a)} \right] R_a$$

Stąd można określić wzmocnienie stopnia:

$$K = \frac{U_a}{U_s} = \frac{\frac{k R_a}{R_a + \rho}}{1 + x \frac{k}{m} \frac{R_a}{\rho + R_a}} = K \frac{R_a}{R_a + \rho + x \frac{k}{m} R_a} =$$

$$= K \frac{1}{1 + \frac{\rho}{R_a} + x \frac{k}{m}}$$

W skrajnych przypadkach, gdy  $x = 0$  (lampa pracuje bez sprzężenia zwrotnego)

$$\frac{U_a}{U_s} = \frac{k R_a}{\rho + R_a},$$

coz gdy  $x = 1$  (maksymalne sprzężenie zwrotne na siatkę ekranową, charakterystyka lampy jest analogiczna do charakterystyki triody)

$$\frac{U_a}{U_s} = \frac{\frac{k R_a}{\rho + R_a}}{1 + \frac{1}{m} \left( \frac{k R_a}{\rho + R_a} \right)}$$

Oporność wyjściowa lampy ze sprzężeniem zwrotnym na siatkę ekranową jest równa

$$R_w = \frac{k'}{S}$$

gdzie  $k'$  jest współczynnikiem wzmocnienia w układzie ze sprzężeniem zwrotnym i wynosi

$$k' = \frac{k}{1 + x \frac{k}{m}}$$

w założeniu, że gdy  $R_a \rightarrow \infty$  to  $\frac{R_a}{\rho + R_a} \rightarrow 1$

Z wyprowadzonych wyżej zależności widać, że wzmocnienie stopnia UL jest tym mniejsze im większe jest  $x$ , to znaczy im większe jest sprzężenie zwrotne na siatkę ekranową (im bardziej odczep pierwotnego uzwojenia transformatora wyjściowego jest przesunięty w kierunku anody). Podobnie ze wzrostem sprzężenia zwrotnego (to znaczy ze wzrostem  $x$ ) maleje oporność wyjściowa wzmacniacza.

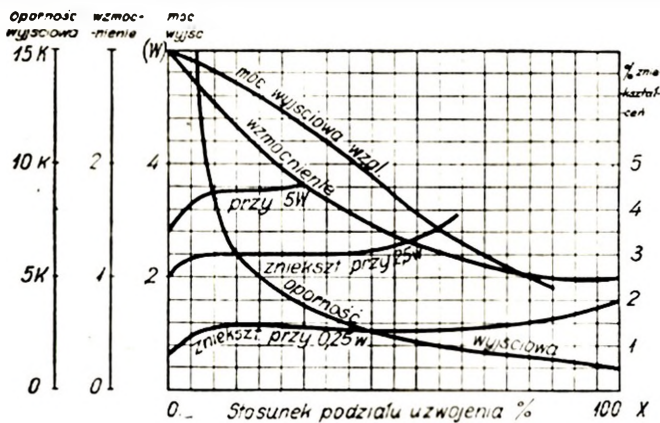
#### Charakterystyka wzmacniacza UL

Przy wyborze najkorzystniejszego stopnia sprzężenia zwrotnego (praktycznie — przy wyborze odczepu, z którego zasila się siatkę ekranową) bierze się pod uwagę moc wyjściową wzmacniacza oraz zniekształcenia nieliniowe. Pełny obraz zachowania się wzmacniacza w układzie UL dają przedstawione na rys. 3 charakterystyki mocy wyjściowej i zawartości harmonicznych, wzmocnienia oraz oporności wyjściowej lampy w funkcji stopnia sprzężenia zwrotnego.

Przedstawione tu zależności odnoszą się do stopnia jednolampowego (asymetrycznego) i wykazują, że układ UL przy zastosowaniu pojedynczej tetrody (pentody) nie daje w zasadzie korzyści w porównaniu z innymi układami stosującymi sprzężenie zwrotne np. na siatkę sterującą. Bowiem w układzie jednolampowym występuje na wyjściu wzmacniacza druga harmoniczna sygnału wejściowego, która w dużym stopniu wpływa na wielkość zniekształceń nieliniowych wzmacniacza. Całkiem inaczej natomiast przedstawia się charakterystyka zniekształceń nieliniowych w układzie przeciwsobnym, tzn. w symetrycznym układzie UL, pokazana na rys. 4.

Dzięki wyeliminowaniu w tym układzie drugiej harmonicznej (układ przeciwsobny) oraz dzięki właściwości ujem-



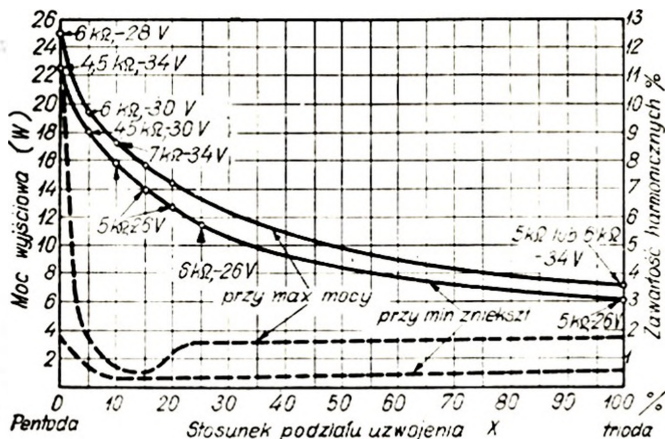


Rys. 3. Charakterystyki: mocy wyjściowej, zawartości harmonicznych, wzmacnienia oraz oporności wyjściowej lamp w funkcji  $x$  w %.

nego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza UL zniekształcenia nieliniowe są ograniczone do małej wartości. Charakterystyki przedstawione na rys. 4 zostały sporządzone przy doborze warunków pracy układu zapewniających: a) maksymalną moc wyjściową, b) minimalne zniekształcenia nieliniowe. Jak wynika z ich przebiegu — istnieje w obu przypadkach taki punkt odczepu (wyrażony na osi odciętych jako procent całkowitego uzwojenia pierwotnego), któremu odpowiada minimum zniekształceń. Zupełnie wyraźne minimum występuje na charakterystyce (a), to znaczy przy zachowaniu maksymalnej mocy. Odpowiada ono odczepowi siatki ekranowej na około 15% uzwojenia pierwotnego (ściśle biorąc jednej połowki całkowitego pierwotnego uzwojenia transformatora wyjściowego). W drugim przypadku (b) jest ono bardzo niewyraźnie zaznaczone w okolicy 20%.

#### Zalety układu UL

Na podstawie wszechstronnie przeprowadzonych pomiarów i badań<sup>1)</sup>, w wyniku których powstały charakterystyki z rys. 4, można w pełni ocenić właściwości układu UL, a zwłaszcza zdać sobie sprawę z jego zalet w stosunku do konwencjonalnych układów triodowych lub pentodowych (tetrodowych). Istotną mianowicie zaletą tego układu jest to, że umożliwia on osiągnięcie małych zniekształceń nieliniowych właściwych układom triodowym przy stosunkowo dużej sprawności zbliżonej do tej, którą się uzyskuje w układzie pentodowym. Dzięki temu układ UL pozwala na zastosowanie mniejszych lamp wyjściowych i tańszego układu zasilania przy określonej mocy wyjściowej i określonych zniekształceniach — niż to byłoby konieczne w przypadku zastosowania triod. Ponadto charakterystyki wzmacnienia przedstawione na rys. 5 wykazują dobitnie wyższość układu UL nad tetrodowym (pentodowym) w zakresie liniowości wzmacnienia i zniekształceń. Dostatecznie odchylenia od liniowości wzmacnienia w zwykłym układzie tetrodowym powodują, że przy zastosowaniu konwencjonalnego, ujemnego sprzężenia zwrotnego, głębokość tego sprzężenia będzie się zmniejszać przy osiąganiu mocy wyjściowych zbliżonych do maksymalnej, a waga właśnie wtedy, gdy duże sprzężenie zwrotne jest najbardziej pożądane. Stwierdzenie tego faktu stanowi jednocześnie replikę na uzasadnienie, jakoby w zwykłym układzie wzmacniacza z pentodowym stopniem końcowym i przy zastosowaniu ogólnego ujemnego sprzężenia zwrotnego (oczywiście przy założeniu

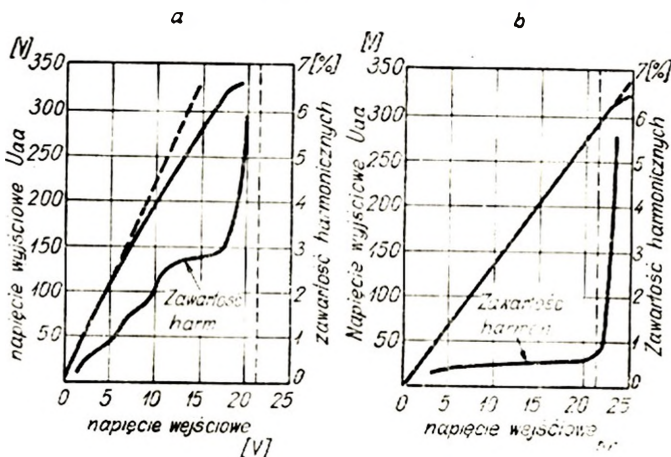


Rys. 4. Charakterystyka mocy wyjściowej i zniekształceń przeciwobnośnego wzmacniacza UL z dwiema lampami typu KT66, zdjęta przy doborze optymalnych warunków pracy (oporność obciążenia i ujemne napięcie siatki sterującej)

spełnienia odpowiedniego kryterium stabilności wzmacniacza) można osiągnąć te same rezultaty, co za pomocą układu UL.

W końcu należy podkreślić, że podwyższając odpowiednie napięcie anodowe w układzie UL można osiągnąć niemal taką samą moc wyjściową, co i przy zastosowaniu zwykłego układu pentodowego, uzyskując oczywiście znacznie mniejsze zniekształcenia.

Wyżej podane wyniki pomiarów i prób przeprowadzonych ze wzmacniaczem w układzie UL wykazały, że jakkolwiek jego mechanizm działania jest na ogół zgodny z wynikami analizy układów z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, to jednak w stosunku do nich cechuje go pewna odmienność, której interpretacja stała się przedmiotem fachowej dyskusji. W odróżnieniu bowiem od układów wzmacniaczy ze sprzężeniem zwrotnym, np. na siatkę sterującą, charakterystyki zniekształceń układu UL ujawniają wklęsłość określającą minimum zniekształceń przy pewnym położeniu odczepu pierwotnego uzwojenia transformatora wyjściowego. Stosunek podziału uzwojenia pierwotnego odpowiadający minimalnym zniekształceniom nie jest przy tym jednakowy dla różnych lamp, jednak waha się on na ogół dookoła wartości 20%. Jako jedną z najbardziej przekonujących



Rys. 5. Charakterystyki wzmacnienia i zniekształceń nieliniowych: (a) końcowego stopnia przeciwobnośnego z tetrodami KT66 bez sprzężenia zwrotnego, (b) tego samego stopnia w układzie UL z odczepem na 20% uzwojenia pierwotnego

<sup>1)</sup> Patrz artykuły w czas. Radio 5, 6, 7/1953.



interpretacji tego zjawiska uznano hipotezę, według której na wklęsły przebieg charakterystyki zniekształceń układu UL ma wpływ proces mieszania zachodzący w przypadku stosowania sprzężenia zwrotnego do innej elektrody lampy poza siatką sterującą. Potwierdzeniem — w pewnej mierze — słuszności tej hipotezy jest znane skądinąd zjawisko eliminacji dowolnej harmonicznej (w przypadku układu UL trzeciej harmonicznej) dzięki odpowiedniemu dobraniu sprzężenia zwrotnego. Jak dotąd — słuszności tej hipotezy nie potwierdzono praktycznie na drodze pomiarów z uwagi na brak dostatecznie dokładnej aparatury pomiarowej, nieodzownej przy badaniu składowych o bardzo małych amplitudach.

### Transformator wyjściowy wzmacniacza UL

Szczególnej uwagi przy budowie wzmacniacza UL wymaga konstrukcja transformatora wyjściowego. Wskutek podziału uzwojenia pierwotnego i stosowania sprzężenia zwrotnego istnieją duże możliwości powstania pasożytniczych drgań własnych w układzie. Dotyczy to zwłaszcza wyższych częstotliwości przepuszczanego pasma, przy których wyraźnie zaznacza się wpływ indukcyjności rozproszenia poszczególnych części uzwojenia transformatora. Indukcyjności te w połączeniu z pojemnościami własnymi uzwojeń, z pojemnościami lamp oraz montażowymi mogą stworzyć dogodny warunki występowania oscylacji. Na ogół w układach UL istnieją dwa zasadnicze możliwe rodzaje oscylacji: oscylacje wskutek sprzężenia skrośnego pomiędzy lampami końcowego stopnia przeciwsobnego oraz oscylacje mniej lub więcej niezależne w układzie jednej z połówek tego stopnia.

Mechanizm działania pierwszego rodzaju oscylacji jest podobny do zasady działania układów multiwibratorowych, przy czym źródłem powstawania drgań jest tu występowanie sprzężenia siatką ekranową jednej lampy a anodą drugiej oraz pomiędzy siatką ekranową drugiej a anodą pierwszej lampy przy silnie zaznaczonym wpływie indukcyjności rozproszenia uzwojenia transformatora.

Drugi rodzaj oscylacji, zachodzący w obrębie jednej z połówek układu przeciwsobnego występuje wówczas, gdy stosunek podziału pojemności własnych układu w połączeniu z indukcyjnością rozproszenia uzwojenia oraz w warunkach małego tłumienia obwodu stwarza możliwości powstania układu drgań Colpitts'a, tak jak to pokazano w schemacie zastępczym na rys. 6.

Ażby zapobiec możliwości wzbudzenia wyżej wymienionych rodzajów drgań w układzie UL, należy spełnić pewne wymagania dotyczące w pierwszym rzędzie konstrukcji transformatora wyjściowego.

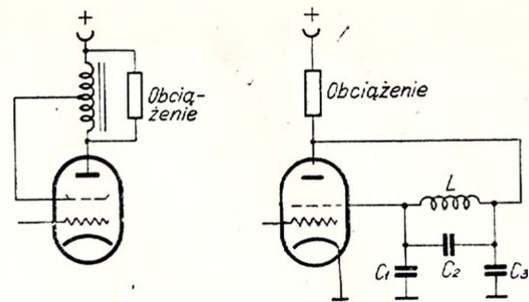
Po pierwsze: sprzężenie pomiędzy siatką ekranową i anodą tej samej lampy musi być większe od sprzężenia z anodą drugiej lampy i sprzężenia z obciążeniem.

Po drugie: należy sprowadzić do minimum sprzężenie pojemnościowe między siatkami ekranowymi a anodami przeciwnych lamp.

Po trzecie: indukcyjności rozproszenia uzwojeń anoda (1) — siatka ekranowa (1) oraz anoda (2) — siatka ekranowa (2), jak również pojemności między siatkami ekranowymi i masą powinny być jak najmniejsze.

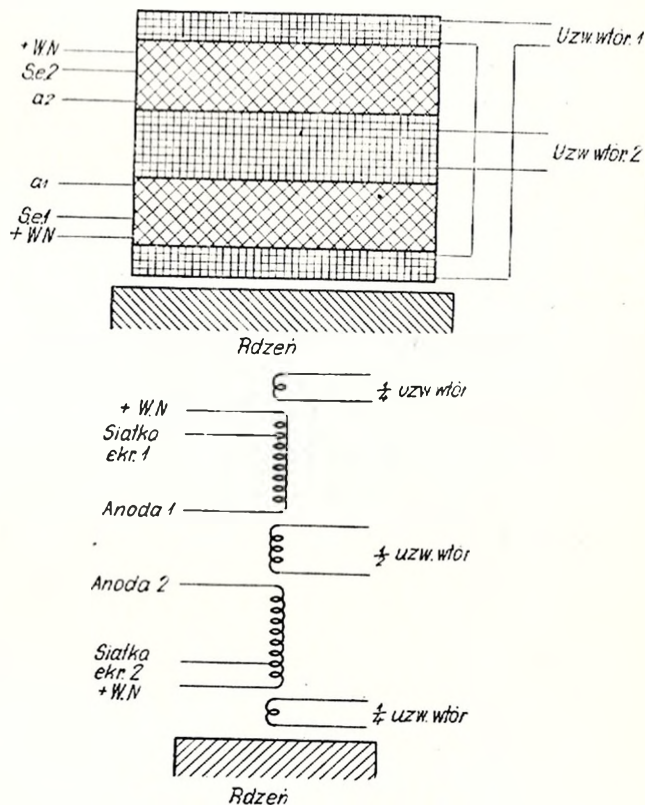
Spełnienie tych wymagań sprowadza się w głównej mierze do specjalnego podziału i wzajemnego rozmieszczenia pierwotnego oraz wtórnego uzwojenia transformatora wyjściowego.

Jako przykład rozmieszczenia uzwojeń spełniającego wyżej wymienione wymagania może służyć uproszczony schemat przedstawiony na rys. 7<sup>2)</sup>.



Rys. 6. Asymetryczny układ UL i jego schemat zastępczy przy wyższych częstotliwościach

$L$  — indukcyjność rozproszenia,  $C_1$ ,  $C_2$  i  $C_3$  — pojemności własne



Rys. 7. Uproszczony schemat rozmieszczenia uzwojeń transformatora wyjściowego układu UL

Należy tu jeszcze podkreślić, że transformatory wyjściowe układów UL posiadają na ogół mniejsze wymiary od transformatorów przeznaczonych do konwencjonalnych analogicznych wzmacniaczy tetrodowych lub triodowych.

<sup>2)</sup> Dane te zaczerpnięto z Wireless World 1/1956.

### Wykaz literatury

- D. T. N. Williamson i P. J. Walker:  
 „Amplifiers and Superlatives“, Wireless World 9/1952.  
 „Tetrodes with Screen Feedback, Wireless World 1/1956.  
 P. M. Leakey i R. B. Gilson: „UL Output Transformers“, Wireless World 1/1956.  
 D. Hafler i H. J. Koroos: „Ultra-Linear Amplifier“ Audio-Engineering 11/1955.  
 F. Langford — Smith i A. R. Chesterman:  
 „Ultra linear Amplifiers“, Radiotronics 5, 6, 7/1955.