

# ELEKTOR w EdW

## Gigant 2000

### Wzmacniacz mocy - stopień końcowy do 2kW

Większość Czytelników jest zachwycona dobrą, wręcz doskonałą jakością projektów stopni końcowych prezentowanych w ELEKTORZE. Jedyнным podnoszonym zarzutem jest moc wzmacniaczy przeznaczonych z reguły do zastosowania w mieszkaniach. Ostatni z prezentowanych projektów "High Power" liczy sobie już ponad 10 lat i był to Gigant. Postanowiliśmy zaprezentować jego następcę, potężny stopień mocy do 2kW - Gigant 2000, który oprócz tego ma do zaoferowania jakość klasy HiFi.

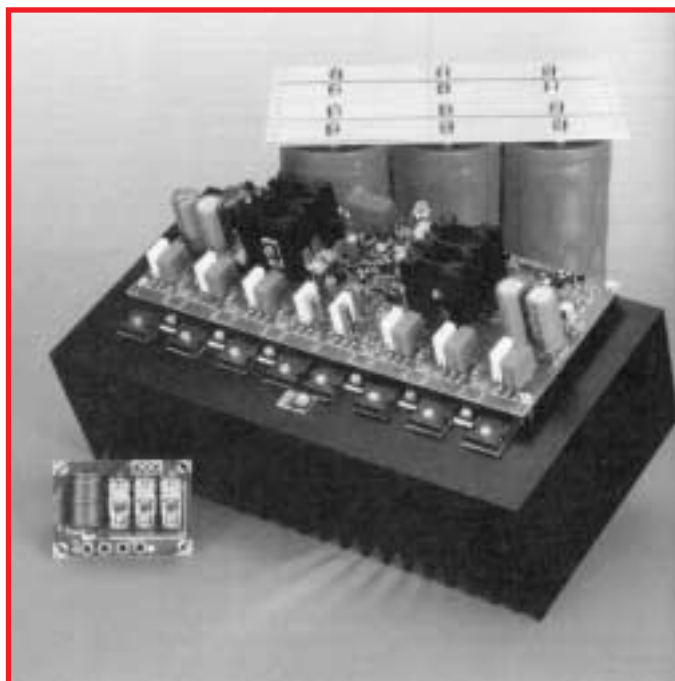
#### Gigant 2000 Dane techniczne

Moc sinusoidalna	300W dla 8Ω 500W dla 4Ω 800W dla 2Ω
Moc muzyczna w układzie mostkowym	2000W dla 4Ω
Zniekształcenia harmoniczne	0,005%
Szerokość pasma open-loop	55kHz
Szerokość pasma mocy	1,5Hz ... 220kHz

Na temat mocy wzmacniaczy można prowadzić bardzo gorące dyskusje. Do wykorzystania w warunkach domowych moc od 2 do 50W (moc ciągła) powinna całkowicie wystarczyć, oczywiście pod warunkiem, że nie stosuje się ekstremalnie słabych głośników (jak przykładowo elektrostaty). 50W to absolutnie wszystko, czego potrzeba do największego pokoju. Pod tym względem redakcja Elektora już dawno była całkowicie jednomyślna i tak samo jest obecnie. Tak więc projekty wzmacniaczy Elektora z ostat-

nich lat w mniejszym stopniu charakteryzowały się solidną mocą, a raczej wyróżniały się jakością i/lub bardzo dobrymi relacjami pomiędzy jakością a ceną.

Jednak wykorzystywanie sprzętu audio nie zawsze musi być związane z mieszkaniem. Są przecież dyskoteki, sale imprezowe i teatralne, których pomieszczenia wymagają zdecydowanie wyższej mocy wzmacniaczy. W przeszłości dosyć często powtarzały się pytania na temat nowego stopnia mocy będącego kontynuacją Giganta. Ten pro-



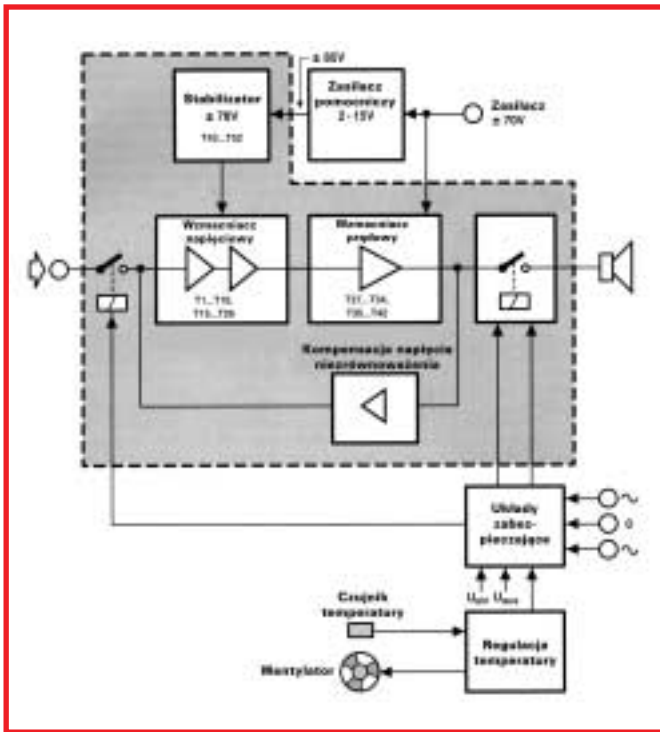
jekt stopnia końcowego 1-kW-PA opracowany w połowie lat 80 cieszył się dużą popularnością i bardzo często był powielany, nie tylko z tego powodu, że jego wielka moc nie była osiągnięta kosztem jakości dźwięku. Końcowy stopień mocy opatrzony był symbolem HiFi. Przed ponad 10 laty to wcale nie było tak oczywiste połączenie ...

#### Power to the People

Aby możliwie jak najlepiej dostosować się do indywidualnych poglądów na temat koniecznej mocy zdecydowano się na zaprojektowanie wzmacniacza w taki sposób, żeby jego moc wyjściowa była "programowalna". Przy standardowym obciążeniu 8Ω mo-

noblok Gigant dostarcza moc około 300W "w sinusie". Odpowiada to zwiększeniu ciśnienia akustycznego o 7,5dB w stosunku do wzmacniacza 50W i dla bardzo wielu zastosowań będzie to całkowicie wystarczające. Jeśli jednak wymagania odnośnie mocy idą dalej, to należy podzielić impedancję obciążenia na połowę - do 4Ω, uzyskując wówczas około 500W, co w porównaniu ze wzmacniaczem 50W daje wzrost o solidne 10dB.

To jednak jeszcze nie jest szczyt możliwości Giganta. Łącząc dwa głośniki równolegle uzyskuje się zmniejszenie impedancji do 2Ω i w takiej konfiguracji ma się bez problemów do dyspozycji



**Rys. 2. Ten uproszczony schemat blokowy pozwala na lepsze spojrzenie na sposób funkcjonowania Giganta 2000. Zasilacz pomocniczy, układy zabezpieczające i regulacja temperatury zostały umieszczone na oddzielnych płytkach.**

800W (1000W mocy muzycznej). Na zakończenie jeszcze wariant Open-Air: jest to połączenie dwóch monobloków Gigant w mostek. Wówczas moc dostarczana do 4-Ω systemu głośników osiąga wspomniane na wstępie 2000W (muzyczne). Wynik ten leży o 16dB powyżej osiągniętych wzmacniacza 50W. Wyzwolenie tylu watów nie sprawia Gigantowi 2000 specjalnych problemów. Byłoby jednak poważnym błędem traktowanie tego stopnia końcowego wyłącznie jako brutalnej maszyny do wytwarzania huków. W przypadku Giganta 2000 mamy do czynienia z rzetelnym wzmacniaczem klasy HiFi. Jak można było zauważyć w parametrach technicznych, zniekształcenia nieliniowe są wyjątkowo małe, a wartości Slew Rate (szybkość narastania napięcia wyjściowego) i szerokości pasma mocy są tak świetne, że mogą ich pozazdrościć bardzo liczne, wypieszczone wzmacniacze "pokojowe". Ta kombinacja dużej mocy i jakości HiFi sprawia, że Gigant jest

wzmacniaczem o niezwykle szerokim zakresie zastosowań.

### Moc musi się opłacać !

Jako podstawa do tego projektu posłużył nowy wzmacniacz, który został zaprezentowany w numerze majowym ELEKTOR '97 jako mały stopień końcowy o wysokiej jakości - typowy wzmacniacz do celów domowych o mocy wyjściowej 50W na 8Ω i około 85W na 4Ω. Szczególną cechą tego w pełni symetrycznego stopnia mocy było zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego prądowego (current feedback) zamiast typowego ujemnego sprzężenia zwrotnego napięciowego. W rezultacie powstał niezwykle szybki wzmacniacz o znacznym wzmocnieniu. Zarówno pod względem techniczno-pomiarowym, jak i podczas prób odsłuchowych ten stopień końcowy wywarł nadzwyczaj pozytywne wrażenie. Przy pewnych modyfikacjach ukierunkowanych na podwyższenie mocy ten mały wzmacniacz

posłużył jako baza dla nowego Giganta.

Pierwotna koncepcja małego wzmacniacza została w znacznym stopniu zachowana, jednak analizując dokładnie budowę wzmacniacza należy stwierdzić, że dwie rzeczy uległy radykalnej zmianie, a mianowicie podwyższony został zakres wysterowania i nastąpiło podwyższenie prądu wyjściowego. W sumie modyfikacja budowy była dość znaczna. Aby osiągnąć planowany pułap mocy konieczne było przynajmniej podwojenie napięcia zasilającego. Tak więc rozpoczęły się poszukiwania tranzystorów, które byłyby przystosowane do pracy przy tak wysokich napięciach. Oprócz tego, jako skutek wysokiego napięcia zasilającego, wystąpiły także znaczne spadki napięcia, a z tego powodu również problemy ze znaczną mocą strat. Także i ta sprawa wymagała podjęcia odpowiednich działań.

Ze swojej strony również i wysoki prąd wyjściowy sprawił, że konieczne stało się całkowicie nowe dobranie elementów do układu wzmacniacza. W tamtym układzie zostały mianowicie zastosowane dość dobrze znane, sterowane napięciowo tranzystory IGBT. Te doskonale tranzystory wykazywały jednak pewną istotną wadę: ze względu na dużą tolerancję napięcia bramka-emiter są one niezbyt dobrze przystosowane do pracy w układzie równoległym, a z punktu widzenia pożądanej mocy wyjściowej równolegle połączone symetryczne pary tranzystorów są nie do uniknięcia. Tak więc zamiast IGBT w układzie wzmacniacza prądowego musiały zostać zastosowane normalne tranzystory bipolarnie. Ale nawet wówczas nie zostały jeszcze rozwiązane wszystkie problemy. Tranzystory IGBT miały jeszcze jedną istotną zaletę - można je było wysterować bez większych problemów. Przejście do czysto bipolarnych tranzystorów wymagało zmiany ze sterowania napię-

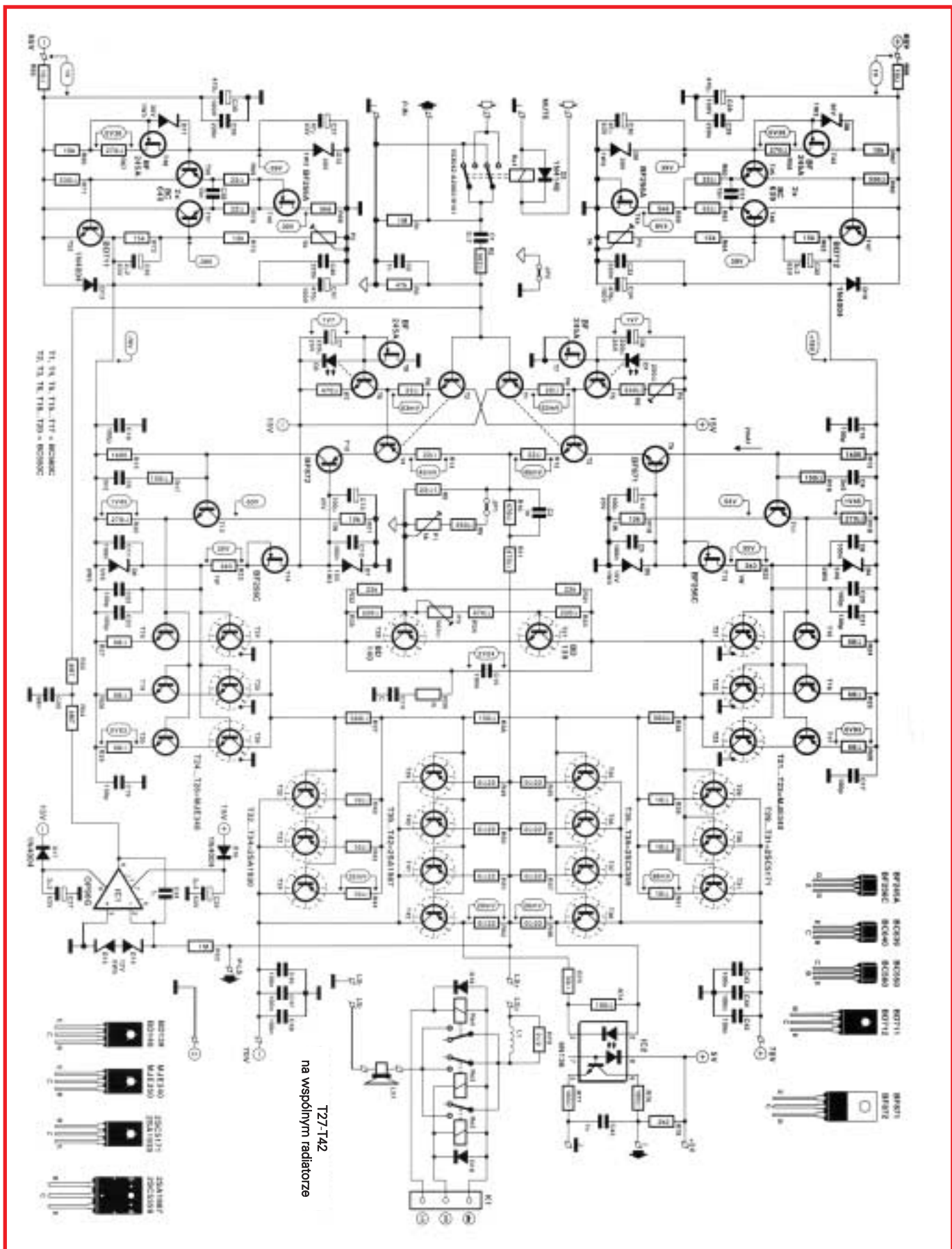
ciowego na sterowanie prądowe. Wiązało się to ze znaczną komplikacją w stopniu sterowania oraz w poprzedzającym go stopniu kaskodowym, gdyż także w tym stopniu było nieuniknione równoległe połączenie wielu tranzystorów. Szczęśliwie się złożyło, że zastosowane tranzystory mocy były zdecydowanie tańsze od IGBT, a był to istotny element wpływający na koszty, gdyż w jednym monobloku występuje ich w sumie aż 8 sztuk (!).

Kolejny element, który w przypadku Giganta 2000 odgrywał znacznie ważniejszą rolę niż w przypadku małego wzmacniacza, odnosił się do bezpieczeństwa. Przy tak wysokich napięciach i prądach końcowym może łatwo doprowadzić do poważnych i kosztownych konsekwencji. Zastosowanie dobrych zabezpieczeń w układzie DC oraz bezpieczników przeciwzwarciovych jest konieczne, ale poza tym wbudowane zostały zabezpieczenia przed przecięciem oraz czujniki temperatury, przy czym te ostatnie zostały podłączone do proporcjonalnego sterowania wentylatorami chłodzącymi.

Po tym przeglądzie najważniejszych wymagań, jakie powinny zostać spełnione, można wreszcie rzucić okiem na schemat, jak również zapoznać się z pewnymi detalami projektu.

### Przegląd

Wszystkie wspomniane aspekty modyfikacji wzmacniacza średniej mocy do postaci stopnia końcowego 2kW doprowadziły ostatecznie do powstania całkowicie nowego układu. Z tego względu należy najpierw rzucić okiem na uproszczony schemat blokowy na **rysunku 1**. Serce układu stanowią bloki wzmacniacza napięciowego i wzmacniacza prądowego, znajdujące się w centrum rysunku. We wzmacniaczu napięciowym znajduje się wzmacniacz wejściowy i stopień kaskodowy. Wzmacniacz prądowy



Rysunek 2. Duża liczba tranzystorów i dyskretnych regulatorów napięcia sprawia, że układ robi wrażenie dosyć skomplikowanego i mało przejrzystego. Dopiero po pewnym czasie można rozpoznać w nim wyjątkowo prostą budowę małego wzmacniacza mocy (pierwotzoru będącego punktem wyjścia do tego projektu).

składa się z szeregu tranzystorów sterujących i tranzystorów mocy. Numeracja elementów zasadniczo odpowiada tej, jaką zastosowano na schemacie elektrycznym, tak więc obydwa bloki łatwo można odszukać na tym schemacie.

Aby uniknąć szkodliwego offsetu stałonapięciowego na wyjściu, w układzie występuje jak zwykle pętla regulacji od wyjścia do wejścia. Głośniki są połączone ze stopniem końcowym za pośrednictwem przekładników i jest to także powszechnie spotykane rozwiązanie.

Do pewnego stopnia skomplikowane jest także zasilanie Giganta. Dwa ciężkie transformatory sieciowe na 50V oraz budząca respekt kolekcja grubych kondensatorów elektrolitycznych wygładzających napięcie służą do zasilania wzmacniacza prądowego niestabilizowanym, symetrycznym napięciem  $\pm 70V$ . Aby wzmacniacz prądowy można było wysterować aż do granic możliwości, napięcie zasilające wzmacniacza napięciowego powinno być nieco wyższe. Pomocniczy zasilacz  $\pm 15V$ , który siedzi na wielkim zasilaczu sieciowym  $\pm 70V$ , służy do skompensowania nieuniknionych spadków napięcia zasilającego. W rezultacie powstające z tych dwóch zasilaczy napięcie zasilające  $\pm 85V$  zostaje ustabilizowane na poziomie czystego napięcia roboczego  $\pm 78V$ .

Różnorodne zabezpieczenia stopnia końcowego, jak zostało to już wcześniej zaprezentowane, są bardzo liczne. Odpowiedni układ elektryczny prowadzi stałe porównywanie napięcia wejściowego i wyjściowego wzmacniacza i skoro tylko wykryje jakiś błąd natychmiast przerywa połączenie pomiędzy wzmacniaczem a obciążeniem, jak również odcina sygnał wejściowy przy pomocy przekładnika. Układ zabezpieczający zabezpiecza przed offsetem stałonapięciowym, przesterowaniem i przekroczeniem maksymalnego prądu. Poza tym posiada możliwość podłączenia do oddzielnego układu regula-

cji temperatury. Ten układ elektroniczny służy do kontrolowania temperatury radiatora oraz steruje w sposób proporcjonalny pracą wentylatora chłodzącego (możliwość indywidualnego ustawienia). Jeżeli zostanie przekroczona maksymalna dopuszczalna temperatura radiatora, nawet przy włączonym chłodzeniu, to poprzez układ zabezpieczenia następuje wyłączenie przekładnika na wyjściu stopnia mocy.

## 52 tranzystory

Szczegółowy schemat elektryczny nowego wzmacniacza mocy Gigant 2000 przedstawiony jest na **rysunku 2**. Już na pierwszy rzut oka zwraca uwagę robiący silne wrażenie zbiór tranzystorów, kondensatorów i rezystorów, który wydaje się bardzo skomplikowany. Ponieważ jednak bardzo wiele tranzystorów pracuje w układzie równoległym, więc gdy się je zbierze i doda wykonany na elementach dyskretnych stabilizowany zasilacz 78-V, to układ ten będzie bardzo przypominał znany wcześniej wzmacniacz średniej mocy.

Na podstawie numeracji tranzystorów w poszczególnych blokach poszczególne podzespoły wzmacniacza można szybko zidentyfikować. Stabilizatory zostały zbudowane na tranzystorach T43...T47 dla gałęzi dodatniej i na T48...T52 dla gałęzi ujemnej. Wzmacniacz wejściowy składa się z T1...T10, stopień kaskodowy, który steruje wzmacniaczem prądowym z T15...T26. Jako stopień sterujący pracują T29...T34, a jako stopień mocy T35...T42. Zasilacz pomocniczy oraz układ zabezpieczeń zostały umieszczone na innej płytce. Teraz przyszła pora, żeby okiełznać rumaka i rozpocząć podróż po szczegółowych rozwiązaniach Giganta 2000 zaczynając od zasilania.

## Zasilanie

Ze względu na szczególne możliwości odnośnie mocy stopień końcowy wzmacniacza można uznać za jego najważniejszą część. Aby stopień końcowy nawet przy impe-

dancji obciążenia wynoszącej  $1,5\Omega$  nie padał jeszcze na kolana (jest to ważny element wśród obowiązkowych właściwości), zastosowane zostało równoległe połączenie czterech par tranzystorów końcowych (T35...T43). Wybór padł na specjalne tranzystory z firmy Toshiba, które charakteryzują się niezwykle liniową charakterystyką przenoszenia oraz posiadają prawie stałe wzmocnienie prądowe aż do około 7A.

Naturalnie oprócz tranzystorów mocy, także i tranzystory w stopniu sterującym powinny pracować wewnątrz swoich SOAR (safe operating area - obszar bezpiecznej pracy), tak więc również i w tym stopniu nieodzowne było zastosowanie równoległe pracujących elementów. W stopniu sterującym również pracują tranzystory z firmy Toshiba, a ich szczególną cechą jest szybkość (częstotliwość przenoszenia = 200MHz).

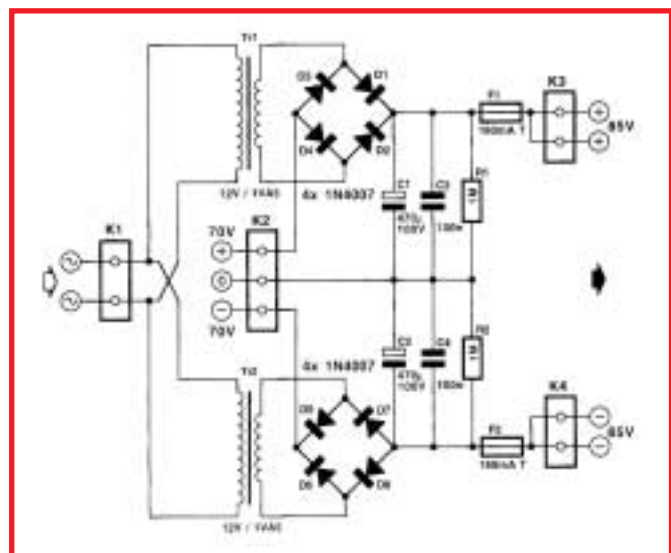
Zbudowany na parze symetrycznych tranzystorów T27/T28 układ regulowanej, tranzystorowej diody Zenera służy do zapewnienia niezbędnego napięcia wstępnego do ustawienia prądu spoczynkowego. Ta para tranzystorów zamontowana jest na wspólnym radiatorze z tranzystorami mocy, co gwarantuje odpowiednie sprzężenie termiczne i dzięki temu prąd spoczynkowy przy dużym wysterowaniu wzrasta, natomiast przy spadającej temperaturze radiatora

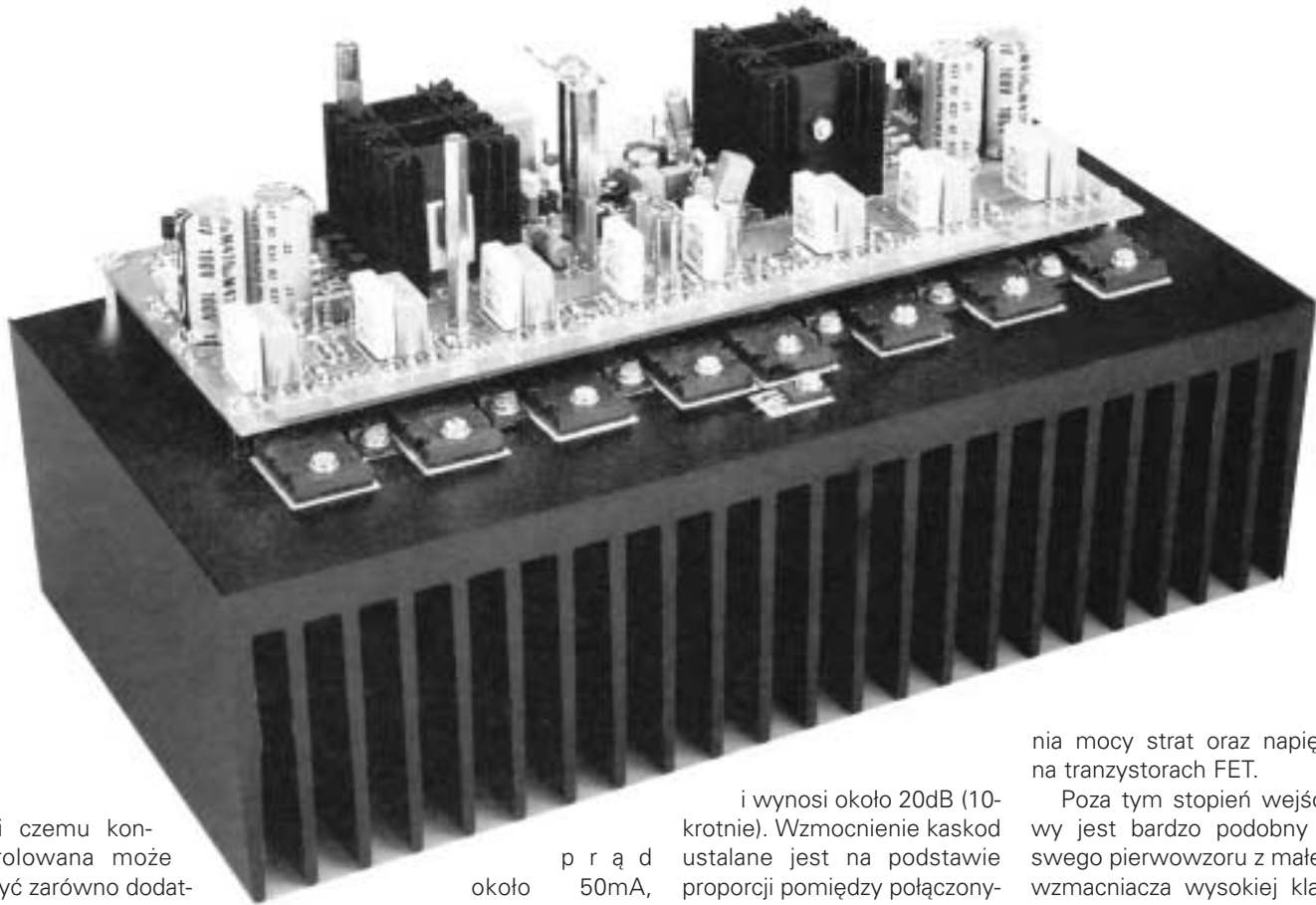
powraca do swojej normalnej wartości nominalnej. Przy pomocy P3 ustawia się prąd spoczynkowy na około 200mA.

Jeszcze kilka słów na temat połączenia pomiędzy wyjściem wzmacniacza a głośnikami. Zazwyczaj w takim miejscu stosowane są przekładniki mocy, ale ze względu na duże prądy wyjściowe zdecydowano się na trzy przekładniki (Re2...Re4) połączone ze sobą równoległe, które będą w stanie bratersko podzielić pomiędzy siebie prąd wyjściowy. Dwa z nich będą mogły być przy tym jednocześnie wyłączane przez układ zabezpieczający, a następnie włączone po pewnym czasie. Na skutek tego na pewien czas znika sygnał wejściowy. Taki sposób pracy ma bardzo pozytywny wpływ na długowieczność styków przekładników. Trzy przekładniki wyjściowe razem z pokazną cewką wyjściową L1 znajdują się na oddzielnej płytce, która umieszczona jest bardzo blisko gniazd wyjściowych.

Transoptor IC2 pracuje jako czujnik w układzie zabezpieczającym przed zbyt dużym prądem. Dzielnik napięcia R74/R75 podłączony jest równoległe do obydwu rezystorów R48/R52 w obwodach emiterów tranzystorów mocy, dzie-

**Rys. 3. Prosty zasilacz pomocniczy do wzmacniacza napięciowego.**





ki czemu kontrolowana może być zarówno dodatnia jak i ujemna połowa stopnia końcowego. Zastosowanie transoptora wyklucza konieczność stosowania pętli masy i czyni zbędnym kompensowanie napięcia współbieżnego  $\pm 70V$ . Napięcie robocze dla części odbiorczej transoptora pochodzi z układu zabezpieczającego.

## Połączenie kaskodowe

Wysoka wartość prądu wyjściowego wzmacniacza wymaga także zdecydowanie "solidniejszego" stopnia sterującego niż te, do jakich jesteśmy przyzwyczajeni. Tak więc powstało wyjście wzmacniacza napięciowego składające się z trzech równoległych stopni kaskodowych (T15...T26). Kaskody są ustawione na prąd 10...15mA, ale ze względu na ujemne prądowe sprzężenie zwrotne prąd ten może ulec znacznemu podwyższeniu w zależności od wysterowania i obciążenia. Z tego też względu jako T21...T26 zastosowane zostały tranzystory, które przy napięciu kolektor - emiter rzędu 150V są w stanie dostarczyć

prąd około 50mA, podczas gdy na T15...T20 całkowicie wystarczające były normalne tranzystory typu BC.

Pomiędzy wzmacniaczem wejściowym a stopniem kaskodowym znajdują się bufor (T11 i T12), które zmniejszają impedancję stopnia wejściowego i jednocześnie pozwalają na zastosowanie wyższych wartości dla R13 i R15. Dzięki temu stopień wejściowy może uzyskać dodatkowe wzmocnienie wynoszące około 3dB. Rezystory R19 i R21 spełniają potrójną rolę. Po pierwsze ograniczają one moc strat w buforach, następnie wytwarzają w buforach wymaganą wartość napięcia i wreszcie ograniczają prąd przepływający przez bufor (a tym samym także i przez stopień kaskodowy) do poziomu bezpiecznego maksimum.

Wzmocnienie stopni końcowych pracujących w układzie Open-loop (otwartej pętli) określane jest wyłącznie przez stopień wejściowy i kaskodowy. Wzmocnienie stopnia wejściowego zależy od proporcji

$R13/R12 + R8(R15/R14 + R8)$

i wynosi około 20dB (10-krotnie). Wzmocnienie kaskod ustalane jest na podstawie proporcji pomiędzy połączonymi równolegle R31 i R32, a także połączonymi równolegle R24, R25 i R26. Ze względu na koncepcję przeciwsobności należy wszystko pomnożyć przez współczynnik 2 i dochodzi się wówczas do marnego 900-krotnego wzmocnienia. Stopnie wejściowe i kaskodowe wspólnie dają jednak wzmocnienie napięciowe wynoszące około 8500!

## Wzmacniacz wejściowy

Po dokładnym przyjrzeniu się należy stwierdzić, że wzmacniacz wejściowy składa się wyłącznie z tranzystorów T3 i T4. Kaskodowa konstrukcja z T9 i T10 ma jedynie za zadanie przeciwdziałać zbyt wysokim napięciom. Tranzystory polaryzowane są przez diody Zenera D5 i D7, które są częścią tego samego dzielnika napięcia, jaki także polaryzuje tranzystory T21...T26. Źródła prądowe zrealizowane na tranzystorach polowych (FET) T13 i T14 utrzymują na stabilnym poziomie prąd przepływający przez diody Zenera. R22 i R23 służą do ogranicze-

nia mocy strat oraz napięcia na tranzystorach FET.

Poza tym stopień wejściowy jest bardzo podobny do swego pierwowzoru z małego wzmacniacza wysokiej klasy. Spadek napięcia na rezystorach w obwodach emiterów buforów T1 i T2 określa spadek napięcia na rezystorach w obwodach emiterów T3 i T4, a tym samym ustawienie całego stopnia wzmacniacza wejściowego. Aby wyeliminować wpływy temperaturowe pary tranzystorów T1/T3 oraz T2/T4 powinny być ze sobą termicznie sprzężone. Pary te są w ten sposób zainstalowane na płytce, żeby je można było łatwo ze sobą połączyć przy pomocy np. masy do mocowania kabli.

Ponieważ ustawienie buforów T1 i T2 ma niezwykle głębokie konsekwencje, więc usprawiedliwia to także odpowiedni nakład elementów w układzie w formie źródeł prądowych T5 i T6. Posiadają one źródła napięcia referencyjnego (mianowicie diody LED D1 i D2), których prąd, także przez źródła prądowe na FET-ach (T7 i T8) jest utrzymywany na stałym poziomie. Ażeby zagwarantowana była stabilność temperaturowa, również D1/T5 i D2/T6 powinny zostać ze sobą w analogiczny sposób termicznie sprzężone. Najłatwiej

jest to zrealizować, gdy jako LED-y zastosuje się diody w prostokątnej obudowie. Aby skompensować ewentualną asymetrię stopnia wejściowego, przy pomocy P2 można zrównoważyć prąd przepływający przez T5, żeby był taki sam, jak dla T6 (do pomiaru odpowiednio na R4 i R6).

### Ujemne sprzężenie zwrotne i kompensacja

Ujemne sprzężenie zwrotne wzmacniacza końcowego przebiega od wyjścia ze stopnia mocy poprzez R10 i R11 z powrotem do węzłów na emiterach T3 i T4. Prąd przepływający przez te tranzystory jest zależny od napięcia na R8, a to z kolei w zasadniczy sposób ponownie zależy od prądu przepływającego przez R10 i R11. Jest to typowa cecha charakterystyczna dla ujemnego, prądowego sprzężenia zwrotnego. Całkowite wzmocnienie stopnia końcowego jest określane poprzez

proporcję pomiędzy R8 a R10 + R11.

Elementy C3, C4, C5 i R16, R17 tworzą układ zapewniający kompensację niezbędną do stabilnego zachowania. Dla większego bezpieczeństwa na płycie przygotowano zostało miejsce pod drugi, aktualnie nie wymagany układ kompensacji. Ponieważ sygnały o wysokiej częstotliwości mogą w tego typu szybkim wzmacniaczu powodować znaczne zniekształcenia, więc zastosowanie na wejściu filtra dolnoprzepustowego (R2/C2) jest absolutnie konieczne. Filtr ten jest konieczny także z punktu widzenia stabilności. Kondensator sprzęgający C1 spełnia także ważne zadanie. Ponieważ kompensacja offsetowa ogranicza się jedynie do nierównoważenia buforów wejściowych, więc napięcie stałe podłożone na sygnał wejściowy przedostawałoby się aż do głośników.

Na zakończenie jeszcze parę szczegółów. Na wejściu wzmacniacza znajduje się przekaźnik, który w razie

potrzeby (między innymi w przypadku przesterowania) odcina sygnał źródłowy od wejścia do układu oraz podaje go na masę. Przekaznik ten sterowany jest przez stopień zabezpieczający. Układ R9/P1 jest konieczny tylko wtedy, gdy dwa wzmacniacze są połączone jako mostek i ma on za zadanie zapewnić optymalne tłumienie równoległe. Układ ten powinien występować tylko w jednym wzmacniaczu, natomiast w drugim musi zostać pominięty (nie instaluje się zwory JP1).

Kompensacja napięcia nierównoważenia obejmuje integrator zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym (IC1). Wzmacniacz operacyjny porównuje wyjściowe napięcie stałe z potencjałem masy i dodaje wzmacniaczowi wejściowemu małe napięcie stałe, skierowane przeciwnie do offsetu. W taki sposób cały czas stałe napięcie wyjściowe odniesione jest do potencjału masy. Jako wzmacniacz operacyjny zastosowany został

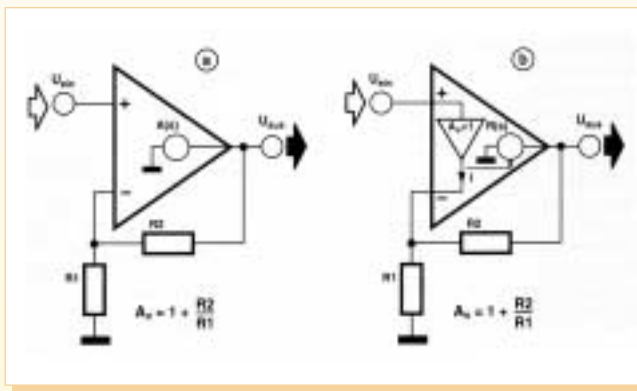
OP90, który charakteryzuje się ekstremalnie niskim poborem prądu = 20µA, połączonym jednocześnie z bardzo małym offsetem wejściowym wynoszącym 450µV. Swoje napięcie robocze OP90 otrzymuje poprzez D16 i D17 z zasilacza ±15V. Buforujące kondensatory elektrolityczne C26/C27 troszczą się o to, aby wzmacniacz operacyjny przez dłuższy czas po wyłączeniu wzmacniacza był jeszcze gotów do pracy i hamował wszelkie ewentualne zakłócenia. D14 i D15 ochraniają wejście układu scalonego w sytuacjach awaryjnych (lub błędnych) przed zbyt wysokim napięciem wejściowym. R54 i R55 zostały w taki sposób dobrane, żeby kompensacja wynosiła maksymalnie 1µA i jest to wystarczające do skompensowania różnicy w prądach bazowych tranzystorów T1 i T2.

### Stabilizacja

Oprócz zalet, z ujemnym, prądowym sprzężeniem zwrotnym związana jest

## Current-feedback (prądowe sprzężenie zwrotne)

Wzmacniacz z typowym ujemnym, napięciowym sprzężeniem



zwrotnym (a) zwielokrotnia napięcie wejściowe przy pomocy swojej pętli wzmocnienia (wzmocnienie open-loop). Pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego wymusza na wyjściu napięcie, które po podzieleniu przez dzielnik R1/R2 jest identyczne z napięciem wejściowym.

O ile wzmacniacz z ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym posiada wejście wysokoomowe, to wzmacniacz z ujemnym prądowym

zwrotnym (b) ma do dyspozycji zarówno wejście wysokoomowe, jak i niskoomowe. Stopień wejściowy składa się z bufora z jednostkowym wzmocnieniem pomiędzy wejściem nieinwertującym (prostym) a inwertującym, które w rzeczywistości jest wyjściem niskoomowym. Za stopniem buforowym następuje stopień dopasowania impedancji, który przekształca prąd wyjściowy z bufora w ekwiwalentne napięcie wyjściowe.

Pętla ujemnego sprzężenia prądowego funkcjonuje następująco: jeśli wzrośnie napięcie na wejściu prostym, to podąża za nim inwertujące. Bufor, poprzez R1, wysyła prąd, który wzmocniony w układzie dopasowania impedancji podnosi napięcie wyjściowe na wzmacniaczu do tego stopnia, żeby prąd wyjściowy płynący przez R2 był równy prądowi z bufora przepływającemu przez R1. Prawidłowe napięcie wyjściowe możliwe jest do osiągnięcia nawet przy bardzo małym prądzie bufora. Stosunek  $1+R2/R1$  określa wzmocnienie (Closed-loop) układu.

Cechą szczególną wzmacniacza z ujemnym sprzężeniem prądowym jest to, że szerokość pasma closed-loop (pętli zamkniętej) jest prawie niezależna od wzmocnienia closed-loop, podczas gdy przy napięciowym ujemnym sprzężeniu zwrotnym szerokość pasma dla równego wzmocnienia closed-loop staje się coraz mniejsza. Jest to zależność, która znana jest jako GBW (Gain Bandwidth Product) - iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma.

## Elektor w EdW

istotna wada, a mianowicie niewystarczające tłumienie wahań napięcia zasilającego. Z tego względu konieczne jest, aby napięcie robocze wzmacniacza napięciowego było przyzwoicie stabilizowane. Mając na uwadze wysokie napięcia robocze oraz fakt, że służące jako podstawa, niestabilizowane napięcia podlegają wpływom ze strony obciążenia wzmacniacza, wydaje się, iż dwa zbudowane na elementach dyskretnych regulatory Low-drop (T43...T47, T48...T52) to wcale nie przesada. W celu skompensowania spadków napięcia, przede wszystkim w stopniu kaskodowym, wzmacniacz napięciowy bez wątpliwości powinien być zasilany wyższym napięciem (a mianowicie  $\pm 78V$ ) niż stopień mocy ( $\pm 70V$ ). Do tego należy dodać, że regulatory napięcia, w każdej sytuacji, do efektywnej regulacji wymagają wystarczającej rezerwy.

Szczęśliwie pobór prądu we wzmacniaczu napięciowym przy wartości równej 70mA jest tak mały, że całkowicie wystarczy mały zasilacz pomocniczy (rysunek 3), składający się z dwóch transformatorów, mostka prostowniczego i "umiarkowanych", wygładzających kondensatorów elektrolitycznych. Napięcie wyjściowe  $\pm 15V$  podłączone jest szeregowo z  $\pm 70V$  z głównego zasilacza, w taki sposób, że uzyskuje się nieregulowane napięcie  $\pm 85V$ .

Przy opisie dyskretnego regulatora napięcia ograniczono się jedynie do części odpowiedzialnej za napięcia dodatnie. Część dla napięć ujemnych jest identyczna, oczywiście za wyjątkiem zmienionej polaryzacji tranzystorów. Elementem referencyjnym jest 39 V dioda Zenera D9 i w związku z tym regulator musi jedynie podwoić napięcie referencyjne, aby uzyskać wymaga-

ne napięcie wyjściowe  $\pm 78V$ . Źródło prądowe T43 (tranzystor FET) troszczy się o to, aby przez diodę Zenera płynął stabilny prąd. Dioda ta dodatkowo odsprężona jest przez C30. Ustawiany przez źródło prądowe T44, wzmacniacz różnicowy T45/T46 porównuje poprzez dzielnik napięcia R63/R64/P4 napięcie wyjściowe z napięciem referencyjnym. P4 służy do wyregulowania w pewnych granicach wartości napięcia referencyjnego. T47 stanowi stopień wyjściowy regulatora. Napięcie wyjściowe utrzymywane jest aż do wartości o około 0,2V poniżej napięcia wyjściowego.

R57 i D8 ochraniają T43 przed zbyt wysokim napięciem podczas włączania, D10 zapobiega przepływowi prądu przez regulator w odwrotnym kierunku. C31 i C32 poprawiają właściwości częstotliwościowe regu-

latora, podczas gdy R56/C28/C29 wpływają dodatkowo wygładzająco na napięcie wyjściowe oraz zapewniają odsprężenie HF od  $\pm 85V$  napięcia wejściowego.

### Kilka słów na temat reszty

Wydaje się, że centralna część Giganta 2000 została wystarczająco szczegółowo omówiona. To, czego jeszcze brakuje, to układy zabezpieczające, regulacja temperatury i oczywiście wskazówki odnośnie wykonania płytek oraz zabudowania całości w odpowiedniej obudowie.

W następnym numerze zostanie zamieszczona druga część artykułu zawierająca szczegółową listę elementów oraz charakterystyki (wykresy) pomiarowe - dokładnie tak, jak to jest w zwyczaju ELEKTORA.

Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama Reklama