

Zosilňovač s MOSFET

– simulácia elektrónkového nízko-frekvenčného zosilňovača

Jozef Ropovik

V poslednom období zvyšovanie záujmu o elektrónkové zosilňovače vytvára dojem nejakého návratu elektronik. Skôr by som povedal, že elektrónkové zosilňovače boli, sú a budú, čo taktiež možno povedať aj o tranzistorových zosilňovačoch. V článku je popísaný zosilňovač s tranzistorami MOSFET navrhnutý tak, aby sa zvukový prejav zosilňovača priblížil prejavu zosilňovača s elektrónkami.

Zámeru odpovedá aj obvodové riešenie, zvyčajne používané u elektrónkových zosilňovačov. Osobne som použil typ **Parallel-Push-Pull**, označovaný aj ako **PPP**, ktorý v 50. a 60. rokoch bol považovaný za najlepšie riešenie. Treba pripomenúť, že 70. a 80. roky priniesli podobu zosilňovačov PPP v tranzistorovom prevedení pod značkou Regent, s ktorými sa stretávam dodnes. Tieto zosilňovače sú osadené bipolárnymi kremíkovými tranzistorami. Preto by bolo vhodné osadiť zosilňovač aj tranzistorami MOSFET, ktoré majú niekoľko spoločných znakov s elektrónkami, aby sa odzrkadlila doba 90. rokov v tej istej podobe.

Podstatou návrhu bola čo najmenšia spätná väzba, a preto vznikli dve

zapojenia – jedno so spätnou väzbou a druhé bez nej. Obidve zapojenia sú osadené tetrodami MOSFET KF982 z bývalej TESLA Piešťany, ktoré s obľubou používam od roku 1993 s prepojenými hradlami G1 a G2.

Vylepšovanie zosilňovačov s použitím PPP som ukončil v roku 2001, pričom ja sám, ale aj môj syn, ich používame dodnes. Doposiaľ s nimi neboli žiadne problémy. Ku konštrukcii ma inšpiroval príspevok pána Rochelta v PE 3, 4 a 5/2000.

Jednou zaujímavou zvláštnosťou tohto zosilňovača oproti iným, ktoré som používal predtým je, že zvuk sa nachádza v priestore izby a pri jej opúšťaní sa podstatne stráca, čo predtým bolo opačne. Rozdiel medzi popísanými zosilňovačmi je len vo vnútor-

nom zosílení, ktoré je pri otvorenej spätnej väzbe rozdielne.

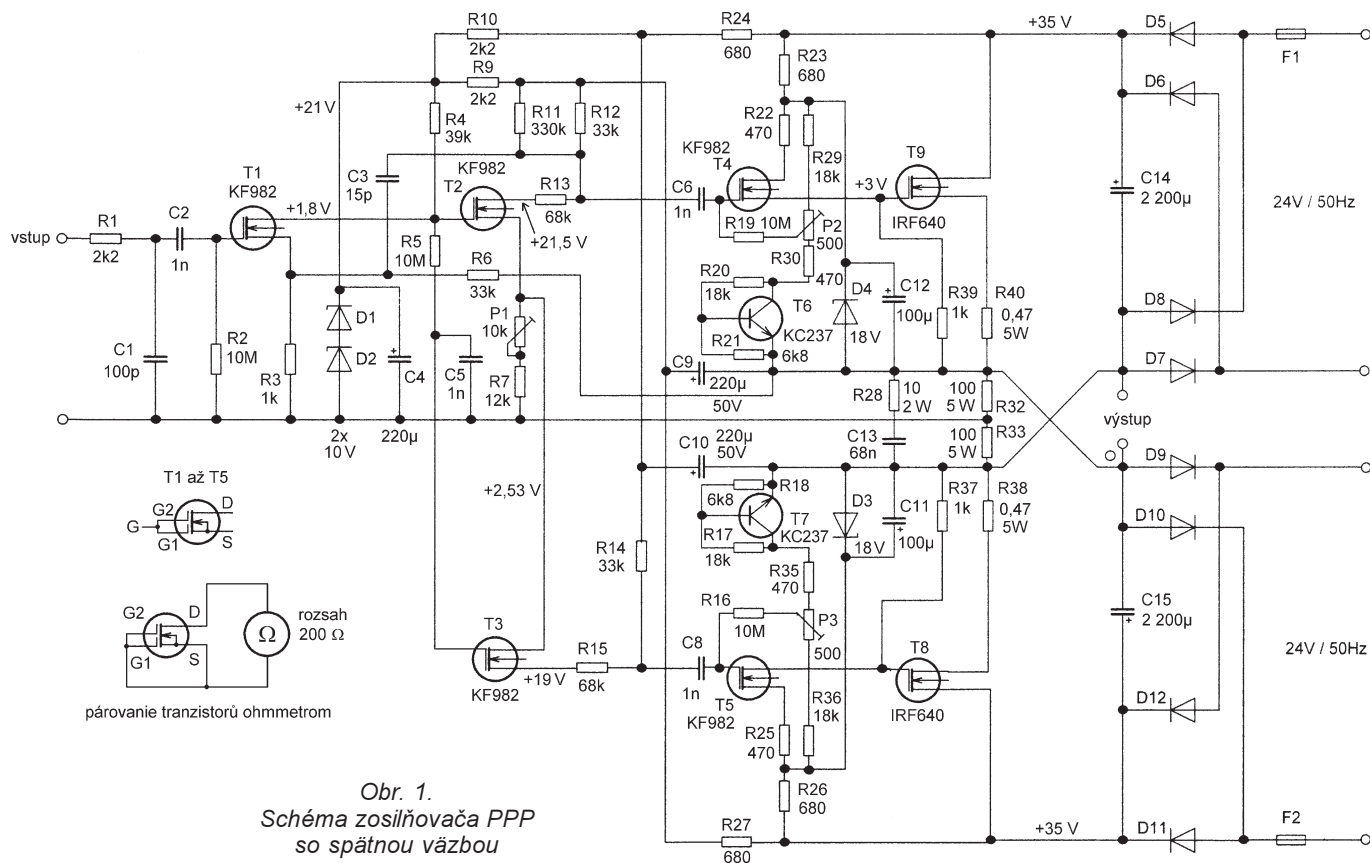
Zvuk je nevtieravý, neunavuje a pre nové konštrukcie ho používam pre porovnanie. Jediné, čo sa mi na ňom nepáčilo, je množstvo napájacích okruhov, samostatných a oddelených.

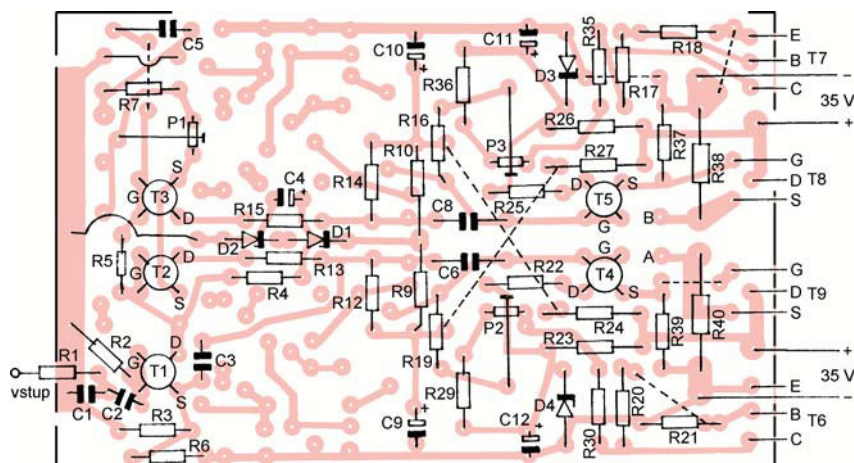
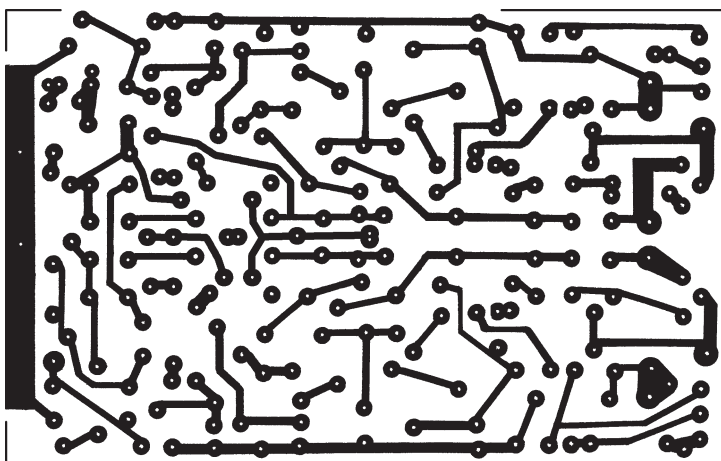
Niektoré skúsenosti pri stavbe a oživovaní

Úvodom je treba upozorniť, že napriek tomu, že tetrody MOSFET majú chránené hradlá, ich ochrana je obmedzená. Pre oživovanie výkonných zosilňovačov používam namiesto poistiek autožiarovky pre prúd do 1 A s vláknami do série, pričom súčet ich napätí musí odpovedať napájaciemu napätiu zosilňovača.

Bežne používam rezistory 0,6 W, pokiaľ ich neoznačujem ináč. Taktiež používam fóliové kondenzátory. Výkonné tranzistory a tranzistorové teplotné čidlá sa musia nachádzať na chladíči vo vzájomnej blízkosti. Protiahlé tranzistory je potrebné párovať. Oživovanie je podobné ako u elektrónkových zosilňovačov opísaných pánom Rocheltom. Treba pripomenúť, že všetko sa musí merať a nastavovať do náhradnej záťaž. Tento zosilňovač nemá výstupný transformátor.

Ako doplnok používam korekčný predzosilňovač. Jedná sa o pasívny korektor osadený tetrodami MOSFET. Predzosilňovač je v zosilňovači možno odpojiť a signál priviesť priamo na koncový zosilňovač.





Obr. 2 a 3. Doska s plošnými spojmi zosilňovača PPP so spätnou väzbou a rozmiestnenie súčiastok na doske.

Niektoré tranzistory KF982 je treba na doskách obrátiť tak, aby súhlasili ich vývody (sú „bruchom“ hore).

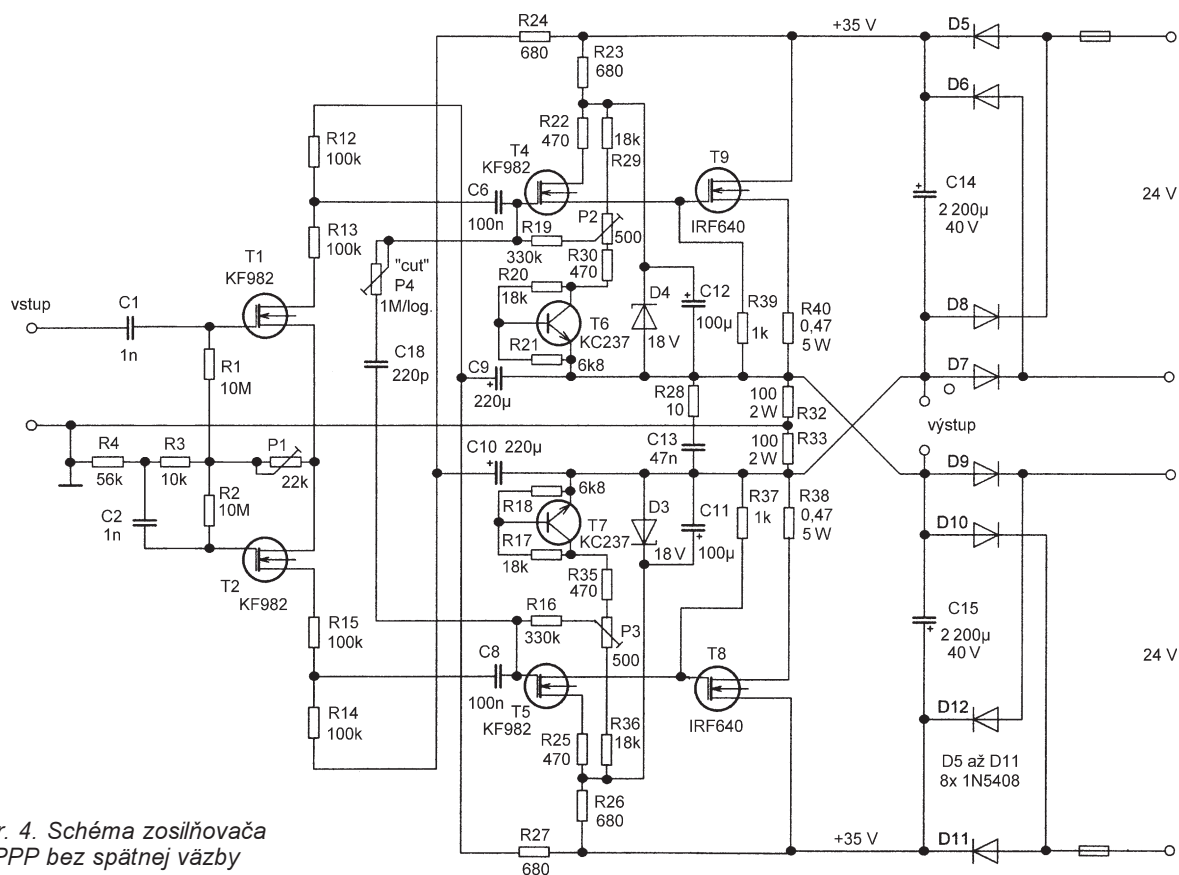
Napájací transformátor má pre stereo-fónny zosilňovač štyri samostatné vinutia s napätím 24 V a jedno nevýkonové vinutie tiež 24 V pre predzosilňovač. Každé vinutie je pripojené na mostíkový usmerňovač. Filtračný kondenzátor pro rozsah záťaže 4 až 8 Ω stačí s kapacitou 2 200 μF pre napätie 50 V. Pre predzosilňovač má filtračný kondenzátor v usmerňovači kapacitu 1000 μF . S odstupom hlukom nie sú problémy.

Trubičkové poistky sú súčasťou zdroja a aj výstup k reproduktoru je odvodený zo zdroja. Doska s plošnými spojmi je univerzálna, a bol na nej postavený i zosilňovač s výkonom 200 W/4 Ω . Ochranné obvody boli identické ako v zosilňovačoch Regent. Najväčším problémom tohto typu zosilňovača je zložitý napájací zdroj.

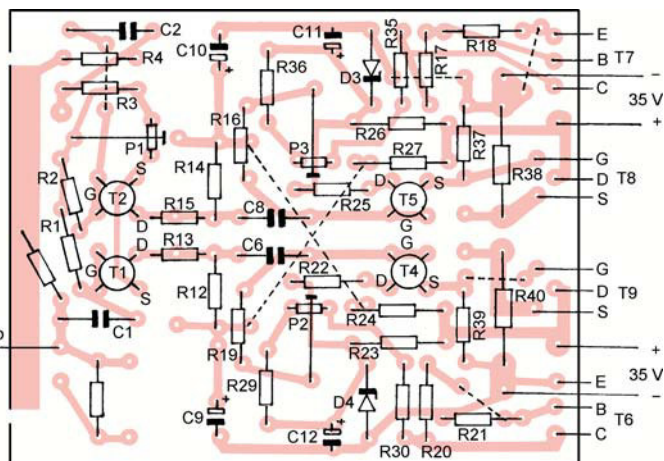
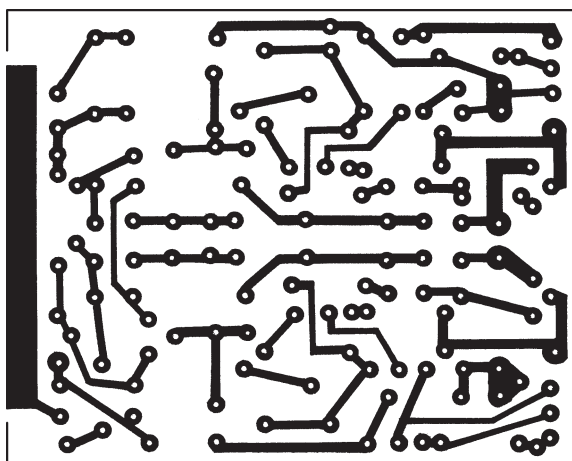
Zoznam súčiastok

Zosilňovač PPP so spätnou väzbou

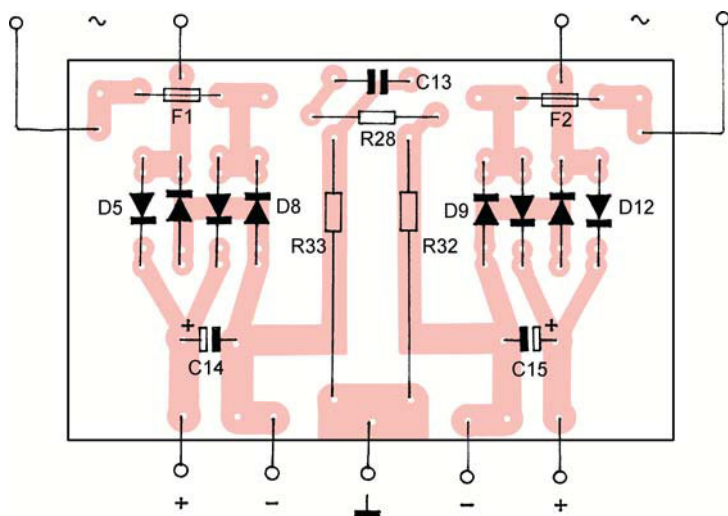
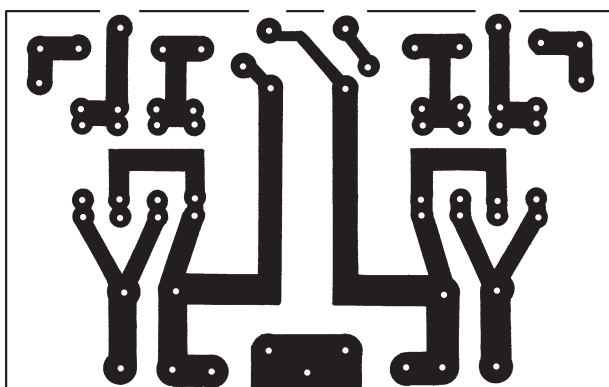
R1, R9, R10	2,2 k Ω
R2, R5, R16, R19	10 M Ω
R3, R37, R39	1 k Ω
R4	39 k Ω
R6, R12, R14	33 k Ω
R7	12 k Ω
R11	330 k Ω
R13, R15	68 k Ω
R17, R20	18 k Ω
R21	6,8 k Ω
R22, R25	470 Ω
R23, R24, R26, R27	680 Ω



Obr. 4. Schéma zosilňovača PPP bez spätnej väzby



Obr. 5 a 6. Doska s plošnými spoji zesilovača PPP bez spátnej väzby a rozmiestnenie súčiastok na doske



Obr. 7 a 8. Doska s plošnými spoji a rozmiestnenie súčiastok usmerňovačov. Výstup na reproduktor je zo záporných pólov usmerňovačov

R16, R19	330 kΩ
R17, R20, R29, R36	18 kΩ
R18, R21	6,8 kΩ
R22, R25	470 Ω
R23, R24, R26, R27	680 Ω
R28	10 Ω, 2 W
R29, R36	18 kΩ (22 kΩ)
R30, R35	470 Ω
R32, R33	100 Ω, 2 až 5 W
R37, R39	1 kΩ
R38, R40	0,47 Ω, 5 W (3x 1,5 Ω, 2 W)
P1	22 kΩ
P2, P3	470 Ω (500 Ω)
P4	1 MΩ, log.
C1, C2	1 nF
C6, C8	100 nF
C9, C10	220 μF/50 V
C11, C12	100 μF/25 V
C13	47 nF
C14, C15	2 200 μF/50 V
C18	220 pF
D3, D4	ZD 18 V, 1,3 W
T1 až T5	KF982
T6, T7	KC237
T8, T9	IRF640
F1, F2	F1,6A

Korekčný zesilovač (jeden kanál)

R1	68 kΩ
R2	100 kΩ
R3	10 MΩ
R4	10 kΩ
R5	18 kΩ
R6, R9	1,8 kΩ
R7, R10	47 kΩ
R8	22 kΩ
R11	1 kΩ
P1, P3, P5	2x 100 kΩ/log.
P2	10 kΩ, trimer
P4, P6	2x 22 kΩ
C1, C3	1 nF
C2	4,7 μF/50 V
C4, C6	33 nF
C5	330 nF
C7	220 μF/35 V
T1, T2	KF982

Pozn. redakce: Zesilovač není vhodná konstrukce pro méně zkušené konstruktéry. Transistory KF982 lze stále objednat u firmy DENKL Electronic, www.denkl.cz.

R28	10 Ω, 2 W	C14, C15	2 200 μF/50 V
R29, R36	18 kΩ (22 kΩ)	D1, D2	ZD 10 V, 1,3 W
R30, R35	470 Ω (1 kΩ)	D3, D4	ZD 18 V, 1,3 W
R32, R33	100 Ω, 2 až 5 W	D5 až D12	1N5402
R38, R40	0,47 Ω, 5 W (3x 1,5 Ω, 2 W)	T1 až T5	KF982
P1	10 kΩ	T6, T7	KC237
P2, P3	500 Ω	T8, T9	IRF640
C1	100 pF, ker.	F1, F2	F1,6A
C2, C5, C6, C8	1 nF	Zosilňovač PPP bez spätnej väzby	
C3	15 pF, ker.	R1, R2	10 MΩ
C4, C9, C10	220 μF/50 V	R3	10 kΩ
C11, C12	100 μF/25 V	R4	56 kΩ
C13	68 nF	R12, R13, R14, R15	100 kΩ

ДАЙДЖЕСТ

фильтры R5C7R7C9 (C7 и C9 имеют емкость 1 миллифарада, т.е. 1000 мкФ) формируют напряжение фиксированного смещения $U_B = -12$ В. Цепочка R6C8D9U1R8 образует схему, запирающую лампы выходного каскада на время разогрева их катодов: в первый момент после включения сети U1 закрыт, и на сетки выходных ламп подается «намертво» запирающее смещение $U_B = -40$ В. По мере постепенного заряда C8 транзисторный ключ U1 открывается, и делитель R7R8R9 (штатное положение выключателя S2 - замкнутое) снижает напряжение смещения до -12 В, обеспечивая режим класса AB2 с начальным током катода выходных ламп от 40 до 50 мА. В разомкнутом положении S2 напряжение смещения увеличивается (по абс. величине) до -19 В и усилитель переводится в экономичный режим класса B2. Элюра напряжения на управляющей сетке выходной лампы при максимальной выход-

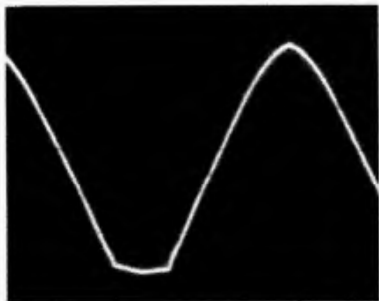


Рис.5

ной мощности показана на рис.5. «Полочка» в нижней полуволне как раз соответствует порогу стабилитрона -24 В, а вершина синусоиды - напряжению +4 В. При этом ток катодов достигает в пике линейного режима 400 мА, обеспечивая выходную мощность 60 Вт. Это существенно больше, чем 40 Вт, обеспечиваемых этими же лампами, но в обычном режиме без сеточных токов. Рабочая полоса частот усилителя по уровню -1 дБ простирается от 7 Гц до 150 кГц, выходное сопротивление 0,2 Ома. Выходной трансформатор - самодельный, 14 секций обмоток выполнены на Ш-образном сердечнике массой 18 фунтов («AudioXpress» №2/2006, с.6-9). **Примечание редакции «РХ».** Подойдет выходной трансформатор от усилителя ТУ-100БУ4.2, который был выполнен на лампах 6Р3С. Если мотать самому, первичка 2x1000 витков провод 0,4, вторичка для 8 Ом 100 витков проводом 1,3, железо сечением 20-24 см². В выходном каскаде можно применить по 2 шт 6П44С в плечо или по одной ГУ-29, ГИ-30.

Йозеф Роповик свой УМЗЧ выполнил по схеме Циклотрона (Push-Pull-Parallel), популярной у конструкторов ламповых схем, но в качестве активных элементов использовал полевые транзисторы KF982 (Tesla), вольтамперные характеристики которых приближены к тетродным, и IRF640 (International Rectifier). Входной, он же фазоинверсный, каскад выполнен по схеме дифференциального УПТ на транзисторах T1, T2 (рис.6). Далее следуют повторители напряжения T4, T5 с местными ООС R29P2R19, R36P3R16 и цепочками (вок-

руг T6, T7), задающими и термостабилизирующими режим транзисторов T8, T9 выходного каскада. Устройство развивает выходную мощность 200 Вт на нагрузке 4 Ома. Его питание выполняют от двух электрически не соединенных 24-вольтовых обмоток сетевого трансформатора мощностью 300 Вт. Налаживание заключается в установке триммерами P2, P3 начальных токов T8, T9, равных 1 А (по падению напряжения 0,5 В на резисторах R38, R40), после чего одним из этих резисторов добиваются нулевой разности потенциалов между обеими выходными клеммами (vystup). Далее на вход усилителя подается синусоидальное напряжение и несколькими итерациями триммерами P4, P1 минимизируют коэффициент гармоник («Prakticka elektronika A Radio» №1/2006, с.26-28 *).

Для любителей высококачественной записи «живой» музыки Деннис Колин разработал предусилитель/микшер/монитор (рис.7), обеспечивающий регулировку уровней и баланса от динамического/электретного стереомикрофона, индикацию трех пороговых уровней и усиление на высокоомные студийные наушники. Для усиления использован счетверенный ОУ TL074 (U1A/B/C/D), выходной каскад которого в принципе работает в режиме класса AB, но, поскольку в данном устройстве выходной ток ОУ меньше, чем начальный ток смещения его выходного каскада, то можно считать, что ОУ работает в режиме класса А. Линейный вход J1L содержит радиочастотный ФНЧ R1C3, блокирующий возможную постоянную составляющую конденсатор C4, аттенуатор P1L и не-

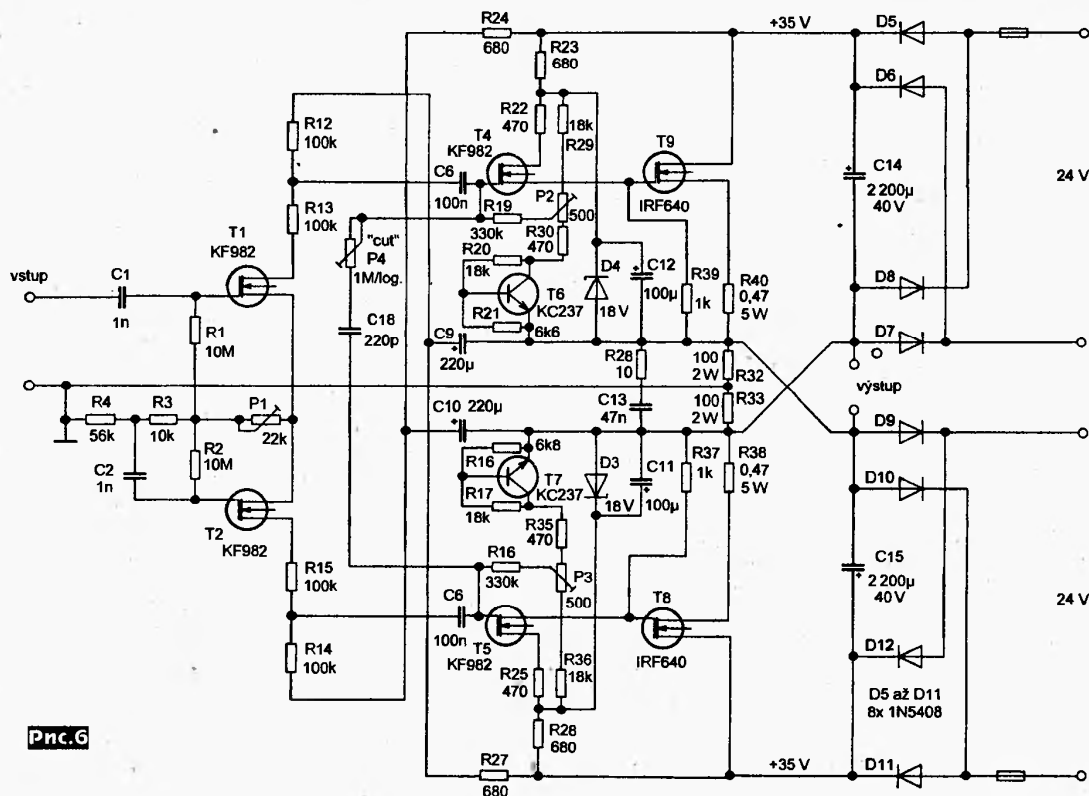


Рис.6