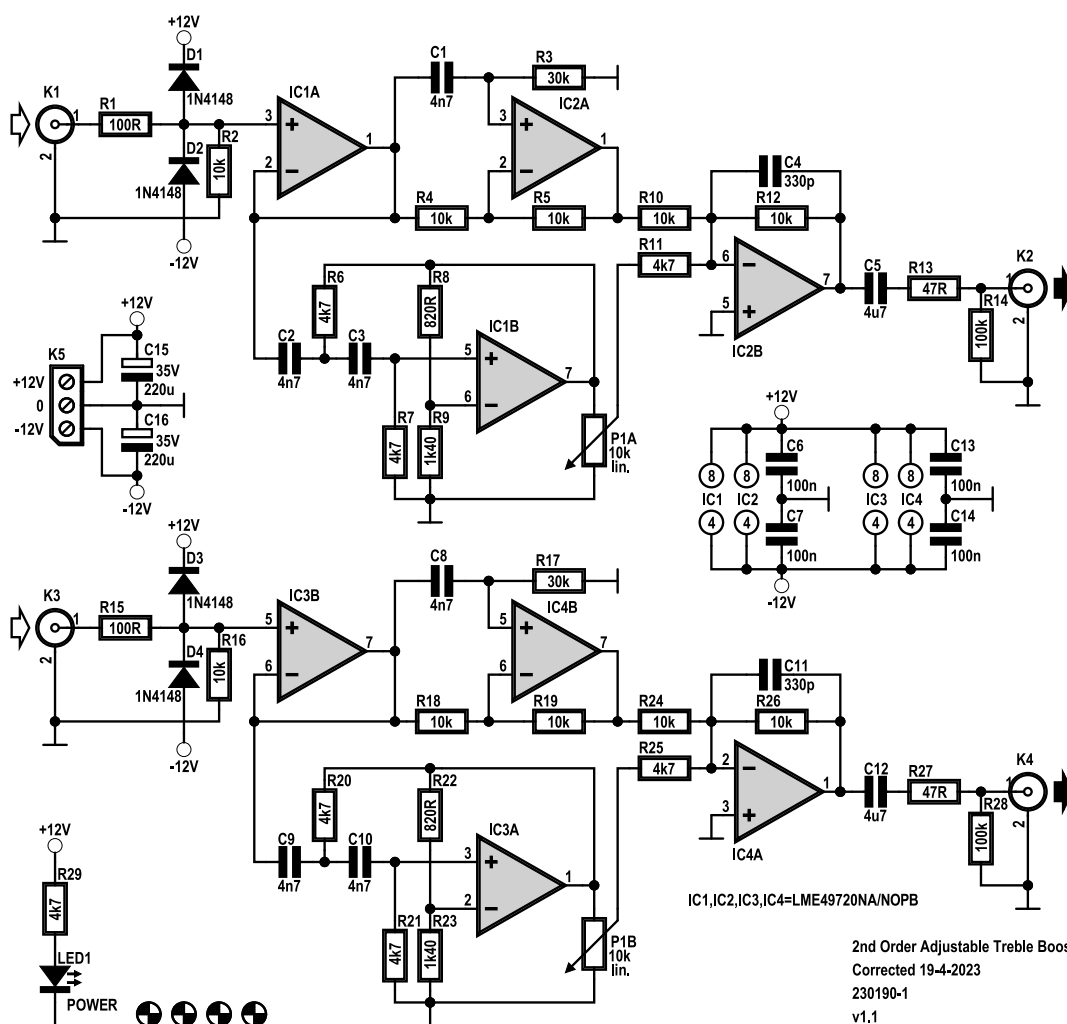


34 Regelbare tweede-orde hogetonen-booster

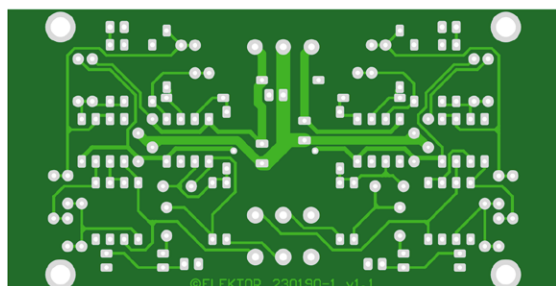
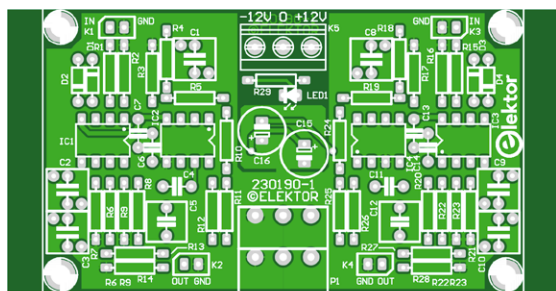
gehoorsteuntje voor ouderen

Ton Giesberts (Elektor Lab)

Naarmate we ouder worden, horen we hogere frequenties minder goed. Het doel van deze schakeling is om dit te compenseren met behulp van een steilere correctie die begint bij een hogere frequentie dan een standaard Baxandall-toonregeling, die meestal vanaf 1 kHz zijn werk doet. Dit kan de akoestische waarneming verbeteren en de verstaanbaarheid van spraak doen toenemen.



Figuur 1. Het schema van dit bijzondere gehoorsteuntje.



Figuur 2. Onder- en bovenzijde van de print.

Waar die correctie precies zou moeten beginnen is natuurlijk voor iedereen verschillend. Met de hier gebruikte waarden gaat het werkpunt (de frequentie waar de versterking begint toe te nemen) van ongeveer 6 kHz naar 3 kHz, afhankelijk van de stand van de potentiometer. Hoe hoger de ingestelde versterking, hoe lager het werkpunt is. De maximale versterking is 12 dB (een factor 4) bij 17 kHz (P1 op maximum). De bandbreedte van de uitgangstrap is beperkt tot 48 kHz om versterking van frequenties ver buiten het menselijke gehoorbereik te voorkomen. Dat vermindert de gevoeligheid voor hoogfrequente storingen.

Principe

Het principe van de schakeling (zie **figuur 1**) is eenvoudig: tel het uitgangssignaal van een tweede-orde hoogdoorlaatfilter op bij het ongefilterde ingangssignaal. Bij de beschrijving van de werking laten we het onderste kanaal, rondom IC3 en IC4, even buiten beschouwing. We kijken dus naar het bovenste kanaal: gewoon optellen van de twee signalen zou niet goed gaan, omdat het filter een faseverschuiving veroorzaakt. Om dat te corrigeren, wordt het door IC1A gebufferde signaal door een allpassfilter rond IC2A geleid, voordat het door IC2B wordt opgeteld bij het signaal van het hoogdoorlaatfilter. Een kritisch gedempt tweedeordefilter veroorzaakt dezelfde faseverschuiving als een allpassfilter. Maar de steilheid van dit type hoogdoorlaatfilter is niet zo groot als gewenst. Een Butterworth-filter geeft een iets andere faseverschuiving, en daarom kan het allpassfilter niet precies compenseren voor dit steilere filter. Het gevolg is een kleine variatie in de versterking bij lagere frequenties, maar met minder dan +0,2 dB rond 900 Hz en -0,3 dB bij 3 kHz (afhankelijk van het werkpunt van het allpassfilter) kan deze fout worden verwaarloosd.

D1, D2 en R1 beschermen de ingang van de eerste opamp tegen overspanning en spikes. De ingangsimpedantie wordt voornamelijk bepaald door R2 (10 kΩ). De uitgang van het allpassfilter is rechtstreeks verbonden met de optelversterker. De versterking wordt bepaald door de verhouding van R10 en R12 (versterking éénmaal). De versterking van het uitgangssignaal van het hoogdoorlaatfilter wordt vastgelegd door de verhouding tussen R11 en R12 (factor 2 = 6 dB).

Om het veranderen van de frequentie van het werkpunt gemakkelijker maken, heeft ook het Butterworth-filter een kleine versterking van ongeveer 1,6 (4 dB). Bij de theoretische versterking van $3 - \sqrt{2}$

Onderdelenlijst

Weerstanden (0,25W, 1%):

R1,R15 = 100 Ω
 R2,R4,R5,R10,R12,R16,R18,R19,R24,R26 = 10 k
 R6,R7,R11,R20,R21,R25,R29 = 4k7
 R3,R17 = 30 k
 R8,R22 = 820 Ω
 R9,R23 = 1k4
 R13,R27 = 47 Ω
 R14,R28 = 100 k
 P1 = 10 k, stereopotmeter, lineair, bijv. Piher
 PC16DH-10IP06-103A2020-TA

Condensatoren:

C1...C3,C8...C10 = 4n7, 1%, 63 V, radiaal, polystyreen, 7,5 x 7,5 mm
 C4,C11 = 330 p, 1%, 630 V, axiaal, polystyreen, 12,9 x 5 mm
 C5,C12 = 4μ7, 10%, 50 V, steek 5 mm
 C6,C7,C13,C14 = 100 n, 10%, 50 V, X7R, steek 5 mm
 C15,C16 = 220 μ, 20%, 35 V, elco, steek 3,5 mm, ø 8 mm

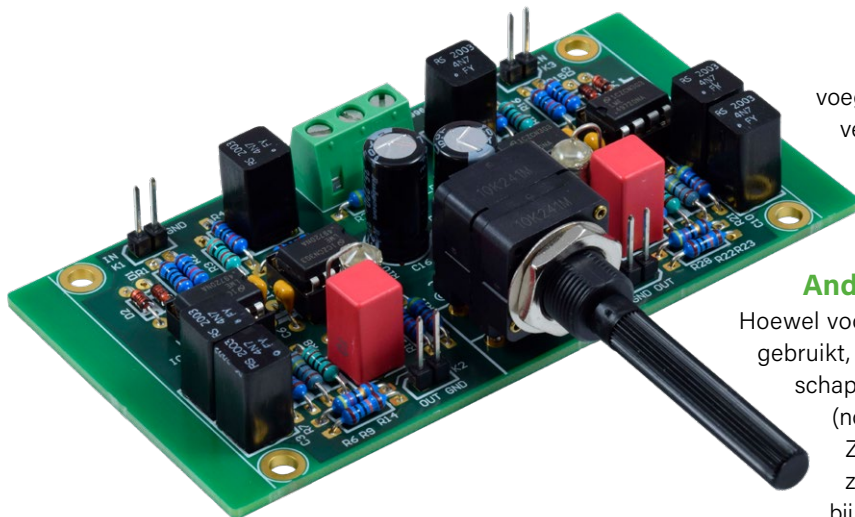
Halfgeleiders:

D1...D4 = 1N4148, DO-35
 LED1 = LED groen, 3 mm
 IC1...IC4 = LME49720NA/NOPB, DIP-8

Diversen:

K1..K4 = 2-polige pinheader, steek 2,54 mm
 4 RCA-connectoren (chassis), aan te sluiten op K1...K4
 K5 = 3-polige printkroonsteen, steek 5 mm
 4 DIP-8 IC-voetjes voor IC1...IC4
 Print 230190-1 V1.1

(= 1,5858) hebben de frequentiebepalende weerstanden en condensatoren dezelfde waarde, dus $C2 = C3$ en $R6 = R7$. Als een verandering nodig is, is de schakeling gemakkelijk genoeg te simuleren om te onderzoeken wat voor effect het veranderen van de componentenwaarden heeft op de karakteristiek van de hoog-booster. Verder heeft C1 dezelfde waarde als C2 en C3 wat het gemakkelijk maakt om het werkpunt te veranderen. Natuurlijk is het ook mogelijk R3 en R6 en R7 proportioneel te veranderen. De waarde van 4,7 nF (voor C1, C2 en C3) is gekozen omdat die verkrijgbaar is als 1% polystyreetype en dit diëlektricum een uitstekende keuze is die borg staat voor geringe tolerantie en vervorming. Dat is ook de reden waarom C4 een 1% polystyreencondensator is (axiaal, verticaal gemonteerd). Een geringe tolerantie van alle filtercomponenten minimaliseert het faseverschil tussen de twee signaalpaden en tussen de twee stereokanalen. Ieder faseverschil tussen de kanalen zou de stereoperceptie kunnen beïnvloeden. Een goedkopere oplossing (met een lagere kwaliteit) is het gebruik van standaard 5 mm PET-condensatoren voor C1...C3 en 5 mm keramisch voor C4 (gebruik tenminste een NP0/C0G-diëlektricum). Om een totale versterking van 12 dB rond 17 kHz te bereiken bovenop de verhouding van R12/R11, moet ook rekening worden gehouden met de versterking van het hoogdoorlaatfilter en de geringe verzwakking door condensator C4 die de bandbreedte begrenst. Zonder C4 zou de maximale versterking van de hoogste frequenties $3,37 = 10,5$ dB zijn: $(1 + R8 / R9) \times (R12 / R11)$. Voor frequenties ver onder het werkpunt is de totale versterking van de schakeling 1 (0 dB). Bij ongeveer 17 kHz wordt het signaal van het allpassfilter met zijn versterking van 1 toege-

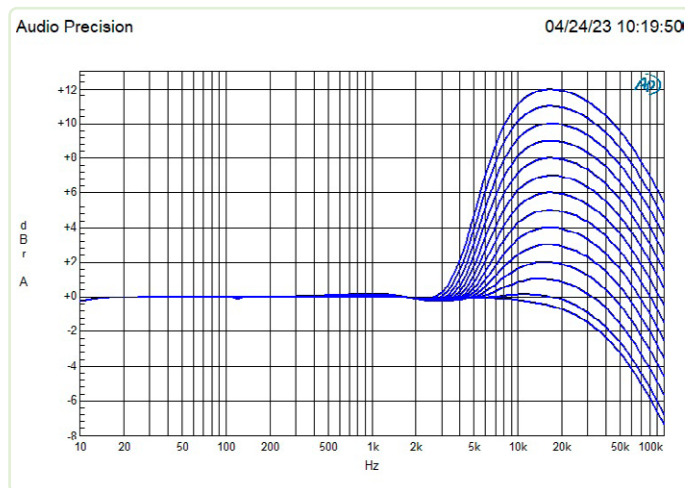


Figuur 3. De opgebouwde print van het prototype.

voegd aan het signaal van het hoogdoorlaatpad met zijn versterking van 3,37. Deze optelling leidt tot een totale versterking van $4,37 = 12,8 \text{ dB}$ met P1 op maximum. Samen met de verzwakking door C4 komen we vrij nauwkeurig uit op de gewenste 12 dB.

Andere aspecten

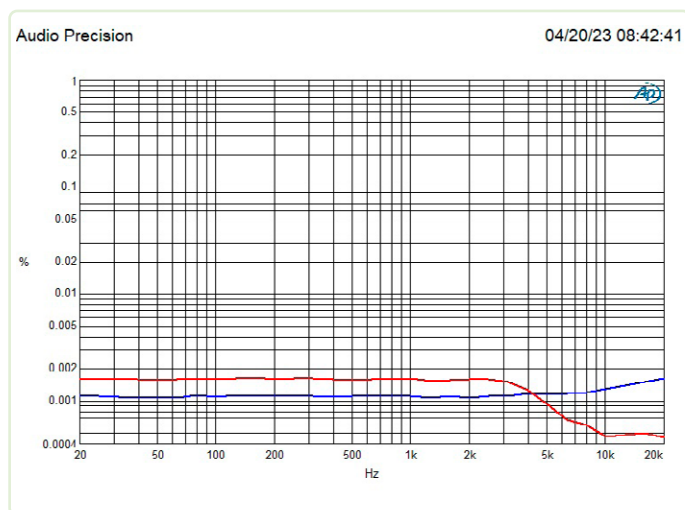
Hoewel voor elk kanaal een quad opamp had kunnen worden gebruikt, hebben betaalbare dual opamps veel betere eigenschappen. Een uitstekende keuze is de LME49720, die ook (nog steeds) verkrijgbaar is in een 8-pens DIP-behuizing. Zijn grote GBP (Gain Bandwidth Product) van 55 MHz en zijn extreem lage vervorming van $< 0,00007\%$ bij 20 kHz bij een belasting van $2 \text{ k}\Omega$ (3 V_{RMS} bij $U_B = \pm 12 \text{ V}$) maken hem heel geschikt voor dit soort schakelingen. Hij heeft ook een heel kleine offsetspanning aan de ingangen. De offset bij de uitgang van de somversterkers is licht afhankelijk van de stand van P1 maar bleef bij het prototype onder 1 mV. Bij gebruik van een andere opamp kan de offset veel groter zijn. C5 blokkeert alle gelijkspanning op de uitgang. De afsnijfrequentie bij een belasting van $10 \text{ k}\Omega$ is 3,7 Hz. De totale ruststroom van het prototype is $+44,7/-42,6 \text{ mA}$ voor beide



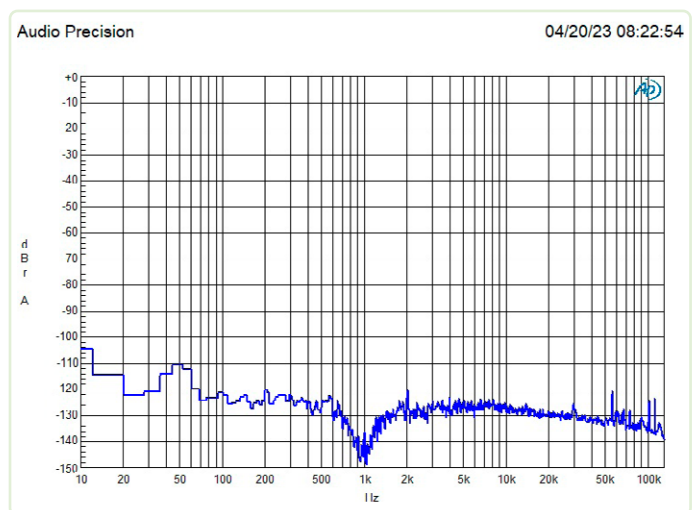
Figuur 4. Grafiek A: Het effect van de instelbare hogetonen-booster van 10 Hz tot 100 kHz.

Metingen aan het prototype

$V_{\text{in max}}$ (@ 1 kHz, THD = 0,1 %) $7,9 \text{ V}_{\text{tt}}$
 Hogetonenversterking begint van 6 kHz tot 3 kHz
 Max. versterking @ 17 kHz (P1 max.) 12 dB
 Ruststroom ($U_B = \pm 12 \text{ V}$) $+44,7 / -42,6 \text{ mA}$
 Bandbreedte (belasting $10 \text{ k}\Omega$, P1 min.) 3,7 Hz...48 kHz
 THD+N (1 kHz, 1 V, P1 min.) 0,0008 % (B = 22 kHz)
 THD+N (1 kHz, 1 V, P1 max.) 0,0012 % (B = 22 kHz)
 THD+N (1 kHz, 1 V, P1 min.) 0,0012 % (B = 80 kHz)
 THD+N (1 kHz, 1 V, P1 max.) 0,0016 % (B = 80 kHz)



Figuur 5. Grafiek B: THD+N van 20 Hz tot 20 kHz bij eeningangssignaal van 1 V en een bandbreedte van 80 kHz: Blauwe curve: P1 op minimum; rode curve: P1 op maximum.



Figuur 6. Grafiek C: de FFT van het uitgangssignaal met P1 op maximum en een sinussignaal van 1 kHz bij 1 V op de ingang.

kanalen samen. De stroom door LED1 is 2,1 mA. De ruststroom van een LME49720 is typisch 10 mA bij ± 15 V. Als je een standaard AC-adaptor wilt gebruiken als voeding, kun je bijvoorbeeld met een DC/DC-converter een symmetrische voeding voor de treble-booster maken. Het totale vermogensverbruik van de schakeling is 1,05 W, dus een symmetrische DC/DC-converter van 1 W is waarschijnlijk voldoende, maar een type met een iets groter vermogen en geregelde outputs is aan te raden. De meeste symmetrische DC/DC-converters hebben een uitgangsspanning van ± 12 V, daarom is gekozen voor een voedingspanning van ± 12 V. Maar het toegestane bereik van de LME49720 is $\pm 2,5$ V tot ± 17 V.

De breedte van de print (**figuur 2**) bedraagt bijna 100 mm, zodat hij precies past in de 1455-serie behuizingen van Hammond. De print kan worden ingekort tot aan de witte lijnen. Er zijn vier montagegaten, waarmee de print in een andere behuizing kan worden vastgezet. De 1455N1201 van Hammond zou een mooie keus zijn, maar de potentiometer is 1 mm te hoog zelfs als de print in de laagste gleuven wordt geschoven. Door het brede gedeelte van de aansluitingen van de potmeter iets te verbuigen, is hij wellicht net laag genoeg om te passen. Een andere mogelijkheid is de potmeter met zijn schroefdraad vast te zetten op het front van de behuizing en hem dan met korte, flexibele draden met de print te verbinden. Zo kan elke lineaire dubbele potmeter van 10 k Ω worden gebruikt. In **figuur 3** zie je de volgebouwde print van het prototype. De layout-bestanden kunnen worden gedownload van de projectpagina opj Elektor Labs [1].

Metingen

Om te zien of de theoretisch berekende doelen ook in de praktijk werden gehaald, heb ik een paar metingen uitgevoerd.

Grafiek A in figuur 4 toont de amplitude van 10 Hz tot 100 kHz en geeft een goede indruk van de karakteristiek van deze instelbare hogetonen-booster. P1 wordt verdraaid in stapjes van 1 dB bij 17 kHz. Bij de op één na onderste curve staat P1 op 0 dB versterking bij 17 kHz. Afhankelijk van de instelling van P1 verschuift het werkpunt van ongeveer 6 kHz naar 3 kHz als P1 van minimum naar maximum wordt verdraaid. In **grafiek B (figuur 5)** zie je de THD+N van 20 Hz tot 20 kHz bij eeningangssignaal van 1 V en een bandbreedte van 80 kHz. De blauwe curve is gemeten met P1 op minimum. De THD+N varieert van 0,0011% tot 0,0016% bij 20 kHz. De rode lijn is gemeten met P1 op maximum. Boven 3 kHz neemt de THD+N af tot 0,00048% bij 20 kHz. Het ruisniveau is relatief lager vanwege het hogere uitgangsniveau bij 20 kHz.

Grafiek C in figuur 6 toont een FFT van een 1kHz-signaal van 1 V met P1 op maximum. De 2^e harmonische en enkele artefacten boven 50 kHz zijn net zichtbaar boven het ruisniveau. De THD+N bij een bandbreedte van 22 kHz bedraagt 0,0012%.

Conclusie

De metingen tonen duidelijk aan dat de vooraf gestelde doelen ruimschoots bereikt zijn. Als je deze schakeling bouwt, krijg je een audioapparaat met zeer goede eigenschappen. Maar hoe gebruik je het in de praktijk optimaal?

Zoals aan het begin al opgemerkt, kan dit apparaat ouderen die hogere frequenties niet meer zo goed horen, helpen om beter te horen omdat dit probleem gedeeltelijk wordt gecompenseerd. Je kunt de schakeling dus eenvoudigweg aansluiten tussen een TV en een versterker (met luidsprekers natuurlijk). Als de hogetonen-booster dan goed is ingesteld, zou het resultaat voor de oudere in kwestie meer plezier bij het kijken van films en een betere verstaanbaarheid moeten zijn. Als dit jezelf (of één van je naasten) betreft, proberen het dan uit!

Waarschuwing: zoals bij alle hogetonen-boosters kan een (te) groot volume de tweeters overbelasten en beschadigen! Vergeet nooit: een viermaal grotere amplitude betekent 16 keer meer vermogen! 

230190-03 (vertaling: Evelien Snel)

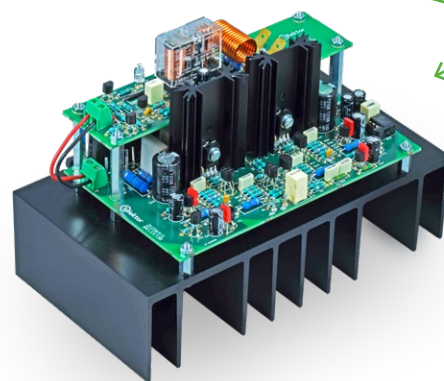
Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen hebt naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Gerelateerde producten

- > **B. Cordell , Designing Audio Power Amplifiers (2nd Edition).** New York: Routledge, 2019 (SKU 19150) www.elektor.nl/19150
- > **D. Self, Small Signal Audio Design (2nd Edition).** Burlington: Focal Press, 2010 (SKU 18046) www.elektor.nl/18046
- > **Elektor Fortissimo-100 Power Amplifier Kit (SKU 20273)** www.elektor.nl/20273



WEBLINK

[1] Projectpagina op Elektor Labs: <https://elektormagazine.com/labs/2nd-order-adjustable-treble-boost-230190>