

Elektronische belasting voor DC en AC

Tot 400 V en 10 A (piek)



Rainer Schuster (Duitsland)

Bij het ontwerpen of testen van een voeding is een belasting nodig om na te gaan of hij aan de vermogensspecificaties voldoet. De eenvoudigste belasting is een (vermogens)weerstand, maar als het gedrag van de voeding bij verschillende vermogensniveaus moet worden getest, wordt het een tijdrovende klus om steeds verschillende weerstanden in serie of parallel te moeten schakelen om de belasting te veranderen. Een elektronische belasting (E-Load) biedt dan uitkomst: de belasting kan elektronisch worden geregeld zonder dat de testschakeling steeds opnieuw moet worden aangepast.

De hier beschreven E-Load kan de schakeling met een constante weerstand, met een constante stroom, ofwel dynamisch belasten om het gedrag van de bron bij snel variërende uitgangsströmen te onderzoeken. De laatste optie vereist een (galvanisch gescheiden) USB-verbinding met een PC, plus een PC-app die de besturing overneemt en de door de E-Load gemeten en berekende (true-RMS) spanningen en stromen kan weergeven. In tegenstelling tot veel andere E-Loads is deze schakeling ook geschikt om wisselstroombronnen te testen.

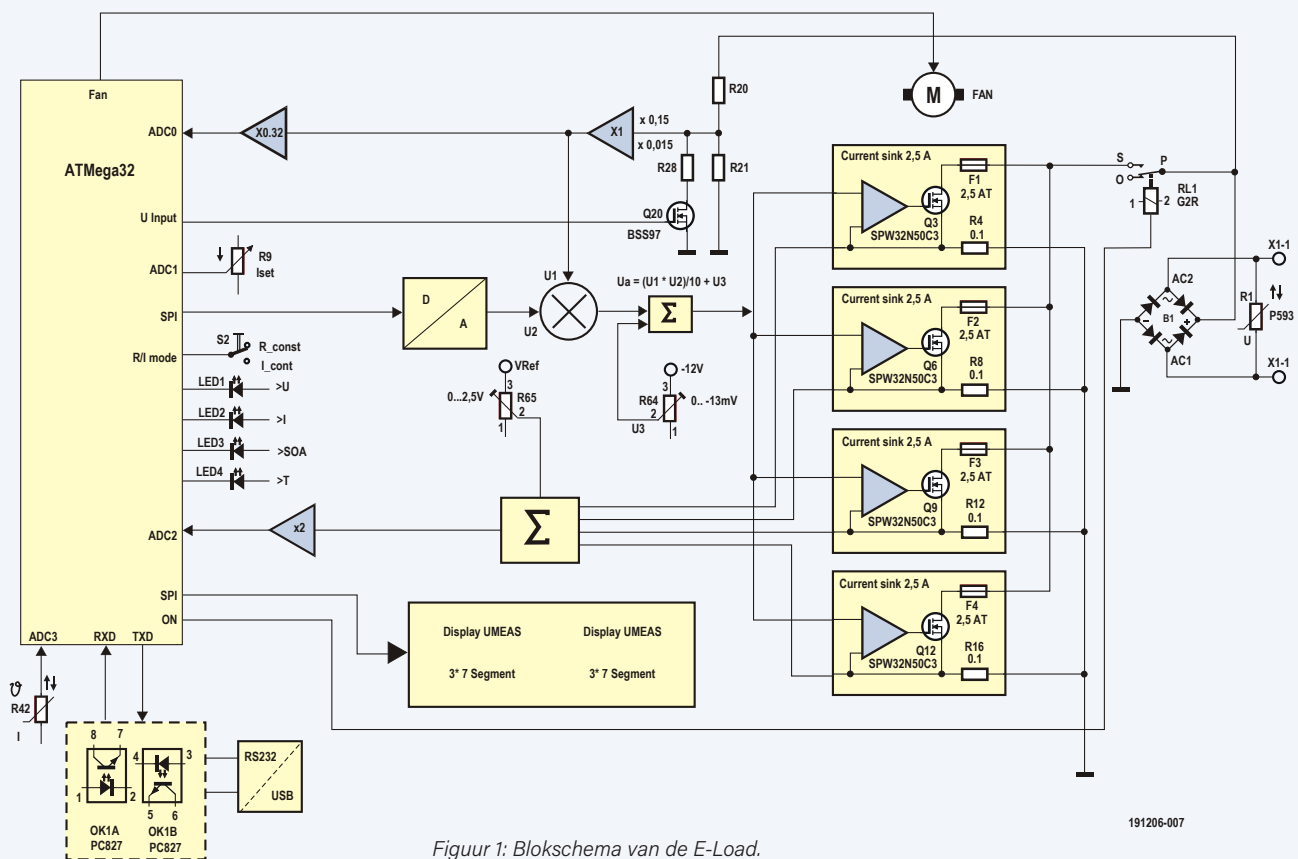
De hardware

Figuur 1 geeft een overzicht van de gehele E-Load en de afzonderlijke blokken. Ontwerp en werking worden in de loop van dit artikel nader besproken. Voor een maximale belasting van 10 A wordt een klassieke *current-sink* gebruikt met vier parallel geschakelde MOSFET's (Q3, Q6, Q9 en Q12) (**Figuur 2**). De stuurspanning wordt aangesloten op de niet-inverterende ingangen van de opamps IC1 en IC2. De resulterende belastingsstroom voor elke trap is gelijk aan deze stuurspanning gedeeld door de drainweerstand (R4, R8, R12,

R16). De maximale stroom door elke eenheid bedraagt derhalve 2,5 A.

Het koellichaam dat voor de belastings-transistoren wordt gebruikt is een LK75 van ELV Elektronik, met een 12 V ventilator. Met deze combinatie heeft het koellichaam een warmteweerstand van 0,44 K/W. De warmteweerstand van het thermische isolatie-plaatje (1,25 K/W) en van de junctie naar de behuizing van de transistor (ook 0,44 K/W) moeten daarbij worden opgeteld. De totale thermische weerstand is dus 2,13 K/W. De resulterende maximale vermogensdissipatie van een

WAARSCHUWING. Werken met hoogspanning kan dodelijk zijn. De hier beschreven schakeling is niet voor beginners. Bouw of gebruik hem niet, tenzij u ervaring heeft in het omgaan met hoge spanningen!



transistor (@ 150°C maximale junctietemperatuur en 25°C omgevingstemperatuur) is $P_v = (T_j - T_a) / R_{th} = 58 \text{ W}$, of 232 W voor vier eenheden. Om veiligheidsredenen en thermische beperkingen is de maximale vermogensdissipatie beperkt tot 200 W.

Opwekking van de stuurspanning

Een andere eis die aan deze elektronische belasting werd gesteld was dat hij wisselstroom moest kunnen verwerken. In dit geval moet de golfvorm van de stuurspanning de golfvorm van de ingangsspanning volgen. Om deze stroom regelbaar te maken, wordt de (geschaalde) ingangsspanning aangesloten op de ingang X1 van analoge multiplier IC5. De stuurspanning wordt aangesloten op Y1. De uitgang van de multiplier wordt direct verbonden met de ingang van de vier constante currentsink-units. De gebruikte multiplier is een AD633, de ingangen X2 en Y2 zijn met massa verbonden en Z is verbonden met een negatieve spanning van 0...-100 mV. De spanning op uitgang W is:

$$W = ((X1 * Y1)/10) + Z$$

De spanning op Z wordt aangepast (R64) om de stroomoffset te compenseren. De regelspanning op Y1 wordt berekend door de microcontroller en doorgegeven aan de 12-bit D/A-omzetter MCP4921 (IC6). Zijn referentiespanning is

ingesteld op 2,5 V (VR1) en dit is tevens de maximale uitgangsspanning van de DAC.

Spanningsmeting

De ingangsspanning van de belasting wordt gemeten door de microcontroller. Om het hele bereik van 0 tot 400 V met voldoende resolutie te bestrijken, worden twee door de microcontroller geregelde spanningsbereiken gebruikt. Bij ingeschakelde Q2 wordt de ingangsspanning gedeeld door 66 ($R_{20}, R_{28} || R_{21}$). Deze spanning wordt rechtstreeks op de multiplier aangesloten, zodat de golfvorm van de stroom de ingangsspanning kan volgen. Deze waarde wordt weer door R_{22} en R_{23} gedeeld door 10 en vervolgens door IC3B vermenigvuldigd met 3,26. Wanneer de ingangsspanning lager is dan 50 V, wordt Q2 uitgeschakeld en wordt de ingangsspanning gedeeld door 6,7 (R_{20}/R_{21}). Bij een ingangsspanning van 50 V is de spanning op de uitgang van IC3B 2,77 V (bitwaarde 567 @10bit A/D-conversie), de resolutie is 100 mV. Bij een ingangsspanning van 400 V is de spanning op de uitgang van IC3B gelijk aan 1,956 V (bit-waarde 400) met een resolutie van 1 V. Afhankelijk van de ingangsspanning (AC of DC) wordt ofwel de DC-spanning ofwel de gelijkgerichte AC-spanning gemeten. De berekening van de ware RMS-spanning wordt in de software gedaan.

Stroommeting

De stromen door de vier MOSFET's worden

opgeteld door IC7A en IC7B, bij $2,5 A_{rms}$ is de uitgangsamplitude 1 V. Deze waarde wordt vermenigvuldigd met IC7D tot een spanning van 0,43 V/A. Afhankelijk van de ingangsspanning (AC/DC) wordt ofwel de DC-stroom, ofwel de gelijkgerichte AC-stroom gemeten. De berekening van de ware RMS-stroom wordt in de software gedaan. Met R65 moet de offset van het stroomdisplay worden aangepast.

Opmerking: bij 10 A_{DC} staat er een spanning van 4,3 V op de A_{DC}-ingang. Voor AC-stromen mag de RMS-waarde niet hoger zijn dan 7 A!

Microcontroller

Voor de besturing van deze elektronische belasting wordt een ATmega32 microcontroller gebruikt. De controller kan worden geprogrammeerd via SV1 op de ISP-interface (bijvoorbeeld met een AVRISP MKII). Tijdens het programmeren moet de controller worden gevoed met de interne voeding.

Belangrijke veiligheidsaanzwijzing: Wanneer de elektronische belasting op de programmer is aangesloten, is er geen galvanische scheiding van de ingangsklemmen. Zorg er dus voor dat de programmer is losgekoppeld wanneer de ingangsklemmen op het lichtnet zijn aangesloten of wanneer de negatieve ingangsklem niet met massa is verbonden!

Figuur 2: De belangrijkste schema-delen.

Display

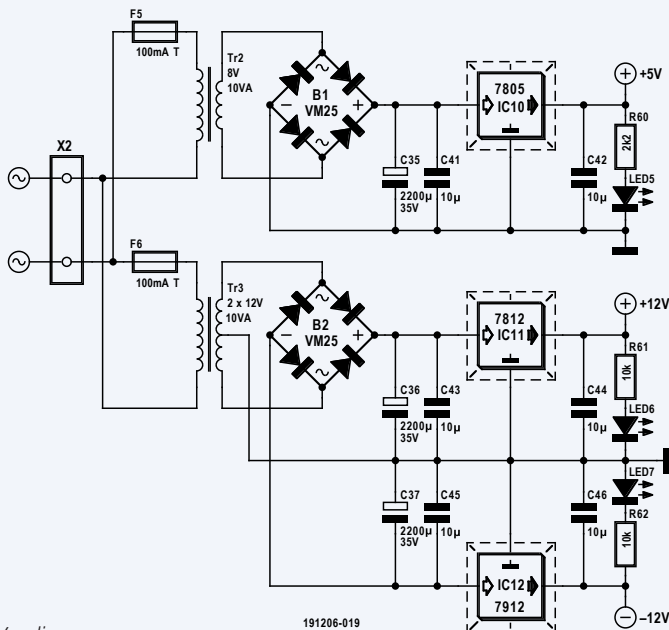
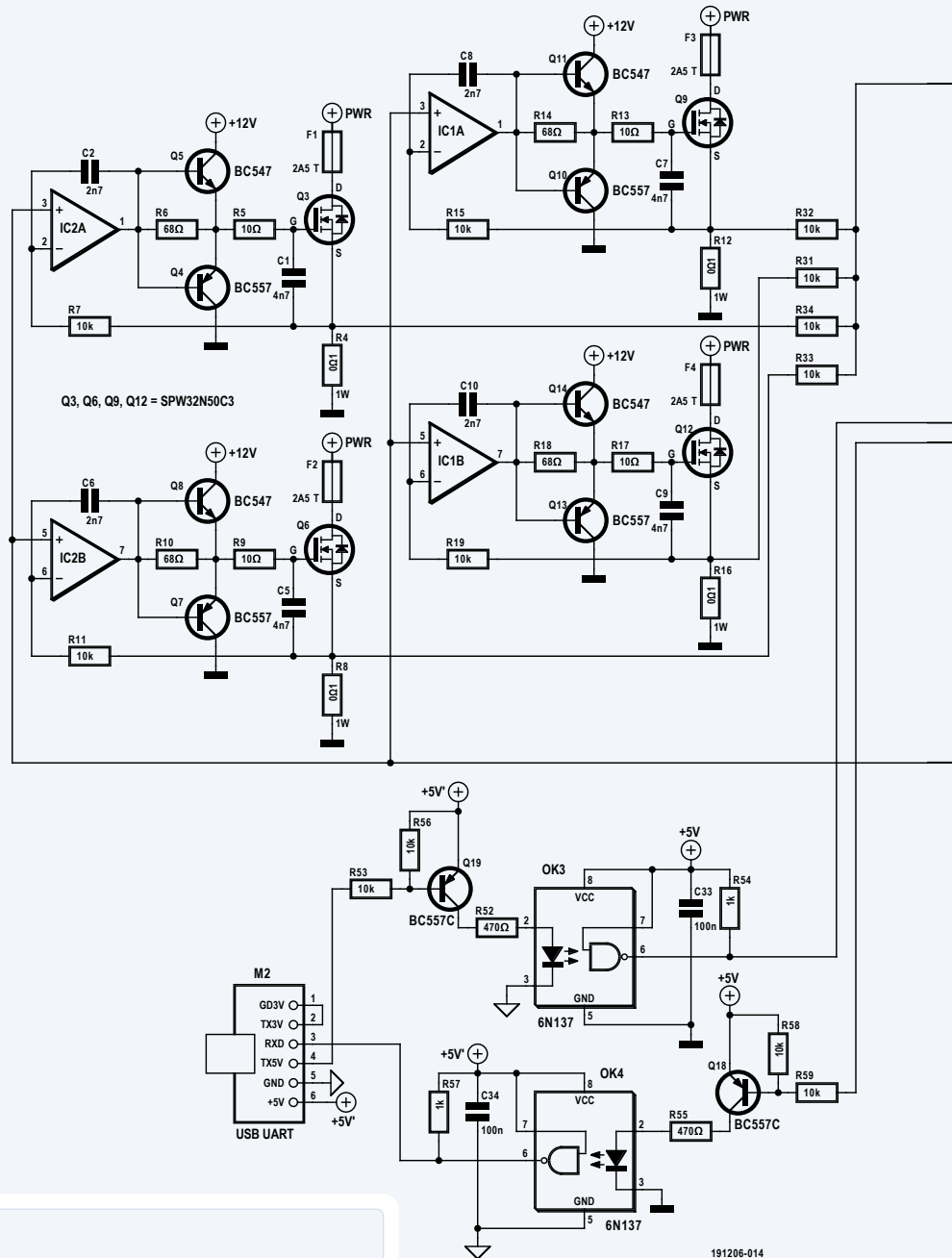
Voor de weergave van spanning en stroom worden zeven-segment LED-displays gebruikt, die worden aangestuurd door een MAX7219 SPI Display Controller. Het schema is overgenomen van een ouder Elektor-project [2] met een licht aangepaste PCB-layout die te vinden is op de Lab-pagina van het project [1].

USB Interface

De PC-communicatie wordt verzorgd door M2. De op de print gebruikte module is geleverd door Conrad, maar elke USB-UART die via USB wordt gevoed kan worden gebruikt. Om de galvanische isolatie te waarborgen, wordt de verbinding met de microcontroller gemaakt met optocouplers OK3 en OK4.

Stroomvoorziening

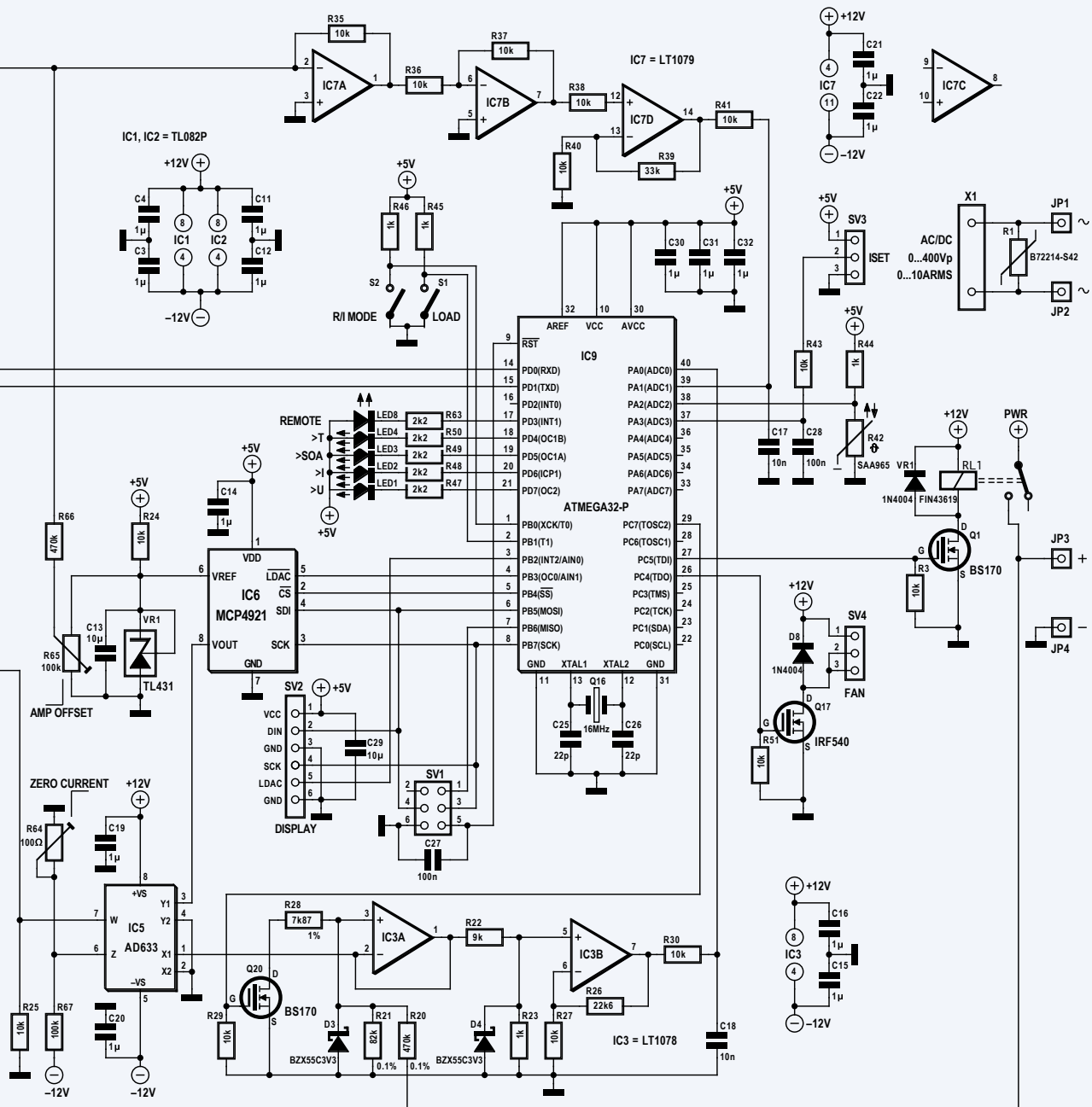
Deze elektronische belasting heeft +5 V nodig voor de microcontroller en +12 V en -12 V voor het analoge deel van de schakeling. Daarvoor worden twee op de printplaat gemonteerde transformatoren gebruikt en standaard spanningsregelaars (78XX en 79XX) (figuur 3).



Figuur 3: Voeding.

Firmware

De firmware voor de ATmega32 werd ontwikkeld met BASCOM AVR. U zult een gelicenseerde versie moeten kopen als u het wilt veranderen. Zowel de broncode als het HEX-bestand zijn beschikbaar voor download op [1]. De momentele RMS-waarden voor spanning en stroom worden om de 20 ms berekend. AC-spanningen en -stromen tot 100 Hz kunnen worden gemeten. Voor het "afvlakken" van de waarden wordt een gemiddelde berekend van 10 opeenvolgende metingen, zodat één volledige meting 200 ms bestrijkt. In de firmware is de berekening van de doelstroom afhankelijk van de instelling van de schakelaar R-const/I-const. In constante-stroommodus (I-const), moet de stroom constant zijn. In de



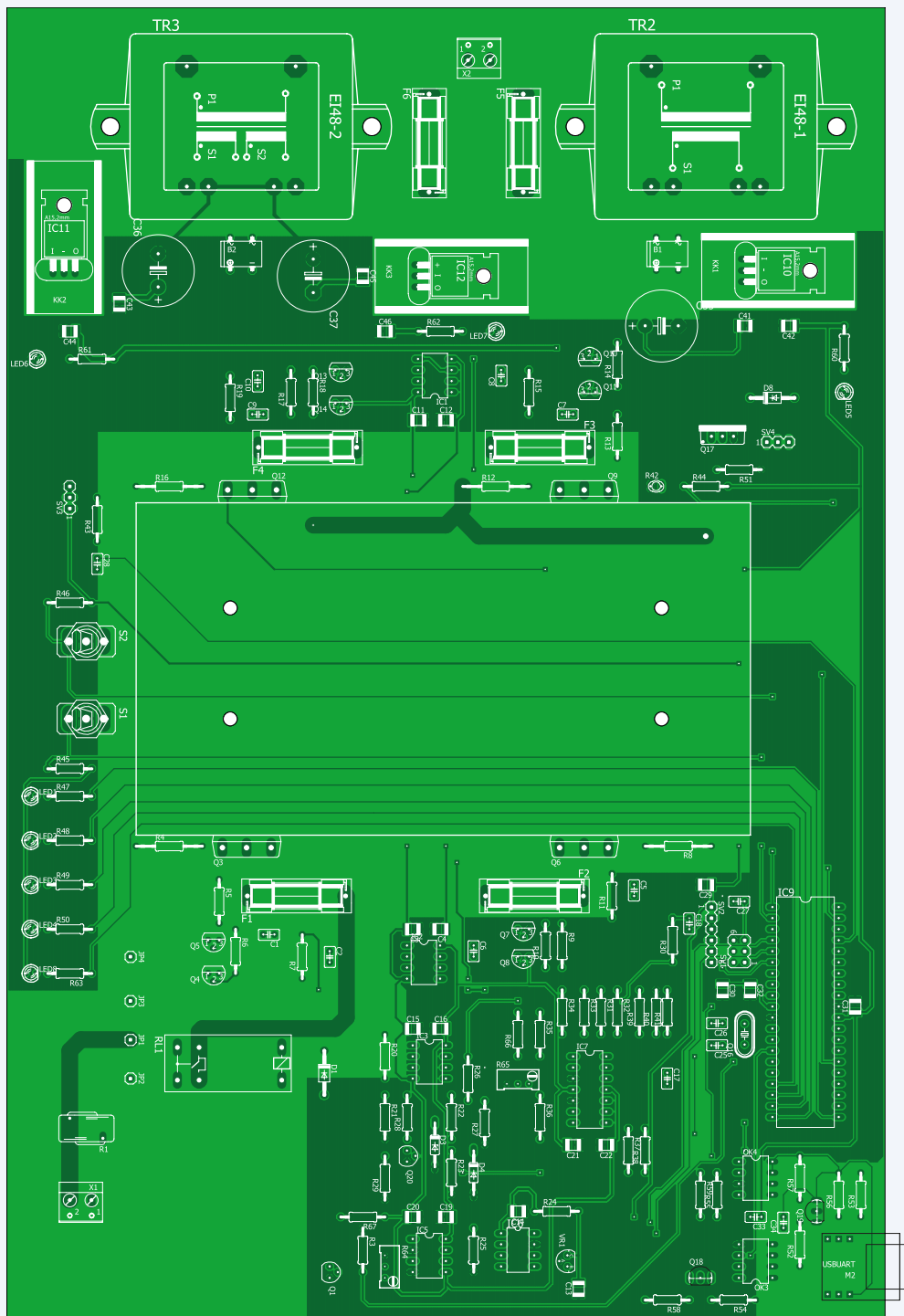
constante-weerstandsmodus wordt de weerstand constant gehouden door de stroom te variëren tot $I = V_{\text{input}}/R_{\text{const}}$. Om een constante stroom te bereiken, moet de DAC-waarde worden berekend afhankelijk van de ingestelde stroom en de momentele (RMS) spanning.

Vanwege toleranties van componenten kunnen doelstroom en werkelijke stroom verschillen. Daarom is in de functie 'Set_dest_current' een regelfunctie met I-karakteristiek geïmplementeerd. Als de doelstroom hoger is dan de momentele stroom, wordt de regelwaarde met 5 mA verhoogd. Is de gewenste stroom lager dan de momentele stroom, dan wordt de regelwaarde met 5 mA verlaagd. In de hoofdprogrammalus worden eerst de foutcondities gecontroleerd:

- Spanning > 400 V: LED >U aan, belastingsrelais uit, bij spanning < 400 V weer aan.
- Stroom: controleer één seconde na het wijzigen van de ingestelde stroom of de momentele waarde < ingestelde stroom + 100 mA. Zo niet: LED >I aan, belastingsrelais uit. Dit wordt weer ingeschakeld na power-cycling van de E-Load.
- Vermogen: Als spanning * ingestelde stroom > 200 W, brandt LED >SOA en het belastingsrelais wordt uitgeschakeld. Het wordt weer ingeschakeld na het power-cyclen van de E-Load.
- Temperatuur: Bij een koellichaamtemperatuur (gemeten met een NTC aangesloten op ADC2) van 40°C zal de ventilator worden ingeschakeld. Hij wordt ook ingeschakeld wanneer het vermogen meer

dan 100 W bedraagt. Wanneer de temperatuur onder 35°C daalt en het vermogen gedurende meer dan 10 s minder dan 100 W bedraagt, wordt de ventilator uitgeschakeld. Als de temperatuur van het koellichaam hoger wordt dan 80°C, gaat LED >T branden en wordt het belastingsrelais uitgeschakeld. Wanneer de temperatuur van het koellichaam onder 75°C daalt, wordt het belastingsrelais weer ingeschakeld.

Deze controles worden elke 500 ms uitgevoerd. Ook worden spanning en stroom op het display elke 500 ms bijgewerkt. Als geen sprake is van afstandsbediening, worden de schakelaars Load On/Off en I-const/R-const gelezen, net als de potmeterwaarde voor de stroominstelling.



Figuur 4: Print-layout van de hoofdprint (70% van ware grootte).

Instellen van de stroom/weerstand

Na het inschakelen van de elektronische belasting wanneer deze is ingesteld op *I-const*, is het stroombereik 1 A. Nadat de schakelaar van de belasting op 'Off' is gezet, zal het stroombereik worden ingesteld overeenkomstig de ingangsspanning. Het stroombereik is 10 A als de ingangsspanning lager is dan 20 V; anders is het stroombereik 200 W/momentele spanning. In de R-const-modus wordt de minimumweerstand ook berekend wanneer de belastingschakelaar op 'Off' wordt gezet door het bereik van de ingangsspanning/doelstroom.

De maximaal instelbare weerstandswaarde is de minimum weerstand * 100.

Opmerking: In de *I-const* modus komt de geheel naar links gedraaide potmeter overeen met de minimum stroom en tegen de rechteraanslag met de maximum stroom. Om overstroom te voorkomen bij het overschakelen van *I-const* modus naar *R-const* modus, komt de linker aanslag van de potmeter overeen met de maximum weerstandswaarde.

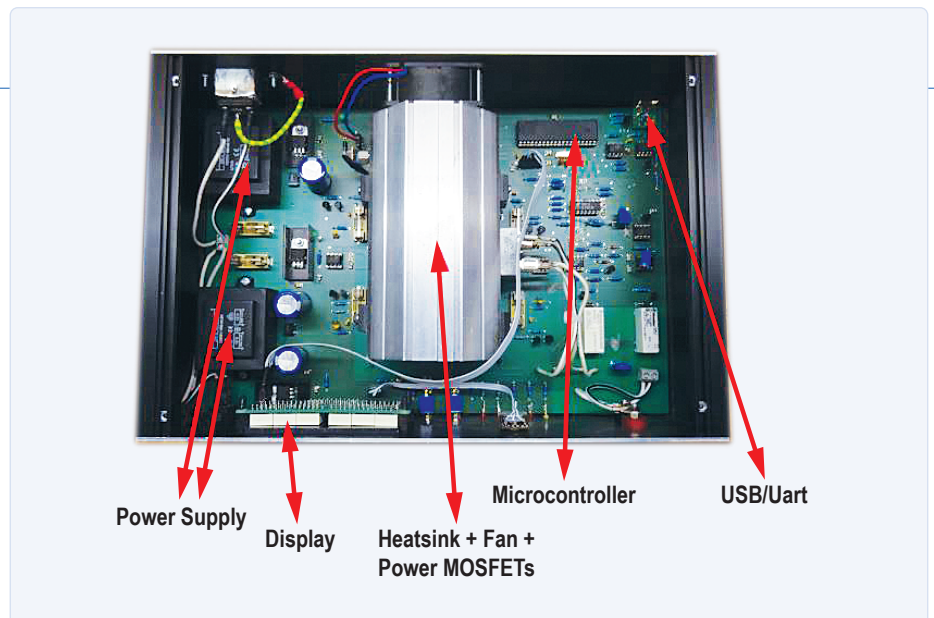
Het bouwen van de hardware

De Eagle-ontwerpbestanden en de Gerber-bestanden voor het bestellen van de printplaten

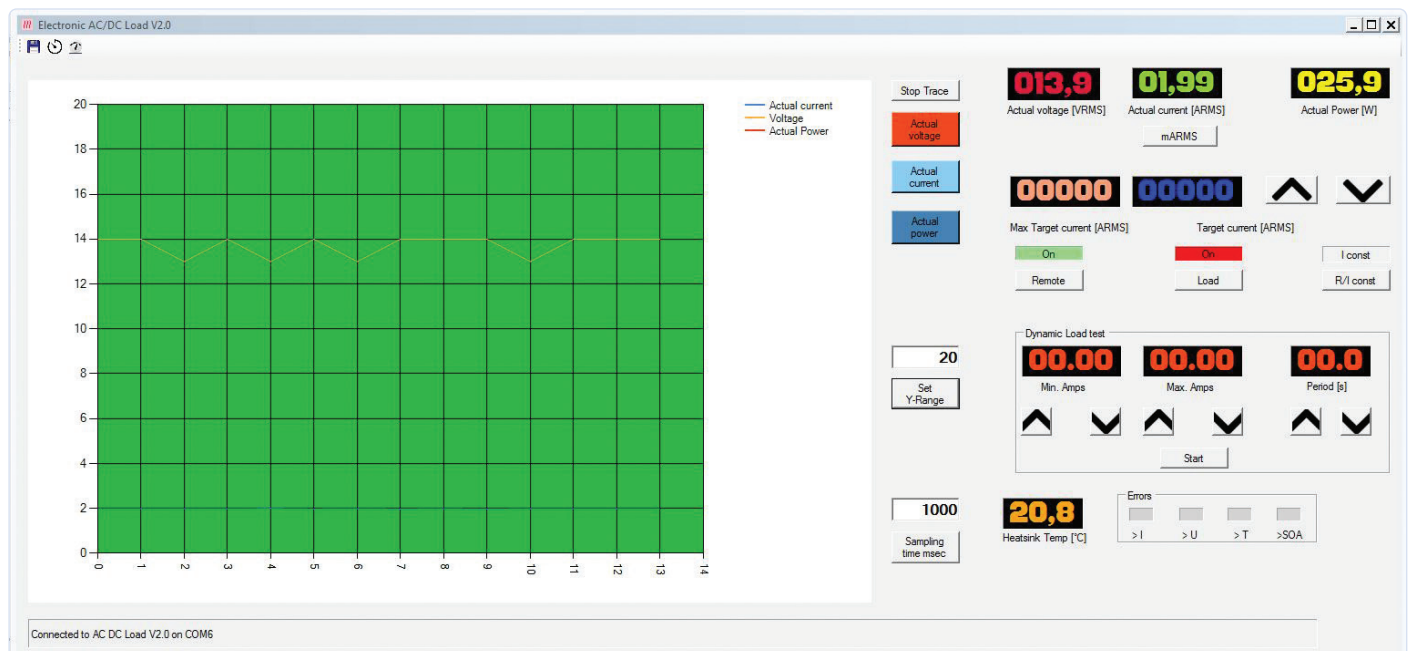
bij de printplatenfabrikant van uw voorkeur zijn beschikbaar voor download op [1]. De layout van de hoofdprint is te zien in **figuur 4**. Kijk op de Elektor Labs-pagina voor de displayprint, waar ook de componentenlijsten voor beide printen te vinden zijn. De printplaten zijn ingebouwd in een behuizing. In **figuur 5** is een overzicht te zien. De power MOSFET's zijn op het koellichaam gemonteerd met TOP3 thermische isolatieplaatjes en geleidende pasta. De diodebrug voor AC-metingen is ook op dit koellichaam gemonteerd en met JP1..JP4 aangesloten op de hoofdprintplaat. Het koellichaam zelf is op de PCB bevestigd met 2 mm plastic afstandhouders.

Bedieningssoftware

Voor de besturing van de elektronische belasting via USB werd een programma geschreven in Visual Basic voor Visual Studio 2015. Het uitvoerbare bestand is *Electronic_ACDC_Load.exe*. **Figuur 6** toont het hoofdscherm. Deze applicatie (zowel de broncode als het uitvoerbare bestand) kan ook worden gedownload op [1]. Op deze webpagina vindt u ook de volledige documentatie van dit project (*Description.PDF*) die een tabel bevat met alle beschikbare commando's om te communiceren met de E-Load via de seriële interface. Deze informatie komt van pas als u de PC-software wilt wijzigen. Het programma maakt verbinding met de elektronische belasting door alle beschikbare



Figuur 5: De E-Load van binnen.



Figuur 6: Hoofdscherm van de PC-applicatie.

Advertentie

Zelf EMC testen uitvoeren?

www.rentalab.nl

€150,-
per 2 uur
excl. BTW

Geautomatiseerde EMC faciliteiten:

- Geleide immuniteit
- Geleide emissie
- Gestraalde immuniteit
- Gestraalde emissie
- Pulse immuniteit (ESD/EFT/Surge)

Rent a Lab in 3 snelle stappen:

1. Ga naar www.rentalab.nl
2. Plan en reserveer een tijd slot (per blok 2 uur)
3. Bevestig & betaal direct online

COM-poorten te scannen en de ID-string elke seconde op te vragen, gedurende maximaal drie keer. Wanneer het programma de ID-String ontvangt, wordt deze samen met de COM-poort in de statusregel weergegeven. Vervolgens worden alle gegevens voor spanning, stroom, vermogen en temperatuur van het koellichaam elke seconde opgevraagd en weergegeven. Voor het instellen van de doelstroom/weerstand moet de knop 'Remote' op 'On' worden gezet. Daarna kunnen het belastingsrelais (Load On/Off) en de R-const/I-const-mode door het programma worden ingesteld. Met de toets 'mARMS' kan de weergave worden omgeschakeld van 'A' naar 'mA' en omgekeerd (alleen in I-const-mode). Met de toetsen Up/Down kan de stroominstelling worden verhoogd/verlaagd. Het veranderen van stappen begint bij 10 mA en loopt op tot 100 mA en uiteindelijk tot 1 A. Na loslaten van de toetsen is de veranderingsstap weer terug naar 10 mA (alleen in I-const modus). In de R-const modus kan de weerstand worden verhoogd/verlaagd. Verhogen is onbeperkt mogelijk; verlagen tot aan de minimum weerstand. De stapgrootte begint bij 1 Ω en loopt op tot 10 Ω en uiteindelijk tot 100 Ω. Na het loslaten van de toetsen keert de stapgrootte terug naar 1 Ω.

Dynamische belastingstest

Hier kunnen twee stromen (I-const mode), of twee weerstanden (R-const mode) worden ingesteld, bijvoorbeeld om voedingen te testen. Hoewel de applicatie de golfvormen van de stroombron toont, zult u een oscilloscoop moeten aansluiten op de uitgangsklemmen van de stroomvoorziening om de dynamische respons echt te onderzoeken. Met 'Periode' kunt u een interval in seconden instellen. Nadat op 'Start' is gedrukt, worden de twee doelstromen/weerstand omgeschakeld van de eerste waarde naar de tweede, enzovoort, totdat u op 'Stop' drukt. Dan wordt de stroom op '0' gezet in I-const modus of op de maximale weerstand in R-const modus.

Spanning, stroom en vermogen weergeven

Nadat op de toets 'Start Trace' is gedrukt, kunnen de eerder geactiveerde traces 'Actual current', 'Actual voltage' en 'Actual power' worden weergegeven. De opnamesnelheid kan worden ingesteld met de toets 'Sampling time msec.' Er worden maximaal 60 punten weergegeven, daarna worden de sporen gewist en begint de opname opnieuw. Hetzelfde gebeurt als u een doel wijzigt. De

resolutie van de verticale as kan worden gewijzigd met 'Set Y-Range.'

Logbestand

Door op het diskettesymbool te klikken, kan een logbestand worden geopend voor langdurig vastleggen van de gegevens. De gegevens worden opgeslagen in .CSV-formaat, zodat u de gegevens verder kunt verwerken in Excel of OpenOffice Calc. Door op het timer-symbool te klikken, kan de samplingtijd voor het logbestand worden gewijzigd. Een geopend logbestand kan worden gesloten door opnieuw op het diskettesymbool te klikken.

Kalibratie

Door op het instrumentensymbool te klikken, kan het display van de elektronische belasting worden gekalibreerd. U hebt gekalibreerde testapparatuur nodig voor het meten van spanning en stroom. Door de waarden voor 'Current display calibration value' en 'Voltage display calibration value' te veranderen,

kunt u de displaywaarden aanpassen naar de op de geijkte instrumenten weergegeven waarden. De waarden worden opgeslagen in de EEPROM van de microcontroller.

Voor veel elektrotechnici zal een elektronische belasting niet het meest gebruikte testinstrument zijn, maar het is wel erg handig om er een bij de hand te hebben als je een voeding bouwt, test of repareert. En hoewel ze ook kant-en-klaar te koop zijn, is het ook een optie om er zelf een te bouwen en dit ontwerp is zeker het overwegen waard!

Dit artikel is gebaseerd op de informatie op de Elektor Labs projectpagina op [1]. Op deze pagina is gedetailleerdere informatie over deze E-Load - inclusief alle software, PCB-ontwerpbestanden en BOM - te vinden of te downloaden. Een video over de presentatie van deze E-Load is te vinden op [3].

191206-02

Vragen of opmerkingen?

Heeft u technische vragen of opmerkingen over dit artikel? E-mail de auteur op rainerschuster@mnet-mail.de of neem contact op met Elektor via editor@elektor.com!

Bijdragen van

Idee, ontwerp, tekst en illustraties:

Rainer Schuster

Redacteur: **Luc Lemmens**

Schema's: **Patrick Wielders,**

Kurt Diedrich

Lay-out: **Giel Dols**

Vertaling: **Jelle Aarnoudse**



GERELATEERDE PRODUCTEN

> JOY-iT JT-HD35 USB Load Resistor (35 W)

www.elektor.nl/joy-it-hd35-usb-load-resistor-35-w

> Siglent SDL1020X-E Programmable DC Electronic Load (200 W)

www.elektor.nl/siglent-sdl1020x-e-programmable-dc-electronic-load-200-w

WEBLINKS

- [1] De Elektor Labs-pagina van dit project:
www.elektormagazine.com/labs/electronic-load-for-dc-and-ac
- [2] Zes-cijferig display met SPI-poort:
www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-200907/15838
- [3] Video: www.electronics-lab.com/ac-dc-200w-electronic-load/