

# Pekskärm med känsla i fingertoppen



## Bygg kring piezoelektrisk haptik



**Av Rich Miron, Digi-Key Electronics**

Rich Miron är applikationsingenjör på Digi-Key, där han arbetat i gruppen med ansvar för tekniskt innehåll sedan 2007. Han har huvudansvar för att skriva och redigera artiklar, bloggar och utbildningsmoduler. Innan Digi-Key arbetade Rich med att testa och kvalificera instrument och styrsystem för atomubåtar. Han har en elektronikexamen från North Dakota State University, Fargo.

**P**ekskärmar har blivit allt vanligare eftersom de har klara fördelar jämfört med mekaniska gränssnitt. För konsumenter är gränssnittet snyggt och intuitivt, och inom industrin undviker en inkapslad skärm problem med smuts och fukt. Fast det finns nackdelar för båda användargrupperna. Till exempel kan konsumenten sakna tydligheten som ett klick från en mekanisk brytare ger och inom industri kan det vara svårt att få knapptryckningar att registreras på pekskärmar när användaren har handskar.

Haptisk återkoppling, där vibrationer indikerar att knappar aktiveras, har använts för att skapa beröringsåterkoppling från pekskärmar, men dagens lösningar använder ofta skrymmande och komplexa mekaniska system. Dessa inkluderar vibrationsmotorer med excentrisk roterande massa (ERM) och linjära resonanta aktuatorer (LRA:er). Piezoelektrisk haptisk återkoppling är ett mer kompakt och flexibelt alternativ. Till nyligen gjorde dock den höga driftspänningen tekniken svår att använda i tillämpningar med låg effektförbrukning, vilket är ett viktigt krav i batteridrivna slutprodukter.

Framsteg inom piezoelektriska haptiska lösningar med hög upplösning adresserar problemet med hög effektförbrukning, men ger också andra fördelar när ett haptiskt gränssnitt konstrueras. Några exempel är ett kompakt format med låg profil, återkoppling med hög kraft och snabb responstid.

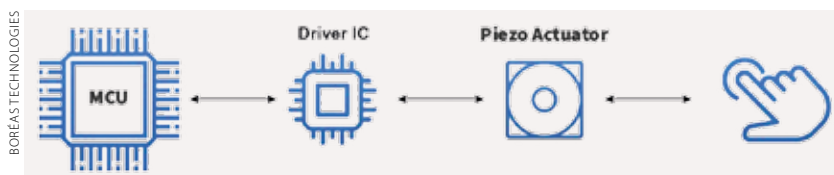
Den här artikeln tar först upp fördelarna med nya piezoelektriska haptiska aktuatorer jämfört med ERM:er och LRA:er. Därefter presenteras en ny kretsgeneration som bygger på flerlagerstrukturer och bipolära teknik, som tillsammans med effektiva drivkretsar åtgärdar tidigare problem kring effektförbrukning. Artikeln visar även hur konstruktörer kan utnyttja dessa aktuatorer och drivkretsar i produkter med pekskärmar med haptisk återkoppling.

**KONSTRUKTÖRER SOM VILL LÄGGA TILL** haptisk återkoppling i sina pekskärmsgränssnitt kan välja mellan tre alternativ: ERM:er, LRA:er och piezoelektriska aktuatorer. Alla tre utnyttjar samma grundprincip där en styrkrets övervakar driften och en drivkrets styr ett aktuator som skapar vibrationer (figur 1). Skillnaderna ligger i hur vibrationerna skapas.

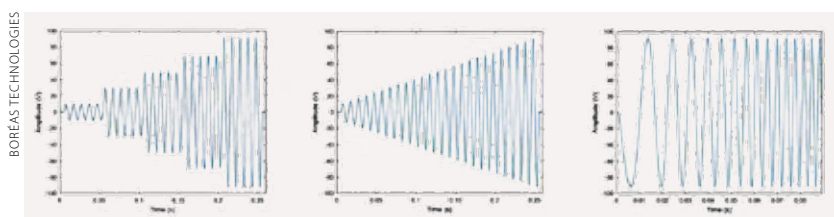
ERM använder en excentrisk roterande vikt, LRA använder en magnetisk vikt upphängd i fjädrar och den piezoelektriska enheten bygger på den omvända piezoelektriska effekten som orsakar en förändring i dimensionerna hos en kristall eller ett keramiskt objekt när den exponeras för ett elektriskt fält.

ERM:er och LRA:er har varit populära i bärbara konstruktioner eftersom de erbjuder ett lågspänningsalternativ (ca 3V) och endast behöver enkel drivning. Konventionella piezoelektriska enheter kräver mycket högre spänningar – upp till 200V – för att skapa tillräcklig mekanisk återkoppling, och därmed en bra användarupplevelse. De höga spänningarna krävs för att enheterna som driver typiskt bygger på nedskalad teknik för ljudförstärkare. De har inte utformats med tanke på låg strömförbrukning. Ytterligare en utmaning har varit bristen på specialiserade strömsnåla haptiska drivare för aktuatorer, vilket tvingat konstruktörerna att välja mindre effektiva lösningar.

Piezoelektriska lösningar har fördelen att de stöder högupplöst haptik som förbättrar återkopplingen jämfört med enkla, monotona vibrationer. Exempelvis kan piezo-



**Figur 1. Haptiska pekskärmsystem innehåller en styrkrets, en drivkrets och en aktuator. Här är aktuatoren en piezoelektrisk enhet, men ERM:er och LRA:er är populära alternativ.**



**Figur 2. Piezoelektriska haptiska aktuatorer kan skapa olika vibrationer som kan användas för att indikera olika resultat vid en knapptryckning.**

	ERM	LRA	Piezoelectric
Size l x w x h (mm)	8 x 3 x 3	10 (dia) x 3	9 x 9 x 2
Acceleration (g) @20 g	2	5	8
Response time (ms)	50	20	<1
Displacement	Satisfactory	Good	Very good
Operating voltage (V)	3	3	60 to 120 (unipolar) -20 to +20 (bipolar)
Energy per click (mJ)	17	15	1 to 8
Force sensing	No	No	Yes
Custom waveforms	No	No	Yes
Driver design	Simple	Simple	Complex

**Tabell 1. Jämförelse av driftegenskaper för haptiska återkopplingslösningar. Piezoelektriska enheter erbjuder bra acceleration (uppmätt i g där 1 g är accelerationen på grund av gravitationen vid jordytan (9,81 m/s<sup>2</sup>)), rörelse och svarstid samt anpassade vågformer som krävs för haptisk återkoppling med hög upplösning.**

elektriska aktuatorer skapa vibrationer som varierar i frekvens och amplitud, och de kan användas för att uttrycka olika känslor vid en knapptryckning (figur 2).

**LÖSNINGAR MED HÖGUPPLÖST** haptisk återkoppling kräver:

- **Bred bandbredd** – ger många olika vibrationsfrekvenser och lägen
- **Hög acceleration [g]** – ger starkare återkopplingskraft
- **Stor rörelsefrihet** – ökar känsligheten i den haptiska återkopplingen
- **Kort fördröjning** – snabb svarstid ökar omfånget av återkopplingen

**TABELL 1 SAMMANFATTAR** prestanda för var och en av de haptiska återkopplingslösningarna och visar att piezoelektriska lösningar är det enda alternativet för högupplösta tillämpningar eftersom de erbjuder en kombination av alla egenskaper nämnda ovan.

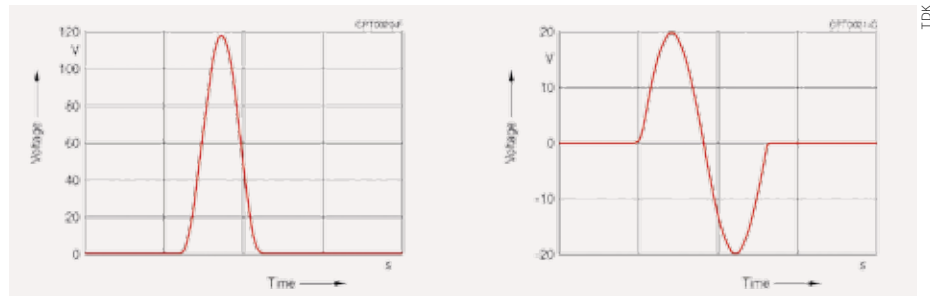
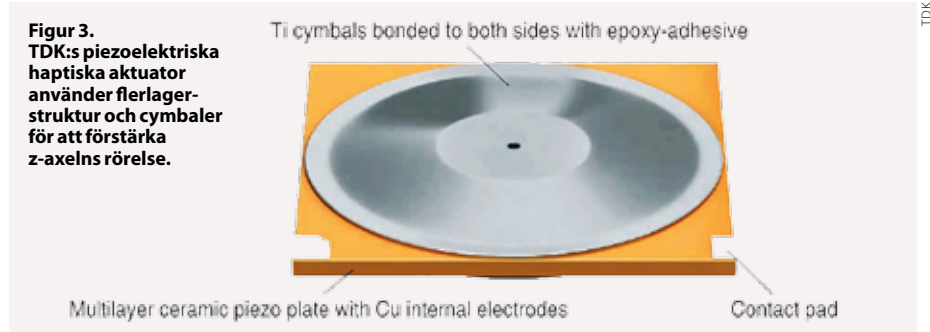
Drivkretsar för piezoelektriska aktuatorer är mer komplexa eftersom de kan alstra anpassade vågformer, vilket ERM och LRA inte har stöd för.

De senaste piezoelektriska aktuatorerna och drivkretsarna har gjort tekniken mycket mer anpassad för batteridrivna lösningar. Det finns till exempel piezoelektriska haptiska produkter, som TDK:s PowerHap B54102H1020A001 (upptar 12,7 mm<sup>2</sup>) och B54101H1020A001 (26 mm<sup>2</sup>), som båda är lägre än 2,5 mm. De har en flerlager- istället för enlagerstruktur, som används av enheter baserade på ljudförstärkarteknik. Flerlagerstrukturen sänker drivspänningen till 60–120 V.

Varje lager hos TDK:s flerlagerprodukt expanderar bara väldigt lite i z-riktningen på grund av den omvända piezoelektriska effekten. Samtidigt samverkar lagren i x- och y-riktning eftersom den piezoelektriska enheten måste behålla en konstant volym.

TDK:s produkter förstärker sammandragningen med något som kallas cymbaler i varje ände av den piezoelektriska enheten. Det ökar z-axelns rörelse med en faktor 15, vilket ger en rörelse på mellan 35 och 65 µm bero-

**Figur 3.** TDK:s piezoelektriska haptiska aktuator använder flerlagerstruktur och cymbaler för att förstärka z-axelns rörelse.



**Figur 4.** Tvåpolig drift (till höger) ger samma mekaniska rörelse som enpolig, men med lägre spänning topp till topp.

ende av modell (figur 3). Vid en belastning på 100 gram (enpolig drift, sinusvåg med enkel puls, 200 Hz) uppnår den större aktuatoren en acceleration på 30 g från topp till topp efter bara en 1 ms. Frekvensområdet på 1–1 000 Hz gör att en konstruktör kan skräddarsy den haptiska återkopplingsprofilen.

TDK:s aktuator kan användas i antingen en- eller tvåpoligt läge. Vid enpolig drift matas en positiv spänning över aktuator medan spänningen varierar mellan positiva och negativa toppvärden vid tvåpolig funktion. Fördelen med två- jämfört med enpolig drift är att samma spänning topp till topp ger större rörelse eller så kan samma förskjutning fås med en lägre spänning topp till topp. Nackdelen är att tvåpolig funktion ökar de mekaniska och elektriska belastningarna på aktuatoren (figur 4).

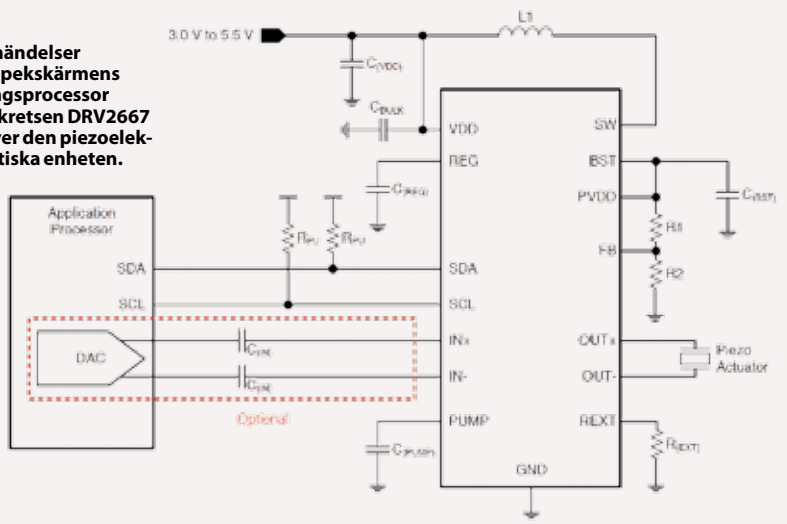
Halvledartillverkare har även kommit med drivkretsar som är särskilt utformade för haptiska återkoppling. De kan ge ett

antal vibrationslägen över ett frekvensområde och erbjuder en- eller tvåpoliga egenskaper samtidigt som de har mycket högre verkningsgrad än tidigare alternativ. Två exempel är Boréas Technologies drivkrets BOS1901CQT och Texas Instruments motor-drivkrets DRV2667.

Boréas Technologies drivkrets har energi-återvinning och kan alstra flera vibrations-signaler. Den kan driva aktuatorer med upp till 190 V topp-topp från 3–5,5 V. BOS1901 använder ett snabbt SPI-gränssnitt och alla inställningar kan justeras via dess digitala front-end. Den typiska starttiden är på under 300 µs, vilket ger låg fördröjning.

TI:s drivkrets integrerar en boostomvandlare på 105 V och en digital front-end som kan driva både hög- och lågspända aktuatorer. Dess digitala front-end hanterar pulsbreddsmodulering (PWM) eller behovet av ytterligare analoga kanalkrav hos värdsystemet. Kretsen inkluderar dedikerat minne

**Figur 5.** Haptiska händelser utlöses av pekskärmens tillämpningsprocessor medan TI-kretsen DRV2667 sedan driver den piezoelektriska haptiska enheten.



för att lagra och hämta vågformer samt en avancerad vågformssyntetiserare. En typisk starttid på 2 ms begränsar fördröjningen, medan det termiska överbelastningsskyddet hindrar enheten från att skadas.

Både Boréas och TI:s kretsar är konstruerade för att användas i ett beröringsaktiverat system som redan inkluderar en applikationsprocessor. Processorn trigger den haptiska återkopplingen via ett SPI, alternativt kan en analog ingång användas (figur 5).

Integreringsnivån hos de senaste drivkretsarna gör att det har blivit enklare att utforma pekskärmssystem med piezo-

elektrisk haptisk återkoppling, men vissa komponentval är viktiga för att optimera konstruktionens prestanda. Till exempel ska boostspänningen (BST) vara 5V högre än toppspänningen som aktuatorn utsätts för. Detta möjliggör en grad av förstärkar-overhead som ställs in med motståndsnätet R1/R2 (figur 5).

**FORMELN FÖR ATT BERÄKNA** motståndsvärdena är:  $V_{(BST)} = V_{(FB)} \times (1 + R1/R2)$ , där  $V_{(FB)} = 1,32$  volt.

För att till exempel nå TI-kretsens maximala  $V_{(BST)}$  på 105 V kan R1 och R2 vara 768 och 9,76 kΩ.

Toppboostströmmen dras från matningen via induktorn L1. Strömmen avgörs av  $R_{(EXT)}$ , men du måste vara noga med att välja en induktor som kan hantera den programmerade strömgränsen ( $I_{LIM}$ ). Förhållandet mellan  $R_{(EXT)}$  och  $I_{LIM}$  bestäms med formeln:

$$R_{(EXT)} = \left( K \times \left( \frac{V_{REF}}{I_{LIM}} \right) \right) - R_{INT}$$

Där  $K = 10\,500$ ,  $V_{REF} = 1,35$  V,  $R_{INT}$  (drivkretsens interna motstånd) = 60 Ω och  $I_{LIM}$  = toppströmegränsen för L1.

Val av induktor är viktigt för att säkerställa bästa prestanda hos drivkretsen. För TI-kretsen ligger den rekommenderade induktansen mellan 3,3 och 22 μH. Avvägningen är mellan att använda en högre induktans för att sänka switchningsförlusterna för boostomvandlaren eller en mindre induktans för att maximera utgångsströmmen.

De viktigaste elektriska specifikationerna för den piezoelektriska haptiska aktuatorn från drivkretsens perspektiv är spänning och kapacitans. Vid TI-kretsens maximala frekvens på 500 Hz är till exempel enheten optimerad att driva upp till 50 nF vid 200V<sub>topp-till-topp</sub> (drivkretsens högsta spänningssvängningskapacitet). Kretsen kan driva större kapaciteter om den programmerade förstärkningsspänningen har sänkts och/eller användaren begränsar ingångsfrekvensen till 300 Hz.

Ett annat viktigt komponentval är för-

stärkningskondensatorn ( $C_{(BST)}$ ). Kondensatorn måste ha en spänning som är minst lika hög som laddningsspänningen eller helst högre. Till exempel rekommenderas en 100 nF-kondensator av X5R- eller X7R-typ, klassad för 250V när TI-kretsens maximala förstärkningsspänning på 105V används.  $C_{(BST)}$  måste ha en minimal arbetskapacitans på 50 nF. För  $V_{(BST)}$  från 30 till 80V är en 100 nF-kondensator klassad för 100V godtagbar och för  $V_{(BST)}$  lägre än 30V rekommenderas en 0,22 μF-krets klassad för 50V.

En bulkkondensator ( $C_{(BULK)}$ ) placerad nära induktorn rekommenderas på grund av switchstiftets strömkrav. En keramisk kondensator av X5R- eller X7R-typ med kapacitans på minst 1 μF rekommenderas.

För konstruktörer som vill experimentera med egenskaperna hos TDK:s piezoelektriska haptiska aktuatorer innan de väljer hårdvara finns den enkanaliga PowerHap-utvärderingssatsen Z63000Z2910Z1Z1. Satsen innehåller ett baskort, en step-up-omvandlare, en utgångsdrivkrets och ett styrkrets-kort.

Satsen levereras med konfigurationsprogramvara som körs på en dator med Windows 7 (eller senare). När programvaran laddats ansluts satsen till datorn via en USB-kabel och drivs med 12V. Programvaran tillhandahåller ett gränssnitt för att konfigurera det haptiska svaret från aktuatorn när det trycks in. Gränssnittet tillåter konfiguration av följande signalparametrar (figur 6):

- Amplitud: 5 till 100 procent (115 volt)
- Frekvens: 20–300 Hz
- Vågform: trapetsvåg, sinusfyrcantvåg, sågtandsvåg
- Trapetsarbetscykel: 35 till 75 procent
- Pulsantal: 1 till 1000
- Utlösningsnivå: 0 till 12V (ju lägre utlösningsnivå desto hårdare måste aktuatorn tryckas in för att aktivera signalen)
- Fördröjning (då aktuatorn inte känner av någon kraft)

**PROGRAMVARAN GÖR DET** även möjligt för konstruktören att skapa anpassade vågformer. När programvaran har konfigurerats skickas informationen till satsens processor via USB-kabeln.

En andra utvärderingssats, PowerHap Z63000Z2910Z1Z44, är utformad för konstruktörer som använder Boréas BO-S1901CQT piezoelektriska haptiska drivkrets. Den här satsen inkluderar ett baskort, en step-up-omvandlare, två drivkretsar och en styrkrets. Baskortet kommer med en piezoelektrisk haptisk aktuator från TDK (figur 7).

Kortet ansluts till en dator via en USB-kabel, det använder det standardiserade USB-ljudprotokollet, och fungerar som en normal audioutgång för alla datorer. USB-ljudprotokollet kan användas för att konstruera prototyper av haptiska effekter i programvara som MATLAB, Python och Audacity. Det går att skapa vågformer upp till 190V<sub>till-topp</sub> och att utföra uppspelning. ■



**Figur 6.** Programvaran för TDK PowerHap-utvärderingssatsen erbjuder ett signalkonfigurationsgränssnitt. När konfigurationen har ställts in kan den skickas till utvärderingskortets processor via knappen "Transmit configuration".



**Figur 7.** TDK:s PowerHap-utvärderingssats Z63000Z2910Z1Z44 använder Boréas piezoelektriska haptiska drivkretsar och uppfyller USB-ljudprotokollet, viktet förklarar konfigurationen.