

# ELEKTRONIK TIDNINGEN



Frank Lehmann  
applikationsingenjör  
Synopsys



Thorsten Gerke  
senior teknisk marknadschef  
Synopsys

## Konstruktion och optimering av elektrisk bränsleinsprutning

Det virtuella fordonet – Del 4 av 4

Redaktör  
Jan Tångring  
jan@etn.se  
0734-17 13 09

**EMBEDDED**  
EXPERT

9 juli 2010 © Synopsys och Elektroniktidningen Sverige AB

Kostnadsfria rapporter om inbyggda system – [etn.se/expert](http://etn.se/expert)



# Konstruktion och optimering av elektrisk bränsleinsprutning

Det virtuella fordonet – Del 4 av 4



**Thorsten Gerke** studerade maskinteknik/mekatronik vid universitetet i Duisburg och började sin karriär som support- och applikationsingenjör på Avanti Systems. År 2002 började han på Synopsys och sedan 2006 leder han teknisk marknadsföring av produktfamiljen Saber i Europa.



**Frank Lehmann** studerade elektroteknik vid University of Applied Sciences i Leipzig. Han började sin karriär som utvecklingsingenjör på Siemens VDO. Sedan 2007 arbetar han med teknisk kundsupport för Saber.

**D**agens motorkonstruktioner ställs inför allt högre krav från fordonstillverkare och leverantörer om högre verkningsgrad, lägre bränsleförbrukning och förbättrad körkomfort, samtidigt som de skall uppfylla stränga krav på avgasrening. I denna artikel beskrivs metodiken *Robust Design Methodology*, som används för optimering av prestanda och tillförlitlighet. Hur denna metodik kan användas demonstreras med ett elektriskt bränsleinsprutningssystem.

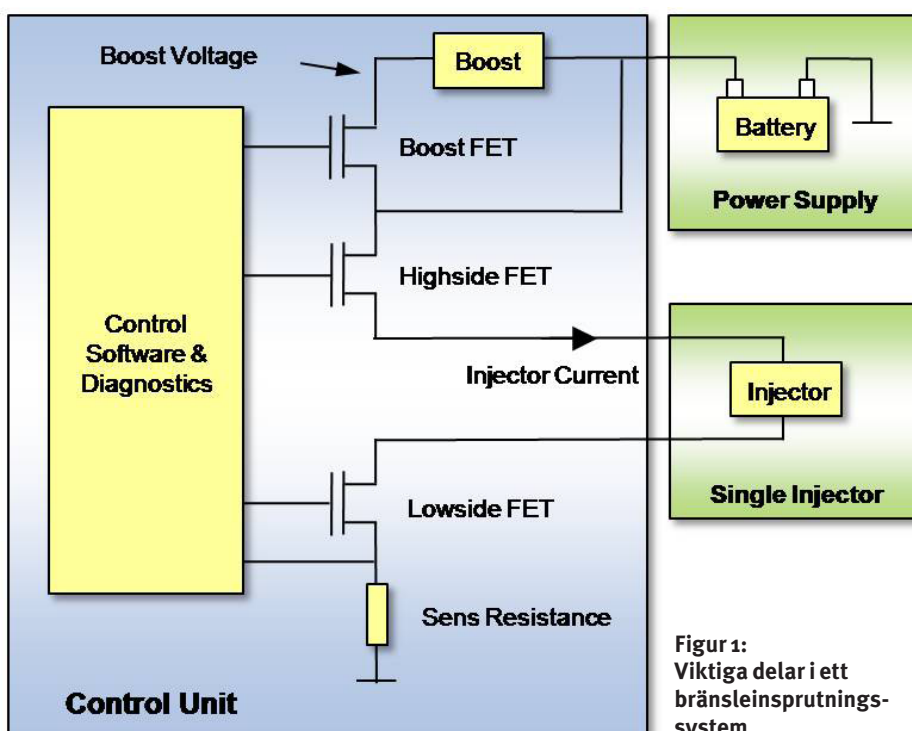
I dagens avancerade bilmotorer finns komplex elektronik som är uppbyggd av både hårdvara och mjukvara. Dessa system måste på ett optimalt sätt uppfylla delvis motstridiga krav. Typiska krav för dagens implementeringar är:

- Maximal effekt med minimal bränsleförbrukning
- Hög körkomfort
- Låga avgasutsläpp
- Lång livslängd och hög tillförlitlighet
- Enkel diagnostik

Bränsleinsprutningssystemet, tillsammans med sitt elektriska styrsystem, är

en mycket viktig del i den totala motorkonstruktionen. Om man tar hänsyn till alla kriterier som räknats upp ovan får

detta en avsevärd inverkan på totalresultatet vad gäller motorkvalitet. **Figur 1** visar den elektriska delen av ett bräns-



**Figur 1:** Viktiga delar i ett bränsleinsprutningssystem

leinsprutningssystem som liknar de som används i system med direktinsprutning. Systemet är sammansatt av två huvudfunktioner.

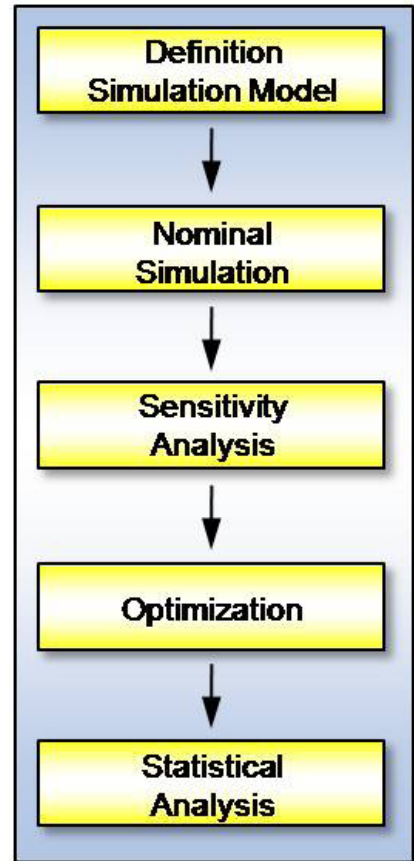
**Den första funktionen** omfattar de fysiska utgångsstegen, drivstegen och spänningskällan, som ger injektorströmmen. Den andra omfattar den applikationsmjukvara som styr bränsleinsprutningen och utför diagnostik.

I denna funktion klockas en effekt-MOSFET med en PWM-signal via gate-drivsteget på höga sidan som levererar ström till injektorsystemet. Ett boost-block läggs till för att ge tillräckligt med ström i början av insprutningsfasen. Matningsspänningen på 60 V kopplas

tillfälligt på med hjälp av en extra effekt-MOSFET.

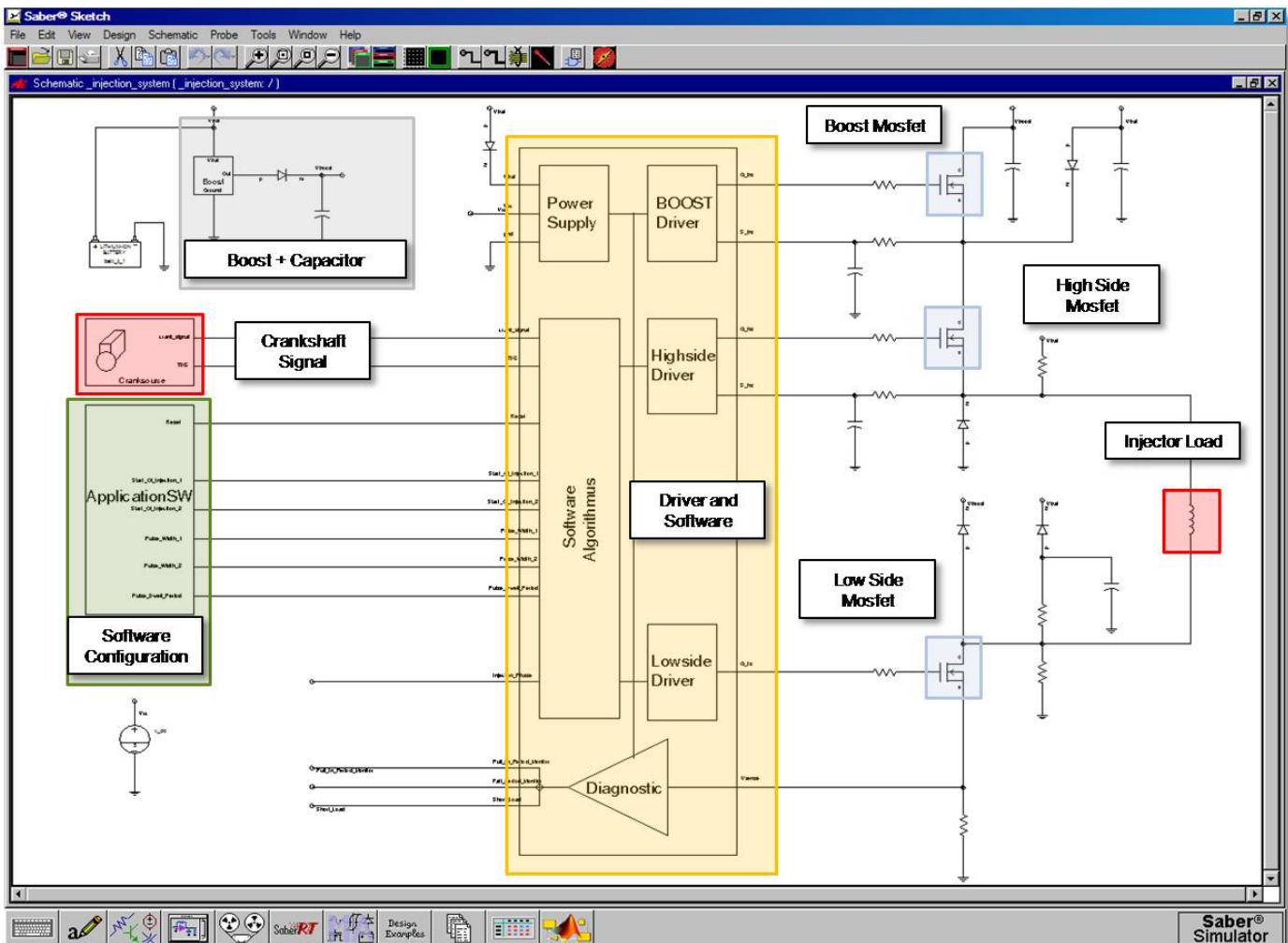
En speciellt krävande uppgift under utvecklingsarbetet är att uppfylla alla OEM-tillverkarnas krav, och samtidigt optimera konstruktionen inom givna toleranser. Dessa krav består av tillåtna tidsintervall för inkopplingscyklerna vid bränsleinsprutning, liksom för de flanker som uppstår. Härigenom garanteras optimal insprutning inom det erforderliga tidsintervallet.

Det finns också ett behov av att tidigt kunna verifiera konstruktionen med avseende på komponenttoleranser. Detta kan vara en mycket svår uppgift om man saknar tillgång till lämpliga möjligheter och metodiker för simulering, eftersom



Figur 2: Robust Design Methodology

Figur 3: Simuleringsmodell av ett bränsleinsprutningssystem



det inte finns några fysiska prototyper tidigt under konstruktionsfasen. Även om man har tillgång till hårdvaruprototyper är det inte genomförbart att utföra systematisk analys av värstafallet-beteendet över hela omfånget av komponenttoleranser.

Varje hårdvaruimplementering av styrenheten representerar en specifik konfiguration vad gäller dess toleranser. Därför använder konstruktörerna simuleringsbaserade metodiker för de nödvändiga analyserna. Även om användandet av robusta konstruktionsmetoder inte nödvändigtvis är bundet till simulering, kräver användandet av dessa metoder specifika steg som skulle vara alltför tids- och kostnadskrävande om de utfördes med hårdvaruprototyper.

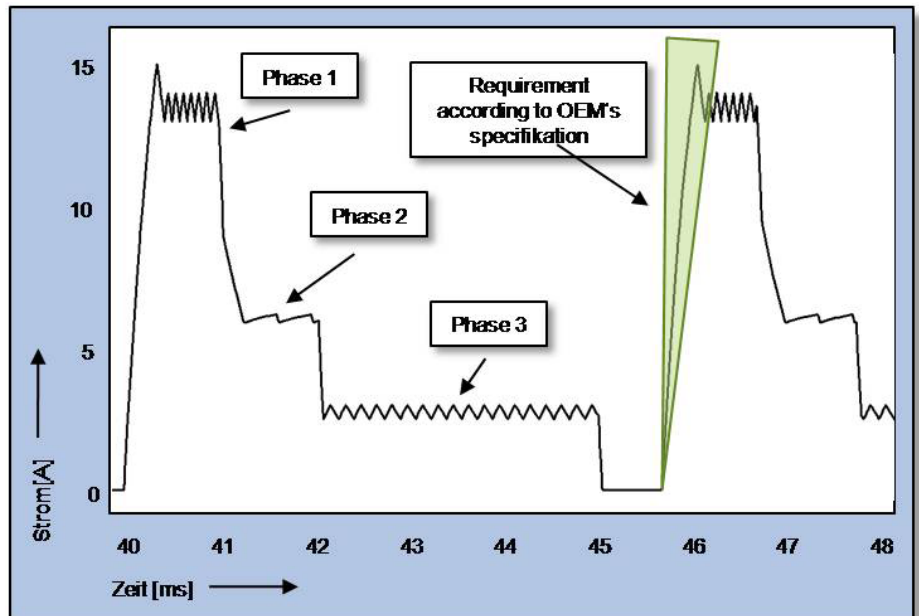
**Genom att använda Robust Design Methodology** kan man garanterat uppnå optimala prestanda hos systemimplementeringen över alla variationer inom specifikationen. Komponenttoleranser beroende på tillverknings- och temperaturvariationer är några av de ingående faktorerna. En av de vanligaste metodikerna inom detta område kallas Design for Six Sigma.

Robust Design Methodology består av fem på varandra följande steg, vilket visas i **Figur 2**. Det första steget definierar systemet och den motsvarande virtuella prototypen (det vill säga simuleringsmodellen). Här definieras relevanta systemparametrar för analysen (till exempel om väderberoende effekter skall tas med). Det analoga systemets beteende registreras och frekvensområdet definieras.

Komponentparametrarna, som har en avsevärd inverkan på systemets beteende, definierar de parametrar som måste anges med toleranser för simuleringen. Kraven måste kontrolleras noggrant eftersom de i hög grad påverkar precisionen hos den efterföljande systemsimuleringen.

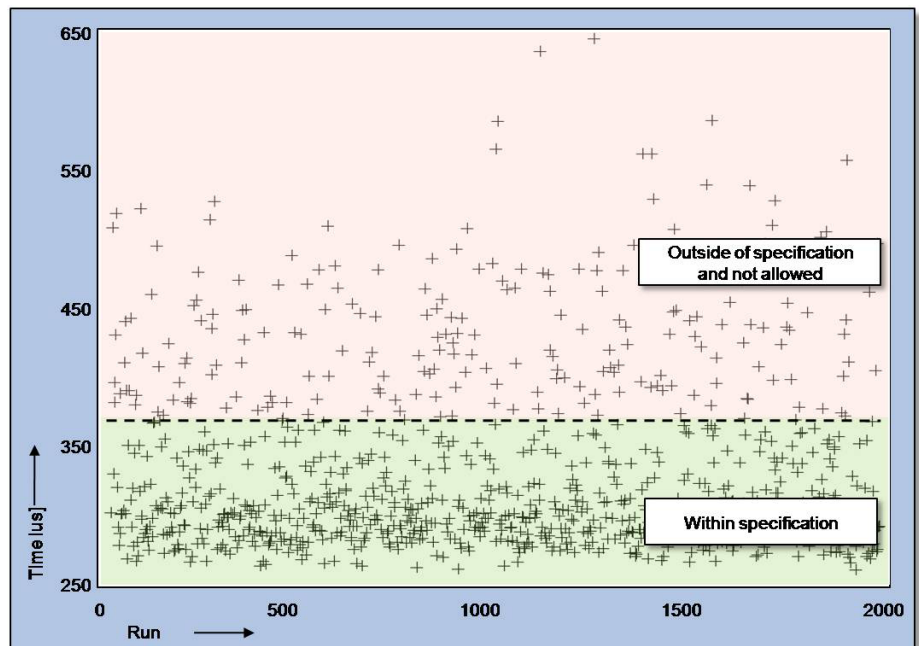
Det är viktigt att notera att det ofta uppkommer fel under detta steg på grund av inadekvata fysiska data. Det medför att modellerna kan bli onödigt komplexa och uppvisa oavsiktliga effekter.

När alla relevanta parametrar noggrant listats, skapas systemmodellen.



Figur 4: Injektorströmmen i nominellt tillstånd

Figur 5: Monte Carlo-simulering för analys av parameteravvikelser



Den resulterande modellen analyseras i det följande steget under nominella förhållanden. Här tas ingen hänsyn till komponenttoleranser, och därför går det att tidigt upptäcka problem som kan uppstå i normalfallet. Om man tar hänsyn till toleranser i ett för tidigt skede kompliceras modelleringsarbetet. Beroende på vad som skall undersökas kan analysen utföras antingen i tids- eller frekvensdomänen.

**För att kunna optimera** systemets prestanda är det nödvändigt att bestämma konstruktionens kontrollvariabler. Nästa steg är därför att utföra en känslighets-

analys. I denna bestäms vilken inverkan varje konstruktionsparameter har (till exempel vilken inverkan ett resistansvärde har på konstruktionens prestanda). Denna analys ger konstruktören möjlighet att avgöra vilka parametrar som är betydelsefulla för optimeringen och därför kräver speciell uppmärksamhet avseende toleranser.

Under det följande steget optimeras systemets beteende genom att man avsiktligt varierar komponentparametrarna. Den slutliga simuleringen av komponenttoleranser avgör om systemets beteende uppfyller specifikationen eller ej. För att få fram det önskade resultatet

repeteras dessa utvärderingssteg iterativt.

Enligt Robust Design Methodology skall de grundläggande kraven på en simuleringsmodell listas först. Utgångsstegen representeras av effekt-MOSFET:arnas beteendemodeller. Även boost-funktionen representeras av en beteendemodell. Uteffekten är en funktion av matningsspänningen, medan digitala modeller ger en abstraktion av drivlogiken.

**Mjukvaran representeras** av en algoritm, eftersom det inte ger något extra att ta med den kompletta mjukvaran. Motorstyrenheten har dessutom många funktioner som inte är intressanta vid utvärdering av modellen för bränsleinsprutningssystemet. Injektorlasten modelleras som en induktans med förluster.

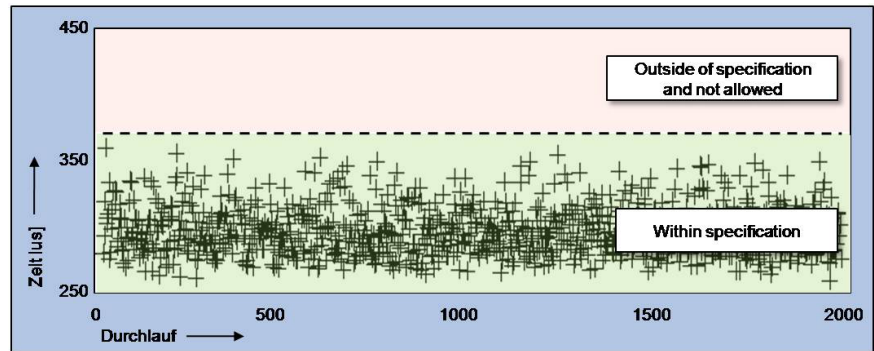
**Figur 3** visar modellen för bränsleinsprutningssystemet i systemsimulatorn Saber.

När modellen har definierats och konstruerats, utförs den verkliga simuleringen av det nominella systemets beteende. På så vis kan man utvärdera strömprofilen under insprutningsfaserna. **Figur 4** visar strömprofilen för injektorn.

Man kan enkelt urskilja tre faser av strömstyrning. Boost-funktionen är bara aktiv under det första steget så att den erforderliga strömnivån snabbt uppnås. I nominellt arbetsläge uppvisar systemet det beteende man önskar. Inga onormala problem kan observeras. Därefter läggs komponenttoleranserna in för ytterligare analys. Dessa toleranser kan hämtas ur tillverkarnas datablad. Beroende på vilka komponenter det handlar om betraktar man vanligen även ett jämnt distribuerat beteende.

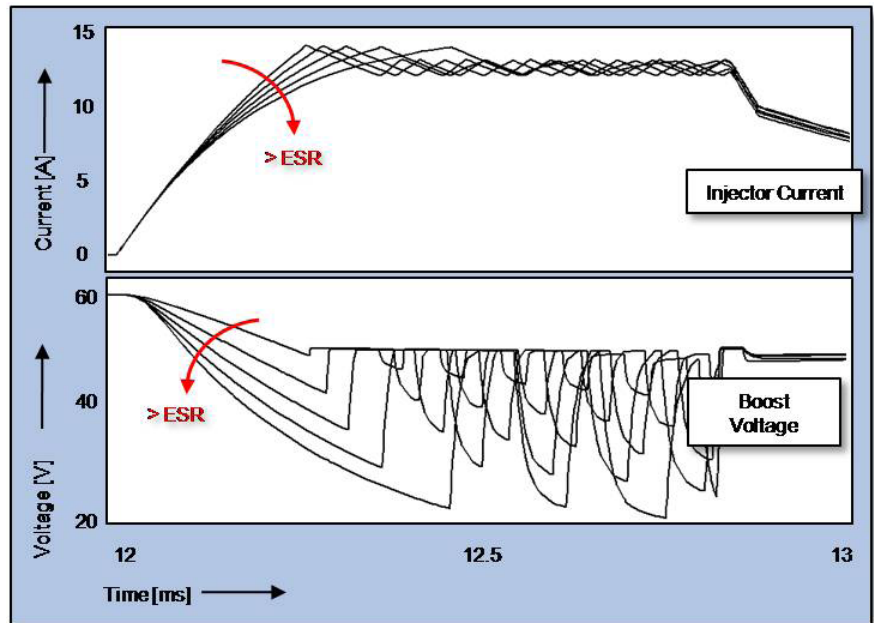
**Ett av utvärderingskriterierna** vid elektronisk bränsleinsprutning är den tid det tar för att uppnå 15 A injektorström under den första elektriska insprutningspulsen. Denna tid får inte överskrida 370 µs.

Denna effekt måste undersökas under statistisk analys av bränsleinsprutningssystemet när hänsyn tas



Figur 7: Optimerat system med slutlig statistisk utvärdering avseende toleranser

Figur 6: Injektorström och boost-spänning när ESR varierar



till komponenttoleranser. **Figur 5** visar resultatet av en statistisk analys avseende det tidsintervall som krävs för att uppnå det erforderliga tröskelvärdet för strömmen.

För att generera dessa data utfördes en Monte Carlo-analys, där alla parametervärden hos alla simuleringsmodeller som försetts med toleranser varierades samtidigt. För att uppnå god täckningsgrad utfördes 2000 körningar. Varje körning motsvarar en simulering i tidsdomänen. Resultatet blev en uppsättning kurvor med 2000 enskilda kurvor för varenda signal i systemet.

**Denna stora mängd** data kan analyseras effektivt och automatiskt med hjälp av Sabers verktyg för efterbearbetning. **Figur 5** visar att många värden ligger ovanför tröskelvärdet. Detta betyder att den aktuella implementeringen inte uppfyller de specificerade kraven. Därför måste man bestämma vilka ändringar som behöver göras för att systemet skall motsvara specifi-

kationen. Detta görs under det tredje steget av Robust Design Methodology, som kallas Sensitivity Analysis. Känsligheten hos en systemvariabel, till exempel den tid som krävs för att uppnå strömtröskelvärdet, kan beräknas på följande sätt:

$$s = \frac{\partial m}{\partial p} * \frac{p}{m}$$

Om känsligheten  $s = 1$  betyder det att om man ändrar parametervärdet  $p$  med 5 procent från det nominella värdet så får man en ändring med 5 procent av den uppmätta variabeln  $m$ .

Känslighetsanalysen ger oss möjlighet att hitta de väsentliga parametrarna i systemet. Dessutom ger den oss en metod att justera de motsvarande konstruktionsparametrarna. Den komplexa processen att definiera en känslighetsanalys stöds grafiskt av lättbegripliga grafiska användargränssnitt.

Bränsleinsprutningssystemet, utgångsstegets MOSFET:ar, kondensatorer och boost-kapacitansen tas

alla med i beräkningarna. **Tabell 1** ger en översikt över beräknade känsligheter. Serieresistansen (ESR) hos boost-kapacitansen visar sig ha den största inverkan på systemets prestanda. Kanalresistanserna hos utgångsstegets transistorer har också hög känslighet. Eftersom dessa redan har nått sin tekniska gräns lämpar de sig inte för ytterligare optimering.

**Slutligen har även** boost-kapacitansen en avsevärd inverkan på den tid som krävs för att uppnå tröskelvärdet för strömmen. Ett steg som rekommenderas är att ytterligare utvärdera hur boost-kondensatorn påverkar ESR och kapacitansen. För att noggrannare kvantifiera denna påverkan analyseras båda parametrarna med hjälp av variations slingor under det tredje steget.

**Figur 6** visar uppsättningen kurvor för strömprofilen. Lägg märke till nedgången hos boost-spänningen. Med hjälp av nästade variations slingor för ESR och kapacitans går det att få fram giltiga områden för boost-kondensatorns värde

Instans	Parameter	Nominellt	s
Boost-kapacitans	ESR	0,5 Ohm	0,98
Boost-MOSFET	RDSon	12,7 mOhm	0,86
MOSFET på höga sidan	RDSon	12,7 mOhm	0,86
MOSFET på låga sidan	RDSon	12,7 mOhm	0,86
Boost-kapacitans	C	380 µF	0,71
...	...	...	...

Tabell 1: Beräknade känsligheter

## LITTERATUR

- [1] Modeling and Simulating a Variable Valve Timing System for Robust Design, B. Goodwin, J. Patton, J. Poole, SAE World Congress 2008
- [2] Designing Automotive Subsystems Using Virtual Manufacturing and Distributed Computing, B. Goodwin, SAE World Congress 2008
- [3] Model based Robust Design Methodology for FlexRay™ Design Systems, T. Gerke, C. Schanze, D. Bollati, FlexRay Product Day Congress 2007
- [4] The Virtual Vehicle, Part 1: Design of Networking Topologies (In-Vehicle Networks), T. Gerke, Elektronik Automotive 2008
- [5] The Virtual Vehicle, Part 2: Early Validation of Vehicle Electrical Systems and

för att önskade prestanda skall kunna uppnås.

För en slutlig validering av implementeringen måste de optimerade värdena för boost-kondensatorn återsimuleras tillsammans med det totala systemet, samtidigt som toleranserna tas med i beräkningarna.

**Det kan rekommenderas** att använda ett CPU-kuster för att kunna utföra den totala beräkningen parallellt. För denna uppgift ger Saber DIA-möjligheter (Distributed Iterative Analysis) för parallell simulering. För de analyser som beskrivits här har ett kuster med 20 CPU:er använts. Detta har givit en tidsreduktion på omkring 19 gånger, jämfört med om en enda CPU hade använts.

**Figur 7** visar resultaten för det optimerade systemet. Bilden visar det tidsintervall som krävs för att uppnå det önskade tröskelvärdet för strömmen. Notera att alla värden nu ligger inom det giltiga

området enligt specifikationen.

**Beroende på vilken** applikation det handlar om kan det vara nödvändigt att utföra ytterligare utvärderingar ifall systemets beteende uppvisar fel. För detta ändamål tillhandahåller Saber miljön *Testify*. I denna miljö går det att definiera såväl utvärderingskriterier som automatisk analys. Typiska scenarier är kortslutningar mot jord eller matningsspänningen. Den integrerade diagnostik algoritmen gör det enkelt att lägga in felscenarier. Härigenom kan man få information om hur robust diagnostiken är.

## Slutsats

Robust Design Methodology, tillsammans med användandet av virtuella prototyper, är sammanfattningsvis en effektiv och flexibel konstruktionsmetod. Den ger möjlighet till specifika kontroller av implementeringens kvalitet och identifierar systemets kritiska parametrar.

Genom att statistiskt analysera komponenttoleranser kan man utvärdera konstruktionsscenarier som inte finns tillgängliga för ren hårdvarubaserad prototyp testning.

Den allra bästa ansatsen är att kombinera fördelarna hos simuleringsbaserad konstruktion med hårdvarubaserade prototyp tester.