



# **KOLEKTOR**

Električni pogon - Razvoj  
vgrajene programske in  
strojne opreme

---

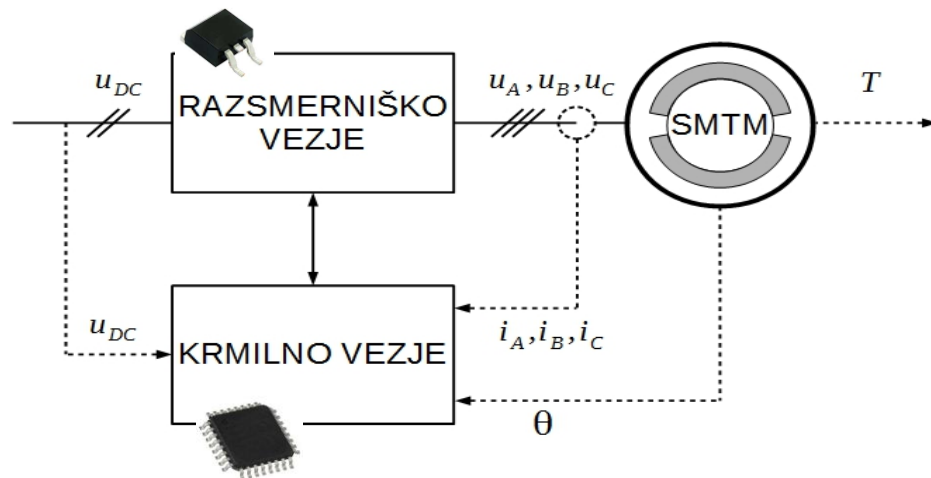
Dejan Beguš, Jaka Ivančič

7/3/2023

# Vgrajena programska oprema – Del sistema

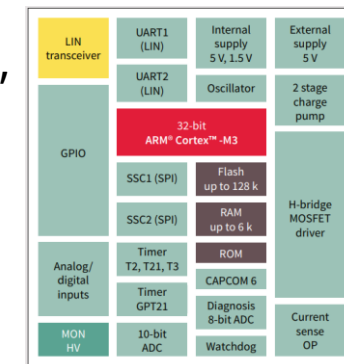
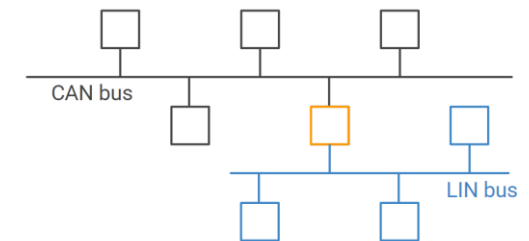
Sistem – Pomožni pogon v osebni avtomobilu:

- Sinhronski Motor s Trajnimi Magneti
- Trifazni rasmernik
- Vgrajena programska oprema



Bistvene zahteve za SW:

- Vodenje motorja + aplikacija (FOC)
- Komunikacijski vmesnik z ECU (LIN)
- Obvladovanje MCU periferije in HW (ADC, PWM, MFET driver..)
- Proces razvoja/Kakovost

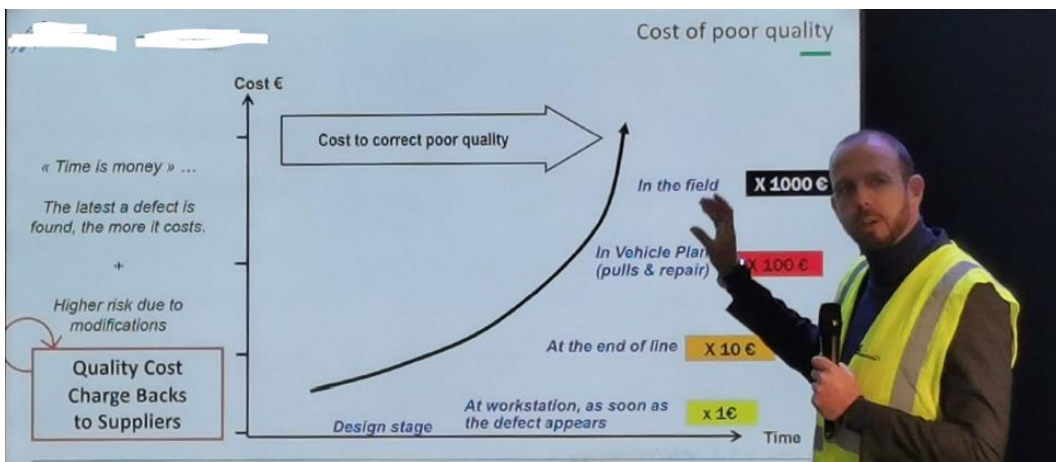


# Proces razvoja vgrajene programske opreme - Motivacija

Visoko serijska proizvodnja



Visoki stroški v primeru defektov



Zahteve glede procesa razvoja

- s strani OEM
- Minimizacija defektov

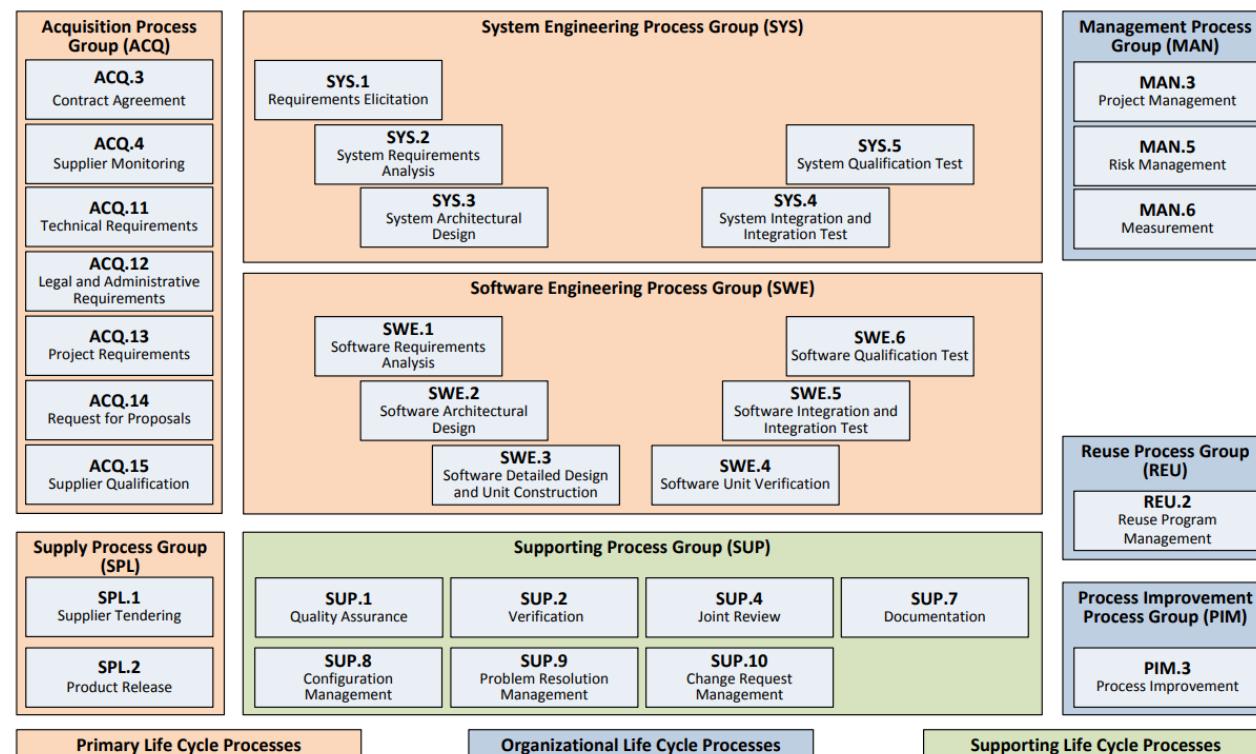
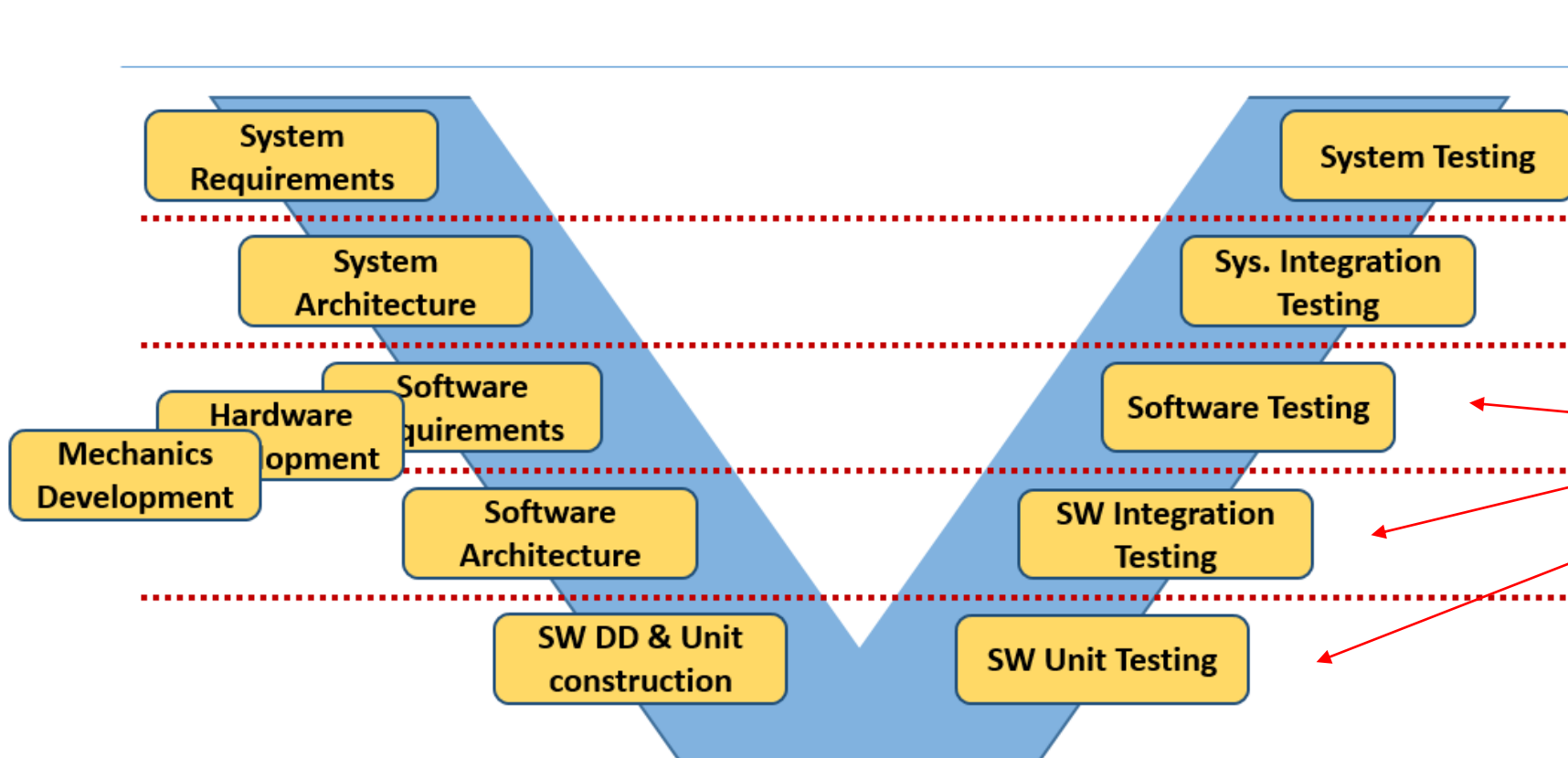


Figure 2 — Automotive SPICE process reference model - Overview



# Nivoji razvoja programske opreme



## Model razvoja:

- V model
- postopen razvoj
- postopna verifikacija

## Nivoji SW:

- Zahteve
- Arhitektura/Komponente
- Enote

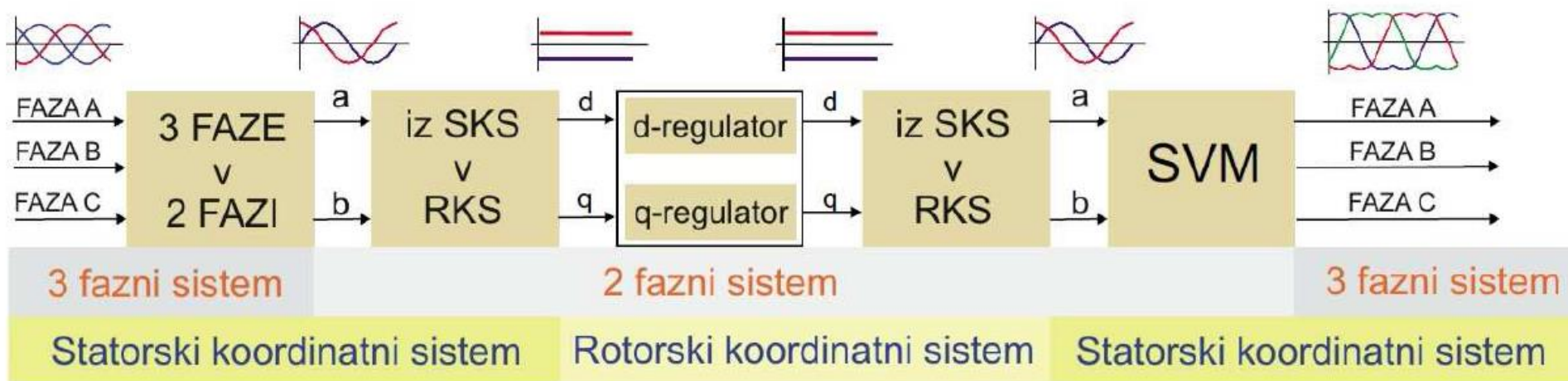
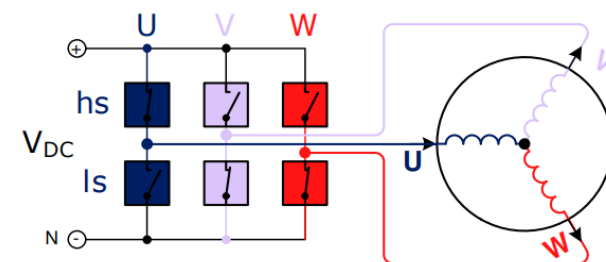
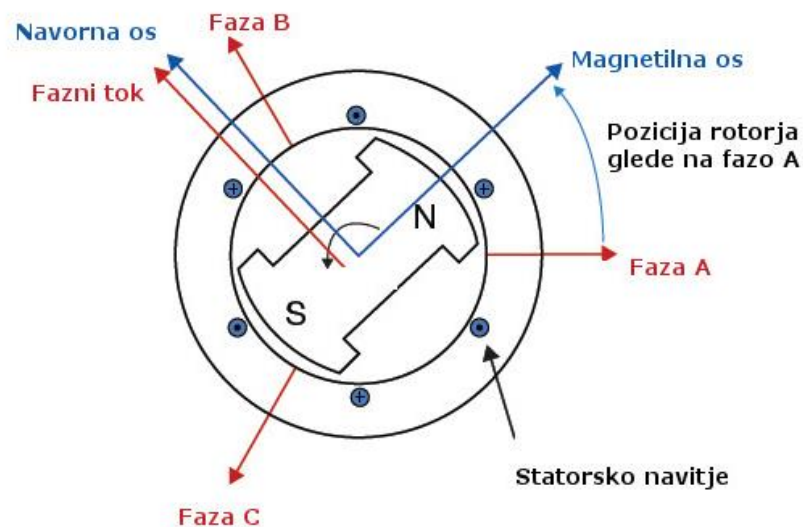
## Primer:

- 250 sw zahtev
- 15 komponent
- 47 sw enot, 50 enot gonilnikov



# Komponenta – Vektorsko vodenje SMTM

- Ideja: nadzor navora
- Statorske tokove predstavimo v koordinatnem sistemu rotorja
- Cilj: navorni in magnetilni tok reguliramo na način da zagotavljamo max navor na vložen tok

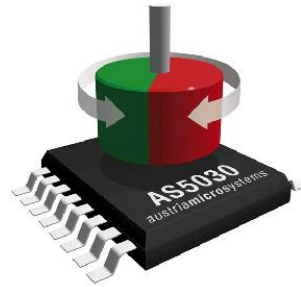




# Detekcija položaja rotorja pri SMTM

## S senzorjem pozicije

- Natančen položaj-> optimalno delovanje (predvsem pri hitrosti 0 in nizkih hitrostih)
- Cena
- Kalibracija
- Dodatno vezje



## Brez senzorja položaja

- Robustnost (manj komponent, cena)
- Občutljivost na spremembe R, L
- Delovanje pri nizkih hitrostih
- Zagon

## Ocena položaja rotorja

- npr. algoritem na podlagi modela motorja
- na podlagi znanih faznih tokovi, pritisnjenih napetosti izračunamo neznane veličine (npr. magnetni sklep ali inducirano napetost) Iz katerih izračunamo položaj rotorja

## Zagon

- zagon motorja v odprti zanki do minimalne hitrosti ter nato preklop na ocenjen položaj rotorja



# Preizkušanje komponente – Model SMTM

## Električni podsystem

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_{el} L_q i_q$$

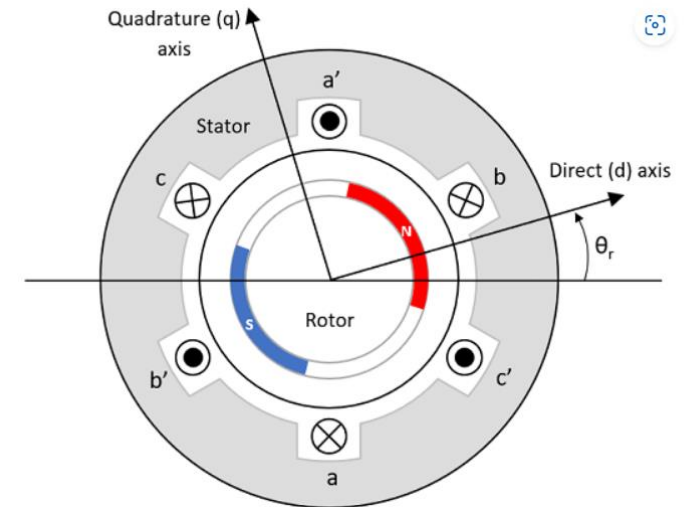
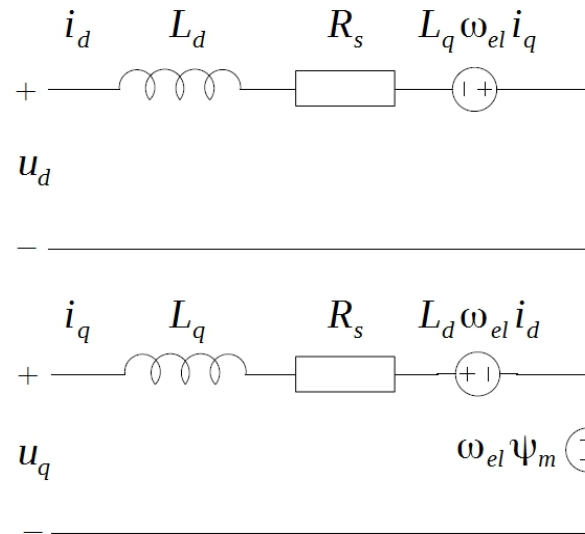
$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_{el} L_d i_d + \omega_{el} \psi_m$$

## Enačba navora

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

## Mehanski podsystem

$$J \frac{d\omega_{meh}}{dt} = T_e - T_L - B\omega_{meh}$$



$$u_d, u_q \rightarrow i_d, i_q \rightarrow T_e \rightarrow \omega_{meh}$$





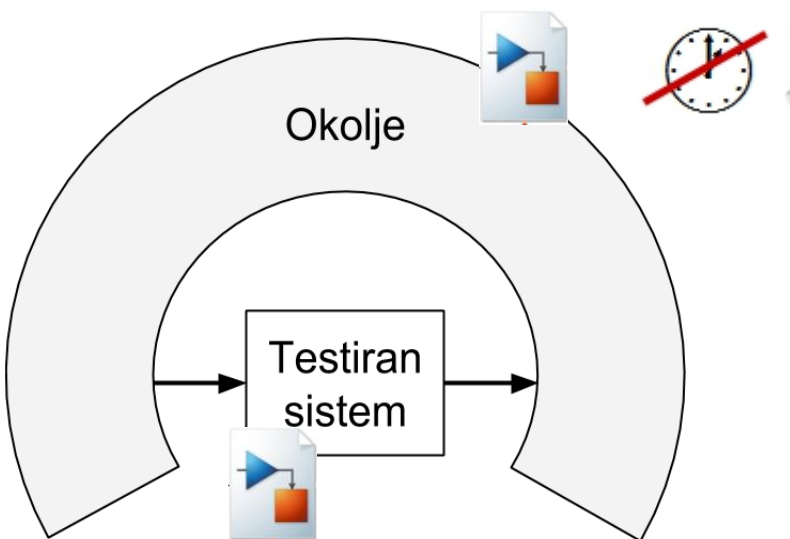
# Načrtovanje in preizkušanje – Model v zanki MIL

## - Preizkušanje:

- posameznih komponent
- Integracija več komponent
- posameznih enot

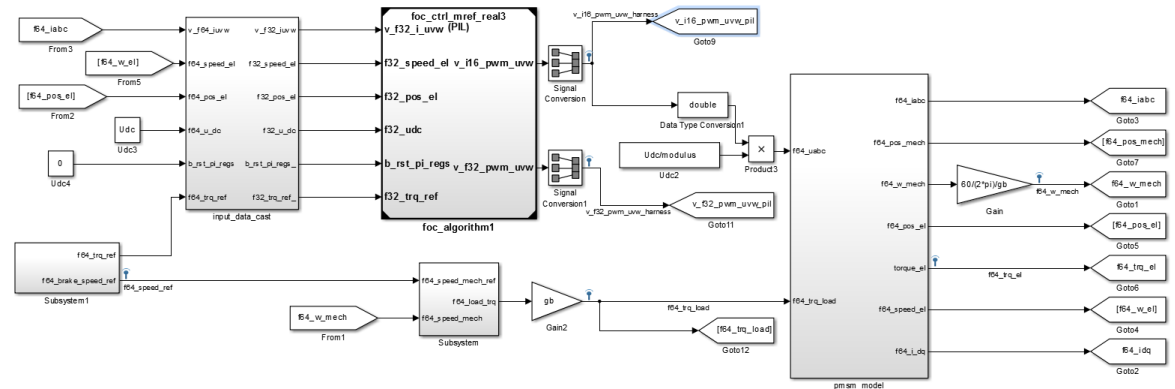
## - Izvajanje:

- neprevedene izvorne kode
- v modelnem okolju
- ne-realnem času



## Primer:

- Testiran sistem: komponenta FOC
- Okolje: Model SMTM
- Orodja: Matlab/Simulink



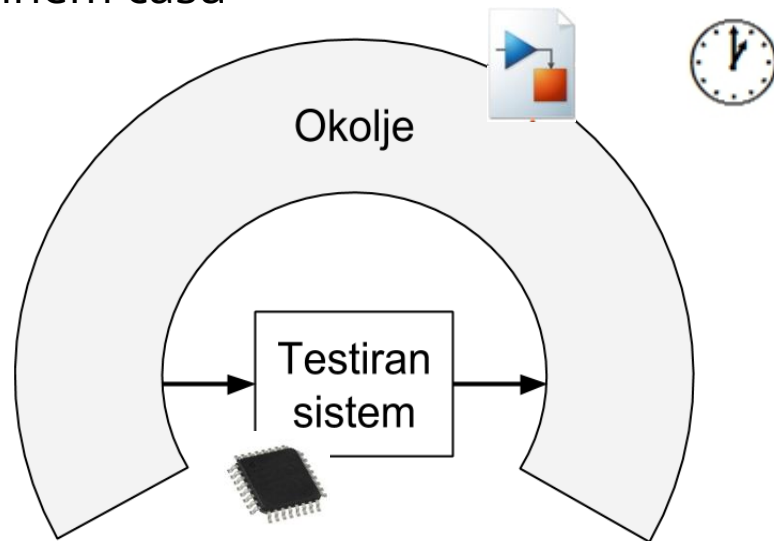
# Načrtovanje in preizkušanje : Strojna oprema v zanki - HIL

## Preizkušanje:

- posameznih enot/komponent, ki so odvisne od MCU (gonilniki, komunikacija..)
- integrirane programske opreme

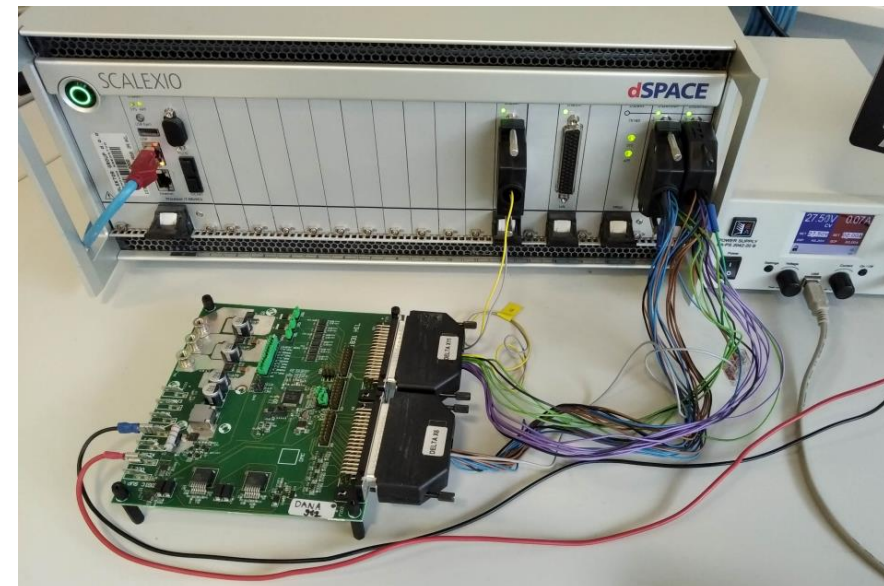
## Izvajanje

- prevedene izvorne kode
- na ciljnem MCU
- v realnem času



## Primer:

- Testiran sistem: ciljni MCU TLE9877
- Okolje: Model razsmernika+Model motorja+...
- Orodja: HIL sistem – izračun modela okolja v realnem času – FPGA vezje za izvajanje časovno kritičnih modelov



# Veriga orodij za razvoj vgrajene programske opreme

- Obvladovanje procesa/elementov razvoja



- Verzioniranje



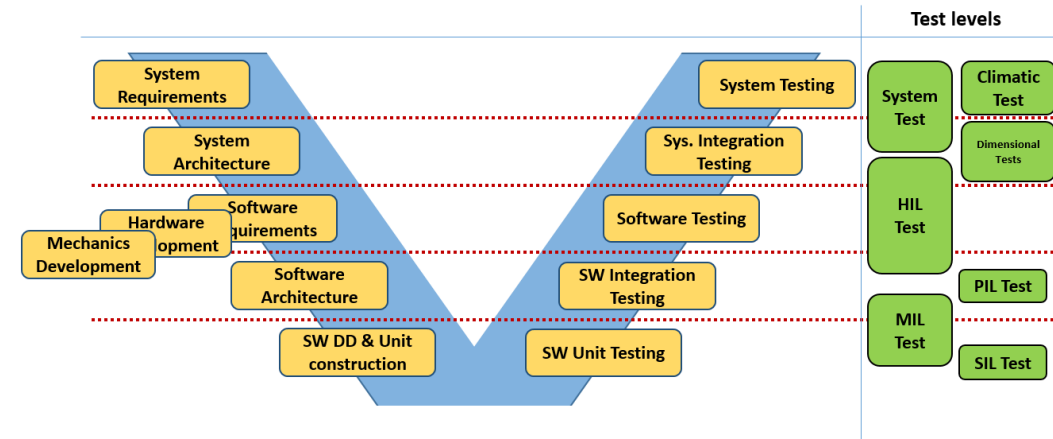
- Programiranje, generiranje kode



- Statična analiza kode



- Dokumentacija - UML diagrami – opis statičnega in dinamičnega obnašanja



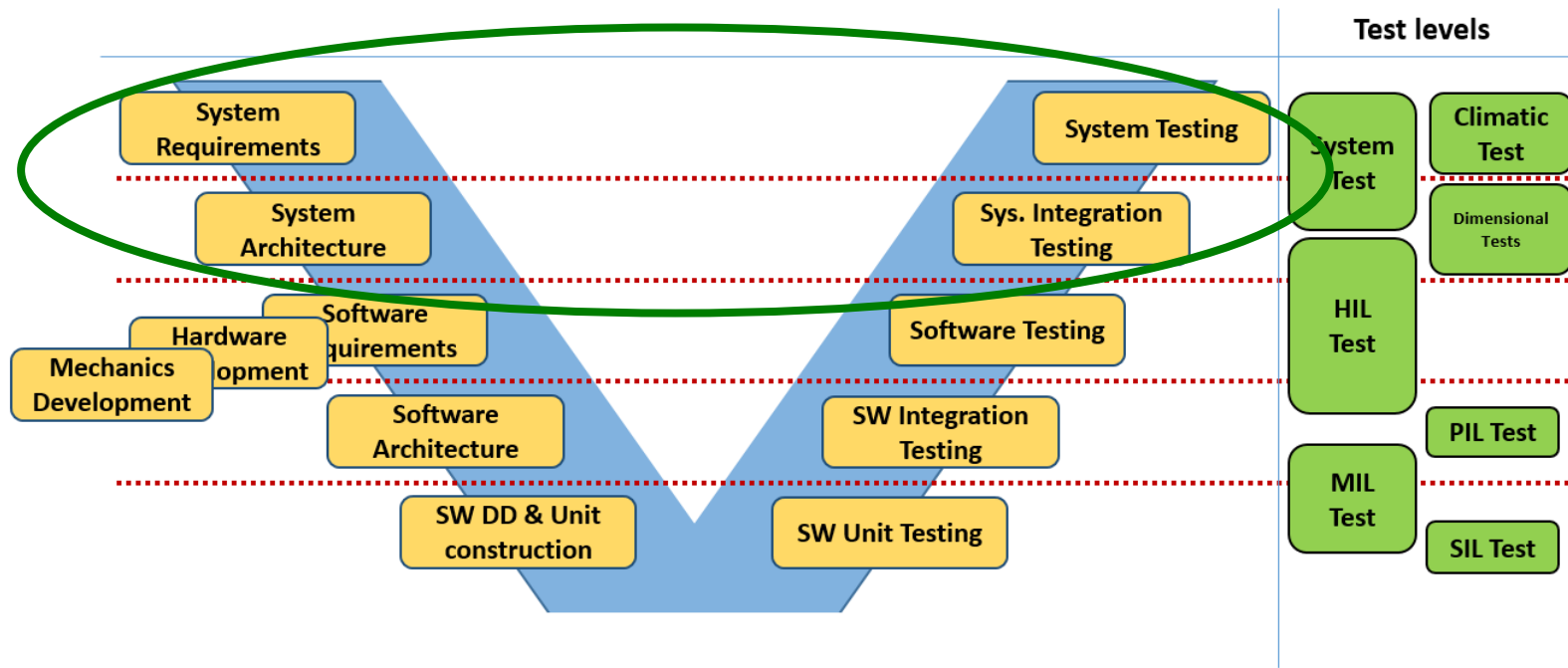
# Preizkušanje na nivoju sistemske integracije in sistema

## Integracija in preizkušanje SW+HW

- npr. meritve proženja mosfet tranzistorjev
- Evalvacija mrtvih časov
- ...

## Validacija na sistemu (7 mesecev, 140 pogonov)

- Funkcijski testi
- Lifetime testi
- Klimatski testi
- Električni testi
- EMC testi
- Vibracijski testi

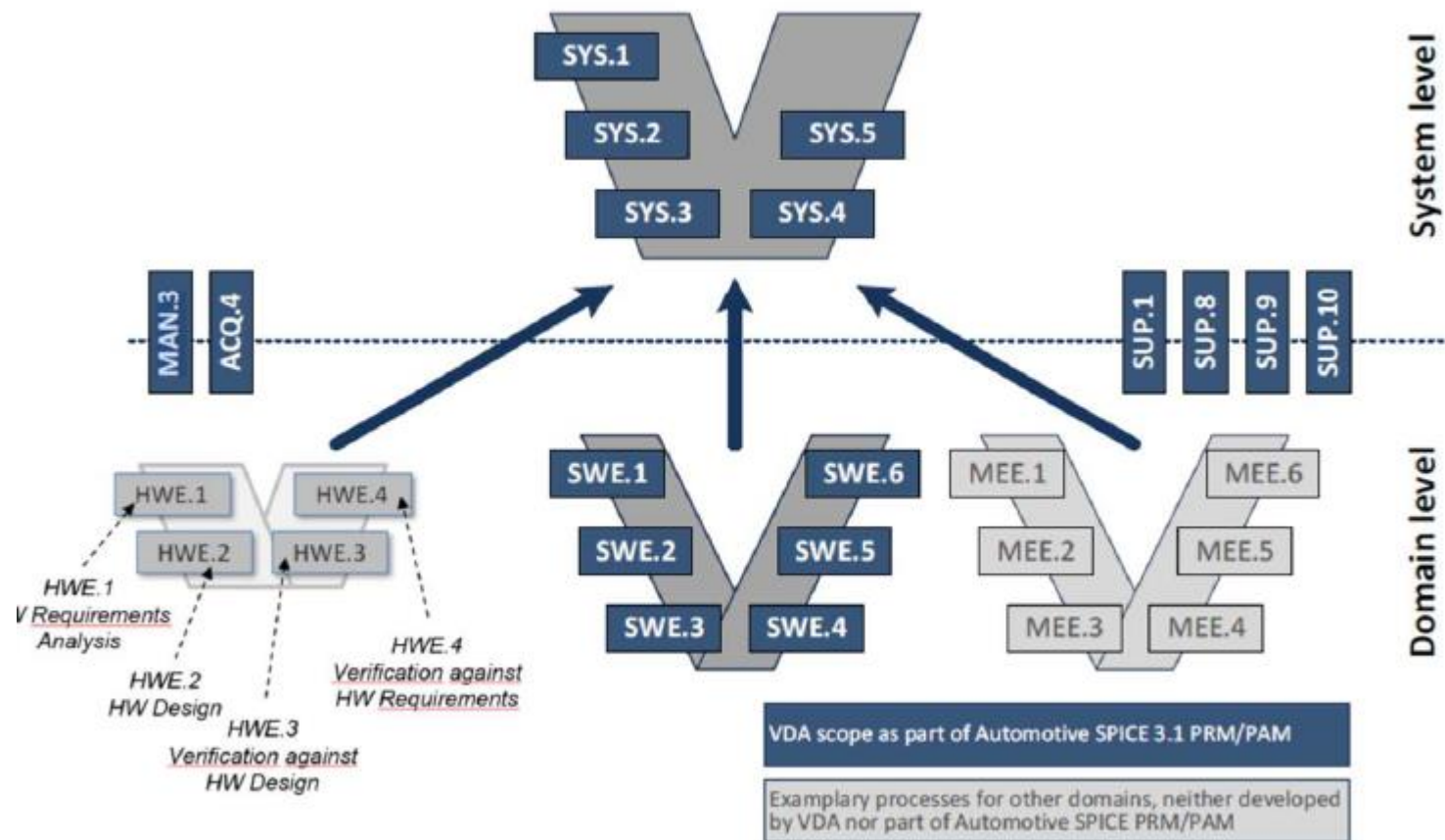


# Proces razvoja strojne opreme

Procesi razvoja po principu razvoja vgrajene programske opreme  
Automotive SPICE PAM

Razvojne aktivnosti po procesih:

- Razvoj zahtev HWE.1
- Razvoj arhitekture in dizajna HWE.2
- Verifikacija glede na dizajn HWE.3
- Verifikacija glede na zahteve in **integracijski testi** HWE.4



# Proces razvoja strojne opreme

**EMC-24829** - Vse uporabljene aktivne elektronske komponente, morajo biti kvalificirane za uporabo v avtomobilski industriji (AEC qualified). Uporaba neskladne komponente je dovoljena le pri komponentah, kjer obstaja nekvalificiran ekvivalent istega proizvajalca z enako osnovno oznako in lastnostmi.

Primer ustrezne ekvivalentne komponente:

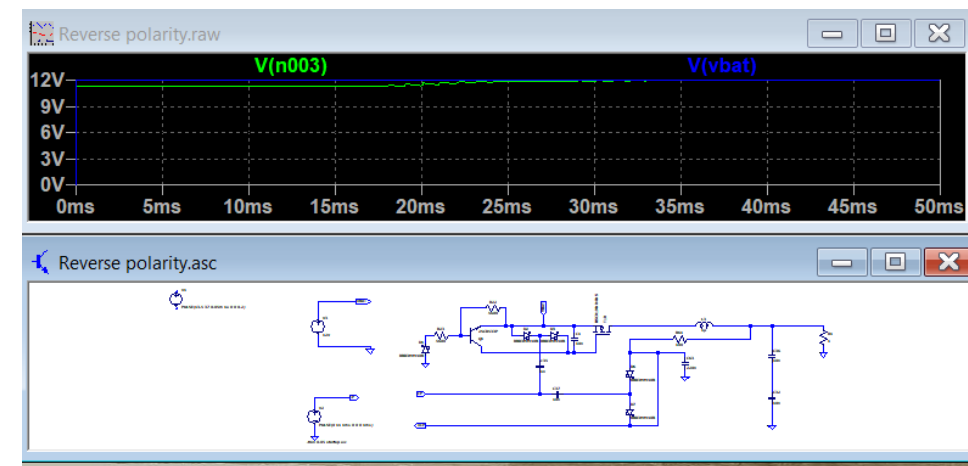
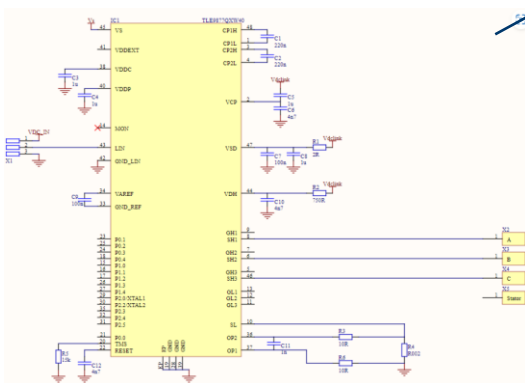
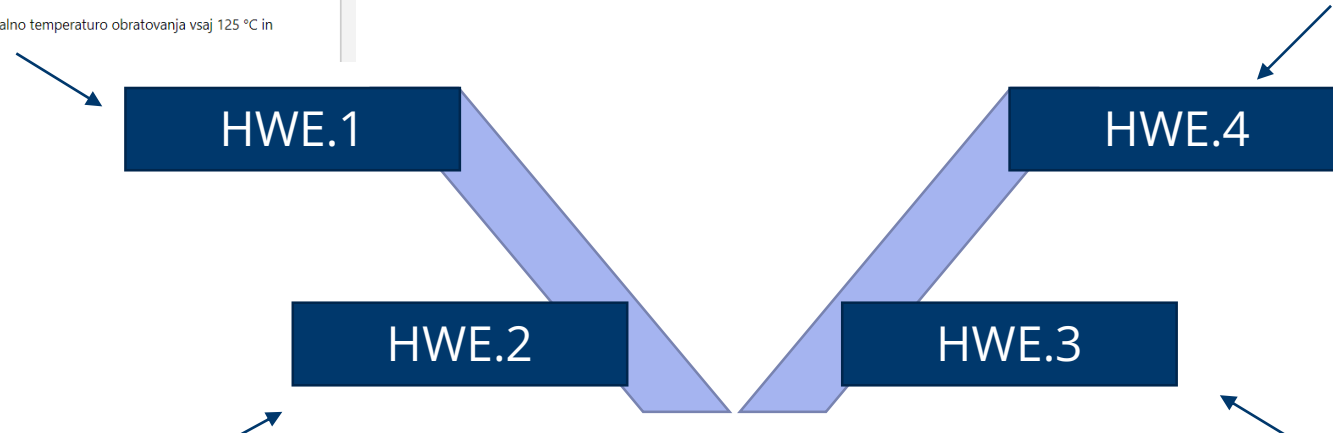
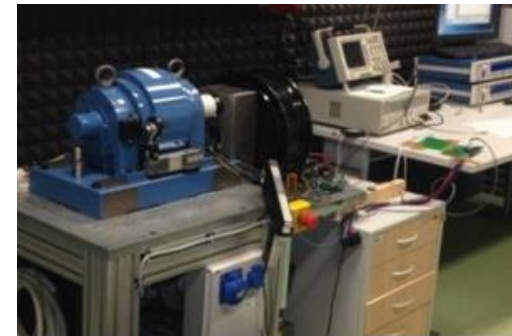
ON Semiconductor SBAS20H - AEC-Q101 kvalificirana komponenta

ON Semiconductor BAS20H - ekvivalentna nekvalificirana komponenta z enako osnovno oznako istega proizvajalca

Pri pregledu cene in ustreznosti BOM se upošteva obstoj različice AEC kvalificirane komponente.

**EMC-24830** - Vse uporabljene komponente morajo biti tipa SMD.

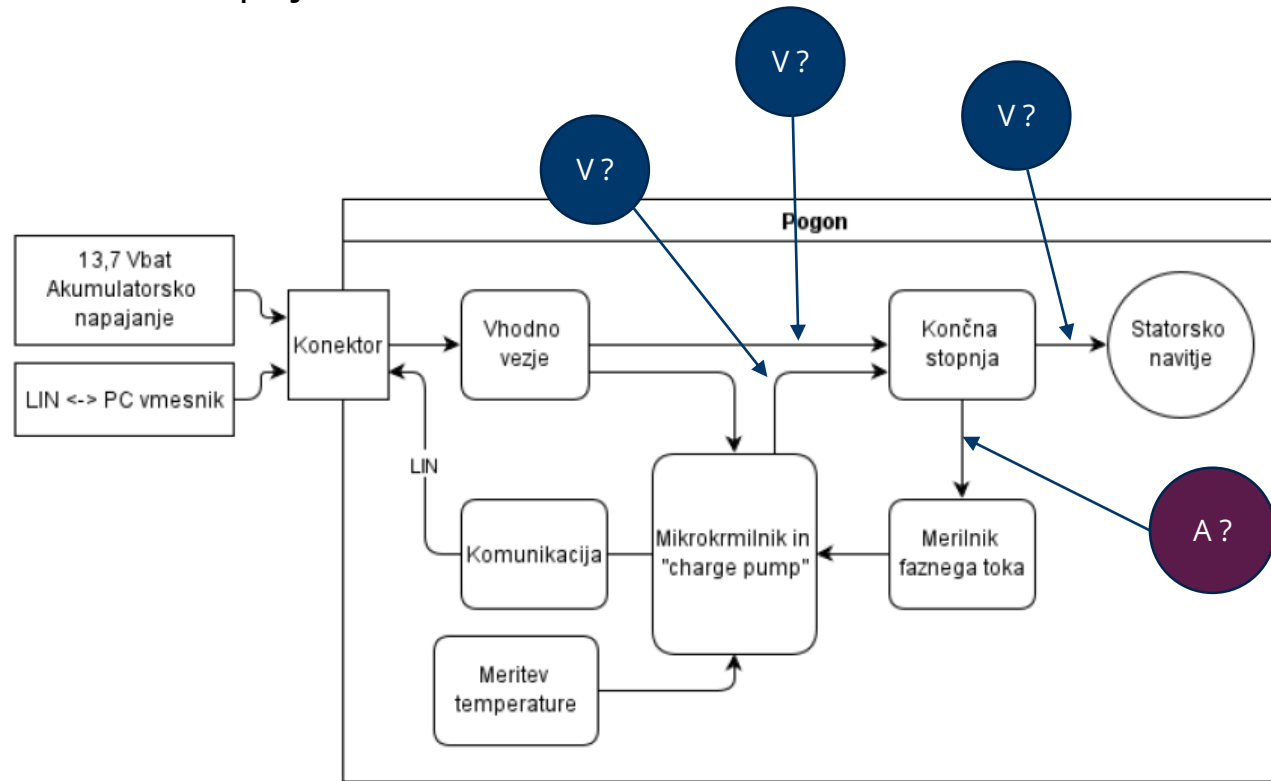
**EMC-24831** - Vse komponente, razen zaščitnih elementov, morajo imeti maksimalno temperaturo obratovanja vsaj 125 °C in minimalno nazivno napetost 30 V.



# Trifazni razsmernik – Osnovni integracijski testi HW/SW

Osnovni integracijski testi:

- Preverjanje sočasnega prevajanja v veji (crossconduction)
- Meritev prožilnih signalov
- Meritev fazne napetosti
- Meritev napetosti končne stopnje

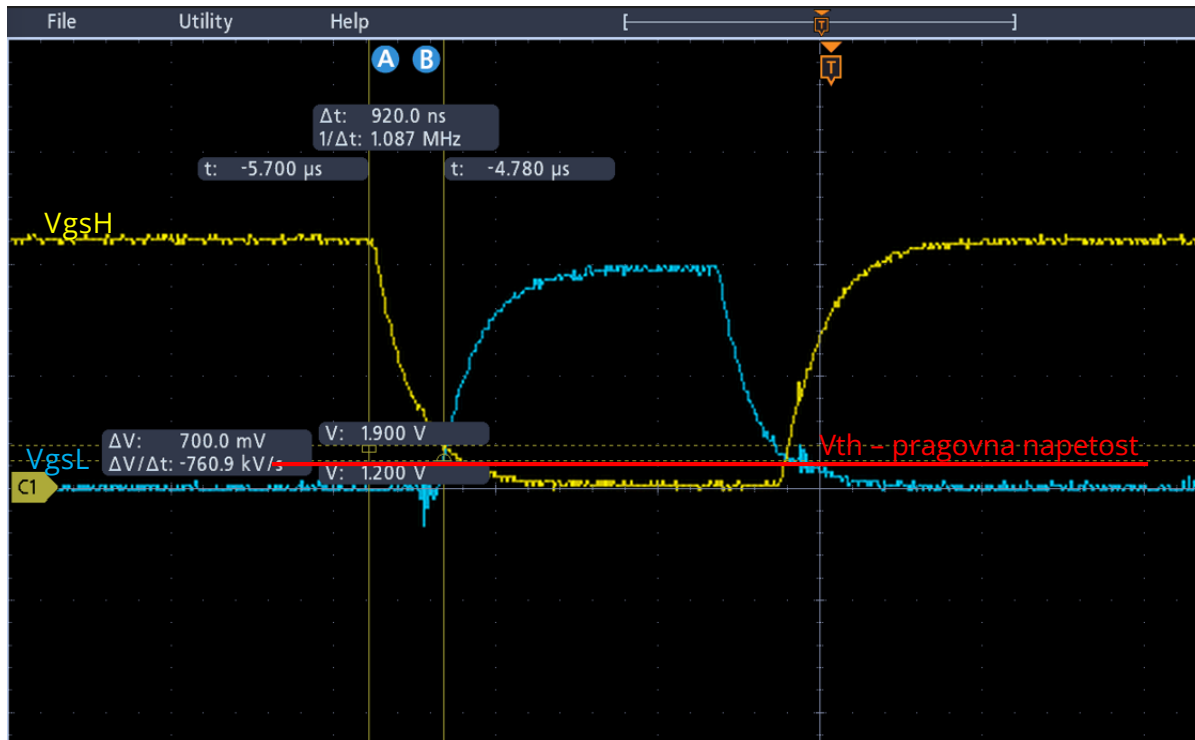


# Preverjanje sočasnega prevajanja

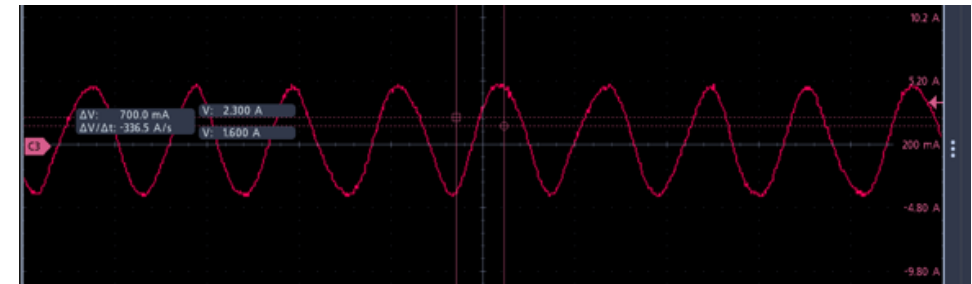
Za preverjanje možnosti sočasnega prevajanja v eni veji razsmernika uporabimo dve metodi:

- Preverjanje prekrivanja napetosti krmiljenja na zgornjih in spodnjih vratih
- Opazovanje faznega toka

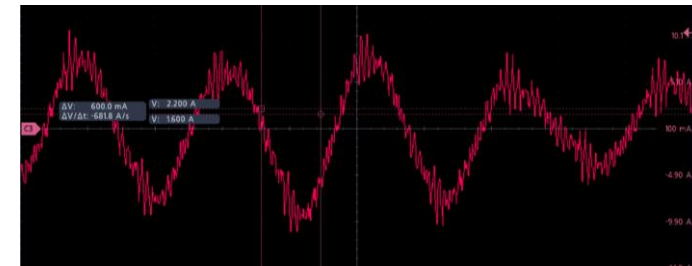
Možne so tudi alternativne metode preverjanja. Ukrep za odpravo je prilagoditev vezja za proženje.



Preverjanje prekrivanja VgsH in VgsL



Fazni tok brez sočasnega prevajanja



Fazni tok s sočasnim prevajanjem – nižji izkoristek in tveganje za termično poškodbo MOSFETa

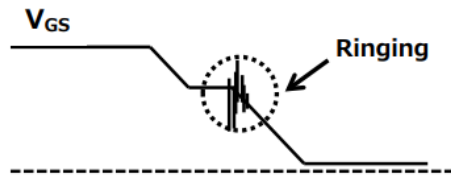
Informacija: mrtvi čas je nastavljen na 600 ns





# Meritev prožilnih signalov

Pri meritvi prožilnih signalov opazujemo oscilacije med Millerjevim prehodom.



Težave odpravimo s prilagoditvami prožilne sekvence in prožilnega vezja:

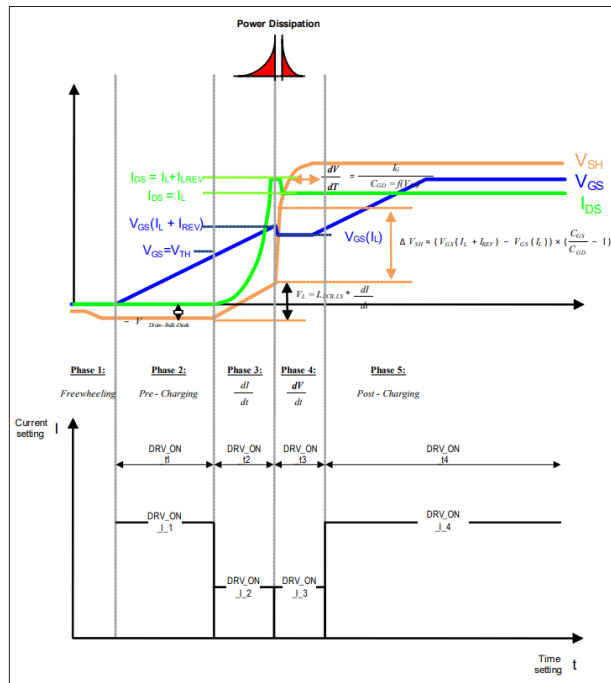


Figure 8 Fitting the Sequencer Phases to MOSFET Switching Phases for Turn On

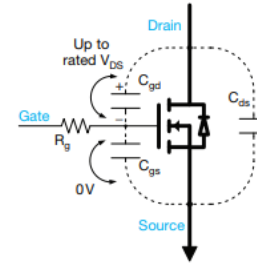


Fig. 5 - Gate Capacitances with Initial Voltages

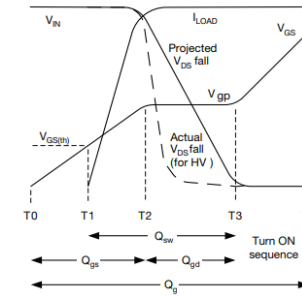


Fig. 7 - Gate Charge Components and Timings

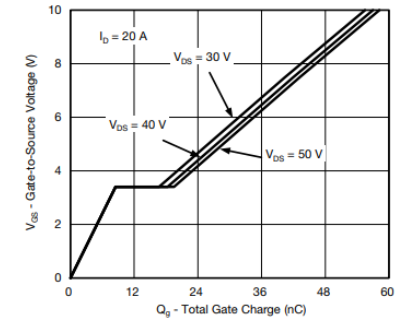
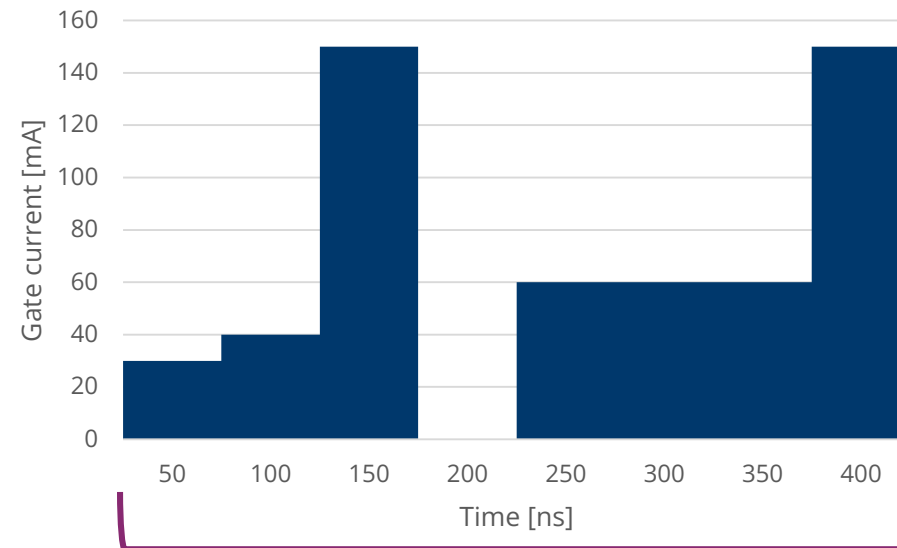


Fig. 4 - Gate Charge Characteristics



8 časovnih razdelkov

Tok nastavljen v območju:  
- 0 ÷ 150 mA  
ali  
- 0 ÷ 300 mA

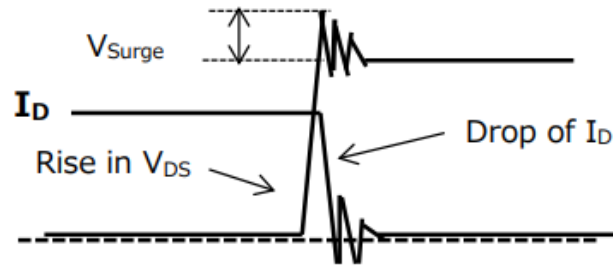


# Meritev faznih napetosti

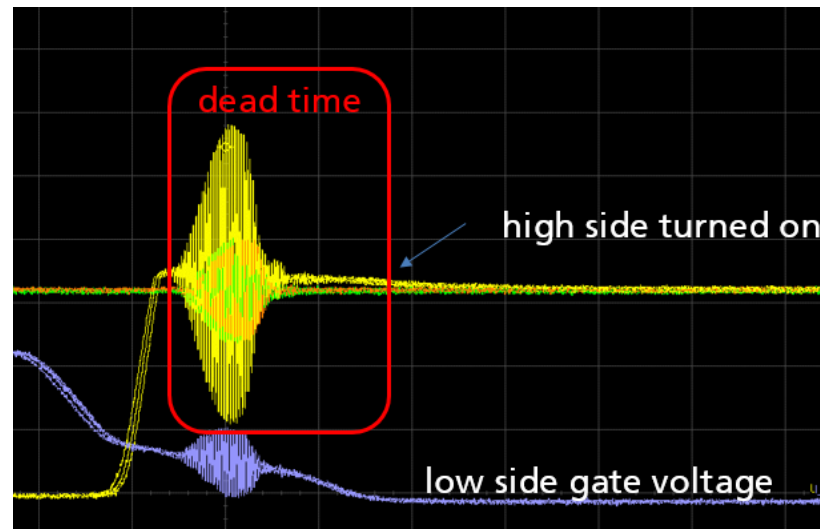
Pri meritvi fazne napetosti smo pozorni na:

- Prenihaj pri pozitivnem ali negativnem prehodu v enem PWM ciklu in pri različnih vrednostih faznega toka
- Oscilacije v mrtvem času
- Ostale anomalije: presluh sosednje faze ipd.

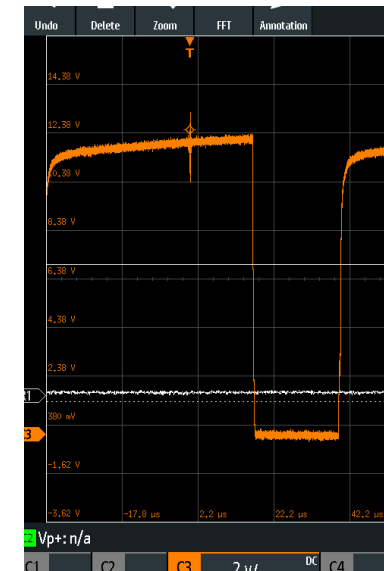
Anomalije glede na vzrok rešujemo z nastavitvami proženja, prožilnim vezjem ali izbiro MOSFET tranzistorjev.



Oscilacije / prenhaji po koncu preklopa fazne napetosti



Oscilacije fazne napetosti med mrtvim časom



Presluh preklopa sosednje faze



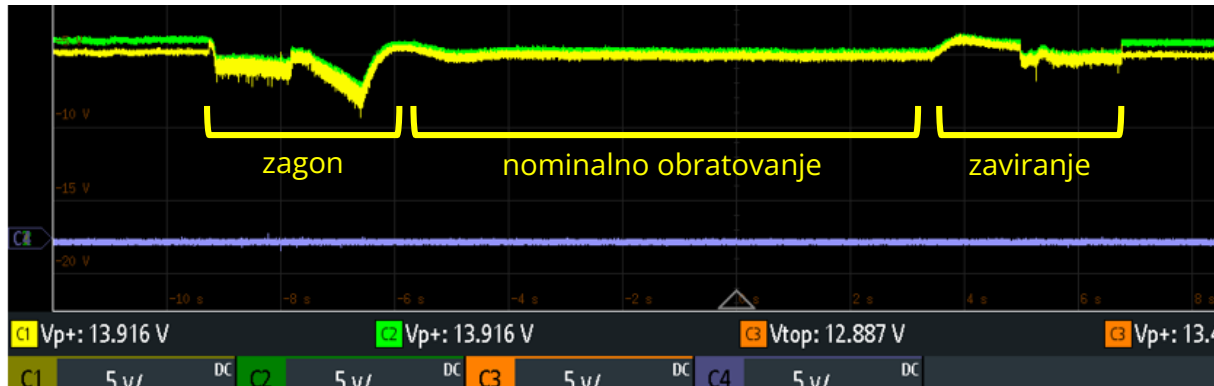
# Meritev napetosti končne stopnje

Algoritem vodenja izvaja meritev napetosti končne stopnje na pinu VDH.

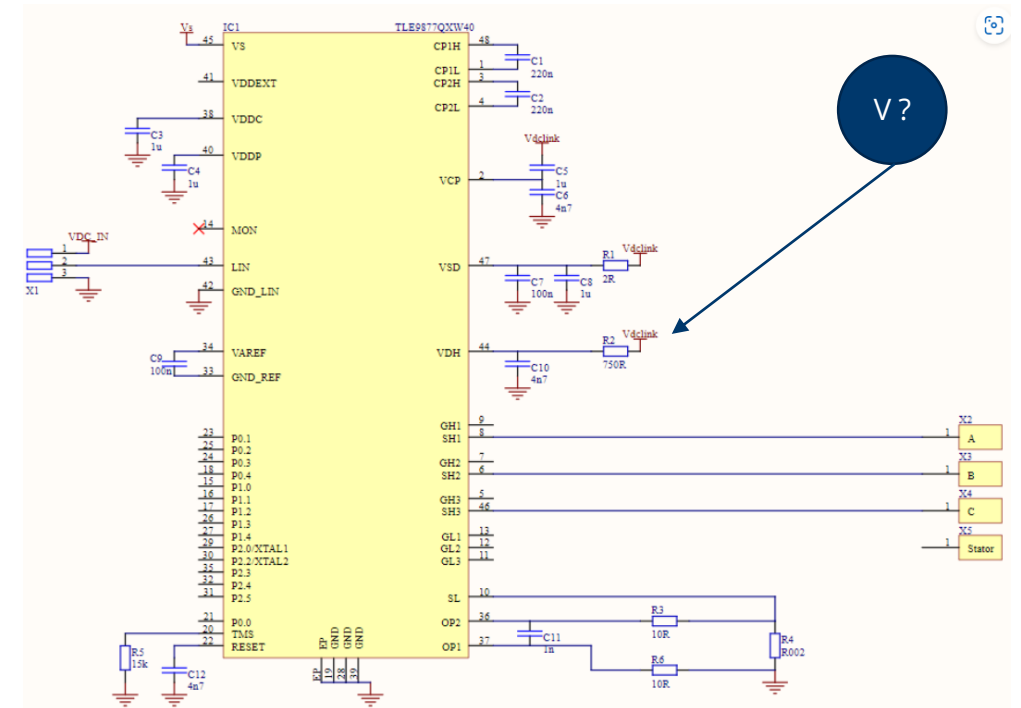
Meje za stabilno delovanje so:

$V_{dclinkMin} = 6,5 \text{ V}$

$V_{dclinkMax} = 18,5 \text{ V}$



Tipičen potek napetosti končne stopnje ob uporabi vhodnega filtra



# Viri in literatura

- Uradna stran tekmovanja: [LPVO: Načrtovanje elektronike za EMC 2023 \(uni-lj.si\)](#)
- Infineon TLE9877QXA40 domača stran: [TLE9877QXA40 - Infineon Technologies](#)
- Datasheet: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE9877QXA40-DataSheet-v02\\_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c81ae03fc0181d83f11323c12](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE9877QXA40-DataSheet-v02_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c81ae03fc0181d83f11323c12)
- Bridge driver application note: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AppNote-TLE986x-TLE987x-FAQ-Application-Hints\\_3-ApplicationNotes-v01\\_03-EN.pdf?fileId=5546d4625b62cd8a015ba9870bd91373](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AppNote-TLE986x-TLE987x-FAQ-Application-Hints_3-ApplicationNotes-v01_03-EN.pdf?fileId=5546d4625b62cd8a015ba9870bd91373)
- Hardware design guideline: [TLE987x/6x Hardware design guideline \(infineon.com\)](#)
  
- Toshiba Application Note: [Parasitic Oscillation and Ringing of Power MOSFETs](#)
- Vishay Application Note AN850: [Power MOSFET Basics: Understanding the Turn-On Process](#)
  
- Automotive SPICE: [Automotive SPICE® | Download](#)
- Hardware SPICE: [https://www.intacs.info/index.php/component/rsfiles/download-file/files?path=SPICE%2BDocuments%252FHardware%2BSPICE%252Fintacs\\_HW\\_Engineering\\_PRM\\_PAM\\_v2.1.pdf&temid=750](https://www.intacs.info/index.php/component/rsfiles/download-file/files?path=SPICE%2BDocuments%252FHardware%2BSPICE%252Fintacs_HW_Engineering_PRM_PAM_v2.1.pdf&temid=750)



Hvala za pozornost

Dejan Beguš, [dejan.begus@kolektor.com](mailto:dejan.begus@kolektor.com)  
Jaka Ivančič, [jaka.ivancic@kolektor.com](mailto:jaka.ivancic@kolektor.com)