

Prenos krmilnega signala med sklopoma podvrženima veliki du/dt in negativni napetosti skupnega načina

Peter Zajec, Andraž Rihar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-mail: peter.zajec@fe.uni-lj.si

Control signal level-shifter subjected to high du/dt and negative common-mode voltage

In the future, the two-voltage source concept will prevail in modern vehicles. In general, the devices differ significantly in the rated power and in the magnitude of the high-voltage source. In those not exceeding 60 V, the galvanic isolation between the control and power stage is not mandatory. Thus using the insulating couplers to transfer logic signals between both stages is not cost-effective. As an alternative, level-shifters are commonly used. Yet, most of them are approved for applications with positive common-mode voltage. The paper proposes a custom made level-shifter capable of withstanding negative common-mode voltage and its sharp change (du/dt). The information is translated via a two-channel current generator relying on a controlled current mirror. At the receiving end, the information is restored by comparing the partial voltage drops at the comparator's inputs. During the design phase, the robustness of the proposed circuit has been analyzed and verified on a dedicated LTspice model and experimentally demonstrated on the fabricated device.

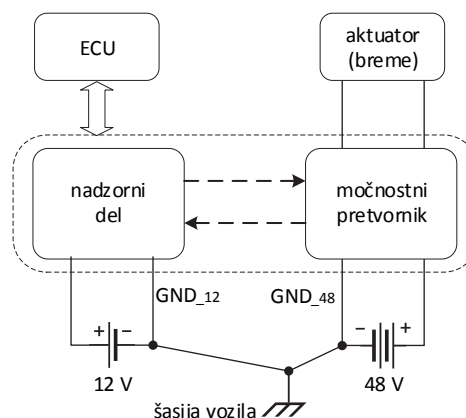
1 Vpogled v ozadje aplikacije

Danes prevladujoča osebna vozila imajo vgrajeno le 12 V baterijo, kar ne zadostuje za motorna vozila z električnimi ali hibridnimi pogoni, kjer večje moči bremen narekujejo uporabo virov z višjo nazivno napetostjo. Prehod na izključno en napetostni nivo je malo verjeten, temveč se pričakuje, da bo v prihodnje prevladovala dvo-sistemska zasnova električnih tokokrogov sodobnih vozil - pa naj si gre pri tem za mehke hibride ali povsem električna vozila [1]–[3]. Pogonski sklopi teh vozil kot tudi sklopi po nazivni moči zmogljivejših naprav (klima, ...) se bistveneje ločijo po magnitudi visoko-napetostnega vira, ki pri mehkih hibridih ne presega 60 V, medtem ko razpon napetosti pri povsem električno gnanem vozilu najpogosteje znaša med 400 V in 800 V.

Notranja struktura (slika 1) omenjenih naprav tako praviloma sestoji iz visokonapetostnega – močnega pretvornika in nizkonapetostnega – nadzornega dela. Za usklajeno obratovanje je med njima vzpostavljeno večje število merilnih in krmilnih tokokrogov, medtem ko s preostalimi napravami (ECU) izmenjuje informacije preko ustaljenih komunikacijskih kanalov (CAN ipd).

1.1 Omejitve pri realizaciji krmilnih tokokrogov v avtomobilski tehniki

Tehnična rešitev prenosa informacij iz merilnih in krmilnih tokokrogov je prepuščena načrtovalcu, mora pa obvezno preprečiti vsak nenamerni kratek stik med napajalnima tokokrogoma. V ta namen se najpogosteje uporabljajo izolacijski sklopniki, ki delajo po optičnem, induktivnem ali kapacitivnem načelu. Pomanjkljivost teh rešitev je, da so sorazmerno velike in razmeroma drage in kot take v dvo-sistemske zasnove električnih tokokrogov z napetostjo izpod 60 V, kjer galvanska ločitev med tokokrogoma ni obvezna, stroškovno neutemeljene.



Slika 1. Konceptualna zasnova dvo-sistemskega napajalnega tokokroga z napetostma pod 60 V.

Nabor namembno oblikovanih vezij za prenos informacij z diskretnimi ali zveznimi električnimi signali dodatno omejuje zahteva, da vezja, ki so sicer prilagojena majhnemu razponu merilnih in krmilnih signalov (vse pogosteje izpod 3,3 V), ostanejo nepoškodovana tudi ob navzočnosti mnogo višje napetosti (vse do magnitude visoko-napetostnega vira). Ali kar je kočljivejše, da morajo omogočati prenos informacije navkljub njeni prisotnosti. Tovrstni primer, ki je del testnih preskusov naprave, v avtomobilski tehniki nastopi ob prekinitvi vodnika med napravo in negativnim polom visoko-napetostnega vira, ali ob prekinitvi vodnikov proti šasiji. Ne glede na specifičen primer, se med referenčnima potencialoma (GND_{12} in GND_{48}) poveča potencialna razlika, ki lahko doseže maksimalni iznos enak magnitudi visoko-napetostnega vira. Sprememba potencialne razlike nastopi praviloma izjemoma, a izvrši se z veliko strmino porasta, ki na zanesljivost prenesene informacije vpliva mnogo bolj škodljivo kot sama magnituda potencialne razlike.

Navedenemu izzivu je posvečeno nadaljevanje članka, kjer bomo opisali specifičen primer, kjer je vezje za prenos informacije podvrženo ne le občasnemu temveč pogostnemu nastopu visoke potencialne razlike s sočasno veliko strmino (du/dt) njenega porasta in upada. Razlika je le v tem, da potencialna razlika ne nastopi zaradi fizične prekinitve predhodno omenjenih vodnikov, temveč zaradi prekinitve tokokroga s tako imenovanim varnostnim stikalom, ki je del naprave.

2 Varnostno stikalo

Varnostna stikala v avtomobilskih sklopih so namenjena preprečitvi škode ob izjemnih dogodkih, ki nastopijo zaradi prekomerne obremenitve (kratek stik). Prav tako morajo napravo varovati v primeru zamenjave polov napetostnega vira. Tovrstni zaščiti sta praviloma podvržena oba vira, a v konkretnem primeru se opis nanaša le na izvedbo in delovanje visoko-napetostnega varnostnega stikala.

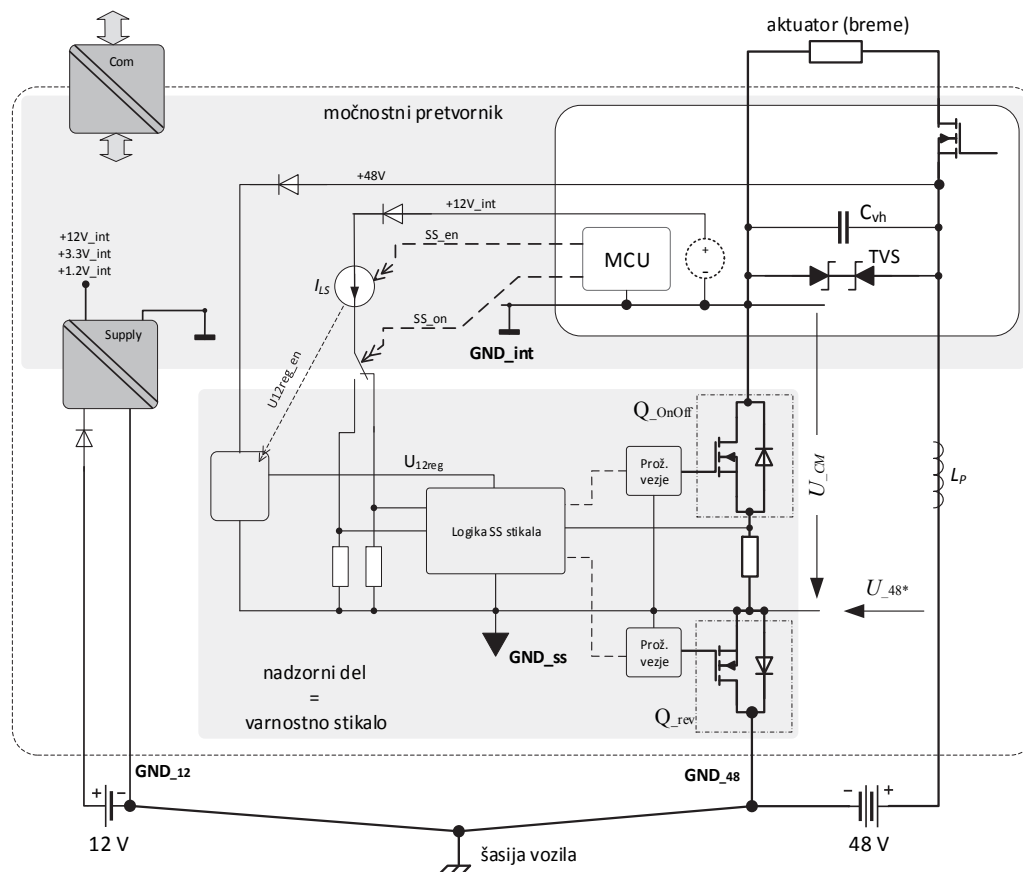
Stikalo (slika 2) sestoji iz dveh zaporedno vezanih in namembno različnih tranzistorskih stikal Q_{OnOff} in Q_{rev} z vzporedno vezanima lastnima diodama. V primeru priključitve napetosti U_{48} napačne polaritete v nadzornem vezju stikala izostane napetost U_{12reg} . Tranzistor Q_{rev} ni prožen zato se vsa potencialna razlika, ki sovpada z magnitudo napetosti U_{48} , vzpostavi preko njegove reverzno polarizirane diode. Ob pravilni priključitvi U_{48} tranzistor Q_{rev} služi izključno

zmanjšanju padca napetosti na njemu vzporedni diodi, zato je posledično majhna in jo zaradi enostavnosti razlage lahko zanemarimo.

Prekinitve močnega tokokroga – ob nameri uporabnika posredno sporočeni preko nadzornega mikrokontrolerja (MCU) ali neodvisno sprožene ob pojavu prekomernega toka, ter njegovo ponovno sklenitev, omogoča tranzistor Q_{OnOff} .

Oba sklopa varnostnega stikala morata delovati avtonomno, predvsem pa zagotavljati najvišji nivo nad-tokovne zaščite, neodvisno od delovanja ali morebitnih okvar v ostalih podsklopih naprave. V ta namen je med tranzistorja Q_{OnOff} in Q_{rev} umeščen merilni upor, čigar padec napetosti se posreduje vezju nad-tokovne zaščite varnostnega stikala. Prožilni ter omenjeno vezje se napajajo iz avtonomnega regulatorja napetosti U_{12reg} , ki ga je možno onemogočiti s ciljem zmanjšanja lastne rabe v mirovanju.

Umestitev varnostnega stikala v povratni (negativni) vodnik, ki povezuje vir napetosti U_{48} z bremenom, je neznačilna – vendar neobhodna v konkretnem primeru, saj umestitev Q_{OnOff} v dovodni (pozitivni) vodnik ne rešuje vseh zahtev glede varnega obratovanja ob nastopu kratkih stikov med priključnimi sponkami naprave.



Slika 2. Umestitev varnostnega stikala in konceptualna rešitev njegovega krmiljenja.

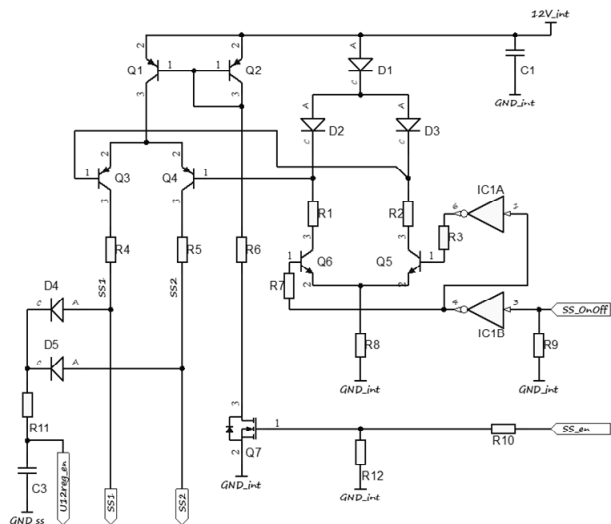
3 Prenos krmilnega signala med vezjema različnih referenčnih potencialov

Opisana umestitev stikala narekuje specifično rešitev za vklop in izklop tranzistorja Q_{OnOff} , kajti številnih prilagodljivih vezij (ang. level-shifter) namreč ni možno uporabiti za prenos krmilnega signala med MCU-jem in logičnim vezjem varnostnega stikala. Razlog tiči v negativni napetosti med njunima referenčnima vozliščema (GND_{int} , GND_{ss}) – t.i. napetost skupnega načina (ang. common-mode voltage), ki jo dopuščajo le posamezna namenska prilagoditvena vezja [4], [5].

3.1 Diferenčna zasnova krmiljenega tokovnega generatorja

Da bi zagotovili visoko zanesljivost vklopa/izklopa tranzistorja Q_{OnOff} tudi ob navzoči veliki strmini porasta potencialne razlike med GND_{int} in GND_{ss} , delovanje predlaganega prilagodilnega vezja sloni na uporabi i) krmiljenega tokovnega generatorja in ii) diference zasnove signalne poti.

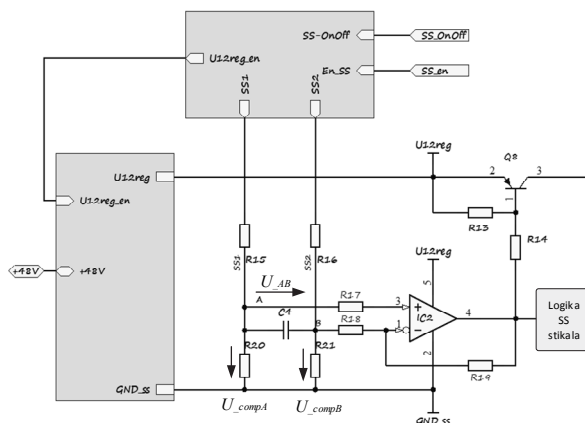
Prilagodilno vezje za posredovanje krmilnega signala sestoji iz oddajnega in sprejemnega dela.



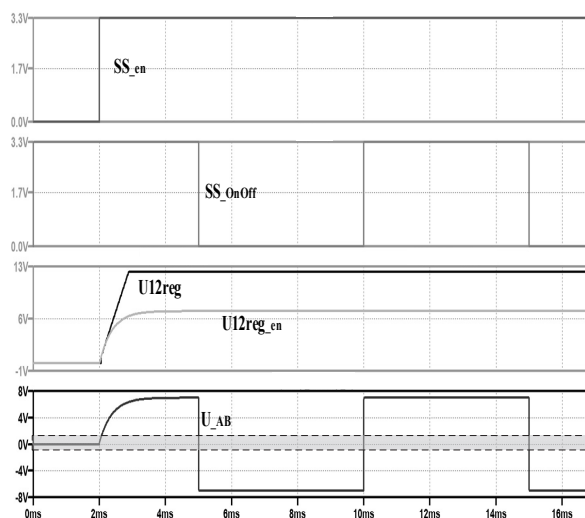
Slika 3. Oddajni del vezja - referenčni potencial GND_{int} .

Referenčni potencial (GND_{int}) oddajnega tokovnega generatorja (slika 3) je istoveten potencialu MCU-ja. Osrednji del tokovnega generatorja tvori t.i. tokovno ogledalo (Q_1 , Q_2), čigar tok je možno spreminjati s krmilnim signalom SS_{en} med diskretnima vrednostma (0 in 1 mA). Signal ima tudi pomožno vlogo, ki bo razvidna v nadaljevanju.

Tok ogledala se nato glede na vrednost krmilnega signala SS_{OnOff} , ki služi vklopu/izklopu tranzistorja Q_{OnOff} , preusmeri skozi enega od tokokrogov (SS_1 , SS_2) k sprejemnemu delu (slika 4), kjer se sklone skozi zaključna upora (R_{20} in R_{21}). Padca napetosti na uporih medsebojno primerjamo z napetostnim primerjalnikom - komparatorjem (IC_2). Izhodni signal primerjalnika se nato v logičnem vezju varnostnega stikala kombinira s signalom nad-tokovne zaščite. Združena vklapljata/izklapljata tranzistor Q_{OnOff} . Delovanje diference zasnove krmiljenega generatorja toka je razvidno iz poteka signalov (slika 5) dobljenega s simulacijskim tekom.



Slika 4. Sprejemni del vezja - referenčni potencial GND_{ss} .

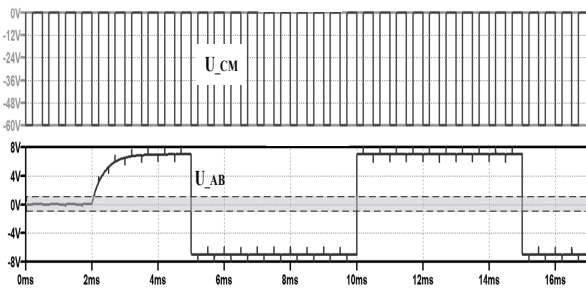


Slika 5. Potek signalov krmiljenega tokovnega generatorja.

Iz poteka vidimo, da razlika napetosti ($U_{AB} = U_{compA} - U_{compB}$) na vходу primerjalnika sledi krmilnemu signalu SS_{OnOff} , a le od $t = 2$ ms, ko je s signalom SS_{en} omogočeno delovanje tokovnega generatorja. Z istim krmilnim signalom se v sprejemnem delu vezja aktivira delovanje regulatorja napetosti. To storimo z napetostjo U_{12reg_en} , ki je za padec napetosti na zaključni upornosti posamezne tokovne linije. Vidimo, da napetost ob spremembi logičnega stanja signala SS_{OnOff} ohrani vrednost.

Ustaljena vrednost napetosti med vodomoma primerjalnika U_{AB} je pogojena s tokom generatorja, tj. z uporom R_6 , tranzistorjem Q_7 ter tokovnim ojačenjem tranzistorjev Q_1 in Q_2 . Nelinearnost in temperaturna odvisnost njunih karakteristik povzročata ob spreminjanju se napetosti med potencialoma $+12V_{int}$ in GND_{ss} tudi manjšo variacijo toka ogledala. Slednja na pravilno razpoznavo krmilnega ukaza (vklop / izklop) v sprejemnem delu vezja ne vpliva, ker je le-ta zasnovan na primerjavi delnih napetosti (U_{compA} , U_{compB}).

S tovrstno zasnovo je v največji možni meri izničen vpliv naglega porasta napetosti med GND_{int} in GND_{ss} , ki je s stališča generatorja toka interpretirana kot napetost skupnega načina. Navedena nedovzetnost vezja na sliki 5 ni evidentna, saj sta spremembi U_{AB} in napetosti skupnega načina vzročno povezani – nastopita tako rekoč sočasno.



Slika 6. Potek U_{AB} – dokaz nedovzetnosti prenosa informacije ob prisotnosti U_{CM} z visoko strmino du/dt .

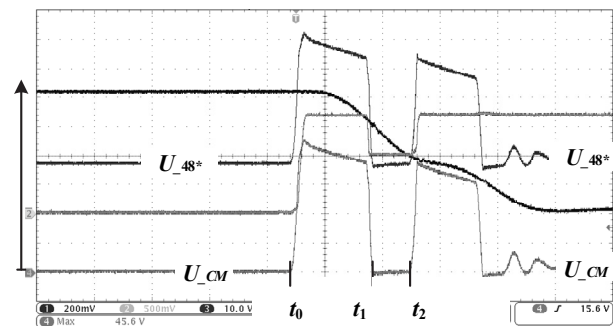
Bolj otipljiv dokaz nam nudi simulacijski tek pri katerem varnostno stikalo ni bilo proženo na podlagi vhodne napetosti primerjalnika U_{AB} , temveč je bilo za namen dokaza proženo periodično z neodvisno napetostjo pulzne oblike. Tokovni generator je zato izpostavljen periodično spreminjajoči napetosti skupnega načina U_{CM} (slika 6) amplitude 60 V. Ob identičnem poteku krmilnih signalov SS_{OnOff} in SS_{en} , prepoznamo dodatne superponirane konice v poteku vhodne napetosti U_{AB} primerjalnika. V primerjavi z ustaljeno vrednostjo je njihova magnituda majhna, zato trenutni iznos napetosti ne doseže preklopne praga primerjalnika (osenčeno področje na sliki 5 in 6), ki znaša vsega 200 mV. Primerjalnik ohrani svoje izhodno stanje, s čimer je preprečen morebiten nenamern vklop ali izklop varnostnega stikala.

4 Preveritev zanesljivosti prilagodilnega vezja

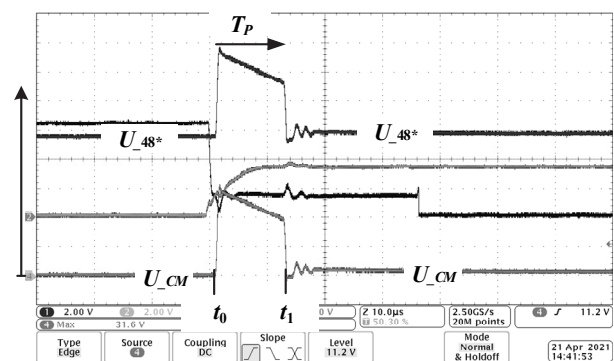
V praksi je magnituda napetostnih konic presegala vrednost s slike 6, saj je poleg frekvenčnih lastnosti tranzistorjev tokovnega generatorja pogojena tudi z na tiskanem vezju prisotnimi prostorsko porazdeljenimi kapacitivnostmi med obema referenčnima vozliščema. Poskusa, kot ga kaže slika 6, na realnem vezju ni možno opraviti. Kot delno potrditev zasnove vezja prilagamo prikaz poteka napetosti na stikalu U_{CM} in U_{48^*} (slika 2) med izklopom kratkostičnega toka, ko za stikalo nastopijo najneugodnejši pogoji. Slika 7.a kaže poteka obeh napetosti namerno modificiranega stikala, kjer vidimo, da je vezje (namerno) dovzetno na veliko du_{CM}/dt , ki nastopi ob izklopu stikala (t_0), zaradi česar stikalo nepričakovano vklopi in ponovno izklopi (t_2). Potek napetosti na sliki 7.b ponazarja pravilno delovanje stikala pri izklopu toka magnitude 400 A ter pri nazivni napetosti U_{48} .

Porast napetosti preko nazivne vrednosti je posledica v parazitni induktivnosti (L_p) nakopičene energije, ki se v intervalu T_p sprosti na prenapetostni komponenti (TVS). Po končanem razmagnetanju (t_1) napetost na stikalu upade skoraj do vrednosti 0 V, navkljub v trenutku t_0 izklopljenemu varnostnemu stikalu. Omenjeni potek je sprva zavajajoč, a ne gre spregledati dejstva, da je kondenzator C_{vh} na vhodu močnostne

stopnje (slika 2) ostal napolnjen na nazivno napetost U_{48} .



a) nedovoljeno delovanje stikala



b) pravilno delovanje stikala

Slika 7. U_{CM} in U_{48^*} po prekoračitvi toka varnostnega stikala.

Zahvala — Delo je sofinancirala ARRS v sklopu financiranja programske skupine P2-0258 in delno v okviru projekta L2619 »Napredni elektronski napajalni modul za avtomobilski katalizator«.

5 Literatura

- [1] C. Hoff and O. Sirch, *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VII*, 1st ed. Renningen: expert, 2016.
- [2] S. Cabizza, L. Corradini, G. Spiazzi, and C. Garbossa, 'Comparative Study of 48V-based Low-Power Automotive Architectures', in *2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Nov. 2020, pp. 1–8. doi: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265730.
- [3] S. Saponara, P. Tisserand, P. Chassard, and D. My-Ton, 'DC/DC converter integrated architecture for 48V supplies in micro/mild hybrid vehicle electrical engine control module', in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Jun. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555855.
- [4] J. Wittmann, T. Rosahl, and B. Wicht, 'A 50V high-speed level shifter with high dv/dt immunity for multi-MHz DCDC converters', in *ESSCIRC 2014 - 40th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, Sep. 2014, pp. 151–154. doi: 10.1109/ESSCIRC.2014.6942044.
- [5] S. Fraiss, 'Smart High-Side Switches, Application note', p. 81.