



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

TESTER VLAKOVÉHO ZABEZPEČOVAČE

AUTOMATIC TRAIN PROTECTIONS SYSTEM TESTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Marek

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Michal Marek

ID: 155196

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Tester vlakového zabezpečovače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem funkce liniového systému vlakového zabezpečovače na železniční síti v ČR, SR a HU. Detailně prostudujte tvary signálů a meze všech podstatných elektrických veličin v technologii přenosu kódu na drážní vozidlo. Navrhněte přenosný tester mobilní částí vlakového zabezpečovače, který bude schopen generovat kód ekvivalentní s kódem liniového systému. Prostudujte princip odometrie na drážních vozidlech a na přenosném testeru navrhněte způsob generování ekvivalentních signálů snímačů otáček. Vyberte vhodný typ akumulátoru vhodný pro napájení testeru po dobu osmi hodin. Tester navrhněte pro uživatelsky jednoduché ovládání a údržbu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Oldřich Poupě: Liniový vlakový zabezpečovač NADAS Praha 1965

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá popisem liniového systému vlakového zabezpečovače a jeho funkčních vlastností, a to zejména s ohledem na přenos kódovaného signálu ze stacionární části na drážní vozidlo. Dále práce shrnuje podstatné informace o způsobu snímání otáček soukolí drážního vozidla a komunikace s okolními periferiemi. Na základě zjištěných parametrů elektrických veličin a signálů je naznačen návrh elektronického přenosného zařízení. Cílem přenosného zařízení neboli testeru je ověřit činnost vlakového zabezpečovače na drážním vozidle a sledovat jeho odezvu na základě generovaných signálů tímto přenosným zařízením. Z toho plyne, že zařízení bude vybaveno generátory signálů liniového vlakového zabezpečovače typu LS a EVM a signálů používaných v odometrii drážních vozidel.

Klíčová slova

Vlakový zabezpečovač, liniový systém vlakového zabezpečovače, generace signálů, modulace signálů, odometrie drážních vozidel, nabíjecí akumulátor

Abstract

The Master's thesis describes continuous automatic train protection system and its functional properties, principally the transmission of special encoded signal between stationary part and rail vehicle. There is also summarized some important information about the gear rotational speed sensors and its communication with other onboard peripherals. Depends by analysed parameters of electrical signals, the general suggestion of portable electronic device is outlined. Portable electronic device or TESTER will be used to in phase of testing mobile part of automatic train protection system mounted onboard of rail vehicle. Tester will generate equivalent electrical signals to signals in system automatic train protection and the real system response will be possible to evaluate. The generator block allows to model real electrical signals in automatic train protection technology type LS or type EVM and signals rail vehicle odometry.

Key words

ATP, Continuous automatic train protection system, rail vehicles odometry, electrical signal generating, rechargeable accumulator

Bibliografická citace

MAREK, M. *Tester vlakového zabezpečovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 107 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „**Tester vlakového zabezpečovače**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. května 2017

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu **doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

Děkuji také **Martinu Pitříkovi** za cenné rady a poznámky ke konvenci vypracování vývojových diagramů.

Děkuji vedoucímu pracoviště vývoje vlakového zabezpečovače společnosti AŽD Praha, s.r.o. panu **Ing. Jaroslavu Kubešovi** za cenné rady a pomoc při vypracování tohoto projektu.

V Brně dne 25. května 2017

.....

podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla podpořena výzkumnou infrastrukturou
vybudovanou v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

ÚVOD	- 9 -
1 VLA KOVÝ ZABEZPEČOV AČ	- 10 -
1.1.1 Liniový	- 10 -
1.1.2 Bodový	- 10 -
1.2 VLA KOVÝ ZABEZPEČOV AČ TYP U LS	- 11 -
1.2.1 Historie	- 11 -
1.2.2 Stacionární část	- 11 -
1.2.3 Mobilní část	- 13 -
1.3 Elektrické veličiny a signály v systému LS	- 14 -
1.3.1 Tvary signálů	- 18 -
1.4 VLA KOVÝ ZABEZPEČOV AČ EVM	- 21 -
1.5 Elektrické veličiny a signály v systému EVM	- 23 -
1.5.1 Modulační signály	- 23 -
1.5.2 Modulované signály	- 24 -
2 ODOMETRIE DRÁŽNÍCH VOZIDEL	- 28 -
2.1 Registrační rychloměr	- 28 -
2.2 Snímač otáček	- 29 -
2.3 Snímače otáček a elektrické parametry	- 31 -
2.3.1 Snímač otáček GEL 2710	- 32 -
3 SHR NUTÍ POŽADAVKŮ NA NÁVRH	- 34 -
3.1 Shrnutí požadavků	- 34 -
4 NÁVRH PŘENOSNÉHO TESTERU	- 36 -
4.1 Generování kódu liniového systému	- 36 -
4.1.1 Přímá digitální syntéza kmitočtu	- 37 -
4.1.2 Napěťový výstup generátoru kódu	- 38 -
4.1.3 Proudový výstup generátoru kódu	- 39 -
4.2 Generování signálů odometrie	- 39 -
4.3 Měření snímače kódu	- 40 -

4.4	Výběr základních komponent	45 -
4.4.1	Akumulátor	45 -
4.4.2	Mikrokontrolér	46 -
4.4.3	Displej	49 -
4.5	Napájecí management.....	51 -
4.6	Schéma zapojení	51 -
4.6.1	Návrh nabíjecího obvodu Li-ion baterie	51 -
4.6.2	Zdroj napájecí sítě $U = 3,3\text{ V}$	59 -
4.6.3	Zdroj napájecí sítě $U = \pm 9\text{ V}$	61 -
4.6.4	Zapojení procesoru	65 -
4.6.5	Blok generace signálů liniového systému.....	67 -
4.6.6	Blok logických (digitálních) obvodů	68 -
4.6.7	Koncový stupeň generátoru kódu s napěťovým výstupem.....	70 -
4.6.8	Koncový stupeň generátoru kódu s proudovým výstupem	71 -
4.6.9	Koncový stupeň generátoru signálů odometrie	73 -
4.7	Teoretický výpočet příkonu TESTERU	74 -
4.7.1	Výpočet doby běhu TESTERU	75 -
4.8	Simulace LT-SPICE	75 -
4.9	Ovládací firmware.....	76 -
4.9.1	Generátor signálu vlakového zabezpečovače	76 -
4.9.2	Generátor signálu odometrie	79 -
4.9.3	Ostatní funkce.....	80 -
4.10	Konstrukční návrh	82 -
4.10.1	Deska plošných spojů	82 -
4.10.2	Čelní panel	83 -
4.10.3	Konektory a jejich propojení	84 -
5	UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ	86 -
6	MĚŘENÍ.....	88 -
	ZÁVĚR.....	93 -

REFERENCE.....	- 95 -
Seznam zkratk	- 97 -
Seznam obrázků	- 98 -
Seznam tabulek.....	- 100 -
Přílohy	- 101 -
Návěstní opakovač mobilní části vlakového zabezpečovače systému LS [18].....	- 101 -
Návěstní opakovač mobilní části vlakového zabezpečovače systému EVM [8]	- 101 -
Jednotka zásuvných modulů mobilní části vlakového zabezpečovače LS06 [4]	- 101 -
Koncept návrhu čelního ovládacího panelu	- 102 -
Deska plošných spojů – vrstva TOP	- 103 -
Deska plošných spojů – vrstva IN 1	- 104 -
Deska plošných spojů – vrstva IN 2	- 105 -
Deska plošných spojů – vrstva BOTTOM.....	- 106 -
Deska plošných spojů – data pro osazení TOP	- 107 -
Deska plošných spojů – data pro osazení BOTTOM.....	- 108 -
Použití pinů mikrokontroléru PIC24HJ128GP204	- 109 -

ÚVOD

Systém vlakového zabezpečovače slouží k přenosu návěstních znaků na stanoviště strojvedoucího drážního vozidla. Návěstní znak přenášený liniovým systémem reprezentuje stav světelného železničního návěstidla nebo cílové rychlosti, které dovolují jízdu vlaku nebo naopak pokračování v jízdě zakazují, příp. určitým způsobem omezují. Strojvedoucímu, tak i v případě zhoršených podmínek viditelnosti, pomáhá lépe předvídat dopravní situaci ve směru jízdy, před drážním vozidlem. Funkce vlakového zabezpečovače na drážním vozidle je také sloučena s funkcí kontroly bdělosti strojvedoucího, a to v pravidelných intervalech, jejichž délku definuje přenášený návěstní znak nebo cílová rychlost. Na území České republiky, resp. tehdejšího Československa, se využívá již od konce 60. let 20. století, a také v současné době je nedílnou součástí zabezpečení na železnici jak v ČR, tak v celé Evropě. [5]

Každý z přenášených návěstních znaků v systému vlakového zabezpečovače je reprezentován elektrickým signálem, modulovaným na vysílací straně. Způsob modulace přísluší přenášenému návěstnímu znaku nebo cílové rychlosti. Lokomotivní část vlakového zabezpečovače (neboli mobilní část) detekuje a vyhodnocuje přenášený signál. Po správné detekci a vyhodnocení návěstního znaku mobilní částí vlakového zabezpečovače je jeden z vybraných návěstních znaků zobrazen návěstním opakovačem na stanovišti strojvedoucího. Návěstní opakovač je modul barevných světél, která se rozsvěcují v reakci na detekovaný přenášený znak.

Cílem práce je detailně prostudovat a popsat elektrické signály liniového systému vlakového zabezpečovače, které jsou přenášeny na drážní vozidlo (mobilní část vlakového zabezpečovače) a popsat princip funkce vlakového zabezpečovače používaného na síti SŽDC, ŽSR a MÁV, tedy v České republice, Slovenské republice a v Maďarsku.

Hlavní požadavek je na základě prostudovaných elektrických soustav a signálů vlakového zabezpečovače navrhnout přenosné zařízení vybavené vlastním akumulátorem, které generuje signály ekvivalentní signálům vlakového zabezpečovače. Regulovatelné výstupní signály přenosného zařízení mají vyvolat v laboratorních podmínkách na mobilní části vlakového zabezpečovače stejné reakce jako v reálných provozních podmínkách.

Dalším cílem je prostudovat výstupní signály a principy snímačů otáček používaných na drážních vozidlech a navrhnout na přenosném zařízení možnost generování.

Navržené přenosné zařízení vybavené generátorem signálů vlakového zabezpečovače a snímačů otáček bude sloužit k testovacím účelům v rámci ověření správné funkce zařízení.

1 VLAKOVÝ ZABEZPEČOVAČ

Vlakový zabezpečovač nebo také vlakové zabezpečovací zařízení lze definovat jako soubor technických zařízení pro přenos návěstního znaku na stanoviště strojvedoucího, čímž se zvyšuje bezpečnost dopravního provozu. Vlakový zabezpečovač je také na kolejovém drážním vozidle propojen s registračním rychloměrem (tachografem), resp. elektronickým rychloměrem. Na základě získaných dat o stávající rychlosti vozidla a přijatém návěstním znaku vykonává systém vlakového zabezpečovače také kontrolu bdělosti strojvedoucího, a to periodické obsluhy tlačítka bdělosti v předepsaném intervalu (cca 200 ms – 2 s) při spuštění zvukové výstrahy pro potvrzení bdělosti.

Systém vlakového zabezpečovače libovolného typu se všeobecně skládá ze stacionární a mobilní části.

Stacionární část je tvořena elektronickými zařízeními pro generování kódu (telegramu, paketu) přenášeného do mobilní části VZ, tedy na kolejové drážní vozidlo. Může se jednat o kodér pro liniový systém VZ připojený ke kolejnicím přes obvody galvanického oddělení nebo o vysokofrekvenční vysílač s magnetickou vazbou na snímač mobilní části VZ.

Mobilní částí vlakového zabezpečovače je skříň zásuvných modulů umístěná v rámu elektroniky zařízení malých napětí. Jádrem této skříně jsou elektronické obvody vlakového zabezpečovače sloužící pro bezpečné vyhodnocení všech aktuálních stavů, napájecí zdroje, obvody galvanického oddělení nebo obvody pro archivaci dat. Na stanovišti strojvedoucího je obvykle instalován tzv. návěstní opakovač, ovládací jednotka a tlačítka bdělosti. [5]

1.1.1 Liniový

Liniový systém používá vysílač informace připojený ke kolejnicím a přijímač na lokomotivě. Od vysílacího bodu (od kolejových obvodů u návěstidla) se do kolejí pouští signální proud. Jednou kolejnicí teče směrem k lokomotivě, projde její první nápravou a potom se vrací druhou kolejnicí zpět k vysílači. Před první nápravou ve směru jízdy jsou snímače, které snímají magnetické pole vytvořené kolem kolejnic a tento signál vedou do vyhodnocovací části, tedy do mobilní části VZ. S použitím izolovaných styků kolejnic se vymezují hranice přenosu signálního proudu liniového VZ. [3]

1.1.2 Bodový

Bodový systém funguje velmi odlišně. Bodový systém spočívá v tom, že v určitém bodě na trati (u návěstidla, či na jiném vhodném místě) je vedle kolejí vysílač. Když jede drážní vozidlo v blízkosti vysílače, přečte si pomocí snímače vysílanou informaci a zobrazí přijaté informace na stanovišti strojvedoucího. Výhodou je laciný provoz systému, větší množství dat, která se mohou přenášet. Nevýhodou je fakt, že pokud se z nějakého důvodu přenos nezdaří, nemá

zabezpečovač šanci dané informace získat. Dojde-li ke změně vysílaných informací po projetí drážního vozidla přes informační bod, zabezpečovač změnu již nezaznamená. Přenos informace proběhne jednorázově v určitém bodě traťové části pomocí vazby na vozidlovou část, zpravidla na zábrzdnu vzdálenost před návěstidlem (délka zábrzdny vzdálenosti se řídí v daném státě národními pravidly, která určuje příslušný správce infrastruktury. Činnost bodového systému se tedy projeví při přejíždění informačního bodu hnacím vozidlem a nelze v následující době jízdy až do místa dalšího informačního bodu znovu aktualizovat informaci při změnách dopravní situace před vozidlem (např. změna návěstního znaku na dovolující). [3]

1.2 VLAKOVÝ ZABEZPEČOVAČ TYPU LS

1.2.1 Historie

Tento zabezpečovač začaly zavádět Československé státní dráhy počátkem šedesátých let 20. století. Traťová část byla zřizována na elektrifikovaných tratích jako součást automatického bloku návěstí. Zařízení bylo s postupem doby inovováno, jednotlivé verze se dodávaly pod označením LS II, LS III a LS IV. Všechny verze tohoto označení existují na současně provozovaných drážních vozidlech doposud, ale jsou zastaralé. Vlakový zabezpečovač verze LS II. se základní frekvencí (frekvencí nosného signálu) 50 Hz je používán na traťových úsecích elektrifikovaných stejnosměrnou napájecí soustavou 3kV. U vlakového zabezpečovače s označením LS III., který byl instalován na tratích pod střídavou napájecí trakcí 25 kV/50 Hz a došlo ke změně nosné frekvence na 75 Hz, a to z důvodů nežádoucích vlivů střídavé napájecí soustavy o stejné frekvenci na toto zabezpečovací zařízení. Vlakový zabezpečovač verze LS IV. byl vyvinut za účelem použití na více-systémových hnacích drážních vozidlech, které byly vybaveny přepínačem mezi vstupními elektronickými filtry navrženými pro nosnou frekvenci 50 Hz a 75 Hz. [1]

V 80. letech se ČSD rozhodly vozidlovou část zcela přepracovat, aby odpovídala úrovni soudobé techniky. Výsledkem byl zabezpečovač LS 90, který byl zaváděn od počátku 90. let. Traťová část, princip činnosti a počet přenášených znaků zůstaly zachovány dodnes (i na území současné Slovenské republiky). Postupné inovace mobilní části probíhají do současnosti. [1]

1.2.2 Stacionární část

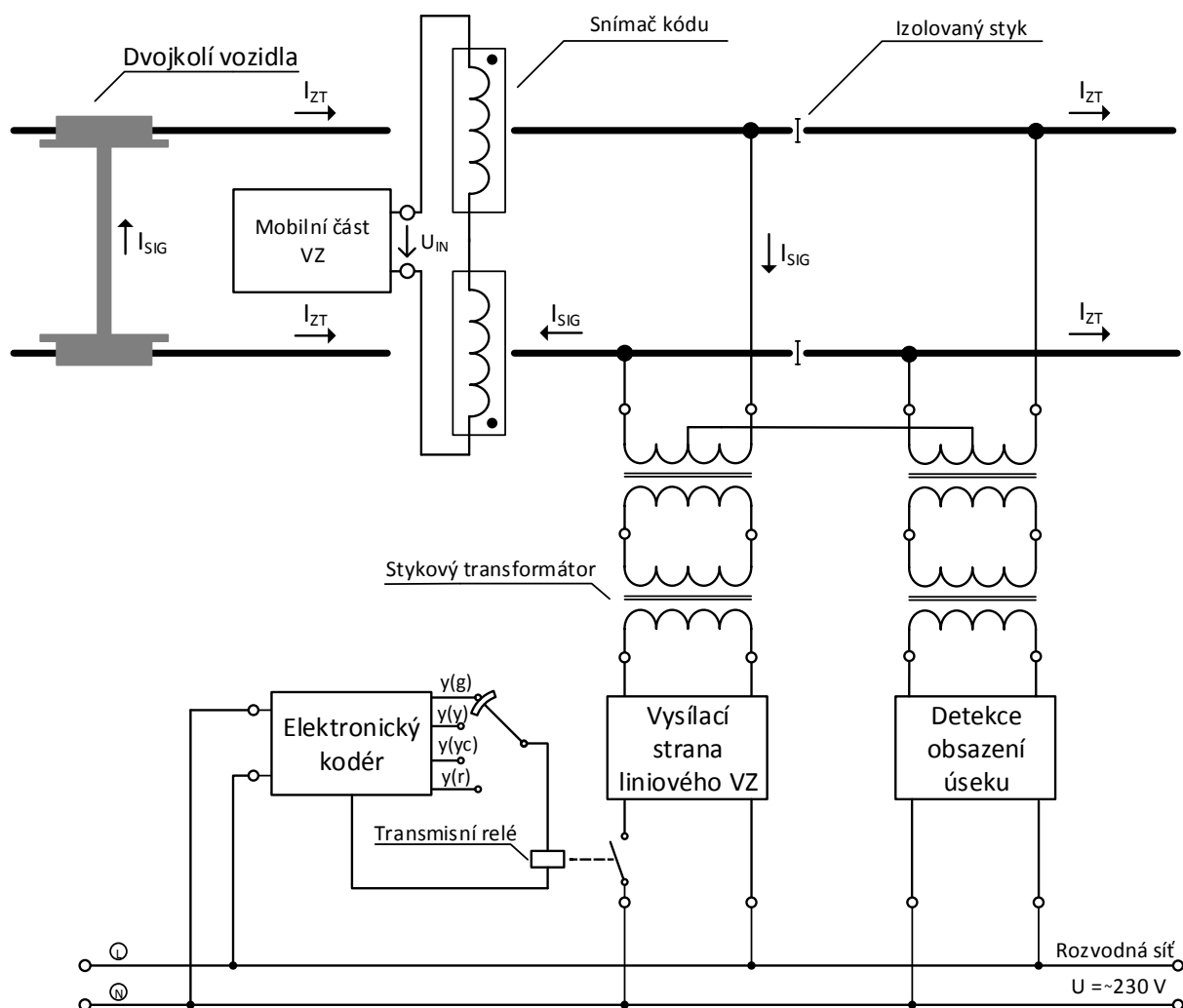
Liniového systému vlakového zabezpečovače se využívá v České republice na železniční síti Správy železniční dopravní cesty a území slovenské republiky na síti ŽSR. Z kapitoly 1.1.1 je zřejmé, že přenos informace na drážní vozidlo probíhá spojitě ve vymezeném kolejovém úseku před následným návěstidlem.

V místě výskytu světelných návěstidel, která přísluší k dané koleji, se kolejové úseky oddělují tzv. izolovaným stykem. Tímto izolovaným stykem je např. mezistaniční kolejový úsek

dlouhý několik kilometrů rozdělen na několik oddílů (1500 m), každý s vlastním kolejovým obvodem. Jednotlivé oddíly jsou vybaveny kolejovým obvodem pro detekci obsazenosti traťového úseku a obvody pro vysílání kódu liniové systému vlakového zabezpečovače (stacionární část VZ). V praxi jsou tyto 2 funkce sloučeny do principu funkce jednoho kolejového obvodu. Kolejový obvod liniového systému, tedy vysílací strana se skládá ze zdroje nosné vlny, která je transformována z rozvodné sítě, elektronického kodéru, převodového transformátoru, stykového transformátoru a ochranných jistících prvků.

Nosnou vlnou je sinusový signál o frekvenci $f_N = 50 \text{ Hz}$, 75 Hz nebo 275 Hz . Frekvence nosného signálu $f_N = 275 \text{ Hz}$ se využívá ke kódování pouze ve staničních kolejích z důvodu lepšího funkčního chování v rozvětvených kolejových obvodech (na výhybkových úsecích). [6]

V bloku kodéru je signál nosné vlny modulován frekvenčně impulzní modulací na základě stavu příslušného návěstidla, které je ovládáno logikou traťového nebo staničního zabezpečovacího zařízení. Liniový systém typu LS přenáší 4 různé signály odpovídající návěstním základním znakům (stavům) světelného návěstidla. Daný signál, resp. signální proud prochází do kolejových pásů (do kolejnic) přes převodový a stykový transformátor, který je galvanickým oddělením mezi vysílací stranou a kolejovými pásy. V kolejnicích může v blízkosti zabezpečovacího zařízení protékat značně velký zpětný trakční proud, který je veden zpět do napájecí stanice traťového úseku. Každý pól sekundárního vinutí stykového transformátoru je připojeno na jednu kolejnici. [2]



Obr. 1 – Schéma přenosu informace ve stacionární části VZ

Při obsazení kolejového úseku hnacím drážním vozidlem se elektrický obvod uzavírá přes první soukolí vozidla ve směru jízdy. Z toho plyne, že signální proud protéká kolejnicemi vzájemně v opačném směru (např. levou kolejnicí ve směru jízdy k drážnímu vozidlu a pravou kolejnicí zpět k vysílací straně). V okolí kolejnice v celém kódovaném úseku průchodem signálního proudu vzniká v okolí kolejnice střídavé magnetické pole přibližně tvaru válce. Mobilní část vlakového zabezpečovače na drážním vozidle vyhodnocuje informaci přenášenou signálním proudem na dvojici snímacích cívek, na kterých se indukuje napětí. Schéma přenosu informace ve stacionární části vlakového zabezpečovače je naznačeno na obr. 1.

1.2.3 Mobilní část

Mobilní částí vlakového zabezpečovače lze rozumět vlakové zabezpečovací zařízení na drážním vozidle, tedy vozidlo vybaveným stanovištěm strojvedoucího. Systém mobilní části se skládá z bloku zásuvných modulů elektrických obvodů vlakového zabezpečovače, 2 tlačítek bdělosti, návěstního opakovače, elektromagnetického ventilu, ovládací jednotkou a dvou

snímačů kódu. Celý systém mobilní části vyhovuje dle mezinárodního evropského standartu *IEC 61508 – Funkční bezpečnost elektrických / elektronických / programovatelných elektronických systémů* související s bezpečností úrovně integrity bezpečnosti IV. (SIL 4). [4]
[10]

Jednotka zásuvných modulů je jádrem logiky mobilní části VZ. Na drážním vozidle je umístěna ve obvykle strojovně v rámu elektroniky pro zařízení malých napětí, která jsou napájena stejnosměrným napětím z palubní baterie drážního hnacího vozidla. Nominální napětí palubních baterií je standardně $V_{BAT} = +24\text{ V}$, $+48\text{ V}$, $+72\text{ V}$ a $+110\text{ V}$. Na vstupu příslušného napájecího zdroje VZ je dovolená hodnota 65 % až 125 % nominálního napětí palubní baterie. Jednotka zásuvných modulů je složena například z napájecího zdroje, vstupních filtrů nebo obvodů pro vyhodnocení kódu liniového systému atp. [4]

Návěstní opakovač je koncové zobrazovací zařízení na stanovišti strojvedoucího, které zobrazuje (informuje strojvedoucího) návěst přenášenou kódem liniového systému na vozidlo. Návěstní opakovač může zobrazovat 4 přenášené znaky liniového systému a je vybaven také optickým indikátorem automatické výluky kontroly bdělosti. [3]

Snímače kódu jsou v cívky navinuté na feritovém jádře, které jsou umístěny v blízkosti pluhu drážního vozidla, před prvním soukolím ve směru jízdy. Jsou vhodně zapouzdřeny do válcového tvaru a jsou montovány tak, aby byly ve vertikálním směru orientovány kolmo na směr vedení kolejnic.

1.3 Elektrické veličiny a signály v systému LS

Proudový zdroj kolejových obvodů vysílá do kolejí signální proud liniového systému o efektivní hodnotě proudu $I_{SIG} = 22\text{ A}_{RMS}$. Signál je v kodéru frekvenčně-impulzně modulován, resp. v přesně stanovených časech (s danou frekvencí) je signál nosné frekvence spínán a rozepínán. Uvedená hodnota efektivního signálního proudu odpovídá výstupnímu proudu kodéru v čase sepnuto. V čase rozepnuto je signální proud $I_{SIG} = 0\text{ A}_{RMS}$. Indukované napětí na snímačích vykazuje shodný časový průběh jako generovaný signální proud. [5]

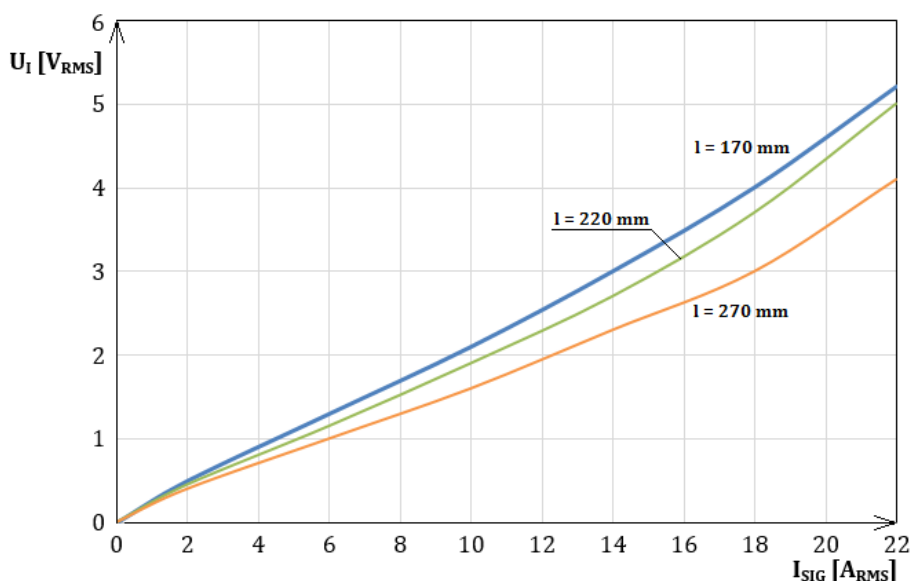
Elektrický odpor kolejnic způsobuje, že se zvyšující se vzdáleností od vysílací strany klesá efektivní hodnota signálního proudu. Pro spolehlivou detekci přítomnosti kódu v kolejnici mobilní částí VZ je minimální přípustná hodnota efektivního signálního proudu $I_{SIG} = 2\text{ A}_{RMS}$. Velikost signálního proudu, který přijímá pohybující se vozidlo tedy roste přibližně od hodnoty $I_{SIG} = 2\text{ A}_{RMS}$ s klesající vzdáleností k vysílací straně po $I_{SIG} = 22\text{ A}_{RMS}$.

Snímače kódu jsou na vozidle montovány do takové vzdálenosti od temena kolejnice, aby se na každém snímači při průchodu nejvyššího efektivního proudu kolejnicí $I = 22\text{ A}_{RMS}$ indukovalo efektivní napětí $U_I = 5\text{ V}_{RMS}$.

Těchto výsledků bylo dosaženo dlouhým experimentálním měřením a zohledněním všech možných nežádoucích vlivů během přenosu kódu liniovým systémem. Dolní hrana snímače se u systému typu LS nachází 219 mm nad temenem kolejnice. [5]

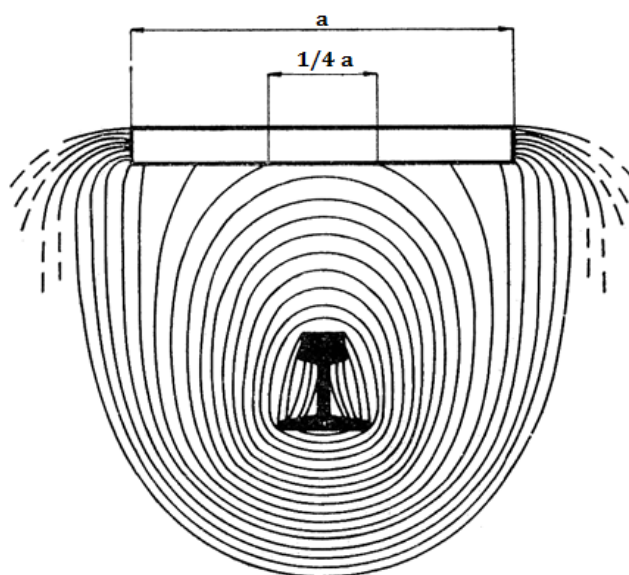
Tab. 1 – Závislosti proudu kolejnicí na indukovaném napětí na snímače kódu [5]

Dělení podle výšky snímače nad temenem kolejnice					
l = 170 mm		l = 220 mm		l = 270 mm	
I_{SIG}	U_I	I_{SIG}	U_I	I_{SIG}	U_I
[A _{RMS}]	[V _{RMS}]	[A _{RMS}]	[V _{RMS}]	[A _{RMS}]	[V _{RMS}]
0	0	0	0	0	0
2	0,5	2	0,45	2	0,4
6	1,3	6	1,15	6	1
10	2,1	10	1,9	10	1,6
14	3	14	2,7	14	2,3
18	4	18	3,8	18	3
22	5,2	22	5	22	3,9



Obr. 2 - Závislosti proudu kolejnicí na napětí snímače kódu při různé výšce na koleji [5]

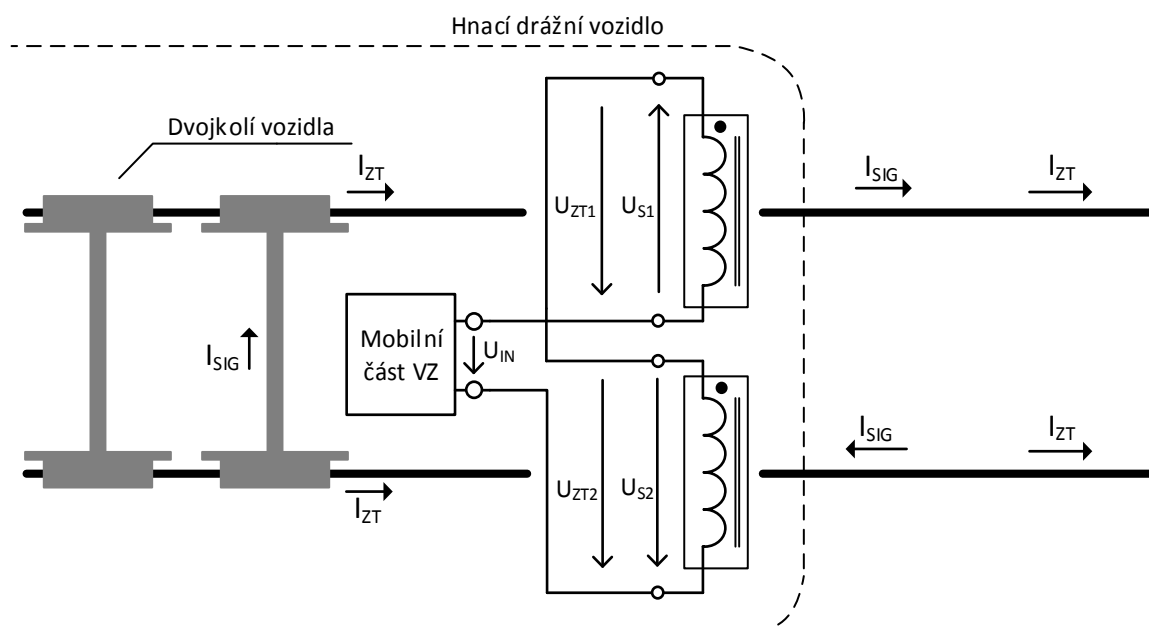
Faradayův zákon říká, že změnou magnetického pole v okolí cívky se bude v cívce indukovat elektrické napětí a v uzavřeném obvodu bude procházet indukovaný proud. Směr proudu je závislý na směru změny magnetického pole a na orientaci pólů magnetu vůči cívce. Na snímači kódu se indukuje napětí orientované v závislosti na směru siločar magnetického pole vyvolaného signálním proudem v kolejnici. Orientace indukovaného elektrického napětí na snímací cívce je shodná se směrem siločar magnetického pole v okolí kolejnice. [7]



Obr. 3 – Rozložení magnetického pole v okolí profilu kolejového pásu (kolejnice) [5]

K omezení nežádoucích účinků zpětného trakčního proudu a vzhledem k faktu, že proud v kolejnicích prochází vzájemně v opačném směru jsou snímače kódu zapojeny antisériově. Začátek vinutí cívky každého snímače je připojen na vstupní obvody mobilní části vlakového zabezpečovače. Jedná se o symetrický napěťový vstup. To znamená, že vlakový zabezpečovač vyhodnocuje rozdílové napětí mezi začátky vinutí snímačů (bez použití zemnicí svorky). [5]

V antisériovém zapojení snímacích cívek má okamžitá hodnota indukovaného napětí U_i úměrného signálnímu proudu I_{SIG} souhlasnou polaritu, vzhledem k opačné orientaci okamžitých hodnot signálního proudu I_{SIG} v kolejnicích jako zdrojích elektromagnetického pole. Nežádoucí účinek zpětných trakčních proudů je eliminován odečtením napětí U_{ZT} na dvou snímačích kódu, které si indukuje vlivem procházejícího trakčního proudu I_{ZT} v kolejových pásech v souhlasném směru.



Obr. 4 – Princip snímání kódu z kolejnice mobilní částí VZ

Funkční chování spočívá v kontrole bdělosti strojvedoucího na základně přijatého návěstního znaku od stacionární části VZ a na základně aktuální rychlosti vozidla v_{AKT} . Tento zabezpečovač nepodporuje přenos cílové rychlosti.

Popis funkčního chování mobilní části systému:

- Trvalá kontrola bdělosti na železniční trati nevybavenou vlakovým zabezpečovačem
- Kontrola bdělosti v pravidelných intervalech při přijetí kódu červená, žluté mezikruží při $v_{AKT} > 40 \text{ km.h}^{-1}$ a žlutá při $v_{AKT} > 120 \text{ km.h}^{-1}$
- Indikace přenášeného kódu na návěstním opakovači pomocí barevných LED diod
- Kontrola nejvyšší dovolené rychlosti vozidla v_{MAX} (konstrukční rychlost)
- Kontrola souladu směru jízdy vozidla s nastavením polohy ovládací páky pro volbu směru jízdy (při nesouladu – aktivace nouzového brždění)
- Potvrzení bdělosti je možné stiskem tlačítka bdělosti, pedálu bdělosti, obsluha ovládací prvků vozidla (snímání přes elektromechanický převodník)
- Stav aktivace nouzového brždění – odpojení napájecího napětí elektromagnetického ventilu, který se úplně otevírá a odpouští vzduch z hlavního brzdového potrubí soupravy (maximální brzdový účinek)
- Nouzové brždění aktivováno při nepotvrzení bdělosti (4 sek. od začátku akustické výstrahy) nebo nesouladu pohybu vozidla (výše uvedeno)
- Stav automatické výluky kontroly bdělosti vyžaduje splnění dvou podmínek – Tlaková a rychlostní podmínka (rychlost soupravy je $v_{AKT} < 10 \text{ km.h}^{-1}$ a tlak v hlavním brzdovém potrubí je alespoň $p = 1,5 \text{ bar}$ a vyšší). Tento stav je indikován rozsvícením modré LED diody (žárovky) na návěstním opakovači. [18]

1.3.1 Tvary signálů

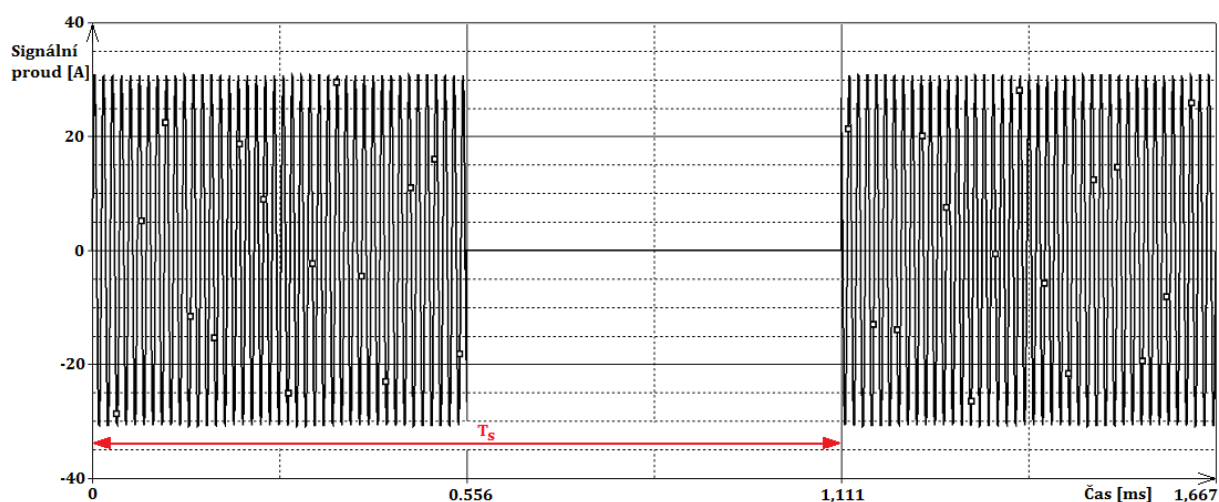
Kapitola 1.2.2 zmiňuje 4 přenášené informace pomocí liniového systému, které určitým způsobem odpovídají stavu světelného návěstidla. Mobilní část vlakového zabezpečovače přijatou informaci vyhodnotí pomocí vlastní logiky a vyhodnocený stav je zobrazen na stanovišti strojvedoucího. Přenášenými znaky (návěsti) jsou:

- Kód červené
- Kód zelené
- Kód žluté
- Kód žlutého mezikruží

Uvedené barevné znaky zobrazuje návěstní opakováč. Každému přenášenému znaku odpovídá tvar modulovaného signálu. Pro rozlišení informace je signál modulován s různou spínací frekvencí. Výsledkem je nízkofrekvenční modulovaný signál. [2]

Signál červené strojvedoucímu zakazuje pokračování v jízdě. Signálu červené odpovídá nejnižší přepínací frekvence $F_S = 0,9 \text{ Hz}$. U zastaralých kodérů s mechanickými ovládanými kontakty docházelo k poruše spínání ve smyslu zpoždění sepnutí. Toto řešení odpovídalo konceptu bezpečnosti. Více zakazující znak v případě poruchy nedovolí pokračování v jízdě.

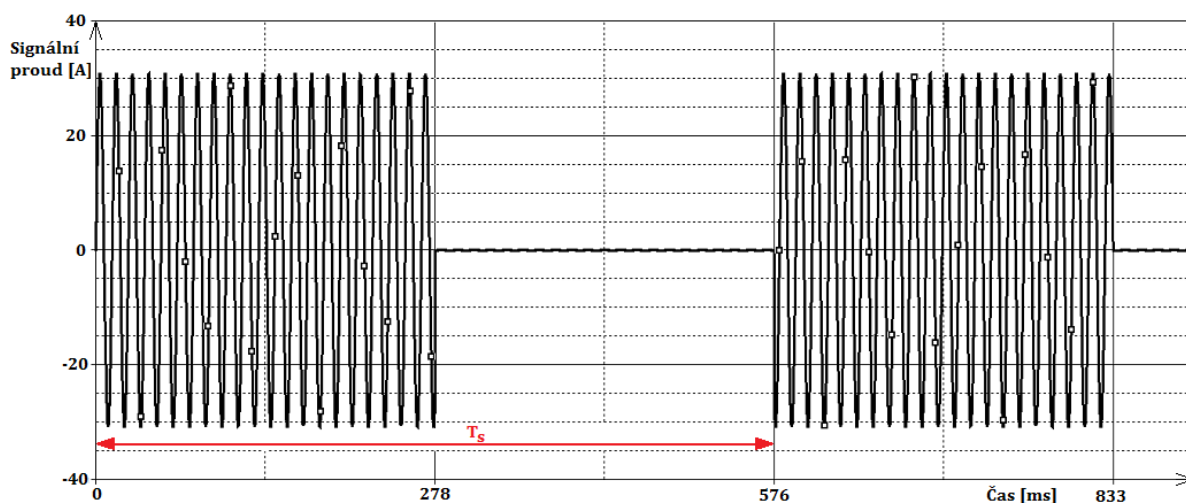
$$T_S = \frac{1}{F_S} = \frac{1}{0,9} = 1,111 \text{ s} \quad (1)$$



Obr. 5 – Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód červená

Signál žlutého mezikruží signalizuje návěst prikazující snížení rychlosti vozidla. Přepínací frekvence je rovna $F_S = 1,8 \text{ Hz}$.

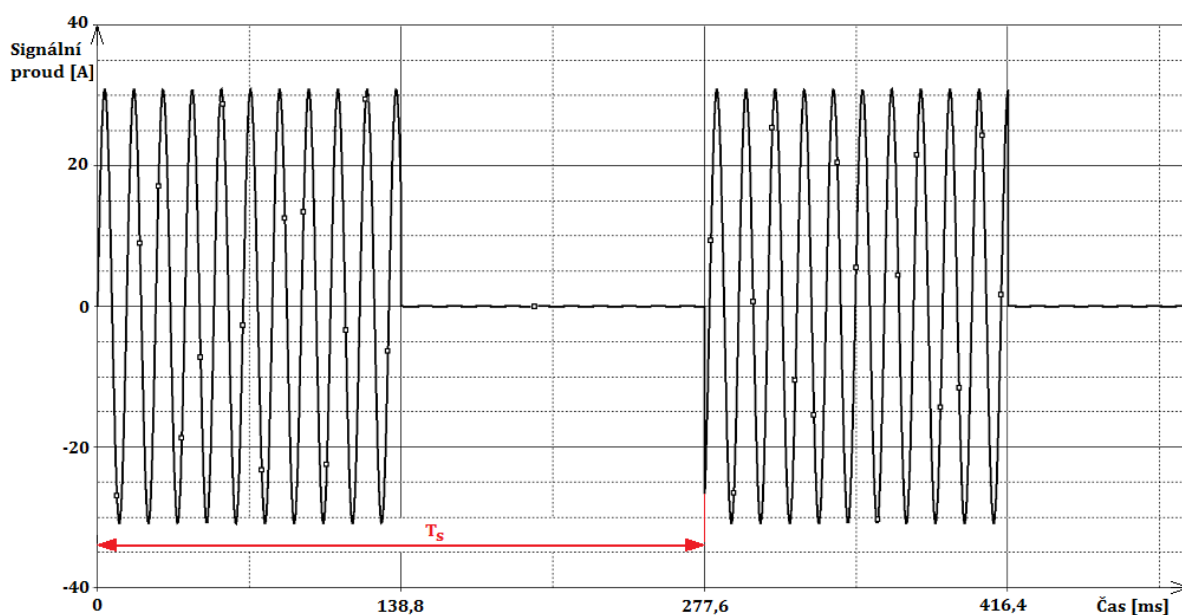
$$T_S = \frac{1}{F_S} = \frac{1}{1,8} = 555,55 \text{ ms} \quad (2)$$



Obr. 6 - Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód žluté mezikruží

Signál žluté upozorňuje na signál zakazující jízdu, a to na konci následujícího oddílu. Přepínací frekvence signálu je $F_S = 3,6 \text{ Hz}$:

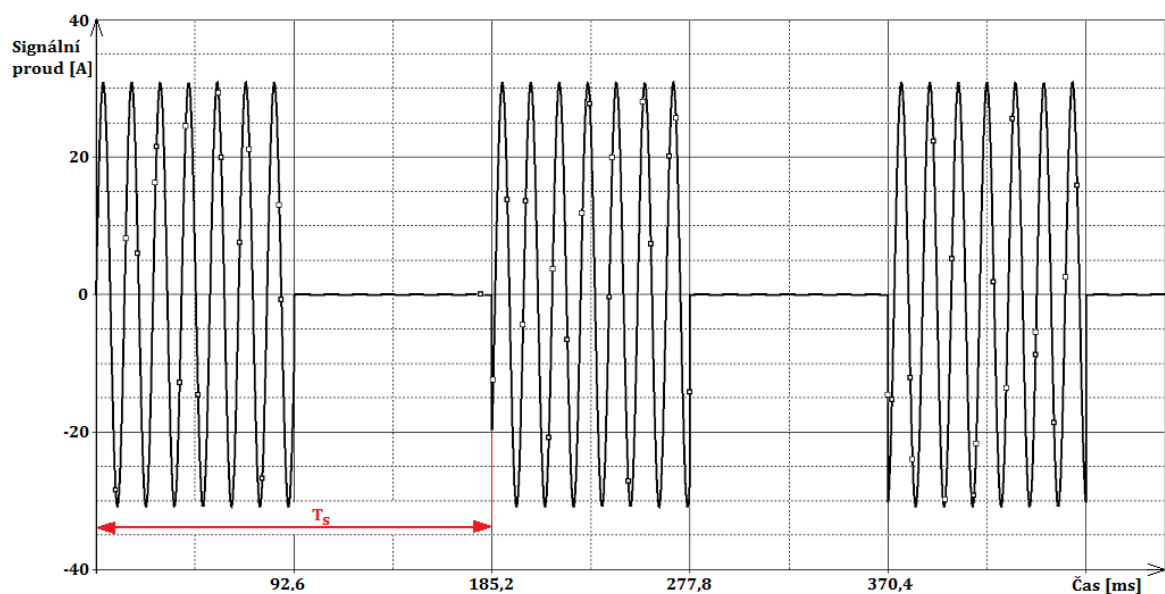
$$T_S = \frac{1}{F_S} = \frac{1}{3,6} = 277,77 \text{ ms} \quad (3)$$



Obr. 7 - Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód žlutá

Signál zelené dovoluje pokračování v jízdě a vlakový zabezpečovač v reakci na příjem tohoto kódu nevyžaduje potvrzování bdělosti při nepřekročení maximální provozní rychlosti hnacího drážního vozidla. Přepínací frekvence signálu je $F_S = 5,4 \text{ Hz}$:

$$T_S = \frac{1}{F_S} = \frac{1}{5,4} = 185,18 \text{ ms} \quad (4)$$



Obr. 8 – Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód zelená

Na uvedených amplitudově časových grafech jsou vyobrazeny tvary modulovaného signálního proudu. Signály jsou při modulaci impulzně spínány a rozepínány v daných čase, které vychází z požadované frekvence. Princip modulace lze vysvětlit na amplitudové modulaci s tím rozdílem, že nosná vlna sinusového tvaru je modulována modulačním signálem obdélníkového tvaru s přepínací frekvencí signálu (kódu) liniového systému. Pro správnou detekci na mobilní části vlakového zabezpečovače je požadována hodnota střídý tohoto obdélníkového signálu $DC = (50 \pm 16,66) \%$. Všechny uvedené časové závislosti zobrazují signály výsledné signály s frekvencí nosného signálu $f_N = 75 \text{ Hz}$. Shodným způsobem lze modulovat i ostatní používané signály nosné frekvence $f_N = 50 \text{ Hz}$ a $f_N = 275 \text{ Hz}$ (modulační signál zůstává nezměněn).

V následující tabulce *tab. 2* je uveden přehled signálů liniového vlakového zabezpečovače typu LS. Sekci signál je uvedena barva signalizovaná na stanovišti strojvedoucího pomocí LED diod na návěstním opakovací. Přepínací frekvence odpovídá frekvenci pulzního modulačního signálu na vysílací straně liniového systému. Veličiny f_s a T_s jsou přepínací frekvence a perioda, resp. frekvence (perioda) modulačního signálu ve vysílači.

Tab. 2 – Přehledová tabulka přenášených kódů vlakového zabezpečovače typu LS

Přehled signálů systému typu LS				
Kód / Signál	Signální proud	f_s	T_s	Význam
[barva]	[A _{RMS}]	[Hz]	[ms]	[-]
Červená	2 ÷ 22	0,9	1 111	Zákaz pokračování v jízdě
Žluté mezikruží	2 ÷ 22	1,8	555,55	Omezení na rychlostní soustavu návěstidla
Žlutá	2 ÷ 22	3,6	277,77	V následujícím oddílu vysílán kód červené
Zelená	2 ÷ 22	5,4	138,88	Dovolující znak, rychlost V_{MAX}

1.4 VLAKOVÝ ZABEZPEČOVAČ EVM

EVM120 (neboli Elektronikus vonatmegállító) je maďarský liniový vlakový zabezpečovač. Použití je omezeno maximální rychlostí drážního vozidla $v_{MAX} = 120 \text{ km.h}^{-1}$. Na železničních tratích bez přenosu liniového kódu slouží systém vlakového zabezpečovače jako kontrola bdělosti strojvedoucího. Mobilní část tohoto vlakového zabezpečovače je dodávána i pod označením EVM160 s rozšířením jeho použití do maximální rychlosti $v_{MAX} = 160 \text{ km/h}$. [9]

Stacionární část vlakového zabezpečovače EVM používá liniový systém se shodným principem funkce a přenosu elektrických signálů jako u liniového systému typu LS. Vysílací strana se skládá z elektronického kodéru, který generuje sled impulzů s proměnnou délkou impulzu a časové mezery mezi impulzy. Sled impulzů je v technologii přenosu označován jako **telegram**. Vygenerované impulzy spínají signál s nosnou frekvencí $f_N = 75 \text{ Hz}$ (na celé síti). [9]

Jedná se o liniový systém s dodatečným kódováním. Z hlediska funkčního chování to znamená, že kolejové obvody připojené k danému oddílu vysílají telegram pouze v případě obsazení tohoto oddílu soupravou (vlakem).

Délka oddílu průměrně 1800 m (v ČR a SR je průměrná délka oddílu 1200 m).

Informace obsažená ve vysílaném telegramu značí dovolenou rychlost, kterou se vlak může blížit ke světelnému návěstidlu. Tato rychlost znamená tzv. rychlostní příkaz a je interpretovaná mobilní částí vlakového zabezpečovače EVM jako cílová rychlost vlaku. Tato cílová rychlost je přenášena v několika stavech odpovídajících cílové rychlosti hnacího vozidla, přičemž jeden ze stavů je zaveden v případě poruchy.

Stacionární část vysílá informaci zapsanou v telegramu, která umožňuje signalizovat uvedené cílové rychlosti hnacího vozidla:

- Telegram 0 – Cílová rychlost 15 km/h (po dovoleném projetí návěsti zakazující jízdu)
- Telegram 1 – Cílová rychlost 15 km/h
- Telegram 2 – Cílová rychlost 40 km/h
- Telegram 3 – Cílová rychlost 80 km/h
- Telegram 4 – Cílová rychlost = konstrukční rychlost V_{MAX}
- Telegram 4* – Cílová rychlost 120 km.h^{-1}
- Telegram X / Spojitý signál – Signalizace poruchy zabezpečovacího zařízení

Vozidla s konstrukční rychlostí do $v_{MAX} = 120 \text{ km/h}$ mají konfiguraci mobilní části na verzi EVM120 a telegram 4 a telegram 4* vyhodnocuje jako stejnou cílovou rychlost, a to v_{MAX} .

Cílová rychlost 120 km.h^{-1} je tedy reprezentována telegramem 4*, jako další možná cílová rychlost pro vozidla s vyšší konstrukční rychlostí než $v = 120 \text{ km.h}^{-1}$.

Telegramu 0 odpovídá stav, kdy vozidlo opouští předchozí oddíl s přenosem telegramu 1 a následným vjetím do mezilehlého nekódovaného úseku s maximální rychlostí $v = 15 \text{ km.h}^{-1}$. V žádných jiných případech není telegram 0 vysílán. [8]

Mobilní část vlakového zabezpečovače se skládá z návěstního opakováče, snímače kódu liniového systému, pedálu bdělosti a z elektronického zařízení skříně zásuvných modulů, které jako celek vykonávají všechny požadované operace vycházející z funkčního chování.

Funkcí mobilní části vlakového zabezpečovače EVM je podobně jako u systémů typu LS přijmout kód (telegram) ze stacionární části vlakového zabezpečovače a vyhodnotit cílovou rychlost s následným zobrazením na návěstním opakováči na stanovišti strojvedoucího.

Funkční chování vlakového zabezpečovače spočívá v porovnání aktuální rychlosti a cílové rychlosti dle přijatého telegramu s následným vyhodnocením stavu a kontrole bdělosti strojvedoucího během jízdy hnacího vozidla.

Popis funkčního chování (základní body):

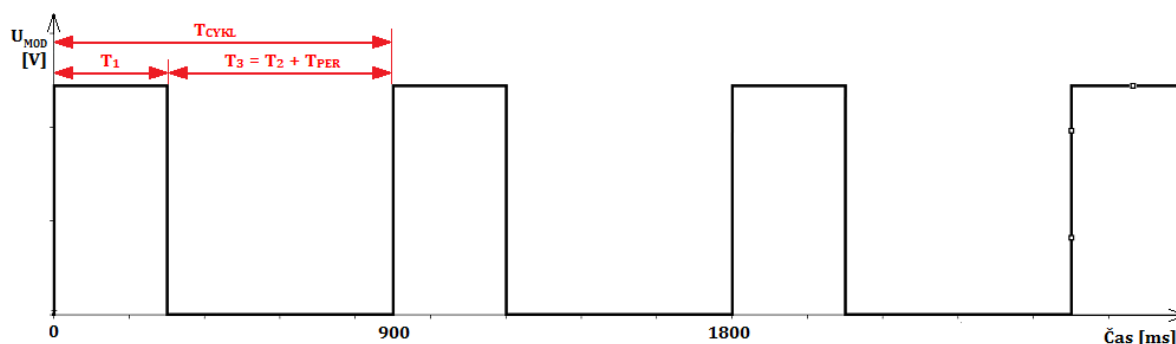
- V případě rychlosti HV vyšší, než je rychlost cílová se v časových intervalech úměrných aktuální rychlosti kontroluje bdělost formou akustické výstrahy na následným stiskem tlačítka/pedálu bdělosti. Potvrzení bdělosti lze provést i formou stisku tlačítka elektrické houkačky vozidla.
- Zobrazení cílové rychlosti na návěstním světelném opakováči, na maticovém displeji návěstního opakováče nebo na LCD displeji zabudovaném na stanovišti strojvedoucího.
- V případě příjmu nižší cílové rychlosti, než je rychlost aktuální je nutno po určité dráze snížit rychlost HV pod hodnotu cílové rychlosti nebo alespoň aktivovat brždění soupravy formou snížení tlaku v hlavním brzdovém potrubí pod hodnotu $p = 4,5 \text{ bar}$. V případě nesplnění uvedené podmínky vlakový zabezpečovač automaticky aktivuje nouzové brždění soupravy
- Kontrola bdělosti probíhá nepřetržitě při rychlosti vozidla vyšší než $v_{AKT} = 15 \text{ km.h}^{-1}$ ve dvou režimech. V prvním režimu probíhá kontrola bdělosti v dráhovém intervalu 1550 m pouze v případě nevyžadujícím snížení rychlosti na základě přijímaného telegramu. Druhý režim nastává při požadavku na snížení rychlosti hnacího vozidla a kontrola bdělosti vyžadována v dráhových intervalech 200 m.
- Kontrola nesouladu vzad, resp. nesoulad pohybu vozidla s nastavením směrové páky na aktivním stanovišti strojvedoucího, při porušení souladu je opět aktivováno nouzové brždění soupravy

1.5 Elektrické veličiny a signály v systému EVM

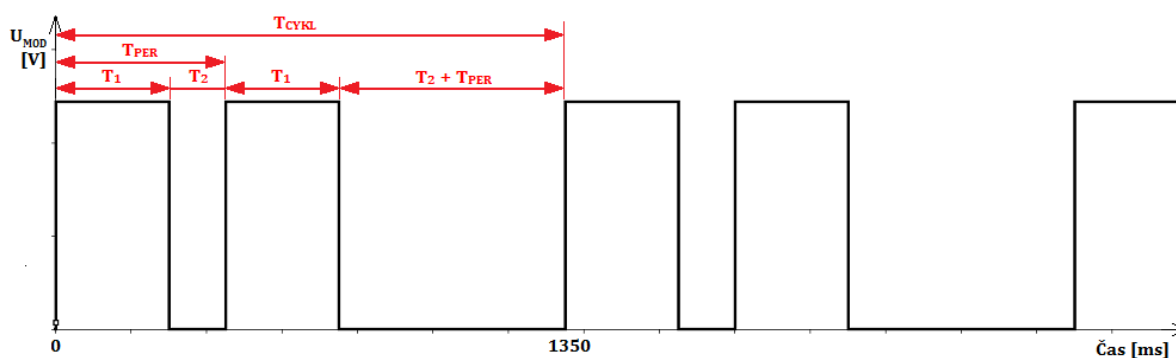
Tvar elektrických signálů vychází z přenosu ve stacionární části v kolejových páslech formou signálního proudu. Ve vysílací části dochází k modulaci střídavého sinusového signálu o frekvenci $f_N = 75 \text{ Hz}$. Signál je cyklicky modulován impulzním signálem (telegramem), který je tvořen sledem impulzů. Ve stacionární části vlakového zabezpečovače EVM se používá několik typů vysílacích stran (resp. vysílačů kódu ve vysílací straně kolejového obvodu), které se odlišují ve vlastnostech vysílaných (generovaných) signálů (telegramů). Označení různých typů vysílačů vychází z vlastností generovaných signálů, resp. z časové délky generovaného impulsu modulačního signálu a časová délka mezery mezi impulzy modulačního signálu. Vysílače jsou označovány ve formátu t_1/t_2 např. 260/130, 300/150, přičemž t_1 je doba trvání impulsu a t_2 je doba trvání mezery mezi impulzy. Rozdíly v parametrech generovaných elektrických signálů jsou blíže specifikovány v přehledové tabulce Tab. 3 (viz níže).

1.5.1 Modulační signály

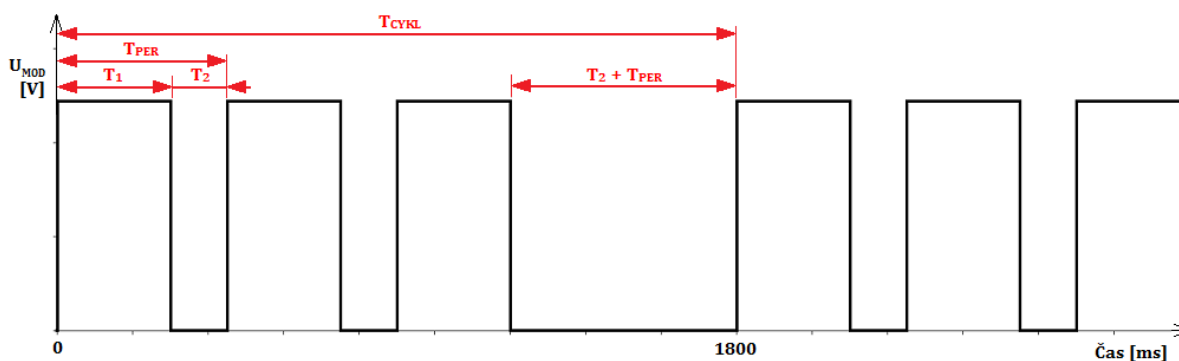
Modulační signály U_{MOD} jsou signály obdélníkového tvaru, které jsou generovány v elektronickém bloku modulace vysílací strany (kolejových obvodů). Modulují harmonický signál nosné frekvence $f_N = 75 \text{ Hz}$. Uvedené časové závislosti signálů časově odpovídají modulačnímu signálu vysílače označení **300/150**. Modulační signály jiných vysílacích stran jsou tvarově shodné s uvedenými, avšak liší se hodnotami uvedených časových parametrů. [8]



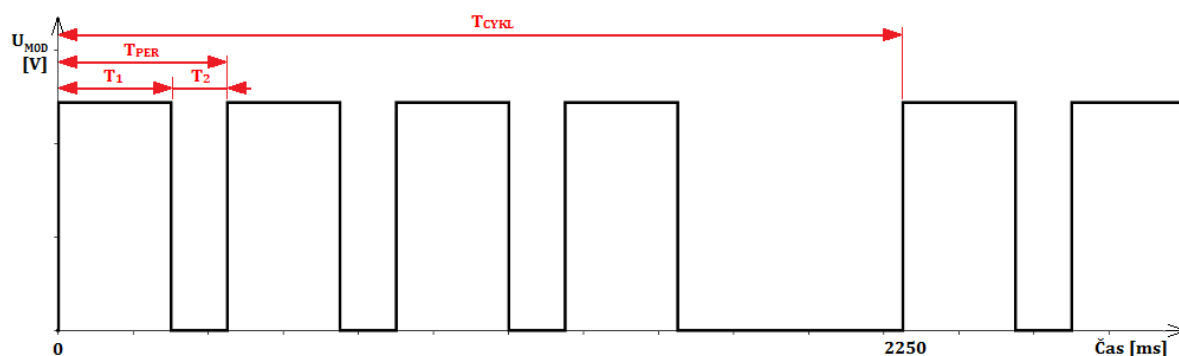
Obr. 9 – Časová závislost modulačního signálu telegramu 1



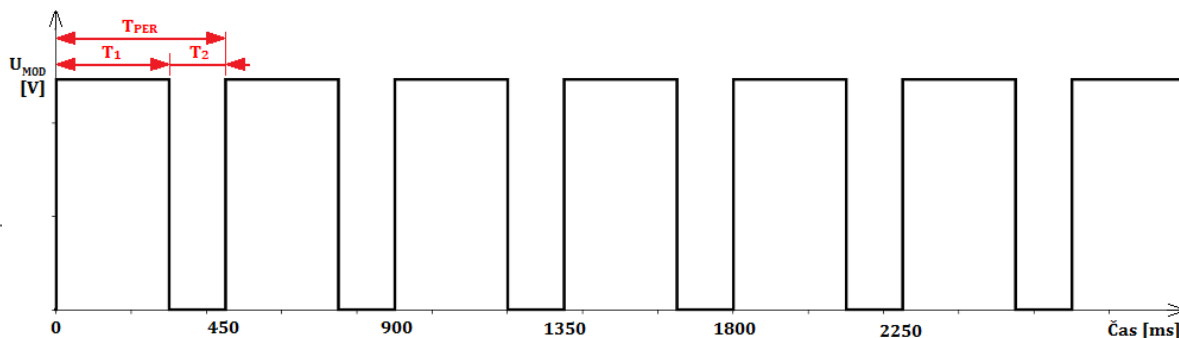
Obr. 10 – Časová závislost modulačního signálu telegramu 2



Obr. 11 - Časová závislost modulačního signálu telegramu 3



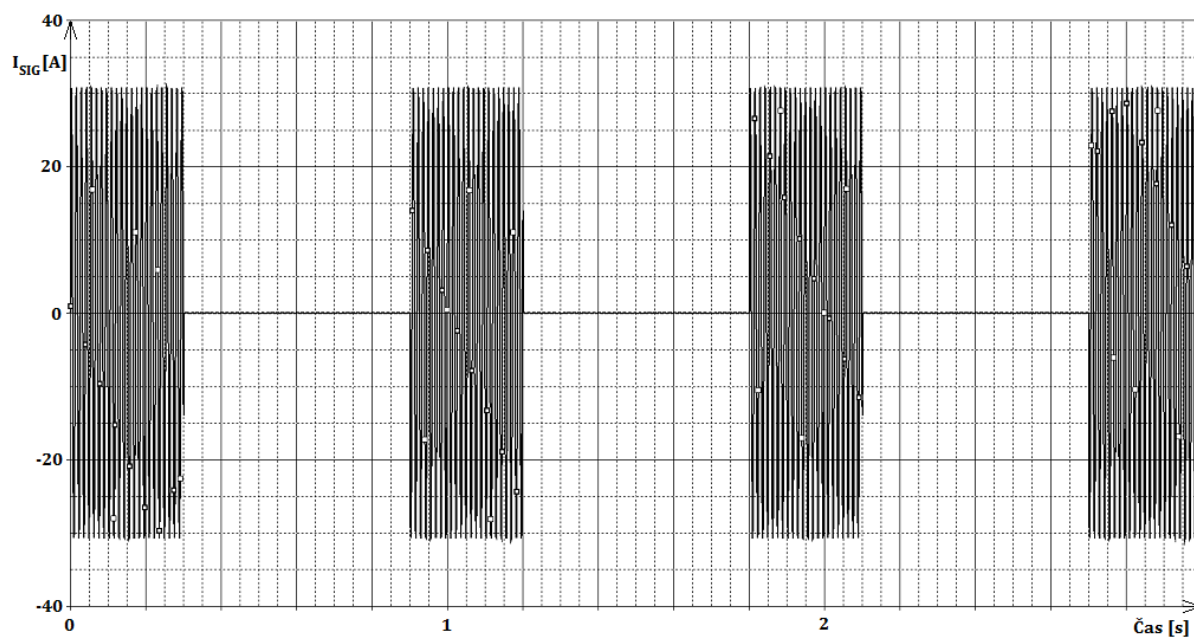
Obr. 12 - Časová závislost modulačního signálu telegramu 4 (nebo 4*)



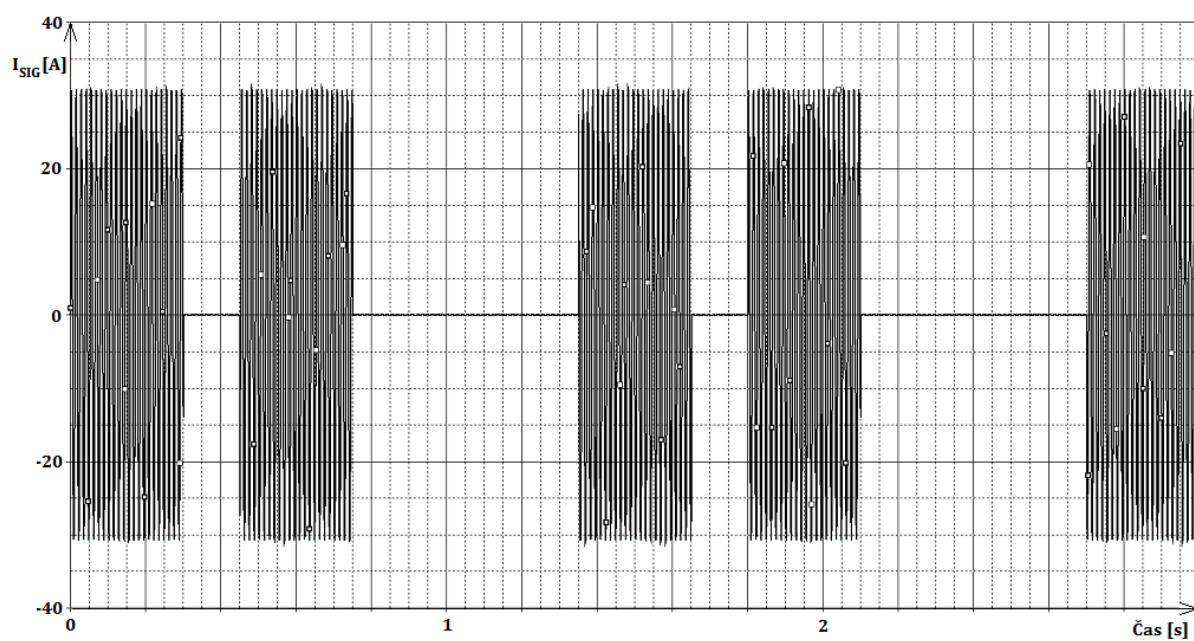
Obr. 13 – Časová závislost modulačního signálu telegramu X

1.5.2 Modulované signály

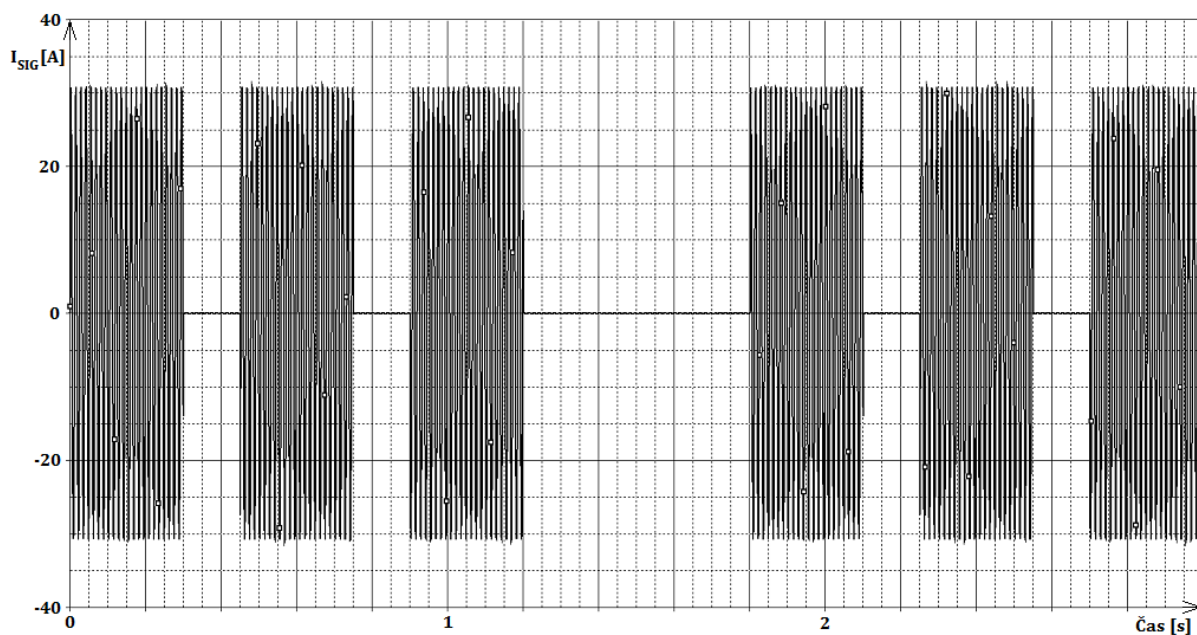
Jsou výsledné signály na výstupné bráně vysílací strany (kolejového obvodu). Charakter signálu lze popsat jako v určených časech spínaný a rozepínaný harmonický signál, přičemž smysl spínání v časovém cyklu se s určitou periodou souvisle opakuje. Následující časové závislosti představují výstupní signály vysílací strany s označením **300/150** a efektivní hodnota signálních proudů, resp. efektivní hodnota harmonického signálu v čase sepnuto je maximální možná, a to $I_{SIG} = 22 A_{RMS}$. Minimální přípustná hranice efektivní hodnoty tohoto proudu v kolejovém obvodu (oddílu) je $I_{SIG(min)} = 1,5 A_{RMS}$ (nejvzdálenější bod od vysílací strany).



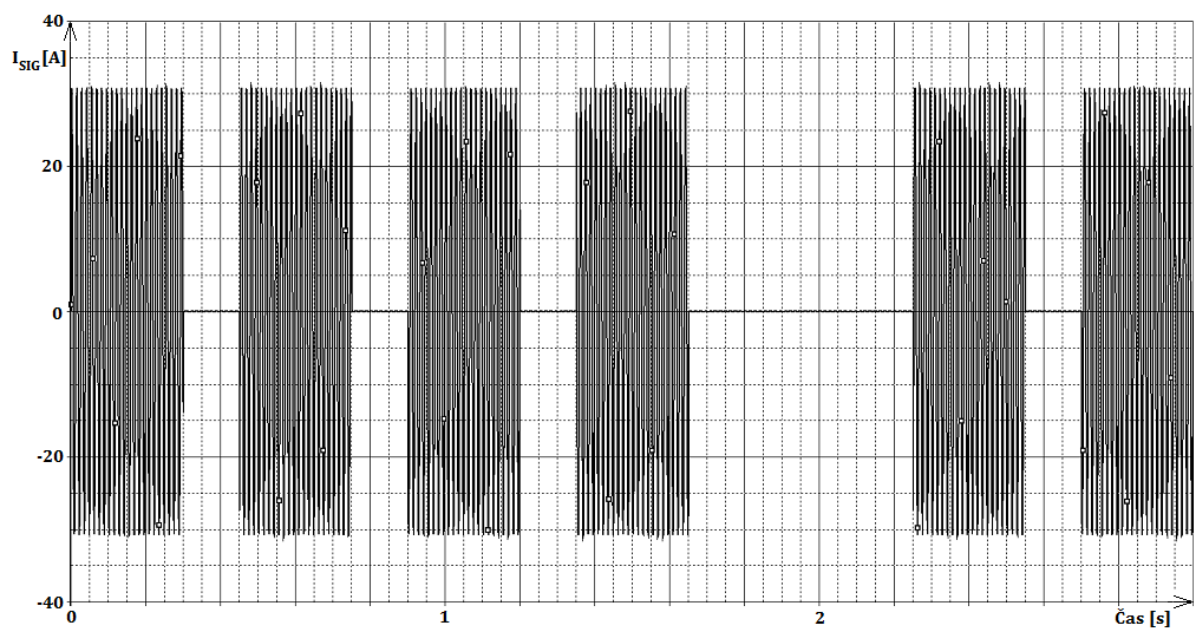
Obr. 14 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 1



Obr. 15 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 2

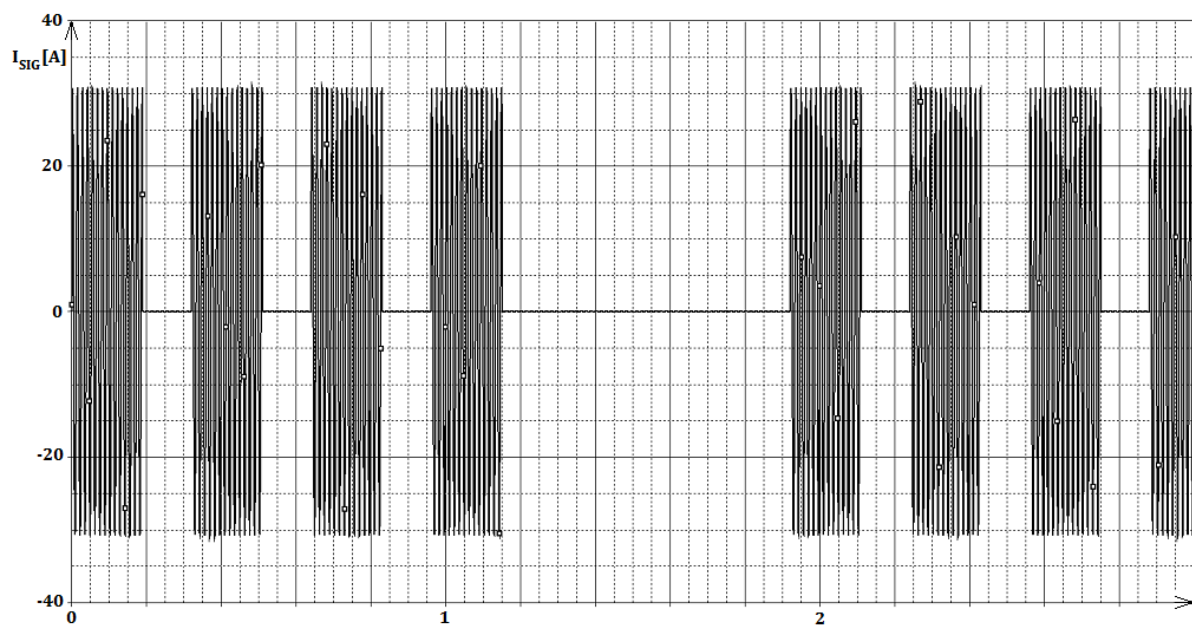


Obr. 16 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 3



Obr. 17 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 4

V případech rozšířené verze vlakového zabezpečovače na verzi EVM160 se používá na vysílací straně speciální vysílací kolejový obvod s výstupním signálem – telegram 4*, které signalizuje cílovou rychlost $v = 120 \text{ km.h}^{-1}$. Časový průběh signálu telegramu 4* je vyobrazen na obr. 18.



Obr. 18 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 4*

Tab. 3 – Přehledová tabulka přenášených telegramů vlakového zabezpečovače EVM

Typ vysílací strany		Telegram	T_{PER}	T_{CYKL}
T_1	T_2			
[ms]	[ms]	[označení]	[ms]	[ms]
260	130	1	390	780
		2	390	1170
		3	390	1560
		4	390	1950
300	150	1	450	900
		2	450	1350
		3	450	1800
		4	450	2250
320	165	2	485	1455
		4	485	2425
360	180	1	540	1080
		3	540	2160
190	130	4*	320	1920

2 ODOMETRIE DRÁŽNÍCH VOZIDEL

Princip odometrie spočívá ve snímání otáček soukolí kolového dopravního prostředku s daným průměrem soukolí. K sestavení funkčního systému odometrie na drážním vozidle se využívá zařízení pro detekci rychlosti vozidla a elektronického zařízení pro vyhodnocení, příp. archivaci apod. [11]

Detekčním zařízením je elektronický snímač otáček, který se otáčí se soukolím hnacího vozidla a na jeho výstupu se generují elektrické signály daným způsobem odpovídající (závislé) na rychlosti vozidla.

Zařízení pro vyhodnocení stavu rychlosti musí být navrženo s algoritmem detekce rychlosti k výstupnímu signálu daného snímače otáček (případně více snímačů otáček s podobnými elektrickými a fyzikálními parametry).

2.1 Registrační rychloměr

Hnací vozidla jsou obvykle vybavována zařízením využívající principu odometru. Podmínka o nutnosti vybavení závisí na typu vozidla a využití. Blíže je specifikováno ve vyhlášce č. 173/1995 Sb. Ministerstva dopravy, přílohy č. 3 – Požadavky na drážní vozidla, část 1. – Drážní vozidla dráhy celostátní, regionální a vlečky. Z uvedené vyhlášky vychází tvrzení, že každé hnací vozidlo, řídící vůz a speciální hnací vozidlo s rychlostí vyšší než 40 km.h⁻¹ musí být vybaveno mimo jiné také registračním rychloměrem. [16]

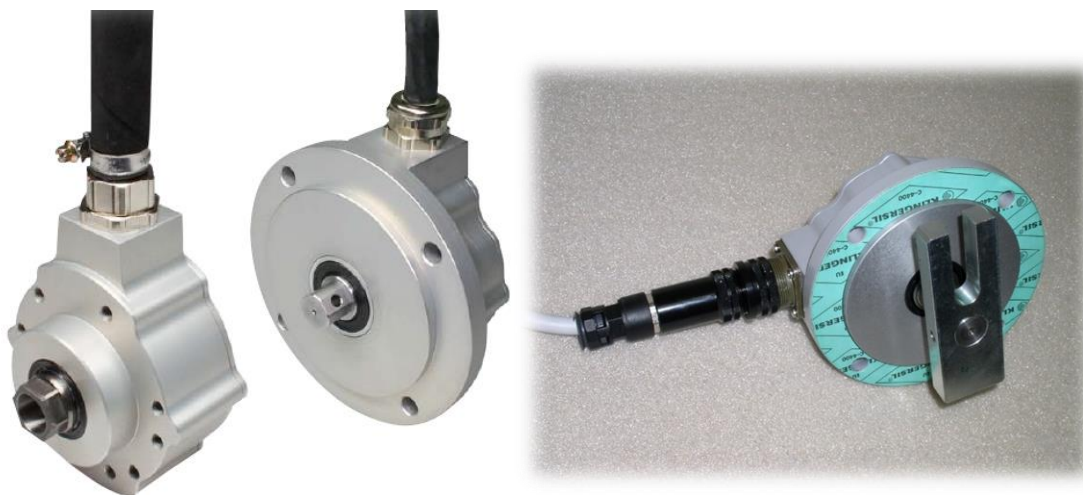
Registrační rychloměr, resp. systém elektronického rychloměru je zařízení pro zobrazování aktuální rychlosti hnacího vozidla (příp. vozidla vybaveného stanovištěm strojvedoucího) a především archivaci dat o ujeté dráze vozidla, která probíhá v krátkých časových intervalech nepřetržitě během jízdy vozidla, a to formou zápisu dat o aktuálním stavu do paměťového modulu typu FLASH. Zobrazovacím zařízením je zadávací modul s displejem a ručkovým ukazatelem rychlosti nebo displej integrovaný na stanovišti strojvedoucího s hardwarovým a softwarovým vybavením pro sériovou digitální komunikaci mezi zobrazovačem a systémem elektronického rychloměru. [16]

Systém elektronického rychloměru je také vybaven digitálními výstupy sériových sběrnic RS422/RS485 a sběrnice CAN pro komunikaci se zabezpečovací nebo jinou další technikou, kterou je vozidlo vybaveno. Digitální informace na výstupu sběrnic elektronického rychloměru, resp. celý systém elektronického rychloměru ve většině případů vyhovuje úrovni integrity bezpečnosti II. dle IEC 61508. [10] [16]

2.2 Snímač otáček

Snímač otáček je samostatně vyráběné zařízení dodávané od mnoha výrobců. Jedná se o zařízení pro venkovní použití s vysokým stupněm krytí a odolnosti proti teplu a vlhkosti, které je montováno na osu soukolí hnacího vozidla.

Snímače otáček jsou konstruovány na základě několika možných principů funkce. Nejčastěji se jedná v podstatě o snímání úhlové rychlosti při rotaci vnitřního mechanického dílu, který se otáčí s osou soukolí při pohybu vozidla. Rychlost otáčení je elektricky vzorkovaná a parametry elektrických signálů jsou přímo úměrné rychlosti vozidla.



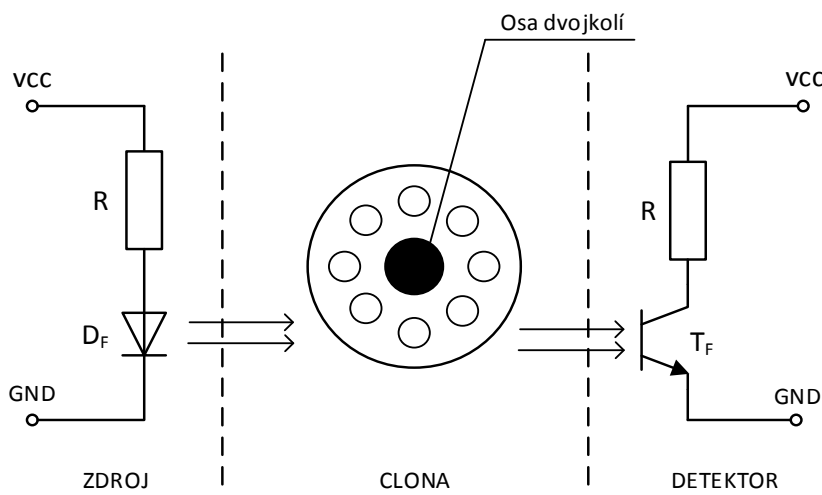
Obr. 19 – Snímače otáček pro drážní vozidla GEL 27xx [12]

Snímače otáček jsou standardně použity na více nápravách hnacích drážních vozidel. Jsou vybaveny několika elektrickými výstupy s různými konfiguracemi, které odpovídají různými použitím – např. pro rychloměr, pro vlakový zabezpečovač, pro stanovení směru pohybu vozidla nebo jako protismykový snímač otáček.

Principy konstrukce snímačů otáček lze rozdělit dle 4 fyzikálně-mechanických principů:

a) Optický

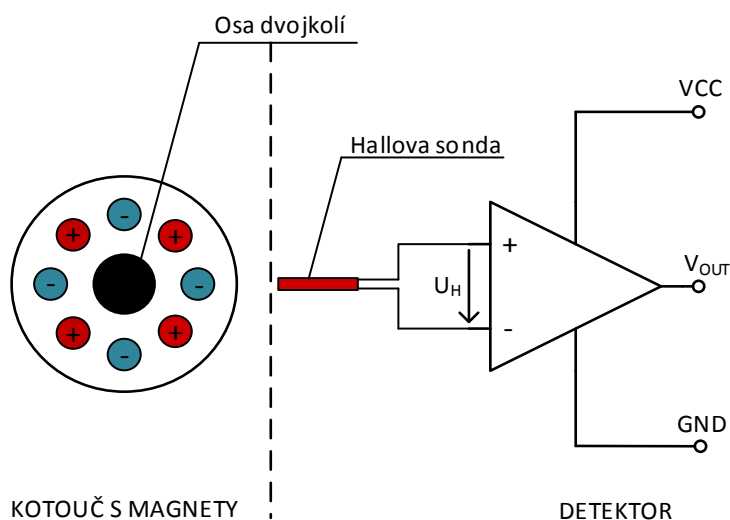
Uvnitř zařízení je v horizontální rovině pevně umístěny optický zdroj (laserová dioda) a optický detektor (fototranzistor). Mezi komponenty se nachází pohyblivá kruhová clona, která se otáčí s osou nápravy vozidla. Kruhová clona má známý počet otvorů na jednu otáčku soukolí. Při pohybu vozidla otvory impulzně prochází optický signál od zdroje k detektoru.



Obr. 20 – Optický princip snímání otáček

b) Magnetický s halovou sondou

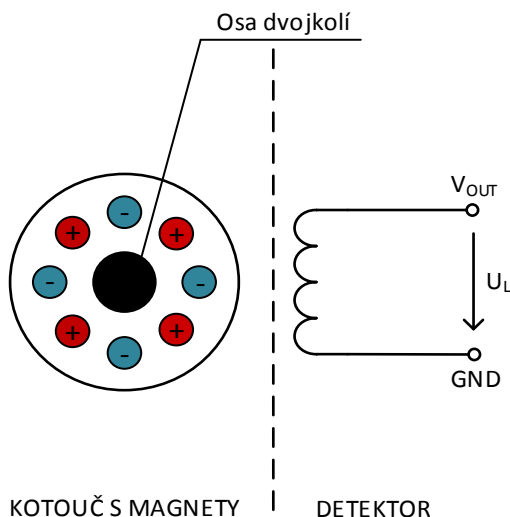
Na ose otáčení v celé délce kružnice jsou umístěny magnety střídavé polarity. V blízkosti je umístěna Hallova sonda. Při otáčení osy soukolí se okolo Hallové sondy pohybuje střídavě kladný a záporný pól magnetu a na Hallovu sondu působí střídavě magnetická síla a indukují se na ní kladné a záporné pulzy Hallova napětí. V celé ose odpovídající 1 otáčce je známý počet magnetů. Frekvence napěťových pulzů udává rychlost pohybu, jelikož je přímo úměrná úhlové rychlosti otáčení modulu s magnety.



Obr. 21 - Magnetický princip snímání otáček

c) Indukční

Princip snímání se podobá magnetickému s Halovou sondou s rozdílem použití cívky jako senzoru místo Halovy sondy. Při otáčení osy soukolí se pohybují magnety střídavé polarity okolo snímací cívky a velikost indukovaného napětí na cívce je přímo úměrné úhlové rychlosti otáčení modulu s magnety. Při vyšší rychlosti roste střední hodnota magnetického toku Φ_L za jednotku času t a zvyšuje se střední hodnota indukovaného napětí na cívce.



Obr. 22 – Indukční princip snímání otáček

d) Princip tachogenerátoru

Tachogenerátor je zařízení k převodu velikosti otáček na elektrické veličiny. Skládá se z rotoru a statoru. Na pohyblivé části, tedy rotoru se nachází permanentní magnet a statickou částí je 3 fázové vinutí okolo rotoru. Na 3 fázovém výstupu se generují střídavé signály dané velikosti a fázového posuvu v závislosti na rychlosti a směru pohybu vozidla.

2.3 Snímače otáček a elektrické parametry

Snímače otáček pracují ve většině případů na principech popsaných výše v kap. 2.2. Mimo detekční část je většina snímačů vybavena navíc vlastní logikou, která pracuje s informací vyhodnocenou detektorem, obvody pro tvarovou úpravu signálů a zesilovací stupně aj. Z hlediska napájení je snímač otáček pasivním prvkem (nevybaven vlastním akumulátorem nebo napájecím zdrojem) a vyžaduje přívod požadovaného externího stejnosměrného napájecího napětí (např. z palubní baterie drážního vozidla).

2.3.1 Snímač otáček GEL 2710

Je to vícekanálový snímač otáček navržený speciálně na základě požadavků z oblasti odometrie v kolejové dopravě od výrobce Lenord Bauer. Výrobce zařízení umožňuje dodání ve 3 různých verzích, které se odlišují parametrem – počet pulzů výstupního elektrického signálu vztažený k 1 otáčce pohyblivé části zařízení spojené s osou soukolí vozidla. Výrobce dodává snímače také ve variantě s 8 výstupními kanály, přičemž u každé výstupní brány (u každého kanálu) lze zvolit parametr (z dostupných hodnot) – počet pulzů na otáčku. [13]

Výstupní signály snímačů otáček z pohledu tvaru obdélníkové pulzy a z pohledu typu digitální signály dvou možných úrovní HIGH a LOW. Obdélníkové signály jsou generovány s frekvencí pulzů úměrou rychlosti pohybu hnacího drážního vozidla. Signály je možné generovat do rychlosti odpovídající frekvenci výstupních pulzů cca $f_{out} = 20 \text{ kHz}$. Při vyšší frekvenci značně klesá možnost vyhodnocení informace vlivem indukce velmi malého napětí na principově magnetické snímací části. [13]

V konfiguraci 4 kanálový výstup je vzájemný fázový posuv signálů $\varphi_{out} = 90^\circ \pm 45^\circ$. V konfiguraci 8–kanálového výstupu je fázový posuv mezi signály sousedních kanálů stejný $\varphi_{out} = 90^\circ \pm 45^\circ$. Střída výstupních pulzů je $DC = 50 \%$ s možnou odchylkou $\pm 10 \%$.

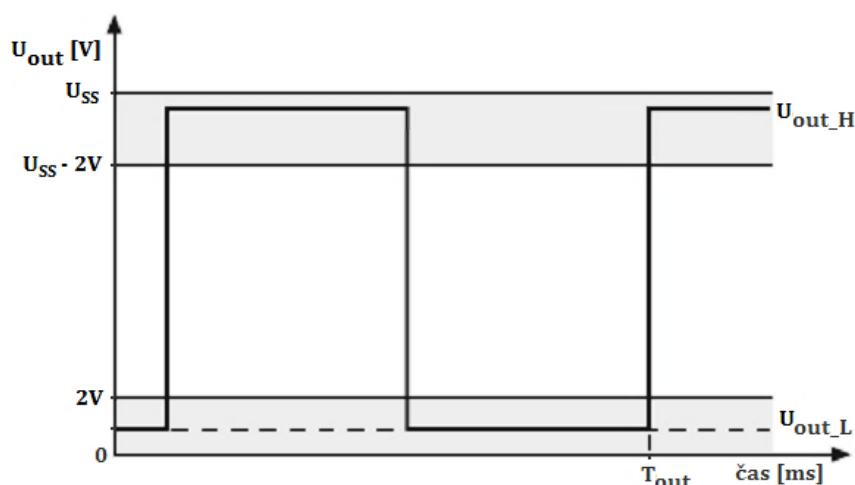
Tab. 4 – Základné elektrické parametry snímače otáček GEL 27xx [13]

Všeobecné				
Parametr	Označení	Hodnota		
		Min.	Standart	Max.
Počet kanálů	n	1	4	8
Vzájemný Fázový posuv	φ_{out}	45°	90°	135°
Střída	DC	40 %	50 %	60 %
Počet pulzů / otáčka	PPNO	12, 55, 80, 100, 110,200		
Napěťový výstup				
Napájecí napětí	U _{SS}	10 V _{DC}	24 V _{DC}	30 V _{DC}
Proudová spotřeba /kanál	I _{SSch}	-	25 mA	30 mA
Výstupní frekvence	f _o	0	-	20 kHz
Výstupní proud	I _{out}	0	-	16 mA
Úroveň signálu HIGH	U _{out_H}	-	U _{SS} – 2 V	-
Úroveň signálu LOW	U _{out_L}	-	< 2 V	-
Proudový výstup				
Napájecí napětí	U _{SS}	12 V _{DC}	-	16 V _{DC}
Úbytek napětí	U _{DROP}	4 V	-	U _{SS}
Výstupní frekvence	f _{out}	0	-	20 kHz
Úroveň signálu HIGH	I _{out_H}	12 mA	14 mA	16 mA
Úroveň signálu LOW	I _{out_L}	5,9 mA	7 mA	8,4 mA

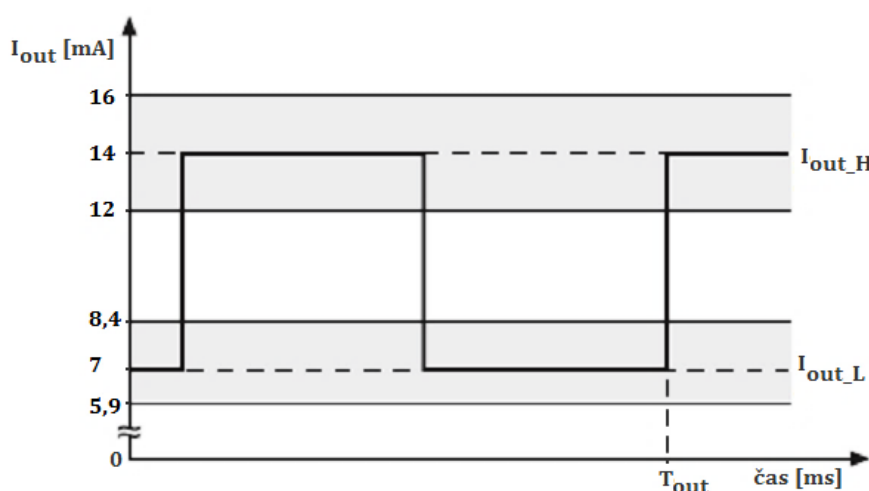
Snímací část je principově založena na magnetické principu s Hallovoú sondou, avšak místo Hallovy sondy je použita snímací cívka. Otáčky pohyblivé snímací části jsou úměrné frekvenci výstupního signálu. Každý snímač otáček je možné dodat v konfiguraci:

- 8 Kanálů – Proudové výstupy
- 8 Kanálů – Napěťové výstupy
- Hybridní – Libovolná kombinace napěťových i proudových výstupů (max. počet kanálů 8 zůstává zachován)

Časové průběhy výstupních signálů pro proudový nebo napěťový výstup a jejich meze definují blíže také *obr. 23* a *obr. 24*. V časových průbězích je naznačen průběh pouze jednoho kanálu. Při pohybu vpřed je následující kanál vůči zobrazenému kanálu generován se stejným tvarem a fázovým posuvem $\varphi_{out} = 90^\circ$ (standardně). Při pohybu v opačném směru dochází také k rotaci pohyblivé mechanické části s magnety v opačném směru a signály jsou generovány se vzájemným fázovým posuvem $\varphi_{out} = -90^\circ$ (standardně).



Obr. 23 – Časová závislost průběhu výstupního napětí (1 kanál) [13]



Obr. 24 – Časová závislost průběhu výstupního proudu (1 kanál) [13]

3 SHRUTÍ POŽADAVKŮ NA NÁVRH

Cílem projektu je navrhnout přenosný přístroj (zařízení) pro generování signálů z oblasti vlakové zabezpečovací techniky. Při návrhu zařízení se bude postupovat na základě vypsání požadavků na návrh a konstrukci uvedeného přenosného přístroje. Bližší specifikace jsou k nalezení ve shrnutí požadavků viz kap. 3.1.

Zařízení je určeno pro periodické přezkoušení správné činnosti mobilní části vlakového zabezpečovače na hnacích vozidlech nebo vozidlech vybavených stanovištěm strojvedoucího. V provozních podmínkách bude zařízení vystaveno venkovním klimatickým podmínkám, se zařízením bude manipulováno v prostorech dílen a opraven a obsluhou zařízení bude obvykle zaměstnanec příslušného depa kolejových vozidel s odborným školením v oblasti vlakové zabezpečovací techniky.

Pro komfortní obsluhu je navrženo ovládání ve formě LCD displeje se zobrazením aktuálních nastavených parametrů a 12 ovládacími tlačítky v konfiguraci standardní numerické klávesnice s tlačítkem pro krok vpřed a krok vzad s tlačítkem pro desetinnou čárku navíc. Způsob návrhu umísťuje výstupní konektory zařízení do čelního panelu zařízení, tedy do blízkosti ovládací části. Společně se zařízením bude dodávána také příslušná kabeláž k elektrickým výstupům.

3.1 Shrnutí požadavků

Na základě funkce mobilní části vlakového zabezpečovače na síti SŽDC, ŽSR a MÁV je vyhodnocen způsob návrhu přenosného přístroje určeného pro testování správné funkce vlakového zabezpečovače s následujícími požadavky:

- Napájení z vlastního akumulátoru po dobu minimálně 8 hodin při maximálním výkonovém zatížení zařízení (resp. při maximální proudové odběru systému),
- Nabíjení akumulátoru z vhodně zvoleného externího AC/DC adaptéru,
- Vybavení znakovým displejem typu OLED nebo LCD s vestavěnou znakovou sadou vhodnou pro zobrazení diakritiky především v českém jazyce,
- 4 kanálový digitální výstup signálů odometrie s nastavitelnou frekvencí signálů v rozsahu $f = 1 \text{ Hz} \div 10\,000 \text{ Hz}$ s krokem $\Delta f = 1 \text{ Hz}$. Nastavení směru pohybu formou změny vzájemného fázového posuvu signálů,
- Výstupní blok generátoru odometrie navrhnout pro připojení externího napájecího napětí v rozsahu $V_{CC} = 12 \text{ V}_{DC} \div 24 \text{ V}_{DC}$,
- Vyvedení 2 proudových výstupů z generátoru kódu liniového systému (LS a EVM)
- Softwarově řízená proudová spotřeba z externího napájení, která odpovídá proudové spotřebě snímače otáček GEL2710 (simulace přítomnosti snímače otáček)

- 2x proudový výstup generátoru kódu liniového systému
- 1x Napěťový výstup generátoru kódu liniového systému
- Generace nosných frekvencí v rozsahu $f = 20 \text{ Hz} \div 300 \text{ Hz}$ a modulace příslušnými signály
- Ovládací tlačítka, tlačítko pro aktivaci zařízení
- Výběrové menu zobrazeno na displeji
- Zvuková signalizace při stisku tlačítka
- Samočinné vypnutí zařízení po uplynutí stanovené doby nečinnosti
- Teplotní rozsah použitelnosti přístroje od $T = -20 \text{ °C} \div 45 \text{ °C}$

4 NÁVRH PŘENOSNÉHO TESTERU

Během návrhu jsou v prvních krocích uváženy možné metody a způsoby návrhu jednotlivých bloků dle požadovaných vlastností (např. požadované přesnosti).

4.1 Generování kódu liniového systému

Kódem liniového systému se všeobecně rozumí elektrický signál, který prochází traťovou částí vlakového zabezpečovače do palubní elektroniky hnacího drážního vozidla (příp. hnaného vozidla vybaveného stanovištěm strojvedoucího).

Jedním ze základních všeobecných požadavků na konstrukci a návrh přenosného přístroje pro testování vlakového zabezpečovače je vybavení přenosného testeru generátorem signálů. Tyto signály jsou pro mobilní část vlakového zabezpečovače vstupními signály (přenášejí kódovanou informaci o následujícím návěstním znaku).

Požadavkem na blok generátoru je generace ekvivalentních signálů vytvářených stacionární částí vlakového zabezpečovače typu LS a EVM popsanych v teoretické části práce. Generace bude probíhat v odlišných mezích hodnot elektrického proudu a napětí používaných ve skutečné stacionární části VZ.

Během napájení přípravku z interního akumulátoru neumožňují obecné zákonitosti v oblasti elektrotechniky generaci elektrických proudů řádově ≈ 10 A, a proto je snaha o realizaci v rámci návrhu tohoto zařízení považována za nereálnou. Mimo jiné může způsobit značný nárůst nákladů na konstrukci a výrobu přenosného TESTERU.

Generování signálů vlakového zabezpečovače je navrženo pomocí **přímé digitální syntézy kmitočtu** (blíže specifikováno níže). Pro toto řešení postačuje pouze 1 univerzální blok pro generaci signálů různého charakteru. Přímá digitální syntéza zajistí úplné softwarové řízení při generaci signálů.

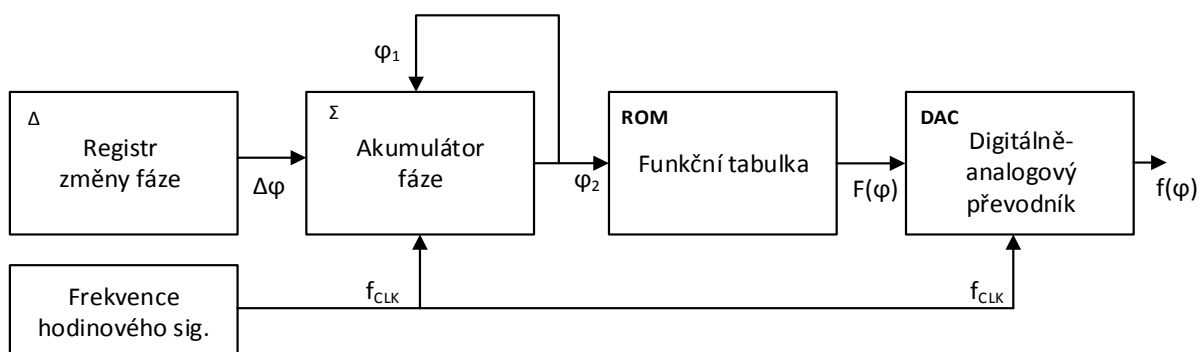
Návrh zahrne použití přesného D/A převodníku s nízkými hodnotami nelinearity (INL a DNL), datové řízení D/A převodníku z MCU (sériová nebo paralelní komunikace) a použití přesné teplotně nezávislé napěťové reference pro D/A převodník, především v rozsahu uvedeného rozsahu teplot $T = -20\text{ °C} \div 45\text{ °C}$, které se udávají jako provozní teploty tohoto zařízení.

Výhodou použití přímé digitální syntézy bude univerzálnost generátoru, možné rozšíření generovaných signálů o signály jiných vlakových zabezpečovačů formou upgradu firmwaru na více rozšířenou verzi. Další výhodou je simulace odchylek signálů (např. odchylka střídny), které ve stacionární části VZ v provozních podmínkách mohou nastat.

4.1.1 Přímá digitální syntéza kmitočtu

Problémem většiny analogových generátorů kmitočtu se sinusovým průběhem je malý rozsah přeladitelnosti s ohledem na přesnost výstupního kmitočtu a amplitudy, rozlišitelnost a opakovatelnost nastavení, rychlost ustálení a v neposlední řadě uživatelský komfort při nastavení parametrů generátoru. Existují generátory, z nichž se sinusový signál získává filtrací digitálního signálu. Zde však narážíme na principiálně stejný problém při konstrukci analogových filtrů přeladitelných v požadované rozsahu. Nejblíže požadovanému ideálu je generování kmitočtu pomocí funkční tabulky a digitálně-analogového převodníku, zde však narážíme na problém dostatečného rozlišení hodinového kmitočtu pro čítač (klasické děličky nevyhovují, neboť nemají lineární, ale skokový výstupní kmitočet, jehož změny nejsou lineární v celém rozsahu přeladění) a vhodné rychlosti D/A převodníku. [14]

Velkou většinu těchto problémů řeší právě přímá číslicová syntéza. Na následujícím obrázku je znázorněn princip její činnosti a níže je vysvětlen:



Obr. 25 – Blokové schéma principu funkce přímé digitální syntézy kmitočtu [14]

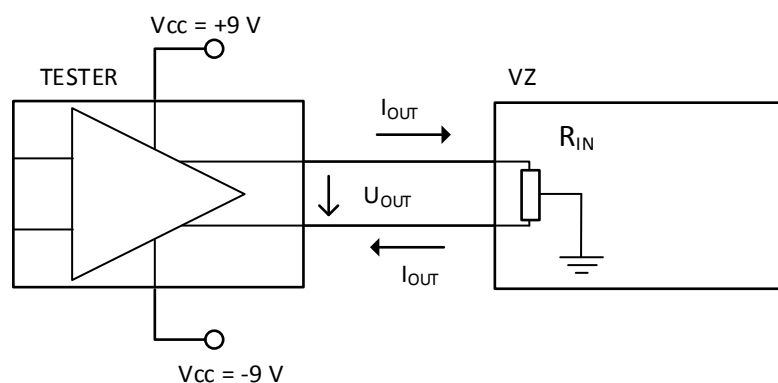
Blok registru změny fáze konstantně udržuje nastavenou hodnotu, která udává velikost změny fáze (resp. fázový krok) hodnotu $\Delta\phi$. Akumulátor fáze Σ při každém hodinovém pulzu f_{CLK} přičte $\Delta\phi$ k hodnotě fáze ϕ_1 a její novou hodnotu udržuje až do příchodu další hrany hodinového pulzu. Aby nemusela být tabulka uložená v paměti ROM příliš veliká, přivádí se do ní jen asi 12 až 14 horních bitů (MSB) fáze (ϕ_2). V ROM tabulce jsou uloženy v binárním formátu hodnoty funkce sinus (nebo jiné funkce, umožňuje-li obvod přepnutí tabulky nebo nahrání nového obsahu do RAM paměti) a její výstup je synchronně s hodinovým signálem přiveden do digitálně-analogového převodníku, ve kterém již vzniká analogový sinusový signál. Z principu činnosti D/A převodníku i skokových změn fáze však tento signál obsahuje i své harmonické složky, které se objevují nad polovinou hodinové frekvence a které zkreslují výstupní signál. Doporučuje se vhodná filtrace použitím např. antialiasingového filtru. [14]

Nevýhodou použití přímé digitální syntézy je generace frekvenční závislost výstupního harmonického signálu z bloku DDS. Závislost má charakter tlumených kmitů dle rovnice tomu odpovídající:

$$y = \frac{\sin(x)}{x}. \quad (5)$$

4.1.2 Napěťový výstup generátoru kódu

Napěťový výstup TESTERU vlakového zabezpečovače bude v při testování připojován na vstupní bránu symetrického vstupu snímačů kódu. Na antisériově zapojených snímačích kódu se dle kapitoly 1.3 indukuje maximální hodnota napětí $U_{max} = 10 V_{RMS}$. Vstupní odpor bloku pro připojení snímačů kódu drážního vozidla udává hodnotu vstupního odporu $R_{IN(VZ)} = 5,6 k\Omega$.



Obr. 26 – Propojení vstupu vlakového zabezpečovače a napěťového výstupu testeru VZ

V rámci vnitřního obvodového zapojení generátoru kódu je za blokem generátoru navrhnut koncový stupeň tohoto napěťového výstupu. Napěťový výstup je řešen symetricky, tedy napětí na symetrickém výstupu roste (klesá) na obou výstupních pinech symetricky podle střední hodnoty časově proměnného přivedeného signálu. Maximální rozkmit výstupního symetrického napětí:

$$U_{OUT(P-P)} = \sqrt{2} * U_{OUT_{MAX}} = \sqrt{2} * 10 = 14,142 V \quad (6)$$

V zapojení bude uváženo vyvedení zemnicí sítě GND ze středu symetrického výstupu, podobně jako je řešeno na vstupní části vlakového zabezpečovače, avšak na úrovni místní země. Z toho plyne, že kladný nebo záporný potenciál signálu na symetrickém výstupu dosáhne maximální hodnoty:

$$U_{OUT(max)} = \frac{V_{OUT P-P}}{2} = \frac{14,142}{2} = 7,071 V \quad (7)$$

Výstupní proud koncového stupně tekoucí do vstupního odporu vlakového zabezpečovače o $R_{IN(VZ)} = 5,6 \text{ k}\Omega$ bude:

$$I_{OUT} = \frac{V_{OUTMAX}}{R_{IN(VZ)}} = \frac{14,142}{5600} = 2,5 \text{ mA} \quad (8)$$

K tomuto výstupním koncovému stupni je navrženo symetrické napájecí napětí $U_{CC} = \pm 9 \text{ V}_{DC}$, resp. $U_{CC} = 18 \text{ V}_{P-P}$, což postačuje pro maximální vypočítaný rozkmit výstupního signálu $V_{OUT(P-P)} = 14,142 \text{ V}$.

Schéma zapojení a detailní postup výpočtů parametrů součástek a jejich výběr dle vypočítaných elektrických veličin (elektrické napětí a proudy) je uveden v kapitole 4.6.

4.1.3 Proudový výstup generátoru kódu

Požadované výstupní parametry proudového výstupu byly zjištěny experimentálním měřením formou měření napěťové odezvy na snímači otáček při generování magnetického pole v okolí snímače kódu (průběh měření je popsán detailně v kap 4.3). Pro koncový stupeň s proudovým zdrojem je navrženo použití dostupného napájecího napětí $U_{CC} = +9 \text{ V}_{DC}$ (využití pouze kladné polarity). Velikost požadovaného výstupního proudu (budící proud) se uvažuje řádově $\approx 100 \text{ mA}$, a to v případě přítomnosti budícího magnetického pole (v okolí vodiče) v těsné blízkosti snímače kódu.

4.2 Generování signálů odometrie

Pro testovací účely je nutno generovat signály ekvivalentní výstupním signálům snímačů otáček v oblasti drážní dopravy. Cílem je navrhnout generátor ekvivalentních výstupních signálů snímače otáček GEL2710 v konfiguraci 4–kanálového napěťového výstupu se vzájemným fázovým posuvem mezi signály kanálů $\varphi_{out} = 90^\circ$ nebo $\varphi_{out} = -90^\circ$. Dostupné externí napájecí napětí koncového stupně se předpokládá primárně $V_{CC} = +24 \text{ V}_{DC}$, příp. $V_{CC} = +12 \text{ V}_{DC}$.

Generaci signálů tvaru obdélníkových pulzů je možno navrhnout přímou generací z digitálního výstupního pinu mikrokontroléru s definovaným časem změn mezi úrovní LOW a úrovní HIGH. Forma generování signálu bude navržena čítáním časovače do zadané vstupní hodnoty a následném vyvoláním přerušení se zadanou prioritou. Priorita přerušení je navržena o stupeň nižší oproti prioritě přerušení pro generování kódu vlakového zabezpečovače. Mez čítání časovače ve výsledku určí výstupní frekvenci obdélníkových pulzů. Pro úsporu vstupně-výstupních digitálních pinů procesoru bude navržena pouze 2–kanálová generace a následné rozšíření na 4 kanály pomocí logických invertorů. Toto řešení je použitelné pouze v tomto případě, jelikož 4–kanálový výstup s hodnotou fázového posuvu

mezi všemi signály $|\varphi_{out}| = 90^\circ$ a signál kanálu č. 1 vůči signálu kanálu č. 3 je inverzní, podobně jako signály mezi kanály č. 2 a č. 4. Fázový posuv mezi inverzními signály je $|\Delta\varphi| = 180^\circ$.

Na základě hodnot z katalogového listu (datasheetu) reálného snímače otáček jsou teoreticky vypočítány maximální hodnoty impedanční zátěže pro různé konfigurace snímače otáček.

Výpočet maximální hodnoty zátěže pro proudový výstup při mezních hodnotách U_{CC} :

a) Pro $U_{CC} = 12 V_{DC}$

$$Z_{MAX} = \frac{U_{CC} - U_{DROP}}{I_{HIGH}} = \frac{12 - 4}{16 * 10^{-3}} = 500 \Omega, \quad (9)$$

b) Pro $U_{CC} = 16 V_{DC}$

$$Z_{MAX} = \frac{U_{CC} - U_{DROP}}{I_{HIGH}} = \frac{16 - 4}{16 * 10^{-3}} = 750 \Omega. \quad (10)$$

Výpočet minimální hodnoty zátěže pro napěťový výstup při mezních hodnotách U_{CC} :

c) Pro $U_{CC} = 10 V_{DC}$

$$Z_{MIN} = \frac{U_{HIGH}}{I_{OUT(max)}} = \frac{U_{CC} - 2}{I_{OUT(max)}} = \frac{10 - 2}{16 * 10^{-3}} = 500 \Omega, \quad (11)$$

d) Pro $U_{CC} = 30 V_{DC}$

$$Z_{MIN} = \frac{U_{HIGH}}{I_{OUT(max)}} = \frac{U_{CC} - 2}{I_{OUT(max)}} = \frac{30 - 2}{16 * 10^{-3}} = 1750 \Omega. \quad (12)$$

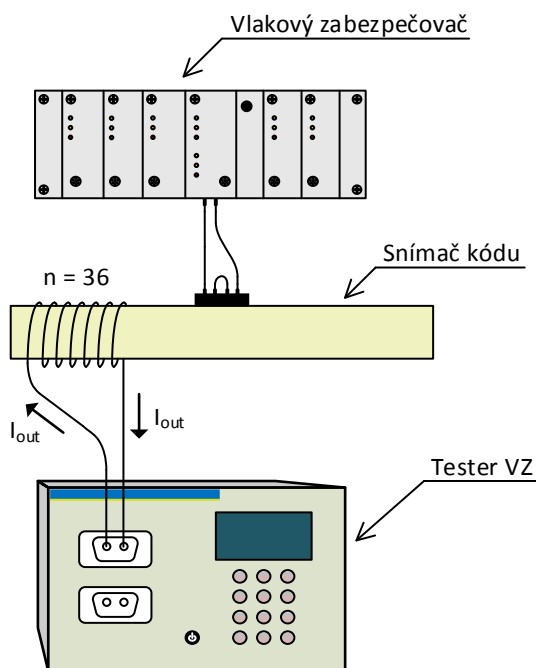
U proudového výstupu se tímto výpočtem udává maximální hodnota impedance zátěže, při které je úbytek napětí na zátěži roven maximální možné hodnotě výstupního napětí pro správnou funkci (při úrovni HIGH). Nebude-li podmínka dodržena, dojde k vychýlení pracovního bodu koncového stupně proudových výstupů mimo dovolené hranice.

U napěťového výstupu se výpočtem stanovuje minimální možná hodnota impedance zátěže, při které je ve stavu HIGH proudová spotřeba zátěže rovna maximálnímu výstupnímu proudu zařízení. Při nedodržení dojde posunu pracovního a může se měnit výstupní úroveň napětí, která s rostoucí spotřebou zátěže přestane být detekována jako úroveň HIGH.

4.3 Měření snímače kódu

V přenosové cestě kódovaného signálu na stanoviště strojvedoucího se nachází magnetická vazba mezi kolejnicí jako vodičem a snímačem kódu na drážním vozidle. Vlivem jevu elektromagnetické indukce se vlivem střídavého elektrického proudu v kolejnici vytváří nestacionární magnetické pole v okolí kolejnice a na snímači kódu se indukuje napětí. Indukovaný signál snímače kódu se detekuje mobilní částí vlakového zabezpečovače a logika jeho funkčního chování se odvíjí od typu přijatého kódu.

Pro testovací účely, tedy v době, kdy se vozidlo nachází mimo kolej vybavenou liniovým systémem, se provede buzení snímače kódu ovinutím vícežilového budícího kabelu okolo válcového pouzdra snímače. Vícežilový kabel je zakončen konektory, které jsou nakontaktovány tak, aby vícežilový vodič dominoval charakterem cívky. Metodu lze popsat jako proudové buzení vlakového zabezpečovače. V této situaci se předpokládá značné navýšení účinku magnetického pole v okolí vodiče jednak vlivem zvýšení počtu vodičů (lze chápat jako vícenásobné ovinutí jednoho vodiče) a jednak snížením vzdálenosti zdroje magnetického pole na „nulovou“ hodnotu (budící kabel přiléhá ke snímači).

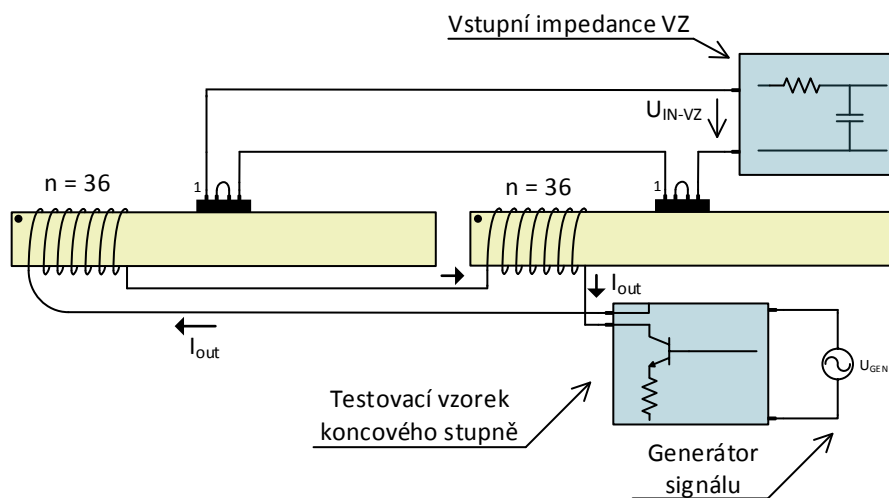


Obr. 27 – Metoda proudového buzení vlakového zabezpečovače

Měření na snímači kódu proběhlo za účelem stanovení převodní konstanty mezi proudem v kolejnici a indukovaným napětím na snímači kódu a stanovení převodní konstanty mezi proudem budícím vícežilovým kabelem a indukovaným napětím na snímači kódu. Převodní konstanta je v podstatě přenosový parametr, který definuje poměr indukovaného napětí a budícího proudu, proto lze tuto konstantu označit jako převodní impedanci. Dalším cílem měření bylo určit hraniční hodnotu efektivní hodnoty proudu I_{out} budící smyčkou, který vyvolá ekvivalentní magnetické pole vzhledem k provozním podmínkám, kdy je snímač umístěn ve výšce $l = 219$ mm nad kolejnicí, která je budícím médiem. Hraniční efektivní hodnota proudu budící smyčkou musí dosahovat takové hodnoty, aby ve stavu testování vyvolala na jednom snímači kódu efektivní hodnotu harmonického průběhu o velikosti $U_{IN(max)} = 5 V_{RMS}$.

Pro stanovení potřebných parametrů a hraničních hodnot v rámci buzení proudovou smyčkou proběhlo měření na testovacím vzorku koncového stupně testeru vlakového

zabezpečovače s proudovým výstupem. Blokové schéma zapojení v rámci měření parametrů magnetické vazby budící proudové smyčky na snímač kódu je znázorněno na obr. 28:



Obr. 28 – Blokové schéma zapojení při měření převodní konstanty magnetické vazby

Pro nastavení vstupního signálu koncového stupně, který simuluje při tomto měření softwarově generovaný signál, byl použit elektronický generátor Agilent 33220A. Testovací vzorek koncového stupně byl vyroben ve zjednodušených laboratorních podmínkách subtraktivní technologií na desce plošného spoje. Vícežilové kabely nahrazuje v rámci měření 36 závitů měděného vodiče se silikonovou izolací.

Snímač kódu se skládá ze dvou cívek ovinutých na magneticky měkkém jádru z transformátorového plechu. Magnetická část je zapouzdřena válcovým PVC obalem a vyplněna polyuretanovou pěnou. Začátky a konce vynutí jsou připojeny na vystupující konektory ze snímače kódu.

Uvinutí snímače kódu budící smyčkou z testeru vlakového zabezpečovače je u obou snímačů kódu je nutno respektovat začátek vinutí snímače kódu a obě budící smyčky orientovat shodně. Není-li toto dodrženo, vlivem protisměrného působení a směru magnetických siločar dochází k vyrušení účinků magnetického pole a na vstupní bráně vstupní impedance vlakového zabezpečovače se neindukuje žádné napětí.

Měření převodní konstanty bylo provedeno sledováním indukovaného napětí na 2 snímačích kódu, na který se provozních podmínkách indukuje maximálně efektivní napětí na vstupu VZ:

$$U_{IN(VZ)} = 2 * U_{I(max)} = 2 * 5 = 10 V_{RMS}. \quad (13)$$

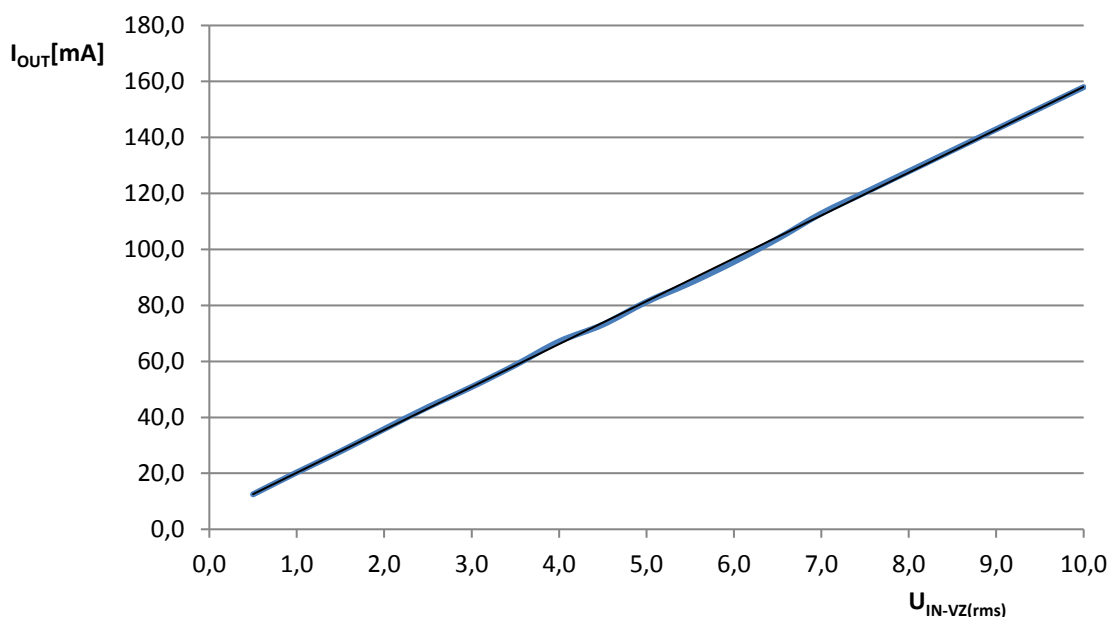
Uvedené výstupní napětí bylo nastavováno parametry vstupního generátoru signálu v rozsahu $U_{IN(VZ)} = 0 V_{RMS} \div 10 V_{RMS}$ s krokem $\Delta U_{IN(VZ)} = 0,5 V_{RMS}$. Pro každé indukované napětí byla odečtena hodnota efektivního proudu budící smyčkou. Tento postup měření je naznačen

v tab. 5. Závislosti převodního parametru je téměř lineární a po vyšetření parametrů vazby je závislost budícího proudu na indukovaném napětí snímače kódu linearizována.

Tab. 5 – Měření převodní konstanty magnetické vazby budící smyčky na snímač kódu

Koncový stupeň					Budící smyčka		Vazba	
$U_{GEN(max)}$	$U_{GEN(min)}$	U_{DC}	$U_{AC(max)}$	$U_{AC(RMS)}$	$I_{out(RMS)}$	Frek.	$U_{IN-VZ(RMS)}$	KP
[V]	[V]	[V]			[mA]	[Hz]	[V]	[Ω]
0,186	0,02	0,103	0,083	0,059	12,5	50	0,5	40,041
0,290	0,02	0,155	0,135	0,095	20,3		1,0	49,236
0,390	0,02	0,205	0,185	0,131	27,8		1,5	53,893
0,496	0,02	0,258	0,238	0,168	35,8		2,0	55,855
0,600	0,02	0,31	0,290	0,205	43,6		2,5	57,300
0,696	0,02	0,358	0,338	0,239	50,9		3,0	58,995
0,800	0,02	0,41	0,390	0,276	58,7		3,5	59,651
0,912	0,02	0,466	0,446	0,315	67,1		4,0	59,613
0,992	0,02	0,506	0,486	0,344	73,1		4,5	61,544
1,100	0,02	0,56	0,540	0,382	81,2		5,0	61,544
1,190	0,02	0,605	0,585	0,414	88,0		5,5	62,491
1,290	0,02	0,655	0,635	0,449	95,5		6,0	62,804
1,400	0,02	0,71	0,690	0,488	103,8		6,5	62,615
1,520	0,02	0,77	0,750	0,530	112,8		7,0	62,037
1,620	0,02	0,82	0,800	0,566	120,4		7,5	62,314
1,720	0,02	0,87	0,850	0,601	127,9		8,0	62,558
1,820	0,02	0,92	0,900	0,636	135,4		8,5	62,775
1,920	0,02	0,97	0,950	0,672	142,9		9,0	62,970
2,020	0,02	1,02	1,000	0,707	150,4		9,5	63,145
2,120	0,02	1,07	1,050	0,742	158,0		10,0	63,303

Příložený graf naznačuje linearitu převodního parametru vazby v závislosti změn vstupního napětí vlakového zabezpečovače a elektrického proudu budící smyčkou. Charakteristiky vykazuje mírné odchylky od lineárního průběhu, proto je nutností v rámci firmaware při možné linearizaci průběhu ověřit relativní chyby indukovaného napětí snímače vlivem generace odchýlené hodnoty proudu budící smyčkou. Měření proběhlo s budícím signálem frekvence $f = 50$ Hz.

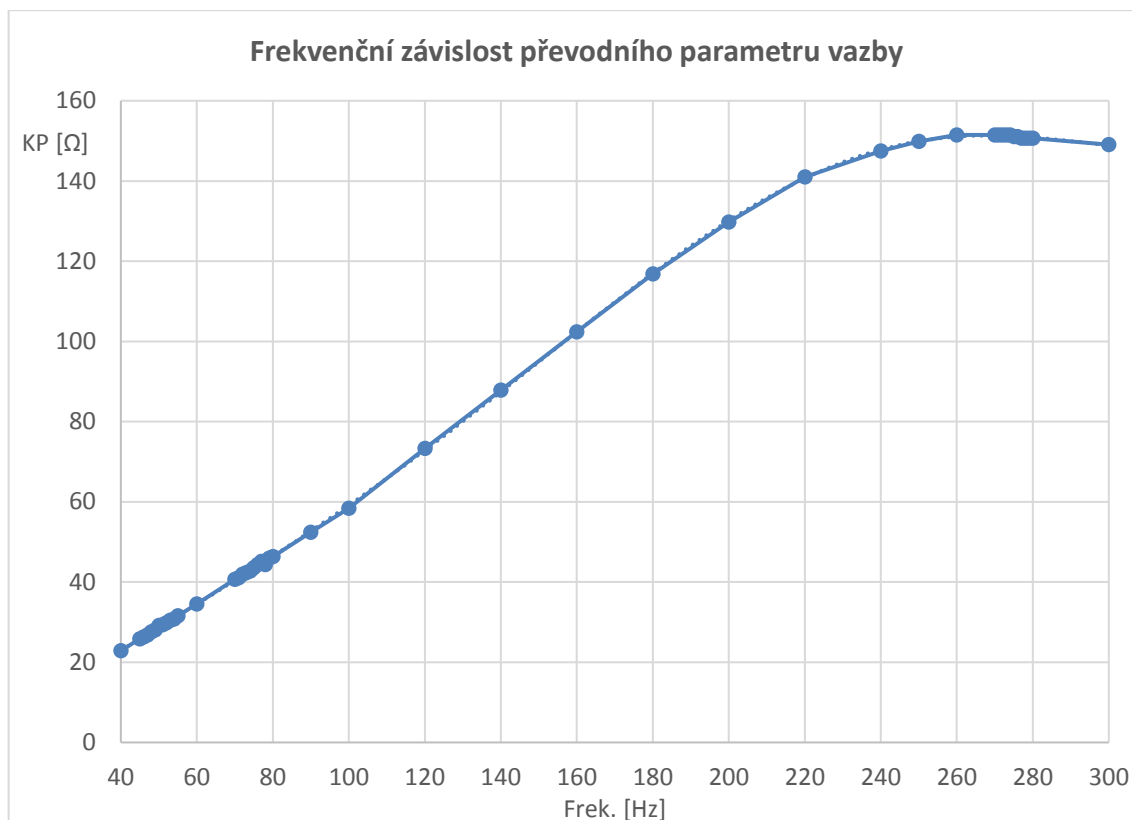


Obr. 29 – Grafická závislost převodního parametru magnetické vazby KP

Jelikož cívka je frekvenčně závislá součástka, resp. její reaktance (zdánlivý odpor) se mění s frekvencí přiloženého signálu, v magnetické vazbě je nutno předpokládat frekvenční závislost převodní impedance vazby. S ohledem na parazitní vlastnosti budícího kabelu (cívky) se bude frekvenční závislost zahrnovat také vliv rezonance magnetické vazby (dle polohy rezonančního kmitočtu).

Měření frekvenční závislosti bylo provedeno stejnou konfigurací blokového zapojení pro měření magnetické vazby. Měření frekvenční závislosti se provádí změnou frekvence od počáteční zvolené hodnoty frekvence s nastavením daného elektrického proudu smyčkou. Při postupné změně frekvence budícího proudu a odečítání hodnot indukovaného napětí na vstupu vlakového zabezpečovače je nutno v rámci celého měřeného rozsahu udržovat konstantní hodnotu proudu smyčkou. Udržením vstupní veličiny na konstantní hodnotě se s měnící frekvencí vykresluje závislost výstupní veličiny (indukovaného napětí), tedy závislost magnetické vazby.

Měření frekvenční závislosti proběhlo při elektrickém proudu smyčkou $I_{out(RMS)} = 250 \text{ mA}$ v rozsahu frekvencí předpokládaného použití zařízení, tedy do $f = 300 \text{ Hz}$.



Obr. 30 – Frekvenční závislost převodního parametru magnetické vazby na snímač kódu

Při ovinutí celkem 36 závitů budicího kabelu z experimentálního měření vystupuje jako závěr hodnota budicího proudu $I_{OUT} = 300 \text{ mA}$ k indukci $U_I = 5 \text{ V}_{RMS}$ na jednom snímači kódu.

4.4 Výběr základních komponent

Kapitola popisuje výběr elektronických součástek a komponent vhodné pro popsanou aplikaci. Výběr probíhá dle specifikovaných funkčních a systémových požadavků a dle postupu návrhu.

4.4.1 Akumulátor

Pro uvedenou aplikaci bude uvažováno použití nabíjecího akumulátoru typu Li-ion (lithium - iontový) s jmenovitým napětím $U_{BAT} = 3,6 \text{ V}$. Pro navýšení kapacity baterie je navržen akumulátorový pack, resp. 3 nebo 4 paralelní akumulátory typu Li-ion s vysokou kapacitou.

Pro požadovanou aplikaci je vhodné využití akumulátorového packu 3 paralelních Li-ion akumulátorů s výrobním označením CL-18650-26H/1S3P s kapacitou 7,8 Ah nebo pack 4 paralelních článků s označením CL-18650-26H/1S4P s kapacitou 10,4 Ah.

Článek Li-Ion disponuje vysokou hustotou energie, čímž lze zajistit relativně malé provedení baterie s vysokou kapacitou. Mimo jiné článek Li-ion oproti starším akumulátorům netrpí efektem samovybíjení v době, kdy je akumulátor nezatížen. [19]



Obr. 31 – Pack baterie CL-18650-26H/1S3P [15]

Tab. 6 – Přehled základní parametrů akumulátoru CL-18650-26H/1S3P [15]

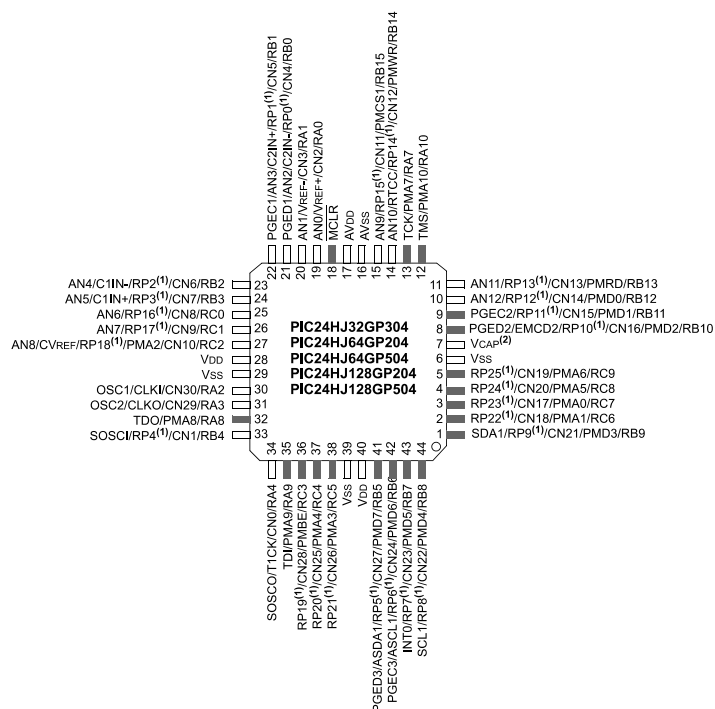
Parametr	Hodnota
<i>Nominální napětí</i>	3,6 V
<i>Kapacita akumulátoru</i>	7800 mAh
<i>Metoda dobíjení</i>	CC/CV
<i>Maximální napětí</i>	4,2 V
<i>Maximální nabíjecí proud</i>	3,9 A
<i>Maximální vybíjecí proud</i>	5 A
<i>Napětí vybité baterie (min)</i>	2,5 V

4.4.2 Mikrokontrolér

Funkční jádro systému přenosného testeru tvoří jeden mikrokontrolér (mikropočítač). Na jeho úrovni je řešeno generování signálů vlakového zabezpečovače a generování signálů z oblasti odometrie drážních vozidel. Mimo jiné se mikrokontrolér stará o požadované vyhodnocení možných stavů (např. vybití akumulátoru), různé indikace na displeji nebo účely nastavení výstupních signálů a jejich aktivace nebo regulace uživatelem pomocí uživatelského menu.

Hlavními požadavky na výběr procesoru bude dostatečný 16ti nebo vícebitová architektura, dostatečný počet vstupně-výstupních portů (pinů), vysoký počet instrukcí jádra procesoru za jednotku času, vybavení vstupními A/D převodníky a periferiemi sériových sběrnic (SPI a I²C).

V rámci projektu je využit mikrokontrolér 16bitové architektury od výrobce Microchip **PIC24HJ128GP204**. Jedná se o procesor harwardské architektury s redukovanou instrukční sadou.



Obr. 32 – PINOUT mikrokontroléru PIC24HJ128GP204 v pouzdře TQFP44 [23]

Uvedený mikrokontrolér disponuje dostatečným počtem pinů - celkem 44, z nichž může být celkem 35 použito jako vstupně výstupních (I/O pins). Pomocí konfiguračního registru je vstupní nebo výstupní buffer odpojen do stavu vysoké impedance.

Napájecí napětí procesoru je $U_{DD} = 3,0 \text{ V} \div 3,6 \text{ V}$. Při uvedení vstupně-výstupního pinu do konfigurace jako vstup vzrůstá díky open-drain zapojení napěťová tolerance vstupu do $U = 5 \text{ V}$. Souvisejícím požadavkem je připojení externího pull-up rezistoru k U_{DD} . Většina vstupně-výstupních pinů (označení CNxx) má zabudovaný pull-up odpor k redukci nutných externích součástek. Omezení použití interního pull-up je rozsah napájecího napětí s udaným maximem $U_{DD} = 3,6 \text{ V}$.

Piny označené jako ANxx (celkem 13) jsou připojeny na interní AD převodník s postupnou aproximací (SAR). Převodník je konfigurovatelný do 10bitového a 12bitového módu. Na jednotlivých vstupech převodníku (vstupy pinů ANxx) se nacházejí sample and hold obvody pro udržení stávající úrovně analogového napětí na vstupu. V konfiguraci 12bit lze využít pouze současně pouze 1 sample and hold obvod, tedy snímat analogovou úroveň napětí v daný okamžik pouze z 1 pinu, a to s rychlostí převodu 500 ksps a v konfiguraci 10bit zpracovává modul A/D převodníku s vysokou rychlostí převodu 1,1 Msps multiplexně až 4 výstupy sample and hold obvodů. Referenční napětí Možnost nastavení interní reference hodnoty napětí AV_{DD} nebo externí referenční napětí z pinů VREF+ a VREF-.

Proces je vybaven rozhraním pro programování ICSP, které programuje přímo paměťový prostor vyhrazený pro strojový kód. ICSP programování eliminuje nutnost programování mikrokontroléru ve speciálním programovacím modulu. Mikrokontrolér zůstává během

programování osazen na systému, pro který je využit. Standart ICSP a vstupní modul se na mikrokontroléru nachází na programovacím rozhraní vstupů PGEC a PGED. Součástí rozhraní mezi programátorem a rozhraním mikrokontroléru je obvykle navíc externí reset na pinu MCLR, který reaguje na nízkou úroveň (Active LOW).

Mikrokontrolér obsahuje globální resetovací modul, který pomocí hradlové logiky slučuje všechny možné resetovací podněty do jednoho interního signálu, jehož úroveň udržuje interní systém MCU v resetu. Reset lze vyvolat pomocí interní programové instrukce, jako power-on-reset (na podnět periferie), watchdog timer reset, brown-out reset, externí reset nízkou úrovní na pinu MCLR atp. Modul resetu obsahuje také registr pro indikaci zdroje vyvolaného resetu.

V jádru kontroléru je zabudováno 5 modulů časovačů. Každý z časovačů je 16bitový (tedy může se strojovou instrukcí čítat do hodnoty $n = 2^{16}$). Jelikož procesor popisuje parametr 40 MIPS, který definuje počet instrukcí za jednotku času (sekunda), doba trvání 1 instrukce je $t_{INS} = 25 \text{ ns}$. Moduly časovačů 2 + 3 a 4 + 5 mají přípravu na konfiguraci do 32bitového módu (čítání do hodnoty $n = 2^{32}$). Pro čítání časovače může být mimo interní hodinový signál, resp. čas strojové instrukce, použit také externí hodinový signál připojený na pin CLKI (Clock input).

Mikrokontrolér je vybaven několika libovolně mapovatelnými piny pro komunikační periferie SPI, I2C, UART, PMP, CAN bus nebo také output compare modul (operace generování výstupních pulzů v časech daných během časovače, např. PWM signál).

Modul sběrnice SPI zajišťuje možnost synchronního datového přenosu komunikace typu MASTER-SLAVE v libovolném směru (mikrokontrolér může být nastaven jako SLAVE). V tomto případě se pin hodinového signálu automaticky nastavuje jako vstup. Modul SPI se skládá z 16bitového posuvného registru, který přepíná (řadí) data na výstupní rozhraní sériové komunikace. SPI rozhraní je definováno vstupy a výstupy pro komunikaci v každém směru (SDI a SDO), hodinovým signálem (SCK) a signálem SS – slave select (aktivace komunikačního rozhraní na straně zařízení SLAVE). Pro zpomalení komunikace např. z důvodů hardwarového omezení okolních periferních bloků připojených na sběrnici je využitelná dvojitá dělička frekvence hodinového signálu pro sběrnici, který v základu vychází z délky interního instrukčního cyklu.

Logika mikrokontroléru zahrnuje také logiku přerušení běhu instrukcí, které může být vyvoláno mnoha zvolenými podněty odkazující na vektor přerušení, jako např. přerušení na přetečení časovače, přerušení na změnu stavu na některém digitálním vstupu, změna stavu vstupního komparátoru nebo při různých operacích na sběrnicích (naplnění bufferu, příjem enable bitu, stop bitu atp.). Pokud nastává více přerušení současně, mikrokontrolér umožňuje nastavení priority pro daná přerušení v 7 úrovních. [23]

4.4.3 Displej

Dle požadavků bude zařízení vybaveno také znakovým displejem pro zobrazování aktuálních nastavených parametrů. Na zobrazovací ploše displeje se nepředpokládají velmi rychlé změny, proto se nabízí možnost použití LCD displeje bez omezení souvisejícím s problematikou zamrzání tekutých krystalků zobrazovače LCD při teplotách $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V dostupném sortimentu vhodných alfanumerických displejů vhodných pro tuto aplikaci se nabízí použití displeje EA DIP203b-6 NLW od výrobce Electronic assembly. EA DIP203b-6 NLW je alfanumerický displej o velikosti 20 x 4 znaků s dodatečnou lištou 16-ti grafických ikon včetně znaku baterie, který nachází využití v možnosti indikace aktuálního stavu vybití akumulátoru. Displej vyžaduje stejné napájecí napětí jako vybraný mikrokontrolér $U_{DD} = 3,3\text{ V}$. Nutnost použití převodníku úrovní mezi displejem a mikrokontrolérem tedy není nutné. [24]



Obr. 33 – Displej Electronic Assembly EA DIP203b – NLW [24]

Popsaný displej EA DIP203b-6 NLW je typu LCD s modrým podsvícením. Displej je připevněný na modulu desky plošných spojů, která je osazena univerzálním řadičem displejů SSD 1803 se zabudovanou znakovou sadou v paměti. Řízení displeje se provádí příslušným firmwarem, a to formou paralelní 4bitové nebo 8bitové komunikace nebo sériovou komunikací SPI (serial peripheral bus). [24]

Tab. 7 – Mapování pinů LCD displeje EA DIP203b – NLW v režimu paralelní komunikace [24]

4-bitová/8-bitová paralelní sběrnice					
PIN	SYMBOL	FUNKCE	PIN	SYMBOL	FUNKCE
1	VSS	Digitální zem GND	13	NC	Nepřipojeno
2	VDD	Napájecí napětí 3,3 V	14	VSS	Digitální zem GND
3	VCI	Regulace kontrastu	15	D0	Data 0
4	RES	Reset (0)	16	D1	Data 1
5	RS	Data (1) / instrukce (0)	17	D2	Data 2
6	R/W	Čtení/zápis	18	D3	Data 3
7	E	Data na výstupní registr	19	D4 (D0)	Data 4 (Data 0 - mód 4bit)
8	NC	Nepřipojeno	20	D5 (D1)	Data 5 (Data 1 - mód 4bit)
9	NC	Nepřipojeno	21	D6 (D2)	Data 6 (Data 2 - mód 4bit)
10	NC	Nepřipojeno	22	D7 (D3)	Data 7 (Data 3 - mód 4bit)
11	NC	Nepřipojeno	23	A	Anoda LED podsvícení
12	NC	Nepřipojeno	24	C	Katoda LED podsvícení

V případě sériové komunikace je nutné propojení připravených vodivých ploch s označením SPI. Zapájením propojky se displej konfiguruje do režimu sériové komunikace bez nutnosti dalších příprav. Nutno je pouze uvažovat přemapování vstupních a výstupních PINŮ displeje.

Tab. 8 – Mapování pinů LCD displeje EA DIP203b – NLW v režimu sériové komunikace [24]

Sériová komunikace SPI					
PIN	SYMBOL	FUNKCE	PIN	SYMBOL	FUNKCE
1	VSS	Digitální zem GND	13	NC	Nepřipojeno
2	VDD	Napájecí napětí 3,3 V	14	VSS	Digitální zem GND
3	VCI	Regulace kontrastu	15	SDO	Výstup DATA
4	RES	Reset (0)	16	D1	Nepřipojeno
5	CS	Vstup CHIP SELECT (0)	17	D2	Nepřipojeno
6	SDI	Vstup DATA	18	D3	Nepřipojeno
7	SCLK	Vstup CLOCK (hodinový sig.)	19	D4 (D0)	Nepřipojeno
8	NC	Nepřipojeno	20	D5 (D1)	Nepřipojeno
9	NC	Nepřipojeno	21	D6 (D2)	Nepřipojeno
10	NC	Nepřipojeno	22	D7 (D3)	Nepřipojeno
11	NC	Nepřipojeno	23	A	Anoda LED podsvícení
12	NC	Nepřipojeno	24	C	Katoda LED podsvícení

Proudový odběr interní logiky (resp. čipu SSD 1803) je průměrně $I_{DD} = 4 \text{ mA}$ a proudový odběr LED podsvícení zobrazovací plochy LCD je maximálně $I_{BL} = 75 \text{ mA}$ při napětí $U_{DD} = 3,3 \text{ V}$.

Modul displeje má z dolní strany napájené dva 12ti-pinové hřebenové konektory se standardní palcovou roztečí 2,54 mm.

Pomocí napěťového vysokoimpedančního vstupu nabízí modul displeje možnost regulace kontrastu zobrazovaných znaků. Regulace jasu podsvícení je možné provádět pouze externě, a to regulací proudu do LED diod podsvícení aktivní plochy displeje. [24]

4.5 Napájecí management

Požadavkem na provoz zařízení je nepřetržitý možný provoz zařízení po dobu 8 hodin při maximálním výkonu přístroje, resp. při maximálním proudovém odběru hardwaru z vestavěného akumulátoru. Pro správný výběr akumulátoru do zařízení je klíčová jeho velikost, jmenovitý výkon a maximální výstupní proud (vybíjecí proud).

Dalším kritériem výběru akumulátor je nutno stanovit příkon zařízení. Nejprve navrhuji provést odhady parametrů výstupních bran, případně hodnoty proudů a napětí stanovit na základě vstupních parametrů mobilní části vlakového zabezpečovače (např. na základě vstupní impedance). Dle požadovaných výstupních parametrů určím požadované napětí napájecích sítí, které bude z baterie generováno pomocí pulzních měničů typu DC-DC (buck nebo boost).

Přístroj bude vybaven mikrokontrolérem (MCU) pro generaci signálů liniového systému, generaci signálů odometrie, řízení displeje, kontrolu stavu vybití baterie atp. Výběr mikrokontroléru je přiblížen v kap. 4.4.2, která uvádí jeho maximální přípustné i požadované hodnoty elektrických veličin. Napájecí napětí pro mikrokontrolér a další logické obvody, které jsou v kooperaci s funkční logikou mikrokontroléru využívají vytvářené napájecí napětí $U_{DD} = 3,3 V_{DC}$.

4.6 Schéma zapojení

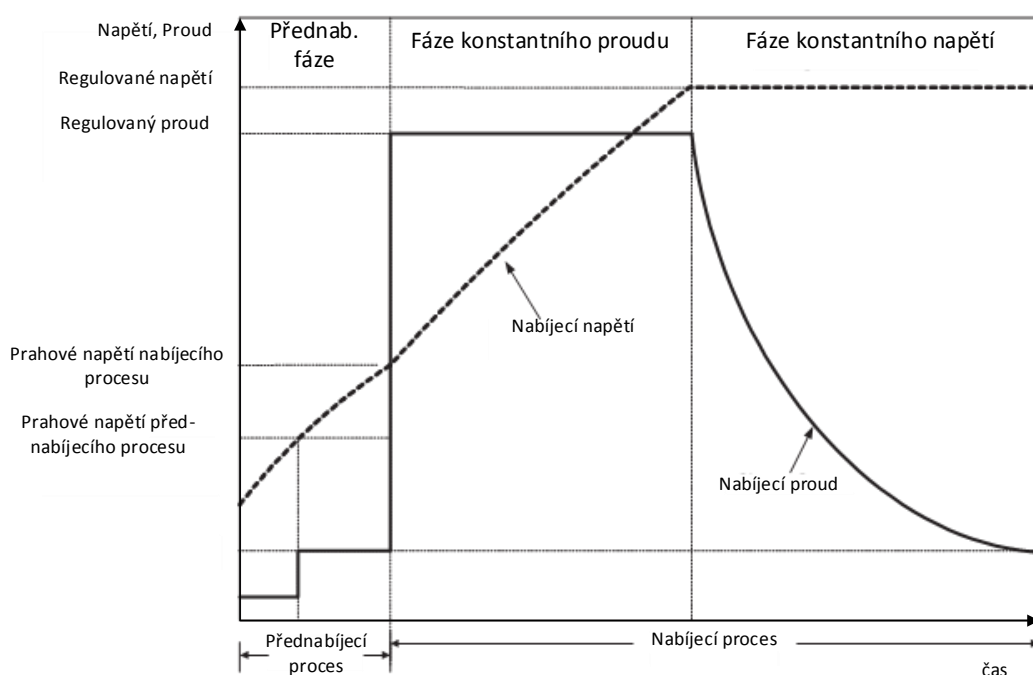
Návrh schématu zapojení je první krokem v rámci návrhu přenosného testeru. Při návrhu se bude postupovat metodou dle požadavků a návrh bude rozdělen do několika bloků s požadovanými vstupy a výstupy, které budou v závěrečné části seskupeny dohromady a vytvoří tak ucelený systém. V rámci bloku jsou vždy zahrnuty návrhy schémat (částí schémat) shodného nebo podobného charakteru. Finální schéma zapojení bude vyrobeno jedné hlavní desce plošných spojů. V rámci návrhu každého bloku budou shrnuty základní požadavky, resp. požadované parametry, podle kterých bude příslušný blok navržen.

4.6.1 Návrh nabíjecího obvodu Li-ion baterie

Základní požadavky vychází z typu vybraného akumulátoru typu Li-ion (Lithium-Iontový akumulátor). Použitý čip BQ24103A je inteligentní integrovaný obvod pro kontrolu nabíjecího procesu 1 až 2 článků (v sérii) akumulátorů Li-ion nebo Li-polymer. Obvod pracuje v pulzním režimu s frekvencí $f_s = 1,1 \text{ MHz}$ s vlastní regulací střídý pulzů v rozsahu $DC = 0 \% \div 100 \%$. Spínaného režimu obvodu se využívá přechodových vlastností induktoru a vytvořeného

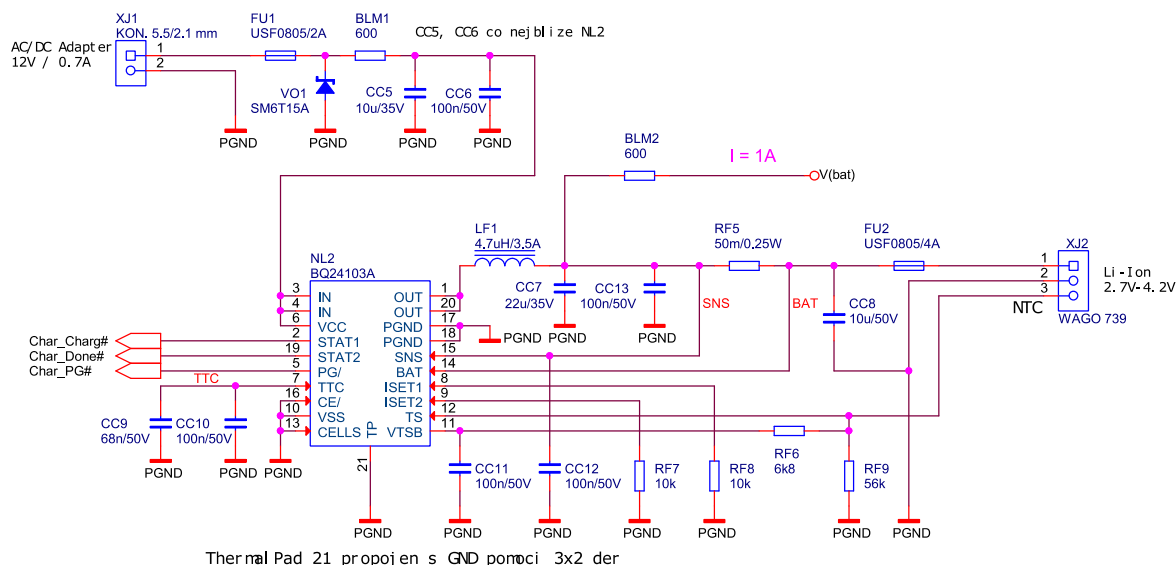
okolního magnetického pole induktoru. Průběh elektrického proudu je induktorem integrován a na výstupu induktoru se objevuje konstantní proud s malým zvlněním. Obvod je vybaven zpětnou vazbou pro snímání nabíjecího proudu a jeho regulaci. Parametry nabíjení a maximální čas do nabití baterie se volí připojením externích součástek k čipu. Blok vyžaduje na vstupní části stejnosměrné stabilizované napájecí napětí v rozsahu $U_{CC} = 4,35 \text{ V} \div 16 \text{ V}$. Je vybaven také logickými výstupy pro indikaci přítomnosti napájecího napětí na vstupu, pro indikaci přechodu do stavu nabíjení a indikací ukončení nabíjecího procesu. Obvod využívá nabíjecího profilu typu CC-CV (constant-current constant voltage), který eliminuje možnost překročení maximálního možného napětí baterie (u Li-ion standardně $U_{BAT} = 2,7 \text{ V} \div 4,2 \text{ V}$).

Průběh nabíjecího procesu CC-CV je zvláštním opatřením k eliminaci přebíjení akumulátoru. První fáze je charakterizována nabíjením baterie konstantním proudem z nabíjecího obvodu doprovázeném růstem napětí akumulátoru do hodnoty $U = 4,2 \text{ V}$. Při dosažení napětí přechází proces do druhé fáze a dosažené napětí je udržované na konstantní hodnotě, které je rovno napětí plně nabitého akumulátoru. V této fázi nabíjecí proud z předchozí hodnoty exponenciálně klesá k nule.



Obr. 34 – průběh nabíjení metodou CC–CV obvodu BQ 24103A

Schéma zapojení bloku nabíjecího obvodu je nastaveno pro nabíjení baterie Li-ion maximálním dovoleným proudem $I_{NAB} = 2 \text{ A}$ (omezení strukturou BQ24103A). Nabíjecí blok bude zapojen v konfiguraci, kdy během nabíjecího procesu slouží výstup bloku současně k nabíjení akumulátoru a k napájení systému (zátěže). Paralelní proudový odběr systému neovlivní logiku nabíjecího procesu. To bezpečně zajistí zpětnovazební „current sense“ rezistor, který kontroluje procházející proud do zátěže pomocí úbytku napětí mezi vlastními vývody.



Obr. 35 – Schéma zapojení nabíjecího obvodu Li-ion baterie s obvodem BQ24103A

Zadání návrhu stanovuje požadavek na nabíjení z externího AC/DC adaptéru. Pro uvedené schéma zapojení se uvažuje na vstupu napájecí adaptér se stejnosměrným stabilizovaným napětím výstupním $U_{DC} = 12 \text{ V}$. Dobíjený akumulátor CL-18650-26H uvádí maximální napětí $U_{BAT} = 4,2 \text{ V}$. Logika obvodu BQ 24103A nastavuje při zahájení nabíjecího procesu tzv. před-nabíjecí proud, který oživuje článek Li-ion nebo Li-polymer ve stavu hlubokého vybití. Hodnota tohoto proudu se nastavuje pomocí externího rezistoru a volí se zpravidla jako $\frac{1}{10}$ z nastaveného nabíjecího proudu. V tomto případě platí, že nabíjecí proud $I_{NAB} = 2 \text{ A}$. Z toho plyne, že hodnota před-nabíjecího proudu odpovídá:

$$I_{PNAB} = \frac{I_{NAB}}{10} = \frac{2}{10} = 200 \text{ mA}. \quad (14)$$

Pro zvolený nabíjecí proud a typ baterie v spínaném režimu je nutno nastavit optimální hodnotu indukčnosti výstupního induktoru inteligentní nabíječky. Induktor v daném zapojení plní funkci tlumivky. Hodnota indukčnosti je úměrná především napětí baterie a vstupnímu napětí bloku nabíjecího obvodu, spínanému proudu (resp. zvlnění) a frekvenci spínání. Jak vychází z katalogového listu a doporučení, zvlnění proudu I_{ZVL} se v počátku výpočtu hodnoty induktoru uvažuje jako 33 % (resp. $\frac{1}{3}$) z hodnoty nastaveného nabíjecího proudu I_{NAB} . Frekvence interního oscilátoru inteligentní nabíječky je $F_{OSC} = 1,1 \text{ MHz}$. Změny proudu na induktory pak dosáhnout hodnoty změny:

$$\Delta I_L = I_{NAB} * I_{ZVL} = 2 * (2 * 0,33) = 1,32 \text{ A}. \quad (15)$$

Doporučená minimální hodnota indukčnosti dle katalogového listu odpovídá hodnotě:

$$L_{OUT} = \frac{V_{BAT} * (V_{IN(max)} - V_{BAT})}{V_{IN(max)} * f_{OSC} * \Delta I_L} = \frac{4,2 * (12 - 4,2)}{12 * 1,1 * 10^6 * 1,32} = 1,88 \mu\text{H}. \quad (16)$$

Pro tento blok je vybrána blízká vyšší hodnota indukčnosti (stejného řádu) $L = 4,7 \mu H$. Induktor je nutno ze sortimentu vybrat též na základě maximálního proudu, resp. proudové špičky, které se na induktoru objevují. Výpočtu hodnoty špičkového proudu se docílí pomocí výpočtu zvlnění proudu a při maximálním nabíjecím proudu I_{NAB} . Na základě zvolené hodnoty indukčnosti vypočítáme skutečnou hodnotu zvlnění proudu induktorem:

$$\Delta I_L = \frac{V_{BAT} * (V_{IN(max)} - V_{BAT})}{V_{IN(max)} * f_{OSC} * L_{OUT}} = \frac{4,2 * (12 - 4,2)}{12 * 1,1 * 10^6 * 4,7 * 10^{-6}} = 0,53 A. \quad (17)$$

Při předpokladu, že střední hodnota proudového zvlnění odpovídá nabíjecímu proudu se maximální hodnota proudu cívkou vypočítá jako polovina rozkmitu zvlnění přičtená k maximálnímu nabíjecímu proudu:

$$I_{L(max)} = I_{NAB} + \frac{\Delta I_L}{2} = 2 + 0,265 = 2,265 A. \quad (18)$$

Tuto hodnotu je při výběru optimálního induktoru nutno respektovat především z důvodu možného uvedení induktoru do saturace (vysokým proudem), kdy ztrácí induktor své přechodové vlastnosti a pro přivedený signál nabývá charakteru rezistoru s malou hodnotou rezistivity (tedy téměř zkrat).

Vnitřní zapojení (čip) integrovaného obvodu BQ24103A zahrnuje kompenzaci stability výstupního pulzního signálu. Katalogový list uvádí doporučený rezonanční kmitočet výstupního induktoru a kapacitoru v rozmezí $f_0 = 8 kHz - 32 kHz$. Podle navržené výstupní indukčnosti se teoreticky dopočítá optimální hodnota výstupní kapacity podle platného vzorce pro mezní kmitočet jednoduchého LC článku:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{OUT} * C_{OUT}}}. \quad (19)$$

Z uvedeného rozsahu doporučených hodnot je zvolena rezonanční frekvence $f_0 = 16 kHz$. Po vyjádření veličiny kapacity platí z předchozího vzorce:

$$C_{OUT} = \frac{1}{4\pi^2 * L_{OUT} * f_0^2} = \frac{1}{4 * \pi^2 * 4,7 * 10^{-6} * 16000^2} = 21,05 \mu F. \quad (20)$$

Pro zapojení je zvolena nejbližší vyšší hodnota výstupní kapacity, tedy $C_{OUT} = 22 \mu F$. V kombinaci s indukčností tvoří výstupní kondenzátor připojený k zemi článek dolní propusti, který vyhlazuje změny výstupního napětí a zároveň filtruje vysokofrekvenční nežádoucí složky.

Nabíjecí proud je kontrolován pomocí zesilovače pro snímání proudu (tzv. current sense amplifier), který kontroluje úbytek napětí na snímacím rezistoru malé hodnoty odporu ($R_{SNS} < 1 \Omega$). Externí rezistory na pinech integrovaného obvodu ISET1 a ISET2 připojené k zemi nastavují proud externím tranzistorem zesilovače a interním rezistorem, který tento proud pro vnitřní logiku převádí na napětí převodním parametrem K_{ISET} .

A hodnota R_{ISET2} obdobně s ohledem na hodnotu před-nabíjecího proudu $I_{PNAB} = 0,2 \text{ A}$:

$$R_{ISET2} = \frac{K_{ISET2} * V_{ISET2}}{R_{SNS} * I_{PNAB}} = \frac{1000 * 0,1}{0,05 * 0,2} = 10k\Omega. \quad (24)$$

Při nabíjení článků akumulátoru může vlivem nerovnoměrného dobíjení paralelních článků téct zvýšená hodnota proudu do jednoho z článků a docházet k jeho nadměrnému zahřívání. Integrovaný obvod nabízí možnost připojení externího termistoru pro kontrolu teploty článků akumulátoru. Integrovaný obvod poskytuje referenční napětí $U_{VTSB} = 3,15 \text{ V}$ na pinu VTSB. Na sousední pinu TS je definován rozsah napětí U_{TS} , kdy se teplota akumulátoru pohybuje v tolerovaných mezích. Pro správné nastavení potenciálu na pinu TS je nutno přesně vypočítat dělicí poměr externího rezistorového děliče s termistorem.

Jako rozsah přípustných teplot akumulátoru je definováno 0°C až 45°C . Pin TS detekuje jako překročení hranice růst napětí za hodnotu $U_{TS} = 2,315 \text{ V}$ a pod hodnotu $U_{TS} = 1,084 \text{ V}$, jak je vypočteno dle procentuálních hodnot z reference na pinu VTSB dle katalogového listu.

Tab. 9 – Parametry BQ24103A pro detekci odchylky teplotního rozsahu nabíjení

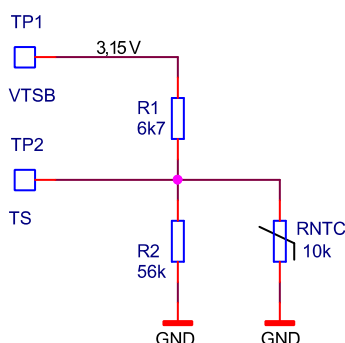
Teplotní komparátor obvodu BQ24103A						
Označení	Název	Jednotka	Výpočet	Hodnota		
				min	typ	max
%LT	Úroveň při nízké teplotě	[%]	$U_{LT} = U_{VTSB} \times (\%LT / 100)$	72,8	73,5	74,2
%HT	Úroveň při vysoké teplotě	[%]	$U_{HT} = U_{VTSB} \times (\%HT / 100)$	33,7	34,4	35,1

Odpovídající potenciál na TS při nízké teplotě je:

$$U_{LT} = U_{VTSB} * \frac{73,5}{100} = 3,15 * \frac{73,5}{100} = 2,315 \text{ V} \quad (25)$$

Odpovídající potenciál na TS při vysoké teplotě je:

$$U_{HT} = U_{VTSB} * \frac{34,4}{100} = 3,15 * \frac{34,4}{100} = 1,083 \text{ V} \quad (26)$$

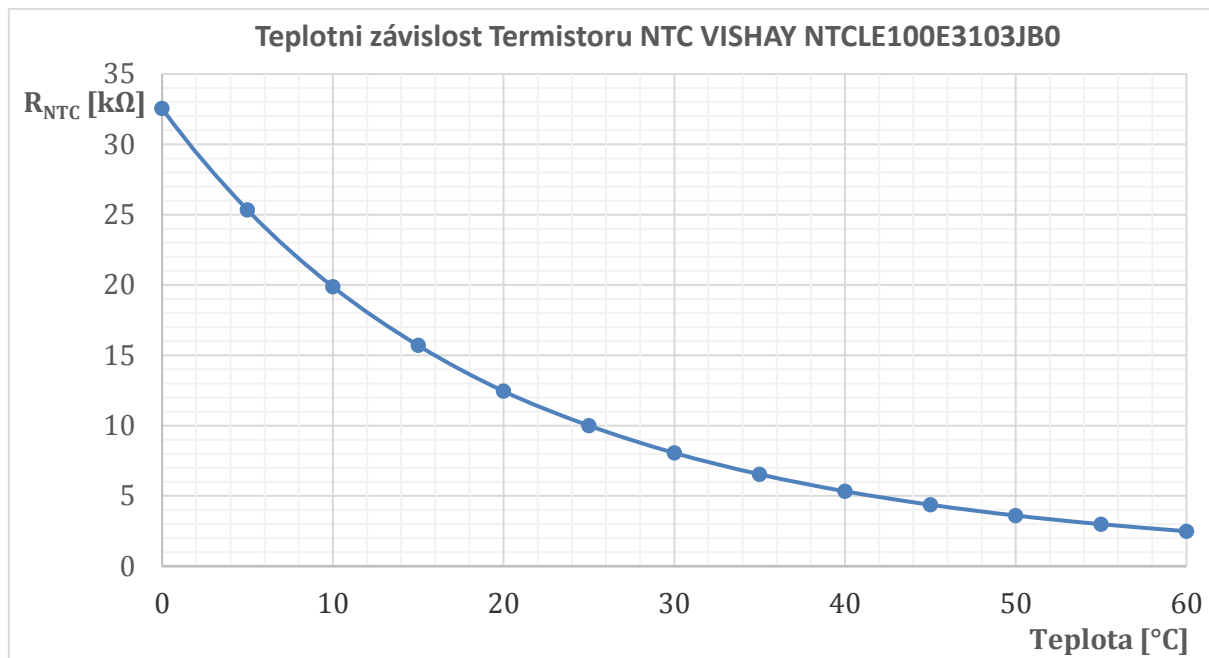


Obr. 37 – Schéma zapojení rezistorové sítě s termistorem k BQ24103A

Rezistory R_{T1} (RF6) a R_{T2} (RF9) tvoří rezistorový dělič napětí připojený na referenční napětí U_{VTSB} . Dělič je zatížený negativním termistorem (NTC), který v závislosti na vlastní

teplotě (resp. teplotě okolí) mění svoji hodnotu elektrického odporu. Jelikož se jedná o termistor negativní, platí tvrzení, že elektrický odpor s rostoucí teplotou klesá.

Pro část obvodu kontroly teploty akumulátoru je ze sortimentu vybrán termistor VISHAY NTCLE100E3103JB0 s nominální hodnotou odporu $R_{NTC} = 10 \text{ k}\Omega$ v pokojové teplotě ($T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$).



Dle závislosti zvoleného termistoru se v dalším kroku vypočítají odpovídající hodnoty rezistorového děliče, které určí požadované napětové úrovně na pinu TS při odchylce z dovoleného teplotního rozsahu. Uvedené primitivní zapojení se chová jako převodník mezi teplotou a elektrickým potenciálem (napětím).

Při hraničních teplotách $T_{COLD} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je odpor $R_{NTC(cold)} = 32,554 \text{ k}\Omega$ a $T_{HOT} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je hodnota $R_{NTC(hot)} = 4,372 \text{ k}\Omega$.

Výpočet rezistoru R_{T2} (RF9):

$$R_{T2} = \frac{U_{VTSB} * R_{NTC(cold)} * R_{NTC(hot)} \left(\frac{1}{U_{LT}} - \frac{1}{U_{HT}} \right)}{R_{NTC(hot)} * \left(\frac{U_{VTSB}}{U_{HT}} - 1 \right) - R_{NTC(cold)} * \left(\frac{U_{VTSB}}{U_{LT}} - 1 \right)} = 64,502 \text{ k}\Omega \quad (27)$$

Výpočet rezistoru R_{T1} (RF6):

$$R_{T1} = \frac{\frac{U_{VTSB}}{U_{LT}} - 1}{\frac{1}{R_{T2}} + \frac{1}{R_{NTC(cold)}}} = \frac{\frac{3,15}{2,315} - 1}{\frac{1}{64502} + \frac{1}{32554}} = 7,81 \text{ k}\Omega \quad (28)$$

Ověření správnosti je možné zpětným výpočtem zatíženého odporového děliče s připojeným referenčním napětím U_{VTSB} . Jedná se o odporový dělič napětí složený z rezistorů

RF6 (R_{T1}) a RF9 (R_{T2}) zatížený negativním termistorem. Pro teplotu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je na pinu TS očekáván potenciál $U_{TS}(0\text{ }^{\circ}\text{C}) = U_{LT} = 2,315\text{ V}$, a to lze ověřit kontrolním výpočtem podle vzorce:

$$U_{TS-HOT} = U_{VTSB} * \frac{R_{T2} * R_{NTC-cold}}{R_{T1} * R_{T2} + R_{NTC-cold} * R_{T2} + R_{T1} * R_{NTC-cold}}$$

$$U_{TS-HOT} = 3,15 * \frac{56 * 10^3 * 32554}{6,8 * 10^3 * 56 * 10^3 + 32554 * 56 * 10^3 + 6,8 * 10^3 * 32554}$$

$$U_{TS-HOT} = 2,366\text{ V} \quad (29)$$

$$U_{TS-HOT} = U_{VTSB} * \frac{R_{T2} * R_{NTC-hot}}{R_{T1} * R_{T2} + R_{NTC-hot} * R_{T2} + R_{T1} * R_{NTC-hot}}$$

$$U_{TS-HOT} = 3,15 * \frac{56 * 10^3 * 4372}{6,8 * 10^3 * 56 * 10^3 + 4372 * 56 * 10^3 + 6,8 * 10^3 * 4372}$$

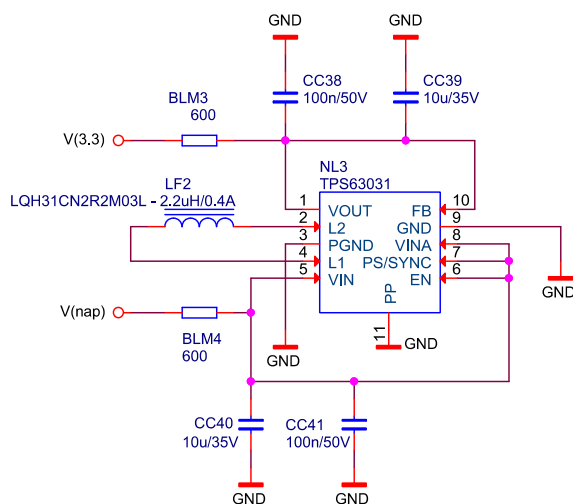
$$U_{TS-HOT} = 1,176\text{ V} \quad (30)$$

Po zvolení hodnot rezistorů s dle dostupných odporových řad (E24) na hodnoty $RT1 = 6,8\text{ k}\Omega$ a $RT2 = 56\text{ k}\Omega$, při jejichž použití je s minimálních odchylkou zachován dělicí poměr, vzniká malá odchylka napětí, kdy požadovaný potenciál na TS při teplotě $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je $U_{LT} = 2,315\text{ V}$ a skutečný potenciál $U_{TS(cold)} = 2,366\text{ V}$. Skutečná odchylka je $\Delta U_{TS} = 50\text{ mV}$.

4.6.2 Zdroj napájecí sítě $U = 3,3\text{ V}$

Pro vytváření napájecího napětí je využit měnič DC-DC pracující v pulzním režimu. Vstupním napětím bloku je nekonstantní napětí baterie, které se mění v rozsahu $U_{BAT} = 2,7\text{ V} \div 4,2\text{ V}$. Požadovaným výstupním napětím je $U_{OUT} = 3,3\text{ V}$, z čehož je patrné, že vstupní napětí může dosáhnout větší nebo naopak menší hodnoty oproti výstupnímu. Těmto podmínkám vyhovuje spínaný měnič principiálně založený na topologii SEPIC (single-ended primary-inductor converter) TPS 63031 od výrobce Texas Instruments.

Integrovaný obvod spínaného měniče TSP 63031 je navržen jako zdroj napájecího napětí $U_{CC} = 3,3\text{ V}$ pro systém, jehož hlavním zdrojem je akumulátor Li-ion nebo Li-polymer (vstupní napětí bloku). Ve spínaném režimu pracuje obvod s interním spínačem induktoru na frekvenci $f_{OSC} = 2,4\text{ MHz}$. V aktivním stavu (připojené V(nap)) měnič plynule přechází z funkčního stavu step-up do stavu step-down při postupném poklesu napětí akumulátoru a opačně.



Obr. 38 - Schéma zapojení pulzního měniče SEPIC s obvodem TPS63031

Napěťový rozsah na vstupu VIN a VINA je $U = 1,8\text{ V} \div 5,5\text{ V}$. Vstup VINA slouží k napájení interní analogově-digitální logiky a vstup VIN je připojen interně připojen k výkonovým spínačům FET. Jak je patrné ze schématu zapojení, že na vstupy L1 a L2 se připojuje induktor, u kterého v tomto případě není podstatná polarita (resp. začátek vinutí). Induktor není nijak magneticky vázán, je použit pouze jako tlumivka.

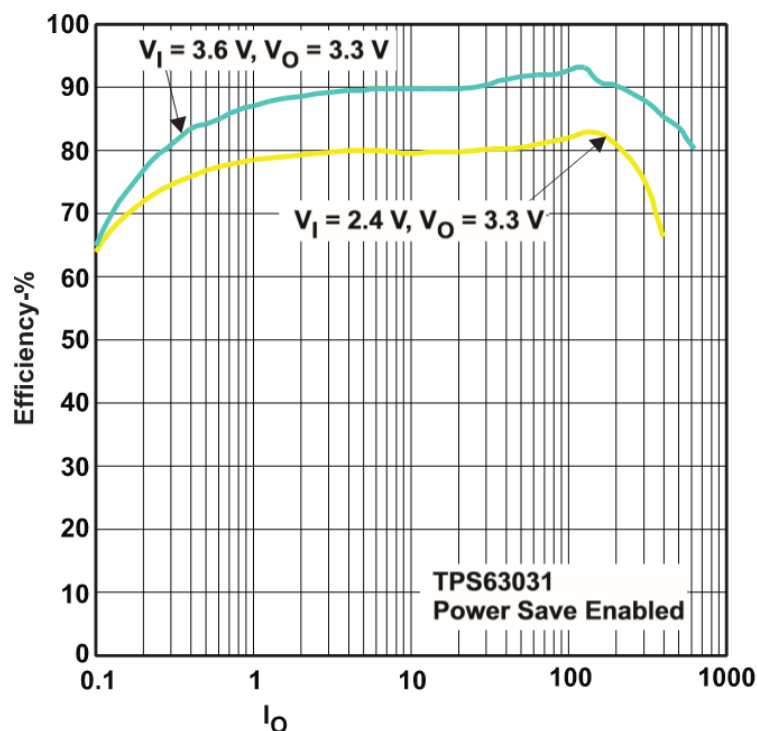
Obvod je vybaven synchronizací a vstupem enable (EN), který řídí interní 3 stavové zesilovače. V tomto případě tyto funkce nejsou využity a piny SYNC a EN je nutno připojit do vysoké úrovně, tedy na vstupní potenciál (napětí akumulátoru). Na spínané výstupu jsou připojeny k zemi výstupní kapacity, které vyhlazují zvlnění výstupního signálu.

Pro regulaci výstupního napětí je využita zpětná vazba (pin FB), která vyhodnocuje úroveň přivedeného potenciálu a na základě jeho velikosti generuje patřičnou úroveň výstupního napětí. Obvody řady TPS6103x verze 61031 při přímém propojení pin V_{OUT} se

zpětnovazebním pinem FB automaticky generují výstupní napětí $U_{OUT} = 3,3 \text{ V}_{DC}$. Funkci zajistí interní odporový dělič nastavený pro požadovanou úroveň napětí na zpětné vazbě.

Odhadovaný maximální proudový odběr sítě $U = 3,3 \text{ V}$ je $I_{SS} = 125 \text{ mA}$.

Podle požadované hodnoty výstupního napětí je ve pulzním režimu DC-DC měniče nastavena u řídicího signálu spínačů ve tvaru signálu modulovaného pulzně šířkovou modulací (PWM) střída tak, aby bylo generováno požadované napětí.



Obr. 39 – Závislost účinnosti DC-DC měniče TPS 61031 dle proudového odběru

Při výstupním napětí $U_{OUT} = 3,3 \text{ V}$ platí podle katalogového listu výrobce uvedená závislost účinnosti na proudovém odběru. Odhadovaná účinnost při minimální dovoleném napětí akumulátoru (vstupního napětí) $V_{BAT} = V_{IN} = 2,7 \text{ V}$ je $\eta = 0,85$ (85 %). Výpočet střídavy řídicího signálu interních spínačů FET je následovný:

$$DC = \frac{U_{OUT} - U_{IN(min)}}{U_{OUT}} = \frac{3,3 - 2,7}{3,3} = 0,1818. \quad (31)$$

K výpočtu zvlnění spínaného proudu na induktoru lze použít univerzální vzorec pro výpočet zvlnění proudu měniče v pulzním režimu:

$$\Delta I_L = 0,4 * I_{OUT(max)} * \frac{U_{OUT}}{U_{IN(min)}} = 0,4 * 0,125 * \frac{3,3}{2,7} = 0,0611 \text{ A}. \quad (32)$$

Optimální hodnota indukčnosti pulzního zdroje v režimu step-up se vypočítá

$$L = \frac{V_{IN(min)} * (V_{OUT} - V_{IN(min)})}{\Delta I_L * f_{OSC} * V_{OUT}} = \frac{2,7 * (3,3 - 2,7)}{0,0611 * 2,4 * 10^6 * 3,3} = 3,3 \mu H. \quad (33)$$

Pro vytvoření vyšší napájecího napětí na výstupu než je na vstupní části $V_{IN} < V_{OUT}$ dodává vstupní zdroj (akumulátor) do tohoto bloku vyšší proud než při $V_{IN} > V_{OUT}$. Z toho lze vyvodit předpoklad vzniku vyšších proudových špiček na induktoru ve spínaném režimu.

Proudové špičky na induktoru v režimu step-up se vypočítají:

$$I_{L(peak)} = \frac{I_{OUT}}{\eta * (1 - DC)} + \frac{V_{IN(min)} * DC}{2f * L}$$

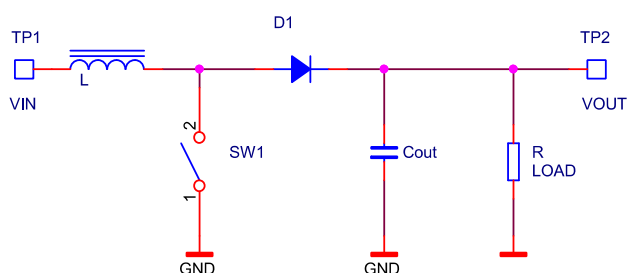
$$I_{L(peak)} = \frac{0,125}{0,85 * (1 - 0,1818)} + \frac{2,7 * 0,1818}{2 * 2,4 * 10^6 * 3,3 * 10^{-6}} = 0,2107 \text{ A.} \quad (34)$$

Pro minimalizaci rizika zasaturování je při výběru induktoru (tlumivky) je volen minimálně 2x vyšší dovolený proud induktorem, tedy alespoň $I_{L(peak)} = 0,4 \text{ A}$.

4.6.3 Zdroj napájecí sítě $U = \pm 9 \text{ V}$

Vytváření potřebného symetrického napájecího napětí slouží blok s pulzním měničem DC-DC označení LT 3580 od výrobce Linear Technology. Možný výstupní napěťový rozsah je do $U_{OUT} = 42 \text{ V}$. Interní struktura spínacích prvků dovoluje dodání výstupního proudu až do hodnoty $I_{SS} = 2 \text{ A}$. Rozsah vstupních napětí je vhodný pro napájení z akumulátoru. Minimální přípustná hodnota napětí $U_{IN} = 2,5 \text{ V}$.

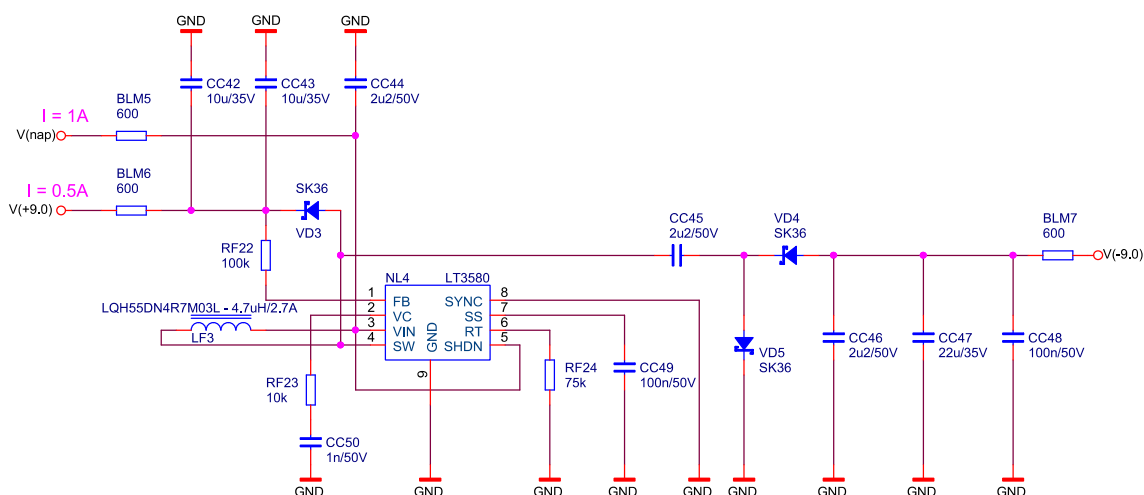
Pro plnění požadované funkce se k integrovanému obvodu obdobně jako v předchozích případech připojují vhodně vybrané externí součástky. Integrovaný obvod LT 3580 a okolní síť součástek je v konfiguraci step-up měniče s výstupním stejnosměrným napětím $U_{OUT} = +9 \text{ V}_{DC}$. K integrovanému obvodu se pro konfiguraci step-up (boost) v základu připojuje externí induktor, shottkyho dioda a vstupní a výstupní filtrační kondenzátory pro vyhlazení pulzního signálu. [21]



Obr. 40 – základní topologie step-up měniče DC-DC [21]

Obvod LT3580 je vybaven dalšími dodatečnými funkcemi. Pomocí zpětnovazebního rezistoru mezi sítí U_{OUT} a pinem FB se nastavuje požadovaná úroveň výstupního napětí nastavitelná v uvedeném rozsahu až do $U_{OUT} = 42 \text{ V}_{DC}$. Pin SHDN (shutdown) lze využít jako kontrolu poklesu napájecího napětí pod minimální hranici (princip UVLO) nebo je možno jej připojit do vysoké úrovně (HIGH) digitální logiky napájecího sítě $U_{DD} = 3,3 \text{ V}$. Na pin RT se připojuje externí rezistor proti GND, který nastavuje požadovanou frekvenci interního oscilátoru, resp. spínače výkonové části. Rozsah nastavitelných frekvencí interního oscilátoru

pomocí externího rezistoru na RT je $f_{osc} = 200 \text{ kHz} \div 2,5 \text{ MHz}$. Obvod má zavedenou funkci soft-start, která zajišťuje plynulý náběh spínaného proudu po zapnutí. Funkce omezuje možné proudové špičky na výstupu v době po zapnutí, kdy zpětná vazba detekuje velkou odchylku od požadovaného výstupního napětí a má tendenci v rychlém sledu dodávat energií výstupním kapacitorům pro nastavení požadované úrovně.



Obr. 41 – Schéma zapojení pulzního měniče step-up s obvodem LT3580

Nastavení zpětnovazebního napětí, tedy požadované výstupní úrovně se docílí výpočtem zpětnovazebního rezistoru ($R_{FB} = R_{F18} + R_{F19}$) podle udávaného vzorce od výrobce pro topologii step-up nebo SEPIC:

$$R_{FB} = \frac{U_{OUT} - 1,215}{83,3 * 10^{-6}} = \frac{9 - 1,215}{83,3 * 10^{-6}} = 93,5 \text{ k}\Omega \quad (35)$$

V případě hodnoty napětí V_{IN} se uvažuje její minimální možná hodnota při vybití baterie, tedy $V_{IN} = 2,7 \text{ V}$, resp. největší rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím, kdy měnič nahromaduje energii z malého potenciálu. Použitá shottkyho dioda SK36 má v propustném směru prahové napětí $U_D = 0,75 \text{ V}$. Maximální hodnotu saturačního napětí tranzistorových spínačů na struktuře čipu je definována $U_{CE(SAT)} = 300 \text{ mV}$. Výpočet střidy řídicího signálu umožní pomocí výpočtu proudových špiček v pulzním režimu i následný výpočet optimální hodnoty indukčnosti konfigurace step-up:

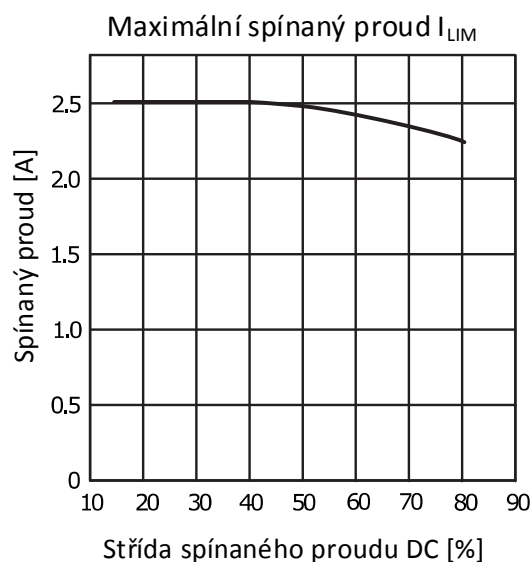
$$DC = \frac{U_{OUT} - U_{IN} + U_D}{U_{OUT} + U_D - U_{CE(SAT)}} = \frac{9 - 2,7 + 0,75}{9 + 0,75 - 0,3} = 0,746 \quad (36)$$

Vyjádření střidy v procentech:

$$DC [\%] = DC * 100 \% = 74,6 \% \quad (37)$$

Frekvence interního oscilátoru, který současně určuje periodu řídicího PWM signálu tranzistorových výkonových spínačů je nastavena na $f_{osc} = 1,2 \text{ MHz}$, což umožňuje použití rozměrově relativně malých induktorů technologie povrchové montáže (SMT). Nutno uvažovat udržení induktoru z pohledu proudových špiček pod hranicí saturace.

Při výpočtu vhodné hodnoty indukčnosti spínaného měniče se uvažuje střída spínaného proudu, minimální vstupní napětí měniče, frekvence interního oscilátoru, požadované výstupní napětí a předpokládaný výstupní proudový odběr. Ve výpočtu se zohledňuje také charakteristika maximálního možného výstupního proudu topologie step-up v závislosti na střídě výstupního proudu, kterou výrobce popisuje pomocí grafické závislosti:



Obr. 42 – Závislost střídy na maximálním výstupním proudu step-up měniče s LT3580

Pro výpočet hodnoty induktoru se maximální proud topologie uvažuje dle závislosti udané výrobcem $I_{LIM} = 2,3 \text{ A}$. Maximální výstupní proud bloku bude řádově v $\approx 100 \text{ mA}$ při maximálním zatížení.

Velmi malé indukty způsobují vyšší zvlnění proudů, a tudíž je vhodné volit vodit dostatečně velkou indukčnost pro danou proudovou zátěž. Na vstupu topologie se uvažuje opět minimální napětí baterie, tedy $U_{BAT-MIN} = U_{IN} = 2,7 \text{ V}$. Majoritní proudový odběr ze sítě $U_{CC} = \pm 9 \text{ V}$ lze očekávat u bloku proudového výstupu generátoru kódu LS, jehož maximální hodnota byla zjištěna experimentálním měřením a jeho hodnota se současně považuje za výstupní proud napájecí bloku, $I_{LS} = I_{OUT} = 300 \text{ mA}$. Typická hodnota účinnosti topologie step-up s LT3580 je přibližně $\eta = 88 \%$. Výpočet minimální hodnoty indukčnosti se provede na základě zmíněných veličin:

$$L_{MIN} = \frac{DC * U_{IN}}{2 * f_{OSC} \left(I_{LIM} - \frac{V_{OUT} * I_{OUT}}{V_{IN} * \eta} \right)} = \frac{0,746 * 2,7}{2 * 1,2 * 10^6 \left(2,3 - \frac{9 * 0,3}{2,7 * 0,88} \right)} =$$

$$= 0,721 \mu H \quad (38)$$

Obvod LT3580 je vybaven kompenzací, která brání nežádoucím oscilacím v případech výstupního proudu se střídou vyšší než 50 %. Pro správnou funkci kompenzace musí být tedy splněna současně podmínka o minimální hodnoty indukčnosti podle rovnice:

$$L_{MIN} > \frac{U_{IN} * (2 * DC - 1)}{f_{OSC} * (1 - DC)} = \frac{2,7 * (2 * 0,746 - 1)}{1,2 * 10^6 * (1 - 0,746)} = 4,35 \mu H \quad (39)$$

Při výběru induktoru je vhodné volit nejbližší vyšší hodnotu z řady sortimentu indukčností cívek vzhledem k minimální doporučené hodnotě. Volba nadměrné hodnoty indukčnosti není z hlediska snímání proudu zpětnou vazbou integrovaného spínaného měniče vhodná z důvodů vyššího proudového zvlnění na induktoru, které se zavádí také do zpětnovazebního bloku. Tento fakt může způsobovat v dané okamžiky chybné vyhodnocení výstupních parametrů, což vede k chybné regulaci spínacích cyklů. Proto je pro spínaný měnič LT3580 volen externí induktor o hodnotě indukčnosti $L = 4,7 \mu H$.

Výběru induktoru přísluší taktéž úvaha výskytu proudových špiček v tomto pulzním režimu. Velikost špiček je závislá na vstupních a výstupních veličinách a také na parametrech spínacího režimu, především frekvence a střída. Špičková hodnota proudu je vypočítána podle:

$$I_{PEAK} = \frac{U_{OUT} * I_{OUT}}{U_{IN} * \eta} + \frac{U_{IN} * DC}{2 * L * f_{OSC}} = \frac{9 * 0,3}{2,7 * 0,88} + \frac{2,7 * 0,746}{2 * 4,7 * 1,2} = 1,315 A \quad (40)$$

Nastavení frekvence interního oscilátoru se provádí připojením externího rezistoru na pin RT a hodnota odporu rezistoru je zvolena na základě požadované frekvence oscilátoru. V konkrétní aplikaci byla zvolena spínací frekvence $f_{OSC} = 1,2$ MHz. Hodnota externího rezistoru RF21 je dopočtena na základě hodnoty frekvence podle závislosti udanou výrobcem:

$$R_T = \left(\left(\frac{91,9}{f_{OSC}} * 10^6 \right) - 1 \right) * 10^3 = 75,583 k\Omega \quad (41)$$

Výstupní kapacita se na základě možných aplikací a výstupního rozsahu obvodu. Vhodnou volbou je kondenzátor MLCC (multi-layer ceramic capacitor) s nízkou hodnotou sériového odporu (ESR) k minimalizaci zvlnění výstupního napětí. Optimální hodnota je kapacity je z horní hranice rozsahu vyráběných keramických kondenzátorů, tedy řádově do $\approx 10 \mu F$.

Výše popsané výpočty a teoretický popis funkce bloku step-up měniče primárně generuje pouze kladné napájecí napětí $U_{CC} = +9 V_{DC}$. Pro vytvoření symetrického napájení se nabízí možnost doplnění bloku o další integrovaný obvod invertující topologie, který obvykle dovoluje zápornou napájecí větev napájet vysokými proudy srovnatelnými s proudy v kladné napájecí větvi. Jelikož je zápornou větví napájen pouze napěťový výstup s velmi malými výstupními proudy a operační zesilovače, jejichž proudová spotřeba je řádově ≈ 1 mA, lze za přijatelné řešení přijmout použití tzv. nábojové pumpy pro malé proudy.

Obvodové zapojení nábojové pumpy se skládá v základu ze 2 kondenzátorů a 2 diod. Pro uvedení nábojové pumpy do funkce se na vstupní svorce předpokládá pulzní průběh. V uvedeném měniči step-up s obvodem LT3580 lze využít přítomného pulzního signálu, regulovaného na požadovanou výstupní úroveň. V průběhu funkce obvodu se tento pulzní průběh objevuje na pinu SW obvodu LT3580 a jeho úroveň se mění mezi potenciálem GND a regulovaným napětí na výstupu bloku, tedy $U_{OUT} = +9 V_{DC}$. Jelikož princip nábojové pumpy využívá akumulace náboje v kapacitorech v rámci přechodových jevů, tudíž zapojení nelze uvést do chodu konstantním vstupním potenciálem. [20]

V první fázi se na pinu SW obvodu LT3580 objeví úroveň výstupního napětí bloku, které nabije kondenzátor CC37 a proud teče přes diodu VD3 zpět do GND. Dioda VD2 je v tomto stavu polarizována v závěrném směru, tudíž skrze ní neprotéká proud.

V druhé fázi se na pinu SW obvodu LT3580 objevuje úroveň potenciálu GND. Kladně nabitá svorka kondenzátoru CC37 je připojena na GND a proud obvodem protéká v opačném směru, tedy přes kondenzátor CC37 a diodu VD2, která je v této fázi polarizována propustně. Proud do anody diody VD2 teče z GND přes výstupní kapacitoru CC39, CC40 a CC41. Výstupní kapacitory slouží jako filtrační (vyhlazují výstupní časově proměnný průběh signálu). Po několika cyklech po zapnutí systému se postupně výstupní kapacity nabíjí na požadovaný potenciál. Vlivem průchodu proudu z GND do diody VD2 je výstupní potenciál záporný. [20]

4.6.4 Zapojení procesoru

Řízení systému, nastavení parametrů výstupních signálů a dalších náležitostí zajišťuje mikrokontrolér (procesor), resp. vytvořený řídicí firmware. Ovládací firmware v procesoru uložen v non-volatilním paměťovém prostoru mikrokontroléru. Firmware v mikrokontroléru uchovává paměť typu FLASH, která nevyžaduje přítomnost napájecího napětí k zachování stavu paměťových buněk.

Obvodové bloky, které je všeobecně funkčně náročné sestavit pro plnění daných funkcí jsou řešeny právě během firmwaru, který požadované funkce zajistí digitálními logickými stavy (logické vstupy, výstupy a komunikační sběrnice).

Procesor disponuje digitální logikou pro maximální napájecí napětí $V_{DD} = 3,6 V$. Pro napájení procesoru je využito dostupné napájecí napětí $V_{DD} = 3,3 V$, které je generováno spínaným DC-DC měničem. U napájecích pinů V_{DD} a AV_{DD} jsou použity blokovací kondenzátory o velikosti $C = 100 nF$.

Výstupní proud 2 vstupně-výstupních pinů je maximálně $I_{I/O(max)} = 8 mA$ při charakteru proudového zdroje i proudové nory. Pro všechny digitální porty současně je maximální proud $I_{(max)} = 200 mA$. Hodnota je taktéž totožná pro charakter proudových zdrojů i proudových nor.

4.6.5 Blok generace signálů liniového systému

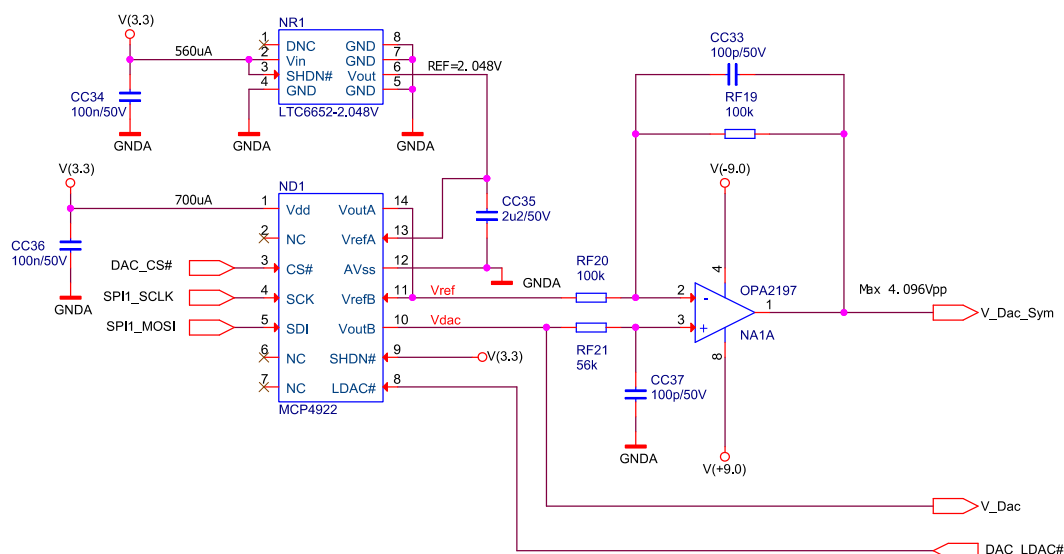
Blok pro generaci signálů vlakového zabezpečovače je rozhraní mezi digitální logikou softwarové generace signálů a analogovou částí systému zakončené výstupy z testeru vlakového zabezpečovače.

Základní komponentu tvoří dvojitý 12-bitový D/A převodník MCP 4922 řízený sběrnici typu SPI. V pouzdru součástky MCP 4922 se nachází 2 nezávislé D/A převodníky (společné je pouze napájecí napětí logiky V_{DD} a vstupní modul komunikační sběrnice). Každý z převodníků má vlastní napěťový vstup pro referenční potenciál. V uvedeném zapojení jsou pro činnost převodu softwarově generovaného signálu využity oba dostupné D/A převodníky.

Převodník **DAC_A** je využit jako softwarově řízená reference pro převodník **DAC_B**. Z toho plyne, že externí referenční napětí je připojeno na referenční vstup převodníku **DAC_A** a výstup tohoto převodníku je přiveden na referenční vstup převodníku **DAC_B**. Převodník **DAC_B** slouží k převodu průběhu generovaného signálu. Činnost převodníku **DAC_A** funguje jako regulace amplitudy generovaného průběhu. Z toho plyne, že rozkmit výstupního generovaného signálu na výstupu převodníku **DAC_B** bude vždy mezi $GNDA$ a V_{OutA} , resp. $GNDA$ a V_{RefB} .

Pro vytvoření externího referenčního napětí je využit přesný napěťový referenční obvod LTC6652-2 s trvalým výstupním napětím $U_{REF} = 2,048\text{ V}$ jako násobek n -bitového rozsahu vstupních převáděných dat ($n_B = 12\text{ bitů}$). Z toho plyne, že regulace s krokem 1 LSB změní výstupní napětí o hodnotu:

$$\Delta U_{OutB} = \frac{1\text{ bit}}{2^{n_B}} * U_{REF} = \frac{1}{2^{12}} * 2,048 = 0,5\text{ mV} \quad (42)$$



Obr. 44 – Schéma zapojení bloku D/A převodu generovaného signálu

Pro koncový stupeň proudového výstupu je využit přímo výstupní signál výstupu V_{OutB} o rozsahu od GND_A po V_{RefB} . Koncový stupeň napětového výstupu vyžaduje časově proměnný signál s nulovou stejnosměrnou složkou. Pro symetrizaci časově proměnného průběhu na V_{OutB} podle potenciálu GND_A je použit operační zesilovač v zapojení jako rozdílový zesilovač.

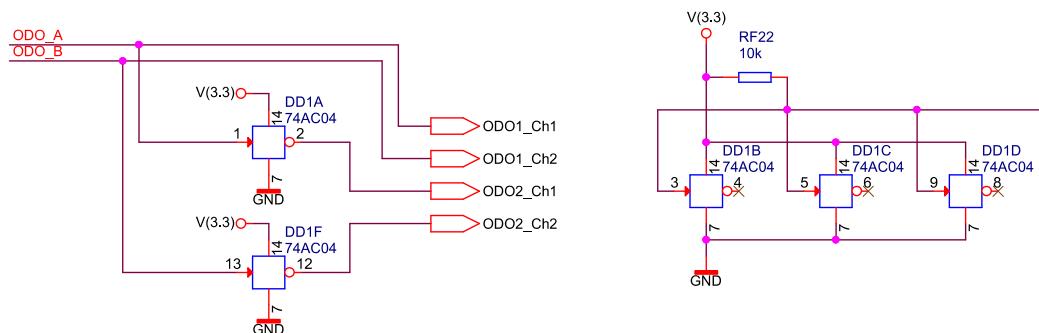
Princip spočívá v zesílení časově proměnného průběhu V_{OutB} na dvojnásobek původního rozkmitu a následném odečtení stejnosměrné složky, která v tomto případě přímo odpovídá hodnotě napětí nastavené reference V_{OutA} , resp. V_{RefB} . Zesílení symetrizačního rozdílového zesilovače odpovídá:

$$A = 1 + \left(\frac{RF16}{RF15} \right) - \left(\frac{RF15}{RF16} \right) \quad (43)$$

4.6.6 Blok logických (digitálních) obvodů

Na bloku schématu zapojení digitálních obvodů je využito několik základních zapojení pro plnění určitých funkcí.

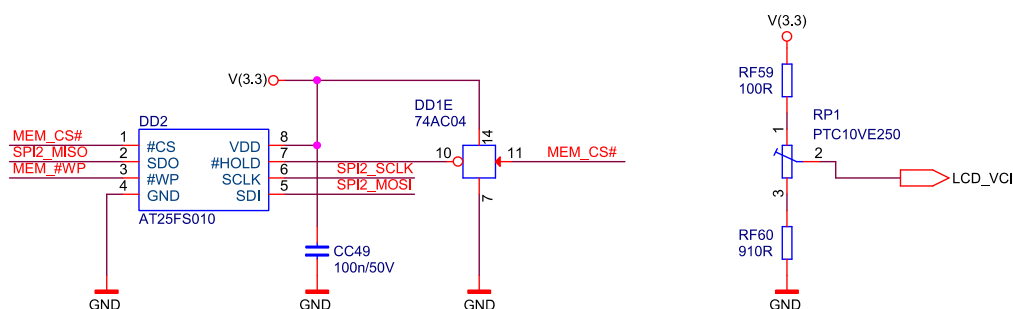
Ze schématu zapojení je patrné využití obvodu 74AC04 pro vytváření inverze 2 kanálů signálu odometrie. Logické hradlo 74AC04 je integrovaný obvod s 6ti logickými hradly invertoru. Invertor překlápí vstupní úroveň do opačné logické úrovně na výstupu. Nevyužitá logická hradla integrovaného obvodu jsou zapojena do vysoké úrovně HIGH na vstupu tak, aby výstupní část byla přitažena k potenciálu GND . Výstupem této digitální části jsou 4 kanály signálu odometrie s fázovými posuvy $\varphi_{ODO} = 90^\circ$ mezi sousedními kanály.



Pro ukládání předchozího nastavení parametrů nebo oblíbených, resp. často používaných nastavení výstupních parametrů testovacího zařízení slouží externí paměťový obvod s paměťovými buňkami typu FLASH o velikosti 1 MB a sériovým rozhraním SPI. Paměťový obvod je vybaven logickým vstupem WRITE PROTECT pro ochranu proti zápisu. Při logické nule na tomto vstupu je možné z paměťových buněk pouze číst. Logický vstup HOLD pozastavuje komunikaci na sériovém rozhraní. V této aplikaci nemá využití a je aktivován inverzně se signálem chip select, který je na tomto rozhraní aktivní v úrovni LOW.

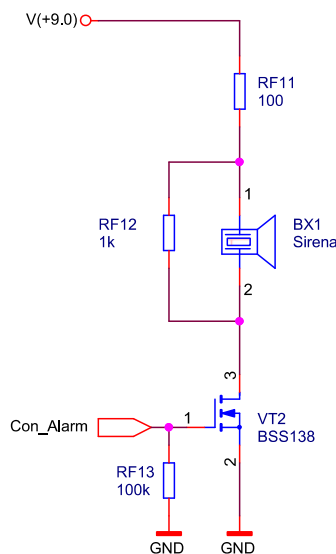
Pro kalibraci nastavení kontrastu znakového pole LCD displeje slouží trimr, který je v sérii zapojen s rezistorem proti U_{DD} i proti GND . Připojení těchto rezistorů vymezuje hranice regulace výstupního napětí mezi $U_{(LCD_VCI)} = 2,35 \div 3,05$ V. Kalibrace kontrastu probíhá

jednorázově při prvním nahrávání firmwaru do nového zařízení, proto není nutností jakýkoliv způsob vyvedení trimru nebo jeho ovládacího prvku do čelního panelu zařízení.



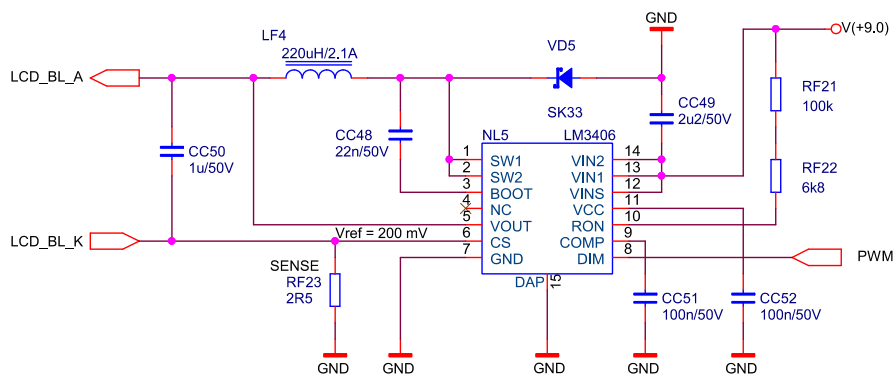
Obr. 45 – Schéma zapojení paměťového obvodu AT25FS010

Signalizaci stisku libovolné klávesy numerické klávesnice a doplňkových ovládacích tlačítek zajišťuje piezo siréna na stejnosměrné napětí do velikosti $U_p = 12\text{ V}$. Firmware mikrokontroléru zajišťuje kontrolu stisku libovolné klávesy a v návaznosti na stisk reaguje změnou úrovně na digitálním výstupu připojeném na spínač s FET tranzistorem. Spínač má v zátěži připojen zmíněnou piezo sirénu.



Obr. 46 – Schéma zapojení spínače FET s piezo sirénou

Z důvodů nutnosti otevření LED diod pro podsvícení LCD displeje je nutno prahové napětí až $U_{AK} = 3,6\text{ V}$ je vhodné z dostupných napájení pro snížení výkonových ztrát použít obvod driveru pro LED diody topologie step-down místo předřadného odporu k vyššímu dostupnému napájení.



Obr. 47 – Schéma zapojení spínaného step-down LED driveru

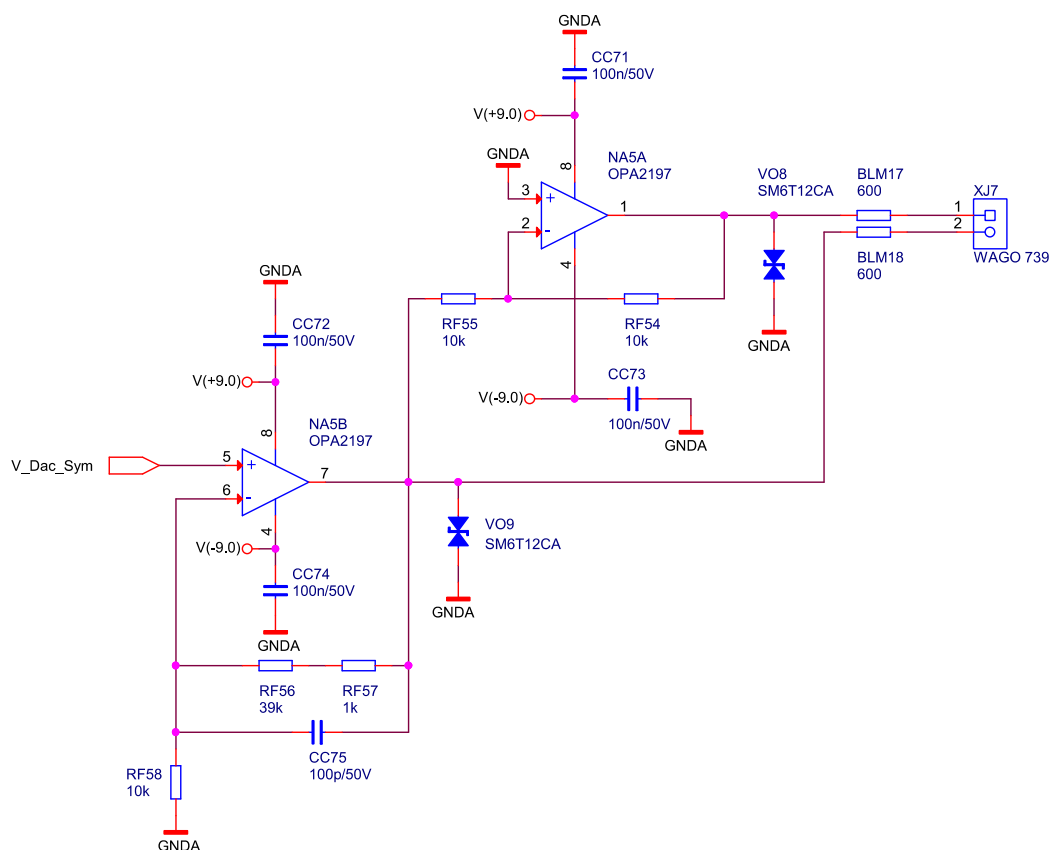
Popsanou aplikaci zajišťuje blok spínaného měniče step-down LM3406 (topologie „buck“), jehož vstupní brána je připojena na napájecí napětí $U_{CC} = +9 V_{DC}$. Výstupní napětí je konfigurováno pro zapojení 1 LED diody s prahovým napětí $U_{AK} = 3,6 V$. Obvod je vybaven nastavitelnou ochranou maximálního proudu diodou. Princip ochrany je založen na referenčním napětí na pinu CS připojeném přímo na katodu diody a snímacím rezistorem proudu připojeným mezi katodou a potenciálem GND. Na tomto rezistoru (RF23) se bude trvale udržovat referenční napětí a velikost odporu určí maximální možný proud diodou.

Obvod LM3406 slučuje také funkce PWM controlleru. Z toho plyne, že obvod současně efektivně snižuje napájecí napětí pro diody podsvícení a tento spínaných signál současně moduluje pulzně šířkovou modulací PWM. Signál PWM není generován interně, ale je nutno jej přivést v logických úrovních logiky napájené $U_{DD} = 3,3 V$ na vstup obvodu DIM.

4.6.7 Koncový stupeň generátoru kódu s napěťovým výstupem

Zapojení koncového stupně s napěťovým výstupem navazuje na symetrický napěťový výstup bloku generace signálu liniového systému. V tomto bloku se za pomoci operačních zesilovačů signál zesiluje na požadovanou výstupní úroveň. Mimo jiné je signál přetransformován na výstupní napěťové svorky do symetrického signálu bez vyvedení středového zemního potenciálu, i když střední hodnota výstupního signálu potenciálu země (GNDA) odpovídá.

Výstupní signál je ekvivalentní k výstupnímu signálu 2 anti-sériových (z pohledu elektrického zapojení se jeví jako sériové) snímačů kódu. Snímače kódu se jeví v přenosové cestě jako vstupní zdroj signálu pro vlakový zabezpečovače (indukuje se napětí). Snímač kódu je však samostatně plovoucím prvkem v elektrickém zapojení, protože žádný z jeho vývodů není vztažen k zemnímu potenciálu. Avšak na úrovni vlakového zabezpečovače je společná svorka sériově zapojených snímačů vyvedena do místního zemního potenciálu. Z tohoto důvodu je možno generovat výstupní signál symetrický dle potenciálu země GNDA, tedy 0 V.



Obr. 48 - Schéma zapojení koncového stupně generátoru kódu s napěťovým výstupem

Zapojení operačního zesilovače NA5B je neinvertujícím zapojením zesilovače, které zesiluje vstupní signál podle vzorce:

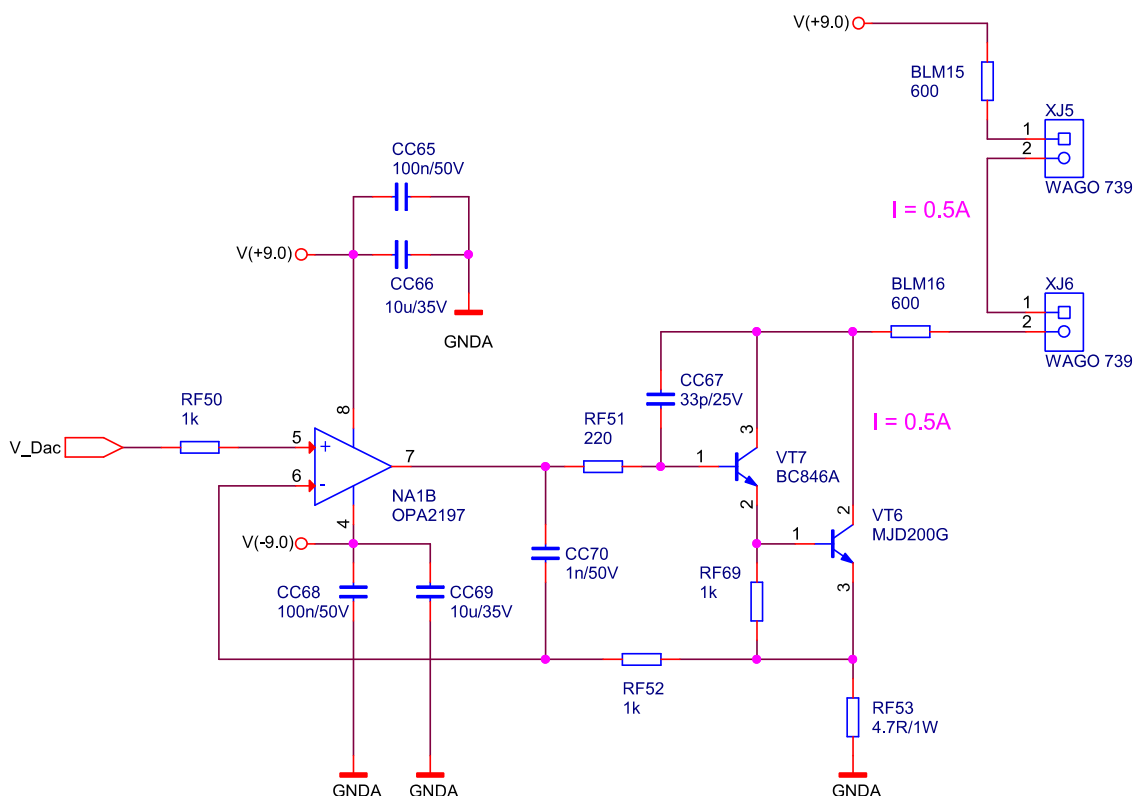
$$A = 1 + \left(\frac{RF53 + RF54}{RF55} \right) = 1 + \frac{(39 + 1) \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 5 \quad (44)$$

Operační zesilovač NA5A je v zapojení invertující operačního zesilovače. Tím se mění fázový posuv signálu o 180° a výstup se poté jeví jako symetrický signál podle GNDA.

Napěťové výstupy jsou chráněny proti přepětí pomocí polovodičových tranzistů, které v případě překročení stanoveného hraničního napětí garantují zkratování vlastní struktury, a tak chrání citlivé prvky proti zničení nadměrným externím napětím na výstupu (v tomto případě se externí napětí jeví pro systém jako vstupní).

4.6.8 Koncový stupeň generátoru kódu s proudovým výstupem

Koncový stupeň s proudovým výstupem navazuje na napěťový výstup bloku generace signálu liniového systému bez symetrizace. Z toho plyne, že generovaný signál s sebou nese stejnosměrnou složku, která je polovinou nastaveného referenčního napětí D/A převodníku, resp. polovina amplitudy harmonického signálu v bloku generace kódu liniového systému.



Obr. 49 – Schéma zapojení koncového stupně generátoru kódu s proudovým výstupem

Koncový stupeň je koncipován jako proudový zdroj s operačním zesilovačem, kdy se využívá záporné zpětné vazby k zavedení nulového rozdílového napětí na vstupu operačního zesilovače. Potenciál na vstupní svorce bloku se poté objevuje také na rezistoru RF50, který slouží pro nastavení proudu do výstupní proudové větve. Uzel nad rezistorem RF50 se potom pro tranzistor VT6 jeví jako proudová nora, která zadefinuje emitorový, resp. kolektorový proud tohoto tranzistoru. Podobným postupem se zadefinuje požadovaný proud kolektoru i u tranzistoru VT5. Pro výstup operačního zesilovače se celá proudová posilovací část s tranzistory VT5 a VT6 jeví jako jedna proudová nora, do které operační zesilovač dodá požadovaný proud, což doprovází nastavení prahových napětí tranzistorů.

Jelikož tranzistor VT6 ve větvi budícího proudu je v této větvi připojen s rezistorem RF50 malé hodnoty $R = 4,7 \, \Omega$ a výstupní budící smyčky mají impedanci na úrovni impedance dlouhého vodiče (36 závitů), jejichž odpor je řádově $R \approx 1 \, \Omega$, je na tomto tranzistoru předvídatelná zvýšená výkonová ztráta, kterou lze ověřit teoretickým výpočtem. Změřený odpor 2 budících smyček v sérii připojených na proudový výstup je $R_{BS} = 1,8 \, \Omega$. Maximální očekávaný efektivní proud smyčkou je $I_{OUT} = 300 \, \text{mA}$. Pro výkonovou ztrátu na tranzistoru VT6 platí:

$$\begin{aligned}
 P_{Z(VT6)} &= [U_{CC} - (I_{OUT} * R_{BS}) - (I_{OUT} * RF50)] * I_{OUT} = \\
 &= [9 - (0,3 * 1,8) - (0,3 * 4,7)] * 0,3 = 2,115 \, \text{W}
 \end{aligned}
 \tag{45}$$

Z důvodů zvýšené výkonové ztráty je třeba volit výkonový tranzistor s chladicí plochou (nejčastěji na kolektoru tranzistoru). Podobně je třeba uvažovat výkonovou ztrátu na rezistoru RF50, kterou lze spočítat podle:

$$P_{Z(RF50)} = RF50 * I_{OUT}^2 = 4,7 * 0,3^2 = 0,423 \text{ W} \quad (46)$$

S ohledem na stárnutí součástky vlivem nadměrného výkonového (tepelného) namáhání je vhodné volit součástky do provozního režimu na polovinu maximálního výkonového zatížení. V případě rezistoru RF50 se tedy doporučuje volba této součástky pro výkonové zatížení alespoň $P = 1 \text{ W}$.

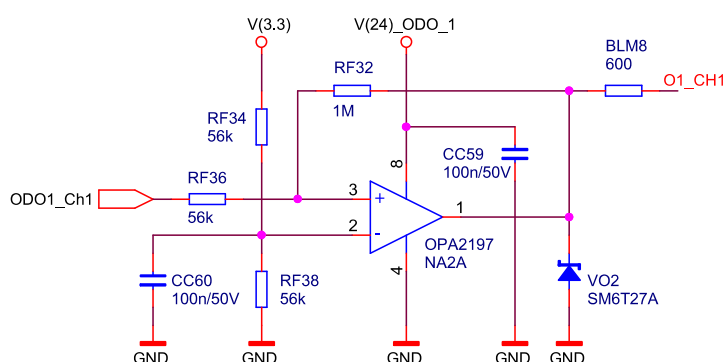
Koncový stupeň má 2 výstupní konektory ve stejné proudové větvi pro připojení budících proudových smyček s využitím při nepřímém buzení vstupu vlakového zabezpečovače formou magnetické vazby na snímač kódu.

4.6.9 Koncový stupeň generátoru signálů odometrie

Výstupní část obvodu generátoru signálů odometrie se skládá z komparátoru s použitím operačního zesilovače s kladnou zpětnou vazbou pro nastavení hysterezního napětí.

Jako referenční napětí pro komparátor je zavedena polovina napájecího napětí $U_{DD} = 3,3 \text{ V}$. Napětí je děleno odporovým děličem s poměrem rezistorů 1:1. V případě vzniku odchylky napájecí sítě se změna projeví taktéž na procesoru, který je připojen na totožnou napájecí síť jako referenční napětí komparátoru. Blok v tomto případě zůstává funkční.

V sekci odometrie je tento blok komparátoru využit 4krát. První 2 kanály jsou přitaženy k externímu napájecímu napětí $U_{ODO(1)}$ maximální hodnoty $U = 24 \text{ V}$. Zbylé 2 kanály jsou přitaženy k napájecímu napětí $U_{ODO(2)}$ stejné velikosti. Oddělení napájecích napětí je navrženo z důvodu simulace přítomnosti 2 snímačů otáček, každý s vlastním napájením.



Obr. 50 – Schéma zapojení koncového stupně generátoru odometrie

4.7 Teoretický výpočet příkonu TESTERU

Při výpočtech celkového příkonu zařízení testeru vlakového zabezpečovače se uvažují účinnosti DC-DC měničů LT3580 (pro síť $U_{CC} = \pm 9 V_{DC}$) a TPS61031 (pro síť $U_{CC} = +3,3 V_{DC}$).

Účinnost DC-DC měniče s obvodem LT3580 je $\eta_{(9V)} = 87 \%$ a účinnost měniče SEPIC s obvodem TPS61031 $\eta_{(3,3V)} = 93 \%$.

Při výpočtech uvažují maximální zatížení a současný provoz všech paralelních bloků. Neuvažují se bloky a součástky, které nemají výrazný vliv na snížení možné doby provozu přístroje.

V uvedených tabulkách je shrnut proudový odběr všech součástek (bloků) připojených k dané napájecí síti. Jedná se o výstupní proud spínaných měničů generujících napájecí napětí.

Tab. 10 – Maximální proudové spotřeby bloků připojených na síti $U_{CC} = 3,3 V_{DC}$

Blok (obvod)	I_{CC}
[-]	[mA]
MCP4922	0,7
LTC6652	0,56
SG310	2
PIC24HJ128GP204	30
Blok s trimrem	2,5
AT25FS010	15
MCP41010	1

Celková proudová spotřeba napájecí sítě $U_{CC} = 3,3 V_{DC}$ dle tab. 10 je:

$$I_{CC(3,3V)} = 0,7 + 0,56 + 2 + 30 + 2,5 + 15 + 1 = 52 \text{ mA.} \quad (47)$$

Tab. 11 - Maximální proudové spotřeby bloků připojených na síti $U_{CC} = \pm 9 V_{DC}$

Blok (obvod)	$I_{CC(\pm 9V)}$
[-]	[mA]
OPA197 _(VCC+)	12,5
OPA197 _(VCC-)	7,5
LM3406	90
Proudová smyčka (RMS)	220

Celková proudová spotřeba napájecí sítě $U_{CC} = \pm 9 V_{DC}$ dle tab. 11 je:

$$I_{CC(\pm 9V)} = 12,5 + 7,5 + 90 + 220 = 360 \text{ mA,} \quad (48)$$

Výkon v napájecí síti $U_{CC} = 3 V_{DC}$ (výkon DC-DC měniče na výstupu):

$$P_{2(3,3V)} = U_{CC} * I_{CC(3,3V)} = 3,3 * 0,052 = 0,1716 \text{ W,} \quad (49)$$

Příkon DC-DC měniče, resp. výkon dodávaný akumulátorem:

$$P_{1(3,3V)} = \frac{P_{2(3,3V)}}{\eta_{(3,3V)}} = \frac{0,1716}{0,93} = 0,185 \text{ W}, \quad (50)$$

Výkon v napájecí síti $U_{CC} = \pm 9 \text{ V}_{DC}$ (výkon DC-DC měniče na výstupu):

$$\begin{aligned} P_{2(\pm 9V)} &= U_{CC+} * I_{CC(9V)} + U_{CC-} * I_{CC(-9V)} = 9 * 0,3525 + 9 * 0,0075 = \\ P_{2(\pm 9V)} &= 3,17 + 0,0675 = 3,237 \text{ W}, \end{aligned} \quad (51)$$

Příkon DC-DC měniče, resp. výkon dodávaný akumulátorem:

$$P_{1(\pm 9V)} = \frac{P_{2(\pm 9V)}}{\eta_{(\pm 9V)}} = \frac{3,237}{0,87} = 3,720 \text{ W}, \quad (52)$$

Celkový požadovaný příkon systému testeru vlakového zabezpečovače odpovídá:

$$P = P_{1(\pm 9V)} + P_{1(3,3V)} = 3,905 \text{ W}. \quad (53)$$

4.7.1 Výpočet doby běhu TESTERU

Celková teoretická doba běhu zařízení je uvažována ve stavu, kdy jsou aktivní všechny výstupní brány (generátorů) TESTERU na maximálních hodnotách (maximalizace proudové spotřeby). V případě použití akumulátoru s nižší kapacitou = 7,8 Ah je teoretická doba běhu při maximální zatížení všech bloků:

$$t = \frac{U_{BAT} * 7,8}{P} = \frac{4,2 * 7,8}{P} = 8,38 \text{ hod.} \quad (54)$$

Při použití akumulátoru s kapacitou = 10,4 Ah se doba běhu navyšuje na:

$$t = \frac{U_{BAT} * 10,4}{P} = \frac{4,2 * 10,4}{P} = 11,18 \text{ hod.} \quad (55)$$

4.8 Simulace LT-SPICE

Pro vyšetření hodnot elektrických veličin v částech schématu zapojení se používá simulační software vyvinutý společností Linear Technology. Simulační prostředí umožňuje sestavit schéma zapojení se zavedením simulačního profilu tranzientního typu (časová simulace), AC a DC analýza a analýzy šumu.

V simulačním programu LT spice je testováno zapojení spínaného DC-DC měniče step-up s integrovaným obvodem LT3580 určený jako zdroj sítě $U_{CC} = \pm 9 \text{ V}$. K tomuto zapojení je přidružena nábojová pumpa pro generaci záporného napájecího napětí $U_{CC-} = -9 \text{ V}$. Korektní funkce zapojení s nábojovou pumpou je ověřena tranzientním typem analýzy. Očekávanými vlastnostmi je plynulý náběh kladného i záporného napájecího napětí po zapnutí (přivedení napětí na vstup bloku s LT3580), přesnost napájecího napětí v kladné i záporné napájecí větvi a schopnost nábojové pumpy v záporné napájecí větvi napájet požadovanou zátěž (operační zesilovače). Očekávaná proudová spotřeba záporné napájecí větve je maximálně $I_{CC-} = 4 \text{ mA}$.

4.9 Ovládací firmware

Ovládací firmware je zdrojový kód nahraný v paměti mikrokontroléru PIC24J128GP204. Pro vývoj firmwaru pro zařízení tester vlakového zabezpečovače je využito vývojové freeware prostředí MPLAB verze 1.95 od společnosti Microchip. Tento software slouží jako vývojové prostředí pro embedded aplikace postavené na mikrokontrolérech PIC a dsPIC.

Firmware testeru vlakového zabezpečovače slouží primárně k nastavení výstupních parametrů signálů vlakového zabezpečovače ve věci generování kódu liniového systému přímou digitální syntézou kmitočtu a generování obdélníkových pulzů přesné frekvence. Zajišťuje zobrazení a ovládání uživatelského menu, které se zobrazuje na LCD displeji a je ovládáno pomocí tlačítek.

4.9.1 Generátor signálu vlakového zabezpečovače

V programové části generátoru kódu je zavedena tabulka hodnot pro vytvoření sinusového průběhu $y = \sin(x)$ a signálu $y = \sin(x) + \sin(3x)$ pro případ použití nosné frekvence základního sinusového průběhu se 3. harmonickou složkou signálu. Pro generaci DDS a korektní plnění fázového akumulátoru DDS je nutno, aby počet hodnot tabulky signál byl v násobcích 2^n .

Princip generace je založen na zasílání jednotlivých vzorků z tabulky na externí D/A převodník, resp. zasílání dat na sběrnici SPI, která propojuje mikrokontrolér s D/A převodníkem. Zasílání vzorků na sběrnici probíhá v časové smyčce v přesně definovaných časech. Proměnná delta registru určuje výstupní frekvenci signálu formou stanovení kroku mezi vzorky z tabulky. Lze konstatovat, že hodnota delta registru určuje rychlost naplnění fázového akumulátoru.

Fázový akumulátor je reprezentován 16bitovou proměnnou, tzn. počet bitů fázového akumulátoru je 16. Při nastavení frekvence f_{out} se použije nastavení delta registru D podle vzorce:

$$D = 2,5 * f_{out} \quad (56)$$

Z toho plyne že minimální hodnota delta registru při nastavení minimální výstupní frekvence $f_{MIN} = 20 \text{ Hz}$:

$$D_{MIN} = 2,5 * f_{MIN} = 50 \quad (57)$$

Frekvence hodinového signálu pro přímou digitální syntézu f_{CLK} se stanoví na základě počtu bitů fázového akumulátoru n , minimální požadované frekvence výstupního signálu a jí odpovídající hodnoty delta registru při f_{MIN} podle vzorce:

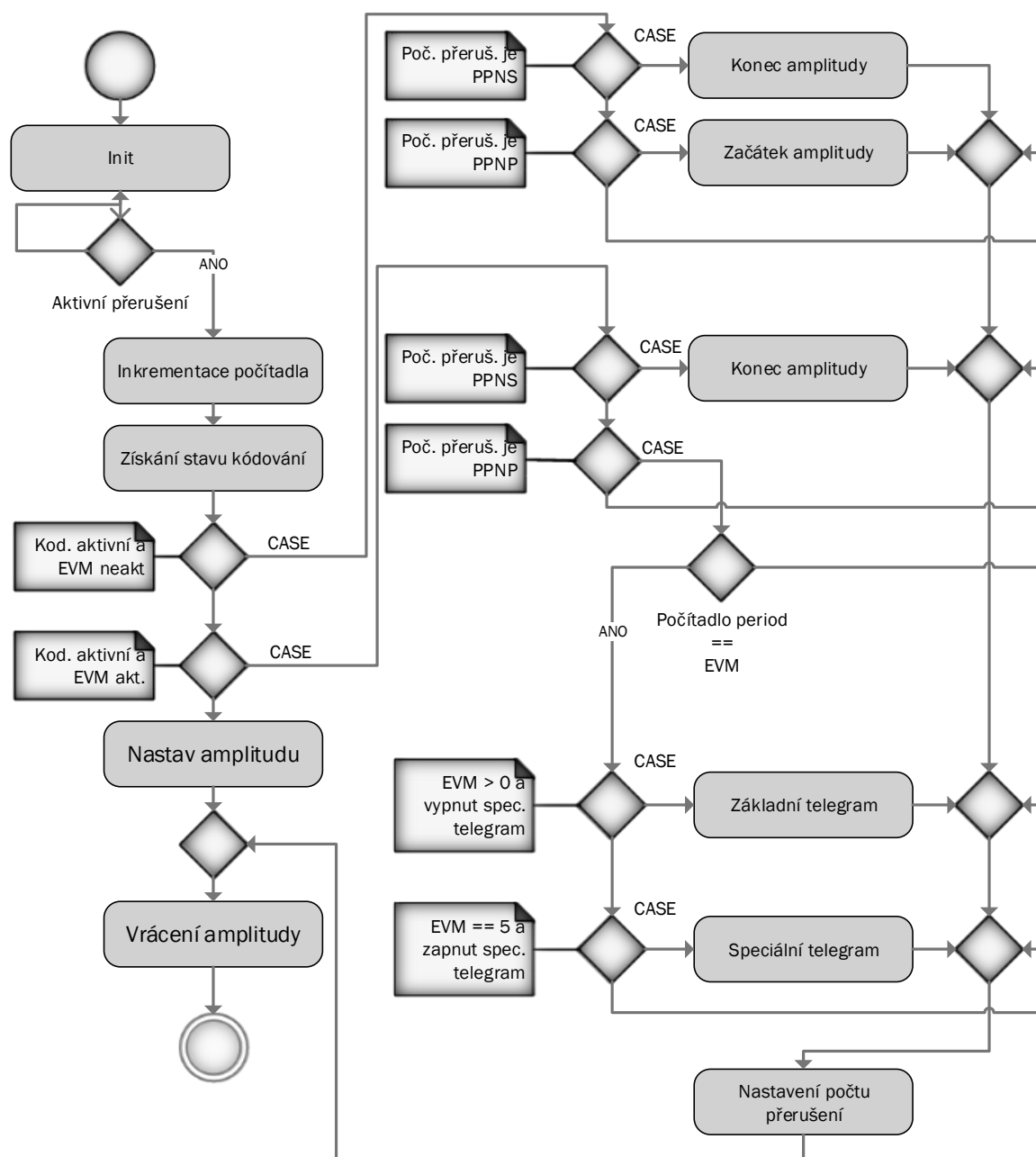
$$f_{CLK} = \frac{2^n * f_{MIN}}{D_{MIN}} = \frac{2^{16} * 20}{50} = 26,214 \text{ kHz} \quad (58)$$

Udávaná frekvence instrukčního cyklu u mikrokontroléru PIC24HJ128GP204 je $f_{\text{INS}} = 40 \text{ MHz}$. Konfigurace časovače nastavuje režim čítání na podnět interního instrukčního cyklu, tedy f_{INS} .

Přetečení časovače okazuje na vektor přerušení. Tedy v přesně definovaných čase probíhá odeslání vzorku na sériovou sběrnici v bloku přerušení.

V každém cyklu přerušení se k hodnotě fázového registru přičítá hodnota delta registru. V cyklu přerušení dochází také ke stanovení aktuální amplitudy pomocí funkce, které zajišťuje modulaci signálu. Jelikož modulační signál lze považovat za dvoustavový signál, v modulaci je klíčové veškeré časování a pro nastavení amplitudy postačí 2 stavy, a to stav nastavené amplitudy a amplituda mezery (standardně amplituda mezery odpovídá 0, je-li střední hodnota signálu taktéž 0).

Funkce pro modulaci signálu využívá počítání počtu přerušení na amplitudu signálu sinus a na amplitudu mezery. Na základě čítání počtu přerušení funkce detekuje požadované časy změn v rámci modulace signálu a návratovou hodnotou je požadovaná amplituda signálu následujícího přerušení časovače (následného odeslaného vzorku). Funkce podporuje modulaci signálu podle liniového systému LS nebo podle liniového systému EVM160 (přenos speciálního telegramu – telegram 4*).



Obr. 51 – Vývojový diagram způsobu generace signálu VZ

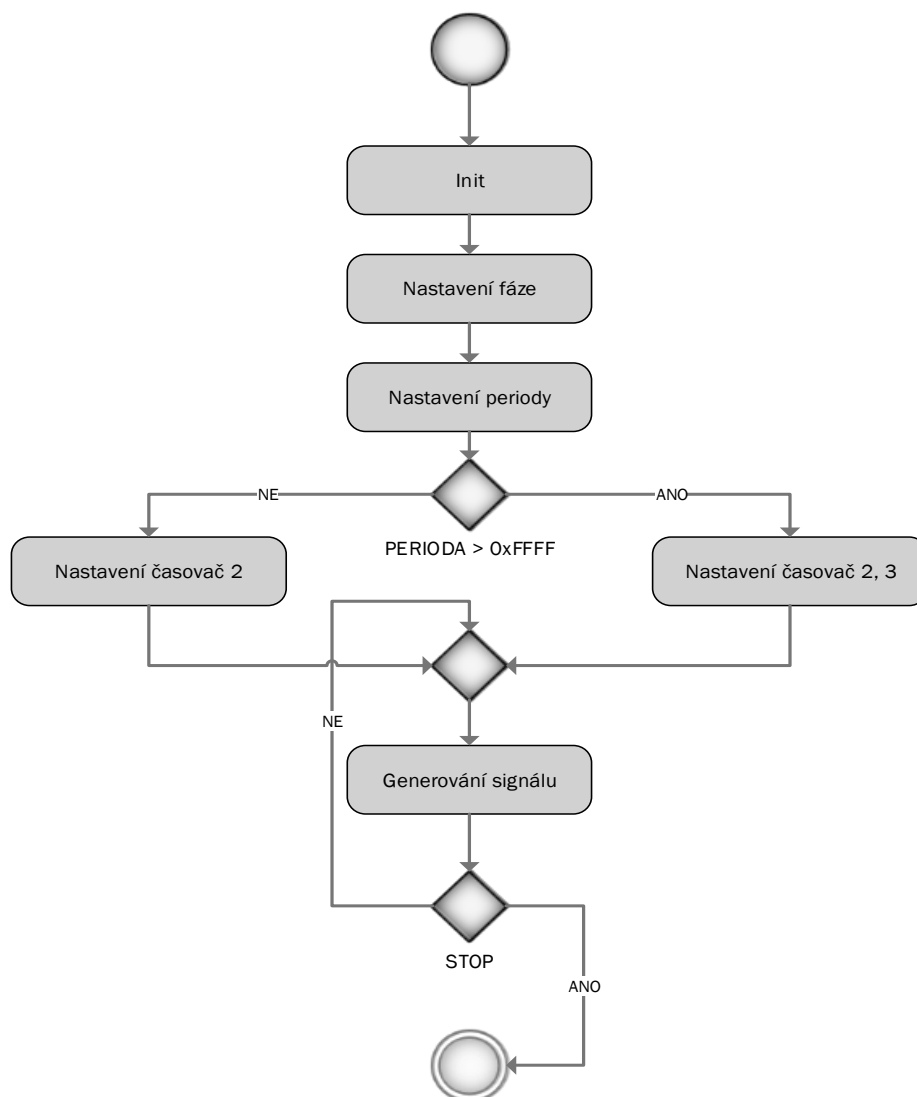
4.9.2 Generátor signálu odometrie

Generátor odometrie využívá 2 digitální výstupu v generaci vzájemně fázově posunutých obdélníkových pulzů. Požadavkem je přesnost obdélníkových pulzů v oblasti nízkých frekvencí.

Generátor odometrie pevně definuje fázové posuvy dvou současně generovaných signálů na hodnoty $\varphi = +90^\circ$ nebo $\varphi = -90^\circ$.

Časování při generaci signálů odometrie zajišťuje nastavení 16bitových časovačů 4 a 5 do režimu 32bit, který slučuje jejich funkci. Vyšší bitové rozlišení umožňuje generaci signálu v širokém rozsahu frekvencí, případně v nižším rozsahu frekvencí s možností nastavení s krokem $< 1 \text{ Hz}$.

Knihovny pro generaci signálů odometrie zajišťují generaci signálu libovolné frekvence v rozsahu $f_{\text{ODO}} = 1 \text{ Hz} \div 10 \text{ kHz}$.



Obr. 52 – Vývojový diagram generace signálu odometrie

Z pohledu uživatele se výstupní signál přepočítává, protože vstupním parametrem pro nastavení signálu, který je ekvivalentní signálu snímače otáček je počet pulzů na jednu otáčku,

rychlost HV a průměr dvojkolí, ke kterému je snímač otáček mechanicky upevněn. Přepočet na výstupní frekvenci obdélníkového signálu proběhne v několika krocích na základě vstupních zadaných veličin. Výchozí známou veličinou při výpočtu je tedy simulovaná rychlost $v_{(km/h)}$ v jednotkách km/h, počet pulzů na otáčku *PPNO* použitého snímače otáček a průměr soukolí hnacího vozidla. Zařízení TESTER VZ přepočítá frekvenci výstupního signálu podle vzorců:

$$dráha/ot = \pi * průměr soukolí \quad (59)$$

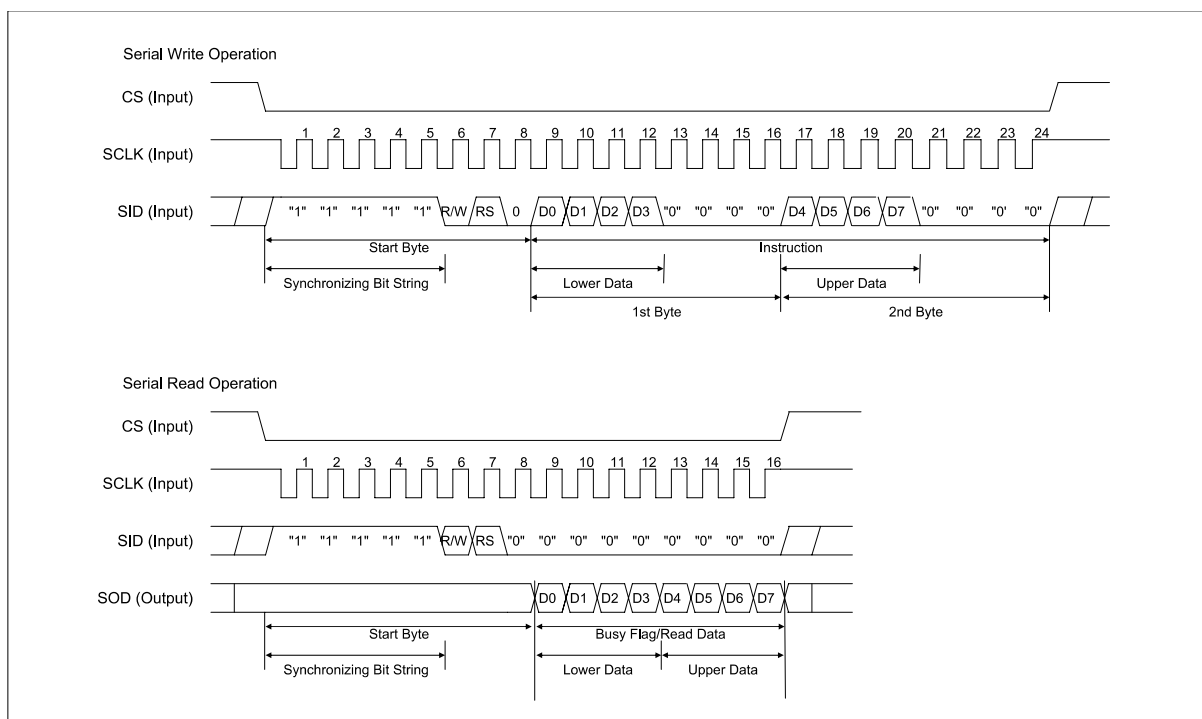
$$v_{(m/s)} = \frac{v_{(km/h)}}{3,6} \quad (60)$$

$$počet pulzů/s = frekvence = \frac{v_{(m/s)}}{dráha/ot} * PPNO \quad (61)$$

Veličina *dráha/ot* ... je úhlová dráha, resp. rovinná dráha ujetá za 1 otáčku kruhového soukolí.

4.9.3 Ostatní funkce

Ostatní části firmwaru zajišťují požadované funkce, které souvisejí s návrhem uživatelského prostředí zobrazeného na displeji LCD a jeho vstupních a výstupních veličin. Datovou komunikaci s použitým displejem EA-DIP 203-6 zajišťuje komunikační protokol na sběrnici SPI2. Protokol pro komunikaci s displejem vyžaduje odeslání tří 8-bitových rámců pro vykonání jedné instrukce logikou displej. Nestandardním znakem komunikace je požadavek reverzních dat na sběrnici, v případě 8-bitové komunikace ve směru B0-B7 (tedy LSB → MSB). Současně protokol vyžaduje separaci dat na 2 poloviny do 2 rámců viz obr. 53.



Obr. 53 – Protokol sériové komunikace s displejem EA DIP 203-6 NLW

Sběrnice SPI2 je využito také v rámci komunikace s digitálním potenciometrem MCP 41010 a externího FLASH paměťového obvodu. Komunikace s digitálním potenciometrem je formou 16bitového rámce, který zahrnuje požadavek na reset, příkaz pro zápis, identifikaci potenciometru (v případě 2 integrovaných součástek na jednom rozhraní) a 8-bitové číslo udávající polohu potenciometru („jezdce“). Regulace potenciometru je lineární v 256 úrovních. V případě digitálního potenciometru postačuje simplexní datová komunikace s tímto periferním zařízením.

V případě práce s paměťovým obvodem FLASH AT25FS010, kde je vyžadováno jak čtení, tak zápis.

Pro zadání zvoleného číselného parametru výstupních veličin v rámci uživatelského rozhraní se spouští zadávací sekvence zajišťovaná blokem firmwaru „keyboard driver“. Funkce snímá stisknutá tlačítka a jejich odpovídající hodnoty zapisuje do velikostně definovaného pole. Funkce je taktéž opatřena detekcí desetinné čárky, která je v některých zadávacích frekvencích vyžadována. V případě potvrzení hodnoty ovládacím tlačítkem vrací funkce zadanou hodnotu na klávesnici.

Zobrazení uživatelského prostředí a dovolené přecházení mezi jednotlivými stavy uživatelského rozhraní definuje stavový automat běžící v nekonečné smyčce (je-li zařízení aktivní). Uživatelské rozhraní zajišťuje všechny funkce popsané v kap. 5. Uživatelské rozhraní je nadřazenou vrstvou, která pracuje nadefinovanými periferiemi a funkcemi na mikrokontroléru.

Kontrolu stavu akumulátoru zajišťuje nastavený A/D převodník, který vrací logickou hodnotu úměrnou hodnotě vstupního analogového napětí. V případě vyhodnocení poklesu pod minimální přípustnou hranici napětí na akumulátoru firmware zařízení automaticky deaktivuje.

Řízení jasu podsvícení displeje je zajištěno nastavením výstupního bloku output compare do režimu generace PWM signálu. PWM generátor využívá k nastavení periody časovač 2, jehož čítání logika výstupního bloku využívá k časování délky pulzu PWM a periodu PWM signálu. Tyto 2 hodnoty stanoví nastavení registrů blok „output compare“.

4.10 Konstrukční návrh

Zařízení je navrženo k montáži do přenosného a uzavíratelného kufru s prostorem pro uschování budících a propojovacích vodičů. V přenosném kufru je montována hlavní deska plošných spojů, na které jsou přímo osazena ovládací tlačítka a displej. Pomocí šroubů M3 je usazena deska plošných. Čelo zařízení kryje frézovaný hliníkový panel s otvory pro ovládací tlačítka, displej a otvory pro montáž konektorů. Čelní panel kryje samolepící voděodolná krycí fólie s dodatečnými potisky pro tlačítka.

4.10.1 Deska plošných spojů

Celé navržené schéma zapojení je realizováno je jedné desce plošných spojů. Jedná se o čtyřvrstvou desku plošných spojů substrátu FR4. V rámci návrhu je primárně použito součástek povrchové montáže (SMD). Velikost desky plošných spojů je shodná s rozměry čelního hliníkového panelu, který bude umístěn v těsné blízkosti nad deskou plošných spojů.

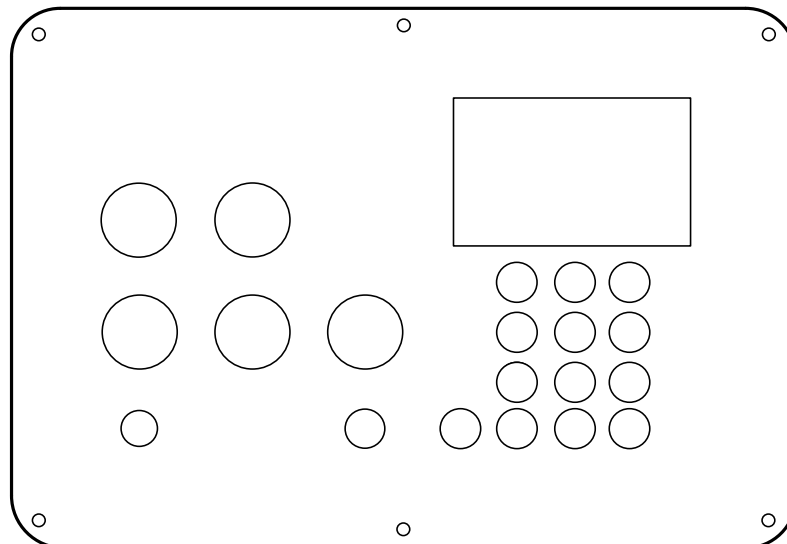
Deska plošných spojů je součástkami oboustranně osazena na vrstvách TOP a BOTTOM a ve vnitřních vrstvách IN1 a IN2 je vylita měď potenciálu země GND a napájecí síť $U_{CC} = +3,3 V_{DC}$.

U obvodů pulzních měničů DC-DC napětí je věnována zvýšená pozornost dodržení návrhových pravidel. Po blokem měniče BQ24103A, který zajišťuje inteligentní nabíjecí proces Li-ion akumulátoru je třeba dodržet vedení signálových cest mimo vrstvy zvýšeného elektrického proudu. U použitých externích induktorů pulzních měničů dochází k přechodovým jevům se zvýšenými hodnotami proudu a napětí. Okolo terminálů cívek jsou vylité měděné plochy.

Výkonové výstupní části systému používají výkonové tranzistory s nutností jejich chlazení. Tranzistory povrchové montáže mají kolektory připojený na měděnou plochu, která je pod celou chladičí plochou tranzistoru a ve dvou směrech je provedeno vícenásobné prokovení na opačnou stranu desky plošných spojů, kde jsou k těmto prokovům přímo zapájeny hliníkové chladiče pro odvod tepla.

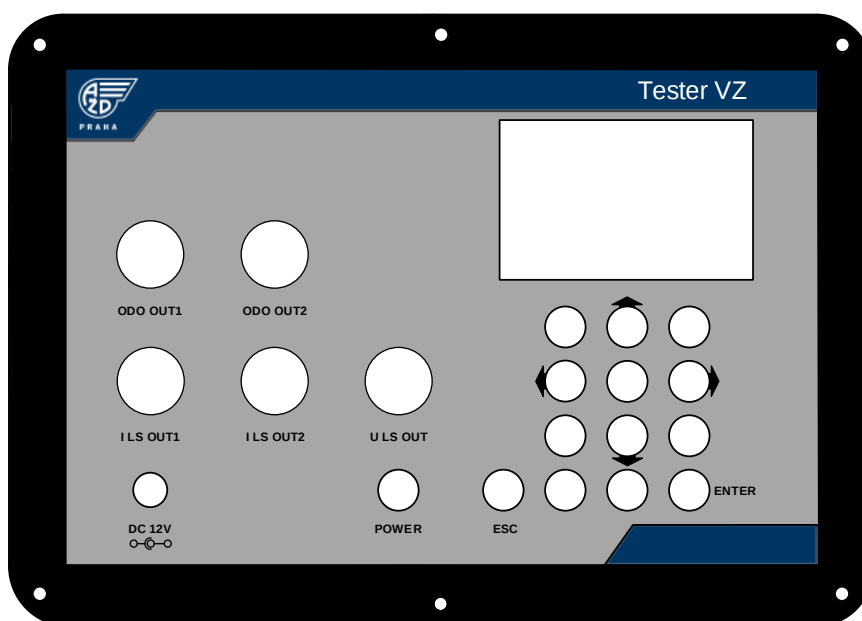
4.10.2 Čelní panel

Návrh čelního hliníkového panelu, resp. samolepící fólie, která má stejné rozměry jako čelní hliníkový panel. Čelní panel uzavírá desku plošných spojů do vnitra přenosného kufru, chrání desku plošných spojů a tvoří základ pro uživatelský ovládací panel zařízení.



Obr. 54 – Obrys čelního hliníkového panelu zařízení

V čelním panelu jsou vytvořeny otvory pro montáž výstupních konektorů, pro souosý napájecí konektor k dobíjení akumulátoru. Dále jsou na panelu vytvořeny otvory pro prostup ovládacích tlačítek, která vystupují z čelního panelu zařízení a otvor pro displej, jehož zobrazovací plocha je ve stejné úrovni s plochou čelního panelu. To zajišťuje možnost lepení čelní fólie s potiskem loga výrobce, názvem zařízení a popisem všech vstupních a výstupních konektorů a tlačítek s danou funkcí.



Obr. 55 – Samolepící fólie čelního panelu zařízení

4.10.3 Konektory a jejich propojení

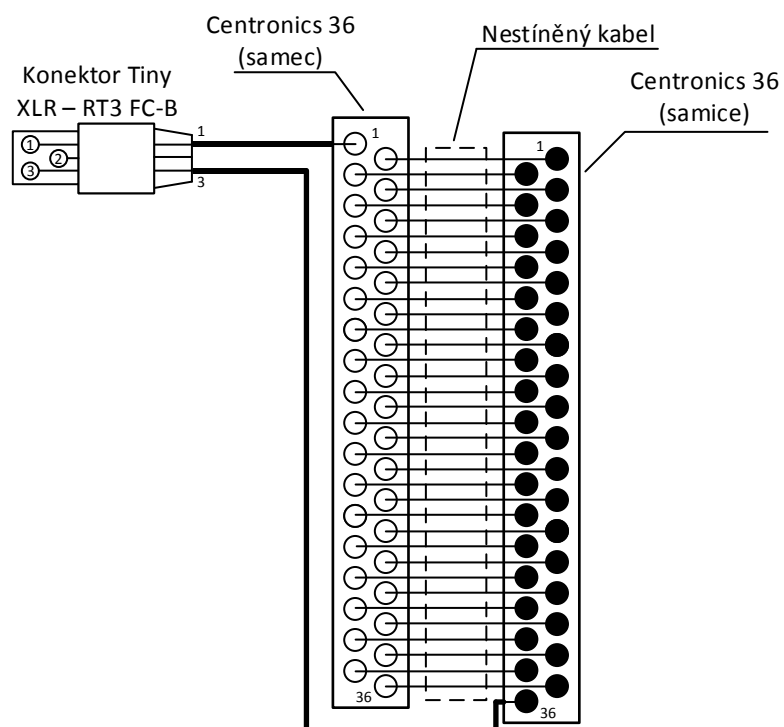
Na straně desky plošných spojů nejsou konektory pájeny přímo na této desce z důvodů rozdílných výšek displeje a konektorů. Z tohoto důvodu jsou na desce plošných spojů všechny elektrické výstupy a vstupy zařízení připojeny na WAGO svorky. Konektory montované v čelním panelu jsou propojeny pomocí izolovaných vodičů s WAGO svorkami.

V čelním panelu jsou použity konektory od výrobce REAN série Tiny XLR RT. U konektorů verze XLR jsou použity 3-pinové a 4-pinové verze. Na straně zařízení je použit konektor RT3MP nebo RT4MP typu samec a jeho protikus na připojovaném vodiči typu samice RT3 FC-B či RT4 FC-B. Kontaktní materiál dutinek konektoru je bronz. Konektory jsou dimenzovány pro maximální proud $I = 5 \text{ A}$. [22]



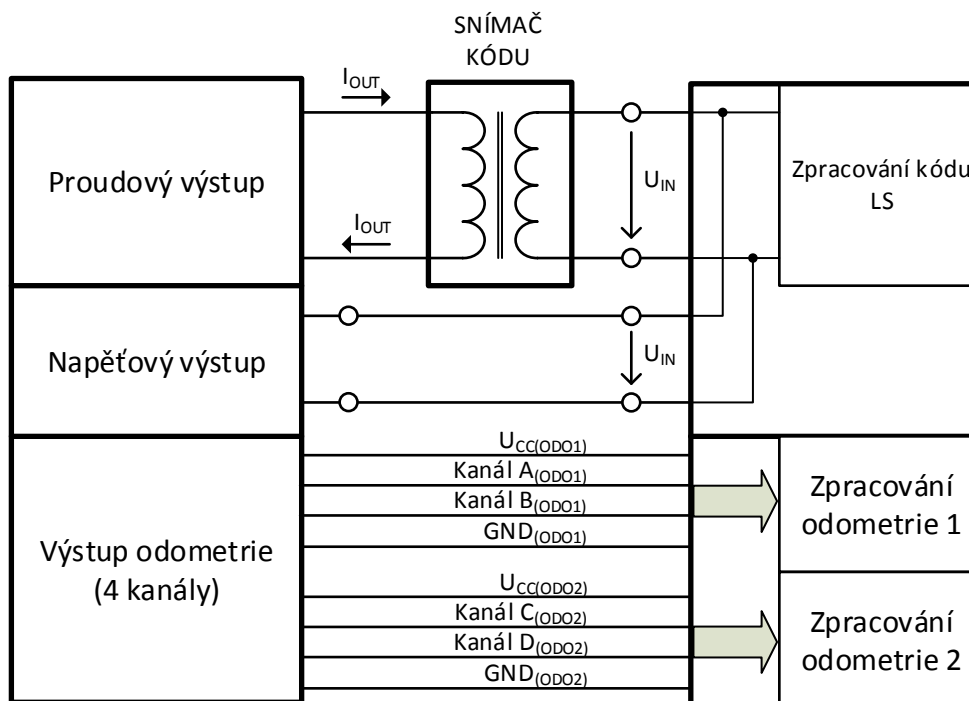
Obr. 56 – Konektory REAN série Tiny XLR-RT samice (vlevo) a samec (vpravo) [22]

V případě budícího kabelu je použit 36 žilový budicí kabel délkově navržený podle průměru snímače kódu, kde při testování proběhne ovinutí. Vícežilový kabel je zakončený konektory typu Centronics s 36 piny. Na tyto konektory jsou vodiče nakontaktovány takovým způsobem, abych budicí smyčka nabyla charakteru cívky. Z toho plyne, že na straně konektoru samice je v případě kontaktovaného n pinu stejný vodič na straně konektoru samce připojen na $n+1$ pin. Pro možnost magnetického vázání na snímač kódu je použit nestíněný 36žilový kabel. Propojovací topologie je znázorněna na obr. 57.



Obr. 57 – Propojení budícího kabelu s připojením k proudovému výstupu testeru VZ

S testem vlakového zabezpečovače se propojují 2 vodiče budící smyčky snímače kódu, napěťový výstup generátoru kódu také 2 vodiče se přímo spojeny s vlakovým zabezpečovačem a 2 x 4 vodiče pro signály odometrie (1 x 4 jako simulace jednoho snímače otáček).



Obr. 58 – Propojovací schéma TESTERU VZ s vlakovým zabezpečovačem na DV

5 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ

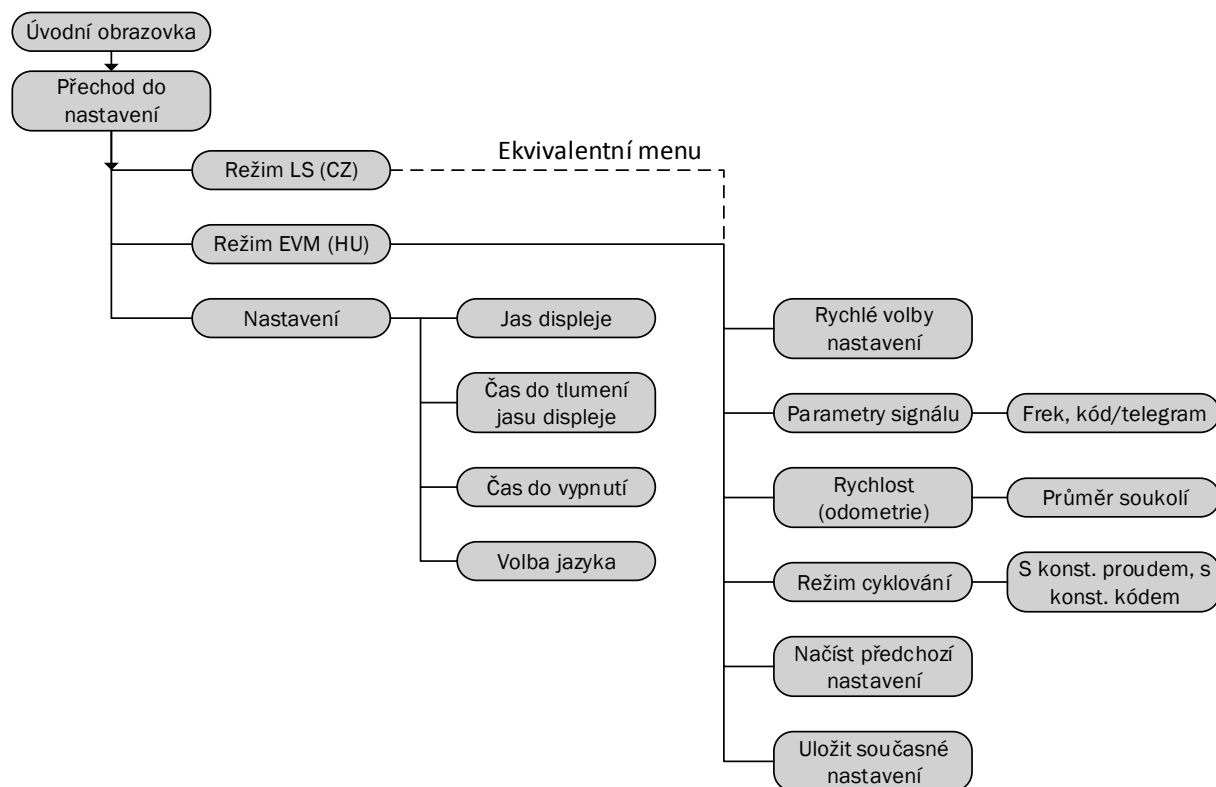
Diagram zjednodušeného větvení ovládacího uživatelského menu. Ihned po aktivaci přístroje se na displeji zobrazuje název zařízení a jeho verze firmwaru.

Ovládací menu umožňuje uživateli přepínání mezi režimy LS (liniový systém v ČR a SR) a EVM (liniový systém v Maďarsku). V režimu LS lze generovat pouze harmonický signál bez modulace a kód liniového systému LS a v režimu EVM lze též generovat harmonický nemodulovaný signál a telegramy liniového systému EVM.

Menu každého z režimů nabízí nastavení rychlé volby s výběrem základních často používaných nastavení (např. kód zelená, frekvence = 75 Hz, efektivní proud = 10 A_{RMS}, odchylka = 0 %).

Volba nastavení parametrů signálu umožňuje nastavení efektivní hodnoty signálu, frekvence signálu, volba tvaru signálu $y = \sin(x)$ nebo $y = \sin(x) + \sin(3x)$, nastavení amplitudy mezery mezi pulzy, editace převodní konstanty, odchylka spínací frekvence.

Ovládací menu režimu LS a EVM nabízí možnost nastavení cyklování. V tomto režimu se v časových intervalech automaticky mění parametry signálu. V režimu cyklování při konstantním proudu dochází k cyklování kódu (telegramu) v časových intervalech v přesně definované posloupnosti. V režimu cyklování při konstantním kódu se v pravidelných intervalech mění hodnota elektrického proudu formou přičítání velikosti proudu od nejnižší hodnoty do maximální hodnoty.



Obr. 59 – Zjednodušený diagram větvení ovládacího uživatelského menu



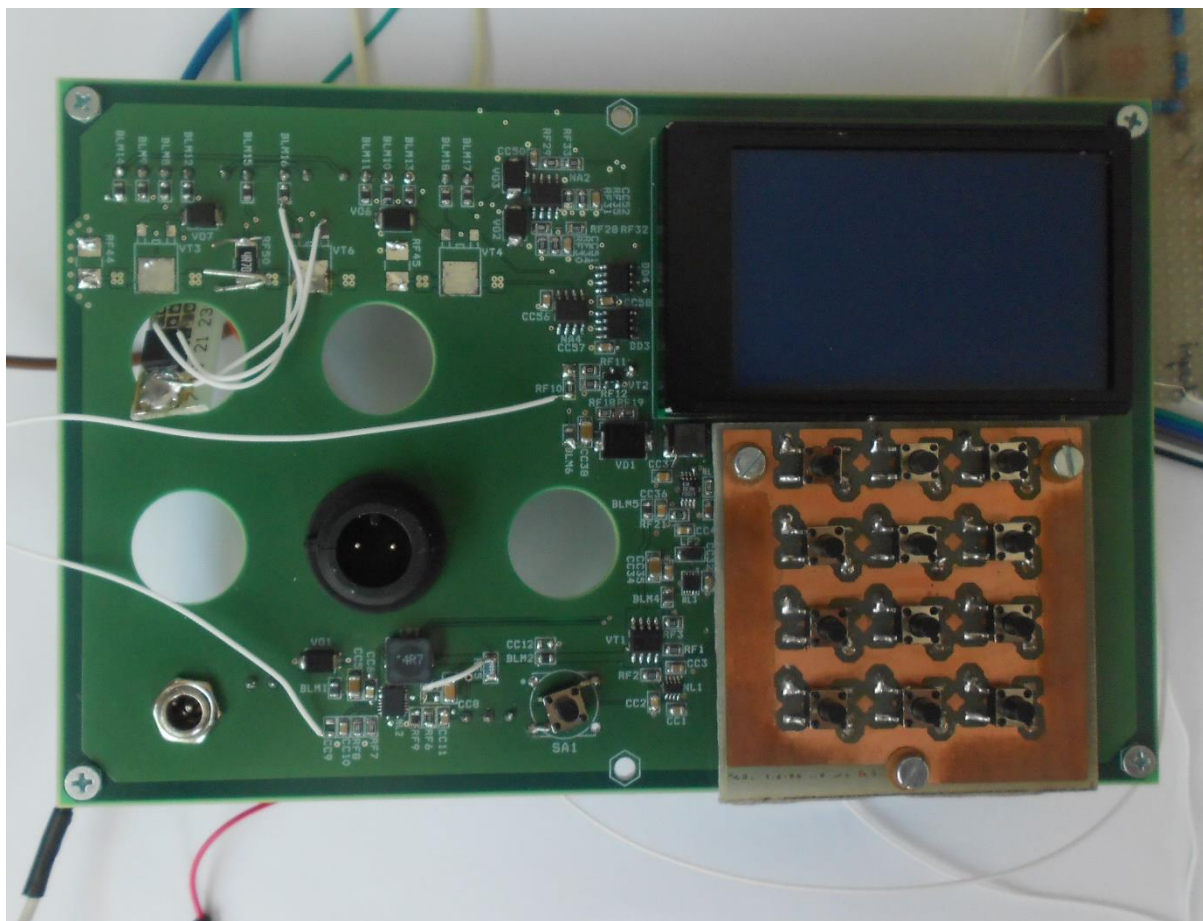
Obr. 60 – První úroveň ovládacího uživatelského menu



Obr. 61 – Úroveň ovládacího menu v režimu LS

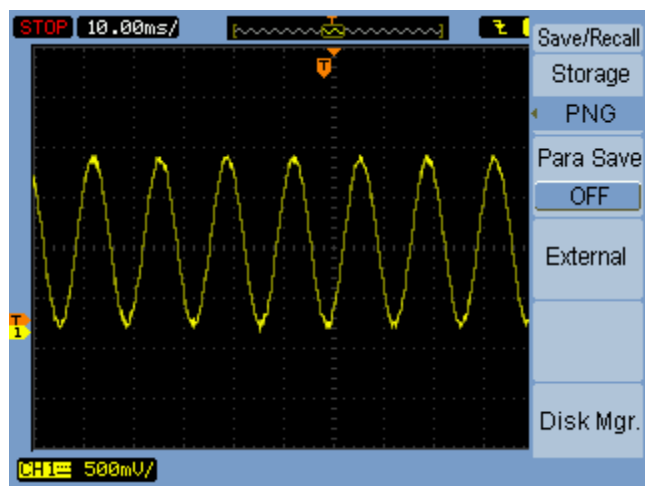
6 MĚŘENÍ

Odladění všech požadovaných funkcí výrobku s ohledem na přesnosti signálů, požadovaných úrovní napětí, zvlnění napětí na výstupech spínaných měničů, ladění firmwaru byl využit prototypová deska plošných spojů verze 0.

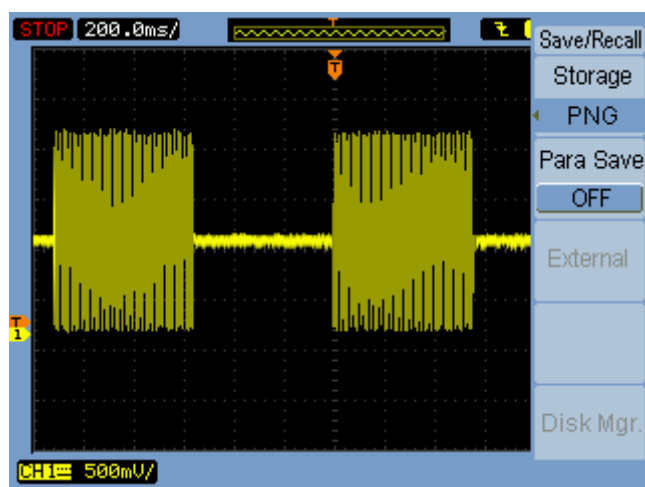


Obr. 62 – Prototypová deska plošných spojů pro TESTER VZ

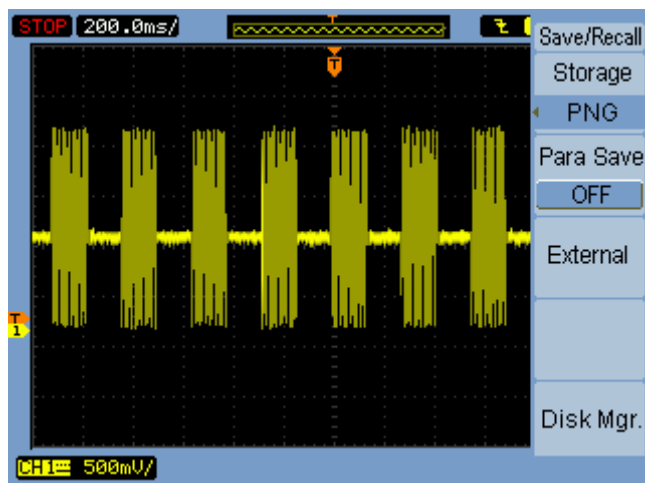
Tvary generovaných signálů byly ověřeny na tomto prototypovém přípravku s použitím osciloskopu Agilent DSO1002A pro ověření tvarů signálů. Změřen byl harmonický signál bez modulace a následně všechny modulace signálu v režimu LS a obdobně v systému EVM. Ověřeny byly také tvary signálů odometrie ve škále frekvencí $f = 1 \text{ Hz} \div 10 \text{ kHz}$.



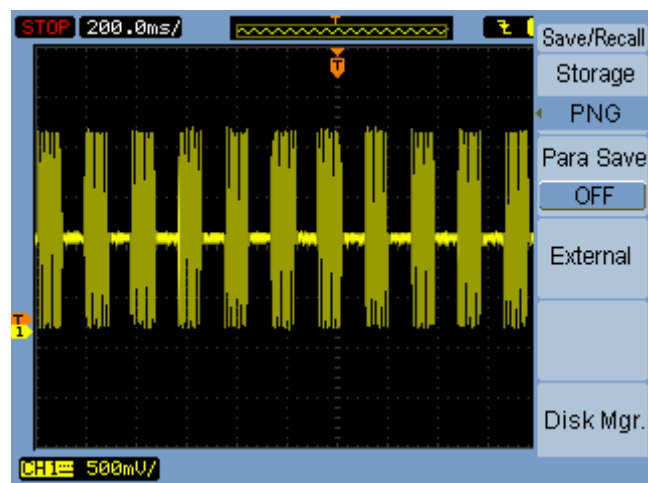
Obr. 63 – Signál sinus bez modulace



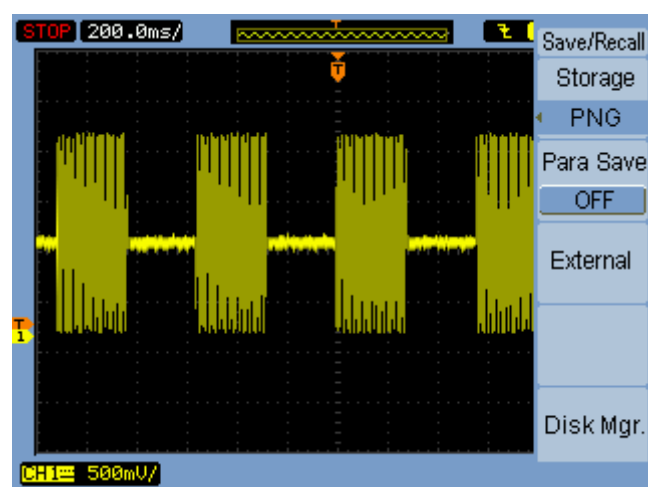
Obr. 64 – Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 0,9$ Hz



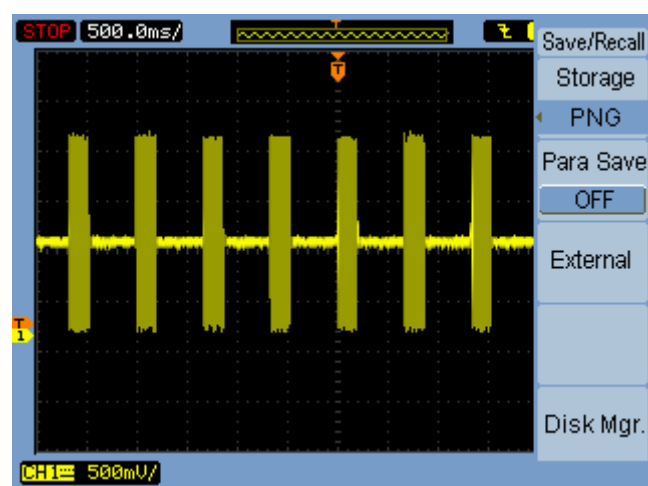
Obr. 65 - Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 1,8$ Hz



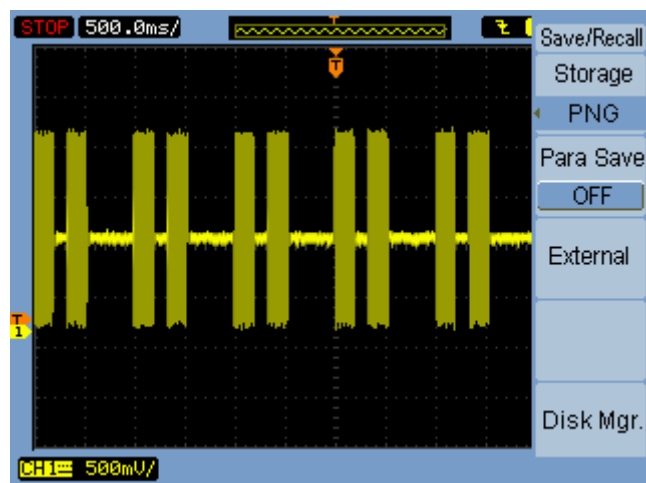
Obr. 66 - Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 3,6$ Hz



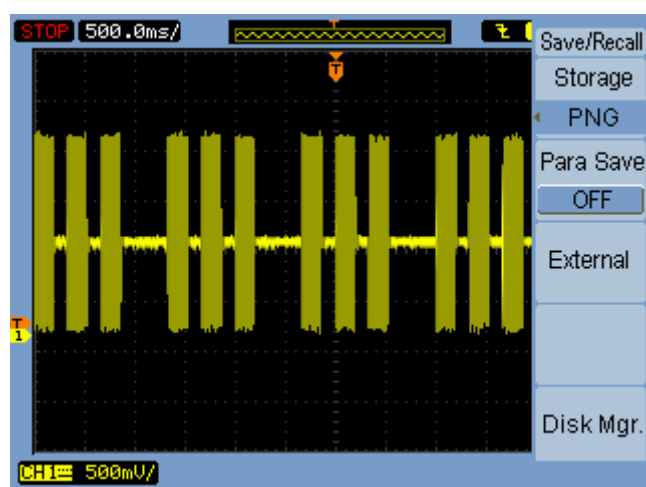
Obr. 67 - Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 5,4$ Hz



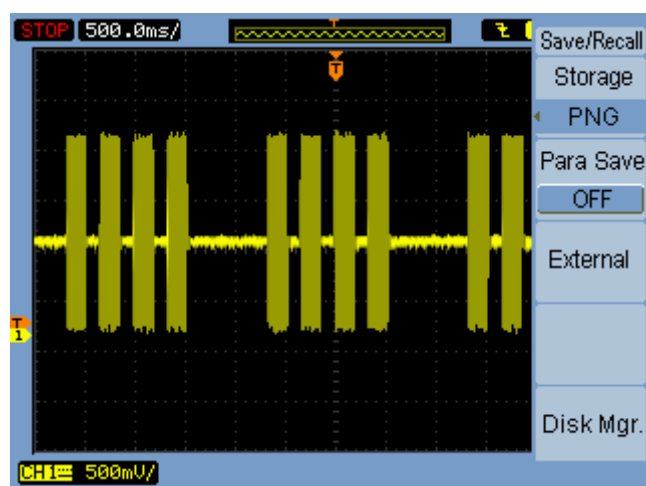
Obr. 68 – Signál EVM, telegram 1



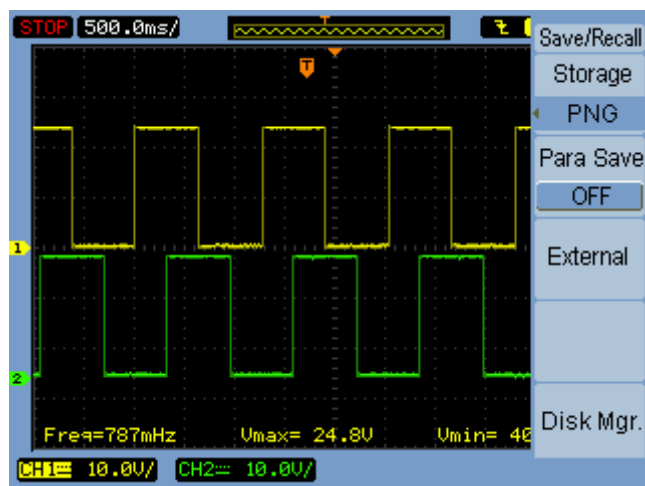
Obr. 69 - Signál EVM, telegram 2



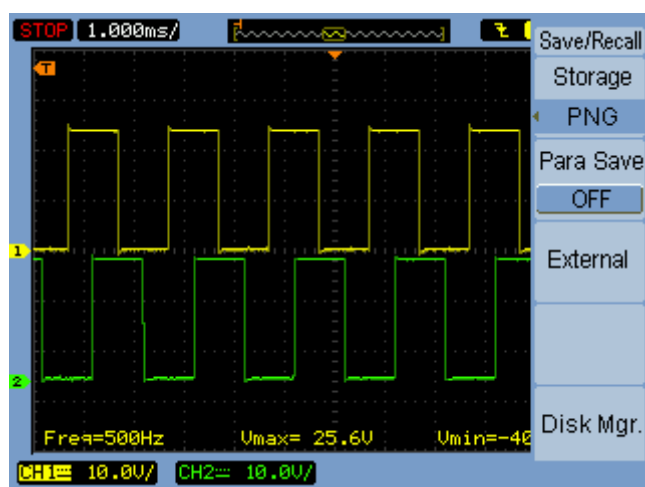
Obr. 70 - Signál EVM, telegram 3



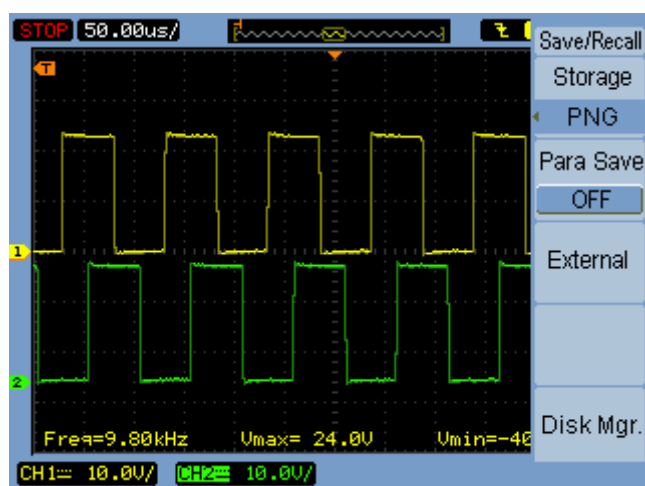
Obr. 71 - Signál EVM, telegram 4



Obr. 72 - Signál odometrie, frekvence = 1 Hz



Obr. 73 - Signál odometrie, frekvence = 500 Hz



Obr. 74 - Signál odometrie, frekvence = 9999 Hz

Hodnoty frekvencí vyobrazené na displeji osciloskopu jsou měřeny relativně nepřesně. Z tohoto důvodu není udaná frekvence vždy shodná s nastavenou frekvencí na testeru.

ZÁVĚR

V úvodní části diplomové práce byly shrnuty podstatné informace o funkci liniového systému vlakového zabezpečovače na železničních sítích v České republice, Slovenské republice a Maďarsku. Za klíčové vlastnosti je považována analýza tvarů a parametrů používaných signálů v přenosu kódu liniovým vlakovým zabezpečovačem.

V následující části je uveden rozbor principu funkce snímačů otáček v železniční dopravě, resp. odometrie drážních vozidel, kde byl naznačen mimo jiné význam a použití pro palubní elektroniku drážního vozidla. Popis zahrnuje možné způsoby snímání otáček soukolí a možnou závislost výstupních parametrů elektrických signálů na okamžité hodnotě otáček soukolí.

V praktické části diplomové práce byl na základě vypsání požadavků popsán návrh testovacího přípravku TESTER VZ. V úvodu bloku návrhu celého systému jsou popsány parametry vhodně vybraných komponent, od nichž se odvíjel způsob návrhu. V rámci počátků návrhu je popsán způsob měření parametrů magnetické vazby při testovacím případě buzení vlakového zabezpečovače pomocí proudové budící smyčky. Samotný návrh zahrnuje kompletní obvodové zapojení a výpočty klíčových parametrů použitých součástek s odůvodněním jejich volby.

Testování navrženého systému bylo provedeno na první prototypové desce plošných spojů TESTERU VZ. V části popisující návrh jsou uvedeny maximální spotřeby jednotlivých obvodových bloků. Na základě toho byl pro tuto aplikaci stanoven požadovaný příkon celého systému, který má vliv na celkovou dobu běhu přípravku při napájení akumulátorem. Provedený teoretický výpočet doby běhu po plném nabití akumulátoru potvrzuje minimální dobu běhu $t = 8$ hodin ve stavu maximálního zatížení.

Pro použitý mikrokontrolér byl navržen firmware, který řídí všechny požadované funkce související s obsluhou zařízení. Ovládání tohoto zařízení zajišťuje ovládací menu zobrazované na displeji přípravku. Pomocí tohoto menu je možno regulovat všechny požadované výstupní veličiny, tedy proud budící smyčkou, nastavení napěťového rozkmitu na napěťovém výstupu generátoru kódu a regulaci parametrů signálů odometrie. Všechny nastavitelné veličiny je možné měnit v průběhu obsluhy zařízení. Generátor signálu vlakového zabezpečovače je kompatibilní pro testování mobilní části vlakového zabezpečovače typu LS90, LS06 a typu EVM120 a EVM160 na hnacím drážním vozidle. Principy softwarové generace signálů jsou popsány pomocí UML vývojových diagramů.

V závěrečném oddílu diplomové práce byl popsán způsob obsluhy zařízení a jednotlivé podúrovně ovládacího uživatelského menu. Ovládání bylo navrženo pomocí tlačítek v konfiguraci numerické klávesnice pro zadávání číselných hodnot, resp. parametrů signálů. Možnost používání tohoto testovacího zařízení nevyžaduje žádné školení obsluhujících osob. Pro užívání přípravku se pouze doporučuje seznámit s jednoduchým návodem k obsluze.

Základní náležitosti týkající se konstrukčního provedení a designu čelního ovládacího panelu tohoto testovacího přípravku bylo v rámci práce uvedeno a popsáno. Pro bližší

vyjasnění významu zařízení bylo zpracováno schéma propojení testeru s mobilní částí vlakového zabezpečovacího zařízení na drážním vozidle

Všechny požadované cíle byly na základě zadání splněny a jejich rozbor je v rámci práce uveden.

REFERENCE

- [1] Liniový vlakový zabezpečovač LS: Princip činnosti. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://goo.gl/cHMzOY>
- [2] Vlakový zabezpečovač: Přenos kódu na hnací vozidlo. *Zabezpečovací technika v dopravě* [online]. Brno [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/sScZBx>
- [3] Pod modrou pokličkou - Vlakový zabezpečovač v otázkách a odpovědích. *Žirafoviny.cz: Typy vlakových zabezpečovačů* [online]. XOOPS organisation, 2008 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/cJhSjs>
- [4] Systémy pro kolejovou dopravu: Vlakový zabezpečovač LS06. *AŽD Praha* [online]. ČR [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/WI3fQC>
- [5] POUPĚ, Oldřich. *Liniový vlakový zabezpečovač: Všeobecný popis*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1965.
- [6] Systémy pro kolejovou dopravu: Kolejové obvody. *AŽD Praha* [online]. ČR [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/rFKDqz>
- [7] Elektřina a magnetismus: Faradayův zákon elektromagnetické indukce. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/jniaGF>
- [8] *Az ÉÉVB és a vezetőállásjelző jelzései* [online]. 1998 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www2.chem.elte.hu/gigant_club/jelzes/vezjelzo.html
- [9] Hungarian Signals, Railway tools etc.: Cab Signals. *Railroad Forums* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/kJK6o5>
- [10] Úroveň integrity bezpečnosti (SIL; Safety Integrity Level): Funkční bezpečnost pro vaše aplikace. *PEPPERL+FUCHS* [online]. Pepperl+Fuchs [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.pepperl-fuchs.cz/czech_republic/cs/25037.htm
- [11] Odometry. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/rhK1Gb>
- [12] Multikanal-Drehgeber: Product details. *LENORD +BAUER: automates motion* [online]. DE: Lenord, Bauer & Co. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z:
- [13] GEL 27xx: Multichannel rotary encoder. *LENORD +BAUER* [online]. Lenord, Bauer & Co. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/TLmbjV>
- [14] Přímá číslicová syntéza kmitočtu (DDS - Direct Digital Synthesis): Popis funkce. DRESLER, Tomáš. *Vyvoj.hw: profesionální elektronika* [online]. Redakce HW serveru, 2011 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/Ja65Lh>
- [15] CELLEVIA BATTERIES CL-18650-26H/1S3P: Technické informace. *TME: Electronic components* [online]. TME Czech Republic [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/Xbmrqc>
- [16] Elektronický rychloměr RE1xx. UNICONTROLS-TRAMEX S.R.O. 2011. *UniControls: Vývoj a výroba zařízení pro drážní účely* [online]. Český server [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/vn7YIJ>
- [17] ELEKTRINA A MAGNETISMUS: Hallův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/vA60KD>
- [18] Zabezpečovač LS 06: Popis obsluhy. PELÍŠEK, Michal. *Plzeňští strojvůdci: Popisy, rady, návody, pomůcky* [online]. 2015 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://goo.gl/v68nrb>
- [19] Používání Li-Ion akumulátorů v praxi. *BattEX: Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. BATTEX, spol. s r.o., 2009 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://goo.gl/Cf05e3>

- [20] Nábojová pumpa pro malé proudy. *Vývoj HW: profesionální elektronika* [online]. HW server, 1999 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://goo.gl/b8tzvy>
- [21] *Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage: Basic Configuration of a Boost Converter* [online]. USA, Texas: Texas Instruments incorporated, 2014 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://goo.gl/USIGMX>
- [22] TINY xlr Cable Connectors. *REAN: Products* [online]. Neutrik®, 2017 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://goo.gl/Rhg3Qd>
- [23] *PIC24HJ128GPX02/X04: Datasheet* [online]. USA: Microchip Technology Incorporated, 2012, 390 [cit. 2017-05-23]. ISBN 978-1-62076-238-7. Dostupné z: <https://goo.gl/ccz0jz>
- [24] *LCD-Modul: 4x20 - 6.45mm* [online]. DE: Electronic assembly, 2013, , 4 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://goo.gl/zNXwyT>

Seznam zkratek

LS – liniový systém

LVZ – liniový vlakový zabezpečovač

VZ – vlakový zabezpečovač

UVLO – under voltage lock-out

DC – duty cycle (střída)

DV – drážní vozidlo

PWM – pulzně šířková modulace

Seznam obrázků

Obr. 1 – Schéma přenosu informace ve stacionární části VZ.....	13 -
Obr. 2 - Závislosti proudu kolejničí na napětí snímače kódu při různé výšce na koleji [5] -	15 -
Obr. 3 – Rozložení magnetického pole v okolí profilu kolejového pásu (kolejnice) [5]	16 -
Obr. 4 – Princip snímání kódu z kolejnice mobilní částí VZ	17 -
Obr. 5 – Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód červená	18 -
Obr. 6 – Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód žluté mezikruží	19 -
Obr. 7 – Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód žlutá.....	19 -
Obr. 8 – Časová závislost modulovaného signálu systému LS – kód zelená	20 -
Obr. 9 – Časová závislost modulačního signálu telegramu 1	23 -
Obr. 10 – Časová závislost modulačního signálu telegramu 2	23 -
Obr. 11 - Časová závislost modulačního signálu telegramu 3	24 -
Obr. 12 - Časová závislost modulačního signálu telegramu 4 (nebo 4*)	24 -
Obr. 13 – Časová závislost modulačního signálu telegramu X	24 -
Obr. 14 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 1.....	25 -
Obr. 15 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 2.....	25 -
Obr. 16 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 3.....	26 -
Obr. 17 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 4.....	26 -
Obr. 18 - Časová závislost modulovaného signálu telegramu 4*	27 -
Obr. 19 – Snímače otáček pro drážní vozidla GEL 27xx [12]	29 -
Obr. 20 – Optický princip snímání otáček	30 -
Obr. 21 - Magnetický princip snímání otáček.....	30 -
Obr. 22 – Indukční princip snímání otáček.....	31 -
Obr. 23 – Časová závislost průběhu výstupního napětí (1 kanál) [13]	33 -
Obr. 24 – Časová závislost průběhu výstupního proudu (1 kanál) [13]	33 -
Obr. 25 – Blokové schéma principu funkce přímé digitální syntézy kmitočtu [14].....	37 -
Obr. 26 – Propojení vstupu vlakového zabezpečovače a napěťového výstupu testeru VZ.-	38 -
Obr. 27 – Metoda proudového buzení vlakového zabezpečovače	41 -
Obr. 28 – Blokové schéma zapojení při měření převodní konstanty magnetické vazby	42 -
Obr. 29 – Grafická závislost převodního parametru magnetické vazby KP	44 -
Obr. 30 – Frekvenční závislost převodního parametru magnetické vazby na snímač kódu -	45 -
Obr. 31 – Pack baterie CL-18650-26H/1S3P [15]	46 -
Obr. 32 – PINOUT mikrokontroléru PIC24HJ128GP204 v pouzdře TQFP44.....	47 -
Obr. 33 – Displej Electronic Assembly EA DIP203b – NLW.....	49 -
Obr. 34 – průběh nabíjení metodou CC–CV obvodu BQ 24103A.....	52 -
Obr. 35 – Schéma zapojení nabíjecího obvodu Li-ion baterie s obvodem BQ24103A.....	53 -
Obr. 36 – Interní zpětná vazba BQ24103A pro detekci proudu snímacím rezistorem	55 -

Obr. 37 – Schéma zapojení rezistorové sítě s termistorem k BQ24103A	56 -
Obr. 38 - Schéma zapojení pulzního měniče SEPIC s obvodem TPS63031	59 -
Obr. 39 – Závislost účinnosti DC-DC měniče TPS 61031 dle proudového odběru	60 -
Obr. 40 – základní topologie step-up měniče DC-DC [21]	61 -
Obr. 41 – Schéma zapojení pulzního měniče step-up s obvodem LT3580.....	62 -
Obr. 42 – Závislost střídý na maximálním výstupním proudu step-up měniče s LT3580	63 -
Obr. 43 – Schéma zapojení procesoru PIC24HJ128GP204	66 -
Obr. 44 – Schéma zapojení bloku D/A převodu generovaného signálu.....	67 -
Obr. 45 – Schéma zapojení paměťového obvodu AT25FS010	69 -
Obr. 46 – Schéma zapojení spínače FET s piezo sirénou	69 -
Obr. 47 – Schéma zapojení spínaného step-down LED driveru	70 -
Obr. 48 - Schéma zapojení koncového stupně generátoru kódu s napěťovým výstupem ..	71 -
Obr. 49 – Schéma zapojení koncového stupně generátoru kódu s proudovým výstupem .-	72 -
Obr. 50 – Schéma zapojení koncového stupně generátoru odometrie	73 -
Obr. 51 – Vývojový diagram způsobu generace signálu VZ.....	78 -
Obr. 52 – Vývojový diagram generace signálu odometrie	79 -
Obr. 53 – Protokol sériové komunikace s displejem EA DIP 203-6 NLW	80 -
Obr. 54 – Obrys čelního hliníkového panelu zařízení.....	83 -
Obr. 55 – Samolepící fólie čelního panelu zařízení	83 -
Obr. 56 – Konektory REAN série Tiny XLR-RT samice (vlevo) a samec (vpravo) [22].....	84 -
Obr. 57 – Propojení budícího kabelu s připojením k proudovému výstupu testeru VZ.....	85 -
Obr. 58 – Propojovací schéma TESTERU VZ s vlakovým zabezpečovače na DV.....	85 -
Obr. 59 – Zjednodušený diagram větvení ovládacího uživatelského menu	86 -
Obr. 60 – První úroveň ovládacího uživatelského menu.....	87 -
Obr. 61 – Úroveň ovládacího menu v režimu LS	87 -
Obr. 62 – Prototypová deska plošných spojů pro TESTER VZ	88 -
Obr. 63 – Signál sinus bez modulace	89 -
Obr. 64 – Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 0,9$ Hz	89 -
Obr. 65 - Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 1,8$ Hz	89 -
Obr. 66 - Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 3,6$ Hz	90 -
Obr. 67 - Signál LS, přepínací frekvence $f_s = 5,4$ Hz	90 -
Obr. 68 – Signál EVM, telegram 1.....	90 -
Obr. 69 - Signál EVM, telegram 2	91 -
Obr. 70 - Signál EVM, telegram 3	91 -
Obr. 71 - Signál EVM, telegram 4	91 -
Obr. 72 - Signál odometrie, frekvence = 1 Hz.....	92 -
Obr. 73 - Signál odometrie, frekvence = 500 Hz.....	92 -
Obr. 74 - Signál odometrie, frekvence = 9999 Hz.....	92 -

Seznam tabulek

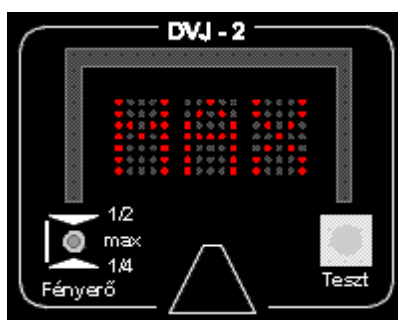
Tab. 1 – Závislosti proudu kolejnicí na indukovaném napětí na snímače kódu [5]	15 -
Tab. 2 – Přehledová tabulka přenášených kódů vlakového zabezpečovače typu LS.....	20 -
Tab. 3 – Přehledová tabulka přenášených telegramů vlakového zabezpečovače EVM	27 -
Tab. 4 – Základné elektrické parametry snímače otáček GEL 27xx [13]	32 -
Tab. 5 – Měření převodní konstanty magnetické vazby budící smyčky na snímač kódu.....	43 -
Tab. 6 – Přehled základní parametrů akumulátoru CL-18650-26H/1S3P [15].....	46 -
Tab. 7 – Mapování pinů LCD displeje EA DIP203b – NLW v režimu paralelní komunikace..	50 -
Tab. 8 – Mapování pinů LCD displeje EA DIP203b – NLW v režimu sériové komunikace	50 -
Tab. 9 – Parametry BQ24103A pro detekci odchylky teplotního rozsahu nabíjení	56 -
Tab. 11 – Maximální proudové spotřeby bloků připojených na síti $U_{CC} = 3,3 V_{DC}$	74 -
Tab. 12 - Maximální proudové spotřeby bloků připojených na síti $U_{CC} = \pm 9 V_{DC}$	74 -

Přílohy

Návěstní opakovač mobilní části vlakového zabezpečovače systému LS [18]



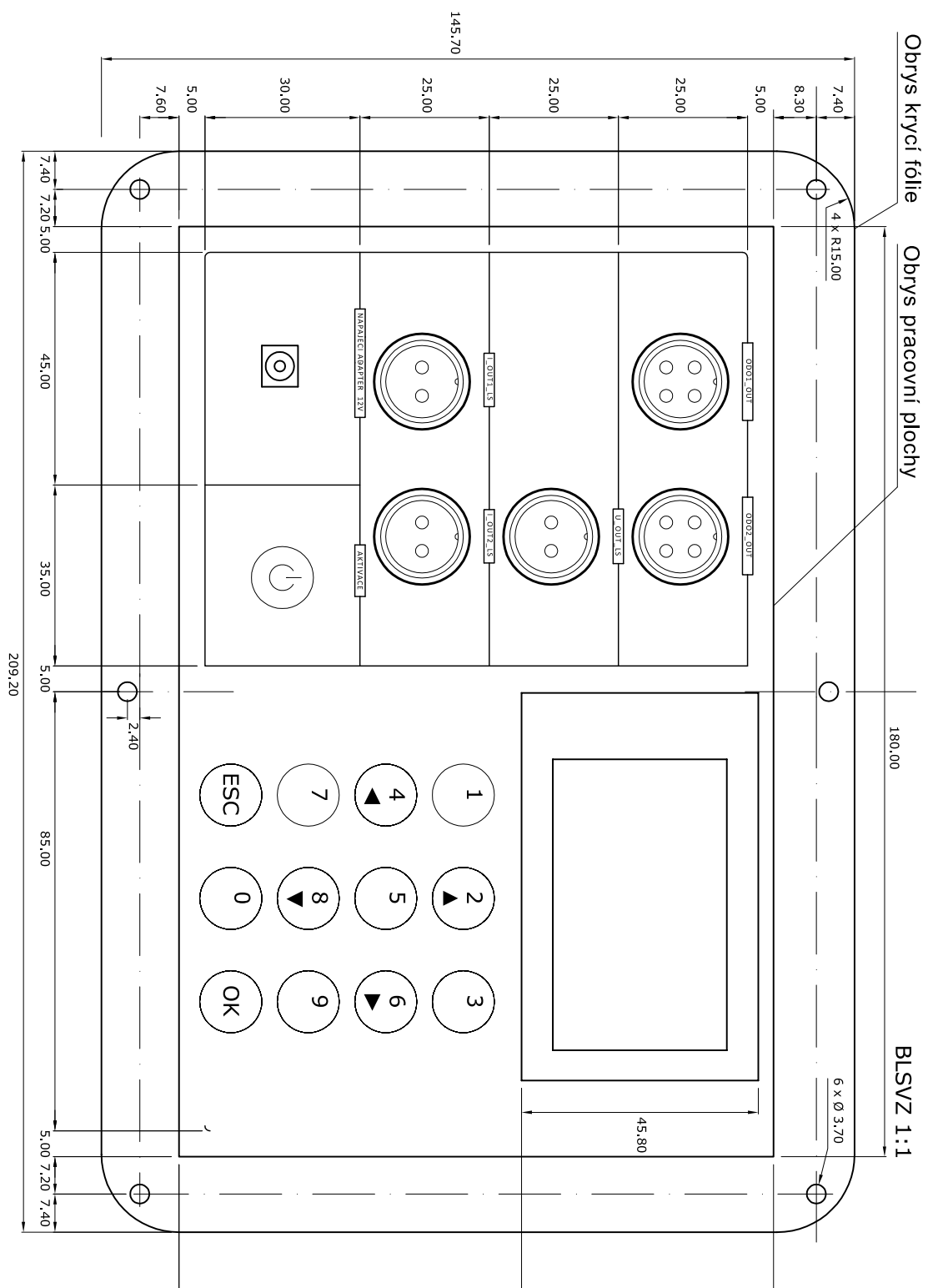
Návěstní opakovač mobilní části vlakového zabezpečovače systému EVM [8]



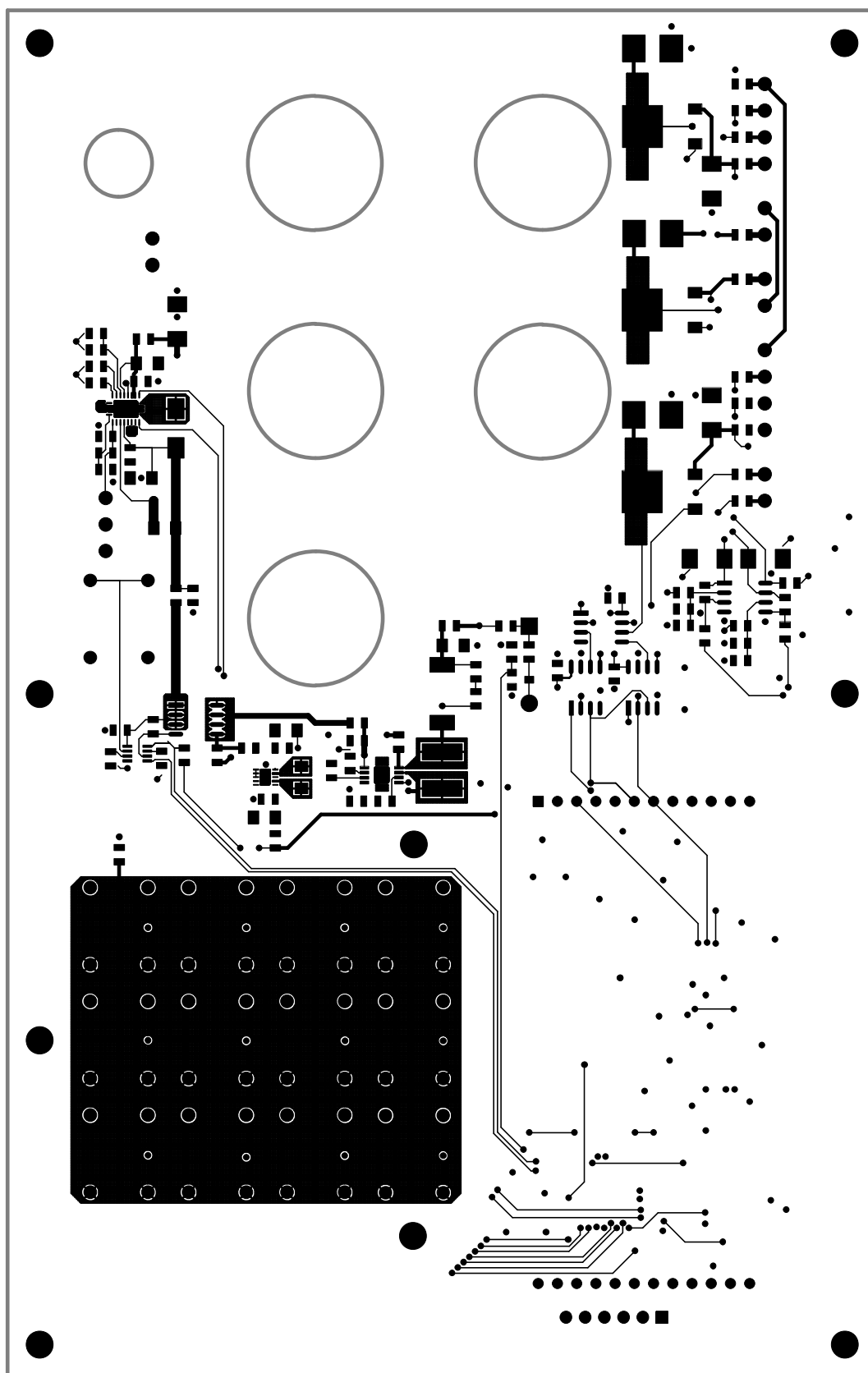
Jednotka zásuvných modulů mobilní části vlakového zabezpečovače LS06 [4]



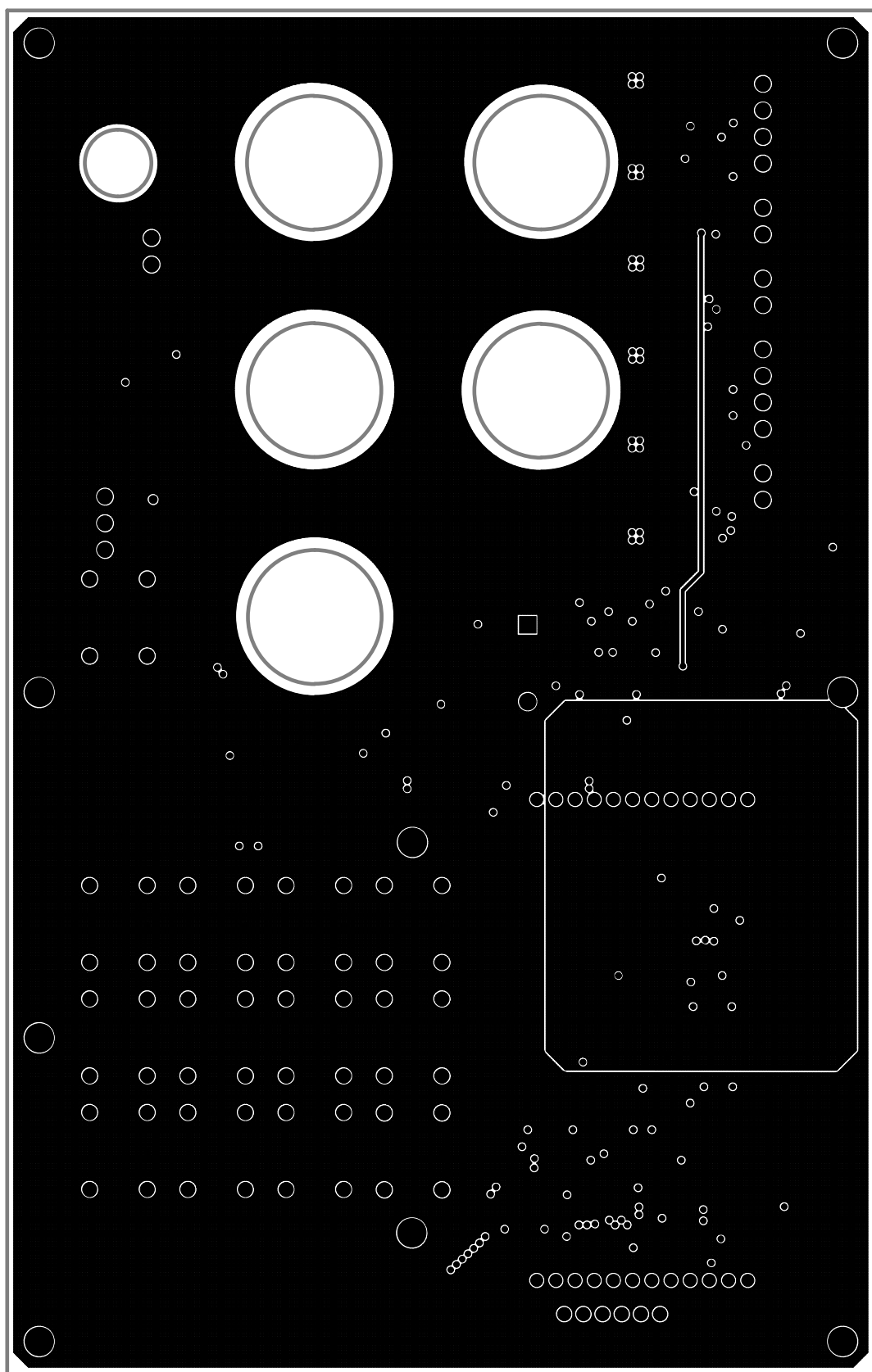
Koncept návrhu čelního ovládacího panelu



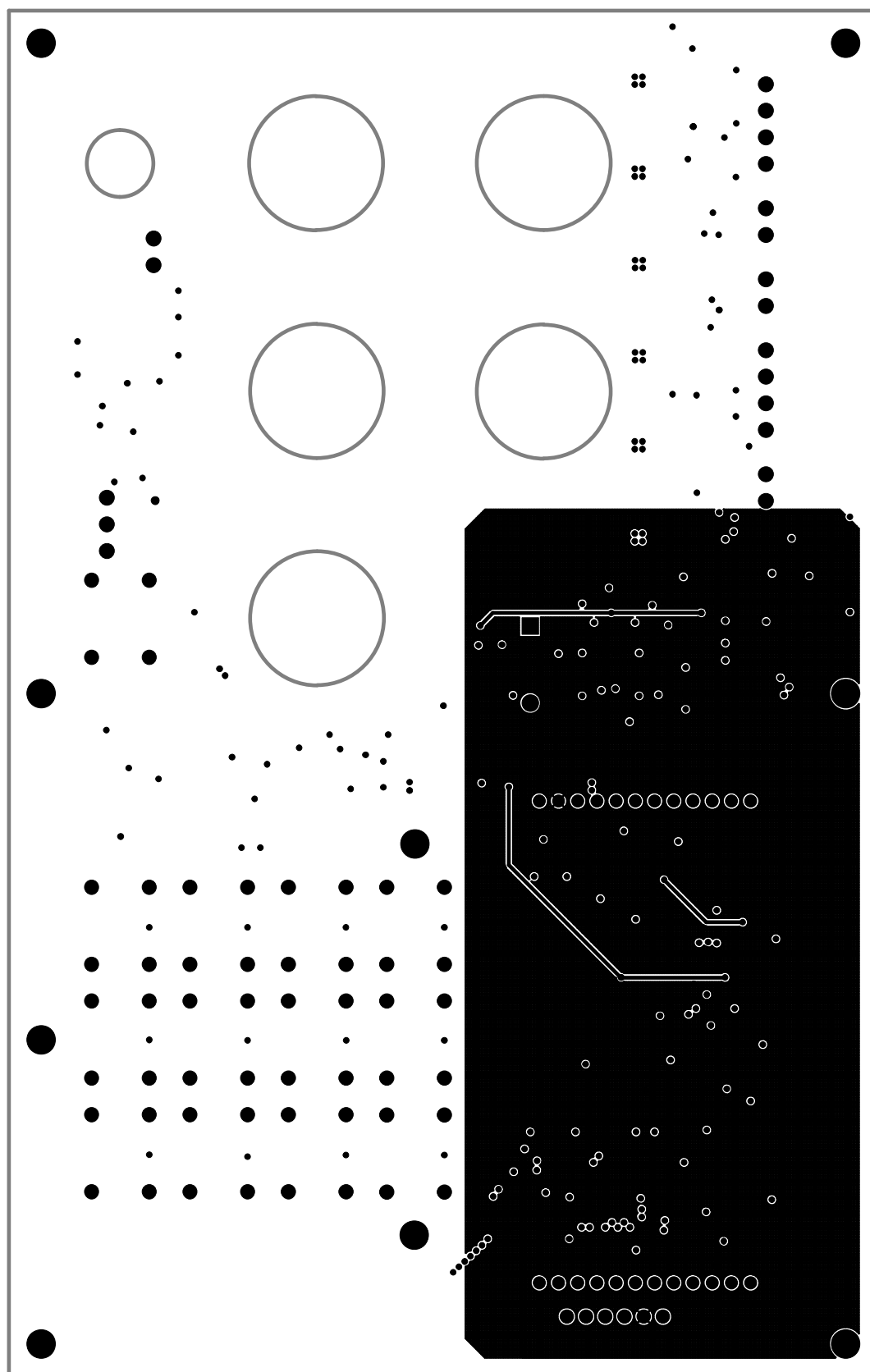
Deska plošných spojů – vrstva TOP



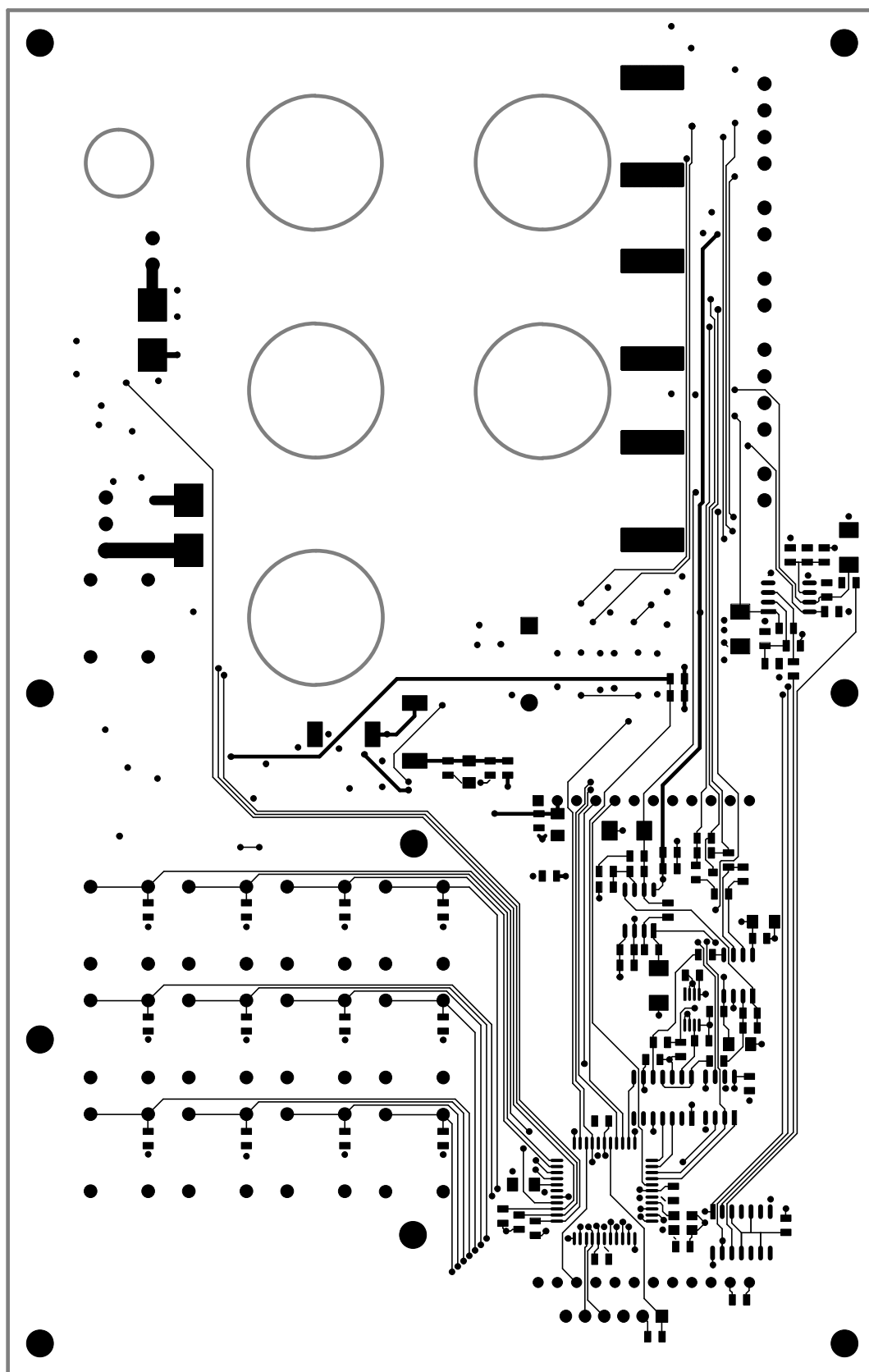
Deska plošných spojů – vrstva IN 1



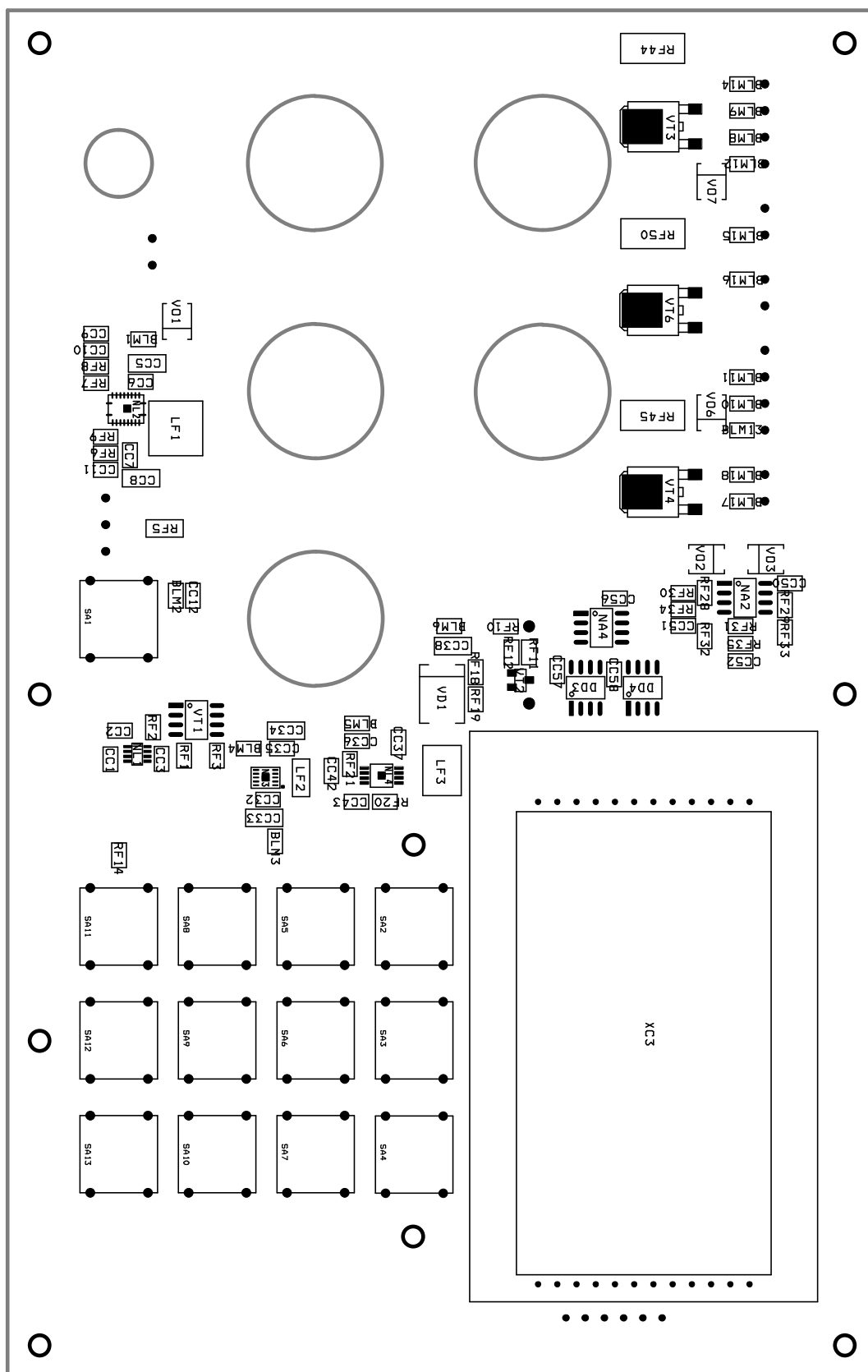
Deska plošných spojů – vrstva IN 2



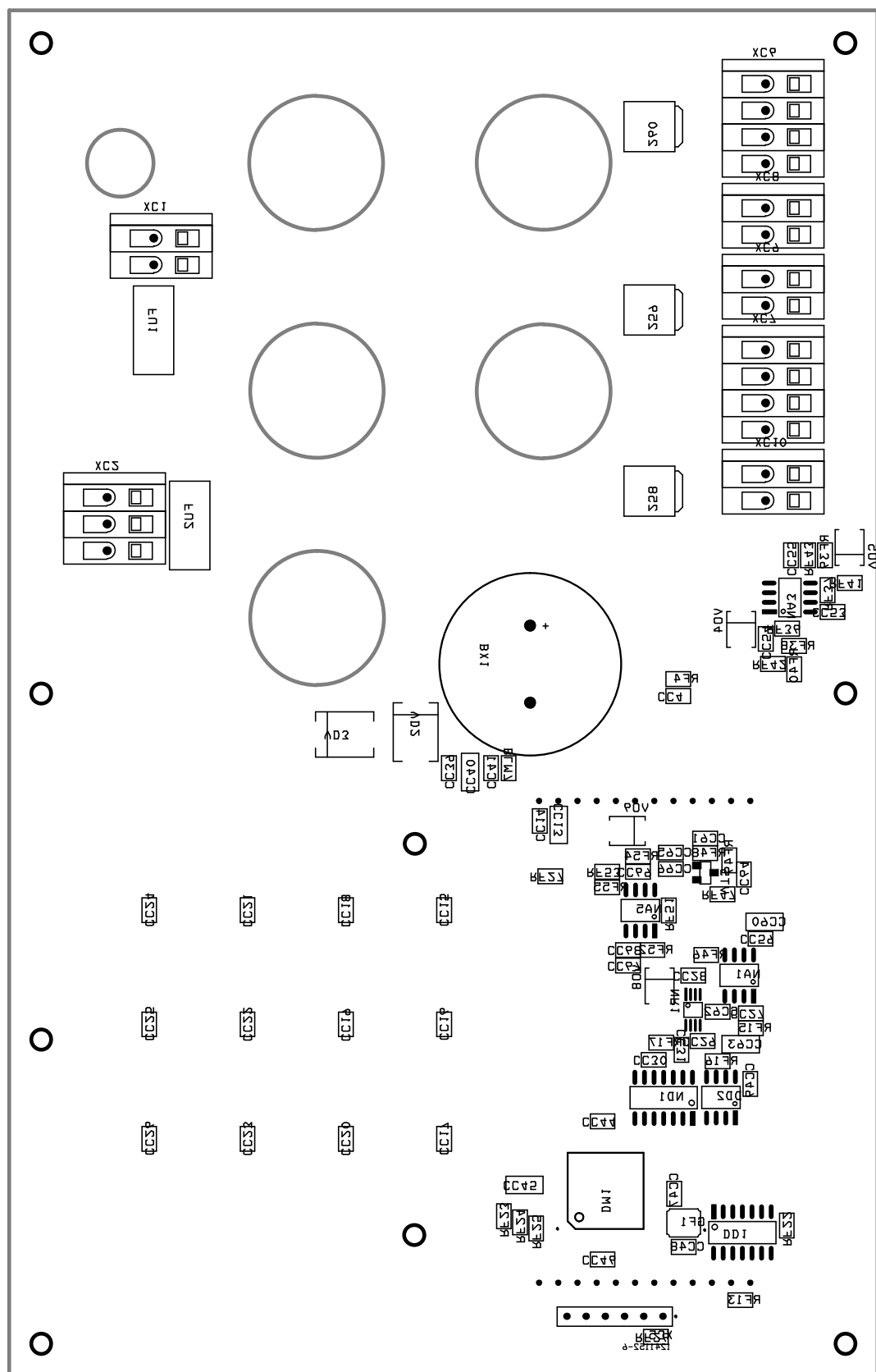
Deska plošných spojů – vrstva BOTTOM



Deska plošných spojů – data pro osazení TOP



Deska plošných spojů – data pro osazení BOTTOM



Použití pinů mikrokontroléru PIC24HJ128GP204

číslo pinu	označení (port)	In/Out	periferie	použití (indikace)
1	RB9	IN		Stav nabíjení
2	RC6	IN		Baterie plně nabita
3	RC7	IN		Napájecí adaptér připojen
4	RC8	OUT		Zvuková signalizace
5	RC9	OUT		Reset LCD
7	VCAP			Kompenzační kapacita
8	RB10	IN		Vstup tlačítka
9	RB11	IN		Vstup tlačítka
10	RB12	IN		Vstup tlačítka
11	RB13	IN		Vstup tlačítka
12	RA10	OUT		Samočinná deaktivace testeru
13	RA7	OUT	SPI2	Chip select - dig. Potenciometr
14	RP14	IN	SPI2	Datový vstup
15	RP15	OUT	SPI2	Datový výstup
18	MCLR	IN	ICSP	Resetovací vstup
19	AN0	IN	ADC	Analogový vstup napětí $V_{BAT/2}$
20	RA1	OUT		Ochrana paměti FLASH proti zápisu
21	RB0	OUT		Řízení posuvného registru DAC
22	RP1	OUT	SPI1	Datový výstup
23	RP2	OUT	SPI1	Hodinový signál
24	RB3	OUT	SPI1	Chip select - DAC
25	RP16	OUT	SPI2	Hodinový signál
26	RP17	OUT	OC	PWM signál
27	RC2	OUT	SPI2	Chip select - LCD
30	CLKI	IN		Externí rezonátor (hod. signál)
31	RA3	IN		Vstup tlačítka
32	RA8	OUT		Výstup signálu odometrie (B)
33	RB4	IN		Vstup tlačítka
34	RA4	IN		Vstup tlačítka
35	RA9	OUT		Výstup signálu odometrie (A)
36	RC3	IN		Vstup tlačítka
37	RC4	IN		Vstup tlačítka
38	RC5	OUT	SPI2	Chip select – FLASH paměť
39	VSS			Zemní potenciál GND
40	VDD			Napájecí napětí
41	RB5/PGED	IN	/ICSP	Vstup tlačítka/ICSP data
42	PGEC	IN	ICSP	Hodinový signál
43	RB7	IN		Vstup tlačítka
44	RB8	IN		Vstup tlačítka