

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**GPS navigace pro zemědělské stroje založená na
platformě Arduino**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan ŠPRISL**
Osobní číslo: **E15N0043P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **GPS navigace pro zemědělské stroje založená na platformě Arduino**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

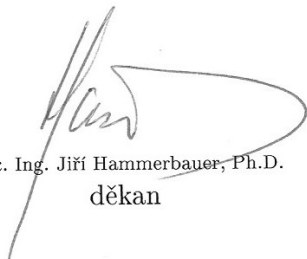
1. Prostudujte problematiku GPS navigace se zaměřením na užití v zemědělských strojích.
2. Navrhněte vhodné zapojení dostupných modulů a vlastních doplňků. Navrhněte hlavní panel zařízení.
3. Vytvořte ovládací software pro řídicí modul navigace.
4. Otestujte přesnost zařízení s ohledem na využití pro navigaci při ošetřování zemědělských ploch.
5. Uveďte možná další vylepšení zkonstruovaného zařízení a srovnajte jej s komerčně dostupnými alternativami.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Autonomous Tractor. [online]. [cit. 13.4.2016] Dostupné z: <https://hackaday.io/project/10697-autonomous-tractor>
2. Fons. Možnosti využití GPS navigace v zemědělství. [online]. [cit. 13.4.2016] Dostupné z: <http://www.gps-agro.cz/proc-vyuzivat-gps-v-zemedelstvi/>
3. Arduino. [online]. [cit. 13.4.2016] Dostupné z: <http://www.arduino.cc/en>
4. Mark Zehner, Peter Baumann. Serial Port Programming in Linux [online]. [cit. 13.4.2016] Dostupné z: <http://trainingkits.gweb.io/serial-linux.html>
5. Kaplan E. and Hegarty C. Understanding GPS: Principles and Applications. Artech House, 2005. ISBN 9781580538954.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kropík, Ph.D.**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím družicových navigačních systémů v zemědělství. V první části jsou popsány jednotlivé principy určování zeměpisné polohy. Dále jsou podrobněji popsány současné družicové systémy, které jsou civilně dostupné. Druhá kapitola se zabývá jejich využitím v zemědělství. Třetí část práce je zaměřena na návrh a realizaci zařízení sloužící pro navigování zemědělských strojů při polních pracích. Zařízení je založeno na platformě Arduino, jež se stará o potřebné výpočty. V práci je zmíněná technologie 3D tisku, která byla využita při konstrukci krytu zařízení. Následuje kapitola zabývající se testováním přesnosti a dlouhodobé funkčnosti navrženého zařízení. V závěru práce je provedeno srovnání s komerčními produkty a jsou uvedeny další možné vývojové kroky.

Klíčová slova

Určování polohy, satelitní systémy, přesnost určení polohy, GPS, Glonass, Galileo, diferenční systémy, využití v zemědělství, Arduino, Ublox, Nextion, navigační režimy, 3D tisk, testování

Abstract

The diploma thesis is focused on use of satellite navigation systems in agriculture. The first part describes the different principles of geographic positioning. Furthermore, the present-day satellite systems, that are available for civilian use, are described in more detail. The second chapter deals with their use in agriculture. The third part of the thesis is focused on the design and implementation of equipment used for navigation of agricultural machines in field works. The device is based on the Arduino platform, which takes care of the necessary calculations. The thesis mentioned 3D printing technology used in the construction of housing facilities. The following chapter deals with precision testing and long-term testing of the functionality of the proposed device. At the end of the work, the proposed device with commercial products is compared, and other possible development steps are outlined.

Keywords

Positioning, satellite Systems, positioning accuracy, GPS, Glonass, Galileo, differential systems, agricultural applications, Arduino, Ublox, Nextion, navigation modes, 3D printing, testing

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 15.5.2017

Bc. Jan Šprisl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Kropíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Zemědělskému družstvu Opařany za spolupráci při provádění praktického testování navrženého zařízení.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 URČOVÁNÍ POLOHY	12
1.1 ZEMĚPISNÁ POLOHA	12
1.1.1 Zeměpisné souřadnice.....	12
1.1.2 Kartézský souřadný systém	13
1.1.3 Převody mezi souřadnými systémy.....	14
1.2 METODY URČOVÁNÍ ZEMĚPISNÉ POLOHY	16
1.2.1 Triangulace.....	16
1.2.2 Trilaterace	17
1.2.3 Multilaterace.....	19
1.3 SATELITNÍ SYSTÉMY PRO URČOVÁNÍ POLOHY.....	20
1.3.1 Princip	21
1.3.2 GPS (Global Positioning System)	22
1.3.3 Glonass	22
1.3.4 Galileo	23
1.3.5 Přesnost určení polohy.....	23
1.3.6 Diferenční systémy DGPS.....	25
1.3.7 RTK.....	26
1.3.8 Použití satelitní navigace.....	27
2 VYUŽITÍ SATELITNÍCH NAVIGACÍ V ZEMĚDĚLSTVÍ	29
2.1 OBLASTI VYUŽITÍ.....	29
2.1.1 Navigování zemědělských strojů	29
2.1.2 Mapování pozemků	33
2.1.3 Vzorkování půdy.....	34
2.2 DRUHY VYUŽÍVANÝCH ZARÍZENÍ	34
2.2.1 Manuální řízení.....	34
2.2.2 Asistované řízení	35
2.2.3 Automatické řízení	36
2.2.4 Autonomní řídicí systémy.....	37
3 NÁVRH ZARÍZENÍ PRO NAVIGACI ZEMĚDĚLSKÝCH STROJŮ	38
3.1 HARDWARE	38
3.1.1 Platforma Arduino	38
3.1.2 Modul pro určování polohy.....	39
3.1.3 Zobrazovací jednotka.....	41

3.1.4	Navigační světelná lišta	42
3.1.5	Zvuková signalizace a senzor okolního osvětlení.....	43
3.1.6	Paměťová karta.....	44
3.1.7	Napájecí část.....	44
3.1.8	Nadstavba	45
3.2	SOFTWARE	46
3.2.1	Navigační režimy	46
3.2.2	Funkce Poslední navigační režim	53
3.2.3	Automatické vypnutí.....	53
3.3	KRYT PRO NAVRHOVANÉ ZAŘÍZENÍ	54
3.3.1	Návrh krytu zařízení.....	54
3.3.2	3D tisk komponent.....	55
4	TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ	56
4.1	TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI	56
4.1.1	Návrh testu	56
4.1.2	Průběh testu	57
4.1.3	Vyhodnocení.....	58
4.2	DLOUHODOBÉ PRAKTICKÉ TESTOVÁNÍ.....	61
4.2.1	Průběh testu	61
4.2.2	Vyhodnocení.....	62
5	POROVNÁNÍ A MOŽNÁ VYLEPŠENÍ.....	63
5.1	TEEJET CENTERLINE 220	63
5.2	TRACK-GUIDE II.....	64
5.3	MOŽNÁ VYLEPŠENÍ ZAŘÍZENÍ TRACNAV	65
5.3.1	Asistované řízení	65
5.3.2	Grafické zobrazení	65
5.3.3	Heads-up displej	66
	ZÁVĚR	67
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK A GRAFŮ.....	72
	SEZNAM PŘÍLOH.....	73

Seznam symbolů a zkratek

CDMA	Kódové dělení signálů
CZEPOS.....	Systém referenčních stanic pro korekci signálu GPS/GLONASS
DGPS	Diferenční GPS
DPS	Deska plošných spojů
FDMA	Frekvenční dělení signálů
GND.....	Kostra (záporný pól akumulátoru)
GNSS	Globální družicové polohové systémy
GPS	Globální poziční systém
IUGG	Mezinárodní unie geodézie a geofyziky
LPIS	Veřejný registr půdy
RTK	Kinematika v reálném čase
SBAS	Systém DGPS s využitím šíření korekcí pomocí satelitů
S-JTSK.....	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SPI.....	Sériové periferní rozhraní
TDMA.....	Kmitočtové dělení signálu
TDOA	Diferenční metoda měření vzdálenosti
TracNav	Název vyvinutého navigačního zařízení
UART.....	Asynchronní sériové rozhraní
WGS84.....	Rotační elipsoid aproximující tvar zemského povrchu

Úvod

Tato diplomová práce pojednává o využití satelitních navigačních systémů pro navigování zemědělských strojů vykonávajících polní práce. Moderní zemědělské stroje se vyznačují vysokým výkonem a přípojná zařízení jsou konstruována pro co největší možný pracovní záběr. Šírky těchto souprav jsou často v řádu desítek metrů. V těchto případech už není obsluha schopná přesného navádění soupravy pro co největší využití jejího potenciálu. Proto jsou v současné době čím dál častěji implementovány navigační systémy udávající obsluze navigační pokyny pro řízení soupravy, popř. tyto systémy přímo řídí soupravy a obsluha provádí dohled nad vykonávanou prací.

Cílem práce je navrhnout a vytvořit navigační zařízení určující polohu soupravy na základě satelitních systémů a zobrazovat navigační pokyny pro co nejpřesnější vedení obsluhou. Zařízení je založeno na platformě Arduino, konkrétně Arduino DUE. Pro vyhodnocování polohy je využit GNSS přijímač Ublox NEO M8N. Navigační pokyny jsou zobrazovány pomocí světelné navigační lišty a 4.3“ dotykového displeje. Ovládání je prováděno taktéž pomocí displeje.

Práce je rozdělena na pět částí. První se zabývá seznámením s možnostmi určování zeměpisné polohy a podrobněji s využitím satelitních navigačních systémů. V druhé části je proveden rozbor využívání těchto systémů v zemědělství a jsou popsány jednotlivé typy navigačních systémů implementovaných v zemědělských strojích. Následuje kapitola popisující hardwarovou a softwarovou část navrženého zařízení. Podrobněji je popsána použitá platforma Arduino, návrh a výroba nadstavby a světelné navigační lišty, implementace displeje Nextion, zvukové signalizace a napájecí části zařízení. Dále jsou vysvětleny jednotlivé navigační režimy, které zařízení podporuje, a s tím je spojená tvorba softwarové části. Předposlední kapitola se zabývá testováním přesnosti a dlouhodobým testováním funkčnosti zařízení umístěném a využívaném v traktoru Zemědělského družstva Opařany. V poslední části je provedeno srovnání s komerčními produkty a možné další kroky vývoje. Pro navržené zařízení byl zvolen název TracNav.

1 URČOVÁNÍ POLOHY

Tato část diplomové práce je zaměřena na problematiku radiového určování zeměpisné polohy pomocí satelitních systémů. Tato technologie je využívána pro určení pozice v navrhovaném zařízení. V první kapitole je vysvětlen pojem zeměpisná poloha na Zemi. Následuje kapitola rozebírající metody jejího určování. Další část je zaměřena na radiové systémy a podrobněji na satelitní systémy. Na závěr je popsán princip, konkrétní systémy a jejich přesnost.

1.1 ZEMĚPISNÁ POLOHA

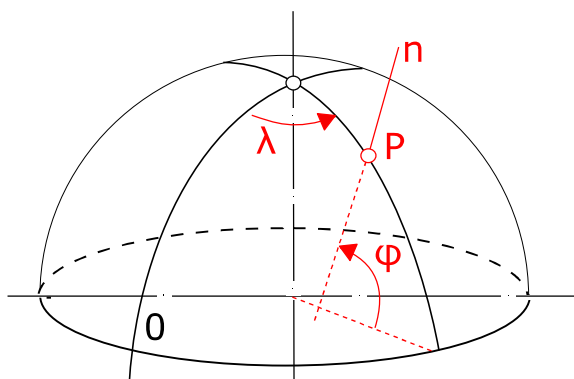
Pro přesné určení pozice daného bodu na zemském povrchu je zaveden pojem zeměpisná poloha. Obsahuje definovaný soubor zeměpisných souřadnic. Nejčastěji jsou využívány dva souřadné systémy. Pro vysvětlení je použita koule jako referenční těleso aproximující zemský povrch. Nicméně vzhledem k členitosti Země je tato úvaha používána jen v určitých případech. Jako přesnější matematický model popisující skutečný tvar se využívá rotační elipsoid.

1.1.1 Zeměpisné souřadnice

Souřadný systém využívá pro určení pozice daného bodu na referenčním tělese zeměpisnou šířku φ a délku λ . (Obr. 1.1)

Zeměpisná šířka φ je definována jako úhel, který svírá normála referenčního tělesa v daném bodě s rovinou rovníku. Nabývá kladných hodnot od 0° (rovník) do 90° (Severní pól), nebo do -90° (Jižní pól). Pokud je zavedeno značení pólů, tak jsou hodnoty od 0° do 90° N, nebo 90° S. [1]

Zeměpisná délka λ je definována jako úhel, který svírá rovina poledníku procházejícího daným bodem s rovinou Greenwichského poledníku. Nabývá kladných hodnot od 0° (rovník) do 180° (východní polokoule), nebo do -180° (západní polokoule). Pokud je zavedeno značení polokoulí, tak jsou hodnoty od 0° do 180° E, nebo 180° W. [1]

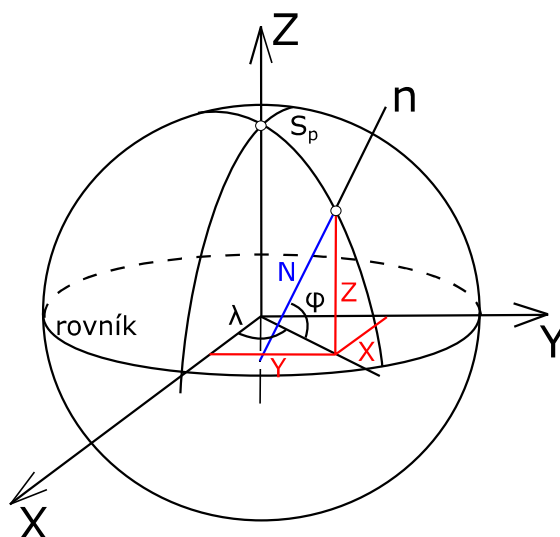


Obr. 1.1: Zeměpisné souřadnice [1]

Pokud je použita koule jako referenční těleso, tak je normála shodná s přímkou procházející daným bodem a středem koule. V případě aproximace Země pomocí elipsoidu už tomu tak není. Tento úhel, který svírá rovina rovníku a přímka procházející bodem a středem tělesa, se nazývá geocentrická zeměpisná šířka β . Využívá se především v astronomii. [1]

1.1.2 Kartézský souřadný systém

Jedná se 3rozměrný pravoúhlý systém definovaný souřadnicemi XYZ (Obr. 1.2). Počátek tohoto systému se nachází ve středu referenčního tělesa, osa Z je totožná s osou rotace, osa X prochází průsečíkem roviny rovníku a roviny daného poledníku. Osa Y je kolmá na předchozí osy. Souřadnice jsou udávány v délkových jednotkách vtažených k bodu průniku os XYZ. [2]



Obr. 1.2: Kartézský systém souřadnic [1]

1.1.3 Převody mezi souřadnými systémy

Při určitých početních operacích je zapotřebí použít jiný systém souřadnic, než v jakém je zadán daný bod. Níže jsou uvedeny přepočty mezi kartézským systémem a zeměpisnými souřadnicemi pro kulový a eliptický model zemského povrchu.

- *Převod kartézského systému souřadnic na zeměpisné souřadnice pro kulový model [2]*

$$\varphi = \arccos\left(\frac{z}{R}\right)$$

$$\lambda = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1.1)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

- *Přepočet zeměpisných souřadnic do kartézského systému pro kulový model [2]*

$$x = R \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda$$

$$y = R \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \quad (1.2)$$

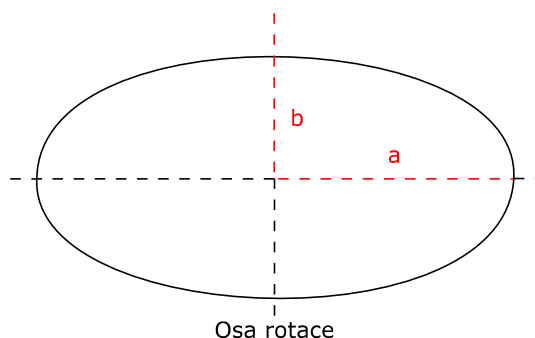
$$z = R \cdot \sin \varphi$$

Ve výše uvedených rovnicích proměnná R udává poloměr kulového modelu. Při aproximaci zemského povrchu pomocí tohoto modelu není vzhledem k tvaru Země tato hodnota konstantní. IUGG udává střední poloměr jako 6 371 008 m.[3]

Pro převody mezi systémy souřadnic vztaženými k eliptickému modelu Země je nutné definovat další proměnné popisující jeho tvar. Hlavní poloosa elipsoidu se značí a a vedlejší poloosa b (Obr. 1.3). Na základě těchto údajů je nutné vypočítat zploštění i (1.3) a numerickou výstřednost (excentricitu) e tohoto tělesa (1.4). [1]

$$i = \frac{a - b}{a} \quad (1.3)$$

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} \quad (1.4)$$



Obr. 1.3: Výchozí rotační elipsoid

Vzhledem k jednoduššímu popisu se v praxi používá rotační elipsoid, který má osu rotace shodnou s vedlejší poloosou b . Rozlišují se 2 typy.

- **Zemský elipsoid**

Osa rotace prochází Severním a Jižním pólem. Nejčastěji používaným je WGS84. Jedná se o světový standart spjatý převážně se systémem GPS.

- **Referenční elipsoid**

Osa rotace neprochází zemskými póly. Pomocí tohoto elipsoidu se aproximuje část území pro přesnější kopírování tvaru daného území. Použití je převážně v geodézii, kdy některé státy mají vlastní eliptické modely. Např. Česká republika v geodézii nejčastěji využívá S-JTK, který vychází z tzv. Křovákova zobrazení. [1][4]

- **Převod kartézského systému souřadnic na zeměpisné souřadnice pro eliptický model [6]**

$$\varphi = \arctan \left(\frac{z}{(1 - e^2) \cdot p} \right)$$

$$\lambda = \arctan \left(\frac{y}{x} \right) \quad (1.5)$$

$$p = \sqrt{x^2 + y^2}$$

- **Přepočítání zeměpisných souřadnic do kartézského systému pro eliptický model [6]**

$$X = N \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda$$

$$Y = N \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \quad (1.6)$$

$$Z = N \cdot (1 - e^2) \cdot \sin \varphi$$

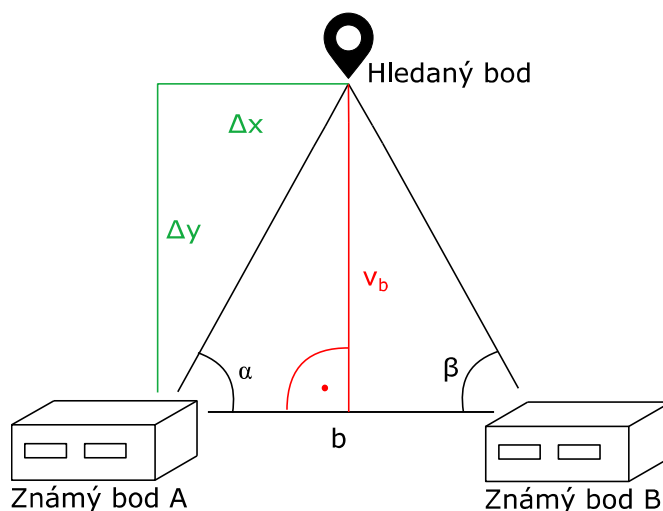
Ve výše uvedených rovnicích proměnná N udává vzdálenost daného bodu a průniku rotační osy s normálou (Obr. 1.2).

1.2 METODY URČOVÁNÍ ZEMĚPISNÉ POLOHY

V předchozí kapitole je vysvětlen pojem zeměpisná poloha. Nyní jsou uvedeny tři základní metody, které slouží k určení polohy hledaného bodu.

1.2.1 Triangulace

Jedná se o metodu založenou na trigonometrii. Pro zjištění polohy hledaného bodu je zapotřebí znát 2 další body a vzdálenost b mezi nimi. Následně se určí úhly α a β , které svírají spojnice s hledaným bodem a spojnice daných bodů. Takto se sestrojí pomyslný trojúhelník (Obr. 1.4). Následně se pomocí rovnice 1.7 určí velikost úsečky v_b , která je kolmá na úsečku mezi známými body a vychází z hledaného bodu. Pro určení pozice hledaného bodu se zvolí např. bod A jako referenční a spočítají se diferenční vzdálenosti Δx a Δy . [5]



Obr. 1.4: Metoda triangulace

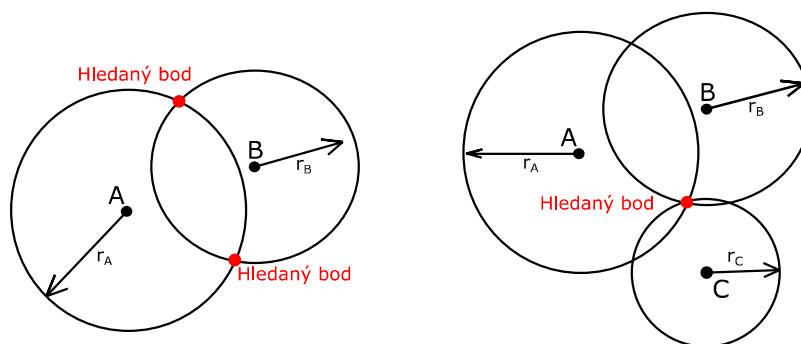
$$v_b = \Delta y = \frac{b}{\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta}} \quad (1.7)$$

$$\Delta x = \cot g(\alpha) \cdot v_b$$

1.2.2 Trilaterace

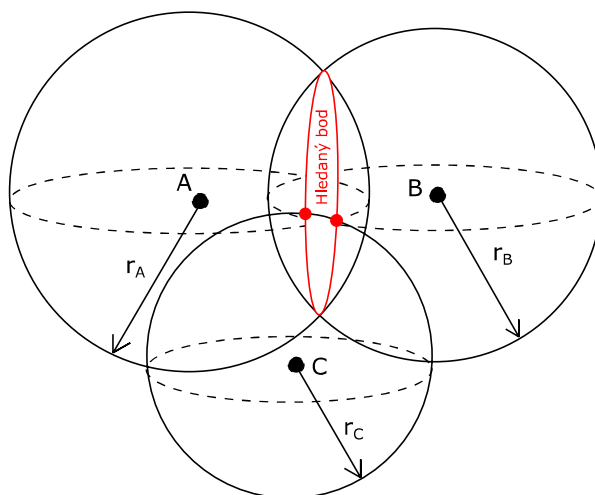
V předchozí metodě bylo zapotřebí znát vzdálenost mezi danými body a úhly α a β . V této metodě se poloha hledaného bodu určuje na základě znalosti vzdáleností mezi jednotlivými známými body a hledaným bodem.

Metoda spočívá ve vytvoření kružnic, resp. sférou, kolem známých bodů s poloměrem o velikosti vzdálenosti k hledanému bodu. Na obrázku 1.5 je znázorněna úloha ve 2D prostoru. Jak je patrné, při známých dvou bodech dochází k průniku kružnic ve dvou místech. Z tohoto vyplývá, že k přesnému určení polohy hledaného bodu je zapotřebí minimálně tří známých bodů. [5]



Obr. 1.5: Trilaterace pomocí 2 a 3 známých bodů

Při využití této metody v 3D prostoru jsou polohy známých bodů definovány pomocí tří souřadnic XYZ a kolem každého je vytvořena sféra o daném poloměru. Pokud budou známy pouze dva body, tak hledaný bod se bude nacházet na kružnici vytvořené průnikem dvou sfér. V případě třetího daného bodu se vytvořením průniku tří sfér získají dva body (Obr. 1.6). Tímto způsobem nedojde k přesnému určení polohy bodu. Z tohoto důvodu se začne uvažovat ještě čtvrtý kruh. V případě lokalizace bodů na zemském povrchu se jako čtvrtý kruh bere Země. Poté jeden ze získaných bodů leží na povrchu Země a druhý je mimo v prázdném prostoru, a proto se eliminuje. [5]



Obr. 1.6: Trilaterace v 3D prostoru

$$\begin{aligned}
 r_A &= \sqrt{(x^2 - x_A^2) + (y^2 - y_A^2) + (z^2 - z_A^2)} \\
 r_B &= \sqrt{(x^2 - x_B^2) + (y^2 - y_B^2) + (z^2 - z_B^2)} \\
 r_C &= \sqrt{(x^2 - x_C^2) + (y^2 - y_C^2) + (z^2 - z_C^2)}
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

Rovnice 1.7 udávají základní vztah mezi poloměrem sfér a pozicí známých bodů s pozicí hledaného bodu. Vyřešením této rovnice se získá pozice hledaného bodu v 3D prostoru ve formě XYZ souřadnic. [6][7]

- **Aktivní dálkoměrné systémy**

Trilaterace se jeví jako vhodná pro určování pozice pomocí satelitních systémů. Pro použití této metody je zapotřebí znát přesnou pozici daných bodů a od nich vzdálenost k hledanému. Na tomto principu pracují tzv. aktivní dálkoměrné systémy. Jedná se o systémy pracující na způsobu dotaz-odpověď. V místě v němž je zapotřebí určit polohu se musí nacházet zařízení nazývané odpovídač. Pomocí satelitů pozemní řídicí stanice vyšle dotaz a odpovídač v neznámém místě vyšle zpět pomocí signálu přes družice odpověď. Na základě zpoždění od satelitů tohoto signálu pozemní řídicí stanice určí polohu odpovídače. [6]

Nicméně pro funkci tohoto systému je zapotřebí, aby zařízení na neznámém místě bylo radiově aktivní. Další problém také nastává v tom, že tento systém je limitován počtem zařízení, které může obsloužit.

- **Pasivní dálkoměrné systémy**

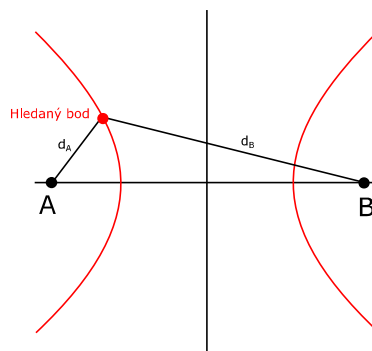
Tyto systémy spočívají ve vysílání synchronizovaného signálu z družic a přijímač na neznámé poloze vyhodnocuje dobu šíření elektromagnetické vlny a zároveň s daty o aktuální poloze satelitů nebo jejich aktuálních drahách, vypočítává svojí pozici. [7]

Nicméně není možné přímo zjistit dobu šíření signálu mezi satelitem a přijímačem, jelikož není znám absolutní čas vyslání signálu od družice. Je proto zapotřebí využít takovou metodu, která zjistí tento údaj nepřímo. Tato metoda se nazývá Multilaterace.

1.2.3 Multilaterace

Multilaterace je metoda založená na vyhodnocování rozdílu doby mezi přijímanými signály a jedním vybraným příchozím signálem. Metoda na měření zpoždění signálu se často označuje zkratkou TDOA vycházející z anglického názvu „*Time Difference of Arrival*“. Multilaterace patří do skupiny dálkoměrných metod. Existují další dělení na úhломěrné a dopplerovské metody, ale ty v současné době nejsou u civilních satelitních systémů pro určování polohy používány. [6][7]

Princip využití této metody v satelitním určování polohy spočívá ve vysílání synchronizovaných signálů ze všech družic. Po odeslání se signál šíří přímo pomocí elektromagnetických vln rychlostí světla. Rychlost vln je konstantní a tím pádem je délka šíření signálu úměrná době jeho šíření k přijímači. Z tohoto vyplývá, že v případě dvou známých bodů, bude rozdíl vzdáleností mezi nimi a hledaným bodem konstantní. Výsledkem je, že v případě 2D prostoru se hledaný bod nachází na hyperbole (Obr. 1.7), a proto je zapotřebí třetího známého bodu pro vytvoření průniku dvou hyperbol, a tím pádem přesné určení pozice. [6][7]



Obr. 1.7: Multilaterace v 2D prostoru [7]

Ve 3D prostoru se takto vytvořené těleso nazývá hyperboloid. Při využití tří známých bodů se protnutím dvou hyperboloidů získá křivka. Proto je zde zapotřebí čtyř bodů (A, B, C, D) pro přesné určení neznámé pozice. [6][7]

$$\begin{aligned}\Delta t_A &= T_A - T_D = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(x^2 - x_A^2) + (y^2 - y_A^2) + (z^2 - z_A^2)} - \sqrt{x^2 - y^2 - z^2} \right) \\ \Delta t_B &= T_B - T_D = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(x^2 - x_B^2) + (y^2 - y_B^2) + (z^2 - z_B^2)} - \sqrt{x^2 - y^2 - z^2} \right) \\ \Delta t_C &= T_C - T_D = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(x^2 - x_C^2) + (y^2 - y_C^2) + (z^2 - z_C^2)} - \sqrt{x^2 - y^2 - z^2} \right)\end{aligned}\quad (1.8)$$

Rovnice 1.8 popisují výpočet doby rozdílu zpoždění šíření signálu od jednotlivých známých bodů A, B, C. Bod D byl vzat jako počátek souřadného systému se souřadnicemi 0, 0, 0 a zároveň jako výchozí bod pro počítání časového zpoždění mezi příchody jednotlivých signálů. Konstanta c je rychlost šíření elektromagnetických vln, tedy cca 299 792 km/s. [7]

1.3 SATELITNÍ SYSTÉMY PRO URČOVÁNÍ POLOHY

V současné době jsou nejrozšířenější systémy pro určování zeměpisné polohy právě satelitní systémy, jako je např. GPS, GLONASS a GALILEO. Přestože myšlenka satelitních systémů je známá dlouho, první nasazení se datuje v 60. letech 20. století. Jednalo se o navigační systém TRANSIL americké armády pracující na principu Dopplerova jevu. Většina těchto systémů vznikala právě na základě potřeb vojenských složek jednotlivých států. Technický pokrok v odvětví elektroniky a kosmického segmentu vedl na uvolnění těchto systémů i pro civilní využití. [6]

V této kapitole jsou podrobněji popsány GNSS používané na evropském kontinentu. Jedná se o GPS, GLONASS a do budoucna GALILEO. Dalším systémem je například BEIDOU pokrývající území Číny. Hlavní výhody těchto systémů jsou celosvětová dostupnost, neustálá funkce bez ohledu na denní dobu a s přibývajícím družicemi stávajících nebo nových systémů se neustále zvyšuje přesnost a rychlost určení pozice. Jako nevýhody lze brát použití pouze v otevřeném terénu, jelikož systém nefunguje v podzemí a uvnitř budov. V lesích nebo v hustě zastavěných městských plochách dochází k nepřesnému určování polohy.

1.3.1 Princip

V předchozí kapitole již byla popsána metoda multilaterace, jež je v současné době využívána u satelitních systémů pro určování zeměpisné polohy. V praxi při použití polohovacích družic je pro určení polohy v 3D prostoru zapotřebí nejméně 4 satelitů. A právě z důvodu, že čtvrtý satelit se bere jako referenční a měří se relativní doba příchodu mezi třemi předchozími satelity a čtvrtým satelitem. Výsledná vypočtená vzdálenost se nazývá tzv. pseudovzdálenost. Tento termín je zaveden z důvodu nutnosti použití dalších zpřesňujících výpočtů. [6][7]

Většina těchto GNSS systémů se dělí do tří segmentů.

- ***Kosmický segment***

Tato část je tvořena družicemi, které obíhají po svých oběžných drahách okolo Země. Každá družice musí být vybavena vysílací a přijímací částí, přesnými atomovými hodinami, systémem napájení pomocí baterií a solárních panelů a dalšími systémy starajícími se např. o korekci dráhy družice na oběžné dráze.

Každá družice kromě přesného synchronního signálu vysílá data o své poloze a o poloze i ostatních družic. Tato data se nazývají efemeridy a almanach.

Almanach jsou data obsahující informace o oběžných drahách všech družic, ovšem s omezenou přesností. Tato data nejsou primárně určena k výpočtu hledané pozice, ale k rychlejšímu startu přijímače.

Efemeridy obsahuje přesná data o pozici družice, která je právě vysílá. Každá družice vysílá vlastní efemeridy a ty už slouží k přesnému výpočtu neznámé pozice přijímače.

- ***Sledovací - řídicí segment***

Sledovací a zároveň řídicí segment se skládá z několika pozemních monitorovacích stanic s přesně definovanou polohou a hlavní řídicí stanice, jež má za úkol shromažďovat data z monitorovacích stanic. Nashromážděná data obsahují údaje o pozorování viditelných družic a na jejich základě se generují efemeridy, korigují se atomové hodiny v družicích a sledují se

další funkce potřebné pro správné fungování systému. Vygenerované korekční informace se odesílají zpět do družic.

- ***Uživatelský segment***

Uživatelský segment se skládá z jednotlivých přijímačů, jež přijímají signál z družic a na základě těchto informací vypočítávají svoji zeměpisnou polohu.

1.3.2 GPS (Global Positioning System)

Jedná se o pasivní dálkoměrný systém vyvinutý americkým vojenským průmyslem v 70. letech minulého století. První spuštění vysílání GPS systému bylo v roce 1977 a plně funkční byl v roce 1993. [6]

Systém byl plánován, že bude tvořen 24 aktivními a 3 záložními družicemi obíhajícími Zemi ve vzdálenosti přibližně 20 200 km po 6 oběžných drahách se sklonem 55°. Doba oběhu je přibližně 11 h 58 min. Nicméně v současné době je využíváno 31 družic. Frekvence vysílané k pozemním přijímačům se nachází v L1 - L5 pásmech (1575,42– 1176,45 MHz). Pro civilní verze je používána frekvence v pásmu L1, tedy 1575,42 MHz. [8]

Systém GPS neslouží pouze pro určování polohy, ale lze jím určovat rychlost pohybujícího se přijímače a vzhledem k přesným atomovým hodinám je možné použití jako generátor přesného synchronního času pro více přijímačů nezávisle na jejich poloze. Zároveň také družice obsahují systémy pro detekci jaderného záření na zemském povrchu.

1.3.3 Glonass

Jedná se o pasivní dálkoměrný systém vyvinutý ruskou armádou. Vývoj započal ve stejném období jako vývoj systému GPS.

Systém se skládá z 24 družic obíhajících Zemi ve vzdálenosti 19 100 km po třech oběžných drahách. Doba oběhu Země jedné družice je přibližně 11 h 15 min. Rozdílem oproti GPS bylo použití FDMA, zatímco GPS používá CDMA. Nicméně v současné době nová generace družic umožňuje použití obou principů. V případě vysílání signálu pomocí FDMA je frekvence v pásmu L1 pro civilní vysílaný signál $1\,602 + 0,5625n$ MHz, kde n značí frekvenční číslo kanálu dané družice. [7]

1.3.4 Galileo

System Galileo je projekt výstavby civilního GNSS zajišťovaný Evropskou unií. Počátky návrhu systému jsou datovány v roce 1999. První družice byla vynesena do vesmíru v roce 2011. V současné době byl spuštěn zkušební provoz s 10 funkčními satelity. Plný provoz je prozatím plánován na rok 2020. V roce 2012 byl v Praze zahájen provoz administrativního sídla pro tento systém. Kosmický segment má být tvořen 24 aktivními a 6 záložními družicemi ve vzdálenosti 23 222 km od zemského povrchu.

System Galileo má být unikátní i v tom, že umožňuje komunikaci ve směru od přijímače do satelitu. Tato možnost má být nápomocna během záchranných prací, kdy má být komunikační kanál využit pro odeslání polohy přijímače osoby v nouzi a zpětnou komunikaci s ní, např. předávání informací o postupu záchranných složek. [9]

1.3.5 Přesnost určení polohy

V předchozí kapitole o zjišťování vzdálenosti mezi družicí a přijímačem pomocí multilaterace je udáno, že touto metodou se nezíská skutečná vzdálenost, ale tzv. pseudovzdálenost, jež je ovlivněna chybami. V této kapitole jsou popsány jednotlivé významné chyby při určování pozice.

Ionosféra způsobuje prodloužení dráhy a snížení rychlosti elektromagnetického signálu. Nicméně změny jsou pro určité území téměř konstantní a je možné je pomocí dalších systémů korigovat, viz kapitola o diferenčních korekčních systémech. Takto způsobená chyba může vnést nepřesnost v určení pozice až 5 m. [7]

Průchod signálu **troposférou** má za následek vnesení chyby do určení polohy až cca 0,5 m. Jedná se o změnu dráhy a rychlosti šířeného signálu způsobenou změnami vlhkosti, teploty a tlaku v troposféře. [7]

Vícenásobné šíření signálu je způsobeno odrazem signálu o zemský povrch, budovy nebo vodní plochy a až poté jeho příjmem na anténě přijímače. Takto způsobená nepřesnost v určení pozice je přibližně 1 m. Nicméně v městské zástavbě tato chyba může dosahovat až desítek metrů. [7]

Přesnost efemerid, které jsou korigovány pomocí zemského řídicího segmentu a odesílány zpět do družice, obsahují určitou nepřesnost, která narůstá vlivem stáří těchto informací. Dále také vzniká chyba v aritmetice procesoru přijímače. Nepřesnost způsobená tímto vlivem může dosáhnout až cca 2,5 m. [7]

Atomové hodiny, přestože jsou velice přesné, mohou vykazovat určitou nepřesnost. Tato chyba může být určena pomocí pozemního segmentu, který zajistí částečnou korekci. Nepřesnost způsobená tímto vlivem může dosáhnout až cca 2,5 m. [7]

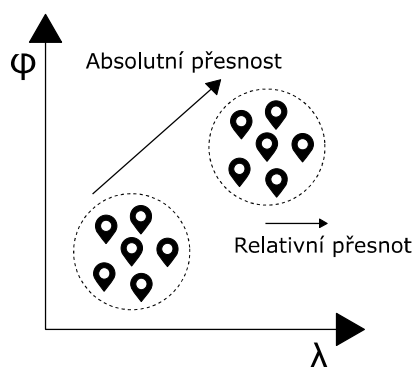
Ve výsledku se celková odchylka v určení pozice hledaného bodu u systému GPS pohybuje přibližně na hranici 7 m. Nicméně na přesnost systému má vliv i elevační úhel přijímané družice a jejich rozmístění při přijímání signálu. [7]

- **Absolutní přesnost**

Výše uvedená hodnota přesnosti satelitních polohových systémů se nazývá absolutní přesnost. Tímto je myšlena opakovatelná přesnost určení pozice nezávisle na čase. V praxi se jedná o přesnost lokalizace stejné pozice, např. další den. [10]

- **Relativní přesnost**

Jedná se o přesnost mezi určením současné pozice a minulé v krátkém časovém okamžiku, např. 15 minut. Tento časový úsek je uveden z důvodu udávání této přesnosti u komerčních navigačních zařízení používaných v zemědělství. Často bývá označována jako Pass-to-Pass. Rozdíl je uveden na Obr. 1.8. [10]



Obr. 1.8: Rozdíl mezi absolutní a relativní přesností

1.3.6 Diferenční systémy DGPS

Pro zpřesnění satelitních polohových systémů se používají diferenční systémy. Hlavní myšlenkou je zjistit chyby, které se podílejí na nepřesnosti určování pozice v daný okamžik a vysílat korekční data do přijímače, jenž je poté použije pro přesnější výsledek.

Princip systému spočívá v příjmu GPS signálu pomocí dvou přijímačů. Jeden přijímač nazývaný jako referenční stanice je umístěn na přesně definované poloze. Slouží pro vypočítávání korekcí, pomocí kterých lze na určitém území téměř odstranit vliv ionosféry, troposféry a chybu efemerid. Druhý přijímač je mobilní a přijímá signál z družic a pomocí dalších komunikačních kanálů i korekční data z referenční stanice, který poté využívá při výpočtu polohy.

Výpočet korigovaných pozic může být řešen tzv. post processing metodou, kdy mobilní přijímač uloží polohy do paměti zařízení a až poté zpětně dochází k přepočtu pomocí korekčních dat. Druhým případem je korigovat výpočet souřadnic v reálném čase. Pro použití v zemědělství je potřebný právě tento způsob. Diferenční systémy se dělí podle oblasti pokrytí.

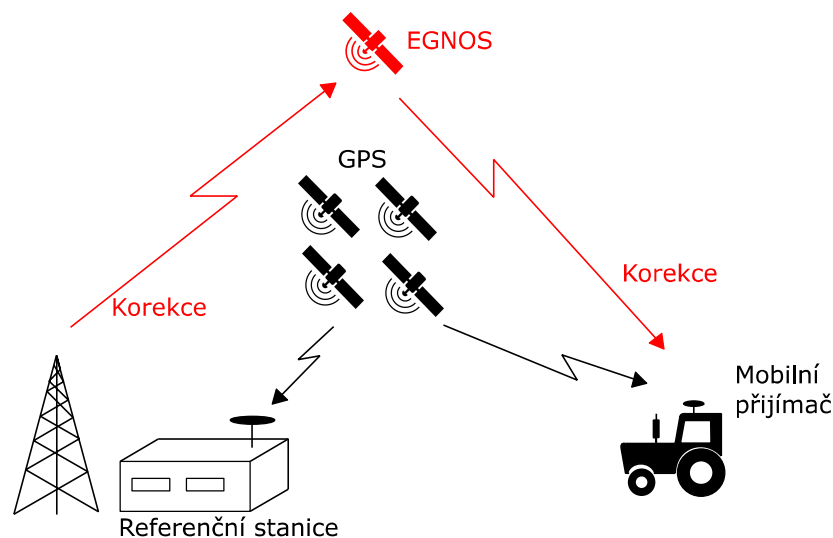
- **Lokální diferenční systémy**

Tyto systémy jsou zaměřené na pokrytí oblasti v řádu kilometrů. Lokální diferenční systémy pracují na principu vysvětleném výše a jako komunikační kanál pro přenos korekčních dat využívají pozemní přenosové systémy, jako je například rádiový vysílač a přijímač nebo připojení na internet pomocí mobilních sítí. V ČR je vybudována síť 28 referenčních stanic CZEPOS, jež je provozována Zeměměřičským úřadem. DGPS signál je přenášen do přijímače přes internet. Tato služba už je ovšem zpoplatněna, nicméně lze dosáhnout přesnosti určení pozice přibližně na 10 cm. [11]

- **Regionální diferenční systémy**

Pro zpřesnění systému GPS, poté i GLONASS, na větší oblast byl vybudován systém nazývaný se SBAS. Název vychází z prvních písmen anglického názvu „Satellite Based Augmentation Systems“. Systém se opět skládá z pozemních referenčních stanic pro vyhodnocení korekce GPS signálu. Nicméně data do přijímače jsou odesílána pomocí satelitů umístěných na geostacionární dráze. Tyto regionální diferenční systémy jsou provozovány

vládními organizacemi a většinou jsou volně dostupné. SBAS systém pokrývající oblast evropského kontinentu se nazývá EGNOS (Obr. 1.9) a skládá se ze tří družic. Frekvence vysílaného signálu je shodná s frekvencí GPS, je tedy možné přijímat korekční data, pokud to přijímač umožňuje, bez nutnosti použití další antény. Podle výzkumu [12], zaměřeného na dlouhodobé testování přesnosti určování zeměpisné polohy daného bodu pomocí systému GPS a EGNOS provedeného v roce 2014, byla vypočítána střední odchylka kvadratické chyby RMS, tj. relativní chyba určení polohy daného bodu s 68,3% pravděpodobností, na hodnotu 0,4 m.



Obr. 1.9: Princip diferenčního systému EGNOS

1.3.7 RTK

Název vychází z anglických slov „Real-Time Kinematic“. Jedná se o korekční systém založený na stejném principu jako DGPS. Rozdíl je ve vyhodnocování korekcí. Referenční stanice u systému DGPS pracuje na principu kódového měření, kdy je podle časových značek obsažených v signálu vysílaného od družic vypočtena poloha přijímače. Metoda RTK spočívá v měření fáze signálu nosných vln od družic. Takto získaná korekční data jsou přenášena do mobilního přijímače pomocí pozemních komunikačních kanálů. Data jsou používána v reálném čase. Udávaná přesnost určení pozice pomocí použití RTK je 2,5 cm. Využití je možno řešit více způsoby, nicméně nejčastější jsou dva. První spočívá v umístění jedné mobilní stanice (Obr. 1.10) s poloměrem pokryté oblasti cca 10 km. S ohledem na použité přenosové kanály pro přenos korekcí je možno pokrývat mnohem větší oblast, nicméně poté narůstá chyba určení pozice. Druhá možnost je vybudovat síť referenčních stanic. Tuto zpoplatněnou službu poskytuje systém CZEPOS. [7][11]

Využití je v mnoha odvětvích, převážně v oblasti robotických řídicích systémů. V zemědělství je využití právě v asistovaných a automatických navigačních systémech, kdy jsou stroje automaticky řízeny pomocí počítače po přesně definovaných drahách. V budoucnu se počítá s nasazením tohoto systému v autonomních zemědělských strojích, které budou vykonávat svou činnost bez přítomnosti obsluhy.



Obr. 1.10: Mobilní RTK stanice od společnosti Trimble, převzata z 0

1.3.8 Použití satelitní navigace

V současné době je používání satelitních polohových systémů velice rozšířené v mnoha odvětvích průmyslu.

- *Vojenský sektor*

Vojenský sektor byl první, kdo tyto systémy začal používat a zároveň stál za jejich vznikem. Je užíván pro navigování vojenských lodí, letadel, raketových zařízení a řízení koordinace postupu pozemních sil a vozidel.

- **Civilní sektor**

Poté co byly tyto systémy uvolněny pro použití v civilním sektoru, začaly být hojně využívány v mnoha odvětvích. V současnosti GNSS jsou využívány v letectví, námořní dopravě, automobilovém a stavebním průmyslu, v telekomunikačním průmyslu kdy každý chytrý mobilní telefon je vybaven GPS čipem. Dalšími odvětvími jsou geodézie, doručovací služby s možností sledování zásilek, turistika a rekreace. V zemědělství jsou GNSS využívány pro snížení nákladů potřebných pro setí, ošetřování a sklizeň zemědělských plodin. Nejdůležitější využití GNSS je v oblasti záchranářství, kdy právě tyto systémy obsažené například v mobilních telefonech velice usnadňují záchranné práce. Aktuálním, velice diskutovaným tématem je průmyslová revoluce označována jako Průmysl 4.0, ve kterém je počítáno s širokým uplatněním satelitních polohových systémů.

2 VYUŽITÍ SATELITNÍCH NAVIGACÍ V ZEMĚDĚLSTVÍ

Tato část se zabývá využitím satelitních systémů pro určování polohy v zemědělství. V důsledku snahy o snížení nákladů spojených se zemědělskou výrobou a rozvojem moderních technologií spojených s automatizací pracovních postupů a určováním zeměpisné polohy je využívání GNSS systémů jedním z neúčinnějších řešení. S používáním těchto technologií se zavádí pojem **precizní zemědělství**. [14]

2.1 OBLASTI VYUŽITÍ

Jak už bylo výše popsáno, tak oblast využití GNSS systémů v zemědělství je v současné době velice rozšířená. Následující tři kapitoly 2.1.1–3 popisují nejčastější využití.

2.1.1 Navigování zemědělských strojů

V současné době jsou neustále vyvíjeny silnější traktory a stroje používané v zemědělství. S rostoucím výkonem a tím snaze o co nejefektivnější využití jejich potenciálu, je současný trend používat přípojná zařízení (také označována jako náradí) o co největší možné šířce. V praxi toto znamená, že žací stroje sklízějící obilí mají pracovní záběr větší než 12 m, stroje zpracovávající půdu 18 m a stroje aplikující chemickou ochranu rostlin mají záběr více než 28 m. S takovými pracovními záběry náradí nastává problém při otáčení těchto souprav na konci pozemku na najíždění na další řádek, kdy je nutné provádět složité manévry a je zapotřebí velkého prostoru. S využitím navigačních systémů je možné jezdit ob několik řádků a není nutné se vracet hned na další.

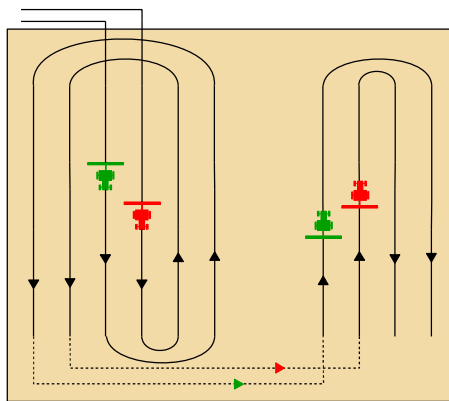
Jsou i zemědělské podniky uplatňující politiku založenou na méně výkonných strojích s menším pracovním záběrem, v rámci jednotek metrů. Aby bylo možné obhospodařovat stejnou plochu jako s většími stroji, často dochází k tomu, že na jednom pozemku se nachází více menších strojů provádějících stejnou činnost.

- **Zpracovávání půdy**

Operace spojené se zpracováváním půdy jsou orba, podmítání po sklizni a příprava před setím. Pokud jsou při posledních dvou operacích využívány výkonné soupravy, tak při záběrech nad 10 m bez použití navigačních přístrojů klesá efektivnost. Toto je způsobeno především tím, že obsluha se nedokáže plně soustředit na přesné vedení soupravy a dochází

k tzv. překrývání (pracovní záběr soupravy není plně využit a část přípojného zařízení obhospodařuje plochu pozemku, jež byla obdělána při předchozí jízdě), nebo část pozemku mezi jednotlivými jízdami není obhospodařena (vznikají neobdělané pruhy mezi jednotlivými jízdami).

V případě využívání menších souprav ve větším počtu dochází k situacím, kdy obsluhy strojů jezdí se soupravami za sebou a takto postupně obhospodařují pozemek z jedné strany na druhou. V těchto případech je nutné tvořit tzv. záhony (Obr. 2.1). Jedná se o rozdělení pozemku na jednotlivé části, jež jsou od sebe vzdáleny o násobek pracovní šířky nářadí. Je nutné, aby nově vytvořené záhony byly dokonale paralelní s předchozími, jelikož v opačném případě vznikají klíny s neobdělanou plochou, které je nutné opravit, a to vede ke zvýšení nákladů.



Obr. 2.1: Tvorba záhonů při obhospodařování pozemku

- **Setí rostlin**

Secí stroje jsou už od počátků jejich vývoje vybavovány znamenáky, zobrazenými na Obr. 2.2, určujícími odstup soupravy při další jízdě pro plné využití pracovního záběru. Princip spočívá v umístění kovového disku na výsuvnou konstrukci nacházející se na kraji secího stroje. Ve vysunuté poloze je disk od stroje vzdálen o polovinu pracovního záběru, nebo o vzdálenost mezi středem předního kola traktoru a krajem secího stroje. Následně je při každé jízdě disk spuštěn a kontaktem se zemí vytváří brázdu. Při další jízdě obsluha naviguje střed soupravy, nebo přední kolo traktoru na tuto brázdu.

V případě využití navigačních systémů dochází k úspoře na údržbě stroje, jelikož disky umístěné na konci znamének se opotřebovávají a je nutné je měnit, a k přesnějšímu vysévání rostlin, jelikož i přes poměrně přesné vytyčení dalších jízdních drah pomocí znamének obsluha opět nemusí být schopná soupravu přesně navigovat, například vlivem nerovností.



Obr. 2.2: Vymezení dalších jízdních drah pomocí znamének, převzato z [15]

- **Chemická ochrana plodin**

Chemická ochrana rostlin je odvětví zemědělské výroby, kde rozvoj využití polohových navigačních systémů znamenal velké snížení nákladů a šetrnější přístup k ošetřování rostlin. Pod pojmem chemická ochrana rostlin se rozumí 2 aplikace. První spočívá v aplikaci práškových hnojiv pomocí rozmetadel k tomu určených. Druhá je použití kapalných hnojiv a ochranných přípravků aplikovaných postřikovači. Nevýhodou těchto operací je, že obsluha bez navigačních přístrojů takřka nemá šanci určit další jízdní dráhy po předchozím přejezdu, jelikož pouhým vizuálním sledováním není takřka rozpoznatelná ošetřená a neošetřená část pozemku. V případě postřikovačů bylo toto dříve řešeno pomocí trysek umístěných na koncích ramen, které v určitých intervalech na pozemek aplikovaly značkovací pěnu [16]. Nicméně i toto při současných pracovních záběrech dosahujících desítek metrů není aplikovatelná metoda.

Moderní navigační zařízení jsou propojována se systémy aplikovaných v rozmetadlech a postřikovačích řídicí pracovní záběr. V praxi toto znamená, že obsluha je naváděna na co nejlepší využití záběru stroje, ale při překrývání dochází k omezování rozhozu rozmetadla nebo vypínání jednotlivých sekcí trysek na postřikovači. Tímto i při nepřesném vedení soupravy dojde k co nejlepšímu pokrytí pozemku aplikovanými látkami.

- ***Sklizeň plodin***

Od počátku vzniku sklízecích strojů byla navigace prováděna obsluhou, a to na základě vizuálního sledování. Na začátku 20. století s příchodem moderních technologií měření vzdáleností pomocí ultrazvukových a laserových metod byla do strojů instalována dálkoměrná čidla vyhodnocující polohu stroje vůči nesklizeným plodinám. Jeden ze systémů vyvinutý firmou CLAAS se nazývá LASER PILOT (Obr. 2.3). Jedná se o laserová čidla umístěná na boku žací lišty stroje, jež vyhodnocují hranici mezi posečenou a neposečenou plodinou. Na základě těchto dat navigační systém automaticky řídí směr jízdy stroje a obsluha pouze vizuálně kontroluje terén před strojem, vyhýbá se překážkám a na konci pozemku otáčí stroje zpět na další řádek. [17]



Obr. 2.3: Systémy LASER PILOT a GPS PILOT od firmy CLAAS, převzato z [17]

Další možností je využití satelitních navigačních systémů. Jedno využití je zobrazeno na Obr. 2.3 a nazývá se GPS PILOT. Jedná se o navigační systém, který řídí žací stroj a pro přesnou korekci polohových dat využívá RTK metodu. Přesnost určení pozice je přibližně 2,5 cm. [17]

- ***Sklizeň píce***

Sklizní pícnin se rozumí sekání, obracení a nahrabování travních porostů na pozemcích k tomu určených (louky, pastviny). Zde jsou uplatněny stejné metody jako při zpracovávání půdy. Buďto soupravy s velkým pracovním záběrem (i více než 12 m) pracující samostatně nebo v případě více menších souprav je uplatňován princip záhonu (Obr. 2.1). Pokud se jedná o sekání pícnin pomocí stranových sekaček, je nutné vytvářet záhony.

- **CTF**

Jedná se o metodu, která mohla vzniknout právě s rozvojem satelitních navigačních systémů. Původní myšlenka vychází ze zjištění, že neustálá stoupající hmotnost nově vyvinutých strojů a neustálé přejezdy při polních pracích mají negativní dopad na strukturu pozemků, tzv. zatížení půdy. Toto poškozování má mnoho negativních vlivů. Překlad originálního názvu „Controlled Traffic Farming“ je řízený provoz zemědělských strojů. Princip spočívá ve využití jednotné pracovní šířky každé soupravy, co na pozemku operuje. V praxi toto znamená, že žací stroje a stroje pro zpracovávání půdy, popř. setí plodin, mají záběr 12 m a stroje na chemickou ochranu pěstovaných rostlin mají násobný záběr (např. 36 m). Nejdůležitější krok je pomocí navigačních systémů vést všechny tyto stroje v jedné jízdě. Pro využití této metody je nutná velká přesnost určení pozice a proto jsou využívány GNSS ve spojení s korekcemi pomocí RTK systému. [18]

2.1.2 Mapování pozemků

Dalším odvětvím v zemědělství využívající rozvoj GNSS v civilní sféře je obor mapování pozemků. Jedná se především o přesné vyměření hranic obhospodařovaných ploch. V současné době jsou velice časté jejich změny, kdy s příchodem nových podniků mají vlastníci větší možnost výběru obhospodařovatelů. Tímto dochází k rozdělování větších pozemků na menší. Dále je zapotřebí vyměřovat pozemky z důvodu dřívější neexistence těchto systémů. To znamená, že obhospodařující společnosti neprováděly kontrolu a vlivem nepřesných polních operací na pozemcích docházelo ke zmenšování, nebo naopak ke zvětšování obhospodařovaných ploch a tím k zásahu do sousedních pozemků.

Na začátku roku 2004 také došlo ke spuštění internetového portálu veřejného registru půdy zvaného LPIS. Jedná se o geografický informační systém vytvořený na žádost Ministerstva zemědělství. Portál je spojený s geografickými mapami a jsou v něm zanesena polohová data o obhospodařovaných pozemcích. Nynější verze podporuje i zobrazení katastrálních údajů. Pomocí LPIS je možné importovat GPS souřadnice do navigačních zařízení strojů nebo mobilních polohových přijímačů, a tím přesně definovat hranice pozemků. [19]

2.1.3 Vzorkování půdy

Při zjišťování variability půdy s využitím satelitních navigačních systémů jsou používány dvě metody.

- *Výnosová mapa*

Pomocí implementace elektronických čidel ve sklízecích strojích zjišťujících aktuální zatížení stroje a výnosnost plodin v daném místě je možné sestavovat tzv. výnosové mapy daných pozemků. Tyto informace jsou velice důležité pro budoucí obhospodařování daného pozemku. Takto lze přesněji volit dávky použitých látek pro chemickou ochranu rostlin. Je možné určit aplikovanou dávku na celý pozemek, nebo propojením výnosových map s řídicím a navigačním softwarem daného stroje aplikujícího hnojiva a chemické látky přímo řídit aplikaci do jednotlivých míst pozemku. Další možnost využití těchto map je například při rozhodování o dalších pracích spojených s posklizňovým zpracováním půdy. [20]

- *Vzorkování půdy*

Metoda zvaná vzorkování půdy spočívá v odebrání jednotlivých vzorů půdy a jejich následné zpracování v laboratořích pro zjištění aktuálního obsahu živin. Každý vzorek je opatřen informací o přesné poloze místa odběru. Z těchto dat je opět složena mapa ukazující jednotlivé rozložení aktuálního stavu pozemku a na tomto základě jsou voleny další postupy v obhospodařování. [20]

2.2 DRUHY VYUŽÍVANÝCH ZAŘÍZENÍ

V této části kapitoly o využití satelitních navigačních systémů jsou popsány jednotlivé druhy navigací podle způsobu řízení soupravy na předem definované trajektorie. Jedná se o manuální, asistované, automatické řízení a autonomní řídicí systémy. Kritériem pro výběr jsou požadavky na přesnost navigování soupravy a pořizovací náklady.

2.2.1 Manuální řízení

Jedná se o kombinaci navigačního zařízení a ručního řízení soupravy obsluhou. S ohledem na manuální řízení soupravy obsluhou se přesnost udávaná výrobcem použitých navigací pohybuje v rozmezí 50 až 20 cm. Pro korekci polohových dat je používán princip DGPS, konkrétně v Evropě se jedná o systém EGNOS. Pořizovací náklady v tomto případě jsou nejmenší. Cena komerčních zařízení se pohybuje v rozmezí 30–60 tis. Kč. [21][22]



Obr. 2.4: Navigační světelná lišta GreenStar Lightbar od firmy John Deere a navigační zařízení Trimble CFX-750, převzato z [21][22]

Nejčastější využití tohoto navigovaní soupravy je při chemické ochraně rostlin u postřikovačů a rozmetadel. Dále při práci více menších souprav, popř. více sklízecích strojů, a používání metody tvoření záhonů. Přesnost určování polohy je dostatečná také pro mapování a vzorkování pozemků. Pro vizuální navigaci obsluhy se používá světelná lišta, LCD displej nebo jejich kombinace.

- **Světelná LED lišta**

Jedná se o světelnou podélnou lištu, kde střed značí požadovanou polohu a případná odchylka je signalizována rozsvícením okolních LED diod. Odchylku od požadované polohy lze odečítat podle počtu rozsvícených LED diod, např. jedna dioda značí odchylku 0,5 m. Společnost John Deere nabízí navigační světelnou lištu pod označením GreenStar Lightbar zobrazenou na Obr. 2.4.

- **LCD displej**

Výhodou využití navigačního LCD displeje je, že obsluha vidí trasu i na určitou vzdálenost dopředu, a může tím lépe reagovat na případné tvary stop definovaných navigačním systémem. U současných zařízení je i možnost, že je graficky znázorněna obdělávaná a neobdělávaná část pozemku. Na Obr.2.4 je zobrazené komerční zařízení od společnosti Trimble kombinující možnost LCD displeje a světelné navigační lišty. [22]

2.2.2 Asistované řízení

Asistované řízení spočívá v řízení soupravy navigačním systémem pomocí elektromotoru umístěného na volantu traktoru, popř. sklízecího stroje. Umístění je buďto zvenčí a hřídel elektromotoru, opatřená na konci měkčeným materiálem, přímo doléhá na volant a tím

dochází k řízení. Nebo druhá možnost je zakoupení nového volantu, jenž má elektromotor už nainstalovaný v konstrukci. Tento systém je přesnější než manuální řízení obsluhou, nicméně i zde vznikají nepřesnosti vlivem vůlí komponent v řídicím soustrojí stroje. V případě potřeby převzetí řízení obsluha začne otáčet volantem a řídicí jednotka navigačního systému odpojí elektromotor. [22]

Pro tento druh navigace je ještě postačující příjem korekčních DGPS dat, nicméně se doporučuje využívání RTK systému. S tím souvisí výše pořizovacích nákladů pohybující se za hranicí 150 tis. Kč. Výhodou tohoto systému je možnost přenositelnosti na jiné stroje. Nicméně se nejedná o neustálou změnu strojů. Toto je myšleno například při koupi nového a změně pracovního zařazení stávajícího stroje. [22]

2.2.3 Automatické řízení

Pro využití automatického řízení musí být traktor, popř. sklízecí stroj, vybaven od výroby potřebnými komponenty. Tato metoda spočívá v přímém navigování stroje pomocí řídicího ústrojí. Moderní stroje jsou vybaveny elektrohydraulickým posilovačem řízení. Navigační zařízení je poté spojeno s řídicí jednotkou posilovače a při automatickém řízení řídí tok hydraulického oleje do pístu, jenž ovládá řízenou nápravu. Pomocí inerciálních snímačů a čidel sledujících natočení kol navigační zařízení mnohem přesněji vyhodnocuje další navigační kroky pro dosažení co nejpřesnější trajektorie. Dále je navigační systém pomocí komunikačních sběrnic spojen s ostatními řídicími prvky stroje a obsluha si může naprogramovat jízdní cyklus, kdy posléze souprava může vykonávat polní práce zcela samostatně. Toto znamená, že automaticky ovládá připojené nářadí při najíždění a vyjíždění z řádků a dochází i k automatickému otáčení soupravy na konci pole (na souvrati). Pro převzetí řízení obsluha začne točit volantem a pomocí čidla sledujícího jeho polohu řídicí jednotka posilovače řízení přepne na manuální režim. [23]

Investice do tohoto typu navigace zemědělských strojů jsou vysoké. Je to dáno už vyšší pořizovací cenou stroje z důvodu dražších komponent řízení, potřebou implementace inerciálních senzorů, vyšším výpočetním výkonem a složitějším softwarem navigačního zařízení. Pro korigování signálu je využíván RTK systém. Výhodou je velice přesné navigování stroje (cca 2,5 cm) a maximální využití pracovního záběru soupravy. Nevýhodou je nepřenositelnost z jednoho stroje na druhý vlivem výrobních úprav. [23]

2.2.4 Autonomní řídicí systémy

S aplikací automatického řízení a rozvojem robotizace se naskytují nové možnosti aplikace navigačních systémů v zemědělských strojích. V současné době vznikají projekty zabývající se robotizací a zcela autonomním řízením zemědělských strojů při polních pracích bez přítomnosti obsluhy. Jednou z firem zabývajících se touto problematikou je CASE IH, která v roce 2016 představila koncept autonomního traktoru.

Traktor je ovládán vzdáleně přes internet pomocí telekomunikačních sítí. Obsluha přes tablet zadá potřebné informace o druhu prováděné polní operace, připojeném nářadí, nakonfiguruje parametry a cestu k pozemku. Ovládací software následně navede soupravu na pozemek a započne s definovanou polní operací. V traktoru je implementována celá řada moderních senzorů pro sledování okolí (ultrazvukové a kamerové senzory, LiDAR) a senzorů pro sledování parametrů traktoru a připojeného nářadí. Pokud software vyhodnotí možnou kolizi soupravy s překážkou nacházející se na poli nebo na cestě na něj, zastaví a informuje vzdálenou obsluhu vykonávající dohled nad soupravou. Operátor poté může manuálně vyřešit situaci, nebo traktor autonomně překážku objede. Prozatím se jedná o koncept, z čehož vyplývá, že uvedení do prodeje bude následovat celá řada testů. Problém také nastává s legislativou jednotlivých států, jelikož v současné době není možné provozovat na pozemních komunikacích autonomní stroje. [24]

Požizovací náklady tohoto řešení nejsou známy, nicméně samotná cena traktoru, na kterém je postaven koncept, se podle internetových stránek výrobce pohybuje v rozmezí 369 000–470 000 USD (9,225–11,750 mil. Kč). S implementací autonomního softwaru a potřebných senzorů se dá předpokládat cena téměř dvojnásobná. Výhodou je zcela autonomní provádění polních prací i s příjezdem a odjezdem z pole, přesné vedení soupravy a operátor může vykovávat dohled nad více soupravami najednou. [24]



Obr. 2.5: Koncept autonomního traktoru od společnosti CASE IH, převzato z [24]

3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO NAVIGACI ZEMĚDĚLSKÝCH STROJŮ

Nejdůležitější část diplomové práce je návrh a realizace zařízení pro navigování zemědělských strojů při polních pracích. V první pasáži je popsána hardwarová část, dále následuje softwarová část a poslední kapitola se zabývá návrhem a realizací 3D modelu krytu pro zařízení. Navrhované zařízení spadá do kategorie navigačních satelitních zařízení s manuálním řízením a pro korekci chyby při určování pozice je využíváno DGPS systému EGNOS. Zařízení je vybaveno navigační světelnou lištou a zároveň LCD displejem pro zobrazení vypočítané ideální stopy soupravy vykonávající polní práce. Následně obsluha řídí soupravu manuálně podle navigačních pokynů.

3.1 HARDWARE

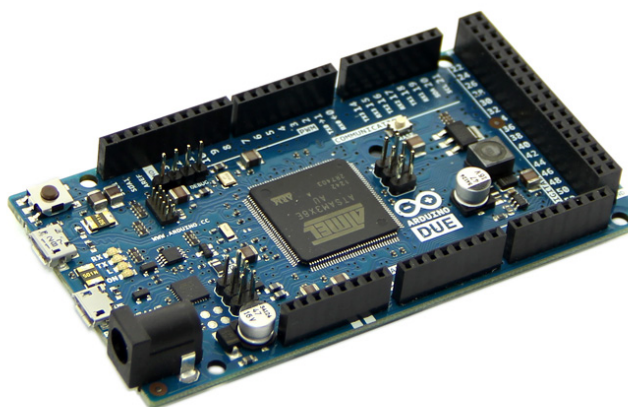
V této části je specifikována platforma Arduino a kritéria pro výběr daného modelu. Dále je popsán výběr, návrh a realizace jednotlivých hardwarových komponent.

3.1.1 Platforma Arduino

Platforma Arduino původně vznikla v roce 2005 v Itálii jako vývojový set pro studenty. Nicméně popularita rychle rostla a nyní se desky prodávají po celém světě. Výhoda spočívá v kompletní desce osazené všemi potřebnými komponenty pro programování a běh procesoru. Většina nejčastěji používaných vývodů procesoru a napájení je posléze vyvedena na krajích desky a pomocí pinů s roztečí 2,54 mm je možno připojovat další periferie. Výrobce se snaží o unifikaci rozložení pinů, a proto je většinou možné používat univerzální nadstavby, tzv. Shildy, napříč kompatibilními platformami. Srdcem Arduina byly od prvopočátku mikroprocesory od firmy Atmel. První použitý byl 8bitový mikroprocesor ATMEGA8-16 používaný v Arduino UNO. V současnosti je nejvýkonnější deska Arduino Galileo osazená 32bitovým čipem od firmy Intel, konkrétně Quark SoC X1000 taktovaným na 400 MHz. [25]

Na začátku vývoje popisovaného zařízení bylo stanoveno, že aktualizace polohových dat a navigačních pokynů pro obsluhu bude probíhat v 1vteřinových intervalech. Dalšími kritérii bylo co nejmenší ovlivnění výpočtu ideálních stop vlivem vnitřní aritmetiky procesoru a cena konkrétní platformy. Z těchto důvodů bylo vybráno Arduino DUE.

Deska Arduino DUE (Obr. 3.1) je osazena 32bitovým ARM mikroprocesor ATMEL SAM3X8E taktovaným na 84 MHz. Programová flash paměť má velikost 512 KB a statická RAM paměť pro uložení dat během výpočtů činí 96 KB. Deska obsahuje 54 I/O digitálních portů. Některé mají přidělené i další funkce. Jako PWM výstup může být použito 12 pinů, dalších 12 jsou analogové vstupy, 8 slouží jako hardwarové asynchronní sériové porty (UART), 2 jsou digitálně analogové převodníky a několik pinů je určených pro SPI komunikaci. Stejnoseměrné napájecí napětí je přivedeno pomocí konektoru a může být v rozmezí 7–12 V. Jelikož periferie připojované k zařízení často vyžadují napájení, je na desce implementován obvod pro stabilizaci napájecího napětí na 5 V a to je pomocí pinu vyvedeno na desce. Maximální proud může být až 800 mA. Nicméně je důležité, aby datové piny od periférií připojené na vstup mikroprocesoru pracovaly na 3,3V logice. Toto je nutné z důvodu 3,3V provozního napětí mikroprocesoru. [25]



Obr. 3.1: Arduino DUE, převzato z [25]

3.1.2 Modul pro určování polohy

Pro určování aktuální zeměpisné polohy byl vybrán GNSS modul od společnosti U-blox, konkrétně model NEO M8N. Jedná se o nejnovější model od tohoto výrobce. Modul je vybaven 72kanálovým čipem pro příjem GPS, GLONASS, BeiDou a korekčních SBAS satelitních signálů. S plánovaným spuštěním systému Galileo výrobce počítá, a proto je i tento modul schopen přijímat a zpracovávat data z tohoto GNSS systému. Výrobce v dokumentaci udává start zařízení při dobrém příjmu GPS signálu (příjem minimálně od tří družic) do 29 vteřin. V případě uloženého almanachu je tato doba pouze 2 vteřiny a v případě uložených i aktuálních efemerid je zařízení schopno udávání polohy do 1 vteřiny od spuštění.

Dále je uvedena absolutní přesnost určení pozice po 24hodinovém sledování s 50% pravděpodobností. Bez použití korekcí je to 2,5 m a 2 m s korekcemi ze systému SBAS. GNSS modul je s řídicí platformou Arduino propojen pomocí UART. Pro přenos polohových dat je nejčastěji používán unifikovaný NMEA protokol nebo binární UBX protokol. [26]

- ***NMEA protokol***

Jedná se o přesně definovaný formát přenášené zprávy ve formě ASCII znaků. Původně byl tento standart vynalezen pro komunikaci mezi elektronickými zařízeními lodí. Odtud také vychází zkratka NMEA, tedy „National Marine Electronics Association“. Standart definuje různé druhy zpráv obsahující odlišná data. Jedná se o zprávy obsahující data o poloze, až po zprávy informující o stavu jednotlivých satelitů, nebo v případě lodních přístrojů jsou přenášeny konkrétní navigační informace. Níže je uveden příklad zprávy obsahující informace o poloze, jež je po vyhodnocení polohy odesílána z GNSS modulu. [26]

```
$GPRMC,092751.000,A,5321.6802,N,00630.3371,W,0.06,31.66,280511,,,A*45
```

Každá zpráva NMEA protokolu začíná znakem \$, následují dvě písmena udávající od jakého GNSS jsou data získávána (zde GP znamená GPS systém ve spojení s SBAS) a další 3 písmena udávají druh zprávy. V tomto případě se jedná o základní sadu údajů poskytovaných každým GNSS modulem. Konkrétně jsou zobrazeny informace udávající aktuální koordinovaný světový čas UTC, stav přijímače, zeměpisnou délku, severní/jižní polokouli, zeměpisná šířku, východní/západní polokouli, aktuální datum a kontrolní sumu pro zjištění správnosti zprávy. [26]

- ***UBX binární protokol***

Jedná se o binární protokol vytvořený společností U-blox pro odesílání dat do dodávaného softwaru U-center zobrazující veškerá data získaná z GNSS modulu. Opět jsou definovány různé druhy. Výhoda spočívá v jasně definovaných bitových délkách jednotlivých zpráv. Pro účely komunikace mezi modulem a Arduinem byl zvolen právě tento druh komunikačního protokolu. [26]

V programu U-center je nutné také nakonfigurovat GNSS modul. S ohledem na rychlost pohybující se soupravy v rozmezí 0–40 km/h byl zvolen dynamický model Chodec, kdy dochází k přesnějšímu určování pozice. Dále byly vybrány používané GNSS systémy

(GPS, GLONASS, GALILEO) a korekční systém EGNOS. Byla vybrána konkrétní odesílaná zpráva UBX protokolu označována jako UBX-NAV-PVT obsahující všechna potřebná data pro výpočty prováděné Arduinem, nastavena frekvence odesílání zpráv na 1 Hz a rychlost UART na 115 200 Bd.

K modulu je pomocí SMA konektoru připojena externí aktivní anténa. Pro co nejlepší příjem signálu z družic je umístěna na střeše stroje v místě s přímým výhledem na družice. Modul je napájen napětím o velikosti 5 V.

3.1.3 Zobrazovací jednotka

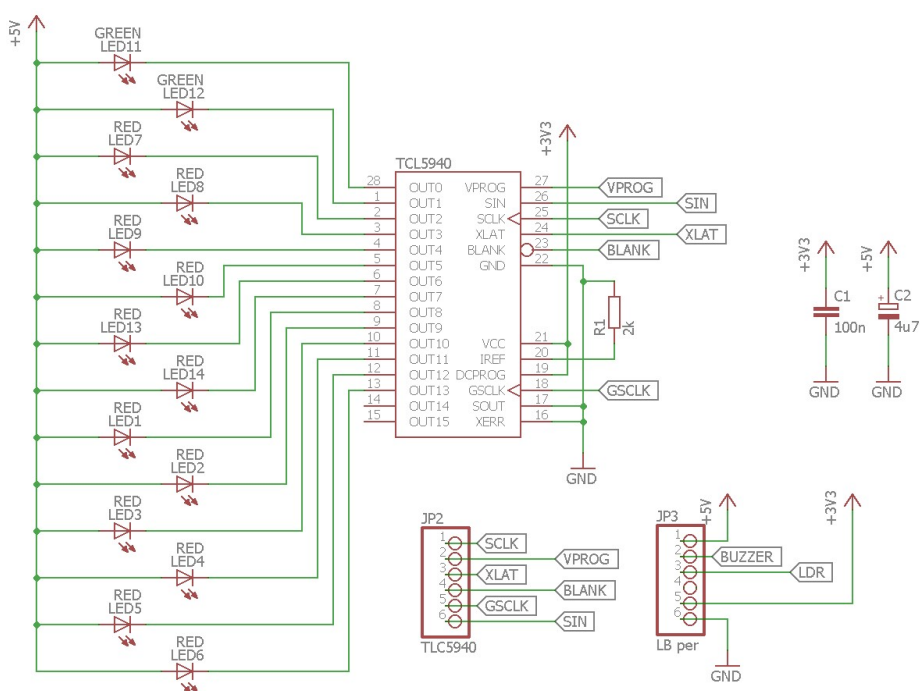
Jako zobrazovací jednotka byl zvolen barevný 4,3“ LCD displej s odporovou dotykovou vrstvou. Řídící mikroprocesor použitý v Arduinu DUE není primárně určen pro složité grafické operace. V průběhu vývoje zařízení TracNav byl zkoušen displej ovládaný přes 16bitový paralelní řadič. Následný problém spočíval v nedostatečné programové paměti řídicího mikroprocesoru, kdy grafické návrhy zobrazované na displeji zabíraly velkou část paměti. Při načítání motivů z paměťové karty zase mikroprocesor neměl dostatečný výpočetní výkon pro určení navigačních údajů a zobrazení pokynů pro obsluhu v intervalu 1 vteřiny.

Po tomto zjištění bylo přistoupeno k použití displeje Nextion od firmy ITEAD Studio, jenž původně vznikl jako projekt na serveru kickstartek.com. Rozdíl oproti předchozímu řešení spočívá v tom, že tento displej obsahuje vlastní grafický procesor taktovaný na 108 MHz s pamětí o velikosti 32 MB obstarávající zobrazování grafických návrhů, provádění programátorem definovaných příkazů a komunikaci s řídicím mikroprocesorem pomocí UART. Displej má rozlišení 480 x 272 pixelů. Dalšími integrovanými komponenty jsou RTC modul hodin, 1kB EEPROM paměť a 8 I/O portů pro připojení periférií. Napájecí napětí je 5 V. Výrobce dodává program Nextion editor, pomocí kterého je vytvořeno grafické uživatelské rozhraní pro TracNav a přes paměťovou kartu je nahráno do paměti displeje. Dále nabízí C/C++ knihovny definující příkazy odesílané z Arduina a dešifrování přijímaných dat z displeje. Program nahraný v mikroprocesoru displeje je přiložen na DVD. [27]

3.1.4 Navigační světelná lišta

Navigační světelná lišta je tvořena pomocí 14 LED diod. Dvě zelené diody jsou umístěny uprostřed a značí požadovanou pozici soupravy. Při odchylce se rozsvěčují diody nalevo, nebo napravo podle aktuální pozice vůči požadované. Každá LED dioda signalizuje odchýlení o 0,5 m. Na každou stranu je umístěno 6 diod (2 žluté a následně 4 červené). Pokud jsou rozsvíceny všechny, tak současné odchýlení soupravy od požadované pozice je větší než 3 m.

Prvotní úvaha spočívala ve využití PWM výstupů na desce Arduino, aby byla možná regulace jasu LED diod. Nicméně vlivem proudového omezení těchto výstupů, které činí 20 mA na pin a celkově 100 mA pro všech 12 pinů, byl použit obvod TLC5940 od firmy Texas Instruments. Jedná se o 16kanálový PWM LED řadič s konstantním proudovým výstupem, ovládaný pomocí sériové komunikace. Na každém výstupním kanále je možné pomocí 6bitového registru nastavit proud v 64 úrovních mezi nulovým a maximálním. Tímto lze kompenzovat úrovně jasu od různě barevných LED diod. Registr je uložen v EEPROM paměti TLC5940. V zařízení jsou použité LED diody s malým úhlem vyzařování (podle barvy v rozmezí od 12° do 20°), aby nedocházelo k vyzařování světla do prostoru ostatních diod. Jelikož připojené LED diody jsou řízeny proudově, není nutné vkládat předřadný odpor. Anoda je připojena na 5V napájecí napětí a katoda na výstup řadiče, který ji přes vnitřní ovládací tranzistor připojuje na společné GND. [25][28]

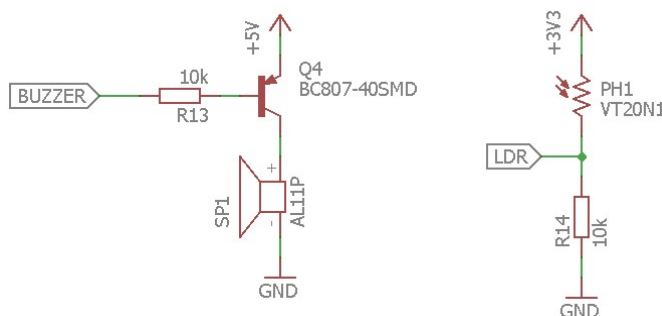


Obr. 3.2: Schéma zapojení navigační světelné lišty

Na Obr. 3.2 je znázorněno schéma zapojení navigační světelné lišty navržené v programu Eagle. Z Arduino desky jsou pomocí propojovacího kabelu s 6pinovým konektorem JP2 přivedeny piny pro řízení řadiče. Pin řadiče SCLK slouží jako vstup pro časující signál řídicí ukládání dat ze sériového přenosu dat. V Arduino je připojen na SDA1. Sériová linka pro přenos dat je realizována pomocí UART. Pin TX1 je využit pro jednosměrné odesílání dat do řadiče, kde je připojen na vstup SIN. Vývod VPROG slouží pro definování, k čemu jsou určena přijímaná data. Pomocí XLAT se povoluje přepisování registrů obsahující údaje o úrovni PWM modulace a hodnotě výstupního proudu. Pro vypnutí všech 16 řízených výstupů je určen vývod BLANK. Pomocí GSCLK je přiváděn referenční hodinový signál pro obvodu PWM regulace. Poslední 4 popsané vývody řadiče jsou připojeny na desce Arduino k datovým pinům D3–D6. Napájecí napětí je pro LED diody zvoleno 5 V a s ohledem na kompatibilitu napěťových úrovní je řadič napájen 3,3 V. Napětí jsou přivedena pomocí kabelu s konektorem JP3. Pro nastavení maximálního proudu 20 mA na výstupech řadiče slouží 2k Ω rezistor R1. Filtrovací elektrolytický kondenzátor C2 je umístěn na 5V napájení pro omezení vlivu spínání LED diod pomocí PWM modulace. Blokovací kondenzátor C1 je připojen mezi 3,3V napětí a GND. [28][29]

3.1.5 Zvuková signalizace a senzor okolního osvětlení

Zařízení TracNav je vybaveno magnetickou sirénou signalizující definované události. Jedná se o indikaci stavu inicializace periférií při zapnutí zařízení a signalizaci stisknutí definovaných tlačítek uživatelského prostředí na displeji. Vlevo na Obr. 3.3 je zobrazeno schéma zapojení. Napájení o velikosti 5 V je na sirénu připojováno přes bipolární tranzistor Q4, který je řízen z výstupu ADC2 na Arduino desce.



Obr. 3.3: Zvuková signalizace a senzor okolního osvětlení

Vlivem změn okolních světelných podmínek je nutné provádět změnu jasu LED diod a displeje. V zařízení jsou implementovány 2 možnosti. Ručně nastavit intenzitu jasu pomocí

uživatelského prostředí nebo využívat automatický režim. Proto je vpravo na Obr. 3.3 znázorněno schéma zapojení LDR senzoru pro snímání okolního osvětlení. Jedná se o rezistor měnící odpor podle intenzity světla, jež na něj dopadá. Zapojení vychází z odporového děliče. Snímané napětí na rezistoru R14 je přiváděno na analogový vstup řídicího mikroprocesoru ADC0 a program podle hodnoty automaticky mění jas. Obvody pro zvukovou signalizaci a snímání okolního osvětlení jsou umístěny na DPS se světelnou lištou.

3.1.6 Paměťová karta

V zařízení TracNav je implementován modul pro vložení paměťové SD karty a její komunikaci s řídicím mikroprocesorem. Na kartu jsou ukládána data o aktuálním nastavení zařízení a informace o souřadnicích bodů použitých pro navigační režimy. Při dalším spuštění je možné načíst data a pokračovat v navigování soupravy podle dříve vytvořených režimů. Dále je možné na kartu vložit souřadnice pozemků, vygenerovaných ze systému LPIS, a použít je v navigačním režimu Hranice pozemků. Jeho funkce je popsána v softwarové části práce.

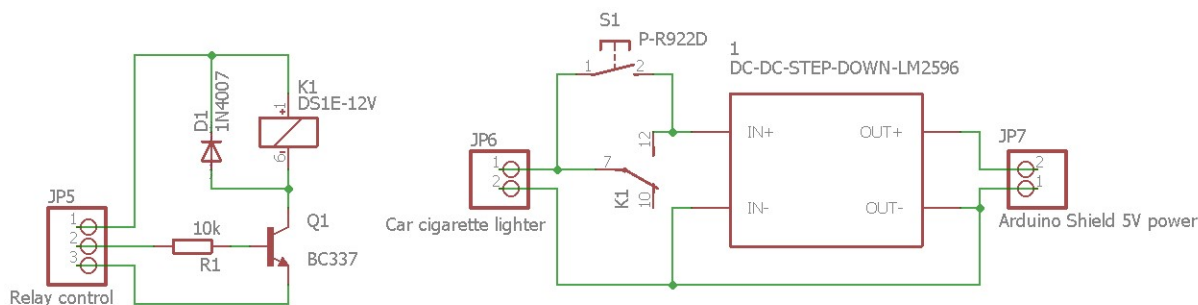
Komunikace této periferie s mikroprocesorem je zprostředkovávána pomocí SPI rozhraní, které je na desce Arduino speciálně vyvedeno (dvouřadý 6pinový konektor viditelný vpravo od mikroprocesoru na Obr. 3.1). Jelikož takto může být připojeno více periferií, je nutné pomocí pinu zvaného Chip select (CS) určit konkrétní, která má komunikovat. Arduino DUE obsahuje 3 CS piny. Modul pro SD kartu je připojen na pin označený jako D52.

3.1.7 Napájecí část

S ohledem na použití zařízení TracNav v zemědělských strojích bude velikost přiváděného napětí 12 V z palubní sítě. Arduino DUE umožňuje připojení tohoto napětí na vstup napájecí části. Z těchto údajů se dá uvažovat přímé propojení. Nicméně napětí palubní sítě stroje se téměř nikdy této hodnotě nepřiblíží. Reálná velikost se pohybuje v rozmezí 12,5–15 V, v závislosti na úrovni nabití 12V baterie a typu alternátoru daného stroje. Toto je jeden z důvodů nevyužití stabilizačních napájecích obvodů na desce Arduino. Dále bylo nutné brát v potaz proudový odběr jednotlivých připojených periferií. Výrobce displeje udává špičkový odběr až 500 mA, plně rozsvícená světelná lišta odebírá 280 mA a magnetická siréna 30 mA. Další periferie mají proudovou spotřebu v řádu jednotek mA. Přesto je součet více než 800 mA a při přímém připojení by byla překročena maximální

hodnota proudu napájecího obvodu Arduina. Z tohoto důvodu je v zařízení implementován externí modul obsahující DC/DC snižující konvertor LM2596. Na vstup lze přivést napětí v rozmezí 3 až 40 V a na výstupu je možno nastavit stabilizované v úrovni 1,25 až 35 V. Výstupní proud může být až 3A s použitím pasivního chladiče na konvertoru (při odběru do 10 W není chladič nutný). Pro napájení desky Arduino a ostatních periférií je nastaveno výstupní napětí na hodnotu 5 V. [25][26][27][28]

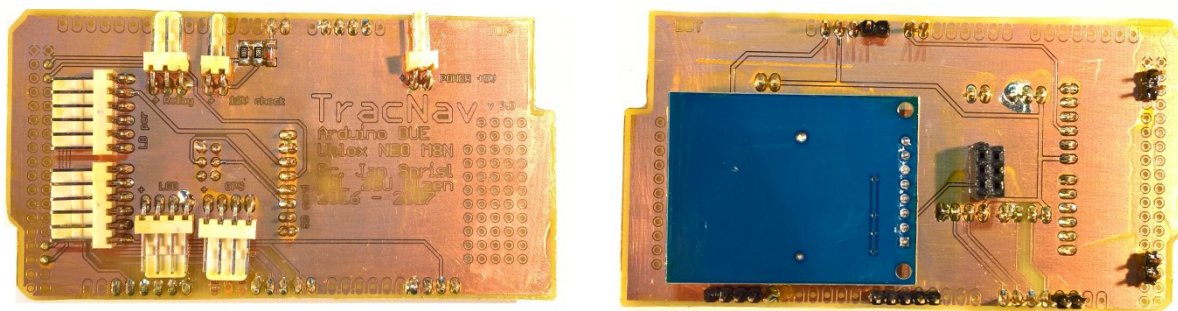
Schéma na Obr. 3.4 zobrazuje zapojení napájecího obvodu. V programu řídicího mikroprocesoru je naprogramována funkce pro automatické vypínání celého zařízení. Z tohoto důvodu je použito relé K1, které při rozepnutí odpojí palubní napájení stroje. Pro zapnutí slouží kolébkový spínač bez aretace S1. Po stisknutí dochází k překlenování relé a přes konvertor přivedení napájení do jednotlivých elektrických obvodů zařízení. V prvním kroku po startu programu je nastaveno relé do sepnutého stavu. Pro zapnutí zařízení je nutné stisknout spínač na dobu cca jedné vteřiny.



Obr. 3.4: Schéma zapojení napájecího obvodu zařízení TracNav

3.1.8 Nadstavba

Platforma Arduino je navržena k výukovým účelům. Připojování periférií na výstupy desky je nejčastěji realizováno pomocí nepájivých polí a propojovacích kabelů. S ohledem na mechanické otřesy působící na zařízení v zemědělských strojích byla vytvořena nadstavba obsahující konektory se zámkem. Jejím použitím dochází k eliminaci možné poruchy zařízení, minimalizaci výsledné velikosti a zamezení možnosti špatného propojení periférií. Do nadstavby je implementován modul pro SD kartu a odporový dělič pro snímání palubního napětí. Pro výrobu nadstavby a světelné navigační lišty byla zvolena sklolaminátová deska FR4 s oboustranně nanesenou měděnou fólií o tloušťce 35 μm .



Obr. 3.5: Nadstavba pro Arduino DUE

3.2 SOFTWARE

Tato část je zaměřena na softwarovou stránku výsledného zařízení. Obsahuje popis jednotlivých navigačních módů a jejich použití. Vývojový tým platformy Arduino vytvořil programovací prostředí Arduino IDE, ve kterém jsou implementovány knihovny vytvořené za účelem zjednodušení programování desek. Programovací jazyk je založený na C/C++, ale s úpravami pro zjednodušení se nazývá se Processing. Arduino IDE je vytvořeno za účelem seznámení a naučení základů programování mikropočítačů. Ovšem při projektech obsahující větší zdrojový kód programátor ztrácí přehled. Program pro navržené zařízení byl vytvořen ve vývojovém prostředí Visual Studio od společnosti Microsoft. Pro využití knihoven vytvořených komunitou Arduino a programování desky byl využit modul instalovaný do prostředí Visual Studio. Projekt pro navržené zařízení se skládá z hlavního programu a čtyř vytvořených knihoven. Veškeré jeho části jsou nahrány na příloženém DVD. [25]

3.2.1 Navigační režimy

Komerční navigační zařízení nejčastěji nabízejí 4 navigační režimy. Jedná se o navigování po paralelních přímkách definovaných dvěma body A a B, popř. bodem A a směrem jízdy. Nicméně obdělávané pozemky mají různé velikosti a tvary. Ne vždy je vhodné, nebo možné použití tohoto navigování. Režim AB křivka tento problém odstraňuje. Jedná se o navigování po paralelních křivkách. Čtvrtým druhem je navigace po kruhových trasách, jež je využívána minimálně a v podmínkách českého zemědělství vůbec. [17][18][21][22]

- **Navigační režim AB přímka**

V tomto režimu navigace zařízení TracNav navádí obsluhu na paralelní přímky odvozené od základní, jež je definována body A a B. Vzdálenost mezi přímkami je volena podle pracovního záběru použitého nářadí. Obsluha může využít tento navigační režim podle následujícího příkladu. Při příjezdu na obhospodařovaný pozemek navede soupravu na pozici nacházející se na začátku záhonu. Stisknutím ikony A na displeji zařízení se do paměti uloží zeměpisná poloha tohoto bodu. Následně uvede soupravu do pohybu ve směru, ve kterém chce vytvořit záhon. Po ujetí určité vzdálenosti, např. 100 m, stisknutím ikony B se uloží souřadnice bodu B. Následně už navigační zařízení TracNav začne obsluhu udávat pokyny pro navigování po definované přímce a od ní odvozených paralelních přímkách.

$$d_{AB} = a \sin(\sin(d_{AC}/R) \cdot \sin(\theta_{AC} - \theta_{AB})) \cdot R \quad (3.1)$$

S ohledem na poměrně malou plochu obhospodařovaného pozemku, maximálně jednotky km², je zemský povrch aproximovaný pomocí ideální koule. Princip rovnice 3.1 spočívá ve vytvoření ideální kružnice definované body A a B. K této kružnici je zjišťována tečná vzdálenost od bodu C. Poloměr koule R je 6 371 008 m. Pro výpočet je dále zapotřebí znát vzdálenost d_{AC} a směr θ_{AC} mezi body A, C. Poslední je směr θ_{AB} mezi A a B. Úhlové proměnné jsou zadávány v radiánech. Vzdálenost mezi přímkou a bodem je v rovnici označována jako d_{AB} . Znaménko u výsledné proměnné d_{AB} udává stranu, na jaké se bod vůči přímce (kružnici na kouli) nachází. Kladná hodnota udává pravou stranu od přímky AB a záporná levou. Algoritmus na základě informací o vypočtené vzdálenosti, straně vůči přímce a aktuálním jízdním směru, získaným z GNSS modulu, vytvoří navigační pokyny na jednotlivé paralelní přímky. [30]

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$$

$$c = 2 \cdot \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (3.2)$$

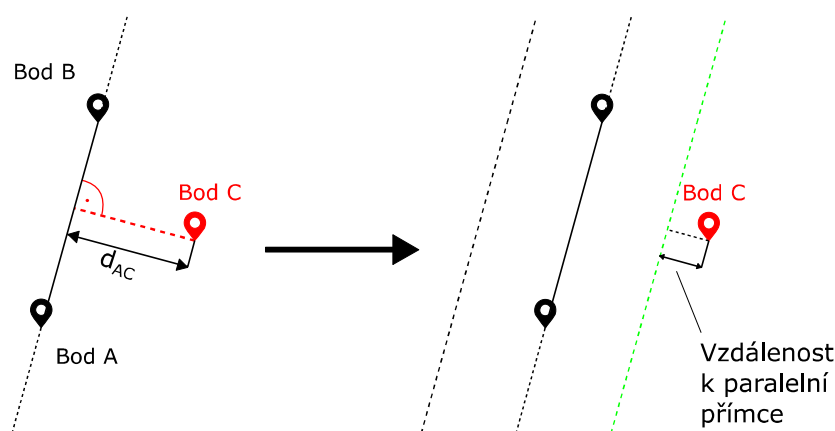
$$d = R \cdot c$$

Rovnice 3.2 je využívána pro výpočet vzdálenosti 2 bodů a zemském povrchu. Algoritmus se nazývá Harvesine formule. Předpoklady pro vznik algoritmu jsou stejné jako

v případě rovnice 3.1. Zemský povrch je aproximován pomocí koule a vzdálenost mezi body je velikost výseče kružnice jimi procházející. Pro výpočet je nutné zadat zeměpisnou šířku φ_1 , φ_2 , délku λ_1 , λ_2 a jejich difference $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ v radiánech. Při zadání poloměru koule R o hodnotě 6 371 008 m vyjde vzdálenost mezi body d ve stejných jednotkách. [30]

$$\theta = \text{atan2}(\sin\Delta\lambda \cdot \cos\varphi_2, \cos\varphi_1 \cdot \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \cos\Delta\lambda) \quad (3.3)$$

Pro výpočty je zapotřebí znát i směr mezi dvěma pozicemi. Rovnice 3.3 popisuje jeho výpočet. Zadávanými hodnotami jsou φ_1 , λ_1 prvního bodu a φ_2 , λ_2 druhého bodu. Výsledná hodnota směru θ je, stejně jako zadávané hodnoty, v radiánech.



Obr. 3.6: Určení vzdálenosti bodu C od přímky AB a definování paralelních přímek

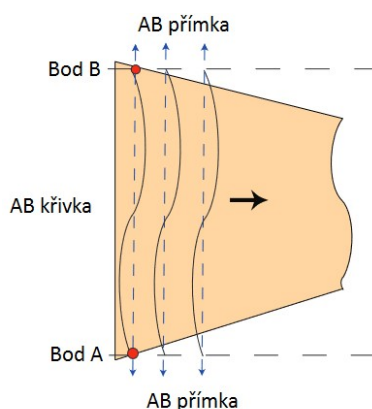
- **Navigationální režim A+ směr**

Navigationální režim A+ směr vychází ze stejného principu jako AB přímka. Rozdíl spočívá v přímém zadání jízdního směru soupravy. Obsluha po příjezdu na začátek záhonu pomocí stisku ikony uloží do paměti zařízení bod A. Následně má dvě možnosti zadání směru. První spočívá v uvedení soupravy do pohybu a po stisku tlačítka se pro tvorbu přímky využije aktuální směr jízdy. Druhou možností je zadání směru pomocí klávesnice na displeji.

Algoritmus vypočítávající navigační pokyny využívá rovnici 3.1. V případě AB přímky se směr θ_{AB} vypočítával ze směru mezi body A a B. Při použití tohoto režimu je získán z GNSS modulu nebo ručním zadáním obsluhou. Zbývající část programu je totožná.

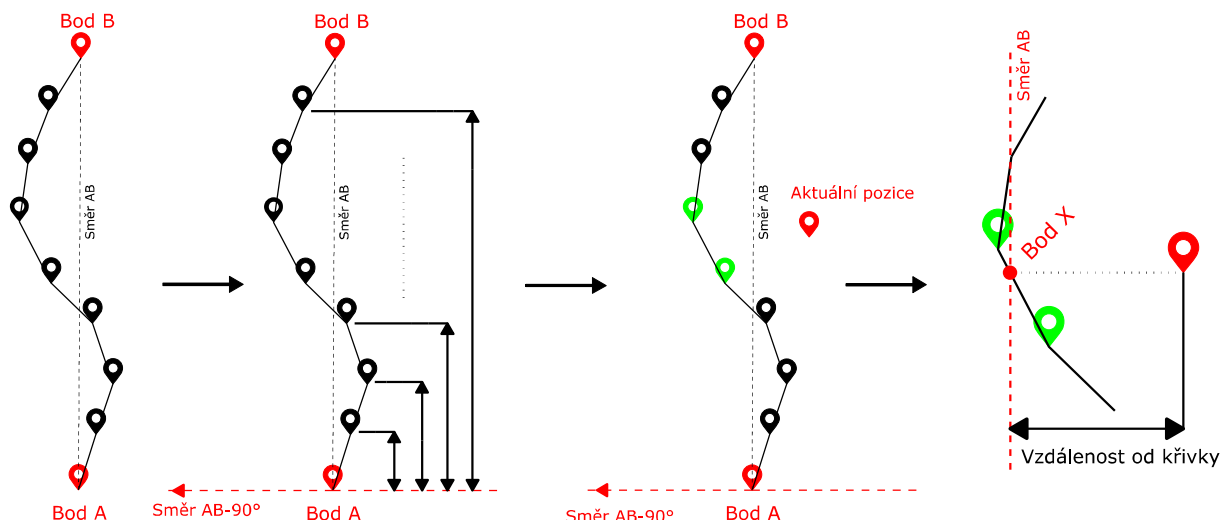
- **Navigační režim AB křivka**

Jak již bylo v úvodu této kapitoly uvedeno, ne na každém pozemku je vhodné používání navigování soupravy po přímkách. Navigační režim AB křivka spočívá v navigování na paralelní křivky odvozené od zaznamenané křivky, po které se pohybuje souprava. Obr. 3.7 tento princip graficky znázorňuje. Paralelní křivky jsou tvořeny kolmo na směr mezi body A a B. Při překročení vzdálenosti mezi těmito body je navigace realizována pomocí režimu AB přímka a naopak. Přepínání je realizováno automaticky, takže uživatel nezaznamená změnu. Tímto, v případě uložení křivky v užší části pozemku, dojde k obhospodaření celé plochy.



Obr. 3.7: Princip navigačního režimu AB křivka

Po zadání bodu A se do paměti začnou ukládat jednotlivé zaznamenané body křivky. K uložení nového bodu dojde poté, co je vzdálenost od předešlého větší než 10m. Pro ukládání těchto informací je použita datová struktura spojového seznamu. Aby nebyla paměť zařízení alokována i při nevyužití potřebného prostoru, je alokována dynamicky. Každá položka seznamu obsahuje data o zeměpisné šířce, délce a pořadí zaznamenaného bodu. Dále informaci o vzdálenosti od bodu A a diferenciální vzdálenost v dvou osách (x, y) vůči aktuální pozici pro zobrazení křivky na displeji.



Obr. 3.8: Výpočet vzdálenosti aktuálního bodu od křivky

Princip výpočtu vzdálenosti mezi aktuální pozicí a vzdáleností od křivky je zobrazen na Obr. 3.8. Algoritmus nejdříve vypočte vzdálenost aktuálního bodu od bodu A. Pokud by byla větší než mezi A a B, popř. pokud je pozice mimo křivku, tak je použit režim navigování AB přímka. V opačném případě je nalezen bod ze seznamu s nejbližší hodnotou vzdálenosti od A. Dále je podle jízdního směru soupravy vybrán další bod v seznamu (při jízdě ve směru k bodu B je vybrán následující a při opačném směru je vybrán předchozí). Z poměrné difference vzdálenosti prvního zvoleného bodu a aktuální pozice od bodu A je vypočten bod X ležící na přímce mezi zvolenými body. Nyní je využit princip navigačního režimu A+ směr. Z bodu X je ve směru AB vedena přímka a vypočtena vzdálenost mezi ní a aktuální pozicí. Algoritmus na základě těchto informací, straně vůči přímce a aktuálnímu jízdnímu směru vytvoří navigační pokyny na jednotlivé paralelní křivky, které jsou zobrazeny formou směrových šipek a grafickým znázorněním aktuální pozice vůči křivce.

$$\varphi_2 = \text{asin}(\sin\varphi_1 \cdot \cos\delta + \cos\varphi_1 \cdot \sin\delta \cdot \cos\theta) \quad (3.4)$$

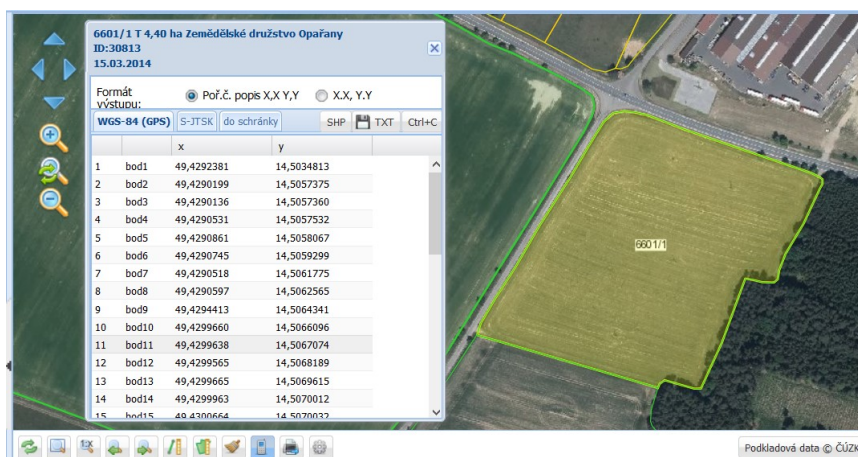
$$\lambda_2 = \lambda_1 + \text{atan2}(\sin\theta \cdot \sin\delta \cdot \cos\varphi_1, \cos\delta - \sin\varphi_1 \cdot \sin\varphi_2)$$

Rovnice 3.4 popisuje výpočet souřadnic φ_2, λ_2 bodu na základně vzdálenosti δ a směru θ od předchozího bodu. Tato rovnice je využita pro navigování na paralelní křivky. Algoritmus vypočte novou pozici bodu na základě vzdálenosti od originální křivky a nastaveného pracovního záběru soupravy. Dále jsou přepočteny diferenciální vzdálenosti v osách x, y mezi novým bodem a zaznamenanými body křivky. V posledním kroku dojde k použití těchto dat a grafickému zobrazení na displeji zařízení. [30]

- **Navigationální režim Hranice pozemku**

V kapitole o využití satelitních polohových systémů v zemědělství je popsána možnost určování hranic pozemků. V zařízení TracNav je implementována funkce pro zobrazení těchto hranic vůči aktuální pozici. Obsluha si pomocí internetového portálu LPIS vyhledá daný pozemek a vygeneruje souřadnice hranic pro referenční elipsoid WGS-84. Podle typu pozemku (louka nebo orná půda) uloží datový soubor s příponou txt do složky na paměťovou kartu a tu vloží do zařízení. Po příjezdu na pozemek a aktivaci tohoto navigačního režimu je na displeji zobrazen obrys pozemku vůči aktuální, na displeji statické, pozici. Následně je možno navigovat soupravu po kraji pozemku a definovat jeho hranice.

Princip navigačního režimu spočívá v načtení jednotlivých hraničních bodů do spojového seznamu uloženého v paměti řídicího mikroprocesoru. Stejně jako v případě režimu AB křivka je využito dynamického alokování paměti. Každá položka obsahuje zeměpisnou šířku, délku a pořadí bodu. Aby bylo možné zobrazení na displeji, jsou také uloženy informace o diferenciální vzdálenosti v dvou osách vůči aktuální pozici. Při příjmu aktuální pozice dochází k přepočtu těchto vzdáleností a aktualizaci grafického znázornění na displeji. Je implementována možnost navigování od jednoho hraničního bodu k druhému. Při využití navigování na bod dojde k automatickému přepnutí na další při vzdálenosti menší než 1 m od současného. Ve spojovém seznamu jsou uloženy pozice v pravotočivém směru. Toto znamená, že pro vytyčení hranic v tomto režimu je nutné pozemek objíždět v pravotočivém směru. Rozdíl aktuálního směru s požadovaným k danému bodu je ukazován pomocí šipek a navigační světelné lišty, kde každá rozsvícená dioda znamená odchylku 1° od přímého směru k danému bodu.



Obr. 3.9: Vygenerované souřadnice hraničních bodů pozemku ze systému LPIS

U navigačních režimů AB přímka, A+ směr, AB křivka a Hranice pozemku je pro grafické zobrazení části paralelních přímek, křivek, nebo popř. části obrysu hranic pozemku, využíváno Cohen-Sutherland algoritmu pro rovinné ořezávání přímek. Princip spočívá v definování hraničních přímek zobrazeného okna pomocí kódů. Tohoto je následně využito při zjišťování pozice přímky vůči definovanému oknu. Nastávají tři případy. V případě, že přímka se nachází v okně, je zobrazena. Naopak pokud není, tak není zobrazena. Poslední možností je, že jeden z hraničních bodů přímky je mimo oblast. Algoritmus vypočte průsečík přímky s definovaným oknem a následně je zobrazena nová přímka s koncem v tomto průsečíku. [31]

- ***Navigační režim K bodu***

Při polních operacích je občas nutné přerušit pracovní činnost a přemístit soupravu na okraj pozemku. Nejčastěji je tento postup aplikován při doplňování strojů pro chemickou ochranu rostlin. Obsluha poté při pokračování v činnosti mívá potíže s nalezením místa, kde přerušila činnost. Z tohoto důvodu zařízení TracNav nabízí možnost využití navigačního režimu K bodu. Na místě přerušení činnosti je obsluhou označena pozice. Automaticky se spustí směrová navigace na tento bod. Na displeji je zobrazena otočná šipka udávající směr k bodu v rozmezí 0–360° (rovnice 3.3). Navigační světelná lišta zobrazuje tento údaj pomocí LED diod, kdy každá rozsvícená dioda oproti přímému směru znamená odchylku o 1°. Dalším zobrazeným údajem je vzdálenost k bodu (rovnice 3.2).

- ***Navigační režim Kompas***

Orebním obděláváním pozemků s využitím jednostranných pluhů dochází k deformacím terénu. Proto se při následné přípravě před setím upřednostňuje navigovat soupravu pod úhlem minimálně 20° oproti orbě. Pomocí navigačního režimu Kompas je možno krátkou jízdou zjistit směr provedené orby. Následně přičtením, popř. odečtením, 20° je získán směr pro provádění přípravy. Ve spojení s navigačním režimem A+ směr a ručním zadáním směru dochází k přesnému navigování a přispění k vyrovnání terénního profilu pozemku.

Na displeji je zobrazen kompas s otočnou šipkou a číselný údaj udávající aktuální směr soupravy. Tento údaj je přímo získán z GNSS modulu.

3.2.2 Funkce Poslední navigační režim

Program při výběru navigačního režimu resetuje data o vybraných pozicích použitých pro navigování. Aby bylo možné opustit daný režim (např. při spuštění režimu K bodu) a poté jej znovu spustit s již použitými koordináty, je implementována funkce Poslední navigační režim. Po výběru dojde k zobrazení informací o posledním navigačním režimu. Je zobrazen časový údaj kdy byl spuštěn a informace o typu navigačního režimu. Pokud se jedná o AB přímku nebo AB křivku, jsou zobrazeny koordináty bodů A a B. V případě A+ přímkou jsou zobrazeny koordináty bodu A a směr. Následně po stisknutí tlačítka pro pokračování je daný režim spuštěn a obsluha může pokračovat v navigování soupravy. Pokud je vložena paměťová karta, je možno při zapnutí zařízení TracNav pokračovat v navigačním režimu uloženém při předchozím vypnutí.

3.2.3 Automatické vypnutí

S ohledem na bezpečnost je v zařízení implementována funkce pro automatické vypnutí při nečinnosti stroje. Informace rozhodující o zastavení stroje je získána z palubního napětí. Při vypnutém motoru se napětí pohybuje v rozmezí 12,5–13 V v závislosti na stavu a typu baterie. Naopak při nastartovaném motoru alternátor dobíjí baterii a napájí ostatní elektronické systémy. V tomto okamžiku se palubní napětí pohybuje v rozmezí 13–15 V. Rozhodovací úroveň o stavu stroje je nastavena na hodnotě 13,5 V. V nadstavbě pro Arduino DUE je implementován odporový dělič za účelem snímání tohoto napětí. Interval automatické vypnutí lze nastavit v rozmezí 5–120 minut. Výchozí hodnota je 15 minut.

Program při příjmu dat z GNSS modulu (každou 1 vteřinu) vyhodnotí úroveň palubního napětí a rozhodne o stavu motoru. Pokud je motor vypnutý, tak pokaždé dojde k zvýšení definované proměnné o jednotku. Jakmile je tato proměnná rovna intervalu pro automatické vypnutí, dojde k uložení dat na paměťovou kartu a vypnutí zařízení. V uživatelském menu se nachází tlačítko pro přímé vypnutí zařízení. Z důvodu uložení dat na kartu využitelných při příštím spuštění je vhodný tento způsob oproti přímému vyjmutí zástrčky z autozapalovače.

3.3 KRYT PRO NAVRHOVANÉ ZAŘÍZENÍ

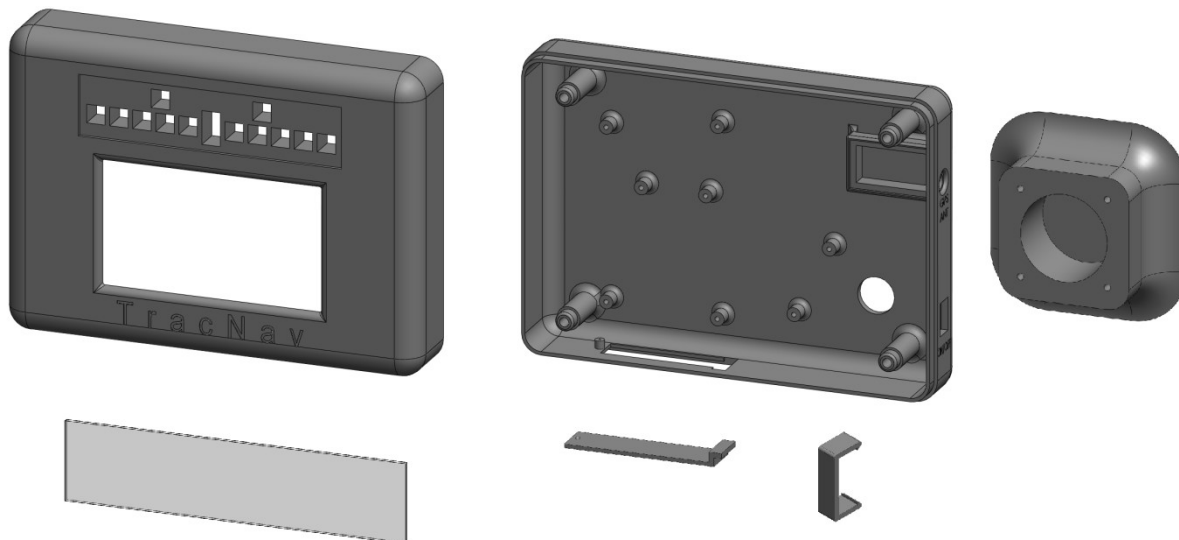
Navržený zařízení je zapotřebí umístit do krytu, jenž odolá provozním podmínkám v zemědělských strojích. Pro tvorbu bylo využito 3D CAD systému a následné vytištění na 3D tiskárně.

3.3.1 Návrh krytu zařízení

Návrh je vytvořen v 3D CAD systému SolidWorks. Jedná se o software vyvinutý společností SolidWorks Corporation. Jedinečností a zároveň nevýhodou je nemožnost úpravy vytvořených souborů ve starších verzích tohoto programu, než ve kterém byly vytvořeny. Jsou nabízeny tři komerční verze a jedna určená k výukovým účelům. Nejzákladnější Standard umožňuje tvorbu dvourozměrných výrobních dokumentací a trojrozměrných modelů. Uživatel má možnost exportu souborů do mnoha formátů. Professional obsahuje další rozšiřitelné balíky, Jedná se např. o předdefinované knihovny normovaných součástek nebo generování spustitelného programu pro prohlížení navrženého modelu bez nutnosti instalace SolidWorks softwaru. Poslední verze je označována jako Premium. Jsou v ní obsaženy nástroje pro tvorbu simulací, pohybových a tolerančních analýz. Studentská verze se také dělí na tři podskupiny, ale rozdíl je převážně v určení doby poskytnuté pro využívání softwaru. Kompletní seznam s popisem jednotlivých verzí je možné vyhledat na internetových stránkách výrobce. [32]

Kryt pro zařízení TracNav se skládá z šesti částí zobrazených na Obr. 3.10. První zleva je přední část, ve které je umístěn dotykový displej a nad ním navigační světelná lišta. Průhledný kryt pro LED diody je znázorněn dole. V prostředku se nachází model zadní strany, v němž jsou připevněny ostatní elektronické komponenty. V levé části jsou vytvořené sloupky pro uchycení platformy Arduino DUE s nadstavbou. Pro vkládání SD karty slouží otvor ve spodní straně. Aby nedocházelo k vnikání nečistot, otvor se zakryje pomocí krytky zobrazené pod ním. V pravém horním rohu je umístěn GNSS modul s vyvedeným konektorem pro připojení prodlužovacího kabelu od antény. K aretaci modulu slouží objímka vedle krytky. V pravém dolním rohu je vyhraněný prostor a vytvořené sloupky pro umístění modulu DC/DC konvertoru. Ve spodní části na pravé straně je umístěn kolébkový spínač pro zapínání zařízení. Pro co nejpřesnější navigování soupravy obsluhou bude zařízení umístěno na čelním skle stroje pomocí gumové přísavky. Poslední část vpravo na Obr. 3.10 je komponenta pro

spojení konstrukce přísavky se zařízením. Je vymodelována zvlášť a po vytisknutí je připevněna na zadní stranu krytu pomocí epoxidového lepidla.



Obr. 3.10: Návrh 3D komponent pro kryt zařízení TracNav

3.3.2 3D tisk komponent

Komponenty pro kryt zařízení TracNav byly vytištěny na 3D tiskárně používané Katedrou teoretické elektrotechniky na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Pro tisk byl zvolen ABS plast. Tento materiál bývá často využíván při 3D tisku s ohledem na jeho termoplastické vlastnosti. Princip tisknutí spočívá v nanášení tenkých vrstev roztaveného plastu pomocí pohyblivé trysky a postupném vymodelování předlohy. Aby nebylo nutné používat výztuhy, byl držák gumové přísavky tisknut zvlášť. Výsledné rozměry krytu bez držáku jsou 130 x 180 x 55 mm. S ním naroste tloušťka zařízení o 30 mm. [33]

4 TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ

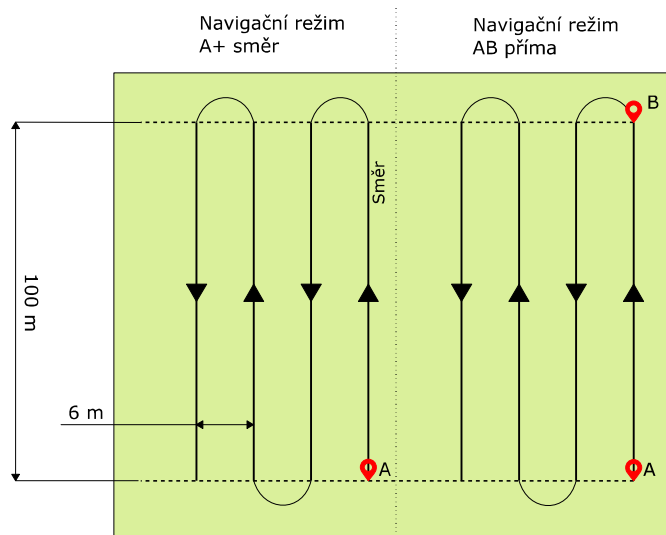
V kapitole zabývající se rozborem satelitního systému pro určování polohy jsou uvedeny vlivy působící na přesnost určení polohy. Následně jsou uvedeny korekční systémy využívané pro jejich odstranění. Tato kapitola se v první části zabývá testováním přesnosti navrženého zařízení a v druhé dlouhodobým testováním zaměřeným na funkčnost zařízení v reálných podmínkách provozu.

4.1 TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI

V dokumentaci od výrobce GNSS modulu je uvedena absolutní přesnost 2 m, při využití DGPS systémů. Následující test spočívá v měření relativní přesnosti, jelikož ta se neuvádí. Pro využití navrženého zařízení k tvorbě záhonů při polních pracích je tato hodnota důležitá. V aplikaci pro chemickou ochranu rostlin se počítá spíše s absolutní přesností z důvodu delšího časového úseku, při němž je souprava navigována podle původní zaznamenané přímky, popř. křivky. Pokud je zařízení využito pro tvorbu záhonů, je vhodné pro co nejpřesnější navigování zaznamenávat předchozí, a tím využít poměrně velké relativní přesnosti v krátkém časovém okamžiku.

4.1.1 Návrh testu

Testování je rozděleno do dvou částí. První test spočívá v navigování traktoru po paralelních přímkách na pozemku, na němž se nachází travní porost. Využitím právě tohoto druhu pozemku je výhodné z důvodu vytvoření viditelných kolejí. Následujícím krokem je změření jednotlivých vzorků vzdáleností mezi původní přímkou a paralelními. Pro možné srovnání s komerčními zařízeními je nutné vytvořit trasy nejpozději do 15 minut od zaznamenání referenční trajektorie. Po změření dat pro určení relativní přesnosti bude proveden test znovu s již uloženými parametry navigačních pokynů pro zjištění přesnosti v delším časovém intervalu. Vlivem následné regenerace travního porostu budou odstraněny pozůstatky po testu a nebude nutné odstraňovat značkovací prostředky, které by bylo nutné použít pro zaznamenání jízdní trasy stroje (např. barevné stopy v případě asfaltových ploch).



Obr 4.1: Grafické znázornění testování přesnosti navigačních režimů AB přímka a A+ směr

Na Obr 4.1 je graficky znázorněn průběh testování přesnosti navigačních režimů AB přímka a A+ směr. U prvního režimu je zadán bod A a po ujetí přímé vzdálenosti 100 m je zadán bod B. Pomocí navigačních pokynů jsou vytvořeny tři paralelní dráhy s odstupem 6 m. Následuje měření vzdálenosti mezi původní přímkou a paralelními. Je provedeno celkem 10 měření s krokem 10 m pro pokrytí vzdálenosti mezi body A a B. Druhý navigační režim je testován s manuálním zadáním směru. Jeho hodnota je získána na základě přejetí předchozí přímkou a odečtením z režimu Kompas. Následně jsou aplikovány stejné měřicí postupy.

4.1.2 Průběh testu

Navržené zařízení TracNav bylo umístěno na traktor Zetor 6911. Externí anténa byla umístěna pomocí magnetického uchycení na střeše stroje. Vybraný pozemek o výměře 6,62 ha se nachází poblíž Olší u Opařan. Tento pozemek byl vybrán se souhlasem vedoucích pracovníků Zemědělského družstva Opařany, jež jej obhospodařuje. Dalším kritériem výběru byla poloha. V okolí testovaného místa se nachází minimálně lesní porost, který by mohl výrazně ovlivňovat přímé šíření satelitního signálu. Test byl proveden 24. 4. 2017 a probíhal v časovém rámci 12:00–17:00. Po celou dobu testu byla téměř jasná obloha a okolní teplota byla přibližně 10 °C.

Před započítáním první části testu byly umístěny cedule označující body A a B. Po vytvoření paralelních křivek s nastavenou roztečí 6 m došlo k změření jednotlivých vzorků vzdáleností pomocí pásmového metru. Dále byly provedeny přípravy pro měření navigačního

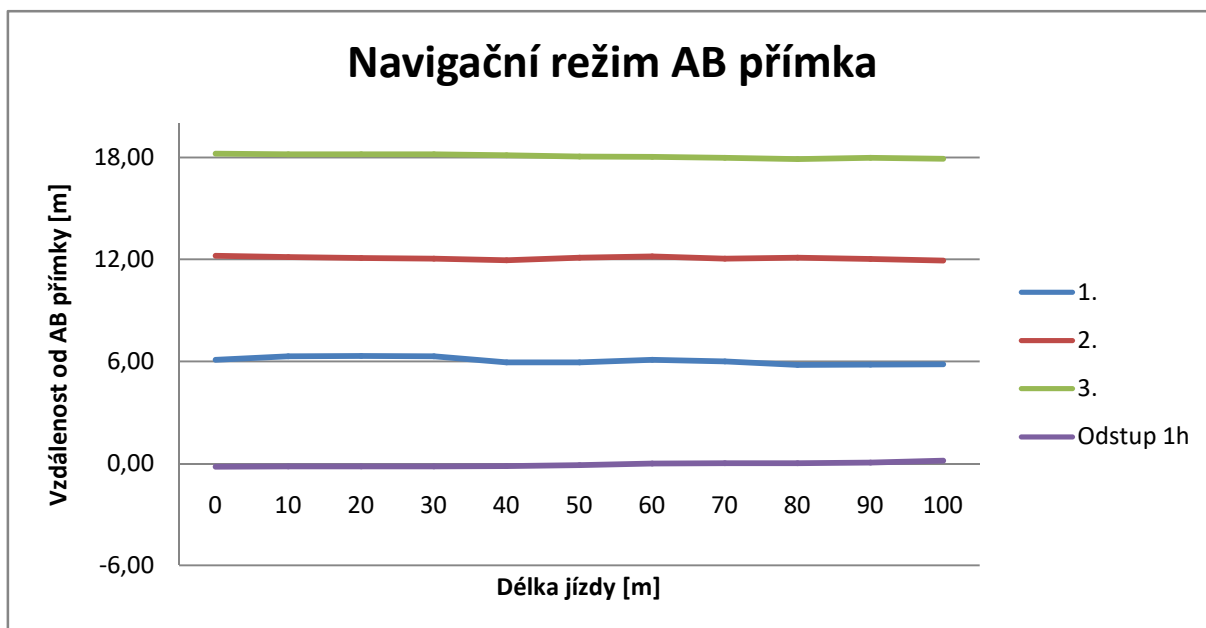
režimu A+ směr. Po uplynutí jedné hodiny byl traktor navigován na původní AB přímku a bylo opět změřeno 10 vzorků pro vyhodnocení přesnosti po delším časovém úseku. Stejným způsobem následně probíhal test navigačního režimu A+ směr.

4.1.3 Vyhodnocení

V Tab. 4.1 jsou zobrazeny naměřené hodnoty vzdáleností získané během použití navigačního režimu AB přímkou. V druhé části tabulky jsou spočítány statistické ukazatele naměřených hodnot. Z měření je patrné, že největší rozdíl od originální přímkou AB je při první jízdě po paralelní přímce, kdy rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou je 53 cm. Ale výsledná průměrná hodnota je 6,05 m. Což při nastavené rozteči 6 m je dobrý výsledek. Po uplnutí 1 hodiny od vytvoření paralelních přímek došlo k navigování traktoru na původní přímkou a změřením hodnot odstupů. Rozdíl maximálních a minimálních hodnot byl 35 cm. Směrodatná odchylka 11 cm okolo střední hodnoty 7 cm nalevo od originální přímkou svědčí velké přesnosti GNSS modulu. V grafu 4.1 jsou graficky zobrazeny naměřené hodnoty vůči požadovaným.

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty při navigačním režimu AB přímkou

Délka jízdy [m]	1. [m]	2. [m]	3. [m]	Odstup 1h [m]
0	6.10	12.22	18.23	-0.19
10	6.31	12.15	18.18	-0.18
20	6.33	12.08	18.19	-0.17
30	6.30	12.05	18.18	-0.17
40	5.95	11.95	18.12	-0.15
50	5.95	12.10	18.05	-0.09
60	6.10	12.18	18.04	0.00
70	6.00	12.05	17.97	0.01
80	5.80	12.10	17.90	0.01
90	5.82	12.03	17.97	0.05
100	5.84	11.93	17.93	0.16
Průměr	6.05	12.08	18.07	-0.07
Max	6.33	12.22	18.23	0.16
Min	5.80	11.93	17.90	-0.19
Max-Min	0.53	0.29	0.33	0.35
Směr. odchylka	0.19	0.08	0.11	0.11
Medián	6.00	12.08	18.05	-0.09

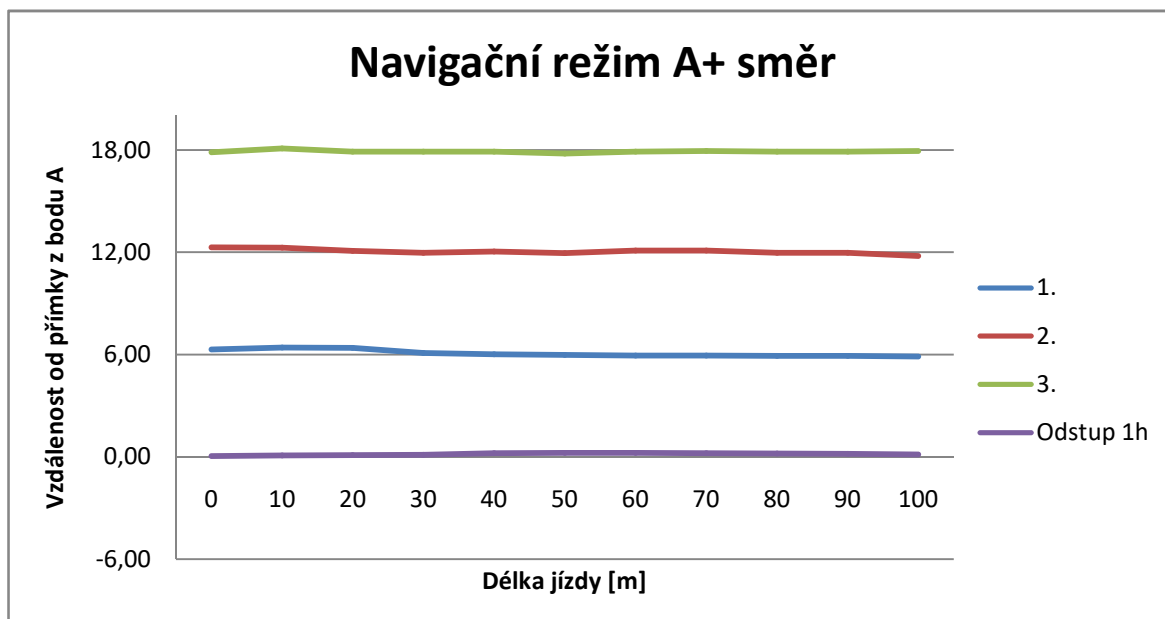


Graf 4.1: Zobrazení naměřených hodnot při navigačním režimu AB přímka

Pro provedení testu navigačního režimu A+ směr byla zadána hodnota 87° . Následně byla vytvořena přímka z bodu A v délce přes 100 m. Následovalo vytvoření tří paralelních přímek. Tab. 4.2 udává naměřené hodnoty a ve spodní části vypočítané statistické údaje pro následné vyhodnocení pokusu. Z výsledných hodnot je patrný největší rozdíl odstupů od originální přímky v případě 1. paralelní přímky. Po uplynutí jedné hodiny byl traktor opět navigován na původní přímku z bodu A. Změřené hodnoty udávají průměrně 16cm chybu v určení polohy GNSS přijímačem. V grafu 4.2 jsou opět graficky zobrazeny naměřené hodnoty vůči požadovaným.

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty při navigačním režimu A+ směr

Délka jízdy [m]	1. [m]	2. [m]	3. [m]	Odstup 1h [m]
0	6.30	12.30	17.86	0.05
10	6.41	12.27	18.10	0.09
20	6.39	12.09	17.90	0.11
30	6.10	11.98	17.91	0.13
40	6.02	12.05	17.90	0.22
50	5.98	11.95	17.80	0.23
60	5.95	12.10	17.90	0.23
70	5.95	12.11	17.95	0.22
80	5.92	11.97	17.90	0.20
90	5.92	11.98	17.91	0.18
100	5.89	11.79	17.94	0.15
Průměr	6.08	12.05	17.92	0.16
Max	6.41	12.30	18.10	0.23
Min	5.89	11.79	17.80	0.05
Max-Min	0.52	0.51	0.30	0.18
Směr. odchylka	0.19	0.14	0.07	0.06
Medián	5.98	12.05	17.90	0.18



Graf 4.2: Zobrazení naměřených hodnot při navigačním režimu A+ směr

Z výsledků obou testů je patrné, že navrhované zařízení je dostatečně přesné pro navigování zemědělských strojů, které jsou obsluhou řízeny manuálně. Rozdíl odstupu paralelních přímek od originální byl v řádu maximálně desítek centimetrů a průměrné hodnoty se od požadovaných lišily v řádu jednotek cm. Přesnost navigačního režimu AB křivka nebyla provedena z důvodu principu použitého algoritmu, jenž vychází z režimu A+ směr.

4.2 DLOUHODOBÉ PRAKTICKÉ TESTOVÁNÍ

Navržené zařízení bude používáno v zemědělských strojích. Toto prostředí se vyznačuje velkým počtem faktorů ovlivňující životnost elektronických komponent v něm použitých. Jsou časté změny teplot, vlhkosti a výskyt prашných nečistot ve vzduchu. V neposlední řadě se jedná o vibrace. Přestože výrobci strojů neustále zdokonalují systémy pro odpružení kabin, nejdou vibrace odstranit úplně. Jejich zdrojem není jenom spalovací motor, ale také nerovnoměrný terén, po kterém se souprava pohybuje. Při testování budou používány jednotlivé navigační módy a bude sledována jejich funkčnost.

4.2.1 Průběh testu

Navržené zařízení bylo na přelomu měsíce března a dubna umístěno v traktoru Massey Ferguson 7620 patřící Zemědělskému družstvu Opařany. Obsluha testovala zařízení při polních pracích a zaznamenávala průběh do vytvořené dokumentace. Sledovanými prvky byly použité druhy navigačních módů, druh práce, doba využívání a případné závady, které se projeví. Jednotlivé záznamy jsou uvedeny v přílohách. V dokumentaci byl obsažen list, na nějž mohla obsluha poznamenat své poznatky a možná vylepšení.



Obr. 4.2: Využívání zařízení TracNav při válení zasetých obilovin

4.2.2 Vyhodnocení

V příloze 8 jsou zobrazeny denní záznamy vypracovávané obsluhou stroje, v němž bylo zařízení TracNav instalováno. Celkem bylo pořízeno devět záznamů a zařízení bylo používáno po dobu 89 hodin. Ze záznamů je patrné používání převážně navigačního režimu AB přímka a AB křivka. Obsluha využívala zařízení při polních pracích týkajících se přípravy půdy před setím obilovin. Při dvou záznamech souprava válela zaseté obiloviny (Obr. 4.2). Při testu byla sledována hlavně odolnost zařízení z důvodu využívání traktoru, v němž byla umístěna navigace. Traktor vykonával práce převážně samostatně a pozemek zpracovával od jedné strany ke druhé. Z tohoto důvodu byla instruovaná obsluha, aby po celou dobu práce testovala zařízení a sledovala jeho přesnost, i když nemohlo být využito při tvorbě záhonů. Z rozhovorů s obsluhou byla nejdříve zjištěna nepřesnost určování pozice při využívání navigačního režimu AB přímka. Nicméně se nejednalo o nepřesnost zařízení TracNav, ale o ne ideálně rovnou jízdní trasu mezi body A a B. Obsluha zadávala body přímky na krajích pozemku, kde byly paralelní přímky přesné, ale mezi těmito body byla trasa vytvořena podle vizuálního odhadu obsluhy a ten byl nepřesný. Následně bylo doporučeno využívání navigačního režimu AB křivka, kde poté navigační pokyny byly shodné s jízdní trasou soupravy po celé délce napříč pozemkem. Během testu nastala pouze jedna porucha týkající se rozbité koncovky napájecího kabelu zařízení. Došlo k uvolnění šroubovací objímky na konci zástrčky do autozapalovače a vypadnutí vnitřních částí (pružina, pojistka a kontaktní kolík). Všechny díly byly nalezeny a zástrčka uvedena do funkčního stavu.

5 POROVNÁNÍ A MOŽNÁ VYLEPŠENÍ

V této kapitole jsou popsány dva typy používaných komerčních navigací v zemědělství. Existuje mnoho výrobců, nicméně v případě spojení s manuálním navigováním se ceny a vybavenost už tolik neliší od těchto vybraných. Odlišnosti už jsou převážně designového charakteru a rozdílným přístupem k ovládání zařízení (mechanická tlačítka vůči dotykovému displeji). V poslední části jsou uvedena možná vylepšení zařízení TracNav.

5.1 TEEJET CENTERLINE 220

Navigační systém vytvořený firmou Teejet Technologies je používán převážně pro navigování při chemické ochraně rostlin. Výhodou tohoto zařízení je propojení s řídicí jednotkou postřikovače, popř. práškovače, a řízení dávky látek podle aktuální rychlosti. Modul pro příjem satelitních signálů podporuje GPS, GLONASS a DGPS systémy. Obsluha může využívat navigační režimy AB přímka, AB křivka a K bodu. Navigační pokyny jsou zobrazeny pomocí grafického 3“ displeje a navigační světelné lišty. Výrobce udává absolutní přesnost určení pozice 1 m bez ohledu na korekční systémy. Relativní přesnost v 15minutovém okně je 30–45 cm, popř. 15–25 cm při použití DGPS. Pořizovací cena se pohybuje v rozmezí £750–800 (24 500–26 000 Kč). [35]



Obr. 5.1: Teejet CenterLine 220, převzato z [34]

Navržené zařízení TracNav v porovnání s Teejet CenterLine 220 obsahuje více navigačních režimů. Prvním je A+ směr a druhým je Hranice bodů. Navíc je možné s použitím paměťové karty pokračovat v navigačním režimu používaném při předchozím vypnutí.

5.2 TRACK-GUIDE II

Německý výrobce Müller-Elektronik se zabývá výrobou elektronických zařízení využívaných v precizním zemědělství. Jedním z produktů je navigační systém TRACK-Guide II. Podporuje navigační režimy AB přímka, A+ směr, AB křivka, kruhovou navigaci a adaptivní křivku. Navigační pokyny jsou zobrazovány pomocí 5,7“ grafického displeje. Výrobce udává relativní přesnost 20 cm při použití satelitních DGPS systémů. Zařízení podporuje propojení s řídicí jednotkou stroje pro chemickou ochranu rostlin. Následně je řízen jejich pracovní záběr a dávka aplikovaná na pozemek, aby došlo k co nejlepšímu pokrytí pozemku. Pořizovací cena je přibližně 62 000 Kč. [36][37]



Obr. 5.2: TRACK-Guide II, převzato z [36]

Navržené zařízení TracNav navíc nabízí navigační režim Hranice pozemků. Pomocí TRACK-Guide II je také možné navigování okolo hranic pozemků, jenže nejdříve je nutné pozemek objet soupravou při předchozí činnosti a uložit data do paměti zařízení. Není tedy možné nahrát souřadnice z portálu LPIS. Výhodou této navigace je displej, na kterém jsou graficky oddělené obhospodařené plochy od těch neobhospodařených. Pomocí USB flash disku je možné v počítačovém programu výrobce zobrazit data o provedené práci a generovat mapy chemické aplikace na pozemcích.

5.3 MOŽNÁ VYLEPŠENÍ ZAŘÍZENÍ TRACNAV

Zkonstruované zařízení při testování vykazovalo dostatečnou přesnost pro navigování zemědělských strojů. Během dlouhodobého testování mohla obsluha zapsat své poznatky a možná vylepšení. Záznamový arch je zobrazen v příloze 9. První výtka byla k ovládacímu menu, které bylo v anglickém jazyce. Během jednoho dne došlo k přeprogramování zařízení na české popisky ovládacích prvků a přehrání softwaru. Zadruhé bylo vytknuto statické rozmístění paralelních přímek zobrazovaných na displeji. Jedná se o softwarovou úpravu řídicího mikroprocesoru, která bude v dalším návrhu upravena. Dále jsou uvedeny možná budoucí vylepšení zařízení TracNav.

5.3.1 Asistované řízení

Návrh by spočíval ve využití krokového motoru pro řízení jízdy soupravy pomocí volantu stroje. Motor by byl umístěn pomocí nosné konstrukce zvenčí na volant. Bylo by nutné využívat snímače jeho polohy z důvodu informace o natočení rotoru, ale také aby docházelo k jeho odpojení při převzetí řízení obsluhou. Pravděpodobně bude nutné pro zjištění aktuálního jízdního směru a určení navigačních kroků implementovat další elektronické komponenty jako jsou např. inerciální snímače. Dalším krokem by bylo zjištění, zda bude mít platforma Arduino DUE dostatečný výpočetní výkon. Přestože při navigačním režimu AB přímka a A+ směr mikroprocesoru trvá výpočet navigačních pokynů cca 84 ms, při použití režimu AB přímka už se doba výpočtu liší v závislosti na počtu zaznamenaných bodů. Například při 200 bodech, odpovídajících 2 km dlouhé křivce, výpočet trvá cca 250 ms. Dalším limitujícím faktorem by mohla být 96KB operační paměť.

5.3.2 Grafické zobrazení

Současné zkonstruované zařízení poskytuje grafické zobrazení polohy soupravy vůči vypočteným trasám. Budoucí vylepšení by spočívalo v zobrazení celého průběhu uskutečněných jízd na pozemku. Takto by obsluha ihned viděla předchozí jízdy a mohla by identifikovat obhospodařenou a neobhospodařenou část pozemku. Využit by byl větší dotykový LCD displej (např. s úhlopříčkou 10"). S ohledem na výpočetní výkon by už pro tyto účely nebylo možné využití Arduino DUE. Možným řešením by bylo použití již hotového komerčního tabletu. V současné době je možné tato zařízení zakoupit za 4 000–5 000 Kč. V tomto případě by mohlo být také implementováno asistované řízení

zmíněné v předchozí kapitole. Zde by pro řízení krokového motoru a snímání potřebných údajů mohla být využita platforma Arduino komunikující s tabletem.

5.3.3 Head-up displej

Současné kabiny moderních zemědělských strojů jsou konstruovány tak, aby obsluha měla co největší výhled do okolí a na připojené zařízení. To znamená, že je kabina vybavena velkou prosklenou plochou. Jedním z dalších možných vylepšení navigačního zařízení by bylo zobrazení navigačních pokynů pomocí Head-up displeje promítajícím údaje na čelním skle stroje. Jedná se o velmi moderní řešení, které v současné době žádný z výrobců zemědělských strojů a navigačních zařízení nenabízí.

Závěr

Diplomová práce se zabývá využitím satelitních systémů pro určování zeměpisné polohy v zemědělství. Cílem bylo navrhnout zařízení na platformě Arduino, které bude pomocí těchto pozičních systémů navigovat zemědělské stroje při polních pracích pro dosažení co největšího využití jejich potenciálu a s tím související snížení vynaložených nákladů. Navržené zařízení spadá do kategorie zařízení určující navigační pokyny pro obsluhu, jež manuálně řídí soupravu vykonávající polní práce.

Navržené zařízení je postaveno na platformě Arduino DUE, vybrané na základě potřebného výpočetního výkonu. Vyhodnocení aktuální zeměpisné polohy obstarává nejnovější přijímač Ublox NEO M8N, který posílá data pomocí sériové linky do řídicího mikroprocesoru. Pro co nejlepší příjem signálu je použita externí magnetická anténa, jež se umísťuje na střechu stroje. Zobrazení navigačních pokynů je realizováno dvěma způsoby. První spočívá v zobrazení aktuální polohy vůči vypočtené ideální pomocí navigační světelné lišty. Požadovaná pozice je signalizována pomocí prostředních LED diod a každé odchýlení o 50 cm je indikováno postupným rozsvěcováním LED diod po stranách, což zároveň udává směr k ideální stopě. Podle okolního osvětlení je možno regulovat jas pomocí PWM modulace. Druhým způsobem zobrazení je dotykový 4,3“ LCD displej NEXTION, jenž je zároveň použit pro ovládání navrženého zařízení obsluhou. Displej obsahuje vlastní grafický mikroprocesor obsahující dostatečnou paměť pro uložení celého grafického uživatelského rozhraní, které je vytvořeno v programu od výrobce a nahráno pomocí paměťové karty. Následně je komunikace mezi ním a řídicím mikroprocesorem platformy Arduino uskutečněna pomocí sériového komunikačního kanálu. Navržené zařízení umožňuje 6 navigačních režimů. Navigační režim AB přímka a A+ směr navigují obsluhu po paralelních přímkách s roztečí šířky pracovního záběru soupravy. U některých pozemků ovšem nemohou být použity. Z tohoto důvodu je implementován režim AB křivka, kdy je obsluha navigována na paralelní křivky. Ve spojení s portálem LPIS, jenž obsahuje údaje o obhospodařovaných pozemcích, je možné navigovat soupravu po hranicích pozemků nahraných do zařízení pomocí paměťové karty. Pro návrat na místo přerušení pracovní činnosti slouží režim K bodu a poslední je možnost zobrazení aktuálního jízdního směru pomocí kompasu. Výsledkem provedeného testu na přesnost navrženého zařízení pro použití při polních pracích je, že ve spojení s manuálním řízením je přesnost v řádu desítek centimetrů dostatečná. Následně je popsán a vyhodnocen dlouhodobý test na funkčnost zařízení, jenž byl proveden

ve spolupráci Zemědělského družstva Opařany, kdy navržené zařízení bylo umístěno v traktoru vykonávajícím jarní polní práce. Zařízení v testu obstálo velmi dobře a objevila se pouze jediná vada ohledně opravitelného poškození napájecí zásuvky. Pro navržené zařízení byl zvolen název TracNav, jako zkrácené označení „Tractor Navigation“.

Vývoj navigačních systémů pro řízení souprav pomocí moderních technologií v oblasti elektroniky v zemědělství je v současné době velice podporován a někteří výrobci už začínají experimentovat s plně autonomními stroji. V závěru této práce jsou uvedena některá další vylepšení současného návrhu. Jednou z možností je myšlenka využití technologie zvané Head-up displej, která není prozatím žádnými výrobci komerčně nabízena.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Základní pojmy. *Katedra geomatiky, Fakulty aplikovaných věd, Západočeské univerzity v Plzni*. [online]. 24. 11. 2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: http://old.gis.zcu.cz/studium/mk2/multimedialni_texty/index_soubory/hlavni_soubory/zaklady.html#srovin
- [2] Spherical Coordinates. *Wolfram MathWorld*. [online]. 3. 12. 2016 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/SphericalCoordinates.html>
- [3] CZERNIAK, Robert J. a James P. REILLY. *Applications of GPS for surveying and other positioning needs in departments of transportation*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1998. ISBN 0309061164.
- [4] Souřadnicové systémy. *GISMentors*. [online]. 25. 11. 2016 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: <http://training.gismentors.eu/open-source-gis/soursystemy/index.html>
- [5] *GIS Geography: Trilateration vs Triangulation – How GPS Receivers Work* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>
- [6] HRDINA, Zdeněk, František VEJRAŽKA a Petr PÁNEK. *Rádiové určování polohy: (družicový systém GPS)*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01386-3.
- [7] KAPLAN, Elliot D. a Christopher J. HEGARTY (eds.). *Understanding GPS: principles and Applications*. 2nd Edit. Boston: Artech House, 2006. ISBN 1-58053-894-0.
- [8] GPS: Space Segment. *Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics* [online]. The National Coordination Office, 2011 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [9] Navigation: Launching Galileo. *ESA: Launching Galileo* [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Launching_Galileo
- [10] *Spar 3D: Accurate or Precise? Do You Know the Difference?* [online]. Diversified Communications [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.spar3d.com/blogs/from-scratch/vol13no38-accurate-or-precise/>
- [11] *Zeměměřičský úřad: Síť permanentních stanic GNSS České Republiky* [online]. Praha, 2004 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: http://czepos.cuzk.cz/_index.aspx
- [12] SPECHT, Mariusz. *The evaluation of the positioning accuracy of the EGNOS and DGPS systems based on the long-term measurements in the years 2006–2014* [online]. 2015, , 11 [cit. 2017-04-04]. DOI: 10.1515/pcr-2015-0006. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Mariusz_Specht/publication/283340906_The_evaluation_of_the_positioning_accuracy_of_the_EGNOS_and_DGPS_systems_based_on_the_long-term_measurements_in_the_years_2006-2014/links/5634840c08aebc003fff0ffc/The-evaluation-of-the-positioning-accuracy-of-the-EGNOS-and-DGPS-systems-based-on-the-long-term-measurements-in-the-years-2006-2014.pdf?origin=publication_detail

- [13] Geo Konzept: Mobile RTK-Referenzstation. *Geo Konzept: Mobile RTK-Referenzstation* [online]. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: http://www.geo-konzept.de/de/02_produktdetail.php?kategorien_bereich=Landwirtschaft&produkte_id=63
- [14] VCE Publications: Precision Farming Tools: Global Positioning System (GPS) [online]. Virginia Polytechnic Institute and State University [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.pubs.ext.vt.edu/442/442-503/442-503.html>
- [15] AgroObchod: Produkty Agroobchod Nové Strašecí s.r.o. *AgroObchod: Produkty Agroobchod Nové Strašecí s.r.o* [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.agroobchod.cz/produkt/neseny-seci-stroj-sklopny-dv/#prettyPhoto>
- [16] CropCare Equipment: Foam markers for AG Sprayers [online]. PBZ [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: http://cropcareequipment.com/haytools_foammarkers/foam-markers.php
- [17] Agrall: TUCANO 450 - 320 [online]. 2013 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.agrall.cz/produkt/40/tucano-450-320>
- [18] Controlled Traffic Farming [online]. CTF Europe, 2013 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.controlledtrafficfarming.com/Home/Default.aspx>
- [19] Věřejný regist půdy LPIS: O aplikaci Registr půdy [online]. 2009 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/farmer/LPIS/>
- [20] AGRI-PRECISION s.r.o. [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://www.agri-precision.cz/>
- [21] What's new in Farming: John Deere: GreenStar Lightbar launched. : *John Deere: GreenStar Lightbar launched* [online]. AgriContent, 2009 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.wnif.co.uk/2008/11/john-deere-greenstar-lightbar-launched/>
- [22] Trimble: Guidance Displays [online]. Trimble [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <https://agriculture.trimble.com/precision-ag/products/displays/>
- [23] AGRI CS: AUTOPILOT [online]. 2011: agrics.cz [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.agrics.cz/autopilot?sid=15577f5fb5583d33d1a6a1d237631559>
- [24] Case IH: Autonomous Concept Vehicle [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <https://www.caseih.com/northamerica/en-us/Pages/campaigns/autonomous-concept-vehicle.aspx>
- [25] Arduino. *Arduino*. [online]. 20. 11. 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [26] U-blox [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://www.u-blox.com/en>
- [27] ITEAD Studio: Nextion [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://nextion.itead.cc/index.html#home>
- [28] Texas Instruments: TLC5940 [online]. Texas Instruments Incorporated, 1995 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TLC5940>
- [29] Tronixstuff: Tutorial – Arduino and the TLC5940 PWM LED Driver IC [online]. 2013 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://tronixstuff.com/2013/10/21/tutorial-arduino-tlc5940-led-driver-ic/>

- [30] *Movable Type Scripts: Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points* [online]. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- [31] *Wikipedia: Cohen–Sutherland algorithm* [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cohen%E2%80%93Sutherland_algorithm
- [32] *SOLIDWORKS: Solidworks - kompletní 3D softwarové nástroje* [online]. Dassault Systèmes SolidWorks [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.solidworks.cz/>
- [33] *Prusa3D* [online]. Prusa Research [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/>
- [34] *TeeJet.com: CenterLine® 220 GPS Guidance System* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.lh-agro.de/english/home/products/precision-farming-products/gps-guidance/centerline--220-gps-guidance-system.aspx>
- [35] *Simpers Trade Counter: Teejet Centerline 220* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.simperstradecounter.co.uk/teejet-centerline-220-765-p.asp>
- [36] *Müller-Elektronik GmbH und Co. KG: TRACK-Guide II* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <https://www.mueller-elektronik.de/en/products/track-guide-ii/>
- [37] *Lukashop: TRACK Guide II* [online]. Lukaservice [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://lukashop.cz/cs/satelitni-navigace/162-track-guide-ii.html>

Seznam obrázků

OBR. 1.1: ZEMĚPISNÉ SOUŘADNICE.....	13
OBR. 1.2: KARTÉZSKÝ SYSTÉM SOUŘADNIC.....	13
OBR. 1.3: VÝCHOZÍ ROTAČNÍ ELIPSOID.....	15
OBR. 1.4: METODA TRIANGULACE.....	16
OBR. 1.5: TRILATERACE POMOCÍ 2 A 3 ZNÁMÝCH BODŮ.....	17
OBR. 1.6: TRILATERACE V 3D PROSTORU.....	18
OBR. 1.7: MULTILATERACE V 2D PROSTORU.....	19
OBR. 1.8: ROZDÍL MEZI ABSOLUTNÍ A RELATIVNÍ PŘESNOSTÍ.....	24
OBR. 1.9: PRINCIP DIFERENČNÍHO SYSTÉMU EGNOS.....	26
OBR. 1.10: MOBILNÍ RTK STANICE OD SPOLEČNOSTI TRIMBLE.....	27
OBR. 2.1: TVORBA ZÁHONŮ PŘI OBHOSPODAŘOVÁNÍ POZEMKU.....	30
OBR. 2.2: VYMEZENÍ DALŠÍCH JÍZDNÍCH DRAH POMOCÍ ZNAMENÁKŮ.....	31
OBR. 2.3: SYSTÉMY LASER PILOT A GPS PILOT OD FIRMY CLAAS.....	32
OBR. 2.4: NAVIGAČNÍ SVĚTELNÁ LIŠTA GREENSTAR LIGHTBAR A ZAŘÍZENÍ TRIMBLE CFX-750.....	35
OBR. 2.5: KONCEPT AUTONOMNÍHO TRAKTORU OD SPOLEČNOSTI CASE IH.....	37
OBR. 3.1: ARDUINO DUE.....	39
OBR. 3.2: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAVIGAČNÍ SVĚTELNÉ LIŠTY.....	42
OBR. 3.3: ZVUKOVÁ SIGNALIZACE A SENZOR OKOLNÍHO OSVĚTLENÍ.....	43
OBR. 3.4: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍHO OBVODU ZAŘÍZENÍ TRACNAV.....	45
OBR. 3.5: NADSTAVBA PRO ARDUINO DUE.....	46
OBR. 3.6: URČENÍ VZDÁLENOSTI BODU C OD PŘÍMKY AB A DEFINOVÁNÍ PARALELNÍCH PŘÍMEK.....	48
OBR. 3.7: PRINCIP NAVIGAČNÍHO REŽIMU AB KŘIVKA.....	49
OBR. 3.8: VÝPOČET VZDÁLENOSTI AKTUÁLNÍHO BODU OD KŘIVKY.....	50
OBR. 3.9: VYGENEROVANÉ SOUŘADNICE HRANIČNÍCH BODŮ POZEMKU ZE SYSTÉMU LPIS.....	51
OBR. 3.10: NÁVRH 3D KOMPONENT PRO KRYT ZAŘÍZENÍ TRACNAV.....	55
OBR. 4.1: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI NAVIGAČNÍCH REŽIMŮ.....	57
OBR. 4.2: VYUŽÍVÁNÍ ZAŘÍZENÍ TRACNAV PŘI VÁLENÍ ZASETÝCH OBILOVIN.....	61
OBR. 5.1: TEEJET CENTERLINE 220.....	63
OBR. 5.2: TRACK-GUIDE II.....	64

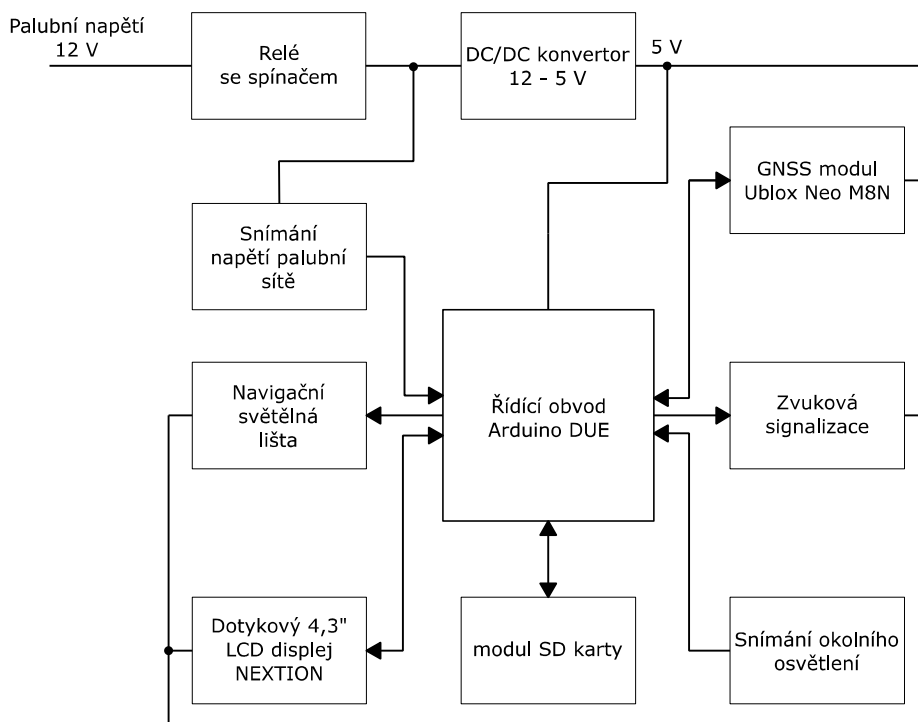
Seznam tabulek a grafů

TAB. 4.1: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI NAVIGAČNÍM REŽIMU AB PŘÍMKA.....	58
TAB. 4.2: NAMĚŘENÉ HODNOTY PŘI NAVIGAČNÍM REŽIMU A+ SMĚR.....	60
GRAF 4.1: ZOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PŘI NAVIGAČNÍM REŽIMU AB PŘÍMKA.....	59
GRAF 4.2: ZOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PŘI NAVIGAČNÍM REŽIMU A+ SMĚR.....	60

Seznam příloh

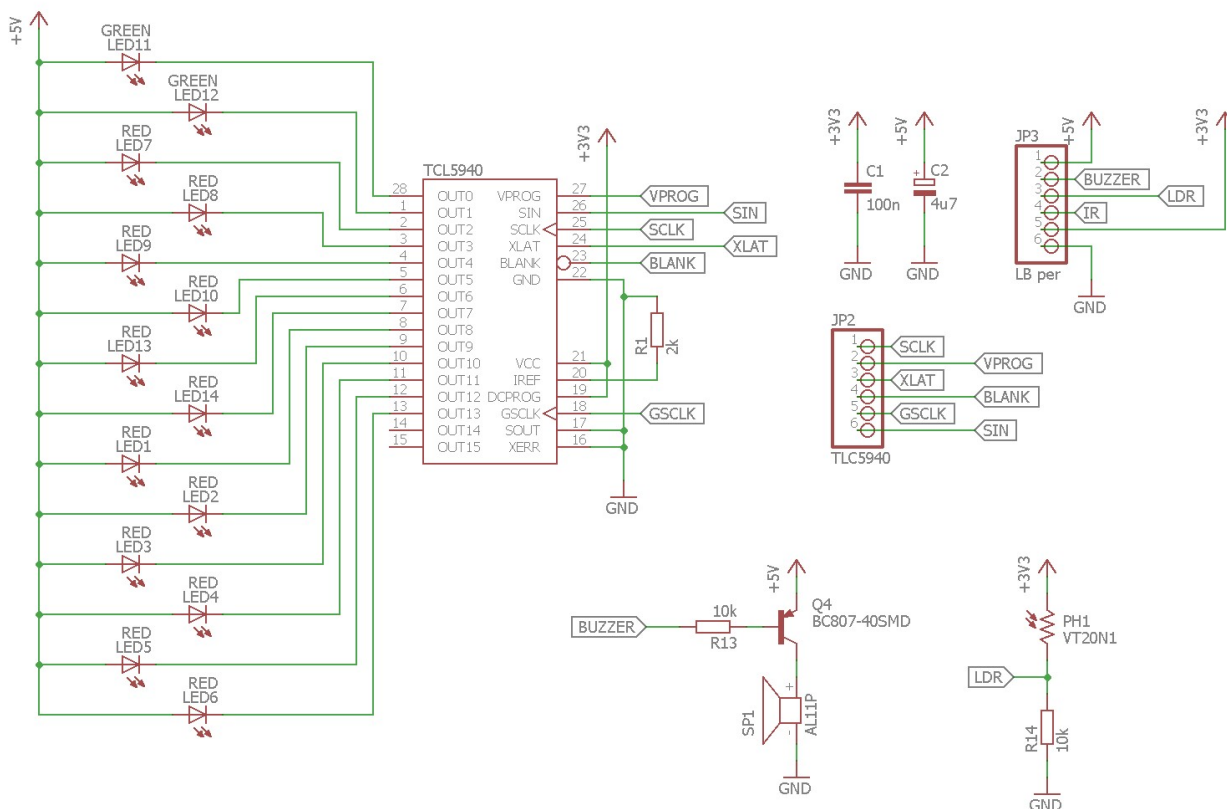
PŘÍLOHA 1: BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ TRACNAV	1
PŘÍLOHA 2: SVĚTELNÁ NAVIGAČNÍ LIŠTA	1
PŘÍLOHA 3: NADSTAVBA PRO ARDUINO DUE.....	3
PŘÍLOHA 4: UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ ZAŘÍZENÍ TRACNAV	5
PŘÍLOHA 5: TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	9
PŘÍLOHA 6: PŘEDÁVÁNÍ ZAŘÍZENÍ NA DLOUHODOBÉ TESTOVÁNÍ.....	11
PŘÍLOHA 7: PRŮBĚH DLOUHODOBÉHO TESTOVÁNÍ.....	12
PŘÍLOHA 8: DENNÍ ZÁZNAMY Z DLOUHODOBÉHO TESTOVÁNÍ VEDENÉ OBSLUHOU	14
PŘÍLOHA 9: PŘIPOMÍNKY OBSLUHY K SOUČASNÉMU STAVU ZAŘÍZENÍ A DALŠÍ MOŽNÁ VYLEPŠENÍ	15

Příloha 1: Blokové schéma navrženého zařízení TracNav

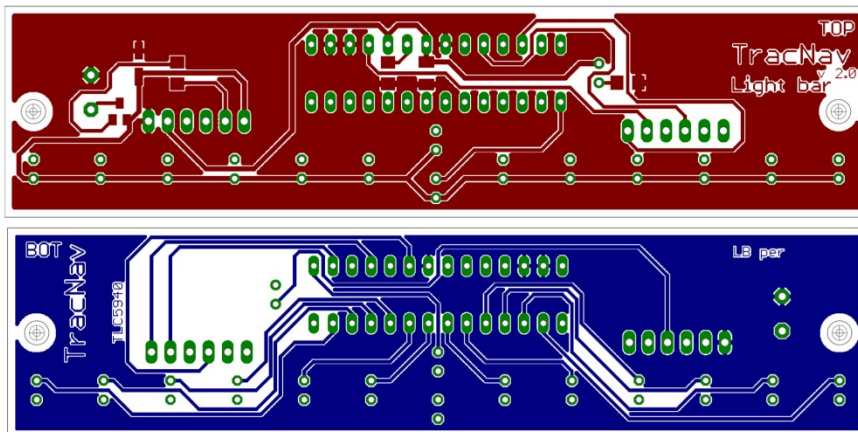


Obr. 1.1: Blokové schéma

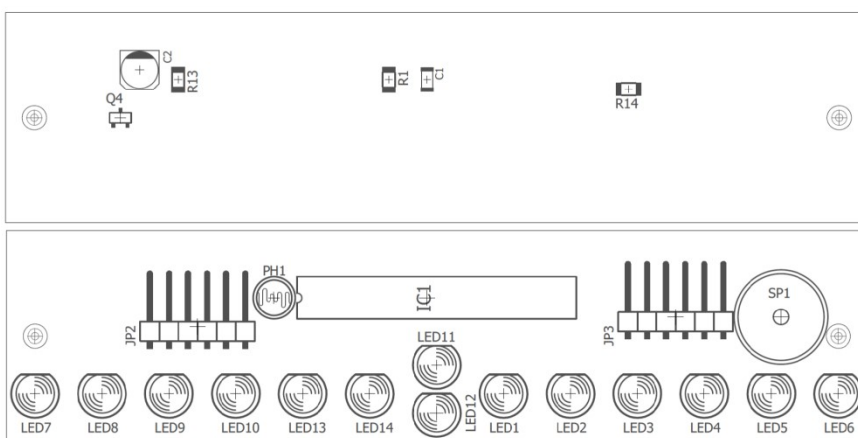
Příloha 2: Světelná navigační lišta



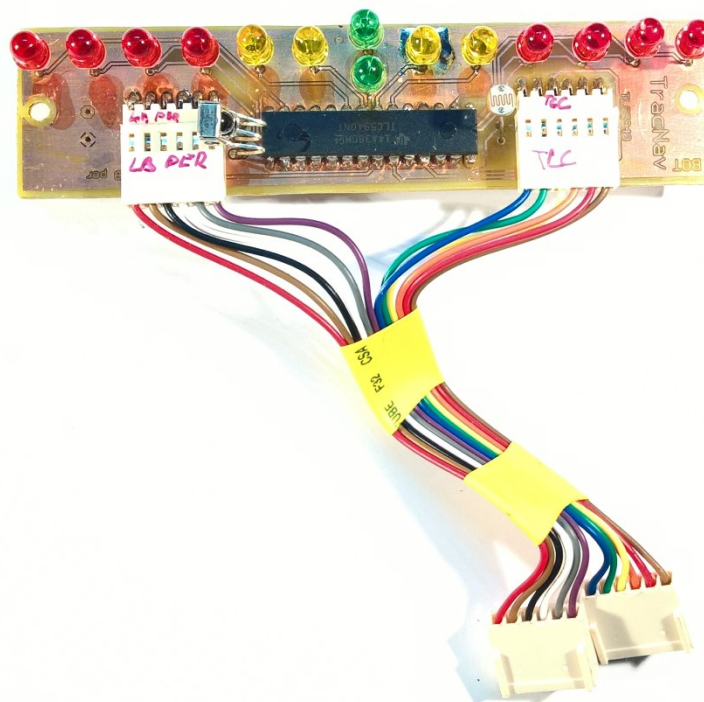
Obr. 2.1: Schéma světelné navigační lišty



Obr. 2.2: Horní a spodní vrstva DPS (vše v měřítku 1:1)

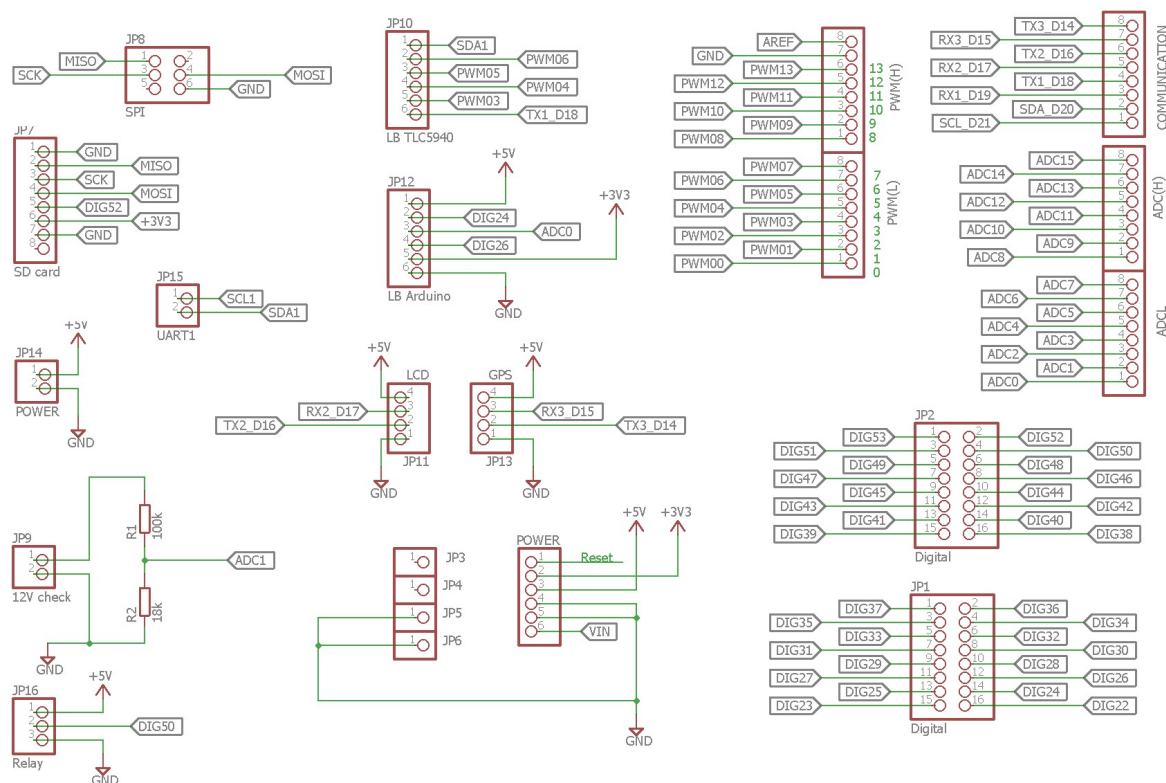


Obr. 2.3: Rozmístění součástek na DPS

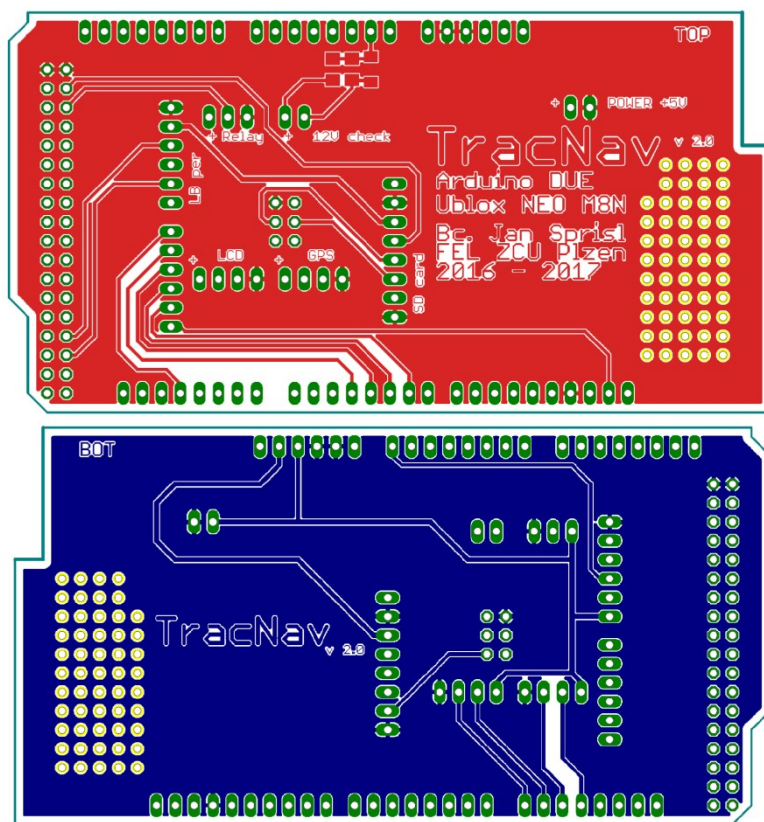


Obr. 2.4: Sestavená světelná navigační lišta

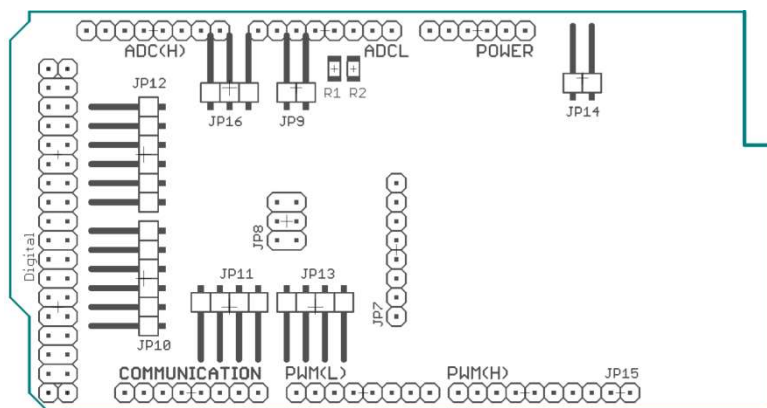
Příloha 3: Nadstavba pro Arduino DUE



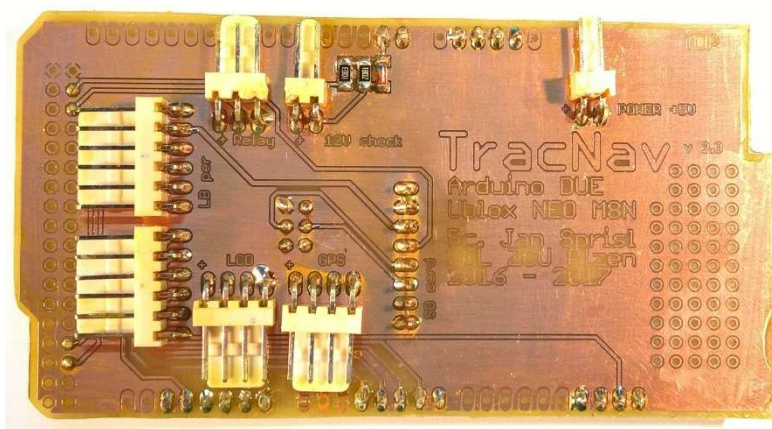
Obr. 3.1: Schéma nastavení pro Arduino DUE



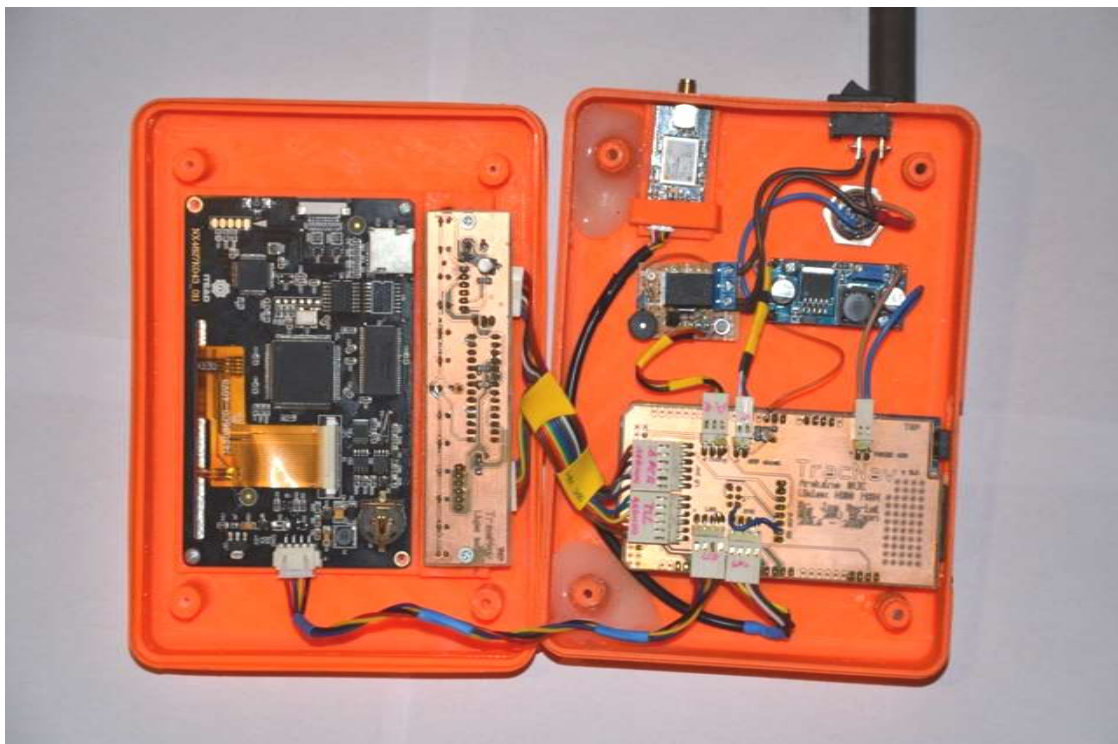
Obr. 3.2: Horní a spodní vrstva DPS nastavení (vše v měřítku 1:1)



Obr. 3.3: Rozmístění součástek na horní straně DPS

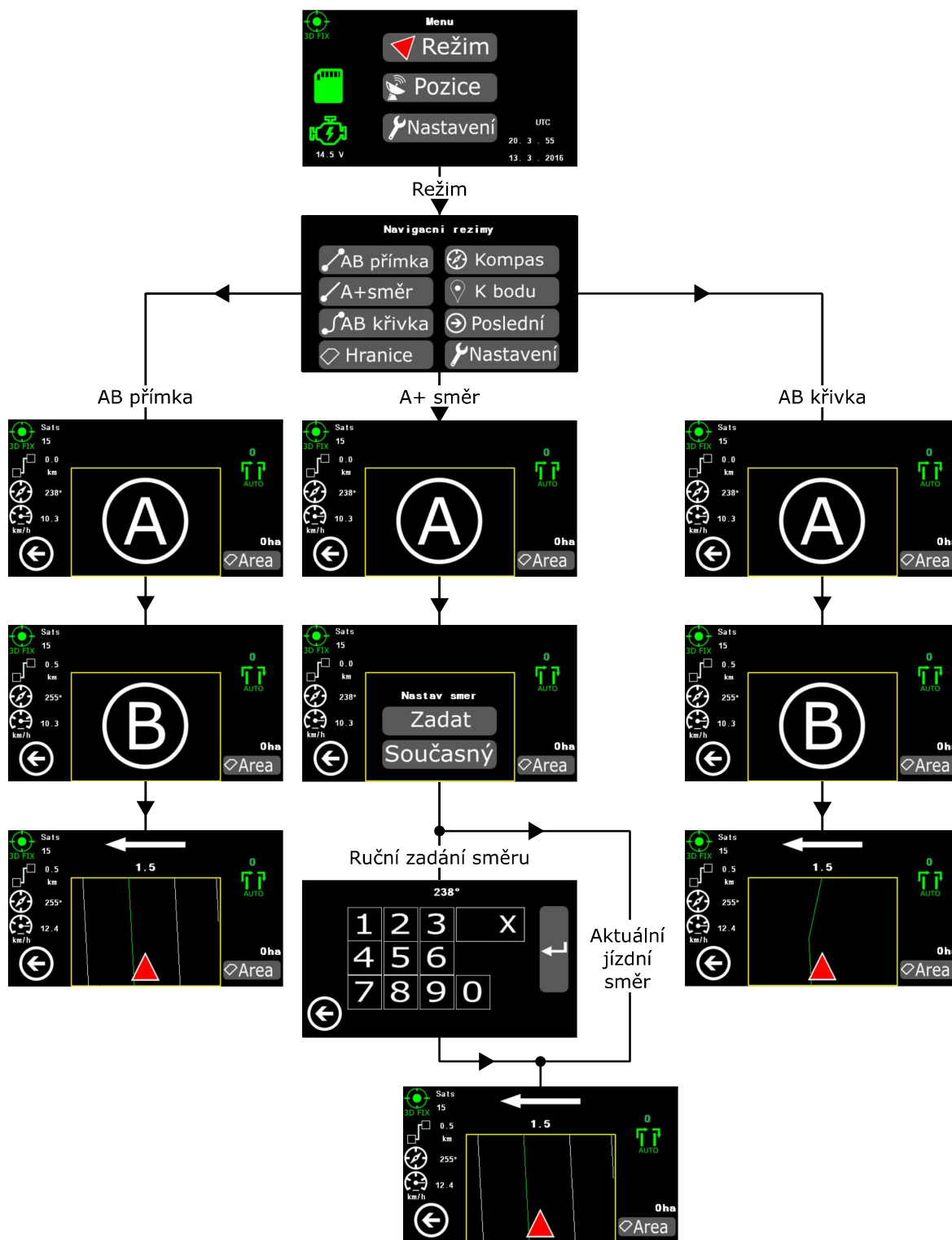


Obr. 3.4: Sestavená nadstavba pro Arduino DUE



Obr. 3.5: Implementované komponenty v krytu navrženého zařízení

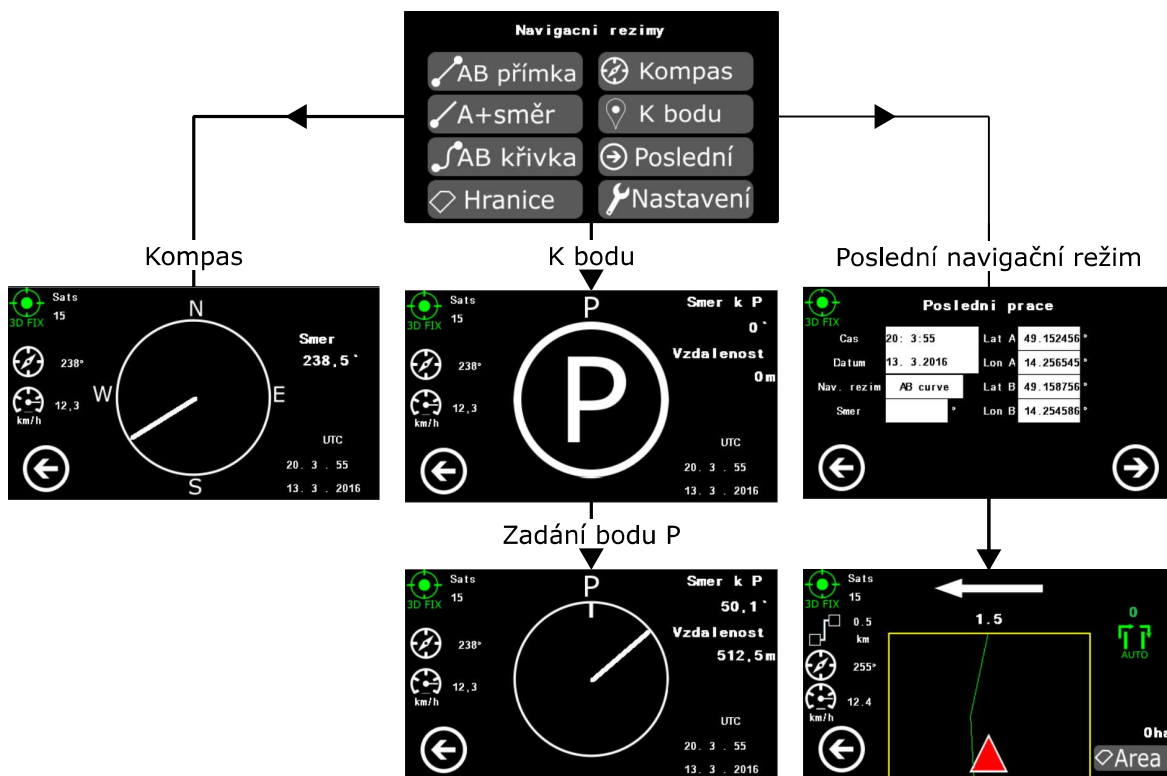
Příloha 4: Uživatelské rozhraní zařízení TracNav



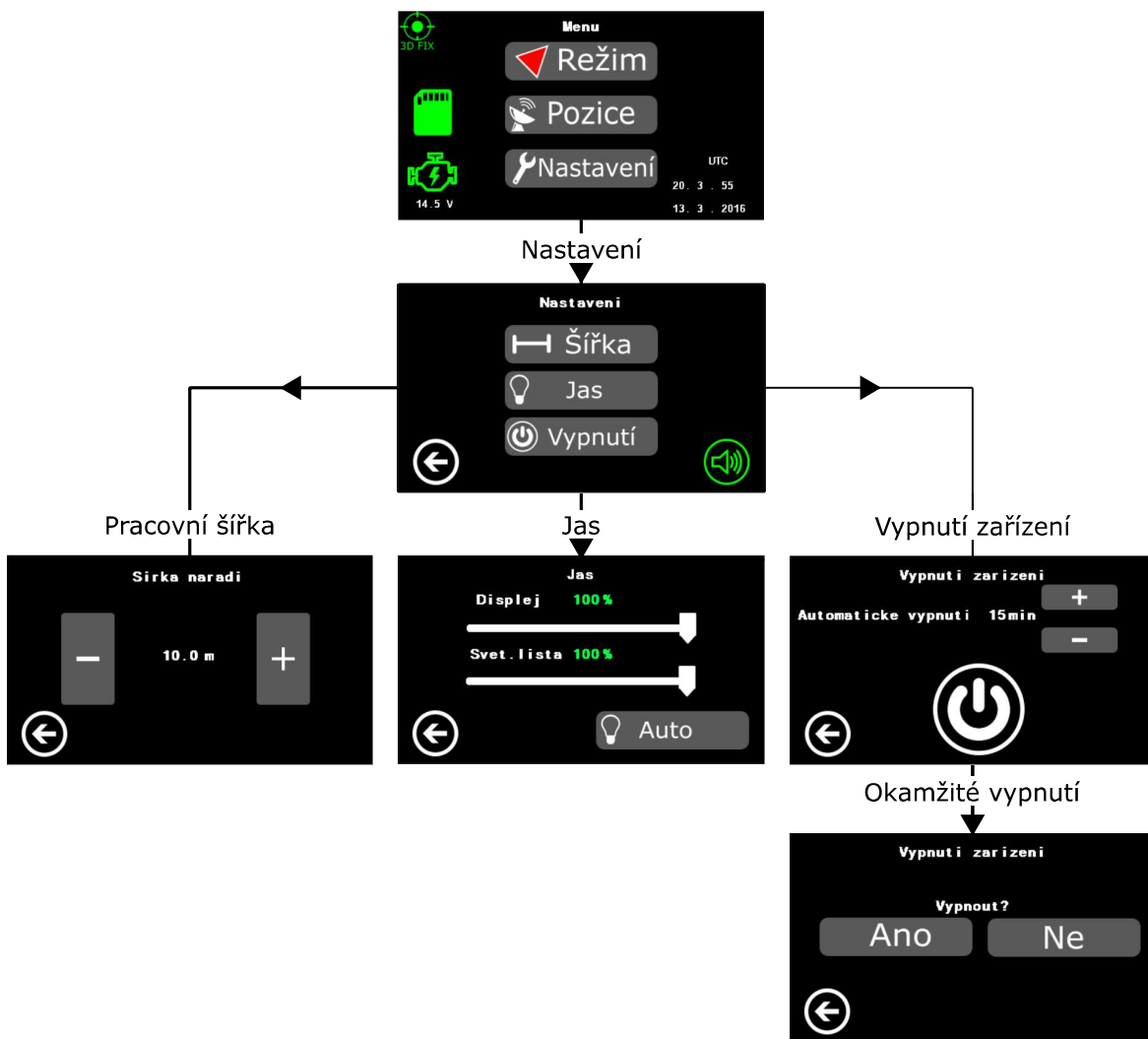
Obr. 4.1: Použití navigačních režimů AB přímka, A+ směr a AB křivka



Obr. 4.2: Navigační režim Hranice pozemku



Obr. 4.3: Ostatní navigační režimy



Obr. 4.4: Nastavení zařízení TracNav

Příloha 5: Testování přesnosti navrženého zařízení



Obr. 5.1: Implementace zařízení v traktoru



Obr. 5.2: Vytvořená jízdní dráha mezi body A a B



Obr. 5.3: Tři paralelní jízdní dráhy s odstupem 6 m

Příloha 6: Předávání zařízení do dlouhodobého testování

Obr. 6.1: Zařízení TracNav, GPS anténa, napájecí kabel a záznamové desky



Obr. 6.2: Obsah záznamových desek

Příloha 7: Průběh dlouhodobého testování



Obr. 7.1: Využívání zařízení TracNav při zpracovávání půdy



Obr. 7.2: Zpracování půdy před setím



Obr. 7.3: Válení zasetých obilovin



Obr. 7.4: Využívání zařízení TracNav při válení

Příloha 8: Denní záznamy z dlouhodobého testování vedené obsluhou

Testování satelitní navigace pro zemědělské stroje

Datum	Čas [h]	Stroj	Druh práce	Pozemek	Režim navigování	Závady
26.3	5	MF 7620 87	příprava diskov	BRÁNOVICE	AB křivka AB přímka AB příčka	
27.3	8	-11-	-11-	PVUTKY ZA ŽALOUZÍ	AB příčka	
30.3	8	-11-	-11-	JATOŮS	AB příčka	
31.3	8	-11-	-11-	DLOUHÝ	AB křivka	
8.4.	12	-11-	-11-	POD SILNICÍ PASEKY & REMÍZ	AB přímka	
8-9.4	12	-11-	-11-	-11-	AB přímka	
9-10.4	12	-11-	-11-	HUŽKA VALENI	AB přímka	

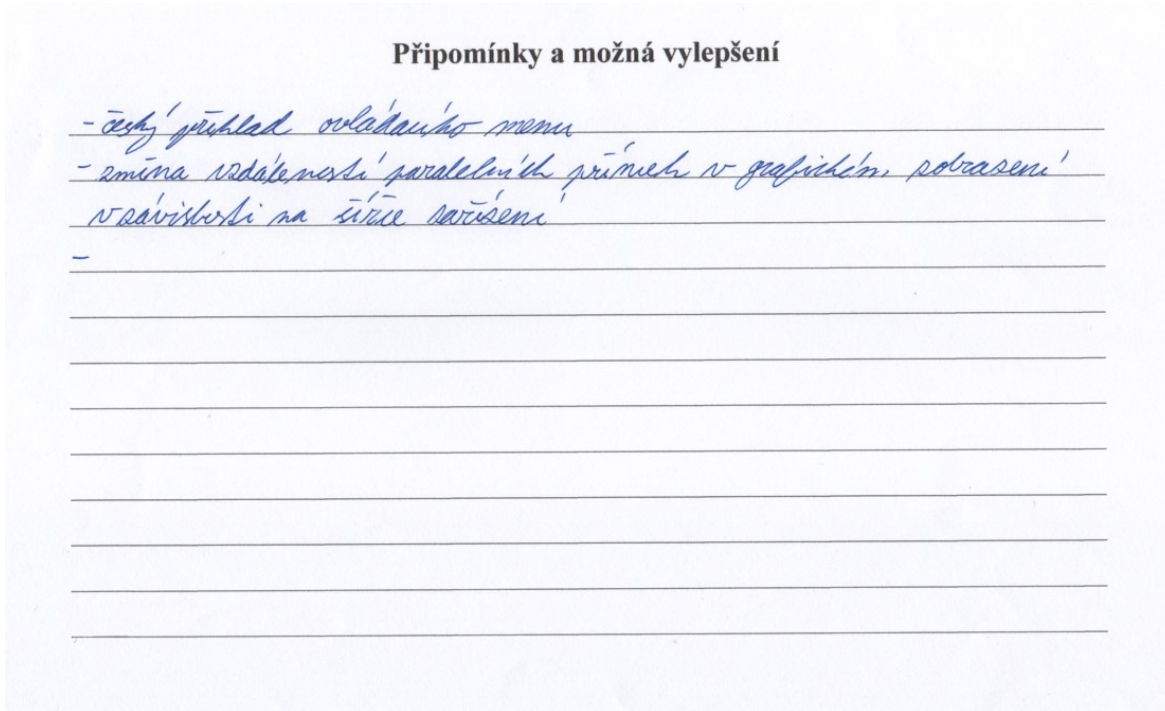
Obr. 8.1: První strana záznamového listu

Testování satelitní navigace pro zemědělské stroje

Datum	Čas [h]	Stroj	Druh práce	Pozemek	Režim navigování	Závady
12.4.	12	MF 7620	VALENI	POD HÁJOVNOU BECHYNSKÁ PASEKY REMÍZ	AB PŘÍMKA A+S MĚR AB KŘIVKA	ROZBITÁ ZÁSUVKA (AUTOZAPALOVACÍ) NAPAJENÍ
14.4.	12	MF 7620	příprava	ZA SLOUP U SLOUPU ZA KOTRBOU	A4 SMĚR	

Obr. 8.2: Druhá strana záznamového listu

Příloha 9: Připomínky obsluhy k současnemu stavu zařízení a další možná vylepšení



Obr. 9.1: Záznamový list obsahující připomínky a možná vylepšení