



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Elektrická motokára

Matyáš Kronus, Matyáš Rejthar

Střední průmyslová škola sdělovací techniky
Panská 3, Praha 1

ANOTACE

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí funkční elektrické motokáry. Hlavní zaměření při návrhu a konstrukci bylo na klíčové prvky, jako je rám, podvozek, pohonná jednotka, elektrické komponenty, řízení a zadní osa.

Klíčová slova: elektrická motokára, konstrukční návrh, bateriový pohon, řízení, podvozek

1 Stavba

Takto konstrukčně složitý projekt jsme si vybrali, protože jsme měli možnost ho uskutečnit ve firmě Kronus kovovýroba, kterou vlastní otec Matyáše Kronuse. Ta se zaměřuje především na výrobu z profilové oceli a plechů. Z tohoto důvodu jsme měli veškerý materiál zdarma, ale museli jsme se snažit využívat zbytky z ostatní výroby. Kdybychom tento materiál museli kupovat sami, tak by cena za něj byla přibližně 3000 Kč. Při výrobě dílů pro rám motokáry jsme používali pilu na profilovou ocel, CNC vysekávačku plechů, CNC ohraňovací lis na ohýbání plechů, pásovou brusku, úhlovou brusku a soustruh. V jiné kovovýrobě jsme si také museli nechat vypálit na CNC laserové řezačce plech na připevnění motoru a ozubené kolo, protože jsme ho potřebovali mít vyrobený z plechu tloušťky 5 mm, který je už příliš silný pro CNC vysekávačku. Připravené díly jsme přivařovali pomocí svářečky typu MIG nebo pomocí laserové svářečky. Pro povrchovou úpravu konstrukce jsme zvolili elektrostatické lakování práškovou barvou, která se následně vypéká v peci při teplotě 200 °C. Většinu výrobních procesů jsme se učili při výrobě, a mnoho dílů jsme také navrhovali až při výrobě, protože některé části je jednodušší nejdříve vyrobit a až poté nakreslit. Pro box na baterii a elektrolyt jsme použili 3D tisk z materiálu PETG abychom zajistili to, že tyto díly nebudou vodivé a nevznikne zkrat. Pro propájení kabelů k měděným kouskům plechu jsme si museli koupit klempířskou pájku s dostatečným tepelným výkonem, aby se cín prolil a pevně držel. Kromě rámu, na který jsme měli materiál zdarma, se nám podařilo sehnat i hydraulickou brzdou, kulové klouby pro řízení a přední kola z nepojízdné čtyřkolky. Tyto díly by nově stály i několik tisíc

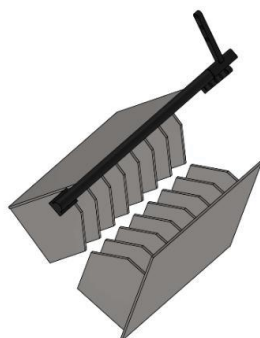
korun. Lithiový akumulátor s parametry toho našeho by stál 10 000 Kč, ale protože ten náš je vyrobený z článků z již použitých elektronických cigaret, tak byl zdarma. Motor nás stál 2000 Kč, klempířská pájka 700 Kč, cín 500 Kč, dvě 200 A relé 600 Kč, filament pro 3D tiskárnu 1000 Kč, ložiska 1500 Kč, Arduino Uno 300 Kč, zadní osa 300 Kč a díly vyrobené na laserové řezačce 500 Kč. Celkem nás tedy vyšla minimálně na 7600 Kč, ale kdybychom neměli některé drahé části zdarma, tak by vyšla na alespoň 23 000 Kč. Celkově nám výroba konstrukce zabrala 300 hodin, návrh konstrukce a výkresová dokumentace 60 hodin, příprava článků a výroba akumulátoru 80 hodin, programování a výroba nabíječky 10 hodin, návrh a realizace elektroinstalace 30 hodin. To je celkem 480 hodin strávených na tomto projektu.



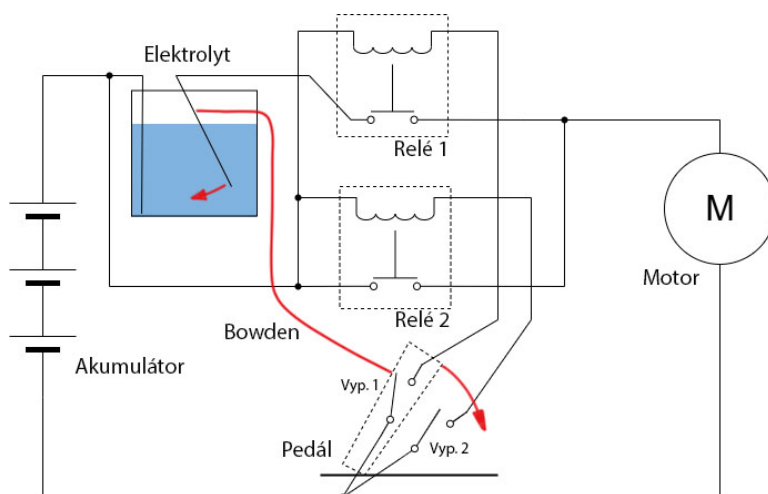
2 Části konstrukce

2.1 Pedál akcelerace

U pedálu akcelerace jsme si dali za úkol, aby fungoval podobně jako u auta s automatickou převodovkou, a nebylo potřeba řešit další spínače. Začali jsme konstrukcí části, ve které bude probíhat elektrolyza a kde se podle vzdálenosti dvou elektrod bude měnit elektrický odpor obvodu, a tím i výkon motoru. Nejdříve jsme si pomocí Ohmova zákona vypočítali, jaký minimální odpor bude muset tento proměnný elektrolytický rezistor mít, aby obvodem mohl při napětí 12 V protékat proud 300 A nutný pro chod motoru. Získali jsme postupným dosazením $R = 12/300 \, \Omega = 0,04 \, \Omega$. S využitím vztahu $R = l / \sigma S$, kde l je vzdálenost elektrod od sebe, S plocha elektrod ponořená v elektrolytu a σ vodivost elektrolytu, jsme vypočítali potřebnou plochu elektrod. Věděli jsme, že elektrody chceme mít ve vzdálenosti 0,01 m od sebe a že vodivost nasyceného roztoku NaCl, který jsme použili, je přibližně $16 \, \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$. Potřebná plocha je tedy $S = l / R\sigma = 0,01 / (0,04 \cdot 16) \, \text{m}^2 = 1 / 64 \, \text{m}^2 = 156 \, \text{cm}^2$. Proto jsme se rozhodli použít dvě elektrody s hřebenem (viz obr.) o rozměrech 15 cm a 20 cm, ale ponořené do roztoku



pouze do poloviny. Jedna z nich se otáčí kolem osy umístěné na vrchní hraně. Dále bylo potřeba zařídit, aby obvodem protékal proud pouze při sešlápnutí pedálu. K tomu slouží vypínač 1 (viz obr.), který při položení nohy na pedál sepne relé 1, a tím je nádoba s elektrolytem připojena ke zdroji napětí. Při sešlapování pedálu se pomocí lanka v bowdenovém mechanismu pohybuje elektroda směrem k druhé elektrodě. Při plném sešlápnutí pedálu se sepne vypínač 2, čímž se aktivuje relé 2, a proud začne procházet z baterie přímo do motoru. Tím je zajištěn plný výkon motoru a elektrody se neopotřebovávají. Opotřebením elektrod je problém, který vzniká při elektrolýze. Pokusem jsme zjistili, že při použití elektrolytu z roztoku NaCl a proudu 10 A ubude železná anoda za 10 minut o 1,7 g. To znamená, že při proudu 200 A, který teče obvodem u motokáry, by se spotřebovalo přibližně 34 g železa každých 10 minut. Správnost tohoto pokusu jsme si ověřili také pomocí Faradayova zákona elektrolýzy. Ten lze matematicky popsat ve tvaru $m = I \cdot t \cdot M / (z \cdot F)$, kde M je molární hmotnost, t čas, I elektrický proud, z počet elektronů potřebných k vyloučení jednoho iontu dané sloučeniny a F Faradayova konstanta. Po dosazení do vztahu dostaneme: $m = 55,8 \cdot 200 \cdot 600 / (2 \cdot 96485) \text{ g} = 34,7 \text{ g}$. To znamená, že přibližně po hodině provozu bude nutné anodu vyměnit. Proto jsme ji navrhli tak, aby se dala snadno přišroubovat a odšroubovat.

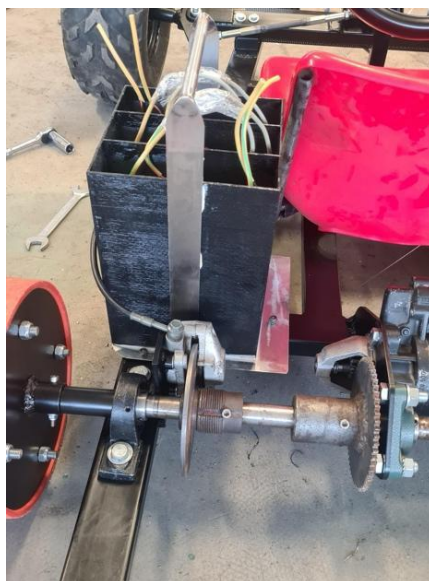


2.2 Zadní osa

Při konstrukci zadní osy jsme se zaměřovali převážně na nízkou cenu a co největší pevnost. Základ zadní osy jsme vyrobili tak, že jsme koupili 1200 mm dlouhou tyč na rotování s průměrem 25 mm, tu jsme následně zbrousili na brusce s nástavcem na rotační tyči, který osu rovnoměrně zbrousil po celé délce. Následně jsme vyvrtali celkově 4 díry. Na každém konci je jeden a prochází jím šroub a ten drží válec s koly na pevném místě a přenáší rotaci pohybu. Dalšími otvory, které jsou blíže středu, procházejí šrouby držící ozubené kolo a brzdový kotouč.

2.3 Brzda

Typicky se u motokár využívají hydraulické kotoučové brzdy, které fungují na principu sevření kotouče dvěma destičkami. V našem případě jsme použili hydraulickou brzdou ze čtyřkolky, která se skládala ze dvou částí. Brzdový pedál jsme připevnili do přední části rámu na část trubky o průměru 20 mm, jelikož v původním provedení byl upevněn na řídítka. Tento pedál se tedy sešlapuje chodidlem a velikost síly potřebné k zabrzdění kol je velmi malá. Brzdový pedál obsahuje nádržku na brzdovou kapalinu, která trubičkou protéká při stisknutí k zadní ose a tlakovou silou poté působí na brzdové destičky. Brzdový kotouč jsme vyrobili z litinové řemenice, kterou jsme vysoustružili a připevnili k ose šroubem.

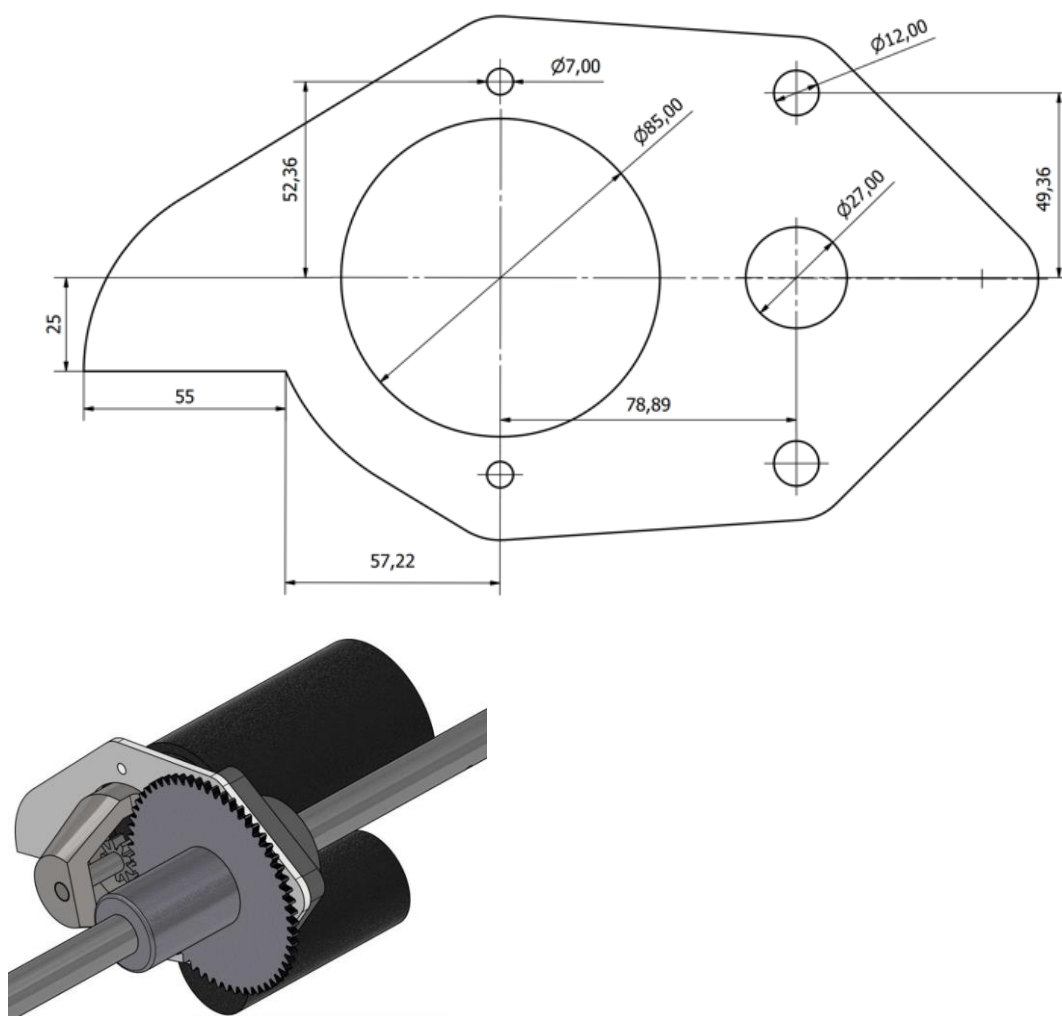


2.4 Motor

Při výběru motoru jsme museli zohlednit několik rozhodujících faktorů. Nejdůležitější bylo zajištění dostatečného výkonu, který by naši motokáru uváděl do pohybu. Protože jsme chtěli, aby mohla driftovat, musel motor disponovat i dostatečným výkonem pro protáčení zadních kol. Dále musel být schopen poskytovat vysoký moment síly při nízkých otáčkách v rozjezdu. Dalšími faktory byly hmotnost, bezpečnost pracovního napětí, složitost provozu a zapojení motoru. Posledním kritériem byla cena, neboť celá motokára byla už tak finančně náročná. Nakonec jsme se rozhodovali mezi asynchronním AC motorem s měničem napětí, kartáčovým DC motorem se sériovým vinutím, přesněji startérem z automobilu a bezkartáčovým DC motorem, který se prodává v sadě i s regulací otáček. Bezkartáčový motor byl nejlepší volbou, ale zároveň nejdražší, a navíc bychom při něm neřešili elektroniku sami, což jsme nechtěli. Asynchronní AC motor byl naopak příliš těžký a nebezpečný kvůli napájení 230 V střídavým napětím. Rozhodli jsme se tedy pro startér se sériovým vinutím, který má velký moment síly, ale normálně není nijak regulovatelný. Proto jsme si vzpomněli, jak nám děda Kronus vyprávěl o tom, jak se dříve rozjížděly kolotoče pomocí elektrolýzy. A tak jsme se rozhodli, že tento princip využijeme i u naší motokáry.

2.5 Uchycení motoru a převod

Motor jsme se ke konstrukci motokáry snažili přidělat co nejjednodušeji, toho jsme dosáhli díky dvěma závitům u pastorku. Navrhli jsme tedy plech, který jsme nechali vyřezat laserem z plechu tloušťky 5 mm. V plechu je větší otvor pro pastorek motoru, druhý otvor pro ozubené kolo a čtyři další úchytné body pro šrouby (viz obrázek). Závity na motoru jsou M7 a pro ložisko M12. Vzdálenost středů otvorů jsme odvodili od výpočtu ozubení. Spočítali jsme na pastorku 9 zubů a kolo má průměr 23 mm. Lze tedy určit modul $m = d / z = 23 / 9 = 2,55$. Vysokorychlostní kamerou jsme naměřili, že perioda jedné otáčky je přibližně 81 ms, z toho jsme vypočítali frekvenci otáčení $n_1 = 83,7 \text{ s}^{-1}$. Také jsme věděli, že velikost maximální rychlosti, které chceme dosáhnout je 35 km.h^{-1} tedy $9,7 \text{ m.s}^{-1}$. S průměrem zadních kol 250 mm to vychází na $n_2 = 12,35 \text{ s}^{-1}$. Ze vztahu mezi poměrem počtu otáček n_1 a n_2 dvou kol, která mají postupně z_1 a z_2 zubů, a poměrem počtu těchto zubů ve tvaru $n_1 / n_2 = z_2 / z_1$ můžeme vyjádřit počet zubů ozubeného kola $z_2 = n_1 \cdot z_1 / n_2$. Po dosazení dostaneme $z_2 = 83,7 \cdot 9 / 12,35 = 61$ zubů. Z tohoto jsme spočítali $d_2 = z_2 \cdot m = 61 \cdot 2,55 \text{ mm} = 155,9 \text{ mm}$. Po sečtení poloměrů kol a odečtení výšky zubů nám tedy vyšlo, že vzdálenost osy pastorku a zadní osy je 78,9 mm. Ozubené kolo jsme navrhli podle vypočítaných hodnot v Inventoru a pak jsme do něj nechali vyřezat laserem z 5 mm tlustého plechu. Ložisko jsme z důvodu nedostatku místa museli odstranit jeden roh, který jsme uřízli na pile pod úhlem 45° . Plech je upevněn ložiskem na osu a opírá se o zadní část rámu, kde je také přivařen.



2.6 Zadní kola

Při tvorbě zadních kol jsme původně zvažovali využít gumová kola z motokáry, která by se ale musela koupit. Nakonec jsme se rozhodli pro kola z PVC roury o průměru 250 mm, která umožňují kontrolovaný prokluz (drift), protože gumová kola by kladla motoru příliš velký odpor. Díky tomu, že PVC kola driftní, se můžeme dokonce i otočit téměř na místě a není potřeba diferenciál. Kola jsme sestavili sevřením roury dlouhé 180 mm mezi dva plechy ve tvaru kruhu, v nichž jsou 4 díry a skrz ně strčené závitové tyče, které jsou utaženy maticemi.

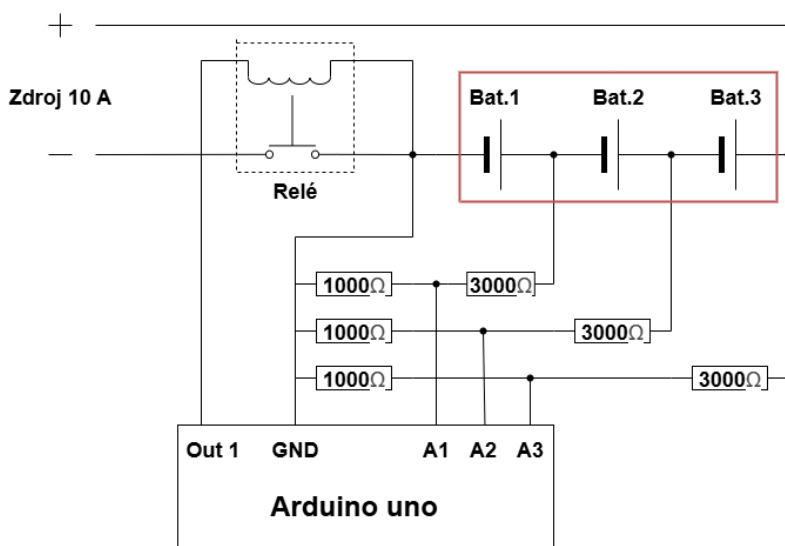
2.7 Akumulátor

Akumulátor je obvykle nejdražší a zároveň nejtěžší část elektromobilů i elektrických motokár, proto byl výběr vhodného typu akumulátoru velmi důležitý. Nejlevnější typ, který je schopen poskytovat proudy i nad 300 A, který se běžně používá k pohonu startérů, je olověný akumulátor. Ten má ale malý poměr kapacity k hmotnosti a to přibližně $40 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, takže by motokára musela mít hmotnost i o několik desítek kilogramů větší. Lithium-iontové baterie mají vysoký poměr kapacity k hmotnosti přibližně $250 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, což znamená přibližně šestnásobek kapacity při stejné hmotnosti. Problém Li-ion akumulátorů je cena. Vzhledem k tomu, že potřebujeme baterii s vysokou kapacitou a musí být konstruovaná na proud o velikosti alespoň 300 A, byla by cena přes 10 000 Kč. Naštěstí jsme věděli, že v jednorázových elektronických cigaretách jsou Li-ion akumulátory a že je možné je dobíjet. Tyto cigarety se po jednom použití vyhazují. Proto jsme se už tehdy rozhodli je sbírat od všech kamarádů s myšlenkou, že z toho jednou vyrobíme něco zajímavého, třeba motokáru. Před zadáním této práce jsme jich měli již 400 a rozhodli jsme se, že když se nám podaří vybrané téma práce obhájit, tak je použijeme. Vypočítali jsme si, že jich bude potřeba alespoň 600, protože jeden článek má v průměru $1,8 \text{ W} \cdot \text{h}$. Protože startér, který jsme našli, potřebuje 12 V a každý článek má 4,2 V, rozhodli jsme se je spojit paralelně do bloků po 200 kusech a tři takové bloky zapojit sériově. Když jsme testovali, jak velký proud dokáže jeden článek poskytovat, zjistili jsme, že zvládá až 10 A. Při paralelním spojení 200 takových to článků pak dostaneme možný proud 2000 A, což je víc než dostačující pro startér. Takto pospojovaný akumulátor byl po konstrukci časově nejnáročnější částí práce, protože jen samotné pájení nám trvalo 40 hodin a rozebírání těch cigaret zabralo podobně dlouhou dobu. Navíc jsme museli změřit napětí každého článku jednotlivě a vyřadit ty, které už byly zničené, tedy měly napětí menší než 2 V. Články, které byly v pořádku, jsme nejprve museli nabít a až poté je spájet dohromady, abychom se vyvarovali spojení dvou článků s rozdílným napětím, například 2 V a 4,2 V, což by je mohlo poškodit. Nabité články jsme naskládali do formy, pak je spájeli tenkým drátem a následně dvěma vodiči, které dohromady vydrží průchod elektrického proudu 300 A



2.8 Nabíječka

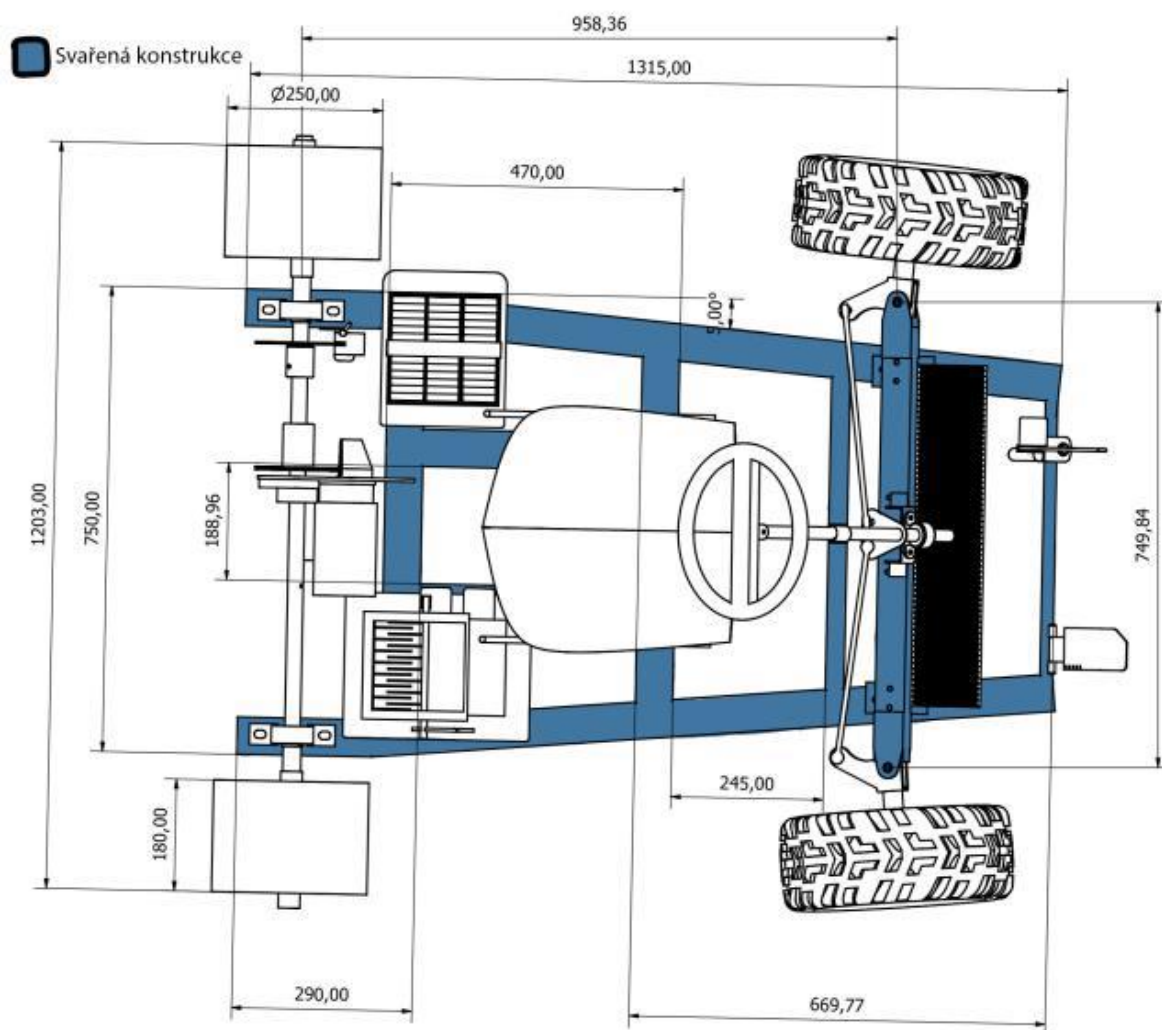
Běžně používané Li-ion akumulátory, které obsahují více sériově zapojených článků, používají BMS (Battery Management System). Ten hlídá, zda nějaký z článků není příliš nabitý. V tom případě systém pozastaví nabíjení. Při vybíjení pak zajistí, aby se nějaký článek z akumulátoru nevybil pod spodní hranici. Naše baterie ale pracuje s tak velkými proudy a kapacitou, že jsme žádný vhodný BMS ani nabíječku na internetu nenašli. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli, že vyrobíme vlastní nabíječku, která bude hlídat, zda se některý z našich tří bloků nepřebije. To znamená, že žádný blok nesmí mít napětí vyšší než 4,2 V, jinak by byl poničen. Proto jsme použili Arduino Uno, ke kterému jsme přes dělič napětí s odpory v poměru 1:4 připojili jednotlivé bloky baterie, aby se snížilo napětí na bezpečnou úroveň pro mikrokontrolér (viz obrázek). Kontrola napětí probíhá každých 15 s a Arduino po 20 ms provede tři měření, která zprůměruje a porovná s hodnotou 4,2 V. Pokud jsou všechny tři bloky v pořádku, program běží dál. Pokud napětí některého bloku překročí 4,2 V, Arduino rozpojí relé, přes které je baterie nabíjena proudovým zdrojem 10 A.



2.9 Rám podvozku

Rámová konstrukce nebo také karoserie je pomyslný nosný prvek, který má za úkol pevně spojovat, nést a chránit ostatní komponenty vozidla. Je vystavena různým vnějším vlivům, zatížení samotné váhy ostatních komponentů motokáry, síly působící během zrychlování a zatáčení, přejíždění různých nerovností, nebo funguje i jako ochrana proti nárazu. Při návrhu jsme se inspirovali tvarem a velikostí závodních motokár značky MS Kart, které jsou certifikované Mezinárodní automobilovou federací (FIA) a používají se tedy v profesionálních závodech i amatérských půjčovnách. Bylo potřeba upravit a zjednodušit tvar konstrukce, jelikož se tím výroba výrazně zjednodušila. Zvolili jsme půdorys ve tvaru rovnoramenného lichoběžníku, aby měla přední kola dostatek prostoru při zatáčení. Přední příčka mezi koly je pozdvižená kvůli výšce uchycení zadní osy a rozdílu velikosti předních a zadních kol, také je nastavená pod úhlem, abychom zajistili závek rejdového čepu. Po zhodnocení velikostí závodních motokár a velikostí našich komponentů, které se na motokáru musejí vejít, jsme vyhodnotili, že ideální rozvor kol pro naši motokáru bude 960 mm, abychom zajistili dobrou stabilitu, ale zároveň nízkou hmotnost konstrukce a dobrou ovladatelnost vozidla. Kvůli potřebnému přesahu na pedály a místa na další komponenty jsme určili celkovou délku na 1300 mm. Umístili jsme dále 2 příčky vyztužené jekly, na které přišly části jako baterie, plech

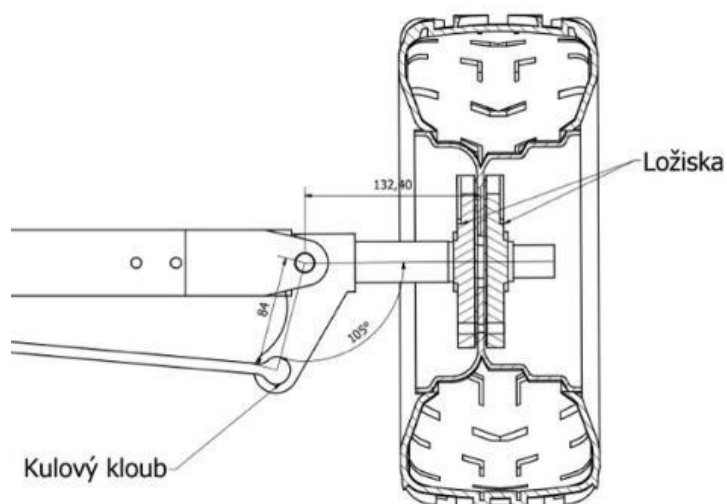
na motor, sedačka a pedál (viz obr.). Na menším jeklu více vpředu se nachází stojan pod volant a úplně vpředu je nejmenší jekl, na kterém jsou upevněny pedály brzdy a akumulátoru.



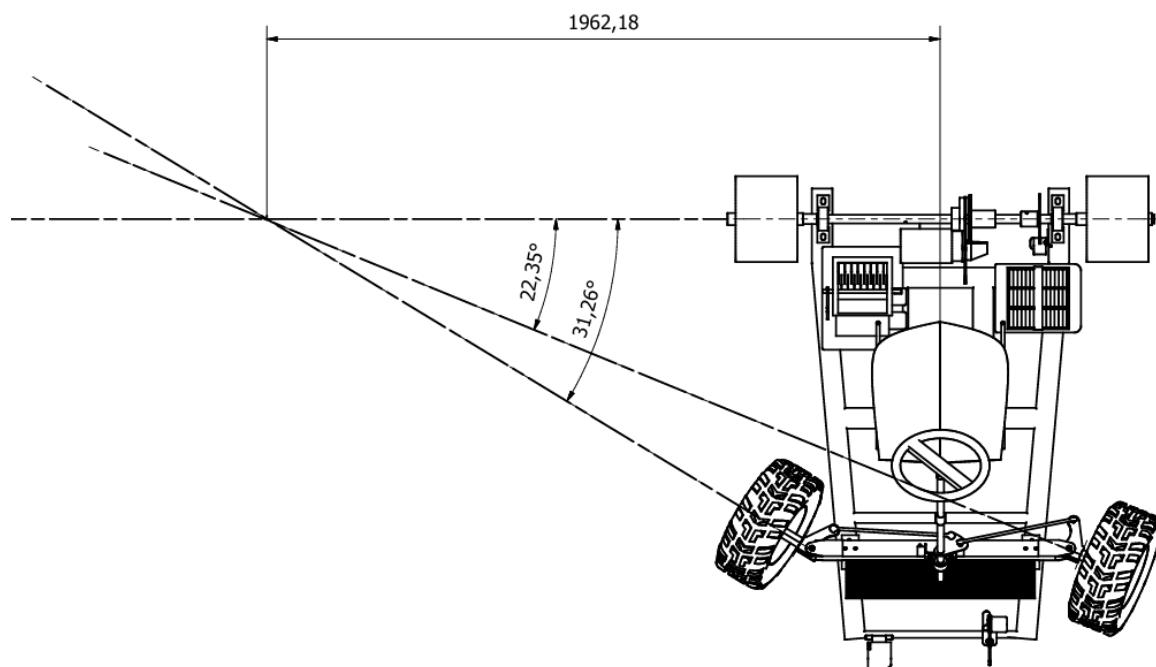
2.10 Zatáčení a přední kola

Při návrhu zatáčení kol jsme dbali jak na dobrou ovladatelnost a stabilitu, tak i na pevnost a životnost komponentů. Zatáčení jsme konstrukčně vyřešili upevněním podstavy ramena na rám podvozku čepem, který je podložen vysoustruženým válečkem a utažen zvenčí šroubem. Díky vypodložení kloubu jsme zajistili hladké zatáčení bez tření a zároveň téměř nulovou vůli. Celé řídicí rameno je vyrobeno ze 4 svařených součástí. Hlavní je 3 mm široký plech, který byl nejdříve navrhnutý v programu Autodesk Inventor a poté exportován do formátu .dxf. Ten jsme otevřeli na vysekávačce a nechali ho vyrobit. Tento plech má otvory o průměru 6 mm na uchycení tyčí řízení, které mají od čepu otáčení vzdálenost 84 mm a svírají s osičkou úhel 105° . Tento úhel byl vybrán specificky proto, aby se dodržela podmínka Ackermanova principu řízení. Poté byl plech ohnut na CNC ohraňovacím lisu a k němu jsme navrhli výztuhu, která kopírovala tvar vodorovné strany součásti. Tyto díly jsme k sobě přivařili, aby se vytvořila pevnější komponenta. Následně jsme na svislou plochu přivařili osičku o průměru 25 mm, která je dlouhá 120 mm a na níž jsou nasazeny válečky, držící kolo pevnou vzdálenost 130 mm od čepu. Dále jsou na osičce upevněny dvě proti sobě směřující ložiska, která jsou uchycená

zároveň i na kolo. Abychom zajistili rovné upevnění a zamezili vyklání, nechali jsme vysekat na každou stranu dva identické plechové kruhy, která jsme přivařili k disku kol a skrz ně dali šrouby, které korespondují s otvory na ložiskách. Jako přední kola jsme použili pneumatiky a disky ze staré čtyřkolky z důvodu, že nová kola na motokáru jsou moc drahá a tato kola jsme měli zadarmo. Tato kola sice mají průměr 370 mm, což je o 120 mm větší než zadní, na jízdní vlastnosti to ale nemá vliv a vyplatí se nám to tedy.



Celým ramenem otáčí řídicí tyč, která je spojena s plechem na ose volantu. Při maximálním zatočení je úhel vnějších kol přibližně $22,5^\circ$ a úhel vnitřních kol 31° , z čehož vychází, že minimální poloměr zatáčky, kterou lze projet bez smýkání je přibližně 2 metry.



3 Závěr

Projekt elektrické motokáry byl náročný jak po časové, tak i finanční stránce, ale při jeho realizaci jsme získali cenné praktické zkušenosti v oblasti konstrukce, mechaniky a elektroinstalací. Naším cílem bylo vytvořit funkční motokáru, která bude schopná driftovat, jezdit na recyklované baterie z jednorázových elektronických cigaret, dosáhne velikosti rychlosti alespoň $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a uveze dospělého člověka. Motokára zvládá driftovat na jakémkoli povrchu, protože jsme jako zadní kola použili velkou PVC trubku a zároveň disponuje dostatečným výkonem. Baterie složená z Li-ion článků z elektronických cigaret funguje přesně podle očekávání a má dostatečnou kapacitu na ujetí několika kilometrů. Maximální velikosti rychlosti, které jsme dosáhli na rovném povrchu při měření, byla $32 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a této hodnoty motokára dosáhne během několika sekund i s člověkem o hmotnosti 70 kg. Používáním starých nebo alternativních dílů se nám podařilo snížit cenu z přibližně 23 000 Kč na přibližně 7600 Kč. Zkonstruovali jsme i mechanicky složité části, například elektrolytický odpor, který funguje bez problémů, nebo mechanismus zatáčení, který je ovladatelný i stabilní, ale vyžaduje velkou sílu pro zatočení. To je způsobeno nepřiměřeně velkým úhlem mezi osou zatáčení kola a vozovkou vzhledem k velikosti použitých kol. Motor, který jsme si pro naši motokáru zvolili, funguje dobře, ale jen po dobu několika minut jízdy. Po delším čase se začne přehřívat, protože není uzpůsoben na delší provoz, proto jsme ani neměřili dojezd naší motokáry. Kdybychom měli ještě něco předělávat, tak bychom změnili úhel mezi osou zatáčení kola a vozovkou odřezáním dílů přivařených k rámu a jejich nahrazením díly s menším úhlem. Zkusili bychom také navrhnout vodní nebo vzduchové chlazení motoru, aby se nepřehříval. Pro zvýšení akcelerace a lepší ovladatelnost na dráze bychom rovněž vyměnili kola za typ používaný u profesionálních motokár. Projekt elektrické motokáry byl náročný, ale přinesl nám spoustu nových zkušeností a dovedností. Celkově jsme velmi spokojeni s tím, co se nám podařilo vytvořit, a těšíme se nejen na další jízdy, ale i na možné budoucí úpravy a vylepšení.

