

# KONSTRUKCE KABELOVÉHO SVAZKU ZÁVODNÍHO VOZIDLA

Jakub Kochrda

Sekce – STROJÍRENSTVÍ

Fakulta strojní, 3. ročník

Bakalářský studijní program – STROJÍRENSTVÍ

**Anotace:** Práce se zabývá komplexním konstrukčním návrhem a výrobou kabelového svazku pro závodní monopost se čtyřválcovým spalovacím motorem Suzuki GSX-R 600, určeným pro mezinárodní studentskou soutěž Formula Student. Cílem práce je navrhnout spolehlivou, lehkou a modulární elektroinstalaci, která plně vyhovuje bezpečnostním pravidlům soutěže a zároveň řeší technické nedostatky předchozích generací vozů. Návrh zahrnuje tvorbu koncepčních 2D blokových schémat, výpočty průřezů vodičů pro minimalizaci úbytků napětí, detailní 3D trasování svazku ve virtuálním prostředí Autodesk Inventor a tvorbu 2D výrobního výkresu pro následnou výrobu svazku. Závěrečná část práce je věnována fyzické výrobě hlavního svazku, při které byly aplikovány profesionální postupy z oblasti motorsportu, včetně techniky koncentrického motání.

**Klíčová slova:** kabelový svazek, Formula Student, autoelektronika, koncentrické splétání, 3D modelace

## 1 Úvod

Tento příspěvek přímo vychází z poznatků a praktické realizace popsané v bakalářské práci autora. Mezinárodní inženýrská soutěž Formula Student představuje pro studenty technických univerzit po celém světě jedinečnou platformu, kde mohou využít své teoretické znalosti do reálného vývoje závodního monopostu. Každý takový vůz je vysoce komplexní, jehož spolehlivost závisí na souhře mechanických a elektronických systémů. Zatímco mechanické části dodávají vozu sílu a ovladatelnost, elektronický systém plní funkci jeho nervové soustavy. Zajišťuje sběr kritických dat ze senzorů, řízení chodu motoru a v neposlední řadě bezpečnost samotného jezdce. Fyzickým nosičem a páteří této nervové soustavy je kabelový svazek [1].

V prostředí profesionálního motorsportu patří návrh a výroba kabelových svazků k nejnáročnějším částem vozu. Kabeláž musí odolávat extrémním teplotám v motorovém prostoru, působení agresivních provozních kapalin a neustálým vibracím, to vše při zachování co nejnižší celkové hmotnosti. Cílem této práce je proto vytvořit zcela nový, komplexní a podložený konstrukční návrh kabelového svazku pro aktuální monopost týmu FS TUL Racing se spalovacím motorem Suzuki GSX-R 600, a následně realizovat jeho výrobu [1].

## 2 Požadavky pravidel

Elektronický systém vozu se spalovacím motorem (CV) spadá v rámci pravidel FSG do kategorie nízkonapěťových systémů [2]. Velký důraz je kladen na bezpečnostní okruh (Shutdown Circuit - SDC). Jedná se o propojený řetězec bezpečnostních spínačů (LVMS, BOTS, tři nouzová tlačítka, Crash senzor a BSPD), jehož rozpojení musí okamžitě odpojit napájení palivového čerpadla, zapalovacích cívek a vstřikovačů.

### 3 Technické specifikace

Výběr vhodných komponentů je kritickým krokem, který přímo ovlivňuje spolehlivost, hmotnost a životnost celého elektrického systému. Zatímco řídicí jednotky tvoří „mozek“ vozu, komponenty svazku plní roli nervové soustavy, které zajišťují distribuci energie a tok informací. Pro systematický přístup ke konstrukčnímu návrhu se celá elektrická architektura vozu rozděluje na aktivní a pasivní prvky [1].

#### 3.1 Pasivní prvky

V rámci návrhu kabelového svazku tvoří pasivní prvky jeho základní fyzickou strukturu. Označujeme jimi ty komponenty, které slouží k přenosu, propojení nebo organizaci elektrických signálů a energie, aniž by samy o sobě vyžadovaly vlastní napájení nebo aktivně měnily charakter procházejícího signálu. Jejich hlavním úkolem je zajistit přenos mezi akčními členy a to i v extrémních podmínkách. Kvalita těchto prvků přímo ovlivňuje klíčové vlastnosti svazku, jako je jeho celková hmotnost, ohebnost a odolnost proti elektromagnetickému rušení.

Jako médium pro přenos signálů a elektrické energie byly jako primární vodiče zvoleny tenkostěnné automobilové vodiče (využívající se standardně v automotive) FLRY s teplotní odolností od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , které představují nákladově optimální alternativu k drahým mil-spec vodičům (SPEC 44/55), přičemž plně vyhovují proudovým a termomechanickým požadavkům monopostu [1].

Spínáním výkonových komponent, jako jsou vstřikovače a zapalovací cívky vzniká elektromagnetické rušení (EMI). Sensory jako je senzor polohy klikového (CKP) a vačkového hřídele (CAM), jsou velmi citlivé právě na toto rušení. Z tohoto důvodu se používají stíněné vodiče, které tento negativní vliv eliminují pomocí kovového opletu kolem jádra vodičů, který funguje jako bariéra proti EMI. Pro zajištění správné funkce stínění musí být indukované rušení svedeno do kostry vozidla. Toto spojení se provádí pouze na jednom konci vodiče, čímž se účinně předchází vzniku zemních smyček, které by mohly do systému vnést další nežádoucí šum [1].

Klíčovým komunikačním prvkem moderních vozů je sběrnice CAN (Controller Area Network). Umožňuje sdílení dat napříč celým vozidlem bez nutnosti propojovat každý senzor samostatným vodičem s každou jednotkou. Fyzickou vrstvu tvoří kroucená dvoulinka (CAN High a CAN Low), po které se šíří diferenciální signál. Kroucení vodičů zajišťuje, že se případné vnější rušení indukuje do obou žil shodně a diferenciální přijímač v řídicí jednotce jej odečte a eliminuje. Pro zamezení odrazů signálu na koncích sítě musí být sběrnice zakončena rezistory o hodnotě  $120\ \Omega$ .

Spojování kabeláže s periferiemi je realizováno pomocí voděodolných konektorů řady Deutsch. Do těchto těles jsou využívány kontakty typu Stamped & Formed. Výhodou těchto kontaktů oproti plným (Solid) pinům je přítomnost druhé sady krimpovacích praporků, které se zalisují přímo přes izolaci vodiče. Toto řešení zásadně zvyšuje mechanickou odolnost spoje proti vytržení a ohybu.

Pro zajištění vnější ochrany svazku před mechanickým oděrem, sálavým teplem a agresivními kapalinami (palivo, olej) jsou aplikovány teplem smrštitelné bužírky, konkrétně například dvoustěnné bužírky ATUM. Jejich specifikem je vnitřní vrstva termoplastického lepidla. Po aplikaci horkovzdušnou pistolí se bužírka smrští, lepidlo roztaje a hermeticky vyplní veškeré dutiny mezi vodiči. Výsledkem je spoj splňující nejvyšší standardy krytí IP67.

## 3.2 Aktivní prvky

Zatímco pasivní komponenty kabelového svazku tvoří pouze fyzickou infrastrukturu pro přenos signálů a energie, jako aktivní prvky označujeme samotná elektronická zařízení připojená do této sítě. Do této kategorie řadíme například řídicí jednotky, měřicí senzory, zobrazovací displeje nebo výkonové akční členy, jako jsou zapalovací cívky. Tyto komponenty spojuje fakt, že vyžadují vlastní napájení a s elektrickým signálem aktivně pracují [1].

V moderním motorsportu plní řídicí jednotky roli výpočetního „mozku“ celého systému. V prostředí Formule Student se jedná především o řídicí jednotku motoru (ECU), jednotku pro distribuci napájení (PMU) a multifunkční displej (ADU). Hlavní funkcí ECU je řízení spalovacího motoru. PMU naproti tomu zcela nahrazuje zastaralé reléové a pojistkové skříně sadou inteligentních polovodičových spínačů, kdy slouží jako hlavní distribuční jednotka energie do celého vozidla. Tuto síť doplňuje pokročilá zobrazovací jednotka ADU (Advanced Display Unit), která funguje jako komunikační rozhraní a přehledně zobrazuje řídicí vozidla veškeré informace o stavu vozu [1].

Senzory představují rozhraní pro sběr informací z fyzikálního a chemického prostředí. Jejich úkolem je převádět neelektrické fyzikální veličiny (jako jsou teplota, tlak, úhlová rychlost či poloha) na měřitelné elektrické signály. Nedílnou součástí aktivních prvků jsou akční členy nacházející se na samotném konci kabelového svazku. Na základě příkazů z ECU nebo PMU vykonávají mechanickou práci nebo jiný fyzikální děj. Zahrnují kritické komponenty řízení motoru (např. palivové vstřikovače, zapalovací cívky) a systémy chlazení a dodávky kapalin (palivov čerpadla nebo ventilátory chladiče). Z hlediska návrhu elektroinstalace se jedná o nejnáročnější prvky, vyžadují precizní dimenzování průřezu napájecích vodičů pro bezpečné zvládnutí vysokých a často trvalých proudových odběrů [1].

## 4 Techniky v motorsportu

Běžné postupy z komerčního automobilového průmyslu jsou pro závodní nasazení nedostačující z důvodu vysoké hmotnosti a nízké mechanické odolnosti. Při výrobě byly proto aplikovány specializované postupy ze světa vrcholového motorsportu.

1. **Koncentrické splétání:** Místo běžného rovnoběžného vedení vodičů, které při ohybu vytváří extrémní pnutí na vnějším poloměru a hrozí vytržením kontaktů, se využívá koncentrické vrstvení. Vodiče jsou systematicky stáčeny kolem středového jádra do soustředných vrstev. U každé vrstvy se pravidelně střídá směr zkrutu a adekvátně se prodlužuje jeho stoupání [3].
2. **Servisní smyčky:** Zajišťují odlehčení tahu u vstupu do konektoru. Na každém vodiči je těsně za konektorem vytvořena 360° smyčka, která se následně zapouzdří pod smršťovací bužírku. Tento prvek zcela eliminuje přenos tahových sil z kabeláže přímo na krimpovaný spoj. Smyčky zároveň představují nezbytnou délkovou rezervu, pokud v budoucnu dojde k poškození pinu, lze jej ustříhnout a nakrímповat nový bez nutnosti úpravy zkracování celého svazku [1].
3. **Krimповání místo pájení:** V motorsportu se k spojení vodiče s kontaktem a nebo větvení vodičů striktně nevyužívá pájení. Vzlínající pájka vytvoří uvnitř jemně slaněného vodiče lokální tvrdý bod, který v prostředí vysokých a neustálých vibrací funguje jako vrub a rychle vede k únavovému lomu vodiče. Místo toho se využívá přesné krimповání, které za studena zdeformuje kontakt i měděné prameny do jediného plynotěsného celku disponujícího extrémní mechanickou odolností [1].

## 5 Postup návrhu kabelového svazku

Koncepce celého systému vychází ze dvou hlavních typů požadavků, které bylo nutné při návrhu sloučit. Prvním z nich jsou oficiální technická pravidla soutěže Formula Student, která definují povinné bezpečnostní prvky vozidla [2]. Druhou skupinu tvoří interní požadavky jednotlivých sekcí týmu. Ty specifikují, jaké komponenty a senzory musí být na voze osazeny, a to od prvků nezbytných pro samotnou funkčnost monopostu až po snímače určené pro sběr telemetrických dat [1].

### 5.1 Pravidla soutěže

Z hlediska celkové elektroinstalace je nejdůležitější sekcí pravidel definice bezpečnostního okruhu (SDC). Jedná se o hardwarově propojený řetězec spínačů a bezpečnostních prvků, jehož primárním úkolem je ovládání dvou hlavních relé (jedno pro palivové čerpadlo, druhé pro zapalovací cívky a vstřikovače). Rozpojení tohoto okruhu v jakémkoliv bodě musí okamžitě odpojit napájení těchto kritických komponent motoru. Do okruhu SDC musí být dle pravidel FSG povinně zařazeny následující prvky [2]:

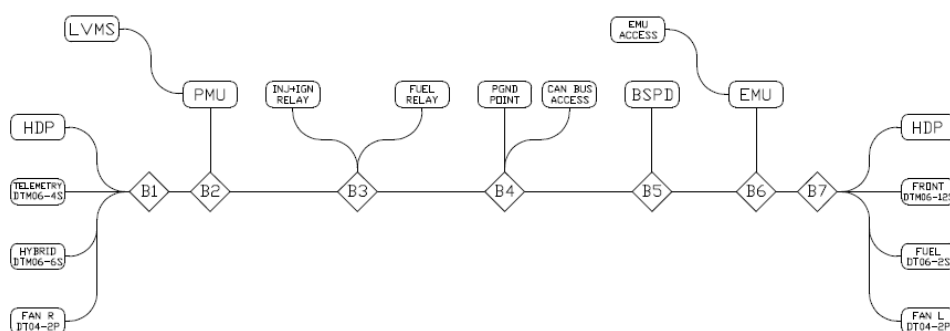
1. **Low Voltage Master Switch (LVMS)** je hlavní mechanický otočný vypínač umístěný na pravé straně vozidla v úrovni ramen jezdce, který kompletně odpojuje baterii a alternátor od zbytku LVS. Musí být vybaven červenou odnímatelnou klíčkou.
2. **Shutdown Buttons (Nouzová tlačítka)**, trojice mechanických tlačítek typu push-pull nebo push-rotate. Dvě z nich (o minimálním průměru 40 mm) se nacházejí zvenčí vozu za hlavou jezdce, třetí (minimálně 24 mm) je v dosahu jezdce přímo v kokpitu.
3. **Brake Over-Travel Switch (BOTS)** je spínač, který nenávratně rozpojí SDC okruh při kritické ztrátě tlaku v brzdovém systému a následném nadměrném propadnutí brzdového pedálu.
4. **Inertial Switch (Crash sensor)** je čistě mechanický senzor (nesmí obsahovat polovodičové součástky), který trvale rozpojí okruh při nárazu, jenž vyvolá podélné zpomalení v rozmezí 8 g až 30 g.
5. **Brake System Plausibility Device (BSPD)**, zcela nezávislý a neprogramovatelný obvod. Jeho funkcí je odpojit SDC v případě implauzibility, kdy je po dobu delší než 500 ms současně detekováno tvrdé brzdění a otevření škrticí klapky na více než 25 % volnoběžné polohy.

### 5.2 Výběr komponentů

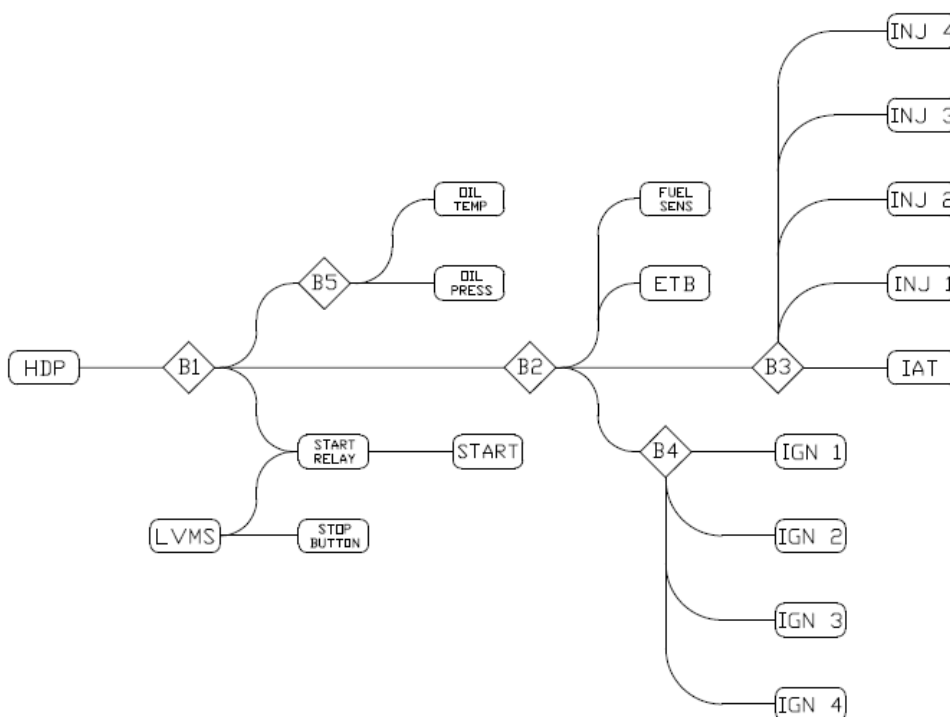
Před samotným návrhem topologie kabelového svazku bylo nutné analyzovat veškeré požadavky od jednotlivých konstrukčních sekcí týmu. Tyto požadavky byly zpracovány z pravidelných schůzí. Pro zachování přehlednosti byly tyto požadavky rozděleny do dvou hlavních kategorií, systémy nezbytné pro funkčnost monopostu a systémy pro sběr dat. Integrace velkého množství senzorů (teploty, tlaky, GPS, akcelerometry) si vyžadovala velmi detailní přípravu pinoutů pro vstupní a výstupní body konektorů a samotný pinout jednotek PMU, ECU a ADU.

### 5.3 Blokové schéma zapojení

Z důvodu zachování modularity, zjednodušení výroby a pro zajištění rychlé servisovatelnosti na závodech nebyl svazek navržen jako jeden celek. Kabeláž byla logicky rozdělena do několika na sebe navazujících větví (Main harness, Engine right/left harness, Mid a Front harness), které jsou mezi sebou propojeny konektory řady DT a DTM. Kritickým uzlem navržené topologie je přechod kabeláže mezi kokpitem a motorovým prostorem. Dle pravidel FSG musí být tyto dvě zóny odděleny protipožární přepážkou (tzv. firewalllem) [2]. Pro propojení hlavní větve a motorových svazků skrze tuto bariéru byly zvoleny speciální kruhové konektory řady DEUTSCH HDP. Tyto konektory díky svému těsnění zajišťují dokonalou izolaci proti vniknutí kapalin a plynů z motorového prostoru do kokpitu [1].



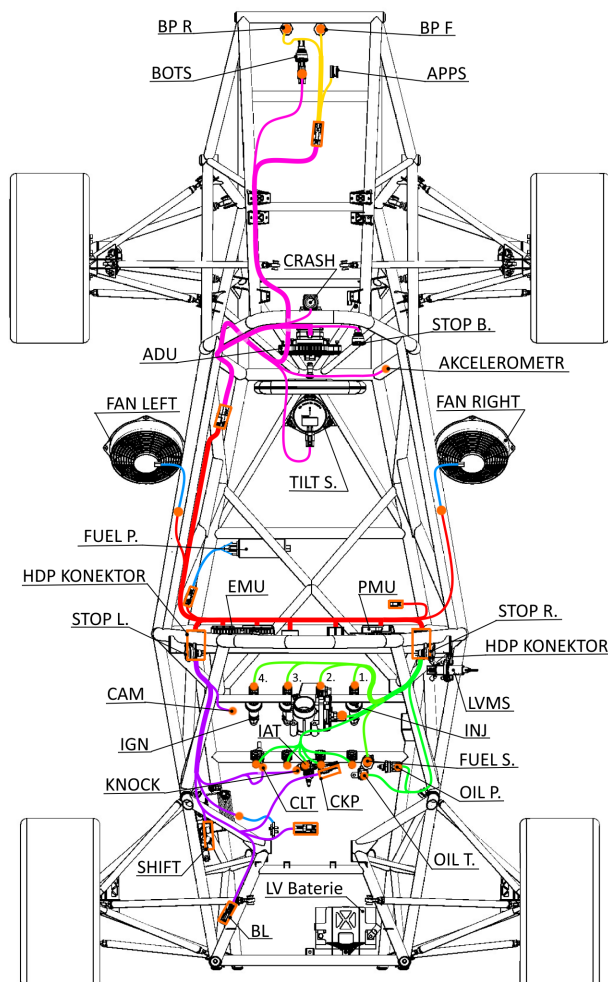
Obrázek 1: Blokové schéma hlavního svazku



Obrázek 2: Blokové schéma zapojení pravé motorové větve

## 5.4 Trasování kabelového svazku

Blokové schéma bylo následně převedeno do 2D náčrtu trasování. Kabeláž je primárně vedena po trubkách rámu, což svazku zajišťuje přirozenou mechanickou oporu, usnadňuje fixaci a udržuje jej v bezpečné vzdálenosti od pohyblivých částí vozu.



Obrázek 3: Rozdělení tras kabelového svazku

## 5.5 Výpočet teoretického průřezu vodiče

Proces dimenzování byl zaměřen na zamezení kritickým poklesům napětí, které sužovaly minulé generace vozidel. Zpětnou analýzou se prokázalo, že starší monoposty využívaly k napájení zapalovacích cívek slabé vodiče o průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$ . Tento nedostatek znemožnil cívkám nanaakumulovat dostatek energie, což vedlo ke vzniku slabé jiskry a nedohořívání paliva ve válcích. Výpočet minimálního teoretického průřezu byl realizován pomocí Ohmova zákona s požadavkem maximálního úbytku  $\Delta U$  do 3 % [1]:

$$S = \frac{\rho \cdot l \cdot I}{\Delta U} \quad (1)$$

kde  $\rho$  zastupuje měrný elektrický odpor mědi,  $l$  trasovanou délkou z CADu a  $I$  proudové zatížení. Výpočet jasně stanovil potřebu minimálního průřezu  $1,5 \text{ mm}^2$ . K eliminaci nutnosti vedení extrémně silného vodiče a k usnadnění krimpování bylo napájení rozděleno do dvou oddělených větví dle pořadí zapalování (1-4 a 2-3).

## 5.6 Stanovení proudové zatížitelnosti

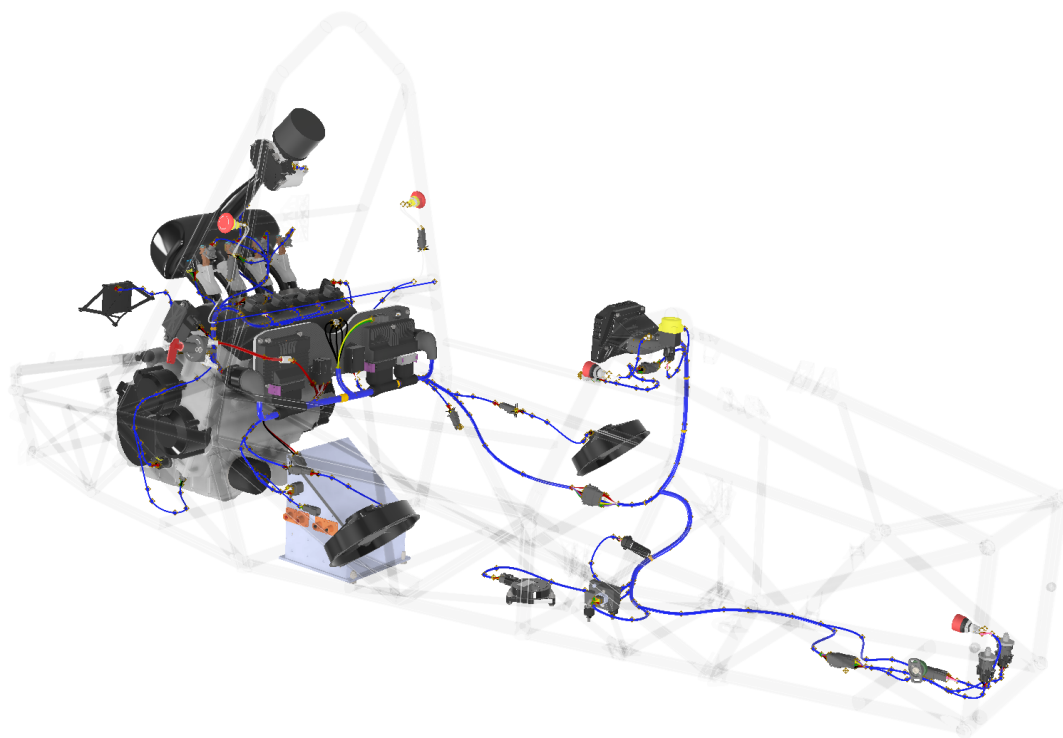
Určený průřez vodiče pokrývá pouze napěťové ztráty, avšak musí být ověřen i z hlediska vyzařování ztrátového Jouleova tepla, aby nedošlo k tepelné degradaci izolace FLRY (105 °C) [1]. Výpočet přechodového oteplování definuje vztah:

$$\Delta T(t) = \Delta T_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2)$$

Kde  $\tau$  představuje časovou konstantu oteplování. Pro zohlednění nejhoršího možného případu, kdy svazek je koncentricky smotán a kabely jsou překryty smršťovací bužírkou zhoršující odvod tepla, byla do vzorce dosazena ambientní výchozí teplota 80 °C s nízkým součinitelem přestupu tepla  $\alpha = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Výsledky validovaly bezpečnost větví s vypočteným oteplením převážně o 3 °C až 19 °C. Ačkoliv obvody hlavních řídicích jednotek generovaly oteplení mírně vyšší (46 °C), vzhledem k jejich lokaci v kokpitu a umístění ve vnější vrstvě koncentrického motání bylo i toto teoretické zatížení klasifikováno jako plně bezpečné.

## 5.7 Modelace svazku ve 3D

Při malosériové výrobě se tradičně používá fyzický model vozu a provázky k odměření délek. V případě studentské formule je ovšem samotný rám dokončován v pozdních fázích vývoje, což brání včasné výrobě složité elektroinstalace. Proto byla zvolena moderní metoda kompletní 3D modelace svazku ve virtuálním prostředí Autodesk Inventor. Každý jednotlivý vodič byl detailně trasován po digitálním modelu trubkového rámu. Tato metoda umožnila včasnou kontrolu kolizí, přesné stanovení počtu vodičů v každé větvi a vygenerování výpisů materiálů dluho předtím, než existoval reálný monopost [1].



Obrázek 4: 3D model svazku v rámu

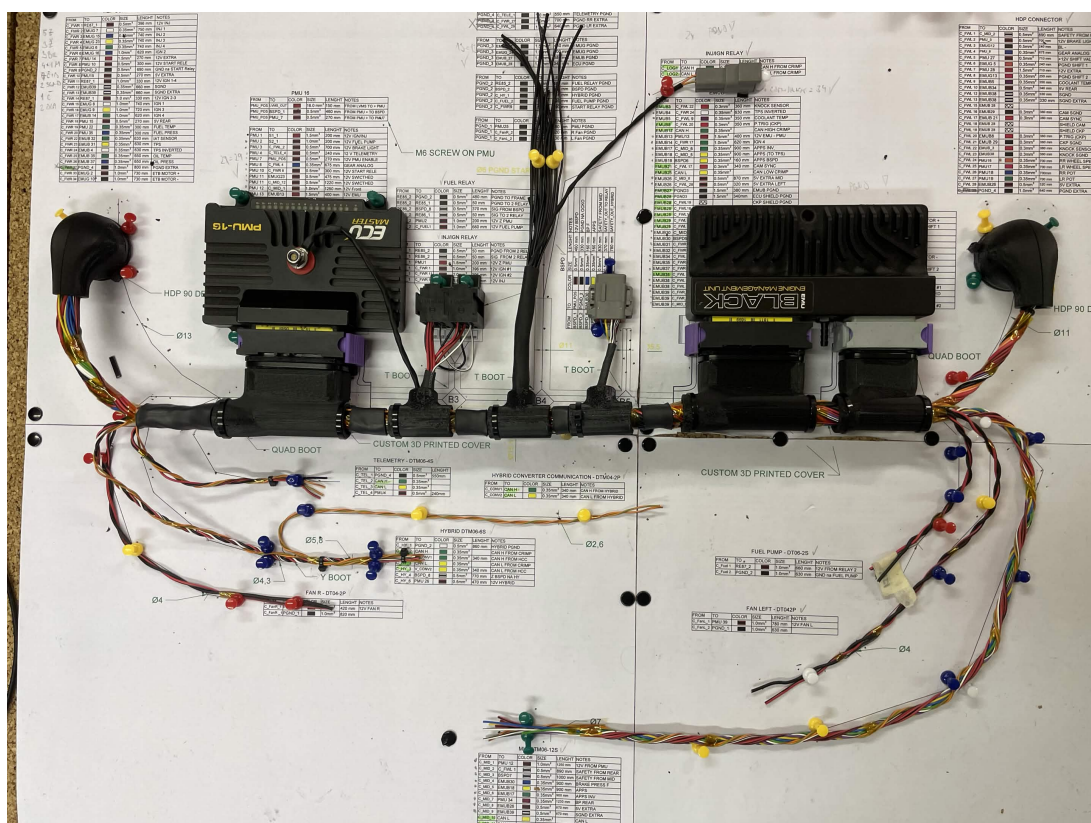
## 5.8 Schéma zapojení

Finálním výstupem celého konstrukčního návrhu je tvorba výrobní dokumentace. Z prostorových dat z Inventoru byla vygenerována rozvinutá 2D schématická zobrazení pro každou větev svazku. Tyto výkresy obsahují přesné délky, uzly větvení a detailní tabulky pro obsazení jednotlivých kontaktů do konektorů.

## 6 Výroba kabelového svazku

Fyzická stavba probíhala v čistém a organizovaném prostředí na velké korkové formovací desce. Na tuto plochu se zafixoval výkres svazku v reálném měřítku 1:1, přičemž jednotlivé uzly a konce větví byly osazeny fixačními špendlíky pro uchycení vodičů. Během krácení kabeláže byl k původní hodnotě z modelu připočítán 20% technologický přírůstek, který slouží jako kompenzace následného zkrácení vzniklého koncentrickým splétáním.

Samotná realizace koncentrického motání vyžadovala značnou manuální zručnost [1]. Struktura vznikala po dílčích sekcích, provizorně zajišťovaných stahovacími páskami, než byla finálně zafixována kaptonovou páskou. Následně proběhlo zapouzdření pomocí teplem smrštitelných bužirek a instalace vytištěných přechodek v dělicích T a Y uzlech. Souběžně s procesem krimování lisovaných kontaktů byly vytvářeny servisní 360° smyčky [1]. Před i po zapojení pinů do konektorů probíhala neustálá verifikace spojů pomocí multimetru nastaveného na test obvodové kontinuity. Tím se zajistila funkčnost finálního výrobku před jeho vložením do vozu.



Obrázek 5: Výroba Main harnessu

## 7 Závěr

Práce dosáhla vytčených technických cílů díky pečlivému prolnutí teoretické analýzy a špičkových metod motorsportu. Zavedení plně 3D modelace v Autodesk Inventor přineslo zásadní zefektivnění návrhu, eliminovalo prostorové chyby a přesně vyčíslilo spotřebu materiálu. Skrze diagnostiku předešlých selhání a implementaci termomechanického a elektrického dimenzování se povedlo zcela vyřešit problém se ztrátami napětí na cívkách, což mělo bezprostřední pozitivní vliv na maximální využití potenciálu motoru Suzuki GSX-R 600.

Vlastní realizace prostřednictvím techniky koncentrického splétání, aplikace plně uzavřených bužírek, tvoření servisních smyček a využívání konektorů Deutsch HDP/DT/DTM demonstruje vysoký konstrukční standard odpovídající plně pravidlům i nárokům Formula Student. Výsledkem práce je systém zajišťující přenosovou spolehlivost i mechanickou trvanlivost závodního monopostu [1].

## Literatura

- [1] Jakub Kochrda, *Konstrukce kabelového svazku závodního vozidla*. Bakalářská práce, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2026.
- [2] Formula Student Germany, *FS Rules 2026. Version 1.1*. 2026. Dostupné z: [formulastudent.de](http://formulastudent.de)
- [3] Brandon Barry, *The Truth About Concentric Twisting*. High Performance Academy.