

Fakulta elektrotechnická Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva o napájecím zdroji s induktivní vazbou

Pracoviště: Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Číslo dokumentu: 22190-057-2018

Typ zprávy: Výzkumná zpráva

Řešitelé: Jindřich Křivka, Jiří Žahour, Kamil Kosturik, Pavel Valenta, Jiří Skála, Vjačeslav Georgiev, Jiří Hammerbauer, Zdeněk Kubík

Vedoucí projektu: Karel Noháč

Počet stran: 21

Datum vydání: 31. 12. 2018

Oborové zařazení: **JE – Nejaderná energetika, spotřeba a užití energie**
JA – Elektronika a optoelektronika, elektrotechnika

Zpracovatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
tel. 377634343
nohac@kee.zcu.cz

Anotace

Výzkumná zpráva předkládá zejména praktické poznatky s návrhem zdroje s proudovým transformátorem a stabilizací jeho výstupu. Součástí zprávy je popis dosažených výsledků z testování na přenosových sítích a dosažitelných výkonů pro napájení robotické platformy NET-Robotics.

Klíčová slova

proudový transformátor; vln vedení; DC/DC měnič; modem; LTE; WiFi

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

The Report of Electronic Power Supply with Inductive Coupling

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

The research report presents a theoretical analysis of energy harvesting from transmission high-voltage lines. It solves the design and optimization of a split core current transformer. Submission of power system design with DC/DC converter and LTE and WiFi communication circuits.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Current Transformer; High Power Line; DC/DC Converter



Robot pro inspekci a diagnostiku distribuční a přenosové sítě NET-Robotics

Číslo projektu: TH02020319

Výzkumná zpráva o napájecím zdroji s induktivní vazbou

Výzkumná zpráva: TH02020319-2018V003; evidenční číslo: 22190-057-2018

Kamil Kosturik, Jindřich Křivka, Jiří Žahour, Pavel Valenta, Jiří Skála, Jiří Hammerbauer,
Vjačeslav Georgiev, Zdeněk Kubík

(ZČU/Energon¹)

31. prosince 2018

¹ Identifikátory organizací: ZČU –Západočeská univerzita v Plzni, Energon – Energon Dobříš s.r.o.

Tento dokument je součástí projektu TH02020319/Robot pro inspekci a diagnostiku distribuční a přenosové sítě -NET-Robotics, realizovaného za finanční spoluúčasti Technologické agentury České republiky.

T A
Č R

I.	Úvod	4
II.	Testování v laboratoři.....	5
III.	Testování v těžké laboratoři	6
IV.	Vývoj platformy pro testování na VVN vedení	7
V.	Testování na 22kV lince – Křimice.....	13
VI.	Testování na 110kV lince – Oplot.....	16
VII.	Závěr.....	19

I. ÚVOD

V této etapě řešení projektu od 1.1.2018 do 31.12.2018 vývoj napájecího zdroje plynule navázal na činnost z předchozího roku (popsána ve výzkumné zprávě TH02020319-2017V005), která se primárně zabývala teoretickým rozbohem možností napájení robotu pomocí proudového transformátoru. Nejprve bylo zkonstruováno několik vzorků proudových transformátorů, které byly podrobeny měření na modelu krátkého přenosového vedení s maximálním proudem primární smyčky transformátoru do 100 A při zatížení.

Testy prokázaly relevantnost zvolené metody napájení, ale současně vnesly nejistotu do optimalizace návrhu sekundárního vinutí proudového transformátoru vzhledem k maximalizaci výkonového zisku. Pro zpřesnění informací o chování děleného proudového transformátoru v závislosti na primárním proudu a proměnlivém zatížení sekundárního vinutí, bylo provedeno několik dalších měření v těžké laboratoři RICE. Ta oproti předchozímu měření umožňovala kontinuální měření s proudovým zatížením závitu na krátko primárního vinutí až do 1100 A. Na základě těchto měření byl vyvinut testovací systém integrující v sobě více typů funkčních elektronických modulů. Tento systém již umožňuje instalaci na vedení VVN a současně je možné vyžít pro monitoring systému vzdálený přístup (viz. výzkumná práce TH02020319-2018V006).

Primárním cílem testování této aplikace bylo proměřování zatěžovací charakteristiky zdroje a vlivu zatížení daného vedení na maximální použitelný výkon pro napájení robotu. Zařízení bylo testováno nejprve na 22kV vedení a následně bylo nainstalováno na 110kV vedení. Nabyté zkušenosti s chováním zdroje umístěného na vedení umožnily navrzení topologie funkčního vzorku zdroje s induktivní vazbou. Jako kritický parametr návrhu elektroniky se ukázala nutnost navrzení přepětových ochran, tak aby spolehlivě ochránily elektronické vybavení robotu v případě proudových špiček na vedení. Ty mohou být způsobeny, jak samotným provozem sítě, tak přírodními vlivy jako je zásah blesku nebo zkrat na vedení.

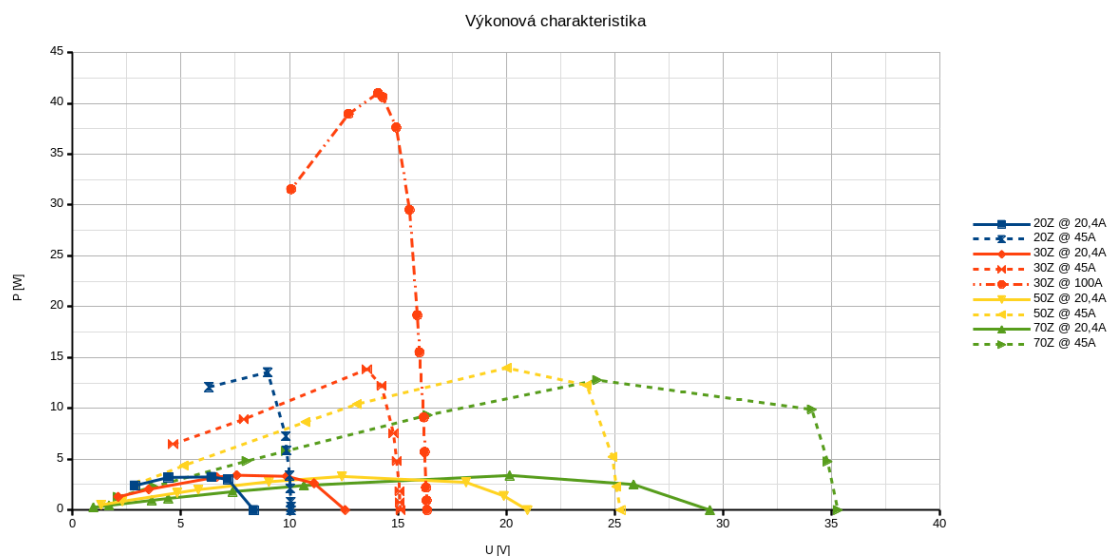
Ve spolupráci s týmem realizující samotné tělo robotu bylo v závěru období definováno blokové schéma elektronického vybavení robotu, tak aby bylo možné finalizovat jednotlivá elektronická zapojení vzhledem k jejich budoucí kooperaci v rámci elektronické palubní sítě robotu.

V dalším období bude probíhat návrh finálního layoutu napájecího systému, který bude v sobě implementovat potřebné strukturální celky plnící následující funkce: ochrana proti přepětí, filtrace vstupního napájení, DC/DC měnič topologie buck-boost, nabíjení baterie, zpětnovazební řízení jednotlivých napájecích větví robotu a komunikace s jinými moduly robotu.

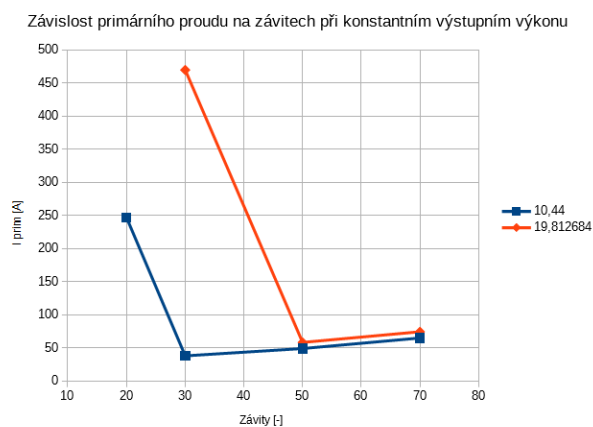
II. TESTOVÁNÍ V LABORATOŘI

Na základě teoretických předpokladů z předešlého období, bylo vyrobeno několik prototypů proudových transformátorů. Ty byly podrobeny laboratornímu testování, které bylo zaměřeno na ověření použitelnosti této metody v praxi. Testy probíhaly tak, že se postupně měnil počet závitů sekundárního vinutí, v kombinaci s různým zatížením výstupu sekundárního vinutí. Tyto hodnoty pro jednotlivé úrovně zatížení a počtu závitů jsou zachyceny v grafu (Obr. 1).

Pro napájení palubní sítě robotu je optimální výstupní napětí proudového transformátoru v rozsahu 15 až 30 V, na které bude optimalizován návrh buck-boost měniče vzhledem k jeho účinnosti. Další experiment byl proveden, tak že se pomocí nastavení parametrů proudu primárního vinutí a počtu závitů udržoval konstantní výkon na výstupu sekundárního vinutí (Obr. 2). Dle naměřených výsledků byl stanoven optimální počet závitů sekundárního vinutí na 50.



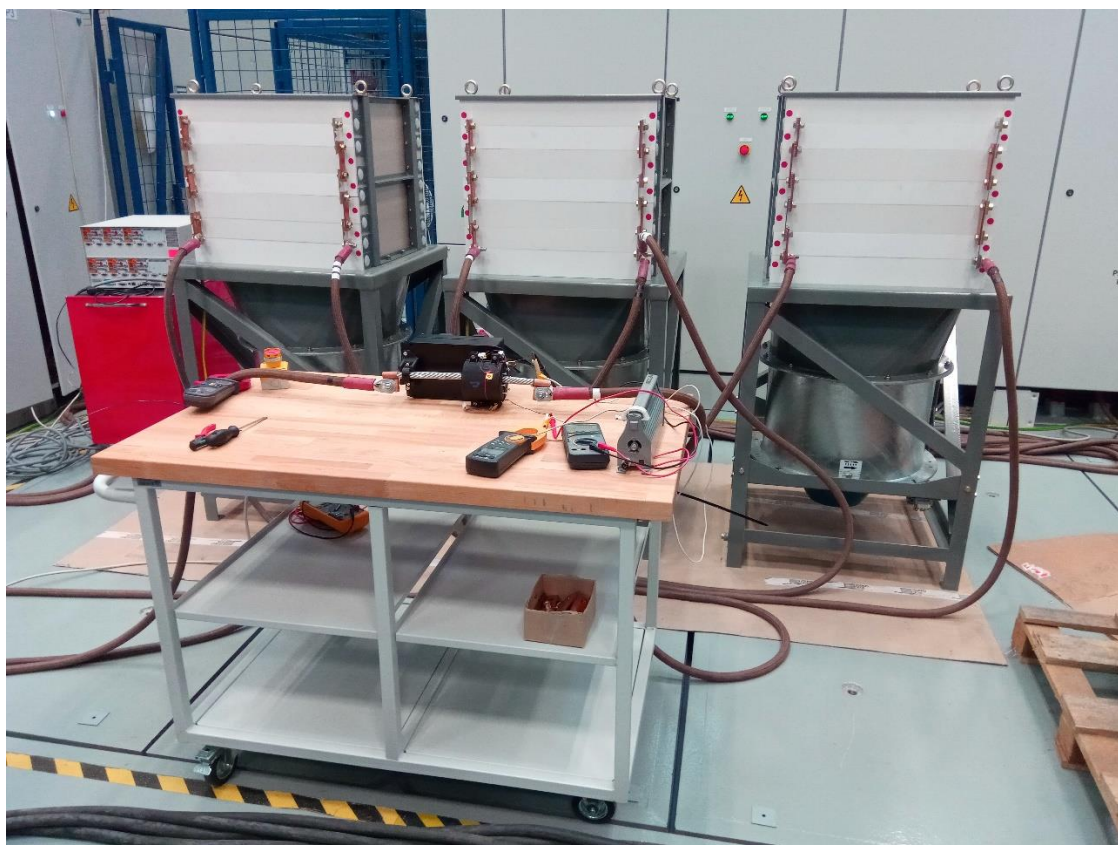
Obr. 1 Výkonová charakteristika zvoleného proudového transformátoru



Obr. 2 Závislost primárního proudu a počtu závitů sekundárního vinutí při konstantní zátěži

III. TESTOVÁNÍ V TĚŽKÉ LABORATOŘI

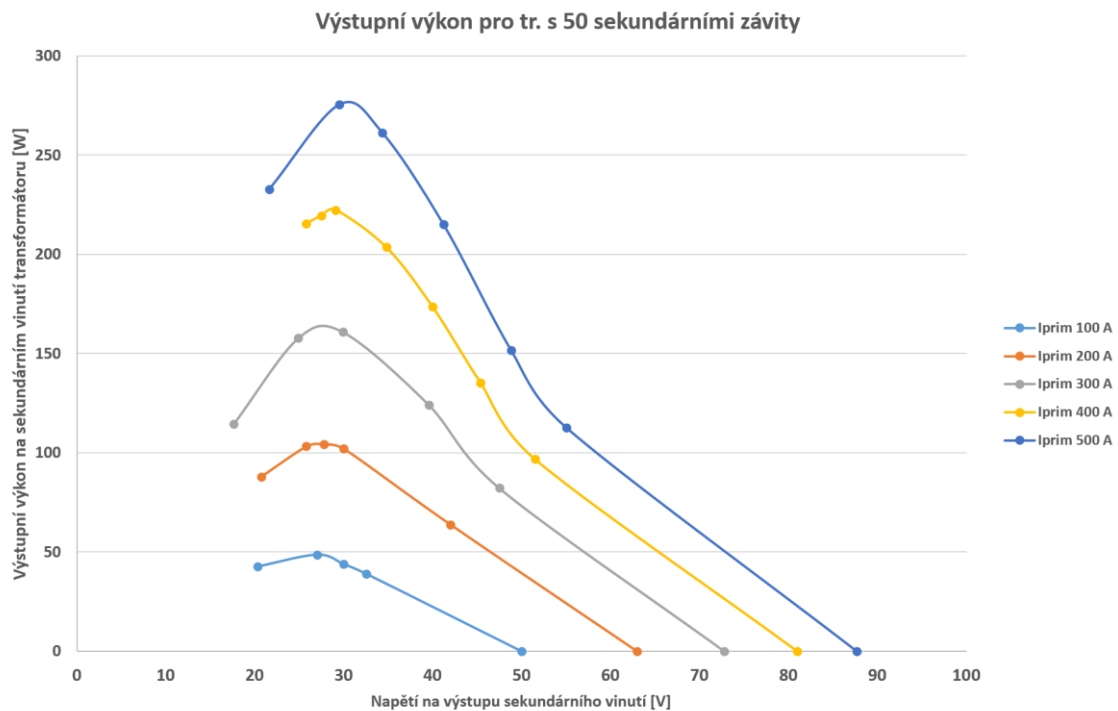
V následujícím kroku byl stejný dělený transformátor s padesáti závity na sekundárním vinutí podroben dalšímu testování. To bylo zaměřené na precizaci nabytých poznatků, ohledně optimalizace úrovně zatížení sekundárního vynutí transformátoru DC/DC měničem vzhledem k výstupnímu napětí pro různé proudy primární smyčky proudového transformátoru. Měřicí stanoviště je zachyceno na fotografii (Obr. 3).



Obr. 3 Testování proudového transformátoru v těžké laboratoři RICE

V grafu (Obr. 4) jsou vyneseny křivky pro jednotlivé zatěžovací charakteristiky transformátoru. Každá křivka je vynesena pro konstantní proud primárním vinutím v rozsahu od 100 A do 500 A. Z průběhů je patrné, že inflexní bod maximálního zisku se se změnou hodnoty proudu primárním vinutím nemění a je na úrovni zatížení výstupního napětí transformátoru přibližně 28 V.

Tento poznatek je zásadní pro optimalizaci návrhu DC/DC měniče, kde bude tento jev zohledněn tím, že bude jeho pracovní bod s maximální efektivitou umístěn v této napěťové hladině 28 V. Pro zpřesnění poznatků



Obr. 4 Graf výsledků testování proudového transformátoru v těžké laboratoři RICE

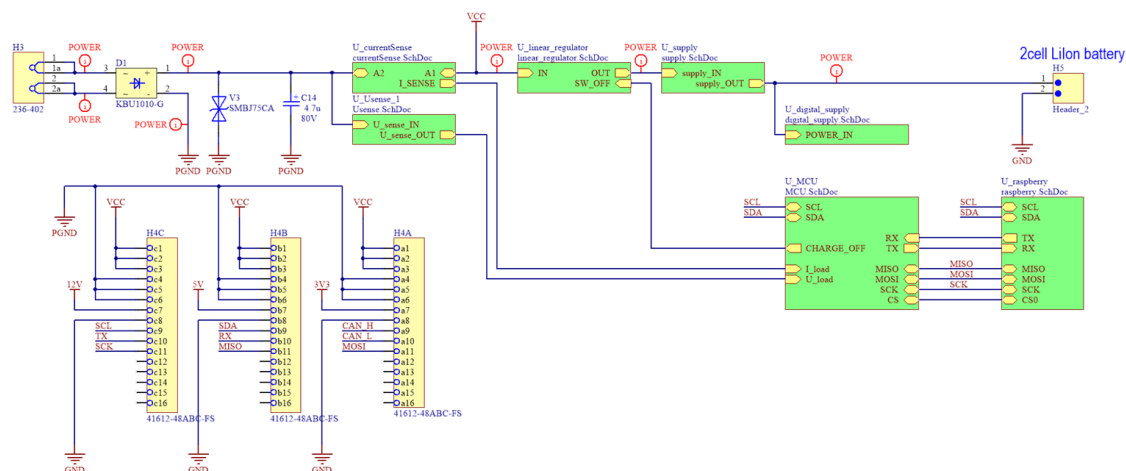
IV. VÝVOJ PLATFORMY PRO TESTOVÁNÍ NA VVN VEDENÍ

Na základě nabytých poznatků ohledně napájení pomocí proudového transformátoru a jeho chování v laboratorních podmínkách. Bylo navrženo několik funkčních vzorků testovacího systému napájení, tak aby bylo možné prokázat možnost napájení robotu testováním přímo na VVN vedení.

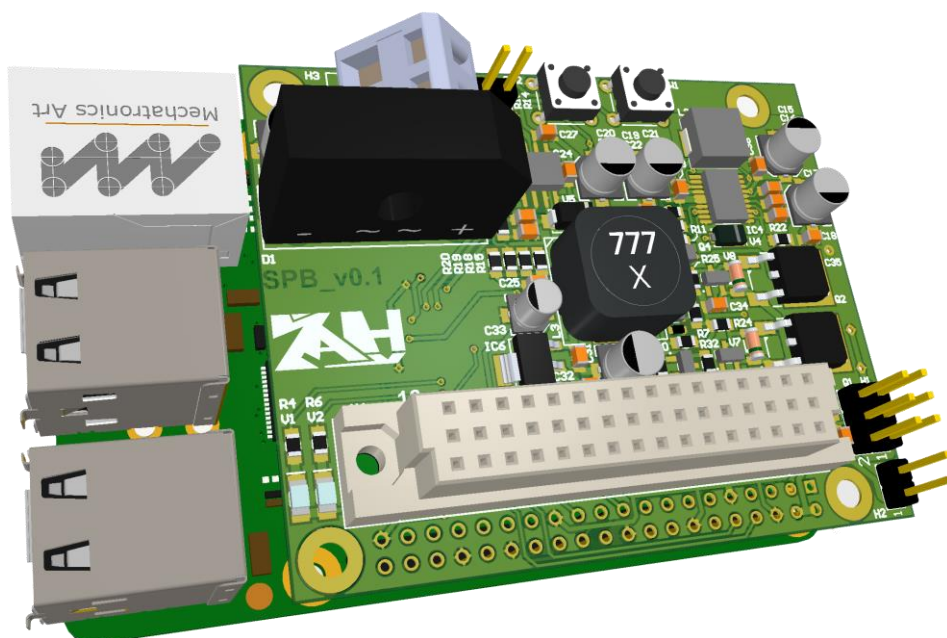
Systém pracuje na principu umělé zátěže, tak aby bylo možné zatěžovat proudový transformátor různým výstupním výkonem. V rámci výzkumného týmu panovala nejistota ohledně zatěžovacích charakteristik VVN vedení, kdy jsme nedisponovali přesnými průběhy proudů vedením během provozu, které podléhají utajení ze strany provozovatele přenosové sítě. Tento experiment, tak měl mimo jiné objasnit, jak jsou vedení 110 kV zatěžována, a jak se mění jejich zatížení v průběhu dne.

V průběhu vývoje této platformy vzniklo několik elektronických modulů, které dohromady tvoří testovací platformu NET-Robotics. Komunikace a hlavní řízení platformy bylo realizováno z důvodu rychlého vývoje pomocí modulu Raspberry Pi3. Jako záložní zdroj napájení, který je současně dobíjen pomocí proudového transformátoru je dvoučláňková Li-Ion baterie o kapacitě 2250 mAh. V platformě je též implementován komunikační modul, který je popsán v samostatné zprávě: Modul pro bezdrátovou komunikaci s robotem v okolí přenosových sítí pod napětím - TH02020319-2018V006. Tato platforma byla podrobena rozsáhlému testování, jak v laboratořích FEL, tak na VN a VVN vedení. Jednotlivé vývojové kroky jsou zachyceny v následujících schématech a obrázcích (Obr. 5 až Obr. 15).

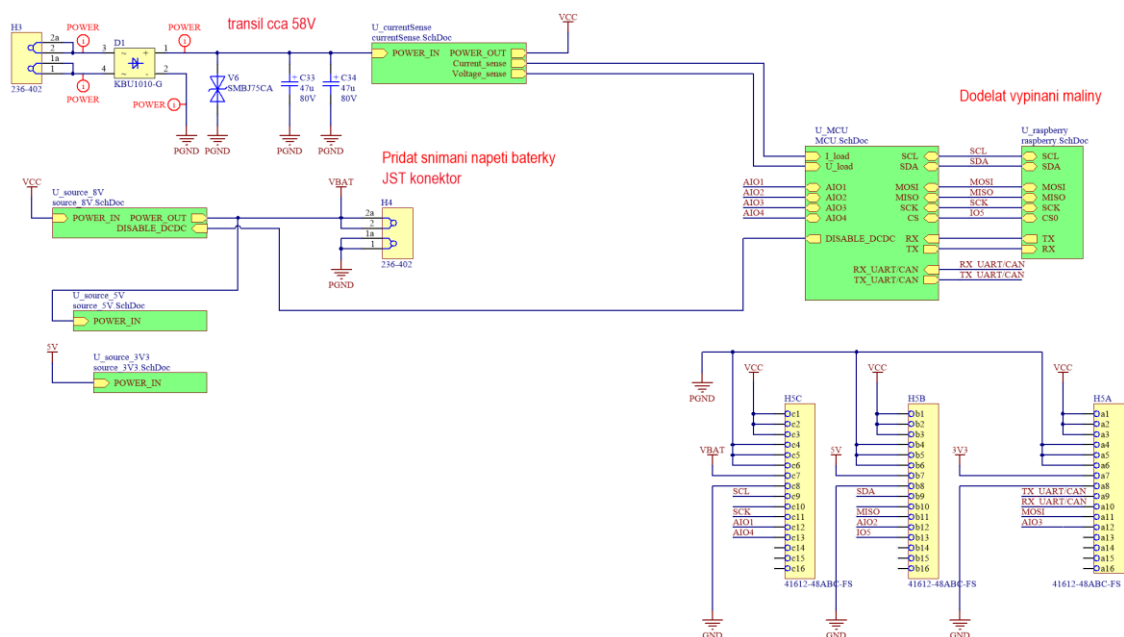
Jednotlivé vývojové stupně byly průběžně testovány a na základě nabytých zkušeností byly zapracovávány změny elektronického návrhu do dalších verzí jednotlivých modulů. Celá měřicí platforma byla před namontováním na vedení 22 kV podrobena testování ve vysokonapěťové laboratoři FEL, kde proběhly testy odolnosti proti vysokému napětí i s komunikačním modulem. Souběžně probíhaly testy v těžké laboratoři RICE, kde se testoval zejména napájecí modul s umělou zátěží.



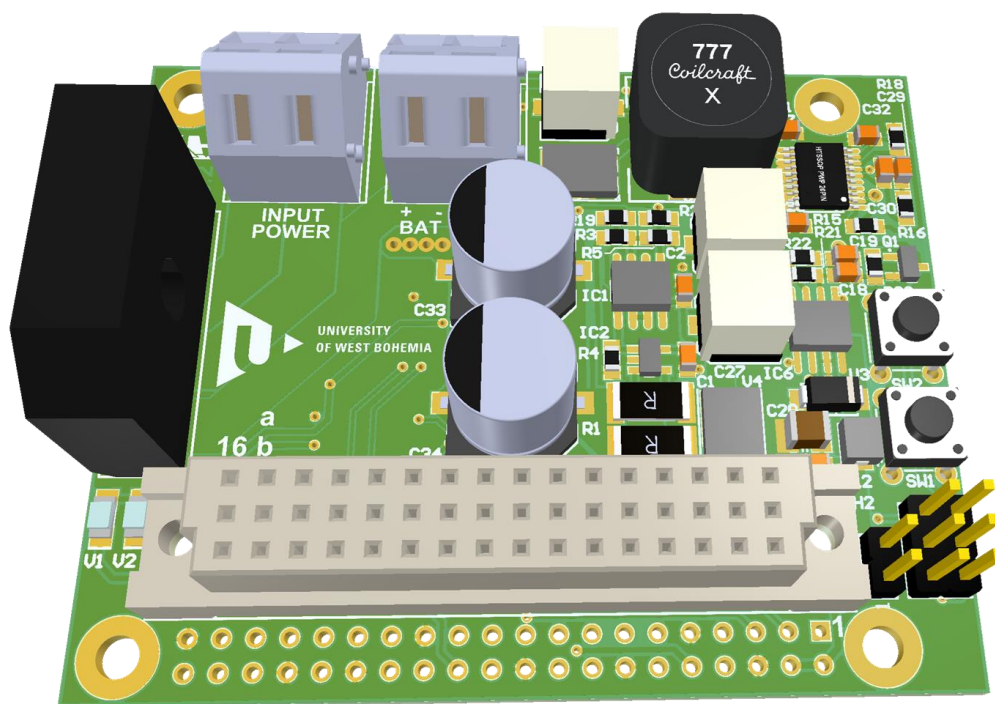
Obr. 5 Schéma - SourcePowerBoard_V0.1.Main



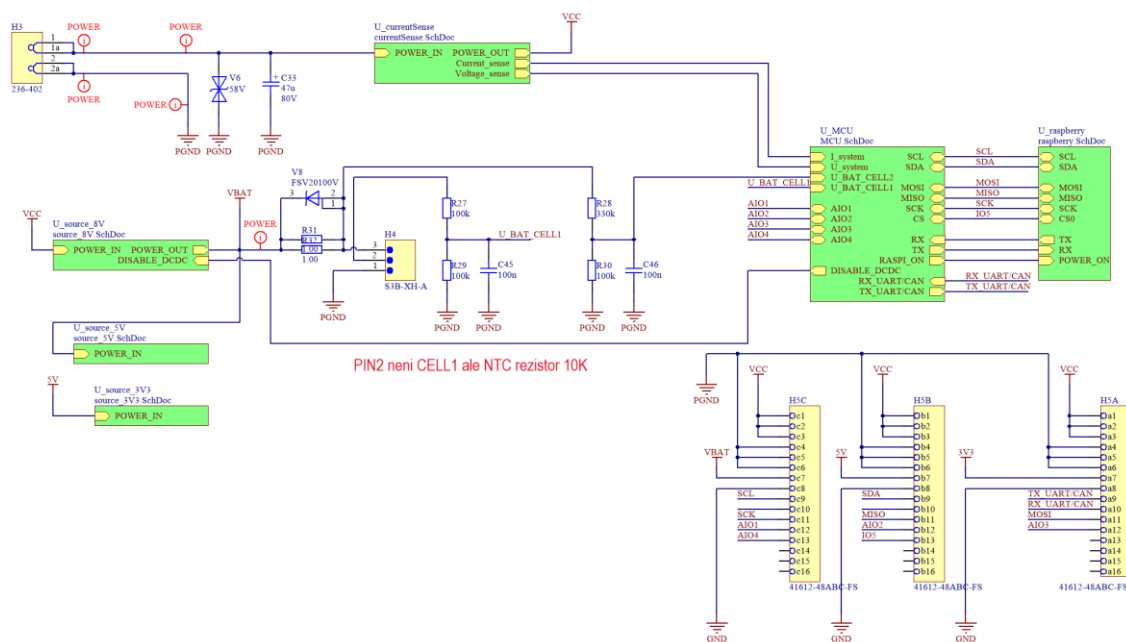
Obr. 6 Plošný spoj - SourcePowerBoard_V0.1 ve spojení s Raspberry Pi3



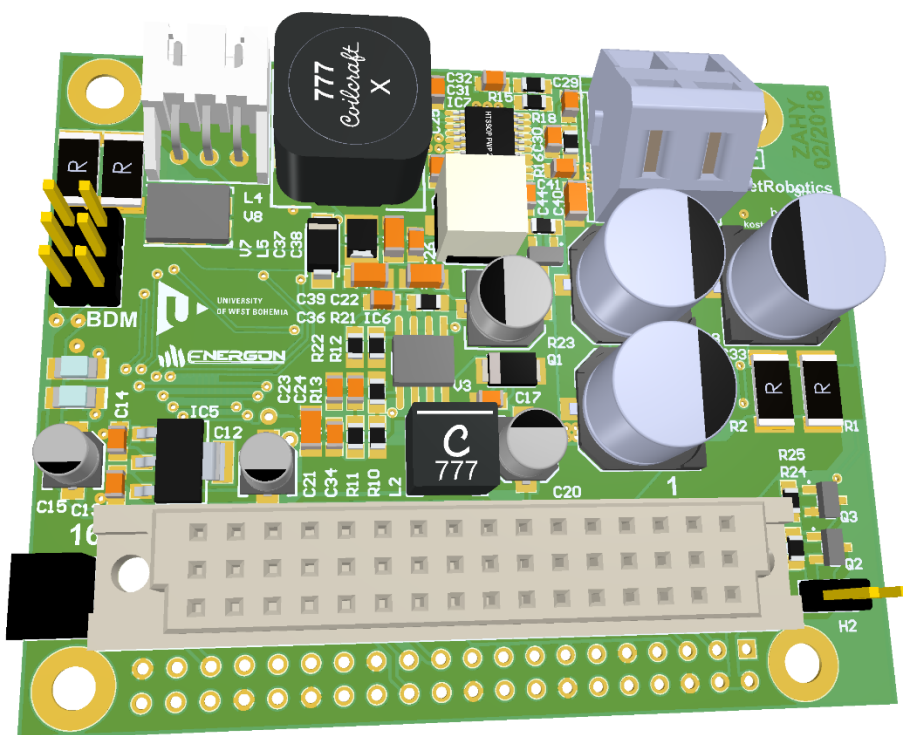
Obr. 7 Schéma - SourcePowerBoard_V0.2.Main



Obr. 8 Plošný spoj - SourcePowerBoard_V0.2

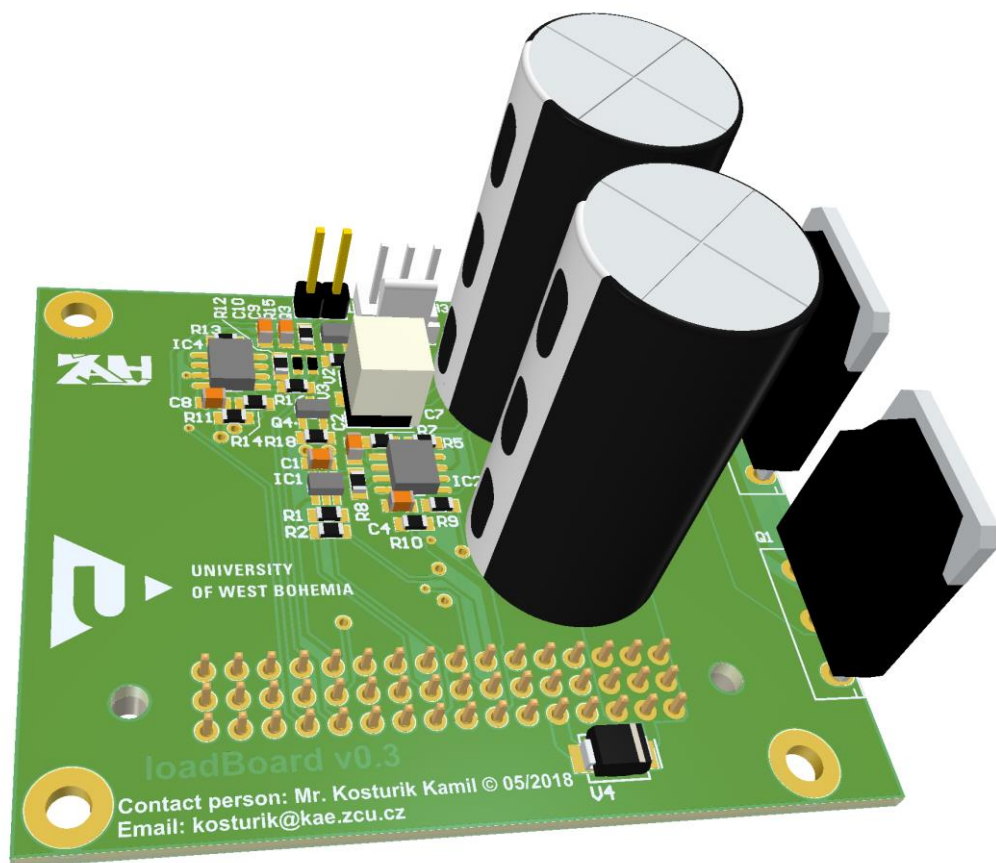


Obr. 9 Schéma - SourcePowerBoard_V0.3.Main

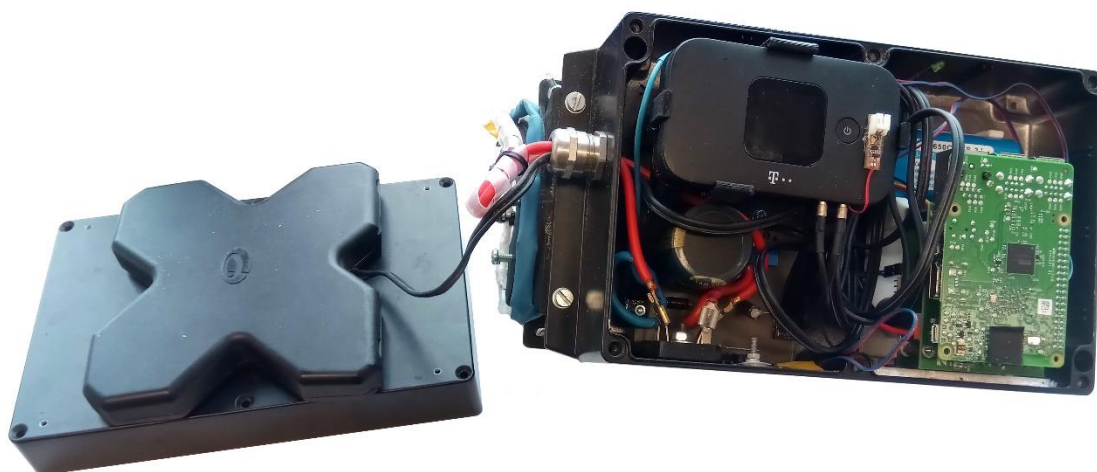


Obr. 10 Plošný spoj - SourcePowerBoard_V0.3

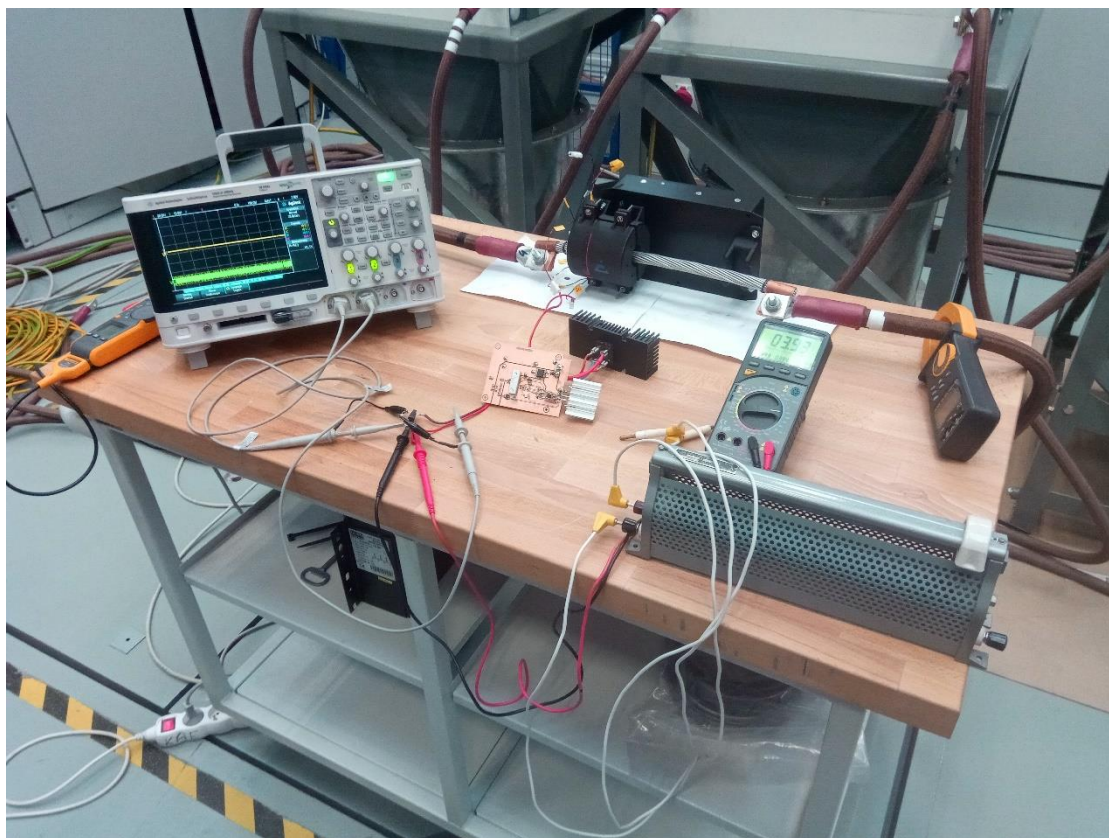




Obr. 13 Plošný spoj - LoadBoard_V0.3



Obr. 14 Testovací měřicí platforma proudového transformátoru NET-Robotics



Obr. 15 Testování měřicí platformy v těžké laboratoři RICE

V. TESTOVÁNÍ NA 22kV LINCE – KŘIMICE

Dne 15. 3. 2018 proběhla úspěšná instalace měřicí platformy u obce Křimice na VN vedení 22 kV ve správě ČEZ Distribuce, a. s. (Obr. 16 a Obr. 17). Měřicí platforma fungovala v této napěťové hladině bez výpadků elektronického systému včetně bezdrátové komunikace a umělé zátěže. Nicméně vedení, na kterém byla provedena instalace, bylo málo vytížené. Podle porovnání s daty získanými při laboratorním testování bylo zatížení v rozsahu 20 – 60 A. Maximální dosažitelný výkon se tak pohyboval na úrovni 10 W (Obr. 18 a Obr. 19).

Z toho důvodu měřicí platforma střídavě přecházela mezi režimy měření a stavem hibernace, kdy nebyla schopna získávat dostatek energie ani pro svůj vlastní provoz. Pro který potřebovala v případě navázané bezdrátové komunikace přibližně 5 W.

Napájecí modul zde byl v konfiguraci snižujícího měniče, a proto bylo vyhodnoceno, že pro následující vývojový krok napájecího modulu bude využita topologie buck-boost, tak aby bylo možné využívat celý napěťový rozsah výstupu proudového transformátoru i v případech, kdy bude primárním vinutím proudového transformátoru protékat malý proud (řádově desítky ampér). Pro splnění napájecích požadavků samotného robota je nutné, aby primárním vinutím tekla proud v ideálním případě 150 – 200 A.



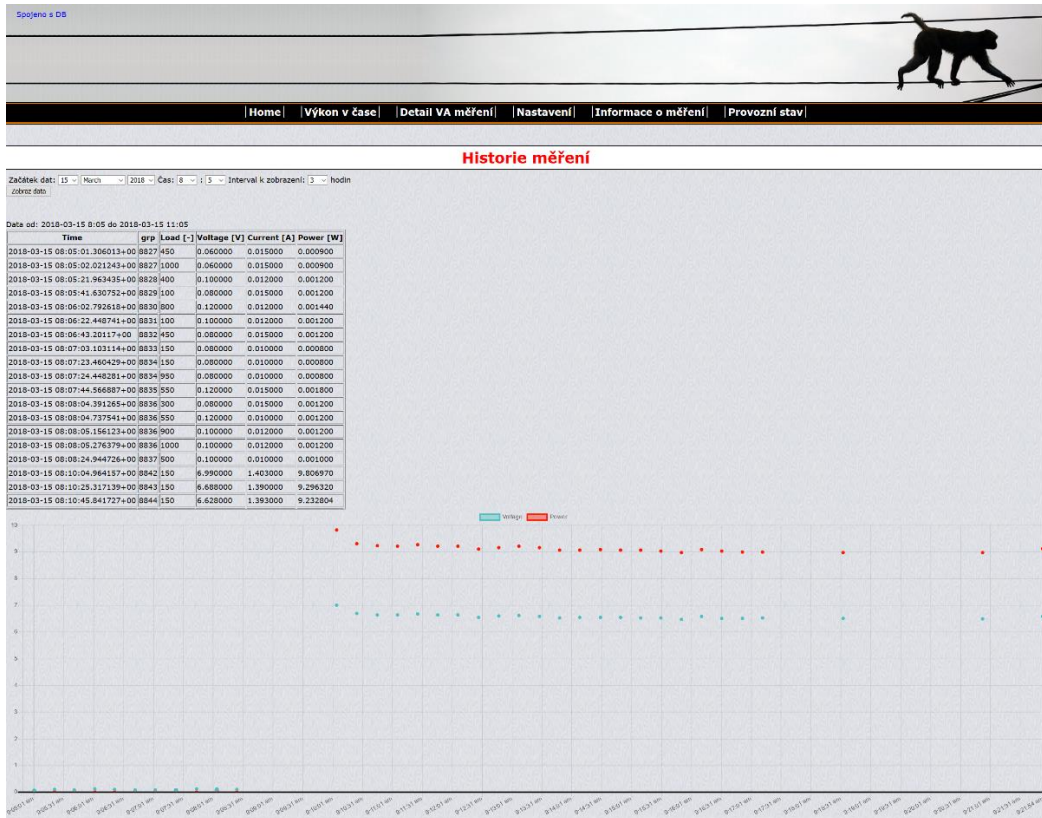
Obr. 16 Průběh instalace měřicí platformy na vedení 22 kV



Obr. 17 Fotografie zachycující umístění měřicí platformy na vedení 22 kV



Obr. 18 Graf z testování zatížitelnosti vedení a dosaženého maximálního výstupního výkonu pomocí změny hodnoty výstupního proudu transformátoru



Obr. 19 Jednotlivé body měření s maximální dosažitelnou hodnotou výstupního výkonu



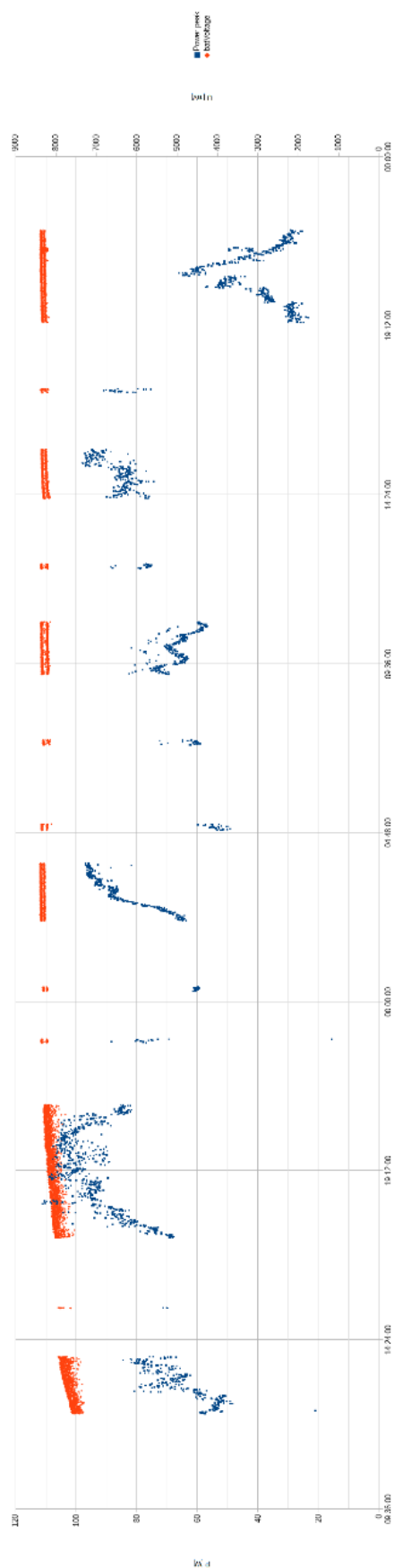
Obr. 20 Záznam provozního stavu měřicí platformy v delším časovém období pro výstupní napětí transformátoru, napětí záložní baterie a teploty

VI. TESTOVÁNÍ NA 110KV LINCE – OPLOUT

Instalace měřicí platformy NET-Robotics na VVN vedení 110 kV u obce Oplot na Jižním Plzeňsku proběhla 23. 5. 2018 ve spolupráci s ČEZ Distribuce, a. s. (Obr. 22). Na základě testování ve vysokonapěťové laboratoři FEL byly očekávány problémy s datovou komunikací. Nicméně tento předpoklad bylo nutné ověřit a navíc platforma byla vybavena, tak aby zrcadlila měřená data do vnitřního úložiště. Z toho důvodu byl kladný předpoklad pro úspěšné zmapování dosažitelné energetické bilance na tomto vedení.

Test opravdu prokázal, že měřicí platforma komunikuje velmi nepravidelně. Nicméně příchozí data ukazovala, že dosažitelný výkon na tomto vedení se pohybuje v rozmezí 30 až 110 W, přičemž střední hodnota naměřených dat byla přibližně okolo hranice 90 W (Obr. 21 a Obr. 20). Po sejmutí robotu z vedení se ukázalo, že nedocházelo jenom k výpadkům datové komunikace, ale k celkovému výpadku elektronického systému. To bylo odhaleno na základě porovnání dat přenesených bezdrátově do databáze s daty uloženými v interním úložišti měřicí platformy, které se svým rozsahem záznamu téměř překrývaly.

Závěr testu byl pravděpodobně ovlivněn atmosférickým bleskovým výbojem, který zapříčinil zničení USB rozhraní u komunikačního modulu.



Obr. 21 Hodnoty maximálního dosažitelného výkonu napájecího zdroje a napětí baterie měřicí platformy



Obr. 22 Instalace měřicí stanice na 110kV vedení u obce Oplot

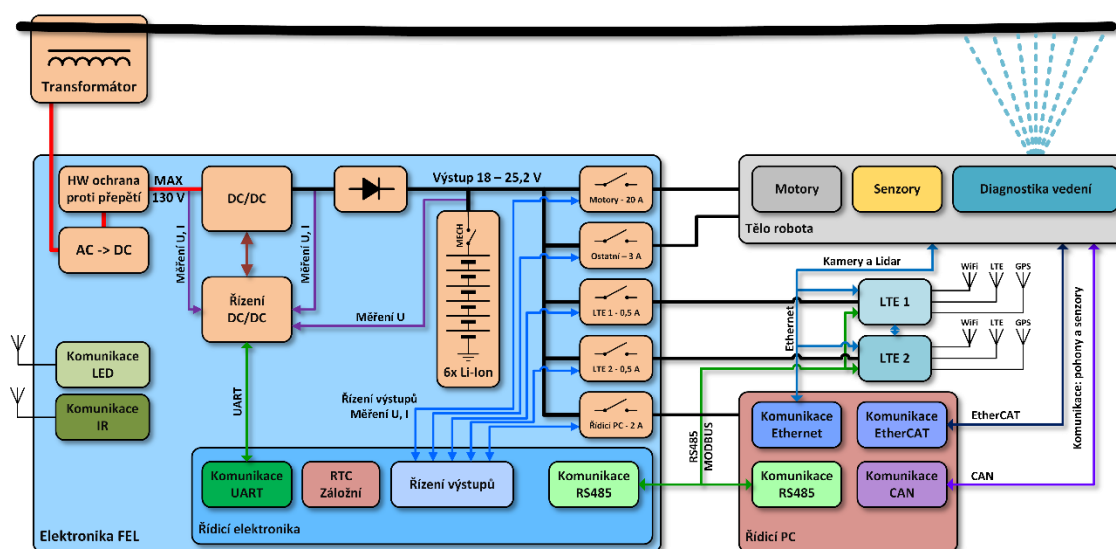
VII. ZÁVĚR

Na základě nabytých zkušeností z testování měřicí platformy NET-Robotics byl navržen funkční vzorek napájecího modulu (Obr. 24 až Obr. 26), který využívá topologii buck-boost a umožňuje využití plného napěťového výstupu proudového transformátoru. Modul je navíc vybaven technologií „Maximum Power Point Tracking – MPPT“, která optimalizuje zatížení zdroje vzhledem k maximalizaci výstupního výkonu. Tato technologie se v současnosti nejvíce uplatňuje v oblasti získávání energie ze solárních článků.

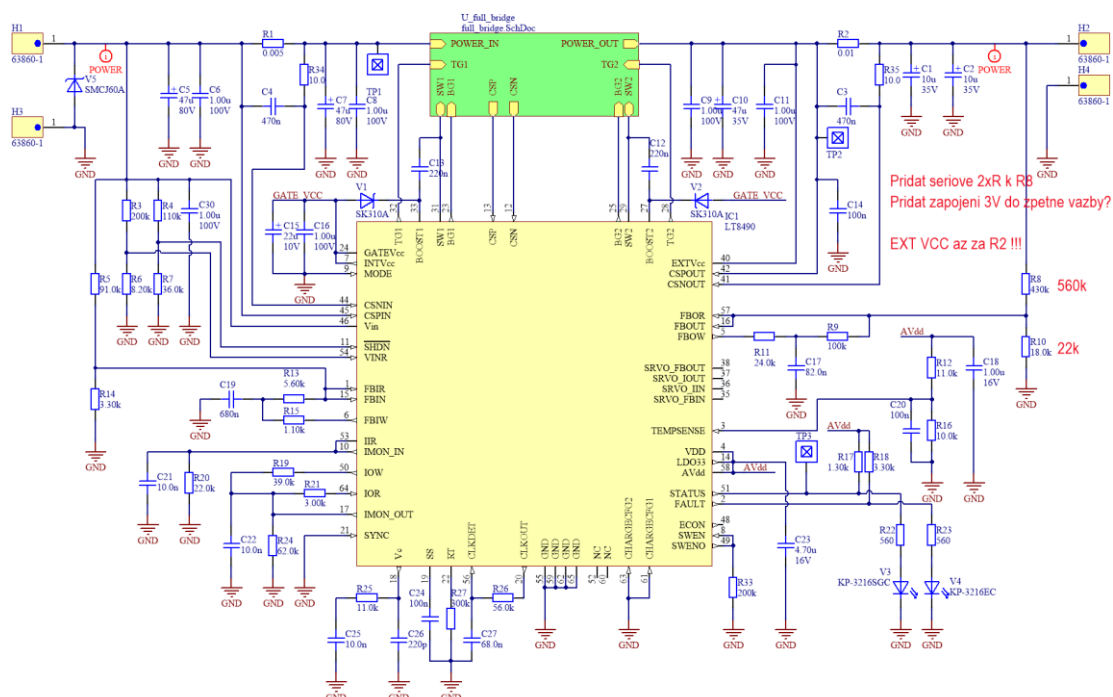
Další období řešení projektu, tak bude zaměřeno na validaci tohoto zdroje a jeho testování v rámci rozvodných sítí s napěťovou úrovní 110 kV. Ve spolupráci s ostatními řešitelskými týmy bylo specifikováno blokové schéma napájení a komunikace jednotlivých modulů robotické platformy (Obr. 23). Detailně je v tomto blokovém schématu rozpracována zejména konečná podoba napájecí sítě robotu.

Základem stabilizace a vyrovnávání energetické spotřeby robotu bude záložní Li-Ion baterie v konfiguraci 6S7P. V této konfiguraci bude baterie disponovat kapacitou 21 Ah při napětí v rozsahu 18 - 25,2 vzhledem úrovní aktuálního stavu nabití. V této konfiguraci bude maximální nabíjecí proud přibližně 10 A, to odpovídá výstupnímu výkonu proudového transformátoru v rozsahu 200 - 250 W. Dosažení těchto hodnot je reálné, což prokázalo měření na vedení u obce Oplot. Napájení jednotlivých modulů robotu bude rozdělené s možností odpojení jednotlivých napájecích odboček.

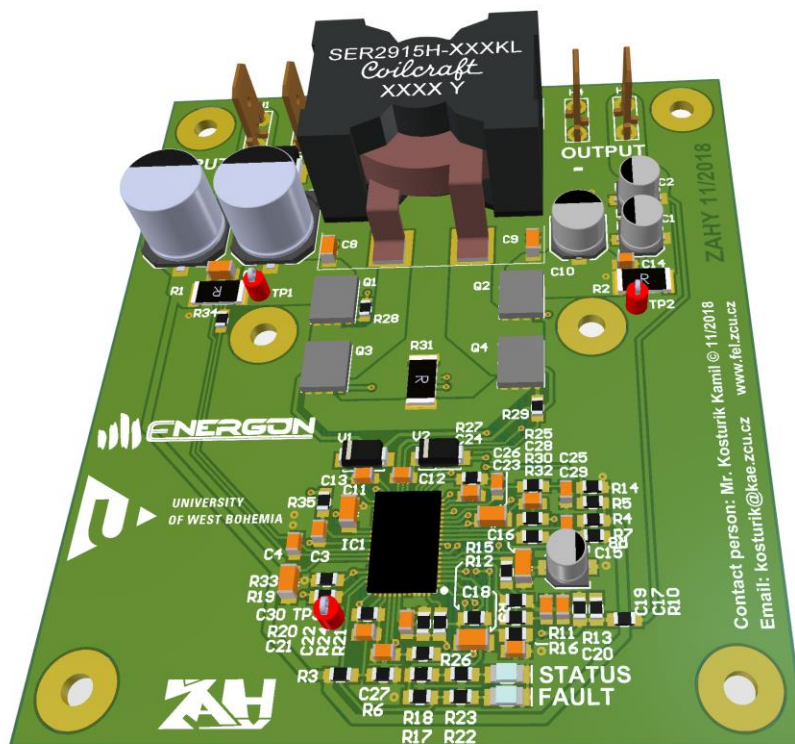
Nedílnou součástí řešení napájení robotu bude mechanické řešení samotného systému nasazování proudového transformátoru na vedení. V případě překonávání překážky na vedení bude proudový transformátor odpojen od vedení a robot musí být schopen překážku překonat pouze ze záložní baterie.



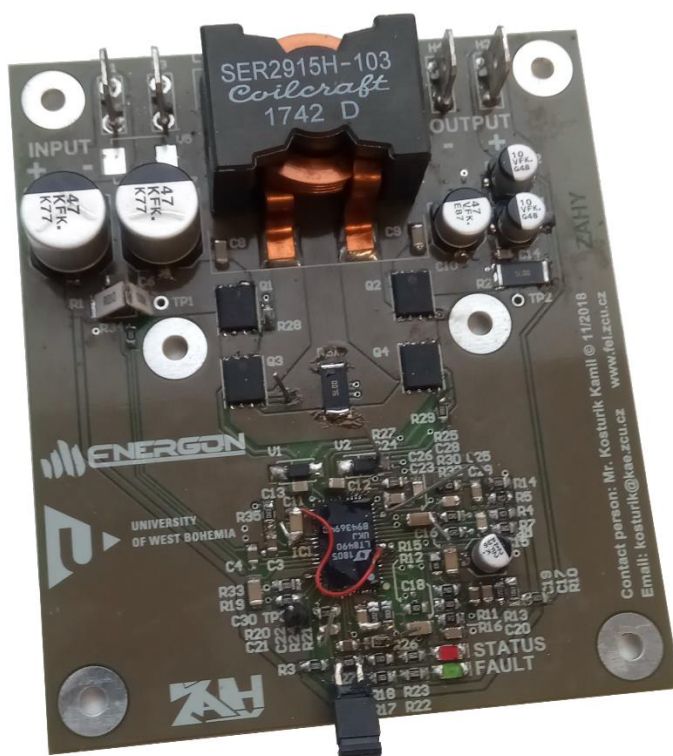
Obr. 23 Blokové schéma komunikačního rozhraní a napájení jednotlivých modulů robotu NET-Robotics



Obr. 24 Schéma napájecího modulu s MPPT funkcí



Obr. 25 Model plošného spoje napájecího modulu



Obr. 26 Osazený ověřovací plošný spoj napájecího modulu