

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

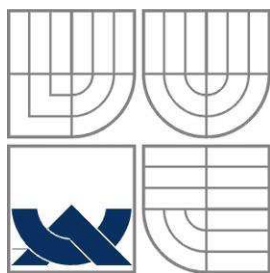
ŘÍDICÍ SYSTÉM KOGENERAČNÍ JEDNOTKY SE VZDÁLENÝM DOHLEDEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

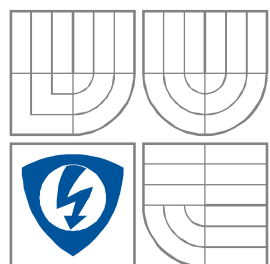
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADOMÍR BETLACH

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ŘÍDICÍ SYSTÉM KOGENERAČNÍ JEDNOTKY SE VZDÁLENÝM DOHLEDEM

THE CONTROL SYSTEM FOR COGENERATION UNIT WITH A REMOTE CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

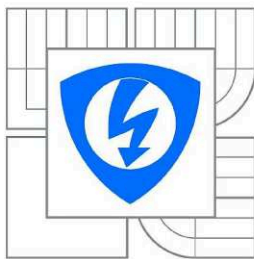
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Radomír Betlach

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Pospíšil

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Radomír Betlach

ID: 125368

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí systém kogenerační jednotky se vzdáleným dohledem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku řízení kogenerační jednotky (řízení motoru, přifázování k síti, obsluha požadavků na teplo). Navrhněte řídicí jednotku s ohledem na ošetření poruchových stavů. Zvolte vhodné řešení pro vzdálený dohled (GSM modul, Ethernet ...). Navrženou jednotku vyrobte a mechanickou konstrukci uzpůsobte provozním podmínkám. Odladte řídicí software a ověřte celkovou funkčnost včetně reakcí na poruchové stavy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DVORSKÝ, E., HEJTMÁNKOVÁ, P. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005.

[2] MANN, B. C pro mikrokontroléry. Praha: BEN - technická literatura, 2004.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Martin Pospíšil

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tématem práce je shrnutí problematiky a popis řízení kogenerační jednotky. Diskutovány jsou případné poruchové stavy, příčiny jejich vzniku a způsoby jejich ošetření. Dalším cílem je návrh koncepce řídicího systému kogenerační jednotky s ohledem na konkrétní aplikaci. V práci je detailně popisován návrh celkové koncepce i všech dílčích částí systému. Následuje popis realizace řídicího systému, včetně sestavení firmware jednotek a fyzické instalace jeho součástí. Posledním cílem je pak předmětný systém uvést do provozu a podrobit inovovanou kogenerační jednotku provozním zkouškám.

KLÍČOVÁ SLOVA

Embedded systém, kogenerační jednotka, řídicí systém

ABSTRACT

The subject of diploma thesis is to summarize problematic about control of cogeneration unit. There are explained some unexpected situations, which can obtain during operation of unit and necessary process for their safety resolving. Next goal is to design the conception of controlling system for currently used technology. Project describes whole conception of control system and its parts. Physical realization and programming firmware is also described. Last goal of diploma project is to launch operation of innovated cogeneration unit and let it undergo the tests.

KEYWORDS

Embedded system, cogeneration unit, control system

BETLACH, R. *Řídicí systém kogenerační jednotky se vzdáleným dohledem.*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 52 s., 20 s. příloh. Diplomová práce.
Vedoucí práce: Ing. Martin Pospíšil

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci, na téma Řídicí systém kogenerační jednotky se vzdáleným dohledem, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Pospíšilovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Kogenerace	2
1.1 Princip kombinované výroby	2
1.2 Provoz kogenerace v ČR.....	3
1.3 Konkrétní popis stávající technologie.....	4
2 Návrh řídicího systému	6
2.1 Celkový návrh řešení	6
2.1.1 Požadavky	6
2.1.2 Topologie řídicího systému	7
2.1.3 Přiřazení úloh.....	8
2.2 Návrh hlavní jednotky	9
2.2.1 Volba MCU.....	9
2.2.2 GSM modul.....	10
2.2.3 Ethernet modul.....	12
2.2.4 Napájecí obvody	12
2.2.5 Uživatelské rozhraní	13
2.2.6 Sběrnice a komunikace s periferiemi.....	13
2.2.7 Návrh DPS hlavní jednotky	15
2.3 Jednotka motoru.....	16
2.3.1 Analogová čidla	16
2.3.2 Měření a řízení otáček motoru	18
2.3.3 Spouštění motoru	21
2.3.4 Návrh DPS jednotky motoru.....	21
2.4 Jednotka generátoru	22
2.4.1 Měření napětí a proudu	22
2.4.2 Buzení synchronního generátoru	23

2.4.3	Fázování.....	25
2.4.4	Návrh DPS jednotky generátoru	26
3	Ověření dílčích částí ŘS	28
3.1	Ověření funkcí procesoru ARM	28
3.1.1	Výroba vývojové desky	28
3.1.2	Programování pomocí SAM-BA loaderu	28
3.1.3	Využití periférií MCU	29
3.2	GSM modul.....	29
3.2.1	Ovládání modulu.....	29
3.2.2	Použití příkazů AT.....	30
3.3	Komunikace po sběrnici	30
3.3.1	UART.....	30
3.3.2	RS-485	31
3.4	Měření fázového posuvu.....	31
3.4.1	Ověření parametrů proudového čidla	31
3.4.2	Fázový posuv RC článku	31
3.5	PWM.....	32
3.5.1	Ověření parametrů budiče IGBT	32
4	Realizace řídicího systému	34
4.1	Jednotka motoru.....	34
4.1.1	Oživení JM.....	34
4.1.2	Sestavení firmware pro JM.....	35
4.2	Jednotka generátoru	39
4.2.1	Oživení JG	39
4.2.2	Sestavení firmware pro JG.....	40
4.3	Hlavní jednotka.....	44
4.3.1	Oživení HJ	44
4.3.2	Sestavení firmware pro HJ.....	45
4.4	Uvedení ŘS do provozu.....	49
4.4.1	Instalace jednotek	49
4.4.2	Ladění programu.....	50
4.4.3	Provozní zkoušky.....	51
	Závěr	52

Prameny a použitá literatura	53
Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
Seznam příloh	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Zjednodušené principiální schéma KGJ	3
Obr. 2:	Průřez dvouvrstvou DPS s mikropáskovým vedením	10
Obr. 3:	Schéma zapojení GSM modulu	11
Obr. 4:	Návrh zapojení napájecích obvodů HJ	13
Obr. 5:	Zapojení terminačních rezistorů sběrnice	14
Obr. 6:	Návrh DPS hlavní jednotky – horní strana	15
Obr. 7:	Návrh DPS hlavní jednotky – spodní strana	16
Obr. 8:	Závislost odporu NTC termistoru na teplotě	17
Obr. 9:	Teplotní závislost odporu čidla KTY81	17
Obr. 10:	Princip funkce snímače pro měření otáček	18
Obr. 11:	Princip unipolárního jednofázového řízení	19
Obr. 12:	Bipolární dvoufázové řízení	20
Obr. 13:	Návrh DPS jednotky motoru – horní strana	21
Obr. 14:	Návrh DPS jednotky motoru – spodní strana	22
Obr. 14:	Schéma zapojení budiče generátoru	23
Obr. 16:	Budící charakteristika generátoru naprázdno	24
Obr. 17:	Schéma zapojení regulátoru budiče	25
Obr. 18:	Znázornění průběhů napětí při fázování	26
Obr. 19:	Návrh DPS jednotky generátoru – horní strana	27
Obr. 20:	Návrh DPS jednotky generátoru – spodní strana	27
Obr. 21:	Návrh DPS testovací desky	28
Obr. 22:	Schéma zapojení obvodu budiče pro simulaci	32
Obr. 23:	Výsledek analýzy – proud statorem budiče	32
Obr. 24:	Napětí na kolektoru a kolektorový proud spínacího tranzistoru	33
Obr. 25:	Mechanické provedení čidel pro JM	35
Obr. 26:	Vývojový diagram hlavního programu JM	36
Obr. 27:	Vývojový diagram obsluhy přerušování JM	37
Obr. 28:	Vývojový diagram hlavního programu JG	40
Obr. 29:	Vývojový diagram obsluhy přerušování JG	41
Obr. 30:	Vývojový diagram obsluhy přerušování komparátoru JG	42

Obr. 31:	P-Q diagram generátoru	43
Obr. 32:	Vývojový diagram stavového automatu 3. úlohy HJ.....	47

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Parametry soustrojí KGJ – motor	5
Tabulka 2: Parametry soustrojí KGJ - generátor.....	5
Tabulka 3: Význam obsahu komunikačního rámce - JM.....	38
Tabulka 4: Význam obsahu komunikačního rámce - JG	44

ÚVOD

Při sledování vývoje moderních technologií je patrné, že v posledních desetiletích je úsilí směřováno nejen ke zvyšování efektivity pracovních či výrobních procesů. Dalším důležitým kritériem se vedle ekonomického hlediska stala také ekologie. V některých případech jsou tato hlediska natolik spjata, že nelze určit, které je dominantní. Typickým příkladem je kogenerace. Účelem kogenerace je výroba dvou forem energie z jednoho primárního paliva. Palivem bývá surovina, obvykle využívaná pouze pro výrobu jediného hlavního druhu energie, ostatní nevyužitá energie paliva se tak stává odpadní. Proces kogenerace je tedy nejen ekonomicky výhodný, ale díky své vysoké účinnosti je navíc ekologický ve srovnání s konvenčními způsoby zpracování paliva. Vzhledem k úsporným a ekologickým trendům je tedy přehodnocován i přístup k využívání stávajících technologií, případně jsou tyto modernizovány tak, aby splňovaly zmiňované požadavky.

Cílem diplomové práce je návrh řídicího systému kogenerační jednotky pro usnadnění její obsluhy, dosažení bezpečnějšího provozu a umožnění vzdáleného dohledu nad stavem kogenerační jednotky. V rámci návrhu a realizace je třeba některé technologické části stávajícího zařízení modernizovat, případně je zcela nově do zařízení doplnit. Po dokončení návrhu a úprav pak řídicí systém zrealizovat a uvést tak inovovanou kogenerační jednotku znovu do provozu. Vzhledem k povaze zařízení, jakým je kogenerační jednotka, je také důležité brát zřetel na zajištění bezpečnosti jejího provozu a podrobit proto řídicí systém podrobným zkouškám. Předmětem práce není změna parametrů soustrojí kogenerační jednotky z hlediska jmenovitých hodnot, ale s využitím moderních technologií dosáhnout bezpečného a stabilního chodu zařízení a také uživatelského komfortu.

1 KOGENERACE

Obnovitelné, nebo někdy také nazývané alternativní zdroje energie, jsou v současnosti rozsáhle diskutovanou problematikou jak v České Republice, tak i celosvětově. Vzhledem k pokročilému technologickému rozvoji lidstva je znatelný soustavný nárůst spotřeby energií, především elektřiny a tepla, s čímž úměrně souvisí i spotřeba paliv. V současnosti jsou bezesporu nejvyužívanější fosilní paliva. Ať už se jedná o uhlí pro tepelné elektrárny, o kapalné frakce ropy pro průmysl a dopravu, nebo o plyn, všechna tato paliva jsou již ze své podstaty vyčerpitelná, a jde tedy o neobnovitelný zdroj energie. Nelze s jistotou stanovit, kdy a za jakých podmínek dojde k jejich vyčerpání, dokonce i názory odborníků se v této otázce rozcházejí. Existují sice ještě nedotčené rozsáhlé zásoby metanu, nicméně velká část zásob fosilních paliv nebude ani v budoucnu těžena, neboť jejich dobývání by bylo energeticky náročnější, než samotný zisk jejich vytěžením. Bez ohledu na to, jaký je skutečný objem světových zásob fosilních paliv, je jisté, že cena za jednotku paliva bude v budoucnu narůstat a paliv bude nedostatek.

Jedním z možných řešení nastávající situace se jeví elektrárny využívající jadernou energii. Dobývání energie jaderným štěpením však nese mnohá rizika, která se bohužel již nejednou představila při haváriích elektráren. Nehledě na to, že i zásoby uranu, jakožto paliva využívaného v jaderných elektrárnách, jsou omezené a skladování radioaktivního odpadu je komplikované. Vědci se tak pokoušejí provést jadernou fúzi, která skýtá ještě mnohonásobně více energie a menší rizika než štěpení, avšak prozatím bez prakticky realizovatelných výsledků.

V posledních desetiletích je prosazována myšlenka rozšíření využívaných zdrojů energií o zdroje alternativní. Jde především o elektrickou energii získávanou z vodních, větrných a solárních elektráren. Využívání těchto zdrojů naráží na mnohá úskalí, jež není třeba rozvádět, výhodou pak je jejich teoretická nevyčerpitelnost. V posledních letech byl učiněn výrazný pokrok a rozvoj ve využití obnovitelných přírodních zdrojů energie. K jejich zpracování jsou využívány různé technologie dle povahy obnovitelného zdroje. Jednou z hojně využívaných technologií pro zpracování paliv z obnovitelných zdrojů jsou kogenerační a trigenerační jednotky.

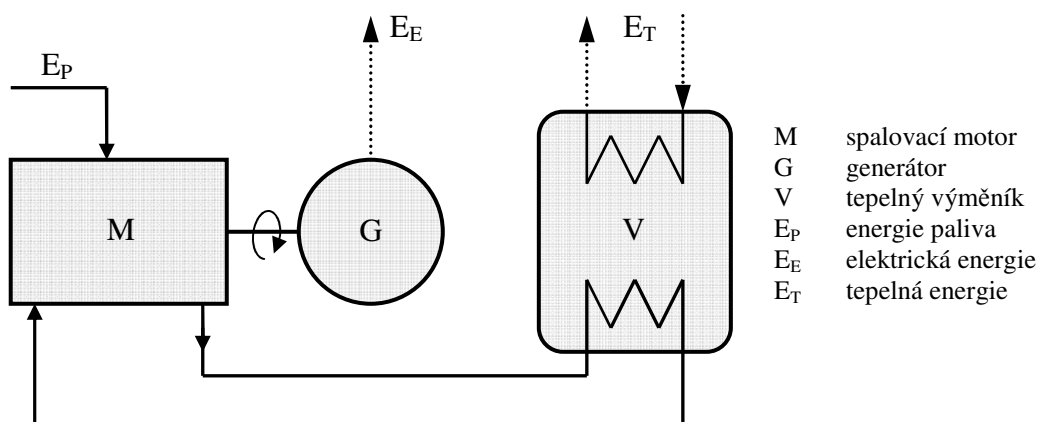
1.1 Princip kombinované výroby

Kogenerace je označení pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Nejdůležitější vlastností kogeneračních jednotek je jejich vysoká účinnost, která dosahuje v souhrnu až přes 90 %. Další výhodou vychází již z principu výroby dvojí energie, kdy jedna instalace nahrazuje buď z části, nebo i úplně, dva systémy. Vzhledem k tomu, že kogenerace může být instalována přímo v místě spotřeby energie, odpadá riziko vzniku ztrát při jejím přenosu. Trigenerace je kombinovaná výroba elektřiny a tepla, doplněná o výrobu chladu použitím absorpčního chladiče.

Ve velkých provozech, s výkony řádově v desítkách a stovkách MWe, tedy elektrického výstupního výkonu, je zpravidla využíváno parních soustrojí nebo plynových spalovacích turbín. Pro zvýšení účinnosti parního cyklu je využívána

kombinace obojího, tedy paroplynový cyklus. Jako doplněk, přidružený k větším provozům, jsou realizovány kogenerační jednotky na principu organického Rankinova cyklu. Ten je založen na stejném parním principu, avšak místo vodní páry je využito organických látek s nižší teplotou bodu varu a je tak možné znovu využít i odpadní teplo.

Nejčastěji využívaná technologie pro malé a střední kogenerační jednotky je spalovací motor s vnitřním spalováním, tedy motor zážehový či vznětový, pohánějící generátor elektrické energie. Ztrátové teplo, které je produkováno spalovacím motorem, je prostřednictvím chladicí kapaliny přiváděno do tepelného výměníku a dále využito. Spaliny motoru jsou rovněž ochlazovány a teplo stejným způsobem využito. Princip funkce kogenerační jednotky, se spalovacím motorem, dále jen KGJ, je schematicky znázorněn na obrázku č.1.



Obr. 1: Zjednodušené principiální schéma KGJ

Nejnověji jsou vyvíjeny malé kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem, tedy motorem s vnějším spalováním. Rozložení výkonu takovéto jednotky je více soustředěno na výrobu tepla. Jako miniaturní kogenerační jednotky jsou dále vyvíjeny palivové články a plynové mikroturbíny, které mají v budoucnu nahradit konvenční kotle na vytápění menších objektů, rodinných domů a bytů [1].

1.2 Provoz kogenerace v ČR

Na základě Národního akčního plánu, který přispívá k naplňování závazných cílů podílu energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie v roce 2020 a stanovuje průběžné dílčí cíle podílu energie z obnovitelných zdrojů, je výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů v ČR, podobně jako i v dalších členských státech Evropské unie, podporována. Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů [2], stanovuje podporu elektřiny z obnovitelných zdrojů, druhotných zdrojů a z vysokoúčinné kombinované výroby elektřiny a tepla. V zákoně jsou, mimo jiné, stanoveny formy a podmínky podpory pro obnovitelné zdroje energie, dále jen OZE. V případě KGJ podpora závisí především na režimu připojení výroby k elektrické rozvodné síti. Režim provozu může být dvojitý, buď tzv. „provoz s přebytky

do sítě“ nebo „přímý dodej“. S tím souvisí podpora formou „zelených bonusů“ nebo formou „výkupních cen“. Pokud není výroba připojena k elektrické rozvodné síti, není provozovatel ze zákona oprávněn nárokovat podporu. Dále, aby mohla být podpora nárokována, musí být výrobně elektřiny a tepla vydáno Ministerstvem průmyslu a obchodu Osvědčení o původu elektřiny z kombinované výroby elektřiny a tepla. Pro provozování výroby musí dále mít její provozovatel licenci, kterou vydává Energetický regulační úřad a výroba musí být připojena k elektrické rozvodné síti. Elektrifikační síť spravuje společnost ČEZ Distribuce a.s., se kterou rovněž musí provozovatel uzavřít Smlouvu o připojení. Dalším nutným krokem k čerpání finanční podpory na provoz OZE je uzavření Smlouvy o podpoře s OTE a.s., což je společnost provádějící činnost operátora trhu energií. Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu, č. 477/2012 Sb., stanovuje konkrétní druhy a parametry podporovaných obnovitelných zdrojů a způsob jejich využití pro výrobu elektřiny a tepla. Problematika provozu a podpory OZE je velmi proměnlivá a proto je třeba aktuální informace hledat například na internetových stránkách Energetického regulačního úřadu [3].

1.3 Konkrétní popis stávající technologie

KGJ, pro kterou má být navržena řídicí jednotka, je provozována již druhým rokem u rodinného domu. Je třeba zdůraznit, že se nejedná o profesionální výrobek, instalovaný dodavatelským způsobem. K vybudování kogenerace bylo přistoupeno vzhledem k rozlehlosti domu, kdy podlahová plocha otápených prostor je přibližně 520 m², a náklady na otápení jiným způsobem by byly neúnosné. KGJ je navíc využita i k ohřevu veškeré teplé užitkové vody a k ohřevu vody ve vnějším bazénu o objemu cca 30 m³. V místě je i značná spotřeba elektrické energie v dílnách.

Jako KGJ je využito původně diesel-elektrické soustrojí, vyráběné v bývalém Národním podniku ČKD, Praha – Hořovice. Toto soustrojí bylo zvoleno kvůli jeho výhodným vlastnostem, o kterých svědčí i skutečnost, že bylo vyráběno i na export do zahraničí, do zemí západního bloku, pod značkou Škoda. Soustrojí bylo původně navrženo do armádních opevnění a řada motorů 2 až 6S 110 byla vyráběna ještě v 90. letech minulého století a prodávány jsou dodnes. Motor je masivní, avšak jednoduché konstrukce, a je plná dostupnost nových náhradních dílů. Tyto motory jsou stále používány v mnoha podnicích jako provozní nebo záložní zdroje, v důlních lokomotivách a v lodích. Použité soustrojí je kombinace dvouválcového motoru a synchronního 3 fázového generátoru s derivačním budičem. V tabulkách č. 1 a 2 je uveden přehled důležitých parametrů použitého soustrojí [4].

Tabulka 1: Parametry soustrojí KGJ – motor

MOTOR		
Typ : 2 S110		poznámky
Výkon motoru	30 hp	÷ 20,1 kW trvale, ÷24,6 kW krátkodobě
Jmenovité otáčky	1500 · min ⁻¹	další verze: 1000 a 1200 min ⁻¹
Vrtání x zdvih	110 x 150 mm	kompresní poměr: 16
Počet válců x objem válce	2 x 1425 cm ³	celkový objem: 2,85 l
Měrná spotřeba paliva	195 g·hp·h ⁻¹	palivo: nafta, ± 5 %
Hmotnost motoru	679 kg	± 5 %, s elektrickým spouštěním

Tabulka 2: Parametry soustrojí KGJ - generátor

GENERÁTOR		
Typ: A9A4 13T		
Provedení	Synchronní, 3fáze	výrobce: MEZ Frenštát, krytí IP 21B
Jmenovitý výkon	18,4 kW, 23 kVA	cos φ: 0,8
Jmenovité napětí, frekvence	400/231 V, 50 Hz	zapojení: hvězda
Buzení	derivační budič	25 - 91V / 3,3 - 8,3A - DC

Soustrojí je instalováno v samostatných odhlučněných prostorách. V místě je instalována veškerá další potřebná technologie, včetně elektrického rozvaděče. Elektrický výkon pro vlastní spotřebu domácnosti, je vyveden do domovního rozvaděče a přebytky dále do elektroměrového rozvaděče, kde je osazen čtyř kvadrantní elektroměr zaznamenávající mj. dodej energie do rozvodné sítě. Tepelná energie je vedena do soustavy akumulčních nádrží, detailní popis zapojení topné soustavy a tepelných výměníků není třeba uvádět. Pro ilustraci je v příloze A.1 uveden snímek soustrojí z podnikové propagační brožury [5].

Další důležité podrobnosti týkající se nezbytných úprav a změn, budou podrobněji probrány v následujících kapitolách. Jedná se především o náhradu zastaralého budiče a úpravy ovládacích prvků a obvodů.

2 NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

2.1 Celkový návrh řešení

Před návrhem do značné míry komplexního systému, jakým je předmětný ŘS, je bezesporu nutné mít nejprve ucelenou představu, jak pracuje stávající systém, jaké jsou na něj kladeny požadavky, a jaká mohou nastat rizika při nesprávném provedení návrhu nového ŘS. Jak vyplývá ze zadání, navrhovaný systém může zahrnovat i částečnou modernizaci již instalovaných zařízení, která umožní přenést dříve manuální obslužné úkony na samotný ŘS, bez nutnosti zásahů obsluhy.

2.1.1 Požadavky

Stávající koncepce předmětné KGJ neobsahuje téměř žádný prvek vyspělé elektronické automatizace. Všechny obslužné úkony, mimo regulace fázových napětí při provozu soustrojí v ostrovním režimu, které obstarává dnes již nevyhovující vibrační regulátor, jsou závislé na ruční obsluze. Nezbytné úkony, jako je spouštění motoru, fázování generátoru k rozvodné síti, regulace účinníku, regulace výkonu nebo následné odstavení z provozu, nejsou nikterak zautomatizovány. Základní myšlenkou je tedy přenechat jednotlivé ovladače v režii ŘS a celý systém obsluhovat spíše uživatelským způsobem. ŘS musí být natolik nezávislý, aby KGJ mohla být obsluhována i laickou osobou, bez zvýšení rizika chybných úkonů obsluhy. Mimo rutinních úkonů mohou nastat také nepředvídané události, na které je třeba urychleně reagovat. I v tomto případě musí být ŘS schopen adekvátně zareagovat, ať už bezpečným odstavením KGJ, anebo v méně naléhavém případě alespoň hlášením vzniklého stavu.

Příkladem může být situace, kdy dojde k úbytku tlaku v mazacím systému motoru, například v důsledku zanesení olejového filtru nad únosnou mez. Reagovat na vzniklou situaci pouhým zastavením přívodu paliva, jako je tomu nyní, není dostatečné. Generátor, přifázovaný k elektrické síti, může přejít do motorického režimu, a ještě před vysazením ochran může po určitou dobu pohánět motor. Ve výsledku může dojít nejen ke značné spotřebě elektrické energie z rozvodné sítě, ale navíc může v důsledku pohybu částí motoru při absenci maziva dojít k jejich poškození. Úkolem ŘS by v tomto případě bylo včas zjistit nedostatečný tlak v mazací soustavě motoru, ihned snížit výkon soustrojí a korektně odpojit generátor od rozvodné soustavy. Následně pak zastavit motor a přívod paliva a problém hlásit obsluze.

Zmíněný příklad naznačuje řešení jedné z mnoha možných mimořádných událostí. Dalším vhodným příkladem očekávaných schopností ŘS může být například požadavek na spuštění KGJ. Stávající způsob spuštění je následující. Motor je vybaven dekompresorem usnadňujícím start studeného motoru. Obsluha má tedy možnost startovat bez přehřátí motoru pomocí dekompresoru. Vhodnější způsob je však nejprve zapnout oběhové čerpadlo chladicího systému motoru a rozvedením teplé vody z akumulčních nádrží motor částečně přehřát. Již při teplotě vody v motoru cca 20°C, je možné nastartovat běžným způsobem, bez použití dekomprese. Po nastartování je nutné udržovat motor v nižších než jmenovitých otáčkách, dokud není

dosaženo minimální přípustné hodnoty tlaku v mazací soustavě. Poté je možno nastavit pracovní otáčky motoru a přejít k fázování. Fázování je opět ruční, pomocí tří dvojic žárovek, přemostujících kontakty fázovacího stykače. Fázování je tzv. „na tmu“, tedy pokud je pro všechny tři fáze na obou stranách kontaktů stykače stejné napětí a ve stejné fázi, žárovky nesvítí a je dosaženo synchronismu. Rozpoznat přesný okamžik fázování a včas sepnout stykač vyžaduje jisté zkušenosti, nepřesným načasováním dochází k proudovým nárazům. Při nevhodném fázování může dojít až k vysazení nadproudových ochran, čemuž je třeba předcházet. Sepnutím stykače je tedy generátor připojen synchronně k síti, zvyšováním mechanického výkonu motoru je pak nastaven požadovaný výkon KGJ. Souběžně musí být regulován proud budiče generátoru, aby byl udržován konstantní požadovaný účinek přibližně 0,95. Nyní je KGJ uvedena do chodu, avšak nadále je nutno kontrolovat parametry, které se mohou zejména po dobu první hodiny provozu měnit v důsledku ohřevu motoru, vinutí generátoru a i prostor celé strojovny. Celou popsanou proceduru by na povel obsluhy měl být schopen obstarat ŘS.

Hlavním požadavkem je, aby ŘS byl autonomní a umožňoval stabilní chod, bez nutnosti zásahů ze strany obsluhy. Obsluha KGJ má být pokud možno jednoduchá, zároveň musí být kladen důraz na bezpečnost provozu, ŘS tedy musí za chodu kontrolovat důležité parametry a předcházet možným haváriím. Součástí systému musí být vhodná signalizace, ŘS by měl umožnit dohled nad provozním stavem a informovat obsluhu o případných událostech během chodu.

2.1.2 Topologie řídicího systému

Rozborem současného způsobu obsluhy soustrojí a k němu přidružených ovladačů v elektrickém rozvaděči KGJ lze odvodit nejvhodnější koncepci ŘS. Z praktického hlediska by bylo velmi nevýhodné pojmout ŘS jako jediný modul, který by bezprostředně ovládal všechny periferie a čidla, řídil obslužné procedury, vykonával dohled nad chodem a disponoval uživatelským rozhraním. Vzhledem k povaze prostředí, je nutné minimalizovat rizika poškození ŘS a jeho částí, především v důsledku vibrací, teploty, zvýšené prašnosti a v neposlední míře i vlivem elektromagnetického rušení.

Jako vhodnější řešení se jeví systém realizovat z více jednotek. Umístění každé jednotky by mělo odpovídat zaměření funkcí daného modulu, tak aby byly minimalizovány délky vedení k čidlům a dalším periferiím náležejícím jednotce. Z pohledu řízení chodu KGJ lze chápat motor a generátor jako dva oddělené celky, což vede k realizaci dvou jednotek. Tyto jednotky budou zcela odlišné, jedna bude uzpůsobena pouze k obsluze motoru, druhá k obsluze generátoru, obě však musí pracovat v součinnosti. Pro zajištění součinnosti jednotek budou tyto provedeny jako podružné a ŘS bude doplněn o třetí, hlavní jednotku. Hlavní a podružné moduly musí komunikovat a proto budou propojeny vhodným typem sběrnice. Na rozdíl od podružných, hlavní jednotka bude disponovat potřebným uživatelským rozhraním a její umístění může být zvoleno, s přihlédnutím k vlastnostem sběrnice, prakticky libovolně.

2.1.3 Přiřazení úloh

Před přistoupením k detailnímu návrhu ŘS a jeho částí bylo nejprve nutné stanovit úkoly a přiřadit prostředky pro každou jednotku zvlášť. Bylo rozhodnuto, že systém bude tvořen jednotkou motoru, generátoru a hlavní jednotkou, dále jen JM, JG a HJ.

Úkolem JM bude obstarat vše, co souvisí s provozem spalovacího motoru. V první řadě se jedná o měření následujících hodnot:

- napětí akumulátoru
- množství paliva v nádrži
- teplota vody v motoru
- otáčky klikové hřídele
- tlak v mazací soustavě

V režii JM dále bude:

- řízení servomotoru k regulaci dávky vstřikovaného paliva
- ovládání stykače startéru
- ovládání relé oběhového čerpadla
- elektromagnetický ventil přívodu paliva
- kontrola dobíjení akumulátoru

Na základní úrovni bude jednotka vykonávat některé operace bez pokynů HJ, jde například o obsluhu startéru s ohledem na otáčky motoru, spínání čerpadla, atd.

Úkolem JG bude kontrola parametrů elektrického proudu a napětí, v závislosti na zvoleném režimu provozu KGJ, a také provádění souvisejících obslužných rutin. Sledované parametry budou následující:

- fázová napětí generátoru, rozvodné sítě
- fázový proud
- frekvence
- fázový posuv napětí a proudu

v režii JG dále bude:

- ovládání stykače fázování
- regulace buzení generátoru

JG bude opět na základní úrovni vykonávat některé operace zcela samostatně. Jde hlavně o udržování požadovaného účinníku při paralelním chodu KGJ s rozvodnou sítí, nebo o udržování konstantního napětí generátoru v případě ostrovního režimu. Fázování bude sice na pokyn HJ, ale bude provedeno samostatně JG.

Poslední částí systému je HJ, která bude vykonávat komplexní dohled nad KGJ, bude prostřednictvím sběrnice provádět odečet aktuálních hodnot a vysílat povely podřízeným jednotkám.

HJ bude zahrnovat:

- uživatelské rozhraní
- registr hodnot provozních parametrů
- modul umožňující vzdálený dohled nad KGJ

Z odečtených údajů z podružných jednotek budou v HJ vypočítávány hodnoty provozních parametrů pro zobrazení v příslušných jednotkách.

Přiřazením úloh byla jasně stanovena specializace každé jednotky, která musí být navržena vždy tak, aby byla schopna vykonávat veškeré očekávané úkony. Pro každou jednotku muselo být vytvořeno odpovídající obvodové schéma a navržena DPS. V základních rysech bylo třeba již při návrhu uvažovat předpokládané řešení budoucího firmware pro konkrétní jednotku.

2.2 Návrh hlavní jednotky

Již před podrobným návrhem bylo zřejmé, že HJ nebude z hlediska hardwarového návrhu mezi ostatními nejsložitější, zato však bude na prvním místě co do složitosti firmware a jeho nároků na výpočetní schopnosti procesoru. Kvůli uživatelskému rozhraní budou zřejmě i poněkud zvýšeny nároky na vnitřní paměť procesoru. Z tohoto důvodu bylo třeba pro HJ zvolit MCU s dostatečně výkonnou architekturou. Aby byl umožněn vzdálený dohled nad KGJ, bylo nutné rozšířit hlavní jednotku ŘS o vhodný komunikační modul. Z několika možných řešení bylo uvažováno využití přenosu zpráv sítí GSM a druhou možností pak komunikace s ŘS v síti Ethernet.

2.2.1 Volba MCU

Pro HJ byl vybrán MCU firmy Atmel, typ AT91SAM7S512. Jedná se o 32b MCU, z rodiny ARM7TDMI v pouzdře LQFP. Procesor disponuje pamětí Flash o velikosti 512 kB, 64 kB paměti SRAM a mnoha periferiemi. Mimo jiné je důležitá přítomnost sériového periferního rozhraní SPI a dvou rozhraní pro sériovou komunikaci UART. Podrobnější informace lze nalézt v dokumentaci výrobce [6]. K zapsání programu je procesor vybaven funkcí SAM-BA Boot Assistant. Princip spočívá ve využití trvale zapsaného zavaděče v paměti ROM. Jeho vyvoláním, po resetu MCU, je do paměti Flash zapsán program, umožňující přímo prostřednictvím integrovaného rozhraní USB a pomocí volně dostupného programu SAM-BA, odeslat z PC do paměti MCU zkompilovaný program v binárním souboru. Mimo to je procesor vybaven rozhraním pro ladění programu DBGU a EmbeddedICE.

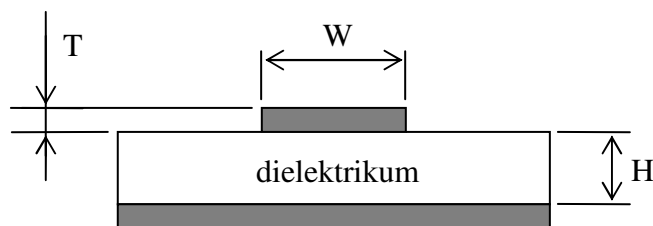
Procesor vyžaduje jen minimum periferních součástek, jde především o blokovací kondenzátory napájení MCU. Pro napájení je potřeba jen jedno napětí 3,0 až 3,6 V, přičemž jádro je napájeno napětím o velikosti cca 1,8 V z vlastního vestavěného regulátoru napětí. Vzhledem k tomu, že rozvod napájení jednotek, dle návrhu, bude veden spolu s komunikační sběrnicí a bude připojen přímo na 12 V akumulátor, který bude zároveň sloužit jako záloha, není možné MCU napájet pouze lineárním stabilizátorem. Zdroj napájení bude konkrétněji popsán v kapitole 2.2.4.

2.2.2 GSM modul

Pro odesílání hlášení ŘS uživateli bylo rozhodnuto využít přenos SMS zpráv sítí GSM. Na trhu je k dispozici poměrně mnoho různých GSM komunikačních modulů, přičemž některé jsou realizovány už jako hotové výrobky, určené k přímému použití, například pro zabezpečovací techniku. V tomto případě však bude použit samostatný modul pro obecné použití od firmy SIMCom, modul SIM900. Jedná se o GSM/GPRS modul kompatibilní s GSM Phase 2/2+, pracující v pásmech GSM 850 MHz, EGSM 900 MHz, DCS 1800 MHz a PCS 1900 MHz. Jádrem modulu je procesor ARM926EJ-S s taktovací frekvencí 156 MHz. Modul vyžaduje napájecí napětí v rozsahu 3,4 až 4,5 V, není tolerantní k napájení 5 V. Přestože udávaná typická spotřeba ve sleep módu je pouze 1,5 mA, napájecí obvody musí být schopny dodat krátkodobě proud 2A. Modul je v pouzdře SMT s 68 vývody a má rozměry 24 x 24 x 3 mm. Další údaje o GSM modulu lze nalézt v jeho katalogovém listu [7].

Pro komunikaci s nadřazeným systémem využívá SIM900 rozhraní UART, přičemž hardwarová kontrola přenosu nemusí být použita a ke komunikaci s MCU tak postačí pouze dva vodiče. Napětí logických úrovní odpovídá úrovním rozhraní UART použitého MCU. Pokud má být modul připojen ke sběrnici s jinými úrovněmi, je nutné použít převodník, pro komunikaci s PC sériovým portem například MAX3232. Ostatní rozhraní modulu, jako jsou GPIO pro klávesnici, SSI pro externí paměť či displej, audio vstup a výstup nebo analogové vstupy pro AD převodník zůstanou nevyužity. Vhodné je na DPS vyvést druhé rozhraní UART, které je servisní a může být využito pro změnu firmware. Pro indikaci stavu modulu je rovněž vhodné využít výstupy pro řízení status-LED. Zcela nezbytné je pak vyvedení RF signálu na vhodný typ konektoru pro připojení antény, například SMA nebo U.FL. Vzhledem k oblasti frekvenčního pásma GSM signálu již musí být toto propojení řešeno jako mikropáskové vedení.

Mikropáskové vedení musí být navrženo pro požadovanou hodnotu charakteristické impedance $Z_0 = 50 \Omega$. Návrh vychází z předpokladu, že materiál, použitý pro výrobu DPS, bude FR-4, s relativní permitivitou, pro použité frekvenční pásmo, $\epsilon_r = 4,3$ o standardní tloušťce $H = 1,55 \text{ mm}$ a s měděnou vrstvou po obou stranách o tloušťce $T = 35 \mu\text{m}$. Pro názornost je na obrázku č. 2 uveden průřez DPS s mikropáskovým vedením.



Obr. 2: Průřez dvouvrstvou DPS s mikropáskovým vedením

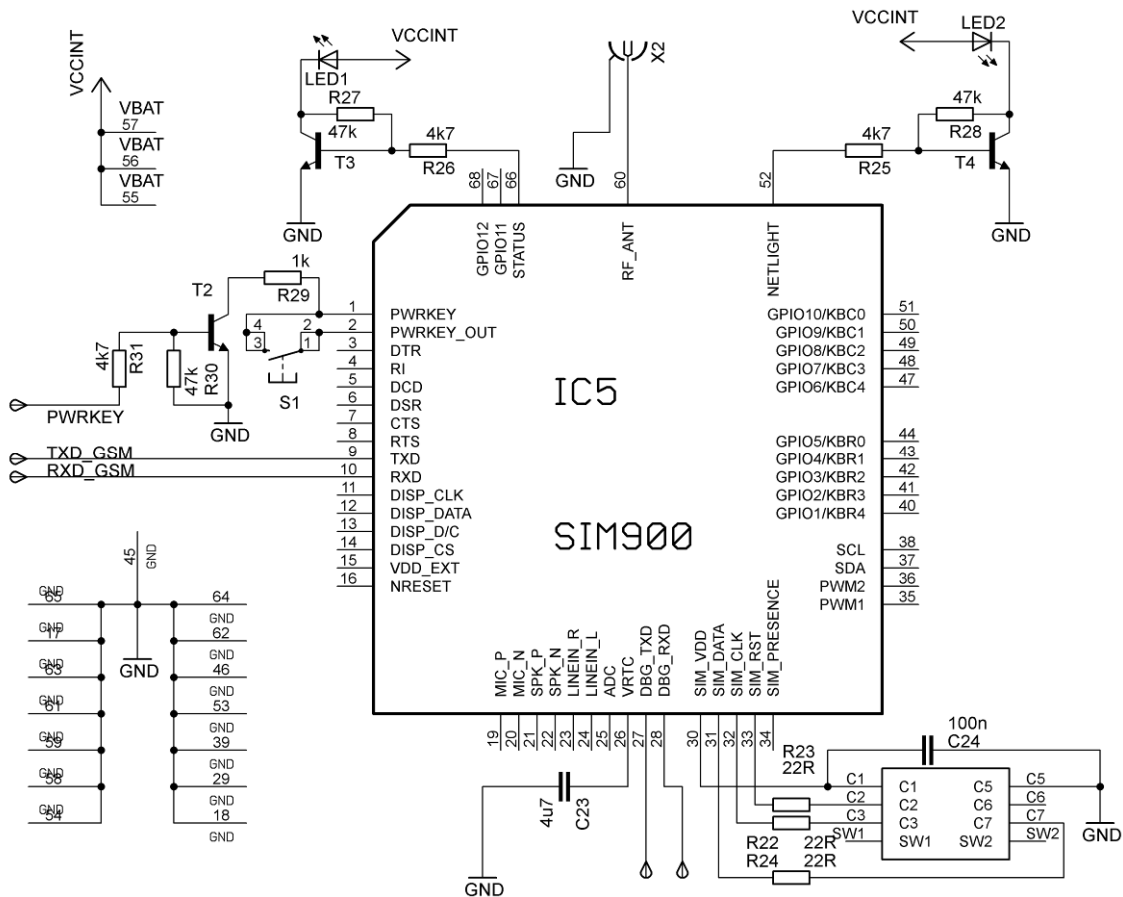
Výpočet šířky je proveden podle vztahu (1) [8]. Šířka mikropáskového vedení W tedy vychází 2,84 mm. Pro ověření byl návrh proveden pomocí online kalkulátoru mikropáskových vedení [9] se srovnatelným výsledkem.

$$W = \frac{e}{0,8} = \frac{e}{0,8} = 2,84 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\frac{5,88 \cdot H}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r + 1,41}} - T = \frac{5,88 \cdot 1,55 \cdot 10^{-3}}{50 \sqrt{4,3 + 1,41}} - 35 \cdot 10^{-6}$$

Pro spuštění modulu je třeba propojit pin PWRKEY a PWRKEY_OUT po dobu přibližně 1 s. To lze provést například tlačítkem, což však pro daný účel nevyhovuje. Vhodným řešením je využití unipolárního tranzistoru, řízeného MCU. Další možností je přivést na pin PWRKEY logickou úroveň L, přičemž je třeba respektovat maximální přípustnou proudovou zatížitelnost pinu, 0,3 mA. Po další prodlevě, trvající minimálně 2,2 s, je možné s modulem začít komunikovat pomocí sériového portu. Poslední nezbytnou periferií k GSM modulu je rozhraní a konektor pro kartu SIM. Napájení SIM je řešeno vestavěným regulátorem napětí, mimo blokovací kondenzátor a ochranné rezistory není potřeba dalších součástek. Zapojení GSM modulu je uvedeno ve schématu na obrázku č. 3.

Účelem využití GSM modulu je možnost uvědomit obsluhu o mimořádných událostech, modul nebude využit pro získávání aktuální provozních dat. Modul komunikuje s nadřazeným systémem prostřednictvím AT příkazů, použitá sada příkazů je dle normy Evropského telekomunikačního a standardizačního institutu GSM07.05, GSM07.07 a doporučení ITU-T [7]. Způsob použití AT příkazů pro komunikaci s modulem SIM900 a jejich struktura budou podrobněji popsány v samostatné kapitole.



Obr. 3: Schéma zapojení GSM modulu

2.2.3 Ethernet modul

Pro získání aktuálních provozních dat KGJ může být využita komunikace v síti Ethernet. Konkrétní zamýšlená aplikace je jednoduchý webový server, kde například prostřednictvím internetového prohlížeče uživatelského PC bude zobrazena stránka s aktuálními údaji z ŘS. Další možností pak může být i vzdálené povelování ŘS mimo uživatelské rozhraní HJ.

Jako ethernetový řadič bude využit v současné době poměrně rozšířený kontrolér ENC28J60 od firmy Microchip. Jde o samostatný 10BASE-T ethernetový řadič, kompatibilní s IEEE 802.3. Z označení vyplývá teoretická maximální přenosová rychlost 10 Mb/s, přenos v základním pásmu a jako přenosové médium kabel TP. Řadič zahrnuje vrstvu MAC a PHY, tedy datovou a fyzickou vrstvu modelu OSI. Kontrolér obsahuje 8 kB paměti RAM pro buffer a vyžaduje externí taktovací kmitočet 25 MHz. Řadič nedisponuje výrobcem přidělenou fyzickou adresou MAC, ta musí být dodatečně vhodně zvolena, aby nedošlo ke konfliktu v síti. S řídicím procesorem komunikuje prostřednictvím rozhraní SPI, do maximální frekvence SCLK 20 MHz.

Jako součást HJ bude použit již hotový modul s uvedeným kontrolérem, periferními součástkami a konektorem RJ45. Modul využívá napájecí napětí 3,3 V, logické úrovně rozhraní SPI korespondují s použitým MCU. Sériové rozhraní SPI vyžaduje propojení modulu a MCU pomocí 4 vodičů. Podrobnější údaje lze nalézt v dokumentaci výrobce [10].

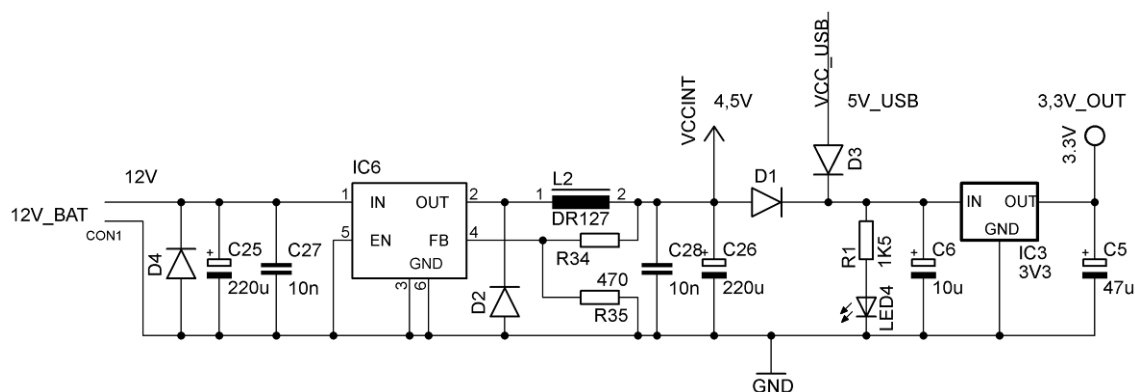
2.2.4 Napájecí obvody

Pro napájení jednotek ŘS bylo zvoleno následující řešení.

Zdrojem napětí bude startovací olověná akumulátorová baterie 12 V, s kapacitou 180 Ah. Akumulátor může sloužit dočasně jako záložní zdroj, v případě že dojde k poruše dobíjení. Rozvod napájení všech jednotek ŘS bude řešen vodiči, vedenými spolu s komunikační sběrnici. Součástí HJ bude GSM modul, který vyžaduje zdroj o napětí cca 4,5V, schopný dodat proud až 2 A. Využití lineárního stabilizátoru by bylo nevhodné, ztrátový výkon, přeměněný stabilizátorem na teplo, by byl přes 10W. Vhodným řešením je napájení modulu spínaným měničem z 12 V na požadovaných 4,5 V. Toto napětí bude současně použito k napájení GSM modulu a k napájení low-drop stabilizátoru napětí 3,3 V pro napájení MCU.

Pro spínaný stejnosměrný měnič bude využit integrovaný step-down stabilizátor LM2596, firmy Texas Instruments. Stabilizátor je nastavitelný a je při napájecím napětí 40 V schopen dodat maximální výstupní proud 3 A při napětí v rozsahu od 1,2 do 37 V. V katalogovém listu výrobce [11] je uvedeno typické obvodové zapojení stejnosměrného snižujícího měniče i s návrhem hodnot součástek pro požadované výstupní napětí. Uváděná účinnost měniče je pro dané zapojení a patřičné hodnoty napětí přes 80 %.

Napájení MCU bude řešeno low-drop stabilizátorem pevného napětí 3,3 V, konkrétně LM1117T. Aby bylo možné ladit a programovat MCU v HJ i bez externího zdroje napájení, je stabilizátor odděleně napájen z konektoru USB, napětím 5 V. Celkové schéma zapojení napájecích obvodů pro HJ je na obrázku č. 4.



Obr. 4: Návrh zapojení napájecích obvodů HJ

2.2.5 Uživatelské rozhraní

Při stanovení požadavků na ŘS bylo mj. rozhodnuto, že k řízení KGJ bude namísto stávajícího manuálního způsobu ovládání sloužit uživatelské rozhraní HJ. Uživatelské rozhraní bude pouze jednoduché, tvořeno displejem a tlačítky. Pro volbu provozního režimu a nastavování požadovaných parametrů chodu KGJ bude vytvořeno programové menu.

Použitý displej bude LCD grafického typu, s dvěma řadiči KS108 a rozlišením 128 x 64 bodů, každý řadič adresuje 64 x 64 bodů. Displej vyžaduje napájecí napětí alespoň 4,5 V, pro komunikaci však postačují přímo logické úrovně výstupů použitého MCU, neboť logická úroveň H je již od hodnoty 2 V. Displej dále využívá pro regulaci kontrastu záporné napětí o hodnotě přibližně -7 V. Některé typy displejů vyžadují externí zdroj záporného napětí, použitý typ LCD však již disponuje vlastní nábojovou pumpou. Pro komunikaci LCD s procesorem je zapotřebí 14 vodičů. Datových vodičů je 8, 2 pro výběr řadiče, další pro hodinový signál, reset, čtení/zápis, data/instrukce a poslední k řízení podsvícení. Protože grafický displej s řadičem KS0108 nemá žádnou vlastní paměť pro znakovou sadu, musí být uložena v paměti MCU.

K obsluze budou použita 4 tlačítka, připojená k I/O pinům MCU. Přestože procesor disponuje vnitřními programovatelnými pull-up rezistory, je vhodné připojit rezistory externí. Dle katalogového listu [6] může v důsledku výrobní technologie u některých pinů dojít k nežádoucím jevům. Použitý MCU disponuje funkcí filtrace zákmitů na vstupech, což je při použití tlačítek výhodné.

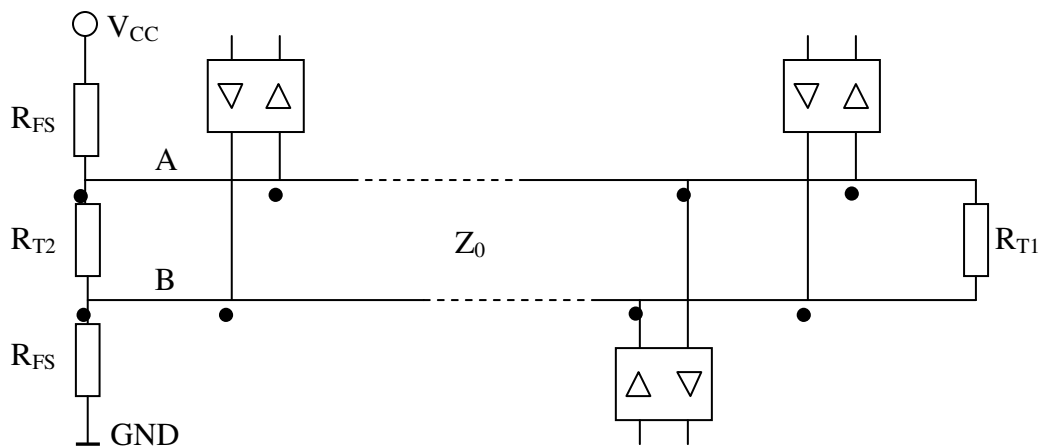
2.2.6 Sběrnice a komunikace s periferiemi

Po srovnání parametrů několika v současnosti používaných komunikačních sběrnic, bylo rozhodnuto že pro komunikaci jednotek v rámci ŘS bude využita sériová sběrnice RS-485.

Rozhraní sběrnice RS-485 je standardizované, využívá dvou vodičů, značených A a B. Jako logická úroveň je bráno rozdílové napětí mezi vodiči, logická úroveň tak není vztažena k referenční úrovni. Jako přenosové médium je nejčastěji použit kroucený pár vodičů, maximální délka vedení může být až 1200 m. Na jedno vedení může být připojeno až 32 komunikujících jednotek s třístavovými výstupy. Přenosová rychlost může být až 10 Mb/s, v závislosti na délce sběrnice.

Použití standardu RS-485 je díky odolnosti vůči rušení vhodné pro průmyslové aplikace, využívá jej například sběrnice MODBUS. [12] Komunikační protokol pro RS-485 není standardizován, proto pro použití v ŘS musí být vytvořen vlastní protokol.

K potlačení odrazů na vedení je důležité správně navrhnout impedanční zakončení linky. Na konce vedení je třeba připojit zakončovací rezistor, tzv. terminátor. Protože ale sběrnice je tzv. multipoint, nelze pevně určit, která jednotka je vysílač, a která přijímač. Může také dojít ke stavu, kdy všechny jednotky budou ve stavu vysoké impedance, na sběrnici by tak nebyl definován klidový stav, tedy napětí mezi A a B menší než -0,2 V. Na obrázku č. 5 je zapojení sběrnice s terminačními rezistory R_T , doplněné o tzv. fail-safe rezistory R_{FS} , definující klidový stav sběrnice.



Obr. 5: Zapojení terminačních rezistorů sběrnice

Charakteristická impedance kroucené dvojlinky (TP kabelu) Z_0 je přibližně 120 Ω . Hodnota terminátoru R_{T1} musí odpovídat charakteristické impedanci vedení a má hodnotu rovněž 120 Ω . Pro výpočet hodnot rezistorů R_{FS} , podle [15], je uvažováno napájecí napětí $V_{CC} = 3,3$ V s tolerancí 5 %. Jako napětí mezi vodiči V_{AB} , je uvažována hodnota klidového stavu sběrnice, tedy 200 mV, s maximálním přípustným rušivým napětím 50 mV. Výpočet hodnot rezistorů R_{FS} je pak dle vztahu (2):

$$R_{FS} = \left(\frac{V_{CC}}{V_{AB}} + 1 \right) \cdot 27,8 = \left(\frac{3,267}{0,25} + 1 \right) \cdot 27,8 = 391 \Omega \quad (2)$$

Z výrobní řady je volena hodnota rezistorů $R_{FS} = 390$ Ω . Výpočet hodnoty terminátoru R_{T2} je dle vztahu (3):

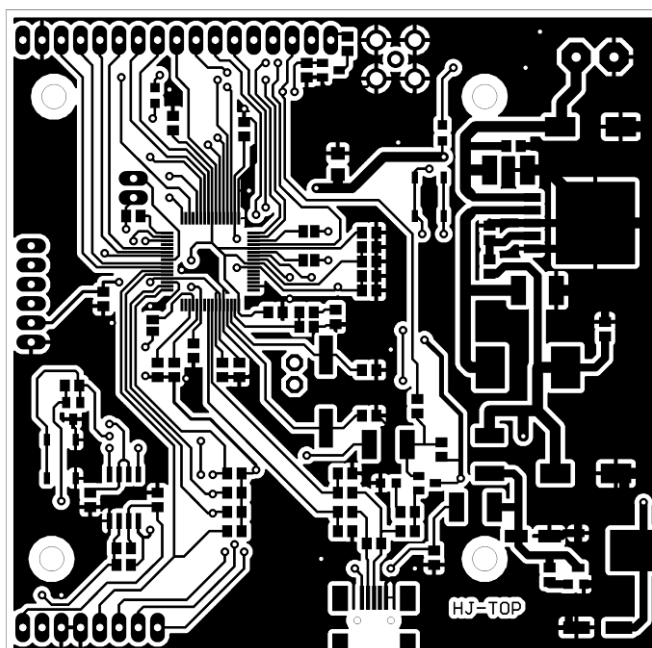
$$R_{T2} = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} - \frac{1}{2 \cdot R_{FS}}} = \frac{1}{\frac{1}{120} - \frac{1}{2 \cdot 390}} = 142 \Omega \quad (3)$$

Jako převodník mezi rozhraním UART a sběrnici RS-485 je použit integrovaný obvod ST3485E, který podporuje napájecí napětí v rozsahu od 3,3 až do 7 V, stejný převodník je použit ve všech jednotkách ŘS. Protože sběrnice RS485 nemá standardizovaný komunikační protokol, byl navržen vlastní jednoduchý způsob komunikace mezi jednotkami. Z pohledu programové obsluhy rozhraní UART

a převodníků pro sběrnici RS485 jsou JG a JM provedeny jako jednotky podružné, tzv. slave, a HJ jako tzv. master. HJ tedy vyzývá JM a JG ke komunikaci, samostatně jsou podružné jednotky neaktivní. Komunikační rámec je tvořen 10 B, přičemž 1. Byte je adresa jednotky, pro kterou je rámec určen. Poslední Byte je pak vyhrazen pro kontrolu chyb v rámci, pomocí ověření kontrolního součtu CRC8.

2.2.7 Návrh DPS hlavní jednotky

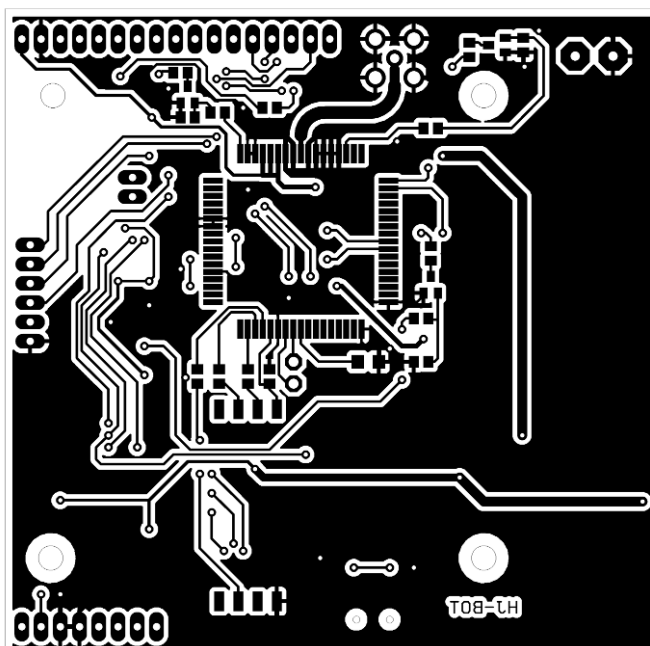
Návrh DPS, stejně jako schéma, byl vytvořen v programu Eagle. DPS je pojata jako oboustranná, pro osazení součástkami na horní i spodní straně desky. Všechny součástky jsou v provedení SMD, na spodní straně desky je umístěn mj. GSM modul, konektor pro vložení karty SIM a mikropáskové vedení k SMA konektoru. Na horní straně DPS je umístěn mikroprocesor a veškeré součástky spínaného měniče napětí.



Obr. 6: Návrh DPS hlavní jednotky – horní strana

Dutinkové lišty, pro připojení periferních částí HJ, tj. je pro displej, tlačítka a ethernetový modul, jsou po stranách desky. Pro napájecí vodiče je osazena šroubovací svorkovnice. Propojení vrstev spojů je řešeno využitím prokovů, DPS je určena k profesionální výrobě a je navržena podle požadovaných návrhových pravidel. Nejmenší šířka spoje a mezery mezi spoji je 0,3 mm, průměr vrtaných otvorů pro prokovení vrstev je 0,6 mm.

Pro zlepšení odolnosti vůči okolnímu rušení je v návrhu využito „vylití“ volných ploch a mezer mezi spoji, spojené s nulovým potenciálem zdroje. Rozmístění součástek zdrojové části je voleno tak, aby bylo co nejvíce zamezeno možnému rušení okolních signálních spojů. K montáži je DPS opatřena symetricky rozmístěnými otvory o průměru 3,2 mm. Výsledná deska má rozměry 87,0 x 85,5 mm, návrh motivu DPS v měřítku 1:1 je na obrázku č. 6 a 7. Kompletní schéma zapojení HJ je v příloze B.1, osazovací plán v příloze B.2.



Obr. 7: Návrh DPS hlavní jednotky – spodní strana

2.3 Jednotka motoru

Z důvodu minimalizace délky vedení k analogovým čidlům má být JM umístěna co možná nejbližší motoru. Vzhledem k tomu, že v režii JM je i ovládání motorového spouštěče, který je napájen startovacím akumulátorem, je JM připojena ke zdroji 12 V a podle návrhu topologie ŘS bude zprostředkovávat napájení všem ostatním jednotkám na sběrnici. Pro JM byl zvolen 8 bitový mikrokontrolér ATmega16, v pouzdře PDIP 40. Je mj. vybaven 16 kB paměti flash, sériovým rozhraním UART, čtyřmi I/O porty a AD převodníkem s rozlišením až 10 b. Jde o velmi rozšířené MCU a pro daný účel plně vyhovuje.

2.3.1 Analogová čidla

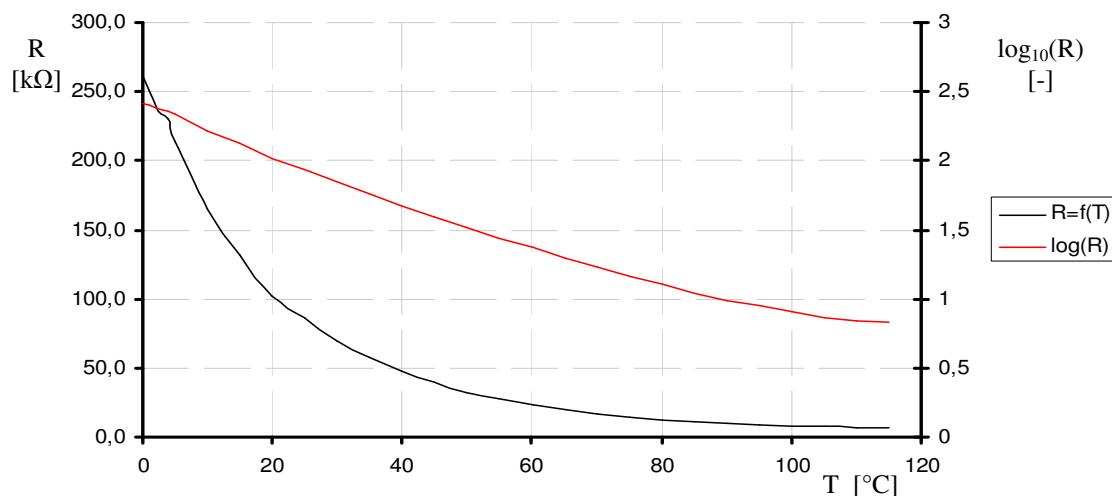
Pro kontrolu hladiny paliva je použit plovákový palivoměr, použitý např. ve vozech Škoda Felicia. V principu jde o drátový reostat s hodnotou 430 Ω , jehož jezdec je upevněn na ramenu s plovákem. Pro snímání hladiny je zapojen jako odporový dělič a úbytek napětí je snímán pomocí integrovaného AD převodníku v MCU. Aby maximální hodnota výstupního napětí děliče při plné nádrži odpovídala plnému rozsahu AD převodníku při vnějším referenčním napětí 5 V, je do série vřazen rezistor o hodnotě 680 Ω a měřidlo je připojeno k napětí 12 V. Měřič paliva je lineární a tvar nádrže krychlový, takže hodnota výstupního napětí je přímo úměrná množství paliva v nádrži.

K měření teploty motoru měl být podle původního záměru použit termistor NTC, se záporným teplotním součinitelem odporu. Praktickou zkouškou změřená teplotní charakteristika použitého termistoru, pro rozsah teplot 0 až 115 $^{\circ}\text{C}$ s krokem 5 $^{\circ}\text{C}$, je na obrázku č.8. Jak je z charakteristiky zřejmé, termistor NTC vykazuje značně

nelineární závislost odporu na teplotě. Aby naměřená hodnota teploty mohla být reprezentována ve stupních Celsia, musí být závislost alespoň přibližně linearizována. [13]. Pro velmi přesné vyhodnocení teplotní závislosti termistoru NTC, s přesností $\pm 0,15 \text{ }^\circ\text{K}$, by bylo možné využít rovnici (4), přičemž charakteristické konstanty a, b, c se určují při teplotách 25, 40 a 70 $^\circ\text{C}$.

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln(R) + c \cdot [\ln(R)]^3 \quad (4)$$

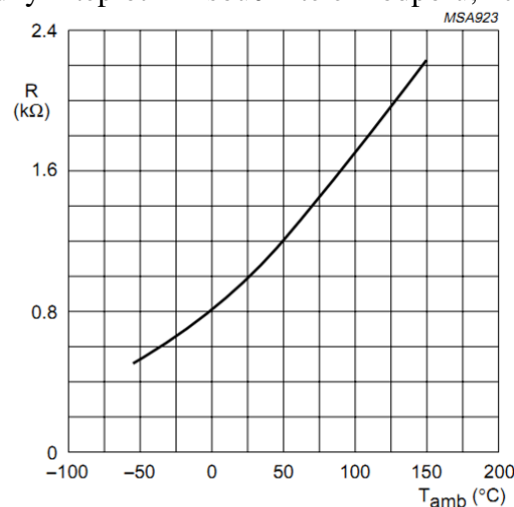
Pro zjednodušení byl k danému účelu uvažován jako dostačující údaj dekadický logaritmus měřené hodnoty odporu a vzniklá nepřesnost měla být zanedbána.



Obr. 8: Závislost odporu NTC termistoru na teplotě

Později se zmiňované řešení projevilo jako nevhodné, neboť nejvíce využívaná oblast charakteristiky, tedy rozmezí teplot přibližně 60 - 90 $^\circ\text{C}$, vykazuje již malou strmost. Výsledkem je téměř nevyužitá převážná část rozsahu AD převodníku pro měření teplot do 20 $^\circ\text{C}$ s čímž souvisí velmi nepřesné měření teploty v pracovním rozsahu.

K měření teploty motoru bylo tedy zvoleno teplotní čidlo KTY81 - 220. Jedná se o křemíkové čidlo s kladným teplotním součinitelem odporu, které je určeno pro měřicí a řídicí techniku.



Obr. 9: Teplotní závislost odporu čidla KTY81

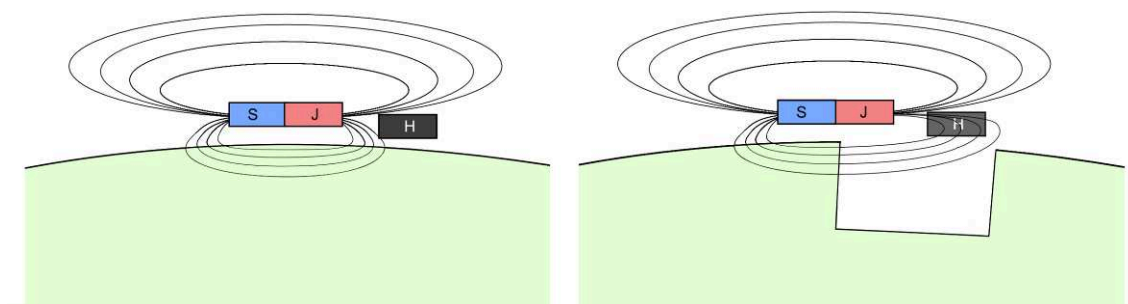
Hlavní výhodou tohoto čidla je přibližně lineární závislost odporu na teplotě, při měření teploty v rozsahu 20 - 150 °C lze závislost již zcela považovat za lineární, viz charakteristika na obrázku č. 9 [16]. Čidlo je vyráběno v pouzdře SOD70 a obdobně jako v předchozím případě je toto čidlo součástí odporového děliče napětí, jehož výstup je přiveden na AD převodník integrovaný v MCU.

Pro kontrolu tlaku v mazací soustavě motoru je použit místo čidla pouze jednoduchý tlakový spínač. Sensory pro měření tlaku v řádech MPa jsou relativně drahé, kvůli nárokům na mechanické provedení. V dané aplikaci však není důležitý absolutní údaj o hodnotě tlaku a stačí pouze informace v podobě logické úrovně, zda je v soustavě alespoň minimální povolený pracovní tlak oleje. Je použit tlakový spínač, určený pro automobily značky škoda, který je pomocí redukce vložen do mazací soustavy motoru.

2.3.2 Měření a řízení otáček motoru

Pro potřeby ŘS je nutné měřit otáčky spalovacího motoru. Bylo by sice možné určit otáčky výpočtem z frekvence střídavého napětí generátoru, avšak tento způsob by byl z mnoha důvodů nevhodný, především kvůli skutečnosti, že měření frekvence bude obstarávat jiná jednotka. Pro měření byla zvolena jiná metoda s využitím čítače integrovaného v MCU.

Jako generátor impulzů je využita Hallova sonda s integrovaným komparátorem umístěná v magnetickém poli neodymového magnetu, reagující na deformaci jeho magnetického pole, vlivem přítomnosti ocelového setrvačnicku motoru v jeho blízkosti. Snímač může být např. typ TLE4935, který pracuje s napájecím napětím v rozsahu od 3,8 do 24 V. Citlivost 30 mT i maximální pracovní teplota čidla 150 °C plně vyhovují. Po obvodu setrvačnicku je vytvořeno 6 zahloubených otvorů, pro manipulaci setrvačnickem pomocí montážní páky. Při průchodu každého z těchto otvorů magnetickým polem snímače nedochází k deformaci tvaru magnetického pole, jako je tomu v případě plné masivní části setrvačnicku, což zaznamená čidlo magnetického pole a je tak vytvořen pulz, který je přiveden na vstup čítače v MCU, určený pro externí zdroj signálu. Pro názornost je na obrázku č. 10 znázorněn princip činnosti snímače pro měření otáček.



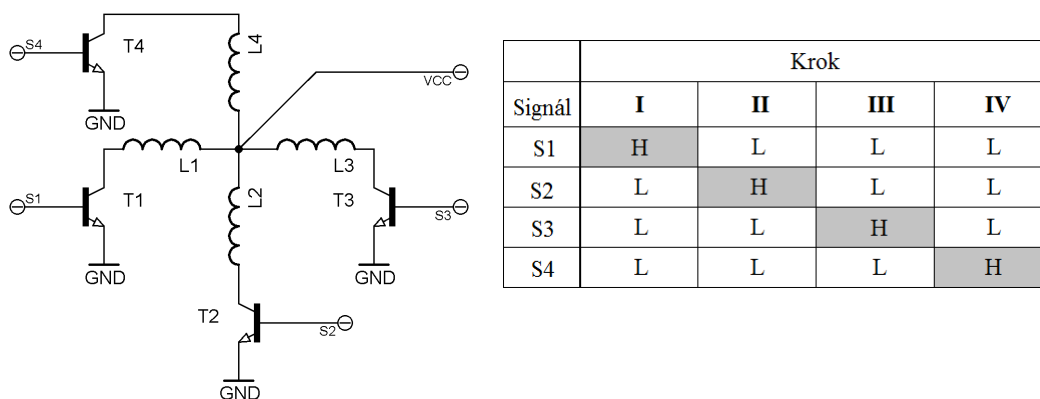
Obr. 10: Princip funkce snímače pro měření otáček

Eliptické křivky spojující severní a jižní pól permanentního magnetu S a J představují siločáry magnetického pole. Hallova sonda H je umístěna v těsné blízkosti drah siločar, podléhajících deformaci vlivem přítomnosti magneticky silně vodivého materiálu setrvačnicku. Při jeho nepřítomnosti je čidlo magnetickým polem dostatečně zasázeno.

Řízení otáček motoru musí být řešeno elektrickým pohonem ke stávající regulační páce vstřikovacího čerpadla. Vstřikovací čerpadlo je vybaveno mechanickým odstředivým regulátorem otáček, který zároveň plní funkci výkonového regulátoru. Nastavením regulační páky do určitého úhlu je regulátor nařazen na udržování příslušných otáček v rozsahu od 0 do povoleného konstrukčního maxima. Při změně hodnoty mechanické zátěže motoru přichází tendence k poklesu nebo zvýšení otáček od nastavené hodnoty, čehož důsledkem je oddálení nebo přiblížení závaží od rotující hřídele regulátoru. V důsledku toho je však posunut hřeben dávkovače paliva a tak jsou otáčky motoru regulovány v okolí nastavené hodnoty s nerovnoměrností 3 až 5 % [4]. V případě, že je poháněn generátor přifázovaný k rozvodné síti, je mechanická zátěž téměř konstantní, a navíc je v důsledku synchronizmu prakticky nemožné otáčky motoru oproti synchronním změnit. Situace je tak zcela odlišná a zvětšením úhlu ovládací páky je již jen zvýšena dávka vstřikovaného paliva a je tak zvýšen odevzdávaný mechanický výkon. Zmenšením úhlu páky by došlo k nežádoucímu režimu, kdy zjednodušeně řečeno, místo dodávky energie by motor sám byl poháněn generátorem v motorickém režimu energií odebíranou z rozvodné sítě.

K ovládání řídicí páky byl zvolen servopohon. Pro daný účel byl upraven starší, avšak masivní celokovový servopohon KM firmy Komextherm, původně určený k ovládání vícecestného ventilu pro topné soustavy. Jeho úprava spočívala v nahrazení původního pulzně řízeného sériového motoru pro napětí 24 V krokovým motorem. Servopohon je vybaven převodovým mechanismem, který byl zachován. Jako náhrada původního motoru byl využit krokový motor značky Mitsumi, typ M42-SP7. Jedná se o bipolárně řízený krokový motor s úhlem kroku $7,5^\circ$ a s kroutícím momentem 49 mNm při napájecím napětí 12 V.

Způsob řízení bipolárního krokového motoru je odlišný od unipolárního řízení, zásadní rozdíl je především v zapojení řídicích obvodů pro buzení jednotlivých vinutí. Princip unipolárního řízení krokových motorů je znázorněn na obrázku č. 11. Unipolární krokový motor má zpravidla 2 nebo 4 vinutí, přičemž každým vinutím může vždy protékat proud pouze jedním směrem. Často proto bývá vyveden pouze jeden konec každého vinutí a navíc společná svorka pro opačný konec všech vinutí. Pro řízení takto zapojeného unipolárního motoru pak stačí pouze 2 nebo 4 spínací prvky, nejčastěji v integrovaném provedení, jako univerzální driver, například ULN2003, anebo diskrétní tranzistory typu MOSFET apod. [17].

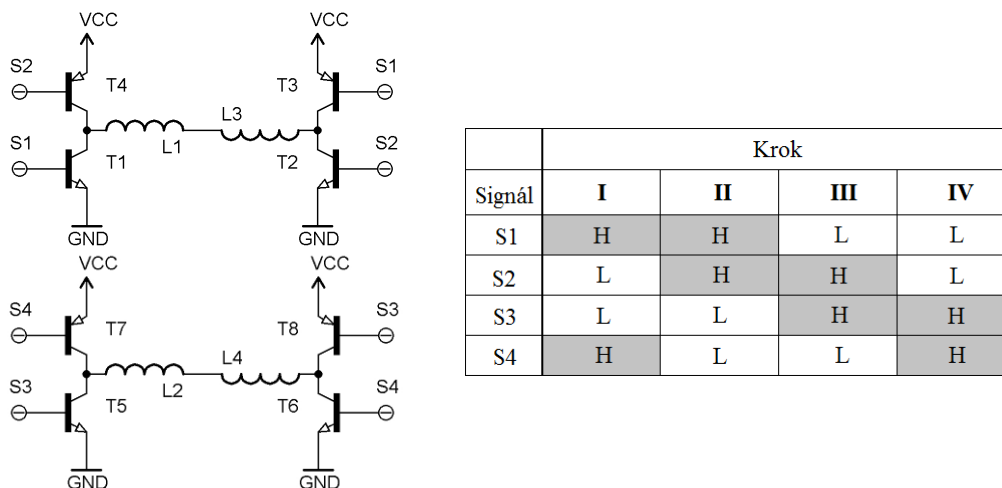


Obr. 11: Princip unipolárního jednofázového řízení

Bipolární krokový motor má nejčastěji vinutí dvě, avšak rozdělené do dvou částí opačně vinutých, a proud protékající vinutím může navíc měnit smysl. Řízení bipolárního motoru tedy vyžaduje minimálně dvojici můstkových zapojení po čtyřech spínacích prvcích. Realizace takového zapojení z diskretních součástek by byla neefektivní, v současnosti jsou běžně dostupné tyto obvody v integrované formě jako integrované obvody přímo určené k řízení bipolárních krokových motorů. Navíc jsou vybaveny dalšími ochrannými a pomocnými obvody a výsledné obvodové zapojení je tak jednodušší.

Jedním z výše zmiňovaných obvodů je například MTD2003F, který byl vybrán pro osazení do JM. Integrovaný obvod MTD2003F je tvořen dvojitým můstkovým zapojením spínacích tranzistorů, včetně rekuperačních diod. Dále je vybaven obvody s funkcí „Constant-current chopping“, tedy funkcí udržující konstantní hodnotu protékajícího proudu vinutím. Jeho hodnota je nastavitelná prostřednictvím logických úrovní na dvou řídicích vstupech. Další výhodou obvodu je automatická ochrana proti přehřátí a vnitřní logická struktura odolná vůči chybným řídicím signálům, vylučující zničení můstku při sepnutí obou tranzistorů v jedné větvi můstkového zapojení. Obvod je schopen pracovat s napájecím napětím až 30 V, při proudu vinutím krokového motoru 1,2 A [18].

Řízení je čtyřfázové, jsou tedy zapotřebí 4 rozdílné vstupní řídicí signály. Na obrázku č. 12 jsou znázorněny časové průběhy řídicích signálů a zjednodušené schéma zapojení řídicích obvodů. Jak je z obrázku patrné, dva signály lze získat pouhou inverzí a není tak nutné generovat plný počet řídicích signálů výstupy MCU. Postačují pouze 2 signály generované časovačem mikroprocesoru v režimu pulzně šířkové modulace PWM. Zbývající dva lze získat s použitím klasického logického invertoru, např. 74LS00.



Obr. 12: Bipolární dvoufázové řízení

Nastavení úhlu řídicí páky vstřikovacího čerpadla bude po krocích, s úhlem kroku $0,5^\circ$. Celkový chod ovládací páky je 90° , počet kroků je tedy 180. Krajní polohy jsou signalizovány JM koncovými spínači, před spuštěním motoru je tak možné provést případnou korekci.

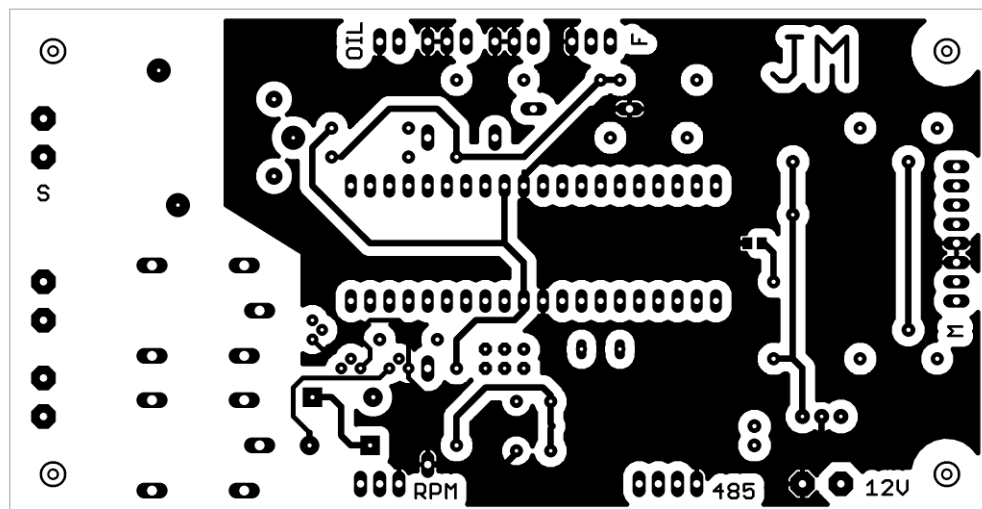
2.3.3 Spouštění motoru

Ke spouštění motoru slouží spouštěč 12 V o výkonu 3 kW. Je vybaven stykačem pro odpovídající startovací proud. K jeho ovládnání je potřeba relé se spínací schopností alespoň 4 A. Jak již bylo zmíněno, při startování je možné použít dekompresor, ale pokud bude motor alespoň částečně přehřát, není jeho použití nutné. K přehřátí motoru poslouží voda z akumuláčnicích nádrží, JM proto musí pomocí dalšího relé ovládat oběhové čerpadlo sloužící k odvádění chladicí vody. Oběhové čerpadlo v systému má příkon menší než 100 W, takže lze použít vhodné miniaturní relé pro síťové napětí do DPS. Mimo přehřev, před spouštěním studeného motoru bude relé využíváno ke spínání čerpadla za běhu KGJ namísto původního termostatu.

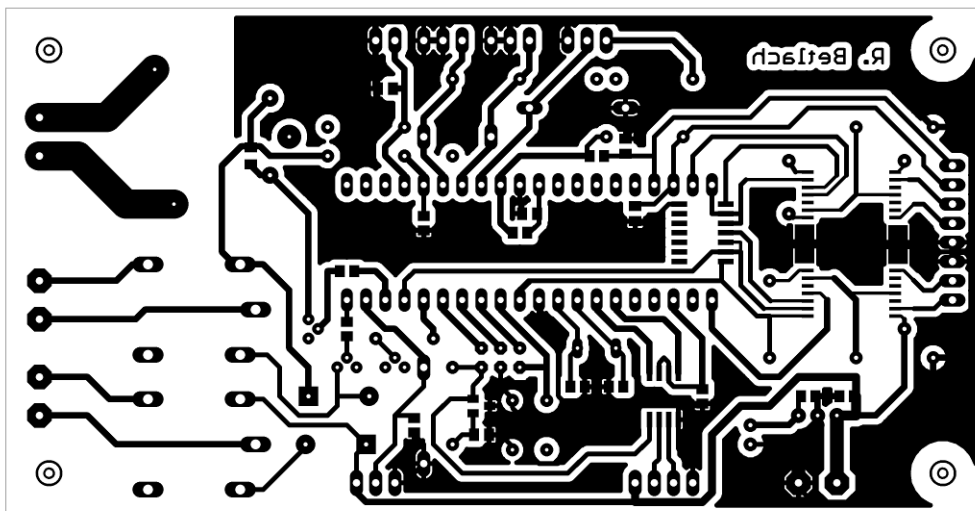
Před spouštěním motoru musí být otevřen přívod paliva ke vstřikovacímu čerpadlu. K tomuto slouží elektromagneticky ovládaný šoupátkový ventil určený pro hydraulické aplikace, odolný vůči působení nafty a olejů. Ovládací cívka ventilu je solenoid se stejnosměrným provozním napětím 12 V a proudem 0,4 A při otevřeném ventilu. Ventil má klidovou polohu neprůchozí, návrat do uzavřené polohy je zajištěn pružinou. K ovládnání ventilu je použito další relé.

2.3.4 Návrh DPS jednotky motoru

Kompletní schéma zapojení obvodů JM je v příloze B.3, v příloze B.4 je osazovací plán JM. Návrh schématu a DPS, byl opět vytvořen v programu Eagle. DPS je provedena oboustranně, propojení vrstev je řešeno pájením vývodů součástek s klasickým pouzdrem v obou vrstvách. Pro připojení vodičů sběrnice a napájení 12 V jsou u okraje desky umístěny šroubovací svorkovnice. Další svorkovnice slouží pro připojení vodičů ke spínacím kontaktů 3 relé, pro ovládnání spouštěče, spínání oběhového čerpadla a elektromagnetického ventilu paliva. Ostatní konektory jsou vidlicové, se zámkem, a slouží k připojení všech periférií JM, tedy čidel, servopohonu atd. DPS je opatřena symetricky rozloženými otvory pro uchycení o průměru 3,2 mm. Předloha pro výrobu horní strany DPS v měřítku 1:1, je na obrázku č. 13. Na obrázku č. 14 je návrh spojů spodní strany DPS, rovněž v měřítku 1:1, v zrcadleném zobrazení. Výsledné rozměry DPS jsou 129 x 67 mm.



Obr. 13: Návrh DPS jednotky motoru – horní strana



Obr. 14: Návrh DPS jednotky motoru – spodní strana

2.4 Jednotka generátoru

Při návrhu JG bylo třeba brát v úvahu skutečnost, že obvody budou spojeny se sítovým napětím, mezi obvody s napětím sítě a generátoru se může přechodně vyskytovat i napětí sdružené, tj. 400 V. Některými částmi obvodu bude také protékat značný proud. Stejně jako v případě JM, i pro JG byl zvolen mikrokontrolér ATmega16.

2.4.1 Měření napětí a proudu

JG vyžaduje pro svou činnost měření okamžité hodnoty napětí alespoň jedné fáze rozvodné sítě a odpovídající fáze generátoru. Bylo by možné měřit napětí pomocí odporového děliče se značným dělicím poměrem. Z důvodu galvanického oddělení je však použit malý síťový transformátor do DPS. Sekundární napětí transformátoru 5 V je přivedeno na odporový dělič napětí. Pro zpracování hodnot MCU je třeba získat napětí o amplitudě 2,5 V, neboť rozsah AD převodníku MCU je opět 5 V. Proto je výstupní napětí z děliče vztaženo k referenčnímu napětí 2,5 V, které je získáno pomocí pevné napěťové reference LM385Z2.5, s tolerancí 1 %. AD převodník MCU má při rozlišení 10 b rozlišovací schopnost 4,89 mV, což převedeno na primární stranu transformátoru znamená rozlišovací schopnost přibližně 0,635 V. Jde o poměrně nepřesné měření, avšak pro daný účel postačí. Doba převodu je, při taktovací frekvenci MCU 16 MHz a při 10 bitovém rozlišení, 65 μ s. Vzhledem k periodě síťového napětí 20 ms je rychlost převodníku plně dostačující.

Pro měření okamžité hodnoty proudu je využit integrovaný převodník na principu Hallova jevu. Jde o lineární proudový převodník ACS712 od firmy Allegro MicroSystems. Umožňuje měření stejnosměrného i střídavého proudu až do frekvence 80 kHz, verze ELECTR-30A-T pak umožňuje měření proudu v rozsahu ± 30 A, s citlivostí 66 mV/A. Přestože základní pracovní napětí je 354 V a izolace mezi silovou a signálovou částí je lepší než 2,1 kV, převodník je v pouzdře SOIC8. Odpor proudového vedení uvnitř převodníku je 1,2 m Ω , z čehož vyplývá, že teoretický

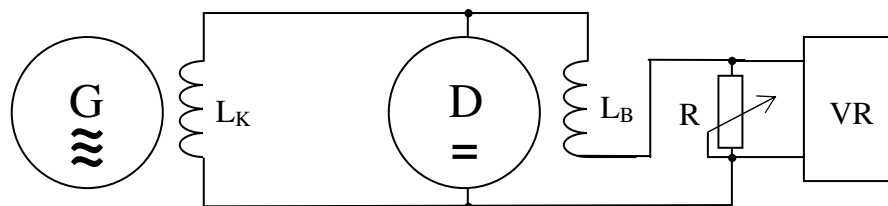
maximální ztrátový výkon při jmenovitém proudu je 1,08 W. Převodník je tolerantní k ojedinělým proudovým impulsům o velikosti až 100 A, při době trvání nepřesahující 100 ms. Maximální chyba převodníku je 1,5 %, připojením RC článku k příslušnému vývodu lze navíc omezit šířku pásma a výstupní signál tak zbavit rušivých složek. Napájecí napětí převodníku je 5 V, výstupní napětí při nulovém proudu je polovina napájecího napětí, tedy 2,5 V.

Pro výpočet účinníku je potřeba znát údaj o fázovém zpoždění mezi časovými průběhy napětí a proudu. Proto je na výstupu proudového převodníku a na sekundární straně jednoho síťového transformátoru zapojen komparátor pro detekci průchodu signálu nulou. Komparátor díky hysterezi omezuje zákmity v okolí prahové hodnoty. Jsou použity dva samostatné komparátory LM311, zvolené referenční napětí je stejné jako pro převodník, tedy 2,5 V. Výstupy komparátorů jsou přivedeny na vstupy analogového komparátoru, integrovaného v MCU. Překlopení prvního komparátoru nastane při průchodu napětí nulou, bude spouštěn čítač v MCU, a následně při překlopení druhého komparátoru, při průchodu proudu nulou, bude čítač zastaven. Hodnota uložená v registru čítače bude odpovídat poměrné části periody síťového napětí, rovné fázovému posuvu obou signálů.

2.4.2 Buzení synchronního generátoru

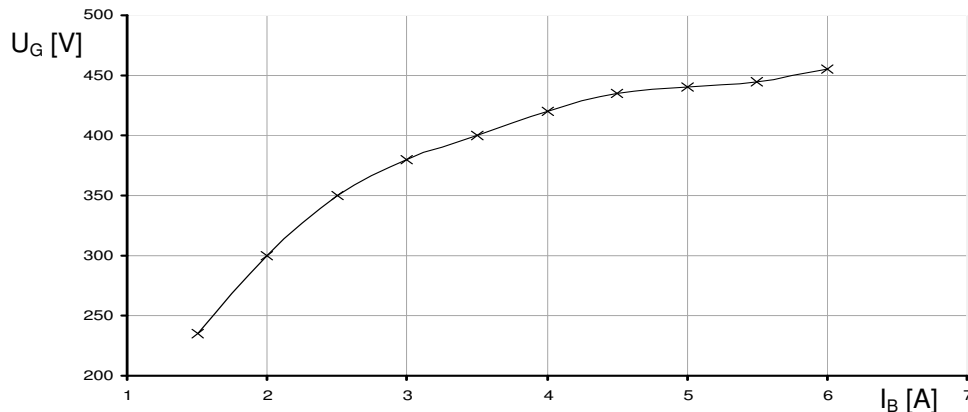
Budič generátoru KGJ musí být schopen pracovat ve dvou režimech. První možností je provoz v tzv. ostrovním režimu, kdy KGJ není paralelně připojena k síti a tedy nedodává přebytek elektrické energie do rozvodné sítě. V tomto režimu je úkolem budiče udržovat výstupní napětí generátoru na jmenovité hodnotě, tj. 230, resp. 400 V. V důsledku proměnlivé zátěže generátoru při ostrovním provozu, např. při spouštění výkonného elektromotoru, by při pevně nastavené hodnotě buzení došlo k poklesu napětí. V horším případě, při pevném nastavení budicího proudu pro jmenovité napětí již při zátěži, může v důsledku odpojení zátěže napětí generátoru skokově narůst přes jmenovitou hodnotu. Následkem by mohla být destrukce připojených citlivých elektrických spotřebičů vlivem přepětí.

Uvedenému jevu je nutno předcházet, a to průběžnou regulací výkonu budiče. Generátor je vybaven derivačním budičem, který byl v původním systému řízen buď vibračním regulátorem VR pro automatický režim, anebo výkonovým reostatem R v manuálním režimu. Funkce vibračního regulátoru spočívá v cyklickém přerušování proudu magnety budiče s dobou přerušování nepřímo úměrnou rozdílu požadovaného a generovaného výstupního napětí. Zjednodušené schéma zapojení generátoru a budiče je na obrázku č. 12.



Obr. 15: Schéma zapojení budiče generátoru

Svorkové napětí generátoru je závislé na hodnotě stejnosměrného proudu protékajícího vinutím rotoru L_K . Zdrojem tohoto proudu je budič, jedná se o derivační dynamo. Regulace proudu vinutím L_K je nepřímá, jak je z obr. 14 patrné, svorky dynamu jsou přímo připojeny přes kartáče k rotoru. Proud vinutím L_K je tedy závislý na budícím proudu statorového vinutí dynamu L_B . Statorový proud dynamu v budiči je několikanásobně nižší, oproti proudu rotorovým vinutím generátoru L_K . Změřená budící charakteristika generátoru naprázdno, tedy závislost svorkového napětí statoru generátoru na budícím proudu rotorovým vinutím, je v grafu na obrázku č. 16.

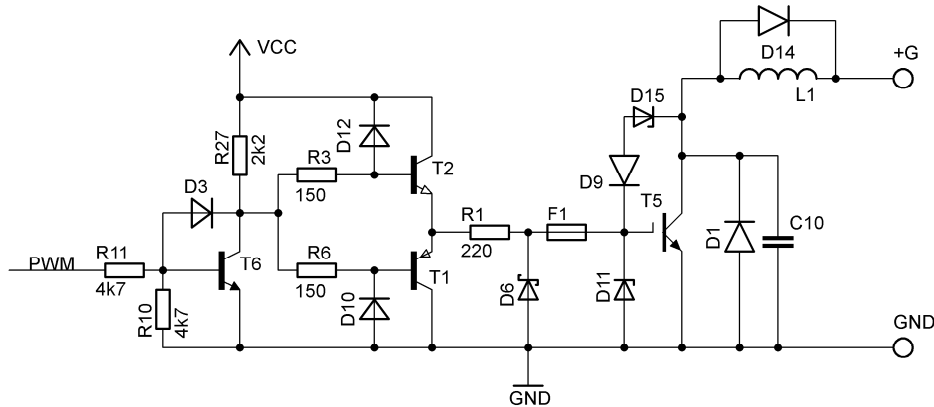


Obr. 16: Budící charakteristika generátoru naprázdno

Generátor vyžaduje buzení o napětí 25 až 91 V a odpovídající proud v rozsahu 3,3 až 8,3 A, dle zatížení. Jmenovité svorkové napětí budiče je 110 V. Výkon dodávaný budičem do rotoru generátoru lze regulovat změnou napětí derivačního dynamu budiče, respektive změnou proudu v jeho statoru, který je tvořen elektromagnety. Řešením je náhrada zastaralého vibračního regulátoru za vhodný spínací prvek řízený signálem s pulzně-šířkovou modulací PWM. Použitý MCU disponuje funkcí PWM, střidu signálu je třeba upravovat v závislosti na rozdílu velikosti aktuálního a požadovaného výstupního napětí. Program JG tedy musí zahrnovat i regulační algoritmus. Schéma zapojení regulátoru budiče je na obrázku č. 17. Změřený odpor statorového vinutí je přibližně 29,6 Ω . Z toho vyplývá, že maximální spínaný proud může být při maximálním napětí budiče přibližně 4 A. Aby proud vinutím po zahrazení tranzistoru zůstal nepřerušen, což by mj. způsobovalo indukci značných napěťových impulzů a proražení spínacího prvku, je zařazena paralelně k vinutí rekuperační dioda dimenzovaná na maximální možný proud vinutím. Zvolena byla dioda MUR1560 se závěrným napětím 600 V a maximálním proudem v propustném směru 15 A. Použitý spínací prvek je tranzistor typu IGBT, konkrétně GT50J325.

Vzhledem k požadavkům na spolehlivost při náročných provozních podmínkách je záměrně volen poněkud naddimenzovaný typ. Trvalý povolený kolektorový proud tranzistoru je 50 A, průrazné napětí mezi kolektorem a emitorem je 600 V. Pracovní frekvence signálu PWM bude přibližně 4 kHz, přičemž mezní spínací frekvence tranzistoru je 50 kHz. Pro případ, že by došlo k přerušení obvodu rekuperační diody, je zapojena mezi kolektor a řídicí elektrodu ochranná zenerova dioda, která při přesažení závěrného napětí přivede náboj potřebný ke znovuotevření tranzistoru, a tím zabrání jeho průrazu. Aby ani v případě zničení tranzistoru nedošlo k proniknutí napětí budiče k dalším obvodům, je řídicí elektroda připojena přes tavnou pojistku, která by byla

přerušena proudem, protékajícím do transilu. Aby nedošlo k překročení povoleného napětí na hradle, v případě náhodného přerušení spoje mezi komplementární dvojicí budících tranzistorů a řídicí elektrodou tranzistoru IGBT, je řídicí elektroda chráněna Zenerovou diodou.

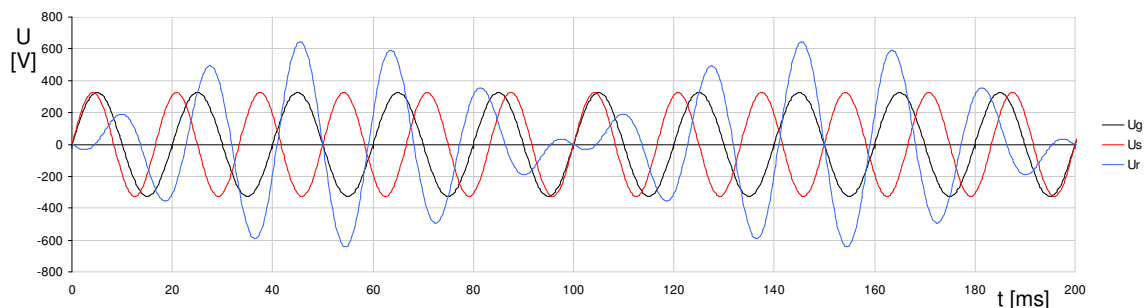


Obr. 17: Schéma zapojení regulátoru budiče

Druhou variantou provozu budiče je chod generátoru paralelně připojeného k síti. Funkce regulátoru je zcela odlišná od předchozí situace. Změnou výkonu na rotorovém vinutí nelze změnit svorkové napětí generátoru, protože vzhledem k rozvodné síti je generátor měkký zdroj. Stejně tak nedojde pouhým zvýšením proudu budícího vinutí ke zvýšení činného výkonu generátoru, zvýší se pouze hodnota jalového výkonu, což je nežádoucí. Dochází k tomu změnou fázového úhlu mezi napětím generátoru a proudem. Pro splnění podmínek kladených provozovatelem distribuční soustavy na provoz KGJ, je třeba udržovat hodnotu účinníku $\cos \varphi$ v rozmezí $\pm 0,95$. Pokud je hodnota účinníku záporná, má účinník kapacitní charakter, kladná hodnota značí charakter induktivní. JG tedy musí regulovat budící proud na základě vyhodnocení vzájemného fázového posuvu mezi fázovým proudem a napětím na svorce generátoru. Při změně mechanického výkonu přiváděného na hřídel generátoru je nutné vždy znovu účinník upravit na požadovanou hodnotu.

2.4.3 Fázování

Připojení synchronního generátoru k distribuční soustavě je do značné míry komplikovaná operace a je možné k němu přistoupit pouze za splnění všech následujících podmínek. Frekvence napětí sítě a generátoru musí být shodná, musí odpovídat sled fází, napětí generátoru musí být shodné s napětím sítě a v okamžiku připojení musí být shodná i okamžitá fáze obou napětí. Proces připojení generátoru, neboli fázování, musí vykonávat JG automaticky. Před fázováním je nutné změřit potřebné údaje, tedy napětí a frekvenci, a generátor vybudit na změřené napětí sítě. Sled fází není nutné vždy ověřovat, pořadí je pevně dáno fyzickým zapojením svorkovnice. Po splnění předchozích kroků může jednotka přejít k samotnému fázování, jehož princip je znázorněn na obrázku č. 18. Frekvence fázového napětí sítě U_s a generátoru U_g jsou před připojením rozdílné. Rozdílová frekvence se projevuje na průběhu obalové křivky napětí U_r , rozdílového napětí $U_g - U_s$. Ideální okamžik připojení je v čase 100 ms, kdy rozdílové napětí U_r je nulové a derivace U_s i U_g jsou shodné, tedy směrnice tečen průběhu U_g i U_s mají stejnou orientaci.



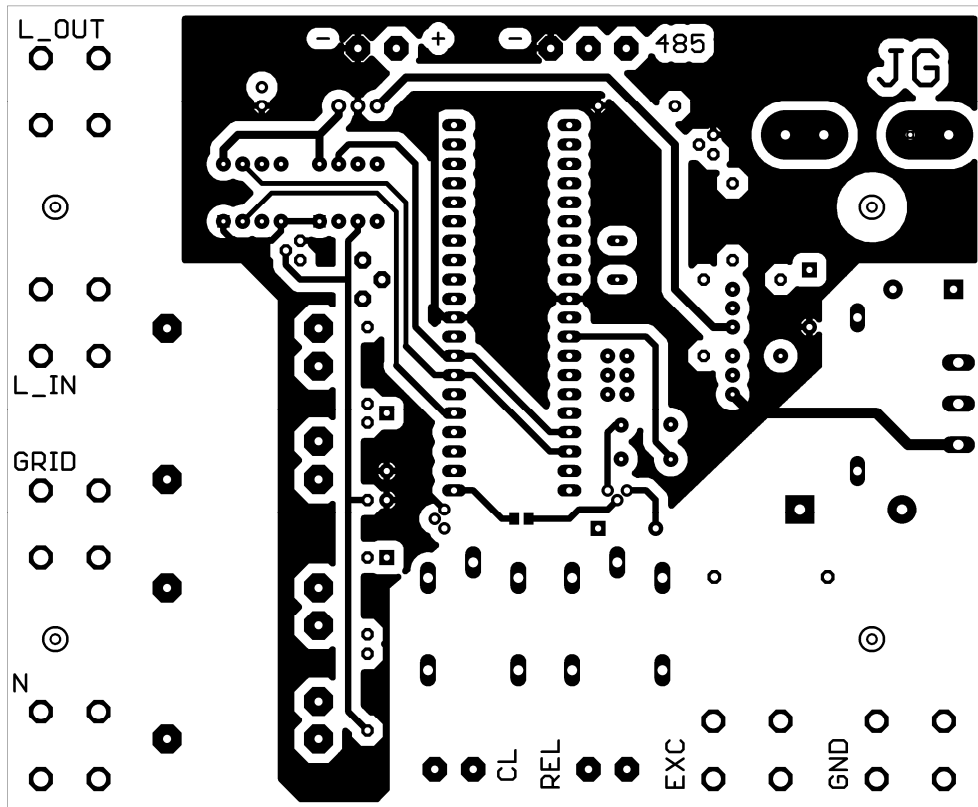
Obr. 18: Znárodnění průběhů napětí při fázování

Protože jsou k měření fázových napětí použity transformátory, navíc zatížené pouze odporovými děliči se zanedbatelným proudem, lze očekávat, že bude do výsledného signálu k AD převodu zaneseno fázové zpoždění oproti skutečnému časovému průběhu. Protože však jsou oba transformátory zapojeny shodně, tedy začátkem primárního vinutí k nulovému potenciálu N, bude v obou případech posun shodný. Uvedenou skutečnost je tedy možné při fázování zanedbat, avšak pro měření účinníku je nutné uložit hodnotu fázového posuvu změřenou při čistě odporové zátěži jako offset a zahrnout ji do dalších výpočtů.

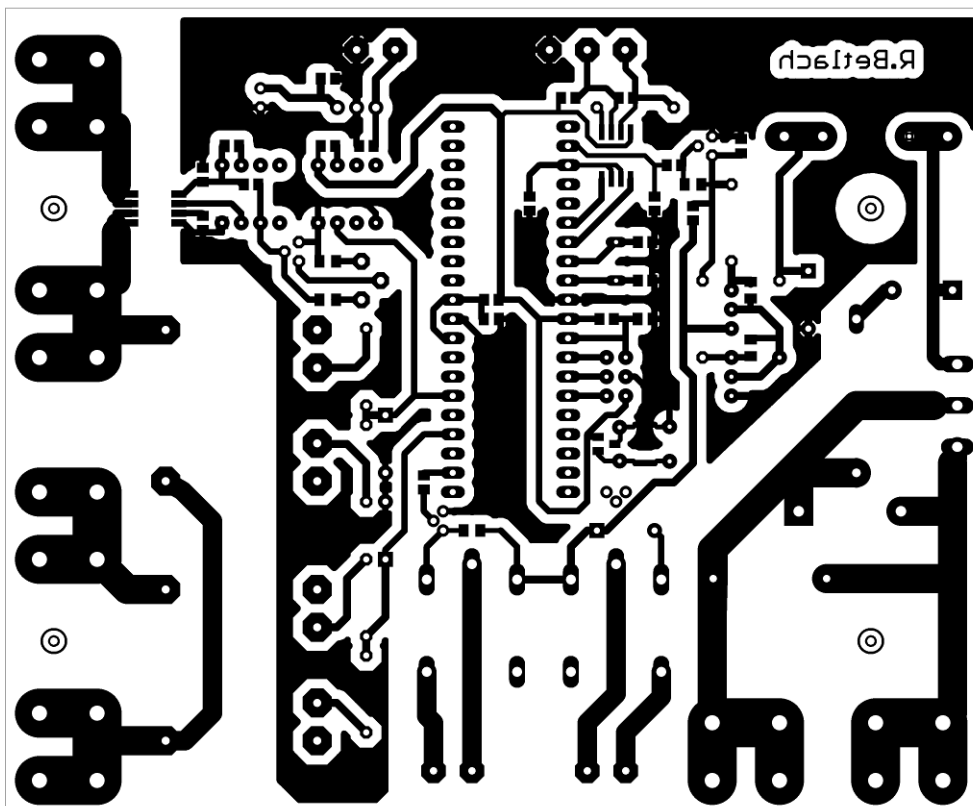
2.4.4 Návrh DPS jednotky generátoru

Kompletní schéma zapojení JG je v příloze B.5. S ohledem na povahu provozního prostředí jsou svorky pro síťová napětí a proudy řešeny jako šroubovací svorkovnice pro kabelová oka. Protože se v obvodech JG vyskytují síťová napětí a napětí budiče, návrh plošných spojů byl proveden podle požadavků pro dostatečnou izolační pevnost mezi silovými obvody a signálovou částí. Spojí mezi svorkami pro měření proudu bude protékat značný proud s maximální okamžitou hodnotou až 25 A. Šířka spojů je proto volena téměř 4 mm a je počítáno s pocínováním krátkých zúžených úseků pro rozvedení tepla ke svorkám.

DPS je oboustranná, propojení vrstev je řešeno pájením vývodů některých součástí v obou vrstvách. Osazovací plán DPS jednotky generátoru je v příloze B.6. Je bezpodmínečně nutné, aby DPS byla po osazení zalakována, a i přes její umístění v elektrickém rozvaděči byla opatřena vhodným krytem, neboť v provozovně KGJ se vyskytuje elektricky vodivý prach z otěru uhlíkových kartáčů. Tranzistor IGBT je umístěn u okraje desky pro usnadnění jeho montáže na chladič. Při montáži je nutné použít silikonovou nebo slídovou teplovodivou izolační podložku, neboť kovová část pouzdra tranzistoru je vodivě spojena s kolektorem. DPS je opět opatřena montážními otvory o průměru 3,2 mm. Výsledný návrh DPS o rozměrech 129,5 x 106,5 mm, v měřítku 1:1, je na obrázcích č. 19 a 20.



Obr. 19: Návrh DPS jednotky generátoru – horní strana



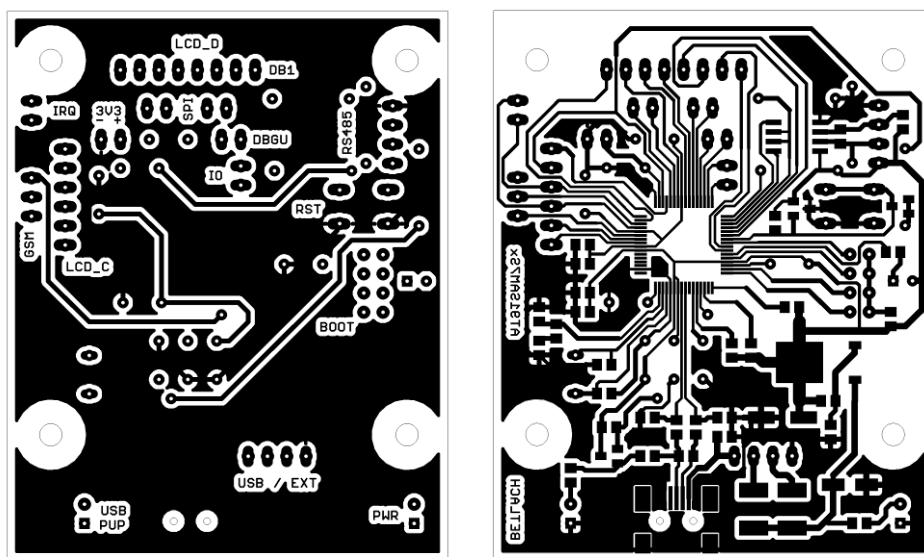
Obr. 20: Návrh DPS jednotky generátoru – spodní strana

3 OVĚŘENÍ DÍLČÍCH ČÁSTÍ ŘS

3.1 Ověření funkcí procesoru ARM

3.1.1 Výroba vývojové desky

Pro oživení procesoru AT91SAM7S512 a osvojení práce s jeho programováním byla navržena a vyrobena testovací deska. Vyvedeny byly veškeré periferie potřebné pro budoucí využití v ŘS. Byly osazeny nezbytné součástky dle pokynů výrobce, jako jsou blokovací kondenzátory a pull-up rezistory nebo resetovací obvod, byl také osazen integrovaný stabilizátor low-drop, LM1117 jako zdroj napětí pro MCU. Pro ověření komunikace po sběrnici RS-485 byl osazen i převodník ST3485 a fail-safe rezistory. Napájení testovací desky je řešeno buď prostřednictvím USB konektoru z PC, nebo externím zdrojem stejnosměrného napětí 5 V. Návrh DPS testovací desky v měřítku 1:1, je na obrázku č. 21. V příloze A.2 je fotografie skutečného provedení testovací desky.



Obr. 21: Návrh DPS testovací desky

3.1.2 Programování pomocí SAM-BA loaderu

Během ožívování testovací desky se vyskytly potíže s enumerací USB. Přestože do operačního systému PC byl nainstalován potřebný ovladač pro SAM-BA Boot Assistant a i zapojení tranzistoru pro řízenou enumeraci USB bylo provedeno podle katalogového listu výrobce MCU, nebylo zařízení v systému rozpoznáno. Problém byl vyřešen trvalým připojením rezistoru o hodnotě 1,5 k Ω mezi napájecí napětí 3,3 V a signálový vodič D+ rozhraní USB. Po této úpravě již bylo možné pomocí programu SAM-BA z PC komunikovat s procesorem na testovací desce. Možnosti programu SAM-BA jsou omezeny na zápis a ověření zápisu binárních dat, zkompilovaného

zdrojového kódu pro MCU. Ladění programu zde není možné, neboť při zápisu dat do pamětí procesoru je zavaděč pro SAM-BA přepsán a po resetu MCU běží program samostatně. Pro ladění programu při běhu na MCU je možné použít rozhraní JTAG, avšak pořizovací náklady emulátoru nejsou zanedbatelné.

3.1.3 Využití periférií MCU

Na testovací desce byla ověřena základní funkce vstupů a výstupů MCU. Mimo jednoduché řízení logické úrovně na výstupech byla zprovozněna také tlačítka s využitím vnitřních programovatelných pull-up rezistorů a s využitím integrované funkce MCU pro filtrování zákmitů na vstupu. Byla vytvořena a odladěna knihovna pro řízení znakového LCD s radičem HD44780. Později byla upravena a odladěna převzatá knihovna pro grafický displej s rozlišením 128 x 64 bodů s dvěma radiči KS0108.

Vzhledem k zamýšlené aplikaci MCU v HJ, byl program sestaven z více úloh, pomocí systému reálného času RTX. Byly vyzkoušeny verze s preemptivním přepínáním úloh a také s kooperativním způsobem předávání systémových prostředků mezi úlohami. Druhý způsob se ukázal jako výhodnější, neboť v ŘS bude HJ vykonávat některé operace prioritně a bez přerušení, které by způsobovalo problémy ve výkonu operací dané úlohy. Způsob obsluhy přerušení procesoru při použití RTX je poněkud odlišný od způsobu pro klasicky vytvořený program s jediným vláknem. Na testovací desce byla vyzkoušena obsluha přerušení od vnitřního zdroje, od 16 bitového čítače, a také od externího zdroje přerušení. Byla také vytvořena a odladěna knihovna, využívající přerušení při dokončení přenosu UART.

3.2 GSM modul

3.2.1 Ovládání modulu

Prvotní záměr byl využít GSM vývojovou desku jako periférii HJ. Byl zakoupen vývojový kit s modulem SIM900A. Jak se později při zkouškách ukázalo, typ GSM modulu, osazeného na vývojové desce, je určen výhradně pro provoz v asijských státech a ačkoliv disponuje parametry potřebnými k jeho použití v ČR, modul kvůli restrikcím s mobilními sítěmi nekomunikuje. Tuto skutečnost prodejce bohužel neuvedl. Potřebný typ modulu je SIM900. Pozdější pokus o změnu firmware v zakoupeném modulu problém nevyřešil, přestože se podařilo sériovým portem PC odeslat, prostřednictvím ladicího rozhraní modulu a pomocí programu pro upgrade přímo od výrobce do modulu firmware verze SIM900. Je pravděpodobné, že v jednotlivých verzích modulu je mimo firmware pozměněna i vnitřní hardwarová struktura, důsledkem čehož je nekompatibilita firmware obou verzí.

Pro komunikaci s modulem byl využit převodník úrovní sériového portu PC na logické úrovně, které využívá modul, tj. $L < 0,8V$ a $H > 2,0 V$. Konkrétně byl použit převodník MAX3232 a k odeslání a přijímání dat byl využit program HyperTerminal. I přes zmiňované komplikace modul posloužil alespoň k ověření napájecího zdroje se spínaným měničem a k osvojení způsobu komunikace s modulem příkazy AT.

3.2.2 Použití příkazů AT

Komunikace mezi PC a modulem SIM900 probíhá po sériové lince. Byla zvolena modulační rychlost 9600 Bd. Použitý GSM modul podporuje využívání příkazů AT, dle doporučení výrobce [7]. Základní struktura příkazů AT je trojího typu:

- 1) AT+<příkaz>=?<CR>
- 2) AT+<příkaz>?<CR>
- 3) AT+<příkaz>=<parametr><CR>

První typ příkazu se využívá pro zjištění, zda zařízení daný příkaz podporuje. Druhý typ příkazu je dotaz na nastavené uložené hodnoty dle příkazu, poslední příkaz slouží pro zápis dat nebo hodnot. AT příkaz vždy začíná zkratkou AT, následuje zkratka požadovaného povelu a končí <CR>, což znamená odeslání příkazu a může být reprezentováno např. stiskem klávesy Enter.

Pro začátek komunikace s modulem SIM900 nebo SIM900A je nutné nejprve zaslat příkaz AT<CR>. Moduly nemají výrobcem přednastavenou pevnou hodnotu modulační rychlosti pro komunikaci, namísto toho je aktivována možnost autobauding. Odesílání příkazu AT je nutné v některých případech opakovat, dokud modul nerozpozná aktuální rychlost komunikace a neodešle příznak OK. Pro zjednodušení příští komunikace, již s požadovanou rychlostí, je třeba do paměti modulu uložit hodnotu příkazem AT+IPR=9600;&W. Odesláním příkazu je trvale uložena volba 9600Bd do flash paměti modulu a původní volba autobauding je deaktivována. Dalšími příkazy, podle [14], byly z modulu vyčteny údaje o verzi firmware, IMEI, hodnotě napájecího napětí a také byla ověřena komunikace modulu se SIM kartou. Dále byly vyčteny údaje o dostupných sítích a intenzitě signálu po přepnutí modulu do servisního módu. Z již uvedeného důvodu nebylo možné provést pokus o komunikaci v síti GSM, po změně firmware již navíc modul ani nenavazoval komunikaci.

3.3 Komunikace po sběrnici

3.3.1 UART

Pro ověření komunikace jednotek po sběrnici bylo nejprve nutné zprovoznit sériovou komunikaci na testovací desce s procesorem ARM a na pokusně zapojeném mikrokontroléru AVR na nepájivém poli. Byl sestaven jednoduchý program pro mikrokontrolér ATmega16, který v cyklu přijímá jeden znak, tj. 8 datových bitů, ze sběrnice a odešle je zpět. Byla použita již hotová knihovna určená pro MCU ATmega16, využívající obsluhu přerušeni vyvolaného při dokončení přenosu rozhraním UART. Pro procesor ARM musela být vytvořena knihovna vlastní, včetně kompletní inicializace periferie. Protože jsou využity obě sériová rozhraní USART, kterými disponuje procesor ARM, byla knihovna vytvořena jako univerzální. Navíc by bylo neefektivní využívat obsluhu přerušeni po jednotlivém znaku, jako v případě AVR, proto bylo využito možnosti přímého přístupu do paměti procesoru DMA. Konfigurací DMA je nastavena délka datového přenosu a přerušeni může být vyvoláno až po jeho dokončení, pokud je třeba. V knihovně je pro kontrolu stavu přenosu vytvořena funkce na dotazování, zda je přenos již dokončen. Tento způsob je označován jako tzv. polling.

3.3.2 RS-485

K ověření komunikace po sběrnici s rozhraním 485 byl v obou MCU doplněn program o řízení převodníku RS485, konkrétně o generování výstupního signálu pro přepínání režimu mezi vysíláním dat a jejich příjmem. Protože převodník je v pouzdře SMD, byl vyroben jednoduchý modul pro zasunutí do nepájivého pole. Mezi testovací deskou s ARM a nepájivým polem byl zapojen asi 20 m dlouhý nestíněný kroucený pár vodičů a byla spuštěna stejná komunikace jako v předchozím případě. Stiskem tlačítka byl z testovací desky odeslán znak do MCU v nepájivém poli, z něj zpět do testovací desky a po příjmu zobrazen na LCD. Základní funkčnost převodníků sběrnice a použitých SW modulů pro jejich obsluhu tak byla ověřena.

3.4 Měření fázového posuvu

3.4.1 Ověření parametrů proudového čidla

Měření proudu převodníkem ACS712 bylo provedeno pomocí MCU ATmega16 a jeho integrovaného AD převodníku. Zapojení MCU bylo provedeno rovněž na nepájivém poli. Program byl sestaven tak, aby byl ve smyčce prováděn převod analogové hodnoty na vstupu a její digitální hodnota, přepočtená na hodnotu odpovídající skutečnému proudu, zobrazována na znakovém LCD. Jako zdroj proudu byl použit laboratorní zdroj s maximálním výstupním proudem 4 A, takže byl prověřen pouze necelý rozsah čidla. Nicméně hodnota indikovaná na panelu zdroje se shodovala s výstupním údajem zobrazovaným na LCD.

3.4.2 Fázový posuv RC článku

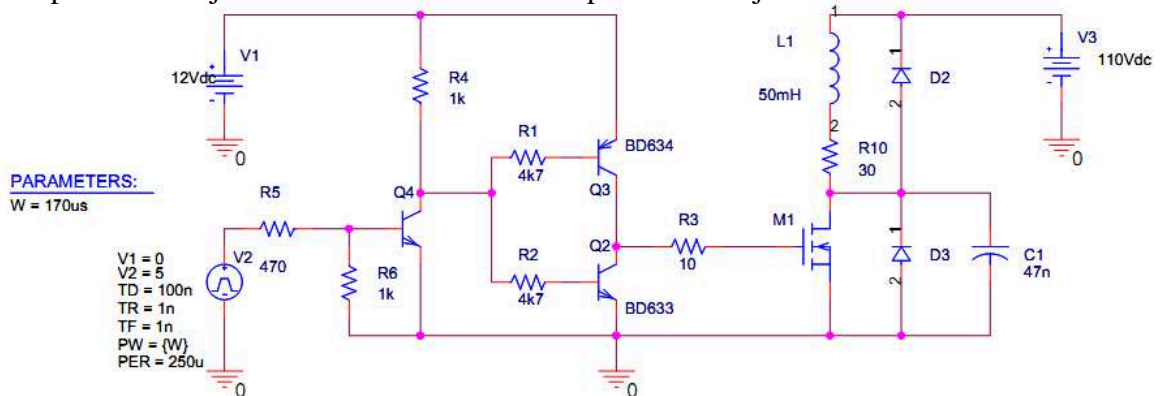
Jako zdroj signálu k měření fázového posuvu byl použit síťový transformátor se sekundárním napětím 12 V. Za odporovým děličem napětí byl odebrán první signál, vztažený k referenčnímu napětí 2,5 V. Pro získání fázově posunutého průběhu napětí byl zapojen k sekundárnímu vinutí transformátoru ještě RC článek, z jeho výstupu byl odebrán druhý signál, opět vztažený k referenčnímu napětí.

Program pro MCU byl upraven tak, aby v obsluze přerušení, po překročení referenční hodnoty prvního vstupu analogového komparátoru, spustil volně běžící čítač. Multiplexor vstupu analogového komparátoru byl následně přepnut na vstup signálu z RC článku a v obsluze přerušení, při průchodu nulou, byl čítač zastaven. Hodnota uložená v čítacím registru, vyjádřená vzhledem k délce trvání poloviny periody sítě, odpovídala fázovému posuvu. Změnou hodnoty kondenzátoru se pochopitelně měnil zobrazovaný údaj o fázovém posuvu, pokud byl k oběma vstupům přiveden stejný signál, čítací registr přetekl. Bylo by proto vhodné změnit dělicí poměr hodinového signálu pro čítač, nicméně navržený způsob měření byl shledán vhodným pro následné využití v JG.

3.5 PWM

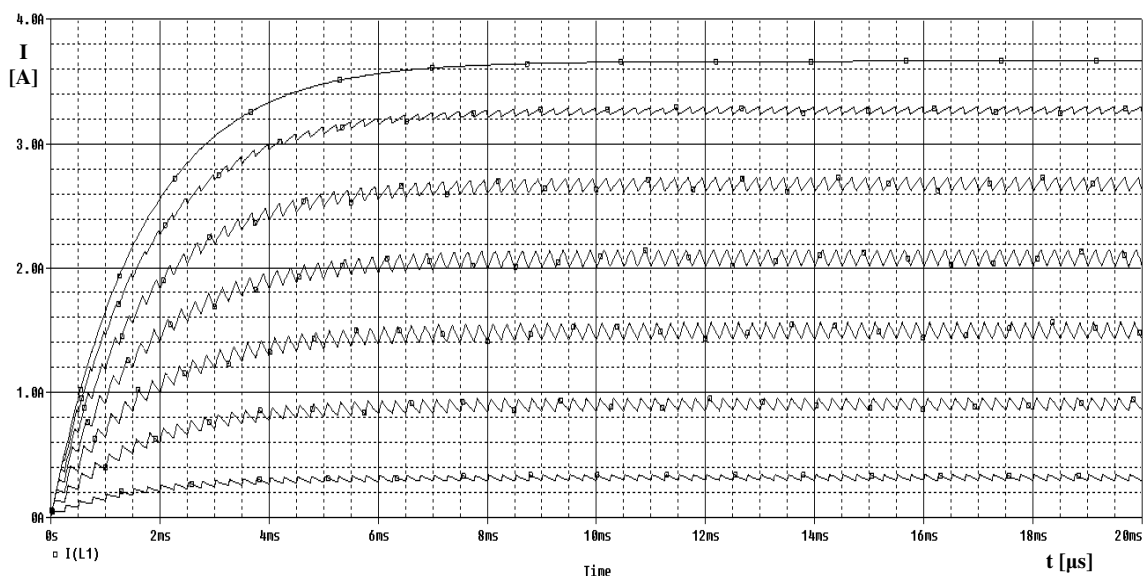
3.5.1 Ověření parametrů budiče IGBT

Pro ověření správné funkce zapojení obvodu pro řízení tranzistoru IGBT, byl vytvořen jeho model a parametry ověřeny simulací v programu PSpice. Byla provedena analýza v časové oblasti, v kombinaci s parametrickou analýzou, kdy parametrem byla šířka pulzu odpovídající střídě signálu PWM. Protože model indukčnosti nezahrnuje reálné parametry vinutí, byl do obvodu vřazen rezistor o hodnotě $30\ \Omega$, nahrazující sériový odpor vinutí. Zjednodušené schéma obvodu pro simulaci je na obrázku č. 22.



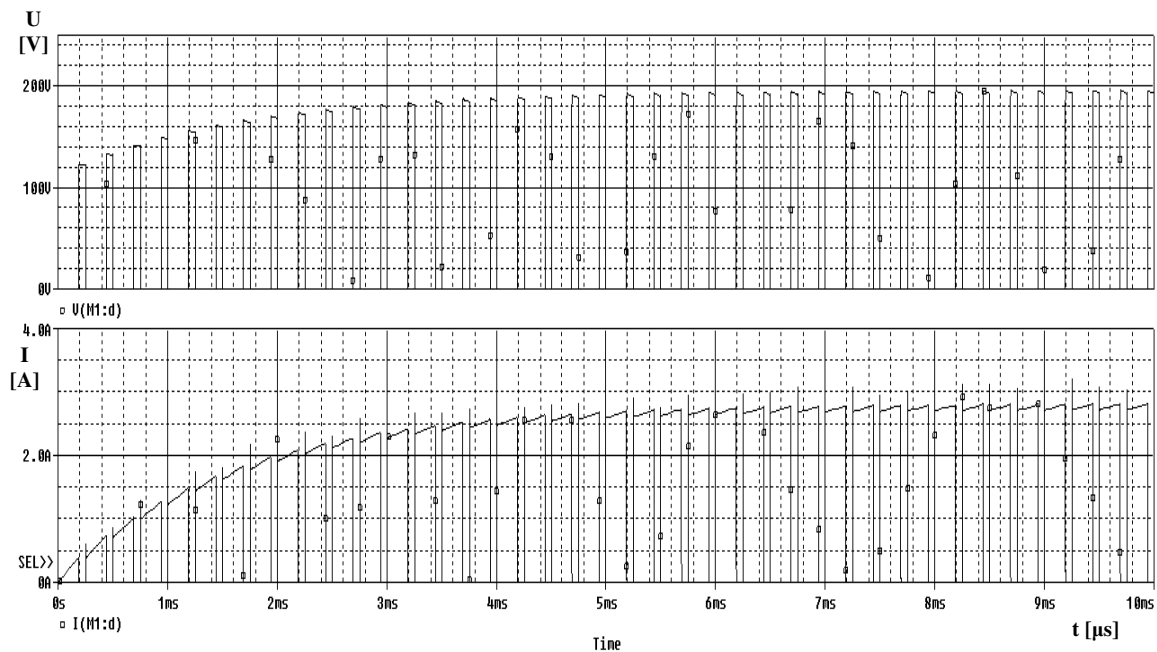
Obr. 22: Schéma zapojení obvodu budiče pro simulaci

Výsledky simulace jsou na obrázku č. 23, jedná se o časový průběh proudu protékajícího indukčností L1. Její hodnota, 50 mH, je pouze řádovým odhadem, protože měřič indukčnosti nebyl k dispozici. Určit skutečnou indukčnost vinutí elektromagnetů ve statoru budiče výpočtem by bylo náročné, bez znalosti materiálů jader a jejich mechanických rozměrů prakticky nemožné. Konkrétní hodnota indukčnosti však není k analýze potřebná, protože se projeví pouze na době trvání přechodového děje, tedy na době nárůstu proudu do ustáleného stavu a na zvlnění proudu.



Obr. 23: Výsledek analýzy – proud statorem budiče

Jak je z výsledků simulace zřejmé, průběh je exponenciální a závisí na časové konstantě RL. Jednotlivé průběhy platí pro různou dobu sepnutí tranzistoru v periodě 250 μs , v krocích po 20 μs . Zvlnění statorového proudu budiče nemá prakticky žádný vliv na harmonické zkreslení výstupního napětí generátoru, původní vibrační regulátor pracoval s mnohem nižší frekvencí než signál PWM. Na obrázku č. 24 je časový průběh napětí na kolektoru a kolektorový proud spínacího tranzistoru při střídě signálu PWM 75 %.



Obr. 24: Napětí na kolektoru a kolektorový proud spínacího tranzistoru

4 REALIZACE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

4.1 Jednotka motoru

Po dokončení návrhu všech jednotek ŘS a po prověření správné funkce důležitých zapojení a jejich částí bylo přistoupeno k vlastní realizaci ŘS. Jako první byla zahájena výroba jednotky motoru a s ní souvisejících periférií.

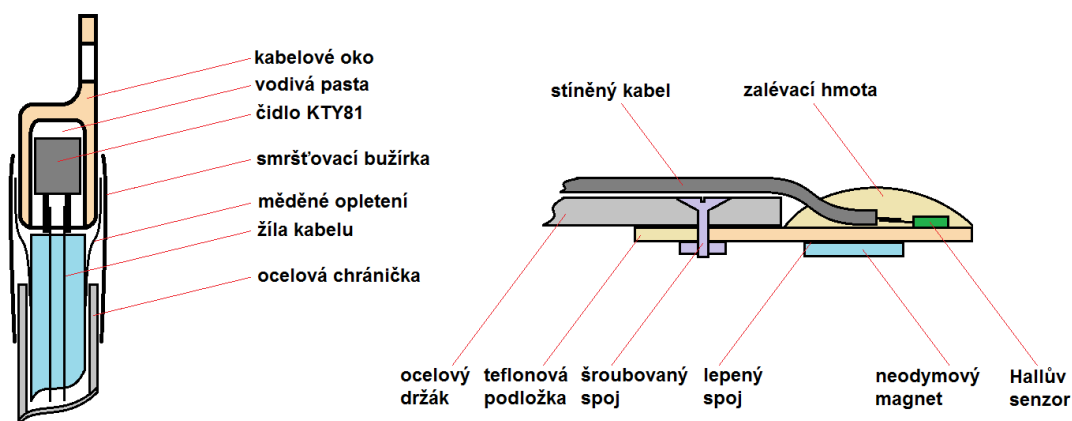
4.1.1 Oživení JM

Po výrobě DPS jednotky motoru, dle návrhu v předchozích kapitolách, byla provedena její kontrola a DPS byla ošetřena pájitelným lakem. Osazování součástek probíhalo po částech, postupně s oživováním, v souvislosti s tvorbou řídicího programu. Jako první byla osazena část napájecích obvodů s lineárním stabilizátorem. Po prověření správné hodnoty výstupního napětí, tedy 5 V, byl osazen mikrokontrolér a integrovaný obvod dohledu nad napájecím napětím, MCP130, který při detekci překročení povoleného rozsahu napájecího napětí vyvolá reset MCU. Dále byly osazeny i některé pasivní součástky, jako krystalový rezonátor a blokovací kondenzátory, nezbytné pro funkci MCU a také tlačítko pro ruční resetování. Následně byl osazen také konektor pro programovací rozhraní ISP.

Vyčtením signatury MCU byla prověřena komunikace s ISP programátorem a mohl být do paměti zapsán připravený program pro řízení driveru pro krokový motor, jehož popis je v následující kapitole. Kontrolou časových průběhů napětí řídicích signálů PWM pomocí osciloskopu byla ověřena správná činnost programu. Následně byl osazen logický invertor 74HC00 a výsledné časové průběhy znovu prověřeny. Po osazení driveru MTD2003F a nezbytných součástek pro jeho funkci byl již připojen krokový motor. Při ladění programu vyšlo najevo, že pro dosažení optimální frekvence řídicích signálů k dosažení maximálních otáček motoru je třeba pro MCU zvolit taktovací signál s jinou frekvencí. Od taktovacího signálu je však odvozen i signál pro rozhraní USART, a proto bylo nutné zvolit takovou hodnotu krystalového rezonátoru, aby výsledná chyba symbolové rychlosti byla přijatelná. Jako kompromisní řešení byl zvolen krystalový rezonátor 8,8672 MHz, při jehož použití je chyba symbolové rychlosti 0,5 % pro rychlost 9600 Bd. Výsledná frekvence řídicích signálů PWM je potom 135,3 Hz, přičemž maximální četnost řídicích pulzů, podle výrobce motoru, může být až 420 s^{-1} . Výsledný počet otáček hřídele motoru je $2,82 \text{ s}^{-1}$ a motor tak pracuje v oblasti své momentové charakteristiky s vysokým krouticím momentem a téměř nejvyšším odevzdávaným mechanickým výkonem.

Dalším krokem při oživování DPS jednotky motoru bylo osazení převodníku UART / RS485. Program JM byl doplněn o obsluhu rozhraní UART a byla provedena zkouška komunikace mezi JM a sériovým portem PC. Před dalším postupem bylo nejprve nutné upravit čidla a zvolit vhodnou mechanickou konstrukci pro jejich následné uchycení na místo a připojení k JM. V případě teplotních čidel bylo použito měděných lisovacích kabelových ok, která byla převrtána na vnitřní průměr odpovídající rozměru plastového pouzdra teplotního čidla KTY81. Vývody čidla jsou

připájeny k žilám stíněného kabelu LiYCY, jehož měděné stínící opletení bylo po obvodu připájeno ke kabelovému oku, čímž je zajištěno pevné spojení a odolnost vůči tahovému namáhání. Zbýlý prostor v dutině kabelového oka byl vyplněn teplovodivou pastou. Na kabel byla navlečena ocelová chránička a přes zbývající část oka, která není při uchycení v kontaktu s podložkou, a přes konec chráničky byla převlečena smršťovací bužírka. Obdobně bylo vyřešeno i připojení palivoměru a snímače pro měření otáček s Hallovoú sondou. Následně byly na DPS osazeny zbývající součástky a konektory pro připojení teplotních čidel a palivoměru a byla provedena kontrola jejich funkčnosti. Jako poslední byly osazeny relé a šroubovací svorkovnice. Na obrázku č. 25 je v řezu znázorněno uváděné mechanické provedení čidel, které není třeba dále rozvádět.



Obr. 25: Mechanické provedení čidel pro JM

4.1.2 Sestavení firmware pro JM

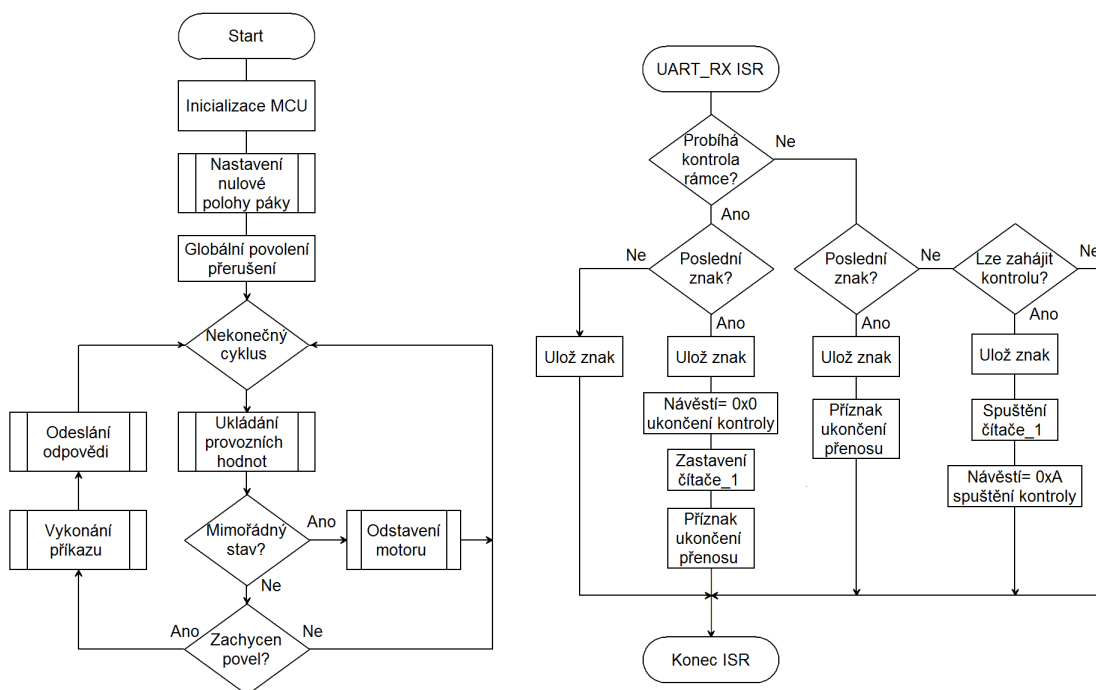
Program JM po resetu MCU nejprve vykoná přípravu periférií mikrokontroléru. Pro inicializaci AD převodníku je nastaven registr děličky hodinového signálu na hodnotu 128, výsledný takt převodníku je 69,2 kHz. Dále je nastaveno zarovnání bitů výsledku pro 8b rozlišení a je proveden první převod k inicializaci převodníku. Při inicializaci rozhraní UART je do registru přenosové rychlosti uložena 12 bitová hodnota definující zadanou symbolovou rychlost asynchronního přenosu. Pro rychlost 9600 Bd a při frekvenci hlavního oscilátoru s krystalovým rezonátorem 8,8672 MHz je hodnota vypočítaná podle vztahu (5) po zaokrouhlení rovna 57 (0x0039).

$$UBRR = \left(\frac{f_{osc}}{16 \cdot BAUD} - 1 \right) \quad [- ; \text{Hz} , \text{Bd}] \quad (5)$$

kde: UBRR - hodnota registru
 f_{osc} - frekvence hlavního oscilátoru MCU
 BAUD - požadovaná přenosová rychlost

V příslušných řídicích registrech je pak nastaven normální asynchronní mód přenosu, symbol bez paritního bitu tvoří 8b datových a 1 stop bit, je povoleno přerušování při příjmu každého symbolu.

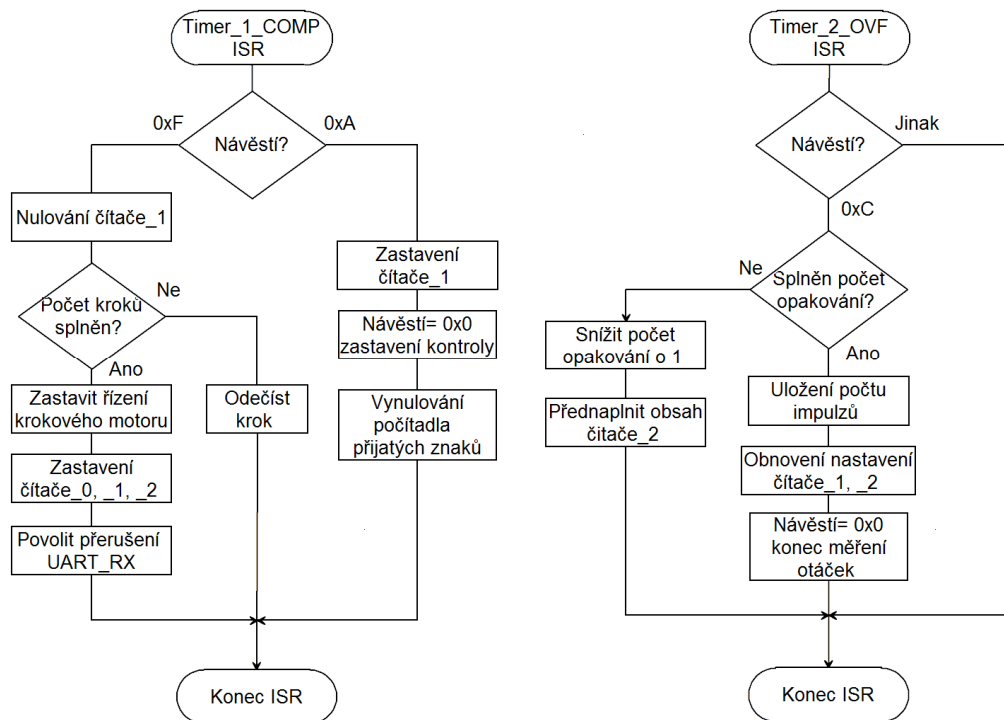
V dalším kroku inicializace jsou nastavena povolení I/O pinů pro řízení relé, která jsou tak nastavena do výchozího stavu. Posledním krokem inicializace je příprava časovačů/čítačů, dále jen TC, pro generování signálu PWM pro řízení krokového motoru servopohonu. Pro generování signálů, jejichž bližší popis je v kapitole 2.3.2, jsou využity TC0 a TC2. Mód obou 8 bitových TC je nastaven jako neinvertující fast-PWM. Dělička hodinového signálu pro oba TC je nastavena na hodnotu 64 a střída signálu na cca 48%, hodnotou 124 v porovnávacím registru. Výsledná frekvence, resp. perioda řídicích signálů je konstantní, neboť nedochází ke změně střídavy signálu. V rámci inicializace jsou rovněž nastaveny řídicí piny pro driver motoru jako výstupní a dva piny, pro koncové spínače polohy páky, jako vstupní. Nastavením logické úrovně H na výstupním pinu pro definování úrovně proudu motorem je uveden motor do chodu dokud není dosaženo spodního dorazu páky, kdy dojde k sepnutí spodního koncového spínače servopohonu. Tím je celý proces inicializace dokončen a po povolení přerušeni program přejde k vykonávání operací v nekonečné smyčce.



Obr. 26: Vývojový diagram hlavního programu JM

Vývojový diagram hlavního programu JM je uveden na obrázku č. 26, další související vývojový diagram obsluhy přerušeni je na obr. 27. V nekonečné smyčce je vykonáváno volání funkcí pro odečítání dat z čidel, palivoměru a také funkce pro měření otáček spalovacího motoru. Při překročení povolených hodnot provozních parametrů jsou pak v rámci hlavní smyčky provedeny operace k zastavení motoru. V případě že JM obdrží korektní povel, dojde k jeho vykonání a k odeslání odpovědi. Operace spojené s přijímáním povelových rámců po sběrnici jsou vykonávány převážně v obslužných rutinách přerušeni, stejně tak i měření otáček.

Protože část programu týkající se obsluhy komunikace po sběrnici je shodná pro JM i JG, je níže uveden podrobnější popis, včetně mechanismu pro obnovení synchronizace při kolizi komunikace na sběrnici.



Obr. 27: Vývojový diagram obsluhy přerušování JM

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.6, komunikační rámec má 10 B. V případě, že HJ vyšle povel, jehož 1. Byte má hodnotu 0xEE, je povel určen JM, při hodnotě 0xCC je adresován JG. Odpověď podružné jednotky je adresovaná HJ, a to buď hodnotou 0xAA, v případě JM, nebo 0xBB, pokud je odpověď odeslána z JG. Poslední Byte je určen pro přenos kontrolního součtu, jehož porovnáním se součtem z přijatých dat lze zjistit, zda nebyl rámec při přenosu poškozen. Použit je cyklický redundantní součet CRC8 s generujícím polynomem $x^7+x^3+x^2$. Výsledek CRC je zbytek po dělení posloupnosti dat generujícím polynomem. Při výpočtu se na koeficienty uplatňuje operace modulo 2, která je reprezentována bitovým posunem a tak určení CRC není výpočetně náročné. Podrobnější popis principu kontrolního součtu lze nalézt v odborné literatuře [19].

Přijímání jednotlivých Byte rámce je doprovázeno vyvoláním přerušování. V případě, že TC1 není zaneprázdněn plněním jiné úlohy, je využit pro kontrolu synchronizace při příjmu dalších Byte. Princip využívá toho, že při známé komunikační rychlosti, tedy 9600 Bd a při známém počtu B v rámci, lze určit maximální přípustnou dobu mezi dvěma přerušováními při příjmu Byte. V obsluze přerušování UART_RX, při příjmu prvního Byte, je spuštěn TC1 a je nastaven tak, aby vyvolal přerušování Timer_1_COMP po uplynutí zmiňovaného intervalu. Pokud před vyvoláním Timer_1_COMP je přijat další Byte, čítací registr TC1 je vynulován a jednotka je připravena pro příjem dalšího B. Tento proces se opakuje až do plného přijetí rámce. Pokud by v průběhu došlo k vyvolání Timer_1_COMP, při jeho obsluze by byl vynulován počet přijatých Byte a TC1 zastaven. Protože TC1 je využit i pro jiný účel, je v programu JM zavedena proměnná, jakožto návěstí pro využívání prostředků MCU. Celý princip je zřetelný z vývojových diagramů na obr 26 a 27.

Poslední důležitou částí programu JM, kterou by bylo vhodné zmínit, je způsob měření otáček motoru v soustrojí KGJ. Samotný princip je uveden již v kapitole 2.3.2.

Pro popis programu je důležitá skutečnost, že na 1 otáčku motoru je snímačem generováno 6 impulzů. K určení otáček je využit TC1, který je nastaven pro čítání externích pulzů přiváděných jako signál na pin PB1, resp. T1 při jeho přiřazení k TC1. Pro změření otáček motoru je vytvořena funkce, která nakonfiguruje TC1 pro čítání impulzů s reakcí na sestupnou hranu. Dále je funkcí spuštěn TC2, s hodinovým signálem 8,659 kHz, který při přetečení vyvolá přerušení Timer_2_OVF. Vzhledem ke jmenovitým otáčkám motoru, tj. 1500 min^{-1} , je třeba získat delší interval pro čítání impulzů, a proto je toto přerušení voláno opakovaně. Při posledním vyvolání Timer_2_OVF je uložena hodnota v TC1 a pro oba použité TC je nastavena původní konfigurace. Před ukončením obslužné rutiny přerušení je nastaveno návěstí pro uvolnění prostředků MCU k dalším účelům. Uložený údaj z TC1 představuje počet impulzů zaznamenaných za interval měření trvající 300 ms. Pro jmenovité otáčky je tedy hodnota rovna 45. Měření otáček touto metodou je velmi nepřesné, rozlišovací schopnost počtu otáček je 67 min^{-1} , avšak pro daný účel je dostačující.

Program JM je poněkud komplexnější, jednotlivé operace v podprogramech hlavní smyčky jsou však druhořadé a jejich popis není třeba rozvádět. Firmware JM byl vytvořen v jazyce C, v prostředí AVRstudio 4. Význam jednotlivých Byte v rámci povelu a odpovědi JM je uveden v tabulce č.3.

Tabulka 3: Význam obsahu komunikačního rámce - JM

Pořadí Byte	Povel		Odpověď	
	položka	význam	položka	význam
0	Adresa jednotky	0xEE - pro jednotku motoru	Adresa jednotky	0xAA – odpověď jednotky motoru
1	Pozice ovládací páky	0x00 až 0xB2 – nastavit polohu 0xFF - neměnit nastavení	Aktuální pozice páky	0x00 – min 0xB2 - max
2	Oběhové čerpadlo	0x00/0xFF - vyp./zap. automaticky 0xAA/0xFF- vyp./zap. ručně	Stav čerpadla	- viz povel
3	nevyužito	bez významu	Teplota vody motoru	0x00 až 0xFF
4	nevyužito	bez významu	Množství paliva	0x00 – min 0xFF - max
5	nevyužito	bez významu	Napětí akumulátoru	0x00 až 0xFF
6	Ventil přívodu paliva	0xFF/0x00 – otevřít/zavřít - ostatní hodnoty bez významu	Stav ventilu paliva	- viz povel
7	Ovládání starteru	0xFF/0x00 – start/zastavení - ostatní hodnoty bez významu	Status motoru	0x00/0xEE – stojí 0xAA - chod
8	Kontrola chodu motoru	0xFF/0x00 – zap./vyp. kontrolu - ostatní hodnoty bez významu	Otáčky motoru	0x00 až 0xFF
9	CRC		CRC	

Převod číselných hodnot z rámce odpovědi JM na údaj v příslušných jednotkách pro zobrazení je podrobněji popsán v kapitole 4.3.2. Kompletní program JM je na příloženém CD, v souboru pod názvem JM_fw.c.

4.2 Jednotka generátoru

4.2.1 Oživení JG

Při kontrole DPS jednotky generátoru, vyrobené podle návrhu v kapitole 2.4.4, byla zjištěna lehká výrobní vada, která však byla odstraněna, a DPS byla následně chemicky pokovena vrstvou cínu. Po ošetření pájitelným lakem bylo přistoupeno k osazování. Osazování součástek probíhalo opět po částech, spolu s oživováním a s tvorbou řídicího programu. Nejprve byly osazeny součástky napájecích obvodů a napěťové reference. Po kontrole hodnoty stabilizovaného napětí byl odporovým trimrem nastaven zdroj referenčního napětí přesně na hodnotu 2,5 V. Poté byl osazen mikrokontrolér spolu s obvodem dohledu MCP130 a dalšími souvisejícími součástkami.

Po vyčtení signatury MCU, prostřednictvím ISP programátoru, byl do paměti zapsán zkušební program pro generování signálu PWM. Za účelem prověření parametrů obvodů pro PWM regulaci buzení generátoru byl program sestaven tak, aby podle hodnoty napětí na vstupu AD převodníku byla upravena střída signálu. Pro ruční regulaci byl zapojen na vstup převodníku odporový dělič, tvořený potenciometrem a před osazením spínacího tranzistoru IGBT byly zkontrolovány časové průběhy napětí v obvodech jeho budiče pomocí osciloskopu. Zde byla odhalena vada návrhu DPS, konkrétně záměna vývodů u pouzder tranzistorů, která byla v rámci možností opravena. Poté byl osazen spínací tranzistor a před zkouškou na generátoru bylo zapojení důkladně prověřeno.

Jako zdroj napětí byl použit transformátor 230/110 V s výkonem 1500 W. Výstupní napětí bylo usměrněno monolitickým můstkovým usměrňovačem RS3506M, pro napětí 600 V a proud 35 A, který byl upevněn na chladič. Pro vyhlazení usměrněného napětí byly použity tři paralelně spojené elektrolytické kondenzátory pro napětí 200 V s celkovou kapacitou přibližně 1,4 mF. Jako zátěž byl nejprve použit halogenový zářič 400 W / 230 V. Po úspěšném pokusu s regulací výkonu cca 150 W byla jako zátěž zapojena topná spirála 2500 W / 230 V. Při střídě 98% byla změřena hodnota usměrněného napětí 138 V, z čehož vyplývá, že výkon na topné spirále byl přibližně 900 W. Měřením teploty chladiče spínacího tranzistoru bylo po 75 minutách provozu, za uvedeného zatížení, změřeno oteplení z 21 °C na 47 °C. Po provedení této zkoušky byla přepojena svorkovnice budiče generátoru tak, aby mohla být instalována rekuperační dioda a do obvodu byla zapojena oživovaná JG. Při chodu motoru byla pak prakticky ověřena PWM regulace budiče s ručním nastavením střídy, a to jak v ostrovním režimu KGJ, tak i po přifázování k rozvodné soustavě.

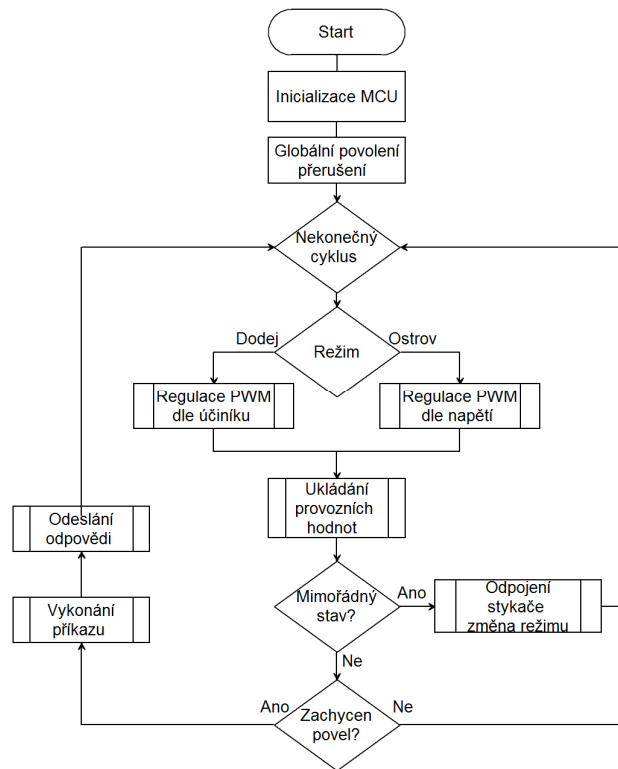
Aby bylo možné pokračovat v oživování JG, bylo nutné pro získávání údajů z jednotky zprovoznit komunikaci s PC. Proto byl osazen převodník UART/RS485 a do programu JG implementován stejný obslužný program rozhraní UART jako v případě jednotky motoru.

Dalším krokem při oživování JG bylo osazení komparátorů LM311 s síťových transformátorů do DPS. Po rozšíření programu o obsluhu AD převodníku bylo provedeno měření okamžité a maximální hodnoty síťového napětí. Pomocí osciloskopu byla zkontrolována činnost komparátorů a další úpravou programu byla měřena perioda síťového napětí. Po osazení proudového čidla ACS712 byla ověřena jeho funkce, při stejnosměrném i střídavém proudu 3 A. Časový průběh výstupního napětí čidla byl

kontrolován osciloskopem a nevykazoval žádné známky zkreslení nebo šumu. Jako poslední byla osazena relé a šroubovací svorkovnice. U masivních mosazných svorek pro připojení silových vodičů byla při pájení značně zesílena vrstva cínu pro minimalizaci ztrátového výkonu a také pro zlepšení mechanických vlastností pájeného spoje.

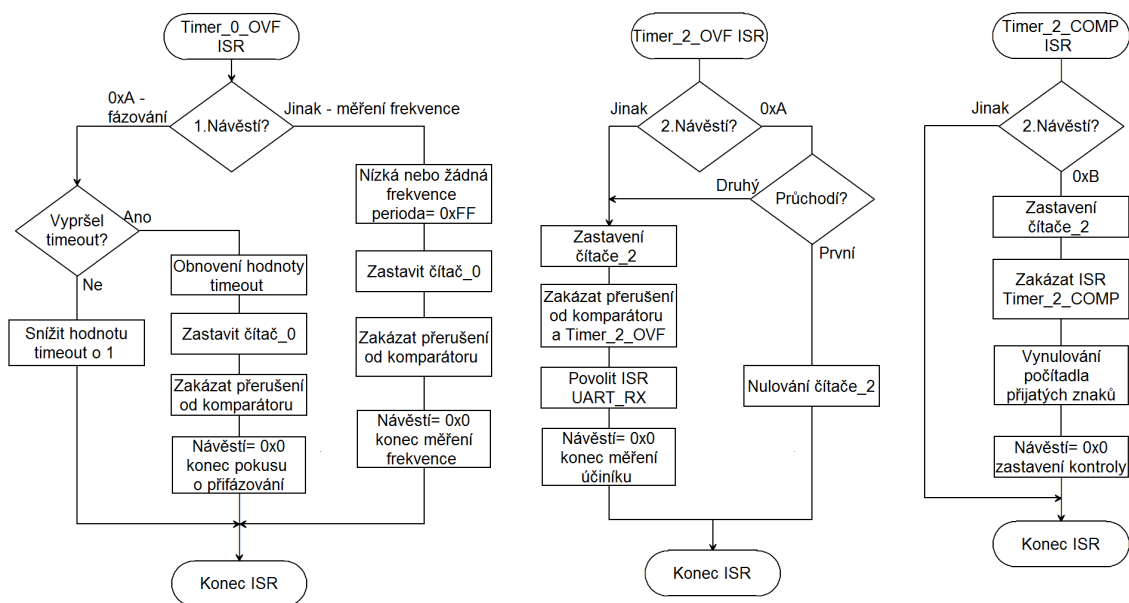
4.2.2 Sestavení firmware pro JG

Program JG po resetu MCU vykoná nejprve nastavení periférií. Nastavením řídicích registrů je inicializován AD převodník, dále TC1 pro generování signálu PWM, rozhraní UART a po inicializaci řídicích pinů jsou nastavena relé do výchozí polohy. Následně program přejde k vykonávání hlavního programu v nekonečné smyčce. Vývojový diagram hlavního programu JG je uveden na obrázku č. 28. V nekonečné smyčce je neustále vykonávána úprava střídy signálu PWM, který je generován nezávisle na běhu programu. Zároveň jsou podle provozního režimu, ve kterém JG aktuálně pracuje, volány funkce pro měření a odečítání provozních údajů generátoru.



Obr. 28: Vývojový diagram hlavního programu JG

V případě, že JG obdrží po sběrnici korektní povel od HJ, vykoná jej a odešle zpět HJ odpověď s aktuálními údaji. Pokud je za chodu JG při režimu dodávky do sítě vyhodnocen trvalý nepovolený stav, JG sama přejde do základního režimu odpojením fázovacího stykače. K odpojení nedojde, pokud mimořádný stav trvá pouze přechodně. Převážná část programu je vykonávána v obsluze některého ze zdrojů přerušení, v hlavním programu je prakticky pouze minimum operací, např. čtení údajů z AD převodníku a následné určení střídy PWM. V případě obdržetí úplného rámce s povelom je v hlavním programu také připraven rámec k odeslání odpovědi. Související vývojové diagramy obsluhy přerušení jsou na obr. 29 a 30.



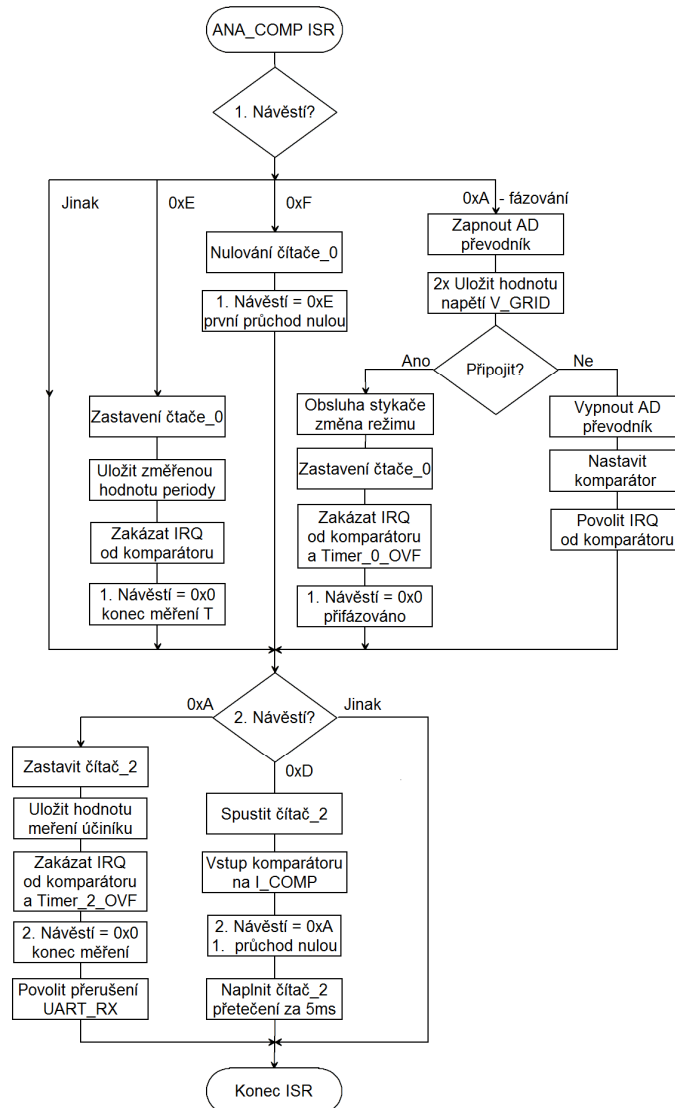
Obr. 29: Vývojový diagram obsluhy přerušeni JG

V programu JG je využito celkem 5 zdrojů přerušeni, přičemž periferie MCU jsou využívány pro více úkolů. AD převodník navíc nemůže být spuštěn současně s analogovým komparátorem. Z tohoto důvodu byly zavedeny v programu dvě pomocné proměnné jako návěští signalizující zaneprázdnění dané periferie. Výsledný program je značně komplikovaný a každá jeho úprava vyžaduje důkladnou kontrolu, zda nemůže dojít za chodu programu k ovlivnění zdánlivě nesouvisejících operací. K přiblížení funkce programu jsou níže popsány posloupnosti vykonávané při měření frekvence napětí, fázování generátoru k rozvodné síti a při měření účinníku.

Základní princip určení frekvence spočívá ve spuštění TC0 v rámci obsluhy přerušeni komparátoru ANA_COMP, vyvolaného při průchodu okamžité hodnoty napětí nulou. Při dalším průchodu nulou je znovu v obsluze přerušeni komparátoru zastaven TC0 a hodnota v čítacím registru je úměrná periodě měřeného signálu. Protože však může dojít k situaci, že v daném kanále nebude žádný signál nebo signál s periodou přesahující interval měření, je nutné připravit ještě další obslužnou rutinu, vyvolanou při eventuálním přetečení TC0, Timer_0_OVF. Při vyvolání tohoto zdroje přerušeni je do proměnné k uchování hodnoty periody uložen znak 0xFF, značící nepřítomnost signálu v měřeném kanále. Při měření frekvence je hodinový signál pro TC0 přibližně 7,812 kHz a tak naměřený údaj stačí pouze vynásobit hodnotou 128. Výsledkem je délka periody v μs . Po ukončení měření, ať už změřením hodnoty nebo přetečením TC0, je nutné zastavit hodinový signál pro TC0, zakázat volání obsluhy ANA_COMP a nastavením návěští na 0x0 uvolnit TC0 i komparátor pro další úkoly.

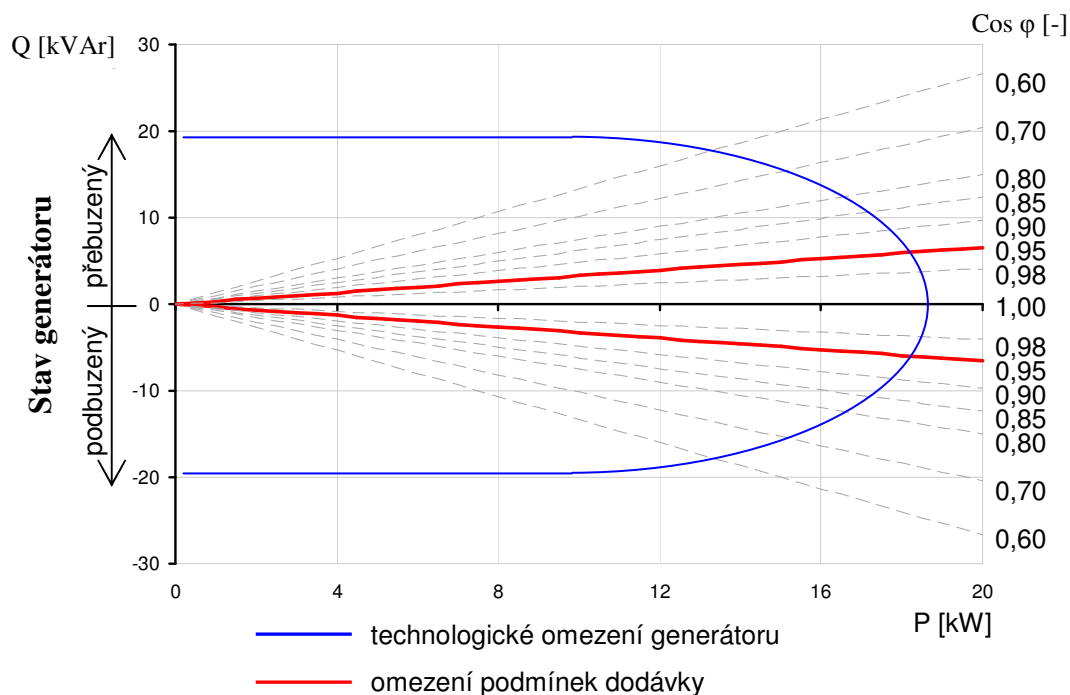
Proces fázování KGJ k distribuční síti je složitější. Před zahájením operace je vždy nejprve ověřeno, zda již není KGJ připojena, zda jsou pro fázování volné periferie MCU, a až po jejich uvolnění je přistoupeno k dalším krokům. Nejprve jsou ověřeny fázovací podmínky, tedy přítomnost napětí sítě i generátoru, jejich frekvence a napětí. Pokud podmínky platí, je spuštěn proces připojení stykače ve vhodný okamžik a návěští je nastaveno na hodnotu 0xA. Pro čekání na tento okamžik je vyčleněn časový interval, timeout, trvající 3s. Zatím co je v obsluze přetečení Timer_0_OVF odečítán limit,

v obsluze přerušení ANA_COMP je vyhledáván vhodný okamžik k sepnutí fázovacího stykače. Přerušení od komparátoru ANA_COMP je voláno při nástupné hraně, tedy při průchodu okamžité hodnoty napětí generátoru nulou. Ihned je spuštěn AD převodník a jsou uloženy dvě hodnoty okamžitého napětí sítě. Pokud je zjištěno napětí blízké 0 V a zároveň rozdíl hodnot je kladný, je sepnut fázovací stykač a status jednotky je změněn z ostrovního režimu na dodávku. Pokud nejsou podmínky k sepnutí stykače splněny, AD převodník je znovu vypnut a komparátor připraven na další vyvolání ANA_COMP. Po vypršení časového intervalu bez připojení jsou periferie MCU nakonfigurovány podle původního nastavení a uvolněny, stejně jako v případě úspěšného přifázování.



Obr. 30: Vývojový diagram obsluhy přerušení komparátoru JG

V režimu dodávky je regulace buzení generátoru odvozována od změřené hodnoty účinníku, narozdíl od chodu KGJ v ostrovním režimu, kdy účelem regulace je dosažení konstantního napětí generátoru bez ohledu na odebíraný výkon. Po změření časového posunu harmonického průběhu napětí fáze a fázového proudu je upraven signál PWM tak, aby bylo dosaženo optimální hodnoty účinníku podle změřeného P-Q diagramu generátoru, uvedeného v grafu na obrázku č. 31.



Obr. 31: P-Q diagram generátoru

Měření účinnku je zahájeno voláním funkce z hlavního programu. Funkcí je nakonfigurován TC2 a analogový komparátor, jsou povolena přerušení Timer2_OVF při přetečení TC2 a ANA_COMP při sestupné hraně na výstupu komparátoru. Návěstí 2 je nastaveno na hodnotu 0xD a je vynulována předchozí hodnota změřeného fázového zpoždění. Další operace jsou již provedeny v obsluze přerušení. Při prvním vyvolání přerušení ANA_COMP, způsobeného průchodem okamžité hodnoty fázového napětí 0, je při hodnotě 2. návěstí 0xD do čítacího registru TC2 vložena potřebná hodnota, aby k přetečení TC2 došlo za 5 ms. Zároveň je přepnut multiplexor a na vstup komparátoru je přiveden signál z výstupu proudového snímače, 2. návěstí je změněno na 0xA. Po uplynutí následujících 5 ms, tedy po uplynutí $\frac{1}{4}$ periody síťového napětí, dojde k vyvolání Timer_2_OVF a TC2 je vynulován. Během následujících 8 ms musí dojít znovu k přerušení ANA_COMP, neboť fáze proudu a napětí na zdroji, při $\cos \varphi = 1$, jsou vzájemně posunuty o $\frac{1}{2}$ síťové periody. V obsluze ANA_COMP je TC2 zastaven, do proměnné k uchování hodnoty fázového posunu je vložena hodnota čítacího registru TC2 a je zakázáno přerušení od TC2 i komparátoru. Periferie jsou uvolněny nastavením 2. návěstí na 0x0. Kdyby k vyvolání ANA_COMP nedošlo, v obsluze přetečení TC2 dojde k uložení hodnoty fázového posunu 0xFF a stejně jako v předchozím případě budou zakázána přerušení a periferie budou uvolněny.

V popisu firmware JG není uvedena obsluha přerušení UART při příjmu znaku a způsob obnovení synchronizace při zachycení neúplného rámce, protože vychází ze stejného vývojového diagramu jako v případě JM, který je na obrázku č. 26 v kapitole 4.1.2. Jediný rozdíl je ve využití TC2 namísto TC1, zbytek program obsluhy komunikace po sběrnici je totožný. Význam jednotlivých Byte v rámci povelu a odpovědi JG je uveden v tabulce č.4. Zdrojový kód JG je na příloženém CD, v souboru pod JG_fw.c.

Tabulka 4: Význam obsahu komunikačního rámce - JG

Pořadí Byte	Povel		Odpověď	
	položka	význam	položka	význam
0	Adresa jednotky	0xCC – pro JG	Adresa jednotky	0xBB – odpověď JG
1	nevyužito	bez významu	Status jednotky	0x00 – ostrovní režim 0x0F – režim dodávky 0xEE – odpojen po chybě
2	nevyužito	bez významu	Změřená perioda	0xFF – nízká/žádná frekvence 0x00-0xFE – změřený údaj
3	nevyužito	bez významu	Maximální hodnota proudu	0x00-0x03 – horní Byte
4	nevyužito	bez významu		0x00-0xFF – spodní Byte
5	nevyužito	bez významu	Maximální hodnota napětí	0x00-0x03 – horní Byte
6	nevyužito	bez významu		0x00-0xFF – spodní Byte
7	nevyužito	bez významu	Fázový posun napětí, proudu	0x00-0xFF – změřená hodnota
8	Fázování	0x0C – povel k fázování 0x0E – povel k odpojení - ostatní bez významu	Střída PWM	0x00-0xB2 – aktuální střída
9	CRC		CRC	

4.3 Hlavní jednotka

HJ byla realizována jako poslední, protože pro vytvoření jejího firmware musela být nejprve získána ucelená představa o řízení podružných jednotek. Podle způsobu jejich povelování pak byla zvolena nejvhodnější koncepce celého programu. HJ je také ústředním prvkem ŘS, ve kterém jsou centralizovány údaje získané z podružných jednotek, jednotka tak uživateli bude jako jediná zprostředkovávat monitoring nad stavem KGJ.

4.3.1 Oživení HJ

DPS pro HJ byla vyrobena profesionální firmou podle předlohy v kapitole 2.2.7. Výrobní data byla vyexportována přímo z programu Eagle, ve kterém byl návrh DPS proveden. Po obdržení hotové desky nebylo nutné provádět její kontrolu, neboť již byla výrobcem elektronicky testována.

Jako první byla osazena zdrojová část, tedy součástky snižujícího spínaného měniče a stabilizátor napětí pro napájení MCU. Další součástky byly osazeny až po

kontrole napětí 3,3 V a 4,5 V, pro napájení GSM modulu a LCD. Následně byl osazen GSM modul spolu s potřebnými součástkami, konektor pro kartu SIM a anténní konektor SMA. Pro oživení byly na DPS připraveny pájecí propojky, ke kterým byly připojeny vodiče sériové linky. Zde byla zjištěna chyba návrhu DPS, vodiče rozhraní RX a TX nebyly překříženy a zapájením propojky by tak byl propojen vysílač sériové linky GSM modulu s vysílačem MCU. Po zapnutí napájení byla pomocí programu Realterm, prostřednictvím převodníku USB na sériové rozhraní, navázána komunikace s GSM modulem. Do jeho paměti pro nastavení byla uložena pevná hodnota přenosové rychlosti 9600 Bd a byly ověřeny další funkce modulu, včetně sestavení hovoru a odeslání SMS zprávy.

Po ověření funkce GSM modulu byl osazen mikroprocesor spolu s periferními součástkami jako jsou blokovací kondenzátory, krystalový rezonátor, resetovací obvod, USB konektor atd. Poté byl do MCU, prostřednictvím již dříve využívaného programu SAM-BA, zapsán jednoduchý program pro ověření funkce MCU. Následně byly osazeny konektory a zbývající součástky, včetně UART/RS485 převodníku a tím bylo dokončeno hardwarové oživení HJ. Později se však vyskytly potíže s funkcí LCD, jehož jmenovité napájecí napětí je 5 V. Přestože byl již dříve testován na funkčnost při nižším napětí, konkrétně 4,6 V, rozdíl jedné desetiny voltu způsoboval výpadky komunikace s jedním z radičů LCD, což se projevovalo chybným zobrazováním levé poloviny LCD. Pokud by napájení bylo nastaveno na vyšší hodnotu, než je aktuální napětí 4,5 V, GSM modul by pracoval na hranici povoleného napětí, které je právě 4,6 V. Pro bezpečnější provoz byl tedy přehodnocen způsob napájení LCD, který je tak napájen samostatným zdrojem s integrovaným stabilizátorem 7805. Odebíraný výkon LCD je malý a tak na stabilizátoru ani při trvale zapnutém podsvícení LCD nevzniká výrazný ztrátový výkon a stabilizátor proto nemusí být připevněn k chladiči.

4.3.2 Sestavení firmware pro HJ

Program pro HJ je oproti programům podružných jednotek o poznání rozsáhlejší. Vzhledem k zamýšlené realizaci webového serveru pro komunikaci prostřednictvím rozhraní ethernet bylo rozhodnuto firmware realizovat na bázi systému reálného času, tzv. RTOS. Systém reálného času umožňuje souběžně vykonávat několik procesů, tzv. vláken, při společném využívání prostředků procesoru. V praxi je toho docíleno předáváním prostředků vždy jediné úloze, po vyčleněné době pak úloze další. Nejprve byla zamýšlena verze RTOS s preemptivním způsobem přepínání úloh, avšak jako výhodnější se ukázal kooperativní multitasking. Rozdíl je v tom, že zatímco u preemptivního způsobu jsou úlohy přepínány po pevně stanoveném časovém intervalu, kooperativní přepínání je v režii každé úlohy a k přepnutí do dalšího vlákna dojde až po vykonání celé operace v dané úloze. Pro přepínání úloh je třeba použít systém, který tak vykonává správu MCU. Pro použitý mikroprocesor je k dispozici několik systémů reálného času, z nichž některé však mají jistá omezení nebo je případně jejich použití zpoplatněno. Jako nejvhodnější řešení byl vybrán systém RTX, který je zároveň součástí vývojového prostředí Keil μ Vision. Verze MDK-Lite je navíc k nekomerčnímu využití zdarma, pouze s omezením velikosti výsledného zkompilevaného programu na 32 kB.

Nejprve byl vytvořen projekt na bázi systému RTX, se 4 kooperujícími úlohami a jednou úlohou vyčleněnou pro inicializaci MCU a jeho periférií. V rámci projektu

byly použity volné knihovny pro grafický LCD a také již dříve vytvořená knihovna pro rozhraní UART. Jako první bude následovat popis vlastní vytvořené knihovny pro obsluhu GSM modulu a podrobnější popis všech úloh. První úloha je vyčleněna pro komunikaci a obsluhu GSM modulu, druhá úloha je určena pro komunikaci a obsluhu rozhraní Ethernet, další úloha je hlavní proces řízení chodu KGJ a poslední úloha je vyčleněna pro komunikaci s uživatelem.

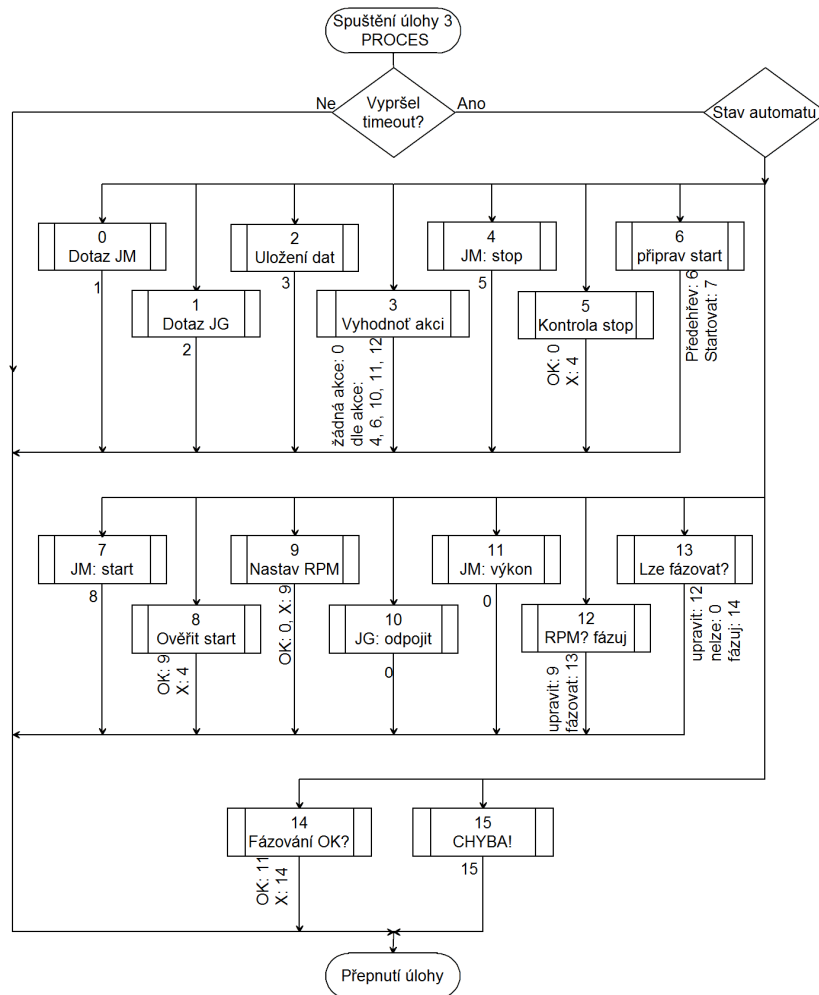
Pro potřeby ŘS byly vybrány ze všech funkcí GSM modulu jen ty, které budou využívány. Modul je nutné spouštět a vypínat, je třeba ověřit jeho připravenost a úroveň dostupného signálu GSM sítě. Využívány pak budou funkce odesílání SMS s předdefinovaným obsahem na zadané telefonní číslo, kontrola paměti přijatých zpráv a jejich obsahu a případně také volání na zadané telefonní číslo. Jak již bylo uvedeno, modul komunikuje prostřednictvím sériového rozhraní. Veškeré operace jsou tedy vykonávány plněním AT příkazů odeslaných z MCU. Výjimku tvoří pouze funkce pro zapínání modulu, která obsluhuje spínací tranzistor a tím v podstatě nahrazuje zmáčknutí tlačítka PWR_KEY uživatelem. Modul po spuštění a inicializaci odesílá po sériové lince příznak „RDY“, na který čeká MCU. Návrátová hodnota funkce, v případě že je znak zachycen, je 0, pokud znak zachycen nebyl, je návratová hodnota 1. Pro ostatní funkce byly podle [14] sestaveny posloupnosti AT příkazů a k vykonání určené operace jsou odesílány v návaznosti na odpovědi modulu. V případě dotazu na kvalitu signálu je návratová hodnota funkce přímo údaj RSSI, referovaný modulem. Funkce pro kontrolu přijaté SMS zprávy odešle dotaz na obsah paměti příchozích zpráv. Pokud je indikována nepřečtená zpráva, je z paměti vyčten obsah poslední nepřečtené SMS, a je prověřen na přítomnost řetězce „STOP“. Pokud je řetězec ve zprávě nalezen, návratová hodnota funkce je 1, pokud byla přijata SMS s jiným obsahem, návratová hodnota je zvolna 8. Pokud nebyla přijata nová SMS, funkce vrací hodnotu 0. Funkce pro vypínání modulu odesílá příkaz k softwarovému vypnutí GSM modulu. Všechny obslužné funkce byly vytvořeny v samostatném souboru SIM900.c, jejich prototypy jsou pak v souboru SIM900.h na příloženém CD.

Obsah 1. úlohy – GSM je následující. Pro předávání povelu pro GSM modul, mezi úlohami v systému RTX, byla vytvořena globální proměnná GSMcmd. Při zavolání úlohy GSM je nejprve kontrolován obsah této proměnné a pokud je rovna 0, není požadována žádná akce a úloha tak předá systémové prostředky 2. úloze. V případě že GSMcmd obsahuje hodnotu, je vykonána příslušná operace, povel v GSMcmd je vymazán a opět jsou prostředky předány 2. úloze. Protože komunikace s modulem může probíhat řádově až v jednotkách sekund, zejména při odesílání SMS, jsou v této úloze vypisovány informace o probíhajícím procesu na LCD.

Obsah 2. úlohy – Ethernet. Tato úloha je vyčleněna pro komunikaci s ethernetovým modulem ENC28J60. Komunikace mezi MCU a modulem probíhá prostřednictvím rozhraní SPI. Přestože byla vytvořena a částečně i odladěna vlastní knihovna pro MCU ke konfiguraci a obsluze rozhraní SPI, z časových důvodů zatím nebyla možnost využití ethernetového rozhraní dále rozvinuta.

Obsah 3. úlohy – Proces. V rámci této úlohy jsou prováděny veškeré operace spojené s řízením podružných jednotek ŘS. Protože je automatický proces řízení chodu KGJ značně komplikovaný, je úloha provedena jako stavový automat, přičemž každý stav představuje momentální stav, ve kterém se KGJ nachází. Pro každý stav je pevně definováno, na základě jakého podnětu lze přejít do dalšího stavu a za jak dlouho.

Stavový automat je tvořen celkem 15 provozními stavy a 1 havarijním, do kterého automat přejde při závažné chybě, např. při ztrátě komunikace s podružnými jednotkami. V tomto stavu je pak prostřednictvím SMS pagingu, pokud je aktivován, odesláno provozovateli KGJ chybové hlášení. Slovní popis stavového automatu by byl značně nepřehledný, a tak je alespoň schematicky znázorněn vývojovým diagramem na obrázku č. 32.



Obr. 32: Vývojový diagram stavového automatu 3. úlohy HJ

Ve stručnosti lze stavový automat rozdělit na část která, se opakuje neustále, tj dotazování podružných jednotek a ukládání provozních dat, další stavy jsou pak procedury pro vykonávání akcí nebo pro udržování nastavených provozních parametrů. V rámci 3. úlohy je rovněž vyplňován registr stavů a provozních hodnot, ze kterého jsou v další úloze čteny údaje pro zobrazení uživateli.

Obsah 4. úlohy – Menu. V této úloze je vytvořeno menu uživatelského rozhraní. Podobně jako v předchozí úloze i v Menu je použit stavový automat, tvořený 6 stavy. Základní stav, ve kterém se úloha nalézá je „Idle“, tedy stav kdy obsluha je neaktivní. Podsvícení LCD je vypnuté a nejsou zobrazovány žádné údaje. Zmáčknutím libovolného tlačítka přejde automat do aktivního stavu, podsvícení LCD je zapnuto a je zobrazen obsah 1. stránky menu. Při nečinnosti obsluhy delší než cca 20 s automat samovolně přejde zpět do neaktivního režimu. Každá ze 4 stránek menu obsahuje na

prvním řádku označení, následují 4 řádky výběru se zobrazenými údaji a poslední řádek slouží k popisu funkce 4 tlačítek, jejichž význam se mění podle aktuálně vybrané položky. Poslední stav automatu slouží jako editační okno pro nastavení a uložení hodnot. Pro informaci o provozních hodnotách KGJ jsou v menu zobrazeny hodnoty získané z podružných jednotek. Pro jejich reprezentaci v příslušných jednotkách musí být proveden potřebný výpočet podle následujících vztahů:

- napětí akumulátoru

$$V_{BAT} = \frac{V_{REF} \cdot VAL}{RES \cdot A} \quad [V; V, -, -, -] \quad (6)$$

kde: V_{REF} referenční napětí AD převodníku, $V_{REF} = 5$ V
 RES rozlišení AD převodníku, $RES = 256$
 VAL údaj o napětí předaný z JM
 A napěťový přenos odporového děliče, $A = 0,322$

- teplota motoru

$$t_M = \left(\frac{V_{REF} \cdot VAL}{RES} - \frac{A}{V_{BAT}} \right) \cdot \frac{V_{BAT}}{B} \quad [^{\circ}C; V, -, -, -, V, V, -] \quad (7)$$

kde: V_{REF} referenční napětí AD převodníku, $V_{REF} = 5$ V
 VAL údaj o teplotě předaný z JM
 RES rozlišení AD převodníku, $RES = 256$
 V_{BAT} napětí akumulátoru [V]
 A, B konstanty pro korekci napěťové závislosti, $A = 29,502$, $B = 0,2076$

- množství paliva

$$F_P = \frac{VAL}{RES} \cdot 100 \quad [%; -, -] \quad (8)$$

kde: VAL údaj o množství paliva předaný z JM
 RES rozlišení AD převodníku, $RES = 256$

- otáčky motoru

$$RPM = \frac{VAL}{\Delta t} \cdot 10 \quad [min^{-1}; -, s] \quad (9)$$

kde: VAL počet impulzů předaný z JM
 Δt časový interval měření otáček, $\Delta t = 0,3$ s

- frekvence:

$$f = \frac{1}{VAL \cdot \Delta t} \quad [Hz; -, s] \quad (10)$$

kde: VAL údaj o délce periody předaný z JG
 Δt časové rozlišení při měření periody, $\Delta t = 128 \cdot 10^{-3}$ s

- proud (efektivní hodnota)

$$I_{EF} = \frac{V_{REF} \cdot VAL}{RES \cdot SENS \cdot \sqrt{2}} \quad [A; V, -, -, V \cdot A^{-1}] \quad (11)$$

kde: V_{REF} referenční napětí AD převodníku, $V_{REF} = 5$ V
 VAL údaj o maximální hodnotě měřeného proudu z JG
 RES rozlišení AD převodníku, $RES = 1024$
 $SENS$ citlivost proudového čidla, $SENS = 66 \cdot 10^{-3} V \cdot A^{-1}$

- napětí (efektivní hodnota)

$$U_{EF} = \frac{V_{REF} \cdot VAL}{RES \cdot A \cdot \sqrt{2}} \quad [V ; -] \quad (12)$$

kde: V_{REF} referenční napětí AD převodníku, $V_{REF} = 5 \text{ V}$
 VAL údaj o maximální hodnotě měřeného napětí z JG
 RES rozlišení AD převodníku, $RES = 1024$
 A napěťový přenos transformátoru a odporového děliče, $A = 6,99 \cdot 10^{-3}$

- účinník

$$\cos \varphi = 1 - \left| \frac{REF - VAL}{B} \right| \quad [- ; -, -, -] \quad (13)$$

kde: REF referenční hodnota fázového posunu, $REF = 130$
 VAL údaj o fázovém posunu z JG
 B převodní konstanta, $B = 55,56$

Program HJ je výrazně obsáhlejší, než jak je uvedeno ve shora uvedeném stručném popisu. Podrobnější popis by však byl již nad rámec této práce a pro detailnější pochopení je možné nahlédnout do zdrojových kódů ve složce HJ_fw na CD.

4.4 Uvedení ŘS do provozu

Některé práce spojené s instalací ŘS byly provedeny již v rámci ožívování a testování jednotek. KGJ však musela být v provozuschopném stavu i po dobu vývoje ŘS, takže definitivní úprava byla provedena až po dokončení přípravy všech jednotek.

4.4.1 Instalace jednotek

Vzhledem k povaze prostředí provozovny KGJ byly podružné jednotky vestavěny do kovových krabic. V případě JM byla použita masivní hliníková elektroinstalační krabice se stupněm krytí IP64 o rozměrech 80x230x120 mm. Krabice je opatřena plastovými kabelovými vývodkami s pojistnými maticemi pro sevření kabelu. Jednotka je umístěna na podpěrné konstrukci palivové nádrže v blízkosti motoru. Kabely vedené při bloku motoru jsou opatřeny kabelovou chráničkou z nerezavějící oceli o světlosti 12 mm, ostatní vodiče a kabely jsou v plastové chráničce o světlosti 16 mm. Mezi motorem a JM je na vedení ponechán průvės, aby byl potlačen vliv vibrací od motoru. Pro montáž servopohonu ovládací páky byl vyroben držák z ocelových profilů. Elektromagnetický ventil je instalován v blízkosti palivové nádrže, nad JM. Pohled na již nainstalovanou JM je na fotografii v příloze D.1.

Jednotka generátoru je vestavěna do krabice z ocelového plechu o rozměrech 220x140x90 mm a je umístěna v rozvaděčové skříně, na místě původního vibračního regulátoru. Krabice je rovněž opatřena kabelovými vývodkami, hliníkový chladič tranzistoru IGBT byl ponechán uvnitř krabice. Umístění JG je výhodné z praktického hlediska, neboť připojovací svorkovnice i fázovací stykač generátoru a sítě je ve společném rozvaděči. Vodiče sběrnice jsou ve společném kabelu FTP, spolu s napájecími. Kabel je veden v plastových elektroinstalačních trubkách a lištách, některé úseky jsou vedeny také plastovou chráničkou. Celková délka sběrnice je přibližně 30 m.

HJ je vestavěna do plastové přístrojové krabice o rozměrech 150x70x180 mm, pro napájení jednotky je použit mimo společný rozvod napájení také samostatný napájecí adaptér 12 V / 1 A, který slouží jako záloha napájení HJ. V případě nečekaného výpadku napájení ŘS tak může HJ uvědomit obsluhu. Aby bylo možné ladit program HJ a tak i chod celého ŘS, je pro připojení sběrnice použit konektor. HJ sice bude trvale umístěna v obytné části domu, ale je možné ji připojit i v provozovně kogenerace. Pro zajištění trvale kvalitního příjmu GSM signálu bylo připraveno 10 m dlouhé koaxiální anténní vedení pro připojení venkovní antény. V místě HJ je rovněž ethernetový router. Fotografie HJ je v příloze D.1.

4.4.2 Ladění programu

Spuštění ŘS do provozu probíhalo postupně, spolu s odhalováním nedostatků. Nejprve bylo odladěno ovládání JM. Objevil se zde problém, způsobený prioritami přerušení v MCU ATmega16. Chyba způsobovala uváznutí programu v obsluze přerušení, pokud po dobu obsluhy servopohonu byl obdržen povel ze sběrnice, HJ tak hlásila ztrátu komunikace s jednotkami na sběrnici. Chyba byla odhalena zkoumáním hodnoty návěstí, využitého v JM pro kontrolu využití periférií MCU. Aby k uvedené chybě již dále nedocházelo, byl program vhodně doplněn o zákaz a opětovné povolení příjmu dat rozhraním UART. Dále byl program HJ upraven kvůli časování povelů pro JM a také pro delší interval příjmu odpovědi, která zejména při chodu servopohonu byla v několika případech ztracena. Pro sledování komunikace na sběrnici byl využit převodník RS485/UART a další převodník UART/USB, komunikace pak byla zachytávána programem Realterm a zobrazována v hexadecimálním tvaru. Až po důkladném prověření funkce ovládání JM bylo možné přejít k ladění JG.

Již při ladění programu řízení jednotky motoru bylo možné pozorovat chování JG v režimu generátoru naprázdno. Zde byl patrný problém s automatickou regulací napětí generátoru. Při zkoumání reakce jednotky na pokles napětí při snížení otáček motoru bylo zřetelné kolísání napětí okolo požadované hodnoty namísto jeho ustálení na jmenovité hodnotě. Firmware JG byl upraven tak, aby v posledním Byte rámce byl odeslán údaj o střídě PWM signálu namísto kontrolního součtu. Díky tomu byla zjištěna příčina uvedeného jevu. Změna napětí generátoru nastává po změně budicího proudu až po určité časové prodlevě. Původní způsob změny střídě, podle aktuální hodnoty napětí, byl tedy příliš rychlý a docházelo tak ke kmitání regulace. Výsledkem bylo kolísání napětí generátoru mezi cca 200 až 240 V. Problém byl odstraněn zpomalením regulační smyčky spolu s doplněním přesahu hodnot, aby namísto porovnávání jedné požadované hodnoty byl použit toleranční rozsah v jejím okolí. Pro zajištění dostatečné rychlosti regulace při odlehčení zatíženého generátoru byl navíc program doplněn o jednorázové skokové urychlení regulace, aby nedošlo k prudkému nárůstu napětí. Výsledkem ladění programu je uspokojivá funkce regulace buzení generátoru jak naprázdno, tak i při proměnlivém zatížení při ostrovním provozu KGJ.

Následovalo ladění programu pro obsluhu fázovacího stykače, kde bylo třeba vhodně upravit firmware JG, aby nedocházelo ke stejnému problému jako v případě JM, tedy ztrátě komunikace při odeslání povelů z HJ po dobu fázování. Odstraněním těchto nedostatků byl ŘS připraven pro zkoušku autonomního chodu s dodávkou do sítě.

4.4.3 Provozní zkoušky

Spouštění KGJ je prováděno z uživatelského menu v HJ. Nejprve je nutné nastavit požadovaný výkon KGJ na nenulovou hodnotu, a to i v případě ostrovního režimu. Po nastavení hodnoty výkonu a jejím uložení již stačí ve volbě režimu změnit nastavení z možnosti „Stop“ na volbu „Ostrov“ pro ostrovní chod KGJ bez připojení k rozvodné síti, anebo „Dodej“, pokud je požadováno připojení a dodej energie do sítě. Pro účely kontroly činnosti ŘS je prozatím na volný řádek LCD vypisována položka stavového automatu, která je právě aktivní. Lze tak tedy přímo pozorovat proces řízení KGJ.

Po zadání požadovaného výkonu a režimu provede ŘS veškeré operace, tak jako by je prováděla obsluha ručně. Po odstranění prvotních obtíží s přecházením do chybového stavu v důsledku ztráty komunikace HJ s podružnými jednotkami se již zásadní problémy nevyskytovaly. Bylo provedeno několik desítek zkušebních startů a odstavení KGJ z ostrovního režimu, přičemž pouze v jednom případě došlo k přechodu do chybového stavu kvůli chybě v procesu nastavování jmenovitých otáček motoru naprázdno. Chyba v programu HJ byla odstraněna a byly provedeny další zkoušky, již s připojením k DS. Vyskytlo se několik dalších drobných chyb, nejprve v regulaci účinníku při dodávce, kdy po několika minutách JG vyhodnotila poruchový stav a došlo k odpojení KGJ od rozvodné sítě. Další chyby se objevily ve výpisu hodnot na LCD, šlo o nevhodné formátování výpisu hodnoty.

Pro ověření reakcí ŘS byly provedeny i zkoušky se simulací poruchového stavu. Nejprve byla KGJ uvedena do stavu dodávky a za chodu byl ručně vypnut hlavní jistič. Po několika sekundách JG vyhodnotila situaci a rozpojila fázovací stykač, do HJ byl pak odeslán v rámci odpovědi status „odpojen po chybě“. Program HJ přešel dle nastaveného požadovaného režimu do příslušného stavu pro pokus o opětovné přifázování. Zde bylo zjištěno, že chybí napětí sítě a tak přešla HJ do chybového stavu a JM byl odeslán povel k zastavení motoru.

V rámci další zkoušky byla opět KGJ uvedena do režimu dodávky, přičemž po krátké době byl přerušen přívod paliva k motoru. Během okamžiku byl znatelný pokles výkonu. Krátce nato JG vyhodnotila nepřipustný stav generátoru během dodávky a byl rozpojen fázovací stykač. HJ po vyhodnocení situace při neúspěšném pokusu o nastavení jmenovitých otáček přešla opět do chybového stavu, byl zastaven motor a přívod paliva, a protože byl v menu aktivován paging, HJ se pokusila odeslat SMS s hlášením chyby. Protože je však v místě provozovny KGJ síť zvoleného operátora nedostupná, tato akce se nezdařila. Nicméně reakce HJ byla i tak adekvátní a KGJ byla korektně odstavena.

Přestože vývoj ŘS stále probíhá, lze konstatovat, že zvolená koncepce je schopna vykonávat požadované úkony a již nyní je díky ŘS umožněna obsluha kogenerační jednotky i laické osobě. Je pravděpodobné, že během déle trvajících provozu vyvstanou některé další problémy. Celý systém je značně komplikovaný a stále ještě vyžaduje jistá zdokonalení. Prioritou v dalším vývoji je dosažení maximální spolehlivosti provozu a také implementace webového serveru pro zobrazování provozních dat a jejich statistik. Výhledově je také uvažována možnost automatizace celého topného systému v objektu, čímž by se otáčení celoročně mohlo stát prakticky bezobslužným.

ZÁVĚR

V rámci návrhu byla zvolena koncepce ŘS pro kogenerační jednotku, jednotkám systému byly přiřazeny úlohy a byla připravena jejich následná realizace. Již při návrhu byl zohledněn požadavek na umožnění vzdáleného dohledu a na případnou signalizaci mimořádných událostí prostřednictvím SMS zpráv provozovateli KGJ. V práci jsou diskutovány důvody pro zvolené způsoby řešení systému a jeho částí. Důležité části návrhu byly nejprve buď prakticky nebo alespoň teoreticky ověřeny.

Všechny jednotky systému byly po návrhu realizovány. V případě hlavní jednotky byl zvolen profesionální způsob výroby desky plošných spojů. Po výrobě byly DPS postupně osazovány součástkami a bylo provedeno jejich oživení. Pro všechny jednotky byl vytvořen firmware podle požadavků aplikace dané jednotky. Během instalace součástí ŘS probíhalo ladění a úprava programů jednotek. Po úplném dokončení instalace ŘS byl v rámci uvedení do provozu dále laděn program hlavní jednotky a byly odstraněny i některé nedostatky ve firmware podružných jednotek.

Následně bylo provedeno několik provozních zkoušek a to jak za chodu KGJ v režimu bez dodávky, tak i s připojením a dodávkou energie do distribuční soustavy. Při zkouškách byl chod KGJ i ŘS zcela autonomní, zásah obsluhy byl proveden pouze za účelem vyvolání mimořádného stavu. Sledováním reakce ŘS pak byla ověřena jeho správná funkce při výskytu poruchy, včetně uvědomění provozovatele o výskytu chyby za provozu KGJ. Vývoj ŘS stále ještě není ukončen. Prioritou při dalším vývoji je implementace programové obsluhy ethernetového modulu do firmware hlavní jednotky, která nebyla prozatím z časových důvodů provedena. Systém však již nyní plní svou funkci dle požadavků stanovených při jeho návrhu.

PRAMENY A POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DVORSKÝ, E., HEJTMÁNKOVÁ, P. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 287s. ISBN 80-7300-118-7.
- [2] Zákon č. 165/2012 Sb., *o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů* [online]. 30.5.2012 [cit. 10.12.2012]. Dostupné z URL : <<http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24254>>
- [3] Energetický regulační úřad, *FAQ – podporované zdroje energie* [online]. 6.2.2013 [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <http://www.eru.cz/dias-read_article.php?articleId=1670>
- [4] ČKD PRAHA oborový podnik. *Návod k obsluze a údržbě naftových motorů Škoda řady S110*. 3. vydání. Praha: propagační oddělení obchodnětechnických služeb odbytu naftových motorů, 1969. 70 s.
- [5] ŠKODOVY ZÁVODY n. p. *Dieselovy motory*. Praha: KOVO akciová společnost pro obchod s kovodělnými a strojními výrobky a surovinami, 1951. 8 s.
- [6] Atmel corporation, *AT91SAM ARM-based Flash MCU* [online]. 26.10.2012 [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.atmel.com/Images/doc6175.pdf>>
- [7] Shanghai SIMCom wireless solutions Ltd., *Hardware design SIM_900_HD_V1.01* [online]. 26.12.2009. [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <[http://www.simcom.us/act_admin/supportfile/SIM900_HD_V1.01\(091226\).pdf](http://www.simcom.us/act_admin/supportfile/SIM900_HD_V1.01(091226).pdf)>
- [8] Analog Devices, *Microstrip and stripline design* [online]. 2009. Dostupné z URL: <<http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-094.pdf>>
- [9] Microstrip line calculator, Dostupné z URL: <http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms_line_e.htm>
- [10] Microchip, *ENC28J60 Stand-Alone Ethernet Controller with SPI Interface* [online]. 26.10.2012. [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39662e.pdf>
- [11] Texas Instruments, *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150 kHz 3A Step-Down Voltage Regulator* [online]. 4.2013. [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/gpn/lm2596>>
- [12] STANĚK, Jan. *RS 485 & 422* [online]. Redakce HW serveru: 1998. [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/rs-485-422.html>>
- [13] ŠPRINGL, Vít. *Měření teploty – polovodičové odporové senzory teploty* [online]. Redakce HW serveru: 2004. [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>
- [14] Shanghai SIMCom wireless solutions Ltd., *AT Commands set SIM_900_ATC_V1.00* [online]. 15.1.2010. [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <<http://wm.sim.com/downloaden.aspx?id=2987>>
- [15] Texas Instruments Incorporated. *RS-485: Passive failsafe for an iddle bus* [online]. 2009. [cit. 10.12.2013]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/SLYT324>>

- [16] Philips Semiconductors. *KTY81 Silicon temperature sensors* [online]. 2000. [cit. 4.5. 2014]. Dostupné z URL: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/philips/KTY81-2SERIES_4.pdf>
- [17] ŘEZÁČ, Kamil. *Krokové motory: princip funkce, metody řízení*. [online]. Robotika.cz: 28.10.2002. [cit. 4.5.2014]. Dostupné z URL: <<http://robotika.cz/articles/steppers/cs>>
- [18] Shindengen Electric Mfg. Co. Ltd. *Stepping motor driver ICs: MTD series*. [online]. 2000. [cit. 4.5.2014]. Dostupné z URL: <http://www.shindengen.co.jp/product/semi/datasheet/U170_MTD2003F.pdf>
- [19] STAVINOV, Evgeni. *A Practical Parallel CRC Generation Method* [online]. 2010, Dostupný z WWW: <<http://outputlogic.com/my-stuff/circuit-cellar-january-2010-crc.pdf>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AD	Analog to Digital, digitální převodník analogového signálu
ARM	Acorn RISC Machine, zkratka názvu architektury procesorů
ČR	Česká Republika
DBGU	DeBuG Unit, jednotka s ladicím rozhraním
DCS	Digital Cellular Service, pásmo digitálního buňkového systému GSM
DMA	Direct Memory Access, přímý přístup do paměti
DPS	Deska Plošných Spojů
EGSM	Extended GSM, rozšířené frekvenční pásmo GSM
GPIO	General Purpose In Out, vstup a výstup pro obecné použití
GSM	Groupe Spécial Mobile, globální systém mobilní komunikace
HJ	Hlavní Jednotka
HW	Hard Ware
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, tranzistor s izolovanou elektrodou
IMEI	International Mobile Equipment Identity, mezinárodní identifikátor
ISP	In System Programming, programovací rozhraní MCU
ITU	International Telecommunication Union, mezinár. telekomunikační úřad
JM	Jednotka Motoru
JG	Jednotka Generátoru
KGJ	Kogenerační Jednotka
LCD	Liquid Crystal Display, zobrazovač s kapalnými krystaly
LED	Light-Emitting Diode, svítivá dioda
LQFP	Low Profile Quad Flat Package, čtyřhranné pouzdro s nízkým profilem
MCU	Micro Controller Unit, mikrokontrolér
MWe	Mega Watt elektrického výkonu
NTC	Negative Temperature Coefficient, záporný teplotní součinitel
OZE	Obnovitelný Zdroj Energie
PC	Personal Computer, osobní počítač
PCS	Public Cellular System, frekvenční pásmo GSM
PDIP	Plastic Dual In-line Package, plastové dvouřadé pouzdro
PWM	Pulse – Width Modulation, pulzně – šířková modulace

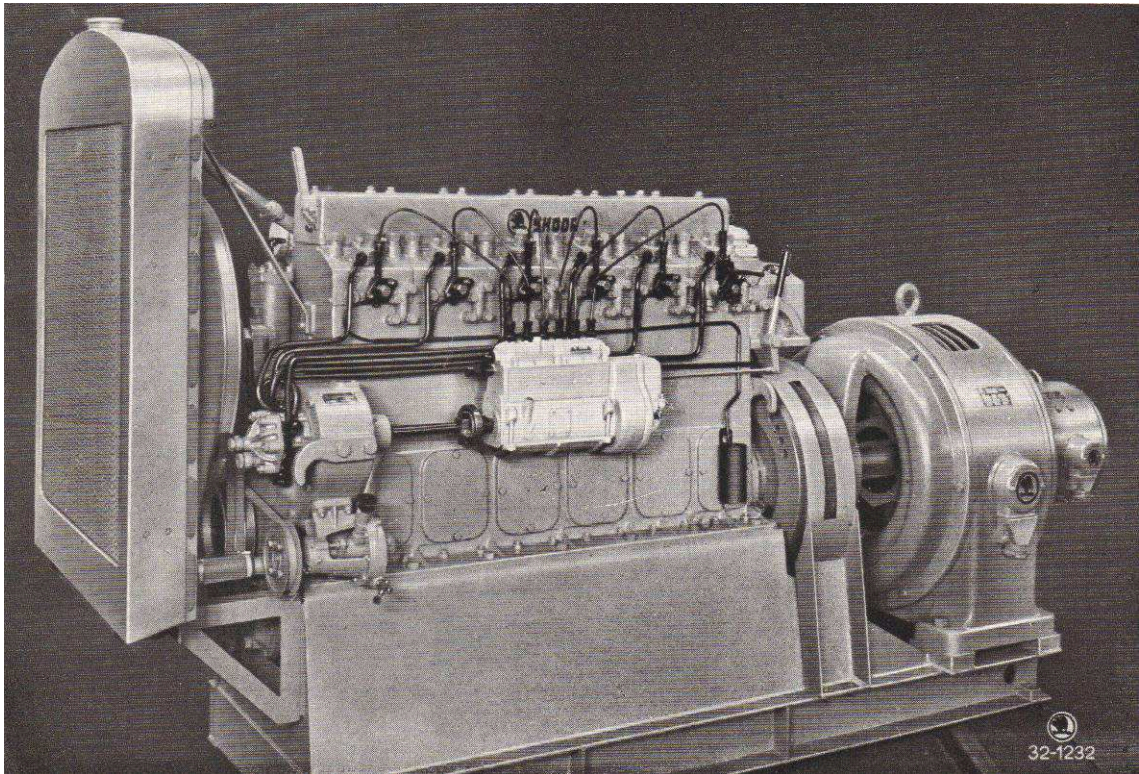
RAM	Random Access Memory, paměť s náhodným přístupem
RF	Radio Frequency, rádiová frekvence
ROM	Read Only Memory, paměť pouze pro čtení
ŘS	Řídicí Systém
SCLK	System Clock, systémový hodinový signál
SIM	Subscriber Identity Module, účastnická identifikační karta
SMA	Subminiature A, miniaturní konektor typu A
SMD	Surface Mounted Device, součástka pro povrchovou montáž
SMS	Short Message Service, textová zpráva
SMT	Surface Mounted Technology, technologie povrchové montáže
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní
SRAM	Static RAM, statická paměť
TC	Timer/Counter, časovač/čítač
TP	Twisted Pair, kroucený pár
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, sériové rozhraní
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice

SEZNAM PŘÍLOH

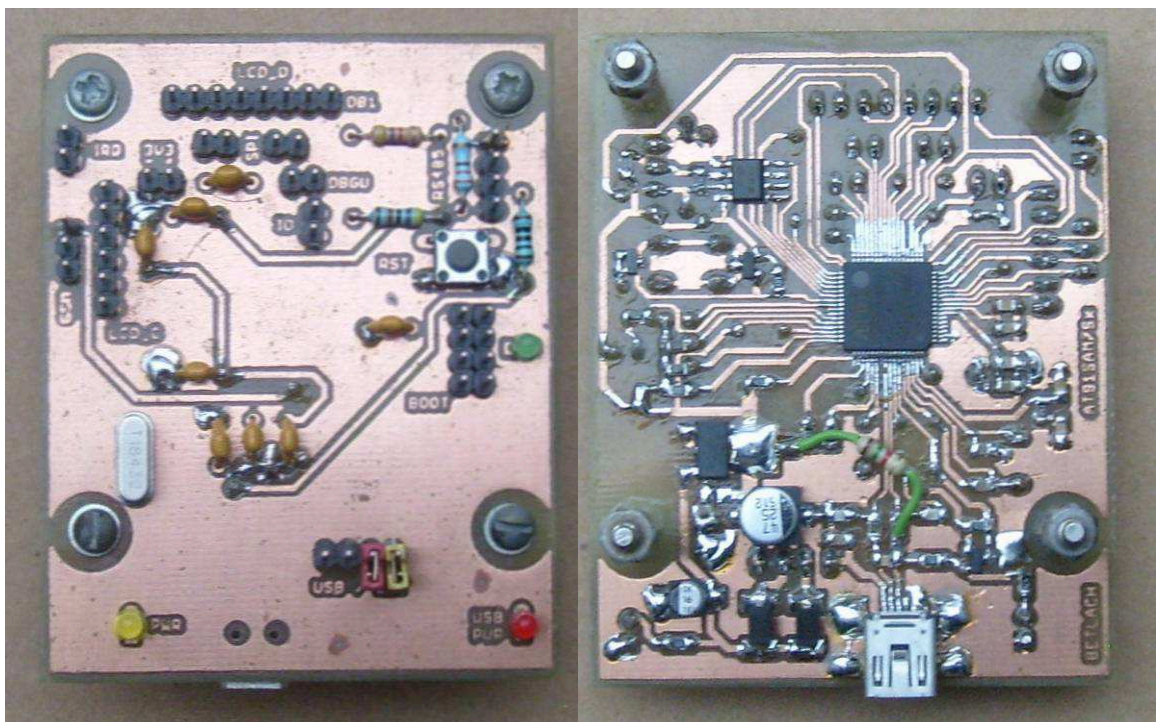
A	Návrh ŘS	58
A.1	Ilustrační snímek soustrojí KGJ.....	58
A.2	Fotografie testovací desky	58
B	Návrh DPS	59
B.1	Úplné schéma zapojení hlavní jednotky	59
B.2	Osazovací plán DPS hlavní jednotky.....	61
B.3	Úplné schéma zapojení JM	62
B.4	Osazovací plán DPS jednotky motoru	63
B.5	Úplné schéma zapojení JG.....	64
B.6	Osazovací plán DPS jednotky generátoru	66
C	Seznamy součástek	67
C.1	Seznam součástek HJ	67
C.2	Seznam součástek JM	68
C.3	Seznam součástek JG.....	69
D	Realizace ŘS	71
D.1	Jednotky ŘS a jejich instalace	71
D.2	Celkový pohled na KGJ	72

A NÁVRH ŘS

A.1 Ilustrační snímek soustrojí KGJ

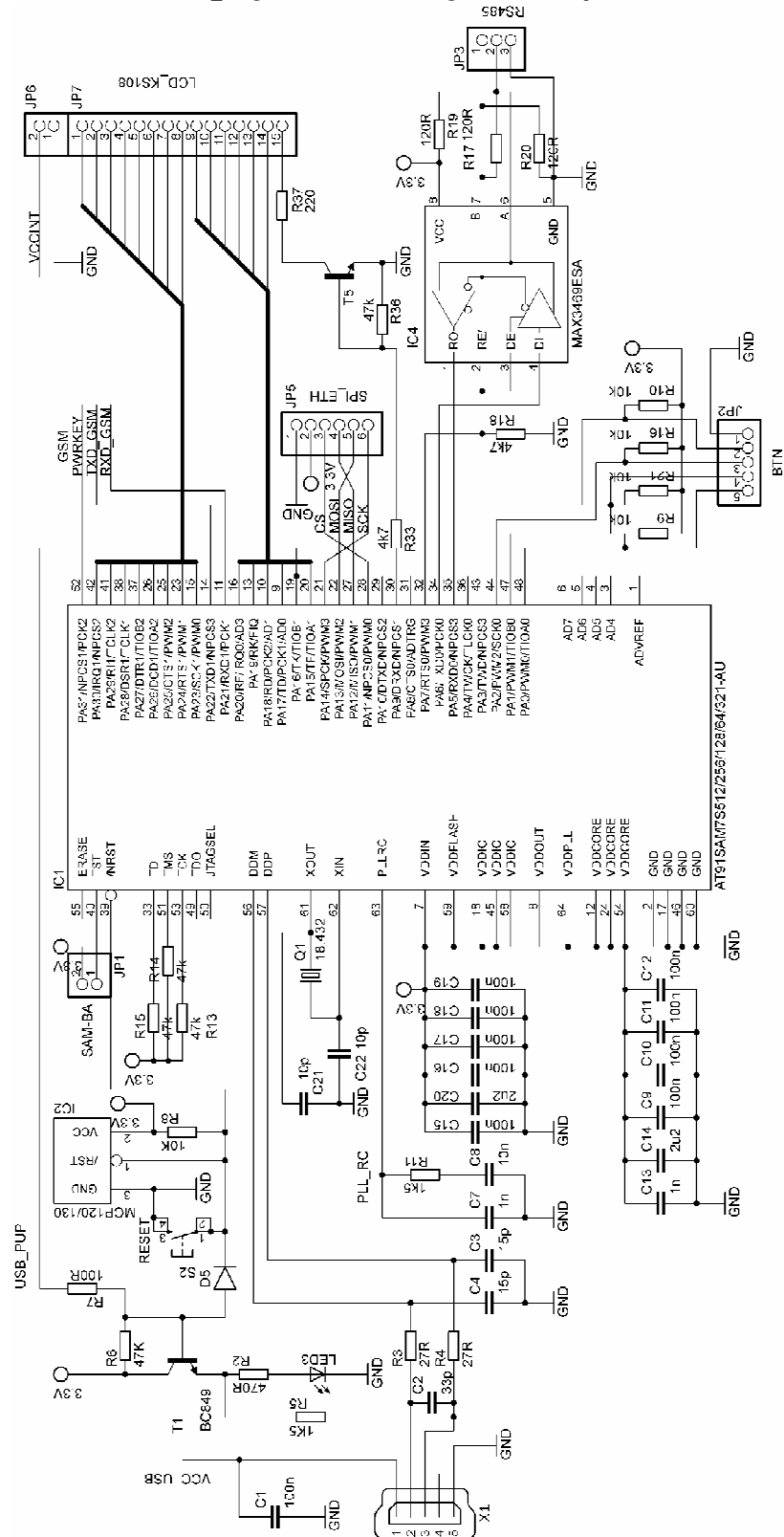


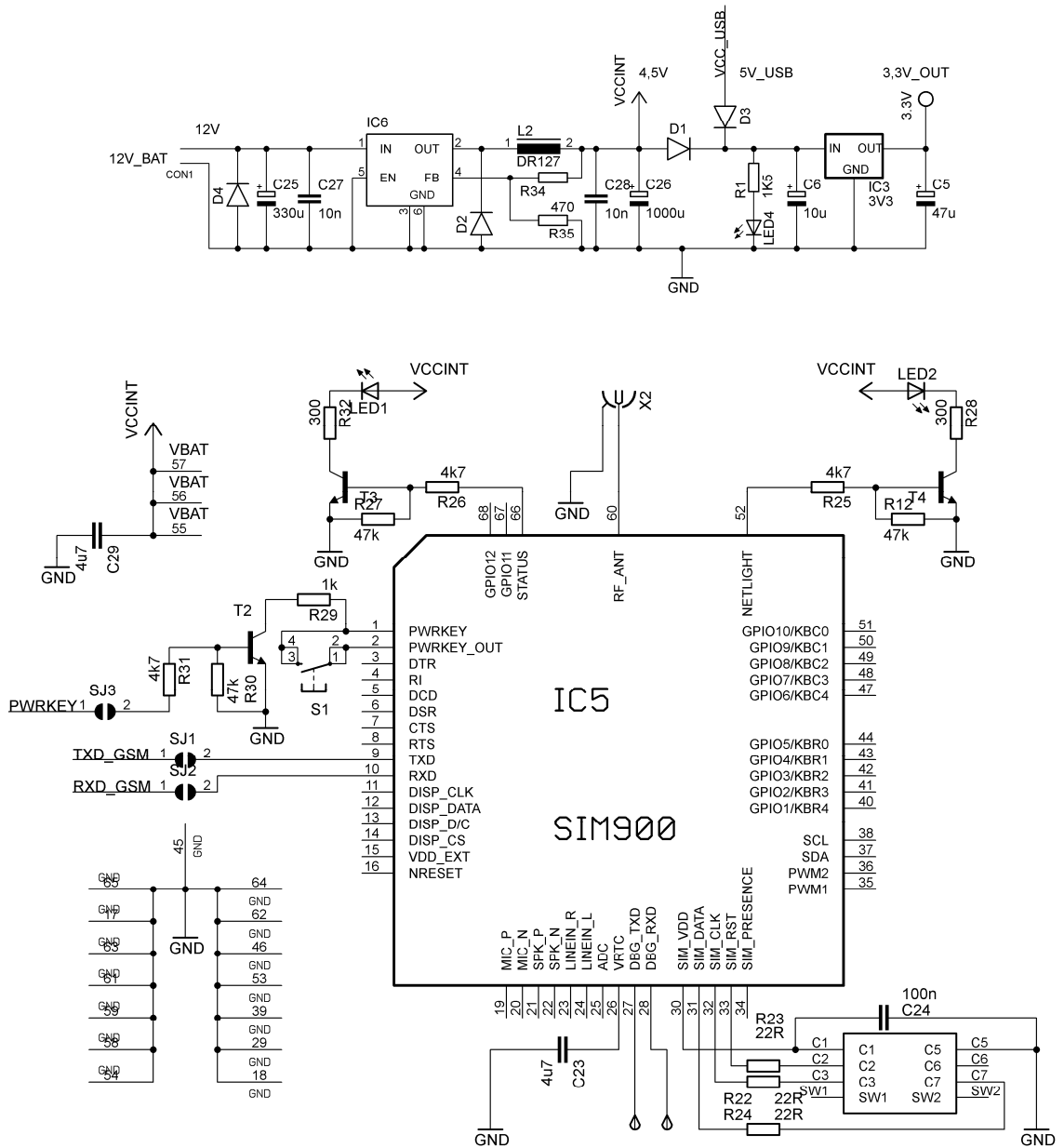
A.2 Fotografie testovací desky



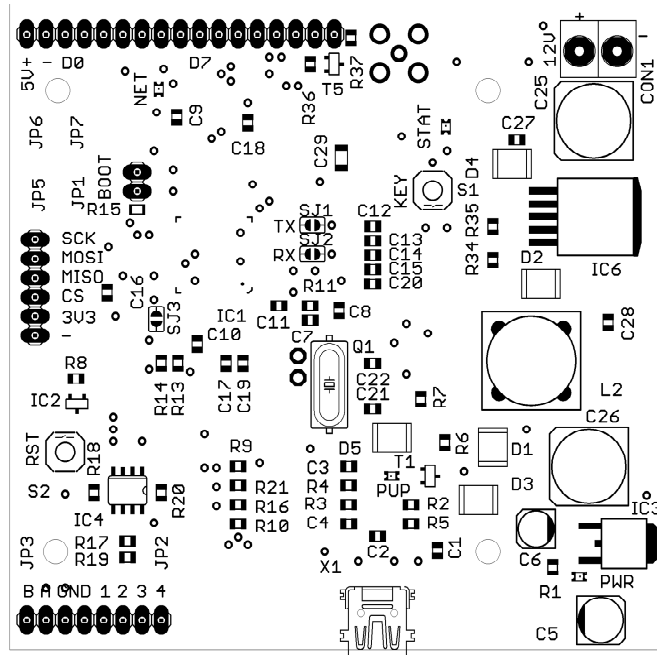
B NÁVRH DPS

B.1 Úplné schéma zapojení hlavní jednotky

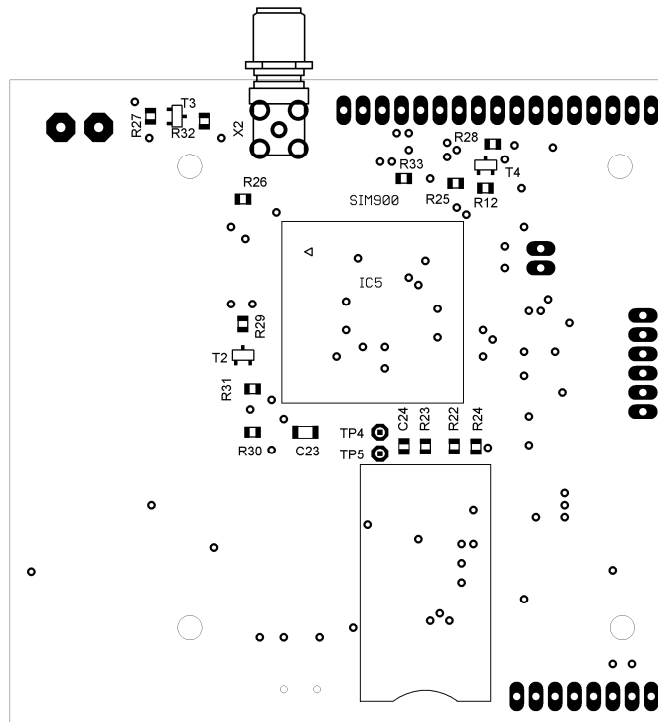




B.2 Osazovací plán DPS hlavní jednotky

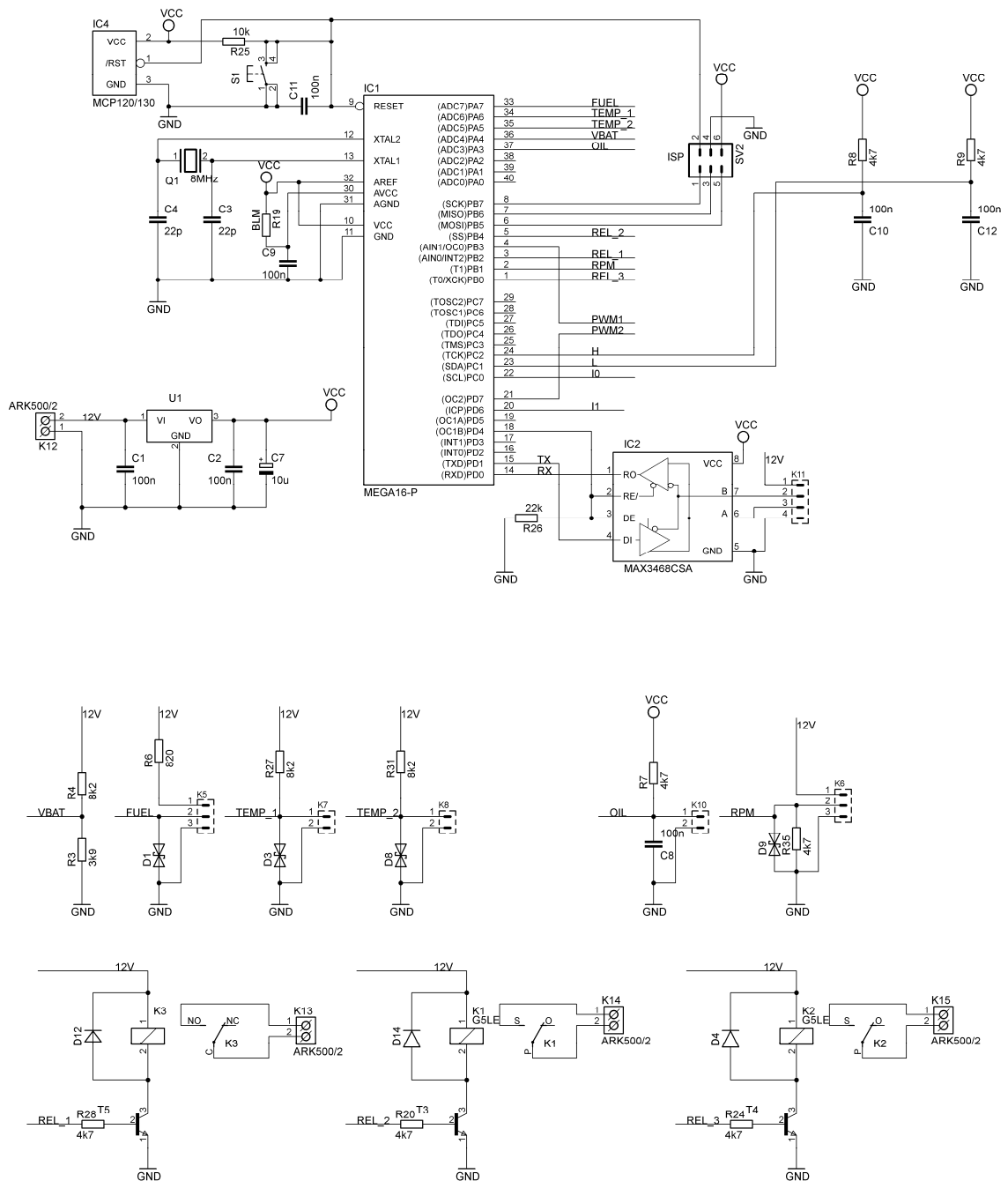


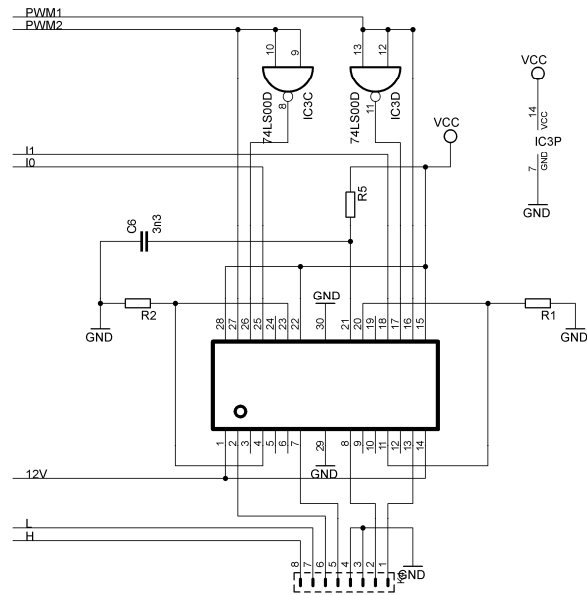
Horní strana, rozměr desky 87,5 x 85,5 [mm], měřítko M1:1



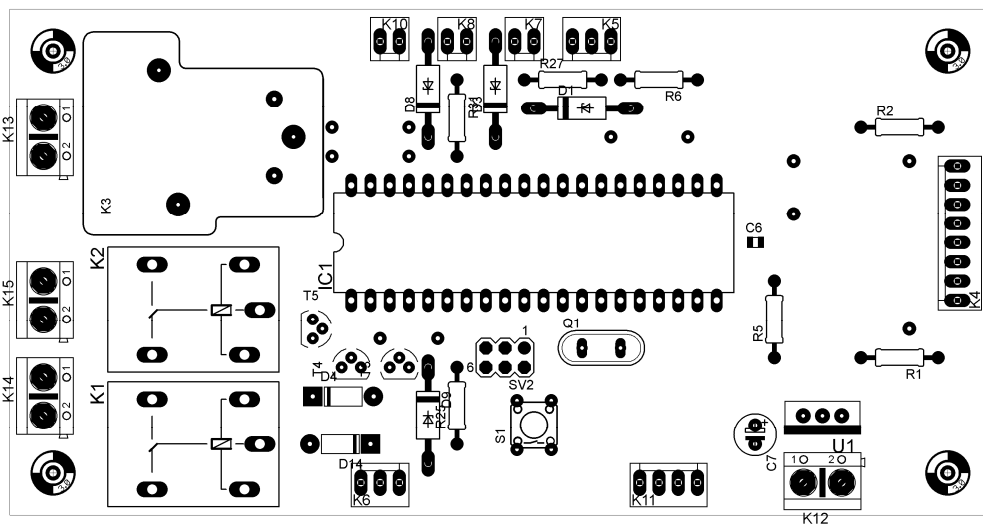
Spodní strana, rozměr desky 87,5 x 85,5 [mm], měřítko M1:1

B.3 Úplné schéma zapojení JM

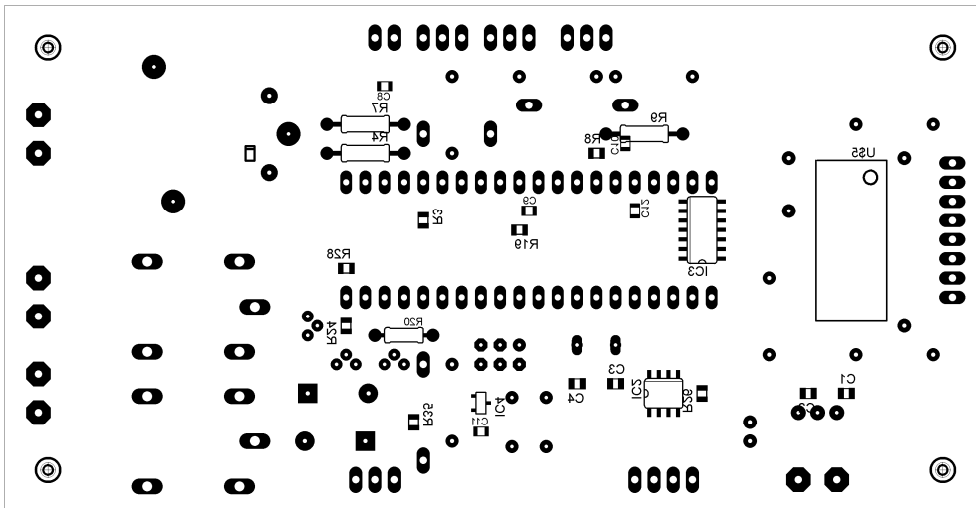




B.4 Osazovací plán DPS jednotky motoru

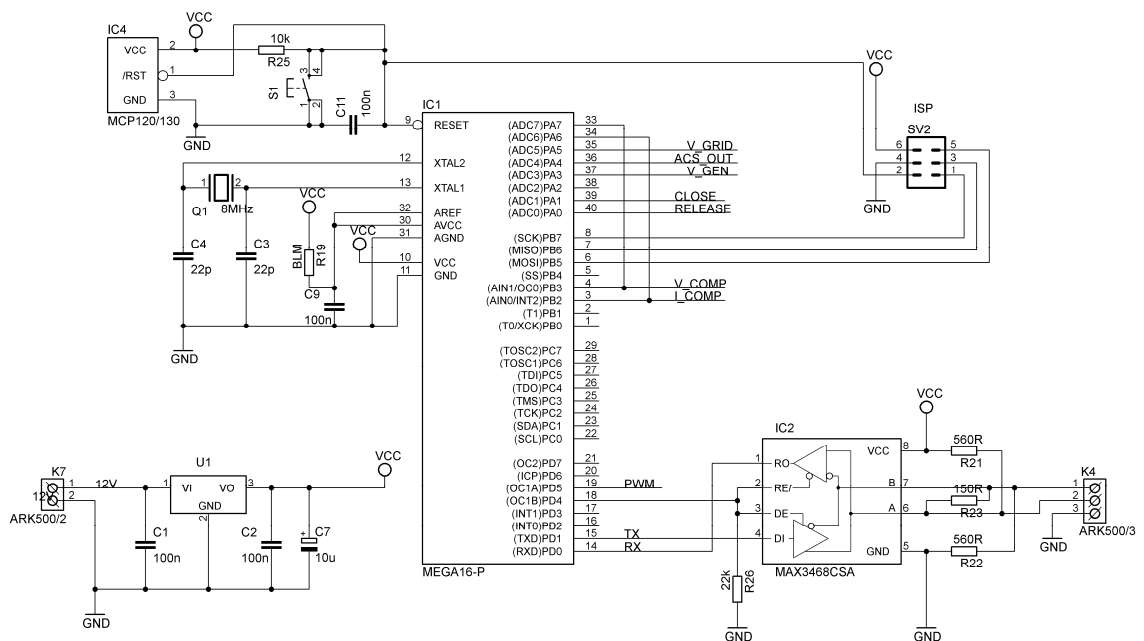


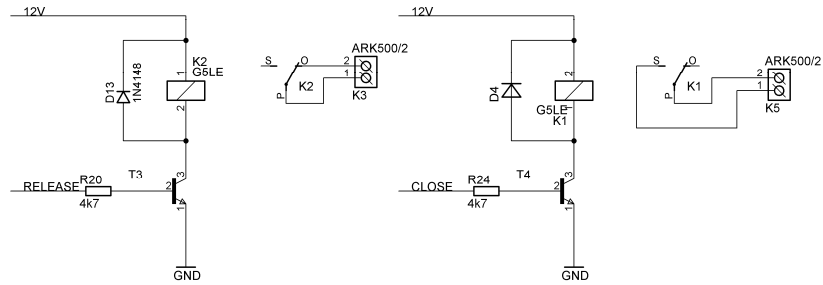
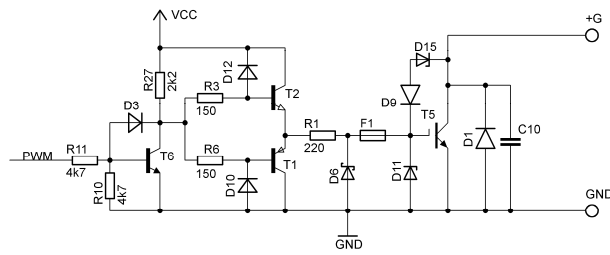
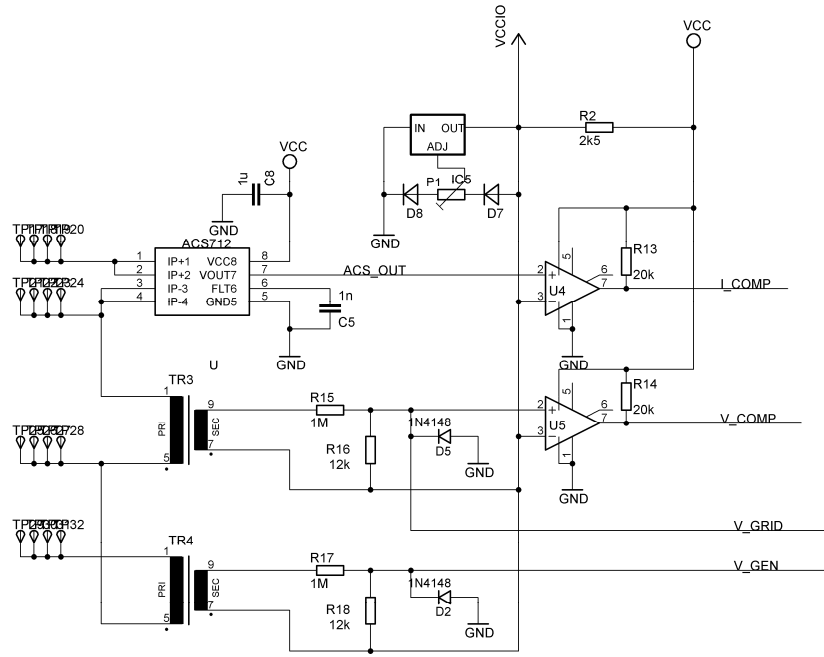
Horní strana, rozměr desky 129 x 67 [mm], měřítko M1:1



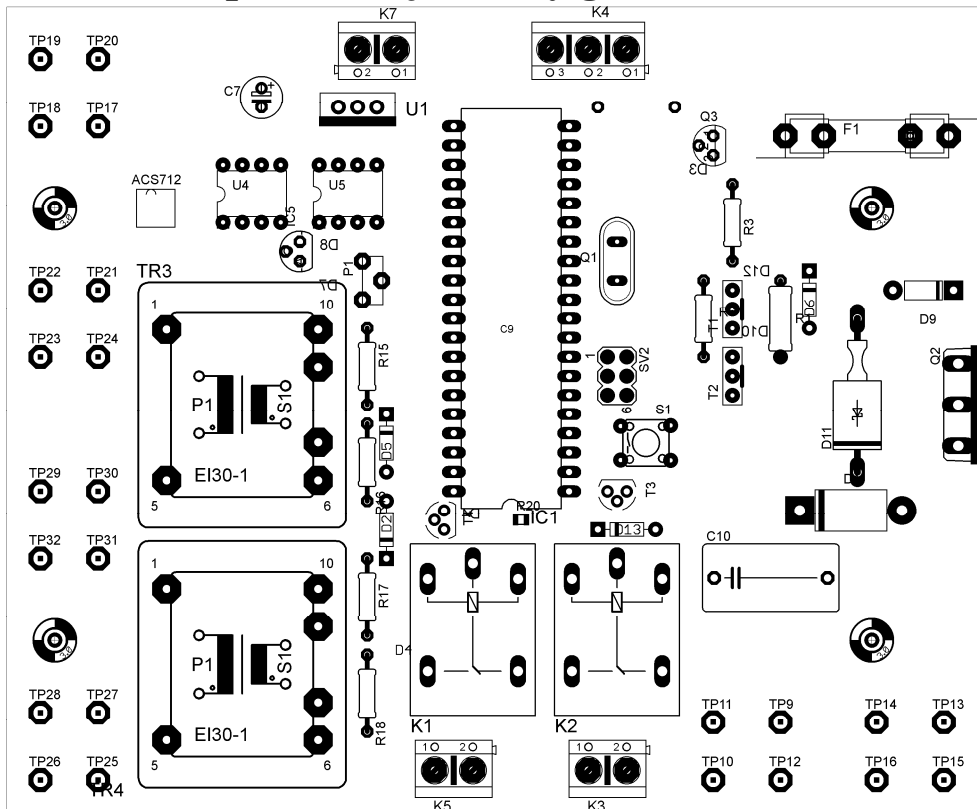
Spodní strana, rozměr desky 129 x 67 [mm], měřítko M1:1

B.5 Úplné schéma zapojení JG

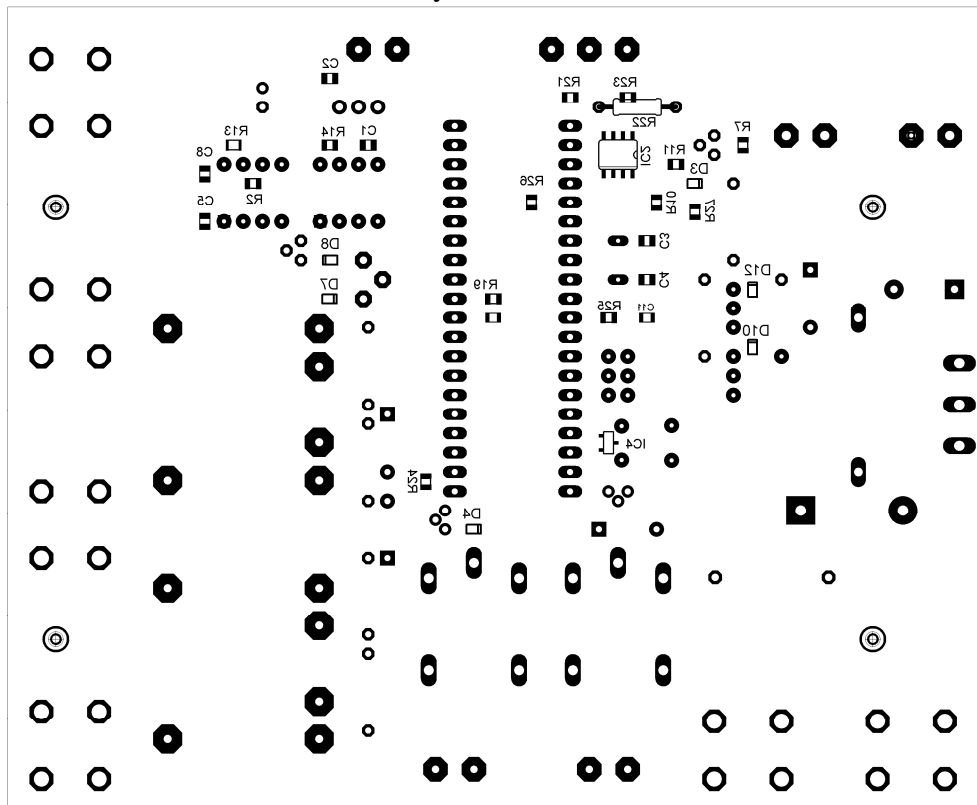




B.6 Osazovací plán DPS jednotky generátoru



Horní strana, rozměr desky 129,5 x 106,5 [mm], měřítko M1:1



Spodní strana, rozměr desky 129,5 x 106,5 [mm], měřítko M1:1

C SEZNAMY SOUČÁSTEK

C.1 Seznam součástek HJ

Označení	Hodnota / typ	Pouzdro	Popis
C1	100n	C0805	
C2	33p	C0805	
C3,C4	15p	C0805	
C5	47u	SMD_C6	Elektrolytický, SMD 10V
C6	10u	SMD_B6	Elektrolytický, SMD 10V
C7,C13	1n	C0805	
C8	10n	C0805	
C9-C12	100n	C0805	
C14,C20	2u2	C0805	Keramický
C15-C19	100n	C0805	
C21,C22	10p	C0805	
C23	4u7	C1206	Keramický
C24	100n	C0805	
C25,C26	220u	153CLV-1010	Elektrolytický, 10V
C27,C28	10n	C0805	
CON1	ARK500/2	ARK500/2	Svorkovnice šroubovací
D1-D5	1N4007SMD	MELF	
IC1	AT91SAM7S	LQFP64	MCU
IC2	MCP130	SOT23	Reset watchdog, 3,3 V
IC3	LM3117 3V3	TO252	Low-drop stabilizátor
IC4	MAX3485	SO08	Převodník RS485
IC5	SIM900	SIM900	GSM modul
IC6	LM2596S	TO263-5	Spínaný stabilizátor
JP1,JP6	JP1E	JP1	Jumperové kolíky
JP2	PINHD-1X5	1X05	Dutinková lišta
JP3	PINHD-1X3	1X03	Dutinková lišta
JP4	PINHD-1X14	1X14	Dutinková lišta
JP5	PINHD-1X6	1X06	Dutinková lišta
L2	330uH	DR127	Indukčnost, ferrit, SMD
LED1-LED4	LED_SMD	LED_0805	SMD LED 2 mA
Q1	18,432MHz	SM49	Krystal, SMD
R1,R5	1K5	R0805	
R2	470R	R0805	
R3,R4	27R	R0805	
R6	47K	R0805	
R7	100R	R0805	
R8-R10	10k	R0805	
R11	1k5	R0805	
R13-R15	47k	R0805	
R16	10k	R0805	
R17	120R	R0805	

R18,R31	4k7	R0805	
R19,R20	120R	R0805	
R21	10k	R0805	
R22-R24	22R	R0805	
R25,R26	4k7	R0805	
R27,R28	47k	R0805	
R29	1k	R0805	
R30	47k	R0805	
R34	1K5	R0805	
R35	470R	R0805	
S1,S2	TAC-SWITCH	SMD switch	Tlačítko, SMD
T1-T4	BC84	SOT23	
TP1-TP5	TSTPAD1-20	P1-20	Jumperové kolíky, přímé
U\$5	SIMHOLDER	SIMHOLDER 8	Konektor SIM karty
X1	MINI-USB	miniUSB	Mini USB konektor
X2	SMA	BU-SMA-G	SMA konektor

C.2 Seznam součástek JM

Označení	Hodnota / typ	Pouzdro	Popis
C1,C2	100n	C0805	
C3,C4	22p	C0805	
C5,C6	100n	C0805K	
C6	3n3	C0805	
C7	10u	E2,5-6	Elektrolytický, 16 V
C8-C12	100n	C0805K	
D1,D3	BZW04XXB	F126Z12	Transil unipolární, 5 V
D2,D5	PMLL4150	SOD80C	Dioda Schottky
D4,D14	1N4007SMD	DO41	
D8,D9	BZW04XXB	F126Z12	Transil unipolární, 5 V
D12	1N4148SMD	DO41	
IC1	MEGA16-P	DIL40	MCU
IC2	MAX3468CSA	SO08	Převodník RS485
IC3	78HC00	SO14	Logické hradlo
IC4	MCP120/130	SOT23	Reset watchdog 5 V
K1,K2	G5LE	G5LE	Relé 12 V
K3	JTN-DC12V	JT-PCB	Relé 12 V
Q1	8,672MHz	QS	Krystal
K4	PSH02-08P	PSH02-08P	Konektor se zámkem
K5,K6	PSH02-03P	PSH02-03P	Konektor se zámkem
K7-K10	PSH02-02P	PSH02-02P	Konektor se zámkem
K11	PSH02-04P	PSH02-04P	Konektor se zámkem
K12-K15	ARK500/2	ARK500/2	Svorkovnice šroubovací
R1,R2	4k7	0207/10	
R3	3k9	R0805	
R4,R5	8k2	0207/10	

R6	820R	0207/10	
R7,R9	4k7	0207/10	
R8,R19	4k7	R0805	
R13,R20,R29	4k7	0207/10	
R24,R28,R35	4k7	R0805	
R25	10k	R0805	
R15,R16	1k	M0805	
R17,R18	10R	R0805	
R19	BLM	R0805	
R20,R24	4k7	R0805	
R25	10k	0207/10	
R26	22k	R0805	
R27,R31	8k2	0207/10	
S1	TAC-SWITCH	TACTILE-PTH	Tlačítko do DPS
SV2	MA03-2	MA03-2	Konektorová lišta
T3-T5	BC337-25	TO-92C	
U\$5	MTD2003F	HSOP	Step motor driver
U1	7805	TO-220S	Stabilizátor napětí

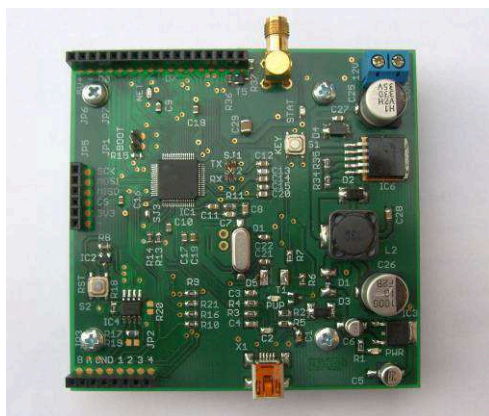
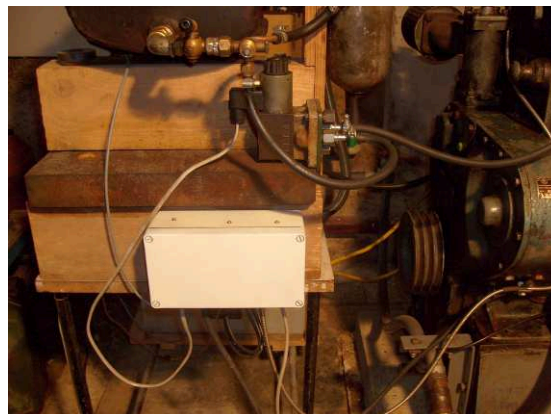
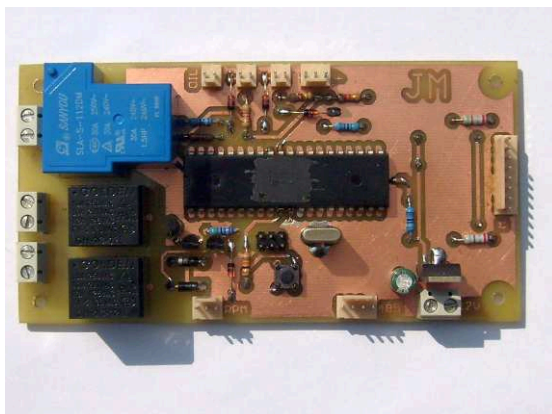
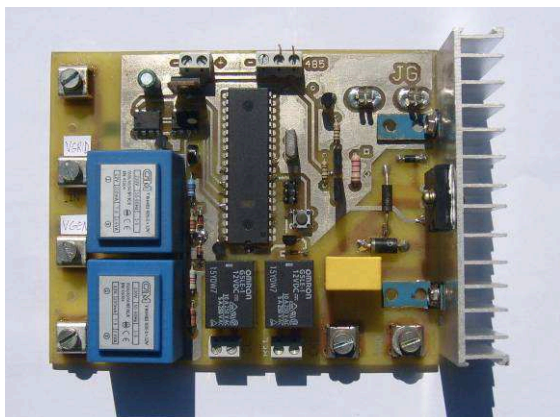
C.3 Seznam součástek JG

Označení	Hodnota / typ	Pouzdro	Popis
C1,C2	100n	C0805	
C3,C4	22p	C0805	
C5	1n	C0805	
C6	10n	C0805K	
C7	10u	E2,5-6	Elektrolytický, 16 V
C8	1u	C0805	Keramický
C9,C11	100n	C0805K	
C10	64u/400	C150-091X182	Svitkový, 400 V, X2
CON1	ARK500/3	ARK500/3	Svorkovnice šroubovací
CON2	ARK210/2	ARK210/2	Svorkovnice šroubovací
CON4	ARK500/2	ARK500/2	Svorkovnice šroubovací
D1	BY550-1000	DO201	
D2,D8	BZW04XXB	F126Z12	Transil unipolární, 5 V
D3,D4	1N4148SMD	SMD805	
D5	BZW04XXB	F126Z12	Transil unipolární, 5 V
D6, D7	PMLL4150	SOD80C	Dioda Schottky
D9	1N4007	DO41	
D11	1N5638	DO13M	
F1	GSH15	GSH15	Držák trubičkové ojistky
IC1	MEGA16-P	DIL40	MCU
IC2	MAX3468CSA	SO08	Převodník RS485
IC3	LM385	TO92	Napěťová reference 2,5 V
IC4	MCP120/130	SOT23	Reset watchdog, 5 V
K2	JTN-DC12V	JT-PCB	Relé 12 V

Q1	8MHz	QS	Krystal
Q2	GT50J325	TOP3AV	IGBT tranzistor
Q3	BC337	TO92	
R1	10R	0309/10	1 W
R2	2k5	R0805	
R3,R6	4k7	0207/10	
R4,R5	220k	R0805	
R7,R8	220k	R0805	
R9,R12	1k	R0805	
R10	10k	R0805	
R11,R24	4k7	R0805	
R13,R14	20k	M0805	
R15,R17	1M	0207/10	
R16,R18	12k	0207/12	
R19	BLM	R0805	Feritový filtr
R21,R22	560R	R0805	
R23	150R	R0805	
R25,R27	10k	R0805	
R26	22k	R0805	
S1	TAC-SWITCH	TACTILE-PTH	Tlačítko
SV2	MA03-2	MA03-2	MA03-2
T1	BD136-16	TO-126S	
T2	BD139-16	TO-126S	
T4	BC337-25	TO-92C	
TP9-TP32	TPSPAD1-20	P1-20	Svorkovnice pro oka
TR3,TR4	EI30-1	EI30-1	Transformátor do DPS
U\$1	ACS712	SOIC8	Proudový senzor
U1	7805	TO-220S	Stabilizátor napětí
U4,U5	LM311	DIL-08	Komparátor

D REALIZACE ŘS

D.1 Jednotky ŘS a jejich instalace



1	2
3	4
5	6

- 1 – DPS jednotky generátoru
- 2 – JG instalovaná v rozvaděči
- 3 – DPS jednotky motoru
- 4 – JM instalovaná u motoru
- 5 – DPS hlavní jednotky
- 6 – HJ vestavěná do přístrojové krabičky

D.2 Celkový pohled na KGJ

