VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

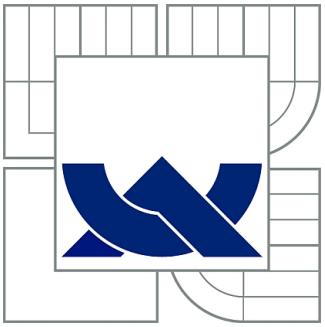
NÁVRH POHONU ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY

DESIGN OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE DRIVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER‘S THESIS

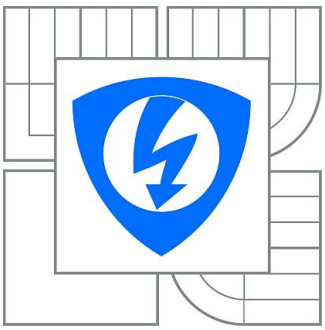
AUTOR PRÁCE — BC. MARTIN DOČEKAL
AUTHOR

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH POHONU ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY

DESIGN OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE DRIVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER‘S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. MARTIN DOČEKAL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Dr. Ing. MIROSLAV PATOČKA
SUPERVISOR

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Martin Dočekal ***ID:*** 125398
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Návrh pohonu elektrické lokomotivy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte elektrické pohony následujících lokomotiv: Škoda - 109E, Siemens - Taurus, Škoda - City Elefant, Alstom - Pendolino

2. Určete potřebné parametry elektrického pohonu pracujícího v pomocném, tzv. vlečkovém, režimu. V tomto režimu bude pohon napájen z vestavěného trakčního akumulátoru.

3. Detailně navrhněte pohon podle bodu 2. Vytvořte matematický model tohoto pohonu a simulací ověřte jeho vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Patočka M.: Magnetické jevy a obvody. VUTIUM, Brno, 2011.
[2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
[3] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.2. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

Termín zadání: 27.9.2013 ***Termín odevzdání:*** 28.5.2014

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka
Konzultanti semestrální práce:

Ing. Ondřej Vítek, 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

Těžištěm práce je výpočet a návrh bateriově napájeného pohonu lokomotivy, pracující v pomocném vlečkovém režimu, tzn. při jízdě na úseku trati bez trolejového vedení. Navržené bateriové skupiny pro zajištění pojezdu vlaku budou instalovány přímo do strojovny lokomotivy. V teoretické části práce je provedena analýza elektrických lokomotiv a elektrických jednotek, provozovaných v současné době na území České republiky a využívajících k pohonu měniče s napěťovým meziobvodem. Následně se v kapitole nachází popis funkce usměrňovacích a střídacích měničů moderních lokomotiv. Praktická část práce obsahuje výpočty potřebných sil a z nich následné výpočty potřebných energií, pro pojezd vlaku po určené dráze vlečky. Na základě získaných hodnot je proveden návrh bateriových skupin, které budou jako nezávislá trakce zabezpečovat pojezd vlaku po dříve určené vlečce. V práci je dále proveden návrh silové části nabíjecího měniče baterií, který se skládá z měničů STEP-UP a STEP-DOWN. K němu je v prostředí Matlab Simulink vytvořen silový model a model řízení. Data a grafy, exportované z prostředí Matlab Simulink pro ověření funkčnosti měniče jsou uvedeny v samostatné kapitole. Kromě návrhu bateriového pohonu je v práci dále proveden výpočet ztrát trakčního měniče při běžném provozu lokomotivy, tj. mimo vlečkový režim. Pro tento výpočet je v závěru práce uvedena teorie výpočtu ztrát, vznikajících v tranzistoru a v nulové diodě střídače. Podle ní je i vlastní výpočet proveden. Následně je proveden i výpočet kapalinového chladiče tohoto střídače.

Abstract

The focus of the work is the calculation and design of battery-powered drive of locomotive, operating in the sub-siding mode, ie when the locomotive is moving on the track section without the overhead line. The proposed battery groups to ensure the drive train will be installed directly into the locomotive engine room. In the theoretical part of the work there has been done the analysis of the electrical locomotives and electrical unit, which nowadays are used in the Czech Republic in driving of voltage controller with the integrated circuit. Then, in the chapter there is a brief description modern locomotives frequency convertor's and rectifier's function. The practical part of the work contains the necessary force and energy calculation for train moving on the determined rails. On the base of the received data, the design of battery groups has been done. These battery groups will work as an independent traction which insures the moving of the train on the determined rails. In the work the design, which consists of STEP-UP and STEP-DOWN convertors, has also been done. The power model and model management were created in Matlab Simulink programme. Data and graphs exported from the Matlab Simulink programm are determined for verifying convertor's function, which can be found in a separate chapter. In addition to the proposal of the battery drive is at work also has been calculated loss of traction rectifier during normal operation of the locomotive, ie outside siding mode. For this calculation, in the conclusion is listed the theory of calculation of the losses incipient in the transistor and freewheeling diode of rectifier. According to the theory own calculation is performed. Subsequently the liquid cooler calculation of the rectifier is calculated.

Klíčová slova

elektrická lokomotiva; pohon; asynchronní motor; frekvenční měnič; IGBT modul; akumulátorová baterie; nabíjecí měnič; ztráty v tranzistorovém měniči

Keywords

electric locomotive; drive; asynchronous motor; frequency converter; IGBT module; rechargeable battery; charging converter; losses in the transistor converter

Bibliografická citace

DOČEKAL, M. *Návrh pohonu elektrické lokomotivy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 82 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Návrh pohonu elektrické lokomotivy, 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **11**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **12**

1 ÚVOD **13**

2 ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH POHONNÝCH SYSTÉMŮ MODERNÍCH ELEKTRICKÝCH LOKOMOTIV **14**

2.1 ELEKTRICKÁ LOKOMOTIVA SIEMENS - ES64U4, ŘADA 1216 ČD **14**

2.2 ELEKTRICKÁ JEDNOTKA ALSTOM - ETR 470, ŘADA 680 ČD **16**

2.3 ELEKTRICKÁ JEDNOTKA ŠKODA - CITY ELEFANT, ŘADA 471 ČD **18**

2.4 ELEKTRICKÁ LOKOMOTIVA ŠKODA - 109E, ŘADA 380 ČD **19**

2.5 SUMARIZACE ATRIBUTŮ POPSANÝCH LOKOMOTIV **22**

2.6 ŘEŠENÍ VÝKONOVÝCH MĚNIČŮ SOUČASNÝCH MODERNÍCH LOKOMOTIV **23**

2.6.1 PRINCIP ČINNOSTI PULSNÍHO USMĚRŇOVAČE 23

2.6.2 PRINCIP ČINNOSTI STŘÍDAČE 24

3 VÝPOČET PARAMETRŮ, POTŘEBNÝCH PRO PŘEKONÁNÍ DRÁHY VLEČKY **26**

3.1 POHYBOVÁ ROVNICE VLAKU **29**

3.2 SÍLA POTŘEBNÁ K PŘEKONÁNÍ VOZIDLOVÝCH ODPORŮ F_{TO} **29**

3.3 SÍLA POTŘEBNÁ K PŘEKONÁNÍ TRAŤOVÝCH ODPORŮ **30**

3.3.1 SÍLA POTŘEBNÁ K PŘEKONÁNÍ ODPORU Z OBLOUKU TRATI F_R 30

3.3.2 SÍLA POTŘEBNÁ K PŘEKONÁNÍ ODPORU ZE SKLONU TRATI F_{ST} 31

3.4 VÝPOČET OPTIMÁLNÍHO ZRYCHLENÍ **32**

3.5 SÍLA POTŘEBNÁ PRO ZRYCHLENÍ ΔF **33**

3.6 CELKOVÁ POTŘEBNÁ SÍLA A VÝKON V NEJNEPŘÍZNIVĚJŠÍM ÚSEKU TRATI **33**

3.7 VÝPOČET ADHEZNÍHO KOEFICIENTU **34**

3.8 VÝPOČET POTŘEBNÉ ENERGIE, PRO REALIZOVÁNÍ POJEZDU PO VLEČCE **34**

3.9 VÝPOČET MAXIMÁLNÍHO MOŽNÉHO POČTU PŘIPOJENÝCH VOZŮ, PŘI TAŽENÍ DO DANÝCH STOUPÁNÍ **36**

4 NÁVRH BATERIOVÝCH SKUPIN **38**

4.1 POUŽITÉ BATERIE **38**

4.1.1 NI-CD BATERIE ŘADY SRX 38

4.2 DIMENZOVÁNÍ BATERIÍ **39**

4.2.1 POTŘEBNÁ ENERGIE JEDNÉ BATERIOVÉ SKUPINY 39

4.2.2 URČENÍ POČTU ČLÁNKŮ BATERIOVÉ SKUPINY 40

4.2.3 URČENÍ POTŘEBNÉ ENERGIE JEDNOHO ČLÁNKU 40

4.2.4 OVĚŘENÍ VÝKONNOSTI BATERIE, PŘI JÍZDĚ V NEJNEPŘÍZNIVĚJŠÍM ÚSEKU TRATI 41

4.2.5 PARAMETRY ZVOLENÝCH BATERIOVÝCH SKUPIN 41

4.3 VÝPOČET VÝKONU FOTOVOLTAICKÝCH FÓLIÍ, UMÍSTĚNÝCH NA STŘEŠE OSOBNÍHO VOZU **42**

4.3.1 FOTOVOLTAICKÁ FÓLIE FATRASOL 43

5 NÁVRH NABÍJECÍHO MĚNIČE AKUMULÁTORŮ 44
5.1 VÝPOČET MĚNIČE STEP-DOWN 44
5.1.1 VÝPOČET INDUKČNOSTI TLUMIVKY 47
5.1.2 VÝPOČET KAPACITY LC-FILTRU 47
5.1.3 NAPĚŤOVÉ A PROUDOVÉ DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČŮ 49
5.2 VÝPOČET MĚNIČE STEP-UP 50
5.2.1 DIMENZOVÁNÍ TLUMIVKY A KONDENZÁTORU 51
5.2.2 NAPĚŤOVÉ A PROUDOVÉ DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČŮ 52
5.3 PARAMETRY SOUČÁSTEK NABÍJECÍHO MĚNIČE 53
5.4 VÝPOČET ÚČINNOSTI NABÍJECÍHO MĚNIČE 54
5.4.1 VÝPOČET ÚČINNOSTI MĚNIČE STEP-DOWN 54
5.4.2 VÝPOČET ÚČINNOSTI MĚNIČE STEP-UP 55
5.4.3 VÝPOČET ÚČINNOSTI MĚNIČE STEP-UP-DOWN 55
6 MATEMATICKÝ MODEL NABÍJECÍHO MĚNIČE 56
6.1 MODEL SILOVÉ ČÁSTI NABÍJECÍHO MĚNIČE 56
6.2 MODEL ŘÍDÍCÍ ČÁSTI NABÍJECÍHO MĚNIČE 58
7 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ NABÍJECÍHO MĚNIČE SIMULACÍ 60
8 VÝPOČET ÚČINNOSTI TRAKČNÍHO STŘÍDAČE 64
8.1 TEORIE VÝPOČTU ZTRÁT V TRANZISTOROVÉM MĚNIČI 64
8.1.1 MATEMATICKÝ NÁSTROJ PRO ANALÝZU UNIPOLÁRNÍCH PWM SIGNÁLŮ 64
8.1.2 STŘEDNÍ HODNOTA UNIPOLÁRNÍHO SIGNÁLU 66
8.1.3 EFEKTIVNÍ HODNOTA UNIPOLÁRNÍHO SIGNÁLU 66
8.1.4 PŘEPÍNACÍ ZTRÁTY TRANZISTORU 67
8.1.5 STŘEDNÍ A EFEKTIVNÍ HODNOTA PROUDU TRANZISTORU A NULOVÉ DIODY 68
8.1.6 MATEMATICKÝ APARÁT VÝPOČTU PŘEPÍNACÍCH ZTRÁT V TRANZISTORU STŘÍDAČE 69
8.2 VÝPOČET ZTRÁT V TRAKČNÍM STŘÍDAČI LOKOMOTIVY ŠKODA 109E 70
8.3 VÝPOČET KAPALINOVÉHO CHLADIČE TRAKČNÍHO STŘÍDAČE 76
9 ZÁVĚR 78
LITERATURA 79
PŘÍLOHY 81

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 : Elektrická lokomotiva řady ES64U4, převzato z [1]..... 14

Obr. 2 : Zapojení trakčního měniče lokomotivy řady ES64U4, překresleno z [3]..... 15

Obr. 3 : Elektrická jednotka řady ETR 470, převzato z [4]..... 16

Obr. 4 : Zapojení trakčního měniče jednotky ETR 470, překresleno z [5]..... 17

Obr. 5 : Vlevo modul trakčního měniče ze strany GTO prvků, vpravo trakční motor [5]. 18

Obr. 6 : Elektrická jednotka řady 471, převzato z [6], [7]..... 18

Obr. 7 : Elektrická lokomotiva řady 109E, převzato z [9]. 19

Obr. 8 : Trakční a brzdová charakteristika lokomotivy 109 E, překresleno z [10]. 21

Obr. 9 : Blokové schéma výkonového obvodu pulsního usměrňovače, překresleno z [11]..... 23

Obr. 10 : Blokové schéma regulačního obvodu pulsního usměrňovače, překresleno z [11]. 24

Obr. 11 : Výkonová část čtyřkvadrantového třífázového střídače, překresleno z [12]..... 24

Obr. 12 : Trakční měnič s asynchronním motorem zapojeným do dvojité hvězdy, překresleno z [12]..... 25

Obr. 13 : Okótovaný půdorys vlečky. 26

Obr. 14 : Graf definující ujetou dráhu v závislosti na čase jízdy, při zvoleném zrychlení 0,1 m/s^2. 27

Obr. 15 : Grafy průběhů rychlosti a zrychlení v závislosti na čase jízdy vlaku..... 28

Obr. 16 : Grafy závislostí sklonů trati a poloměrů oblouků na vzdálenosti od počátku vlečky..... 28

Obr. 17 : Graf závislosti maximálního možného počtu připojených vozů, na stoupání trati. 37

Obr. 18 : Vlevo bateriové články SRX [17], vpravo závislost jmenovité kapacity na teplotě [16]. 39

Obr. 19 : Nabíjecí měnič STEP-UP-DOWN. 44

Obr. 20 : Měnič STEP-DOWN s připojenou polovinou, jedné bateriové skupiny. 45

Obr. 21 : Průběhy napětí a proudů v měniči STEP-DOWN pro případ R = 0, s = 0,8014. 46

Obr. 22 : Graf průběhu proudu a nepětí na kondenzátoru, k výpočtu kondenzátoru LC-filtru..... 48

Obr. 23 : Měnič STEP-UP. 50

Obr. 24 : Průběhy napětí a proudů v měniči STEP-UP pro případ s = 0,5455. 51

Obr. 25 : Vlevo výstupní charakteristika IGBT tranzistoru FF200R33KF2C, použitého v obou měničích, vpravo charakteristika $I_F = f(V_F)$ diody DD200S33K2C, použité v obou měničích. Proloženo tzv. lomenými přímkami [20], [21]. 54

Obr. 26 : Model silové části měniče STEP-UP-DOWN v prostředí Matlab Simulink. 56

Obr. 27 : Rozkreslení podsystémů modelu silové části měniče STEP-UP-DOWN. 57

Obr. 28 : Model řídicí části měniče STEP-UP-DOWN v prostředí Matlab Simulink..... 58

Obr. 29 : Rozkreslení podsystémů řídící části měniče STEP-UP-DOWN, výpočet požadovaného napětí na výstupu měniče. 58

Obr. 30 : Rozkreslení podsystému řídící části měniče STEP-UP-DOWN, převodník hodnoty střídy na pulsně šířkově modulovaný signál. 59

Obr. 31 : Graf závislosti požadovaného výstupního napětí měniče u_{ch} na čase simulace.* 60

Obr. 32 : Grafy závislostí výstupního prudu i_{zh} a napětí u_{zh} měniče na čase simulace. 60

Obr. 33 : Grafy závislostí prudu i_{mh} a napětí u_{mh} v meziobvodu měniče na čase simulace. 61

Obr. 34 : Grafy závislostí vstupního prudu i_{Lh1} a napětí u_{dh} měniče na čase simulace. 62

Obr. 35 : Detaily grafů závislostí výstupního prudu i_{zh} a napětí u_{zh} měniče na čase simulace. 63

Obr. 36 : Náhrada VA-charakteristiky IGBT tranzistoru, v sepnutém stavu „lomenou přímkou“, a) unipolární pulsy, b) křivka pro U_{GE} = 15 V, c) lomená přímka [23]. 64

Obr. 37 : Trojfázový střídač s označením všech napětí a proudů v systému motor – střídač [23]. 65

Obr. 38 : K výpočtu střední hodnoty unipolárních proudových impulsů [23]. 65

Obr. 39 : Příklad sdruženého napětí $u_{ab}(t)$ střídače, a) částečně bipolární napětí, b) unipolární napětí [23]. 66

Obr. 40 : Větev A střídače, a) větvové a fázové napětí, b) okamžitá střída, c) fázový proud zátěže, d) kolektorový proud tranzistoru T_H, e) proud diody D0 [19]. 68

Obr. 41 : Změřená závislost ztrátové energie na spínaném proudu. Příklad pro IGBT 1000 V, 100A, Toshiba, MG 100 N2Y S1. 70

Obr. 42 : Výstupní charakteristika IGBT tranzistoru FZ 1200 R 33 KF2_B5, použitého ve střídači lokomotivy ŠKODA 109E, proloženo tzv. lomenou přímkou [24] 72

Obr. 43 : Charakteristika $I_F = f(V_F)$ diody DD 1200 S 33 K2 B5, použité ve střídači lokomotivy ŠKODA 109E, proloženo tzv. lomenou přímkou [25] 73

Obr. 44 : Závislost zapínací a vypínací energie IGBT tranzistoru a ztrátové energie diody, na kolektorovém proudu tranzistoru, lineárně proloženo do součtu energií ve jmenovitém kolektorovém proudu I_C tranzistoru [24]. 74

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 : Parametry součástek měniče STEP-DOWN a STEP-UP. 53

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

IGBT – Insulated Gate Bipolar Tranzistor

ES – stejnosměrná / střídavá elektrická lokomotiva

ss – stejnosměrné napětí

TSI – Technical Specifications for Interoperability

E – stejnosměrná elektrická lokomotiva

Ni-Cd – Nikl / Kadmium

ÖBB – Österreichische Bundesbahnen

DB AG – Deutsche Bahn

PKP – Polskie Koleje Państwowe

SŽ – Slovenske železnice

ČD – České dráhy

PWR – Pulswechselrichter

EDB – elektrodynamická brzda

GTO – Gate Turn Off

ZSSK – Železničná spoločnosť Slovensko

TMS – trakční měničová skříň

ATM – asynchronní trakční motor

TM – trakční motor

AC – střídavý proud

DC – stejnosměrný proud

PWM – Pulse Width Modulation

SRX – sinter, railways, extreme

1 ÚVOD

Vývoj pohonů elektrických lokomotiv v posledních deseti letech dosahuje vrcholu z hlediska účinnosti přeměny elektrické energie na mechanickou. Vysoké účinnosti pohonů moderních elektrických lokomotiv je dosahováno zejména použitím asynchronních motorů, k jejichž regulaci jsou používány IGBT tranzistory o jmenovitých napětích 3,3 kV nebo 6,5 kV. Pomocné pohony lokomotiv jsou taktéž řešeny asynchronními motory, jejichž řízení je realizováno pomocí IGBT tranzistorových měničů.

Snahou železničních společností v Evropě je snižovat nejenom náklady týkající se spotřeby elektrické energie, ale také náklady vznikající v důsledku používání více napájecích soustav, tedy nutností přepřahovat lokomotivy, pro tažení vlaku při napájení z jiného napájecího systému. Řešení tohoto problému na našem území započalo roku 1975, kdy byla vyrobena první dvousystémová lokomotiva řady ES 499.0. Současně vyráběné lokomotivy pracují převážně na napájecích systémech 3 kV ss, 15 kV; 16,7 Hz a 25 kV; 50 Hz. Některé typy lokomotiv podporují i systém 1,5 kV ss, tímto systémem bývají lokomotivy vybaveny při požadavku dopravce.

Moderní vícesystémové lokomotivy procházejí složitým a dlouhodobým schvalovacím procesem podle směrnic TSI. Po získání patřičných certifikátů a schválení provozu na zahraničních evropských tratích, dochází k dalším finančním a časovým úsporám, protože nemusí docházet k přepřahu lokomotiv na hranicích země, a to především z důvodu vzniku nežádoucích rušení při provozu lokomotiv. Přípustné hodnoty rušení určuje vždy legislativa dané země.

Těmito řešeními je dosahováno výrazných finančních úspor v oblasti osobní i nákladní dopravy. Při přepravě nákladních vlaků však dochází k dalším přepřahům lokomotiv, a to z důvodu posunu vlaku po neelektrifikovaných vlečkách. Dochází tedy k záměně elektrické lokomotivy za dieselelektrickou, a to jak na počátku cesty vlaku, tak i na konci cesty vlaku, k jeho přepravě je tedy nutné využít tři lokomotivy.

Další finanční úspora tedy tkví ve sloučení funkcí zmíněných lokomotiv do jedné. To je realizovatelné buďto použitím dieselelektrického agregátu, pro pojezd elektrické lokomotivy mimo síť nebo použitím baterií nahrazujících elektrickou trakční síť.

Práce se věnuje návrhu pohonu pomocí druhého zmíněného způsobu řešení, tedy za pomoci bateriových článků poskládaných na napěťovou hladinu 3 kV. Dva bateriové bloky budou připojeny přímo do napěťových meziobvodů trakčních měničů.

Výroba historicky první akumulátorové lokomotivy v České republice, se datuje do roku 1926, lokomotiva se po dokončení stala největší akumulátorovou lokomotivou na světě, tato lokomotiva řady E 407.0 využívala olověnou akumulátorovou baterii o počtu 238 článků s kapacitou 392 Ah při hodinovém vybíjení, a kapacitou 630 Ah při pětihodinovém vybíjení.

Koncem 20. století vzniklo několik podobných projektů posunovacích lokomotiv, využívajících modernější Ni-Cd baterie. Výhodami Ni-Cd baterií oproti olověným jsou zejména menší nároky na prostor, vyšší spolehlivost, dobrá výkonnost při nízkých teplotách, lepší odolávání stárnutí, snášení proudových přetížení a lepší odolnost proti otřesům.

Unikátním projektem byla i výroba akumulátorového vozu, určeného pro připojení ke klasické elektrické lokomotivě, která byla tímto schopna pojezdu i mimo trakční síť.

Finálním řešením problému je přesunutí akumulátorových baterií do strojovny lokomotivy, kde bude vyřešen i problém nabíjení baterií, které bude možno nabíjet, jak za stavu kdy lokomotiva stojí a je připojena k síti, tak i za běžného provozu lokomotivy.

2 ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH POHONNÝCH SYSTÉMŮ MODERNÍCH ELEKTRICKÝCH LOKOMOTIV

2.1 Elektrická lokomotiva Siemens - ES64U4, řada 1216 ČD

Obr. 1 : Elektrická lokomotiva řady ES64U4, převzato z [1].

Provozovatel: ÖBB, DB AG, PKP, SŽ, ČD,
období provozu: 2005 – dosud,
napájecí soustava: 1,5 kV ss, 3 kV ss, 25 kV; 50 Hz, 15 kV; 16,7 Hz,
jmenovitý výkon: 6000 kW.

Lokomotiva s typovým označením ES64U4 je vícesystémová lokomotiva, určená pro provoz na evropských tratích, se střídavou i stejnosměrnou trakcí. Lokomotiva k pohonu využívá třífázové asynchronní pohony, určené pro univerzální lokomotivy nejvyšší výkonové kategorie. Informace a údaje o lokomotivě byly čerpány z [2], [3].

Elektrická výzbroj

Přívod proudu

Střídavé napětí je vedeno skrze hlavní elektropneumaticky ovládaný vakuový vypínač na primární vinutí transformátoru, který je umístěn uprostřed lokomotivy mezi podvozky.

Při napájení stejnosměrným napětím je napětí vedeno přes tlumivku přímo do meziobvodů trakčních měničů.

Trvalý trakční výkon lokomotivy na střídavé trakci při 25 kV a 15 kV je 6 MW, výkon rekuperační brzdy je přitom 6,4 MW. Na stejnosměrné trakci 3 kV je výkon trakční i rekuperační 6 MW a na stejnosměrné trakci 1,5 kV je trvalý výkon lokomotivy 3 MW, rekuperační 4,2 MW.

Pomocné pohony jsou třífázové asynchronní, napájené ze čtyř IGBT střídačů o výkonu 4 x 90 kVA, napětí 3 x 440 V a frekvenci 60 Hz, a jsou rozděleny do řízené a neřízené skupiny.

Palubní síť využívá stejnosměrné napětí 110 V z olověné baterie o kapacitě 120 Ah.

Trakční transformátor

Na sekundární straně transformátoru, se nacházejí čtyři vinutí pro trakci o jmenovitém napětí 1600 V, s vyvedenými odbočkami, zajišťujícími stejnou úroveň výstupního napětí na napájecích systémech 15 kV; 16,7 Hz i 25 kV; 50 Hz.

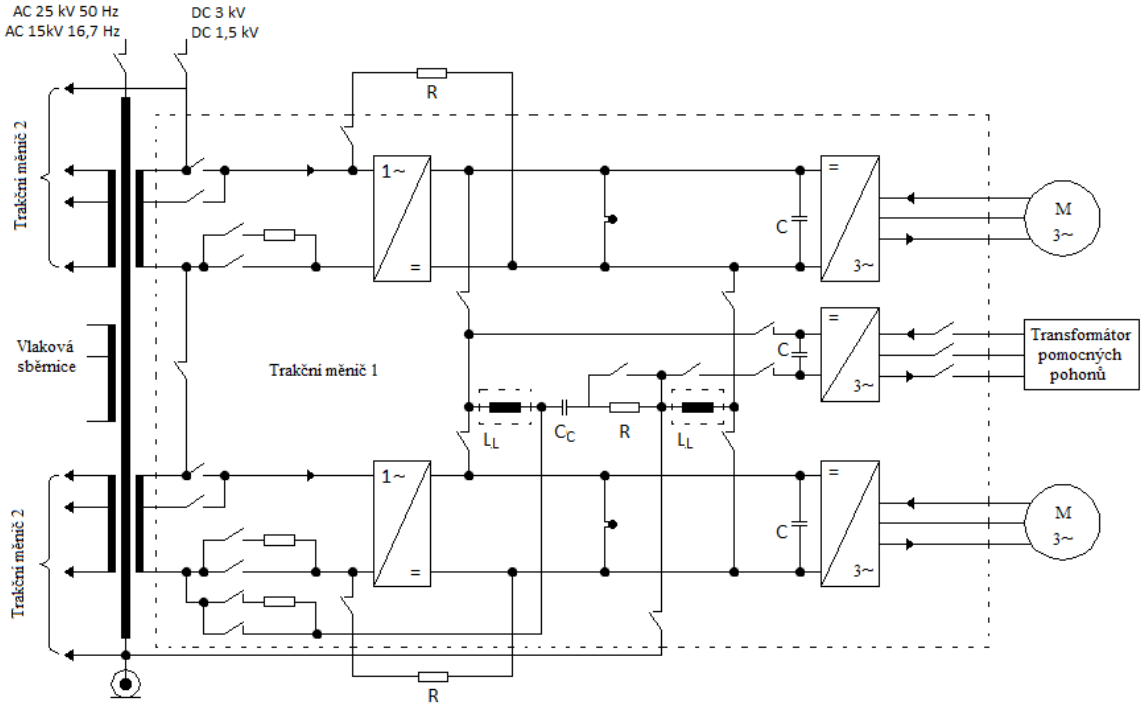
Pro každý podvozek se dvěma trakčními motory jsou určena dvě trakční vinutí. Dále transformátor obsahuje vinutí pro napájení vlakového topení. Ke každému sekundárnímu trakčnímu vinutí je připojen čtyřkvadrantový měnič, který umožňuje odběr síťového proudu

s účiníkem blízkým hodnotě 1 a při elektrodynamickém brzdění navracení brzdné elektrické energie zpět do sítě.

Trakční měniče

V provozu na střídavém systému, napájejí dva čtyřkvadrantové měniče ze dvou sekundárních vinutí trakčního transformátoru dva paralelně spojené stejnosměrné meziobvody a současně k nim paralelně připojený přepínatelný obvod filtru 100 Hz při napájení 25 kV, případně 33,4 Hz při napájení 15 kV. Stejnosměrné meziobvody trakčních měničů, které jsou za normálního provozu propojené, napájejí přes další střídač síť 440 V pomocných pohonů. Každý trakční střídač PWR připojený k meziobvodu, napájí třífázovým proměnným napětím s proměnnou frekvencí jeden trakční motor. Všechny trakční měniče jsou sestaveny z jednotlivých vodou chlazených IGBT modulů 6,5 kV. V případě poruchy výkonové části nějakého vstupního měniče, či střídače je možné příslušný vadný modul odpojit a pokračovat v jízdě se sníženým výkonem.

Při provozu na stejnosměrných napájecích systémech 1,5 kV a 3 kV jsou stejnosměrné meziobvody napájeny přímo ze sběrače, přes hlavní vypínač s magnetickou zhášecí komorou, který je umístěn ve strojovně a vstupní filtr, který využívá sekundární vinutí transformátoru. To slouží jako vstupní indukčnost. Trakční obvod je dále uspořádán shodně, jako při provozu na střídavých napájecích systémech. Každému trakčnímu měniči je přiřazen jeden podvozek.



Obr. 2 : Zapojení trakčního měniče lokomotivy řady ES64U4, překresleno z [3].

Trakční motory

Motory jsou čtyřpólové, cize chlazené třífázové asynchronní stroje s kotvou nakrátko, typu 1TB 2822 o trvalém výkonu 1633 kW. Statorová vinutí trakčních motorů jsou za normálního provozu zapojena do hvězdy, pouze na systému 1,5 kV jsou statorová vinutí z důvodu částečné kompenzace nižšího napájecího napětí zapojena do trojúhelníku. Maximální výkon motoru je 1750 kW, maximální napětí 2027 V a maximální proud 690 A. Frekvenční rozsah je 0 až 150 Hz, maximální otáčky jsou tedy 3900 min^{-1}. Maximální rozběhový moment motoru je až 15000 Nm, nápravový převod činí 3,37.

Elektrodynamická brzda

Lokomotiva disponuje rekuperační elektrodynamickou brzdou, je ale také vybavena blokem brzdových odporníků řízených IGBT pulzním měničem, které vstupují do funkce v případě, že napájecí síť není schopna převzít rekuperovanou brzdnou energii.

Brzdná síla elektrodynamické brzdy je 150 až 240 kN. K brzdění lokomotivy je přednostně využívána rekuperační brzda. V provozu na stejnosměrném systému, kdy při rekuperaci může dojít k nepřípustnému zvýšení napětí v napájecí síti, přebírá tuto přebytečnou elektrickou energii brzdový odporník, ovšem při omezeném výkonu.

Brzdové odporníky

Odporníky jsou seskupeny do jednoho bloku o maximálním výkonu 3 MW. Vinutí odporníků jsou chlazena vzduchem.

2.2 Elektrická jednotka Alstom - ETR 470, řada 680 ČD

Obr. 3 : Elektrická jednotka řady ETR 470, převzato z [4].

Provozovatel: ČD,
období provozu: 2003 – dosud,
napájecí systém: 3 kV ss, 25 kV; 50 Hz, 15 kV; 16,7 Hz,
výkon: 4000 kW.

Roku 1993 byla započata rekonstrukce I. národního železničního koridoru Děčín-Praha-Česká Třebová-Brno-Břeclav. Pro kvalitní a rychlou dopravu, bylo nutné vyvinout nová univerzální vozidla, umožňující zdolání celé cesty bez přepřahu lokomotivy, jak tomu bylo dosud. Těmito vozidly se nakonec staly jednotky ETR 470, cena jedné sedmivozové jednotky byla přibližně 700 milionů korun. Informace a údaje o jednotce byly čerpány z [4], [5].

Elektrická výzbroj

Přívod proudu

Při napájení ze střídavých systémů je proud ze sběračů přiváděn skrze odpojovače přímo na primární vinutí transformátorů.

Při napájení ze stejnosměrného systému jsou napájeny přímo meziobvody trakčních měničů. Zdrojem energie pro palubní síť o napětí 24 V ss, je pět akumulátorových Ni-Cd baterií, z nichž každá má kapacitu 750 Ah. Baterie jsou dobíjeny pěti dobíječi, napájenými ze sítě 400 V ss.

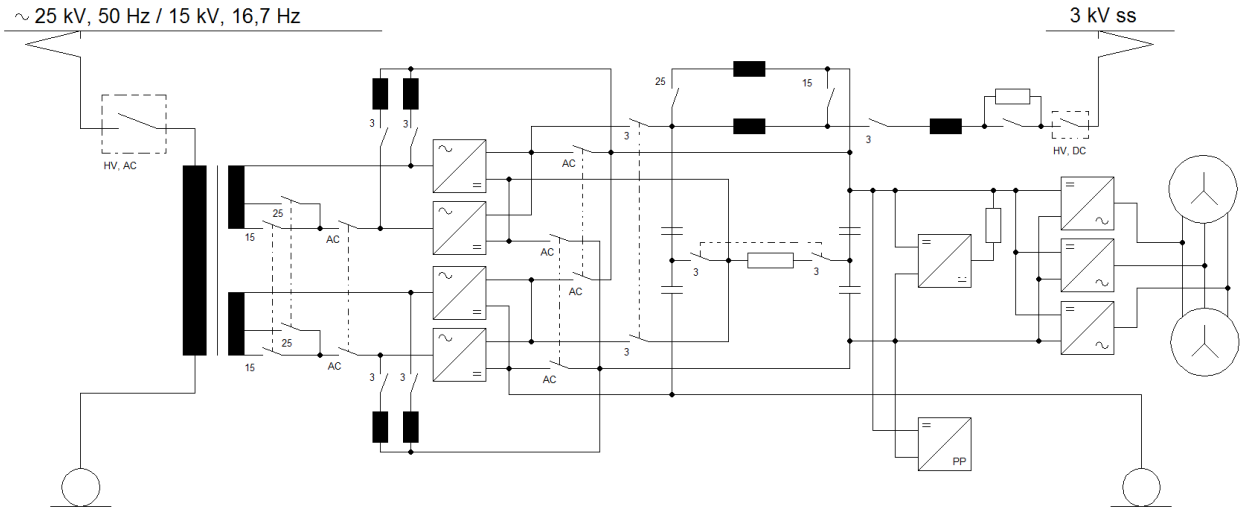
Trakční transformátory

Dva olejem chlazené trakční transformátory jsou umístěny pod podlahami vložených vozů, sousedících s čelními vozy. Součástí transformátorového soustrojí jsou i expanzní nádoby, chladiče a přepojovače napětí. Usměrnění proudu při napájení střídavým proudem zajišťuje vstupní čtyřkvadrantový pulzní měnič, který je součástí trakčního měniče. Každý transformátor o jmenovitém vstupním výkonu 2968 kVA má celkem čtyři sekundární vinutí pro trakci, každé s vyvedenou odbočkou pro soustavu 25 kV. Jednotlivá sekundární vinutí mají jmenovitý výkon 742 kVA.

Trakční měniče

Sekundární vinutí každého transformátoru jsou vyvedena do měničového kontejneru, který obsahuje jak vstupní pulsní usměrňovače, tak i střídače pro trakční motory a pulsní měniče EDB.

Na střídavých soustavách, prochází proud jednoho měniče dvěma trakčními vinutími transformátoru, skrze vlastní pulsní usměrňovače do jednoho meziobvodu, ke kterému je připojen třífázový napěťový střídač. Měničové kontejnery jsou umístěny pod čelními trakčními a vloženými trakčními vozy. V trakčních měničích jsou použity vodou chlazené výkonové GTO tyristory od firmy Westcode.

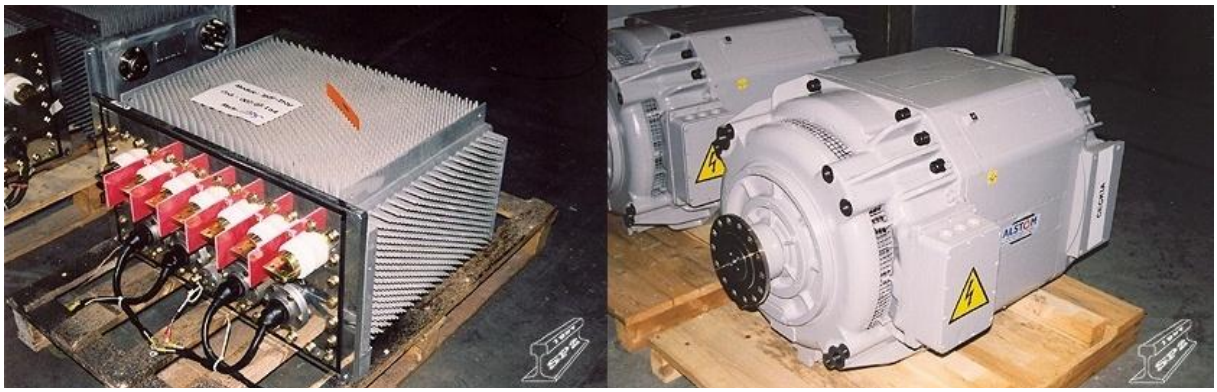


Obr. 4 : Zapojení trakčního měniče jednotky ETR 470, překresleno z [5].

Trakční motory

Pohon jednotky zabezpečuje celkem osm asynchronních trakčních motorů typu Alstom Sesto MTA 6/550, každý hnací vůz je osazen dvěma motory. Trakční motory mají vlastní chlazení a každý disponuje jmenovitým výkonem 550 kW, hmotnost jednoho motoru je 1668 kg.

K jednomu trakčnímu měniči, se jmenovitým výkonem 2 x 1110 kVA jsou paralelně připojeny vždy dva motory, upevněné podélně pod skříní vozidla, přenos krouticího momentu k nápravové převodovce je realizován prostřednictvím kloubového hřídele. Trakční vozy mají takto hnaná dvě dvojkolí, a to z obou podvozků vždy jen vnitřní, tedy blíže ke středu vozidla.



Obr. 5 : Vlevo modul trakčního měniče ze strany GTO prvků, vpravo trakční motor [5].

Elektrodynamická brzda

Jednotka řady 680 ČD je vybavena výkonnou elektrodynamickou brzdou, pracující v rekuperačním nebo odporovém režimu, v závislosti na napájecím systému a aktuálních podmínkách. Na napájecí soustavě 3 kV ss, může jednotka rekuperovat, pokud však napětí na sběrači přesáhne hodnotu 3450 V, dojde k samočinnému přechodu na brzdění do odporníku. Na soustavě 25 kV; 50 Hz rekuperace neprobíhá, naopak při napájení střídavým napětím 15 kV; 16,7 Hz je prakticky výhradně rekuperováno. Elektrodynamická brzda řízená pulsním měničem je funkční v rozmezí rychlosti 230 až 20 km/h.

Brzdové odporníky

Odporníky jsou použity celkem čtyři, každý o jmenovitém výkonu 520 kW a jsou chlazeny pomocí ventilátorů. Umístěny jsou na střechách trakčních vozů.

2.3 Elektrická jednotka ŠKODA - City Elefant, řada 471 ČD

Obr. 6 : Elektrická jednotka řady 471, převzato z [6], [7].

Provozovatel: ČD,
období provozu: 2000 – dosud,
napájecí soustava: 3 kV ss,
výkon: 2000 kW.

Ekonomická životnost elektrických jednotek řady 451 ČD skončila v roce 1983, a proto bylo nutné vyvinout jejich nástupce. Vývoj jednotek nové řady 471 započal v roce 1992. Návrhu a výroby elektrické části se ujala ŠKODA Transportation. Z konstrukce jednotky 471 vychází stejnosměrný systém použitý v lokomotivě ŠKODA 109E. Informace a údaje o jednotce byly čerpány z [7], [8].

Elektrická výzbroj

Trakční měniče

Měniče jsou rozčleněny do přední a zadní strojovny.

Přední strojovna obsahuje dva napěťové trakční střídače, po dvanácti IGBT ventilech 3,3 kV; 1,2 kA. Dále pak pulsní měnič EDB, se dvěma IGBT 3,3 kV; 1,2 kA, primární měnič se čtyřmi IGBT 3,3 kV; 800 A, transformátor pomocných pohonů 205 kVA; 400 Hz, usměrňovač sítě pomocných pohonů 540 V ss a vyhlazovací tlumivku pomocných pohonů 324 A; 4 mH.

Výstupní napětí trakčního střídače 2 x 3 fáze je 1130 V, jeho maximální frekvence je 200 Hz a jmenovitý výstupní proud 405 A. Jmenovitý proud EDB je 495 A, a trvalý výkon primárního měniče je 145 kVA.

Zadní strojovna obsahuje dva napěťové trakční střídače, po dvanácti IGBT ventilech 3,3 kV; 1,2 kA a tlumivku hlavního filtru 700 A; 4,5 mH.

Trakční motory

Motory jsou typu ML4144K/6, trvalý výkon jednoho motoru je 500 kW. Jmenovité napětí motoru je 1130 V, jmenovitý fázový proud 160 A, jmenovité otáčky 1992 min^{-1} a maximální otáčky 3975 min^{-1}. Chlazení motorů je vlastní a pohon náprav je realizován dutým hřídelem. Vinutí každého motoru jsou zapojena do dvojité hvězdy.

Z konstrukce elektrické části jednotky, vychází konstrukce stejnosměrného systému použitého v lokomotivě ŠKODA 109E, další podrobnosti k pohonu, jako například přívod proudu jsou uvedeny v popisu zmíněné lokomotivy.

2.4 Elektrická lokomotiva ŠKODA - 109E, řada 380 ČD

Obr. 7 : Elektrická lokomotiva řady 109E, převzato z [9].

Provozovatel: ČD, ZSSK,
období provozu: 2008 – dosud,
napájecí soustava: 3 kV ss, 25 kV; 50 Hz, 15 kV; 16,7 Hz,
výkon: 6400 kW.

O objednávce dvaceti nových třísystémových lokomotiv pro ČD, bylo rozhodnuto již v roce 2002, ve výběrovém řízení zvítězily stroje ŠKODA 109E. Cena jedné lokomotivy tehdy činila přibližně 120 milionů korun. Informace a údaje o lokomotivě byly čerpány z [9], [10].

Elektrická výzbroj

Přívod proudu

Střídavý trakční napájecí proud, prochází skrze elektricky ovládaný hlavní vypínač do primárního vinutí trakčního transformátoru. Z primárního vinutí trakčního transformátoru prochází dále přes nápravové sběrače do kol a kolejnic. Sekundární vinutí trakčního transformátoru napájejí vstupní usměrňovače dvou trakčních měničových skříní TMS, které napájejí stejnosměrné meziobvody TMS.

Stejnosměrný trakční napájecí proud, prochází skrze přepojovače systémů a vyhlazovací tlumivku rovnou do stejnosměrných meziobvodů TMS, odtud potom přes nápravové sběrače do kol a kolejnic.

TMS napájejí střídavým třífázovým proudem asynchronní trakční motory ATM. Každý je zapojen k jednomu trakčnímu střídači trakčního měniče tak, že na jednom vinutí trakčního motoru je dvojnásobné napětí. Na jednom konci vinutí je kladné napětí a na opačném odpovídající záporné napětí. TMS napájejí i veškeré pomocné pohony lokomotivy.

Při elektrodynamickém brzdění, putuje energie v opačném směru z trakčních motorů do troleje nebo je vyzařována odporníky ve formě tepla.

Pomocné pohony jsou asynchronní třífázové, jejich střídače jsou napájeny ze stejnosměrné sítě 570 V ss.

Palubní napětí je 24 V, použité baterie jsou gelové olověné s kapacitou 2 x 330 Ah. Blokové schéma trakčních obvodů lokomotivy 109 E se nachází v příloze D.

Trakční transformátor

Trakční transformátor typu LOT 8110 snižuje hodnotu střídavého napětí 25 kV nebo 15 kV pro vstupní obvody lokomotivy a napájí vlakové topení. Pro 15 kV i 25 kV má společně jedno primární vinutí, dvě filtrační vinutí a osm dělených sekundárních trakčních vinutí. Dále nádoba transformátoru obsahuje jedno dělené sekundární vinutí pro vlakové topení.

Dodatečně je transformátor vybaven dvěma tlumivkami s děleným vinutím, které pracují na všech třech napájecích systémech. Na systému 3 kV ss, se využívá celé vinutí jako vyhlazovací tlumivka vstupního filtru, na systému 25 kV pracuje jedna třetina vinutí každé tlumivky jako rezonanční tlumivka 100 Hz a na systému 15 kV pracují dvě třetiny vinutí každé tlumivky jako rezonanční tlumivka 33,3 Hz.

Celková hmotnost transformátoru je 15210 kg, z toho tvoří chladicí kapalina 2390 kg, aktivní části tlumivek 2 x 1130 kg a aktivní části transformátoru 7500 kg.

Trakční měniče

V lokomotivě se nachází dvě trakční měničové skříně TMS od firmy Škoda Electric. Každá sestává ze dvou dvojic vstupních pulzních usměrňovačů, stejnosměrného meziobvodu, jedné dvojice trakčních střídačů, jedné dvojice brzdných měničů a jednoho měniče pomocných pohonů.

Pulsní usměrňovače jsou osazeny IGBT ventily firmy MITSUBISHI 3,3 kV; 1,2 kA a každý je připojen k jednomu z osmi sekundárních trakčních vinutí trakčního transformátoru. Jmenovité vstupní napětí usměrňovače je 4 x 940 V AC, jmenovitý vstupní proud 4 x 961 A, jmenovitý výstupní proud 2 x 1120 A, maximální výstupní proud 2 x 1280 A, a jmenovité výstupní napětí 2 x 1600 V DC.

Trakční střídače opět obsahují vodou chlazené IGBT ventily MITSUBISHI 3,3 kV; 1,2 kA. Jmenovité napájecí napětí střídačů je 2 x 1500 V DC, maximální napájecí napětí 2 x 2100 V DC, jmenovitý výstupní proud 2 x 520 A, maximální výstupní proud 2 x 600 A, a maximální výstupní napětí 2 x 1140 V AC.

Brzdné měniče jsou připojeny přímo ke stejnosměrným meziobvodům, každý slouží k napájení jednoho brzdového odporníku, složeného ze dvou vinutí.

Měnič pomocných pohonů je také připojen přímo ke stejnosměrnému meziobvodu a dodává napětí 2 x 570 V DC. Jeho jmenovité vstupní napětí je 2 x 1500 V DC, maximální vstupní napětí 2 x 2100 V DC a maximální výstupní proud 2 x 220 A.

Každá TMS má vyveden obvod na vlastní tlumivku, uloženou v nádobě trakčního transformátoru. Tyto tlumivky plní na stejnosměrném systému funkci vyhlazovací tlumivky a na střídavých systémech funkci rezonančního filtru.

Trakční motory

Trakční motory typu ML 4550 K/6 o jmenovitém výkonu 1,6 MW jsou výrobkem firmy Škoda Electric. Jedná se o asynchronní třífázové motory s kotvou nakrátko, se statorovým vinutím zapojeným do dvojité hvězdy. Jmenovité napětí je 1130 V, jmenovitý proud 518 A, jmenovité otáčky 1825 min^{-1}, maximální otáčky 3700 min^{-1}, izolační třída 200, IP/IC 20/17, hmotnost 2480 kg a chlazení vzduchové cizí 1,45 m^3s^{-1}.

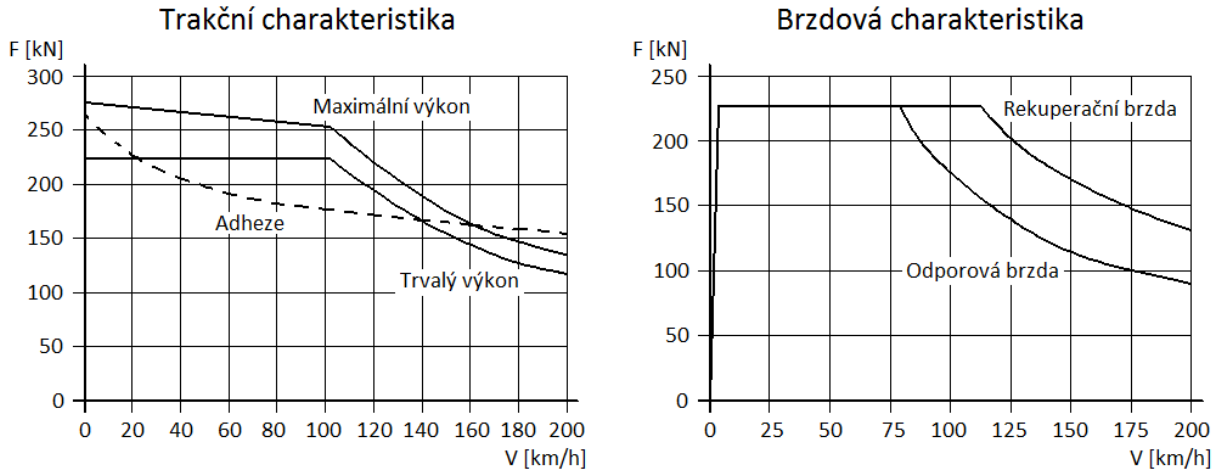
Elektrodynamická brzda

Elektrodynamická brzda je součástí trakčního pohonu, pokud ji lokomotiva nevyužívá je používána pneumatická kotoučová brzda, případně obě se závislou, či nezávislou regulací. Tlaková brzda je doplňková a slouží k vyrovnávání úbytku brzdné síly, při brzdění EDB do odporníků, které pojmou brzdnou energii pouze 4720 kW.

Lokomotiva je vybavena elektronickým protiskluzovým a protismykovým systémem.

Brzdové odporníky

Lokomotiva má dva bloky vzduchem chlazených brzdových odporníků. V každém bloku jsou dva odporníky, složené ze dvou dílčích brzdových vinutí s výkonem 590 kW, maximální brzdný výkon je tedy 8 x 590 kW. Každému podvozku slouží jeden blok sloupového provedení typu R9V10B202 od MEP Postřelmov, součástí bloku je rovněž ventilátorové soustrojí. Odporníky jsou dimenzovány pro trvalé zatížení, v režimu EDB jsou napájeny pulsním proudem obdélníkového průběhu, ze stejnosměrného meziobvodu lokomotivy skrze vlastní pulsní měnič.



Obr. 8 : Trakční a brzdová charakteristika lokomotivy 109 E, překresleno z [10].

2.5 Sumarizace atributů popsaných lokomotiv

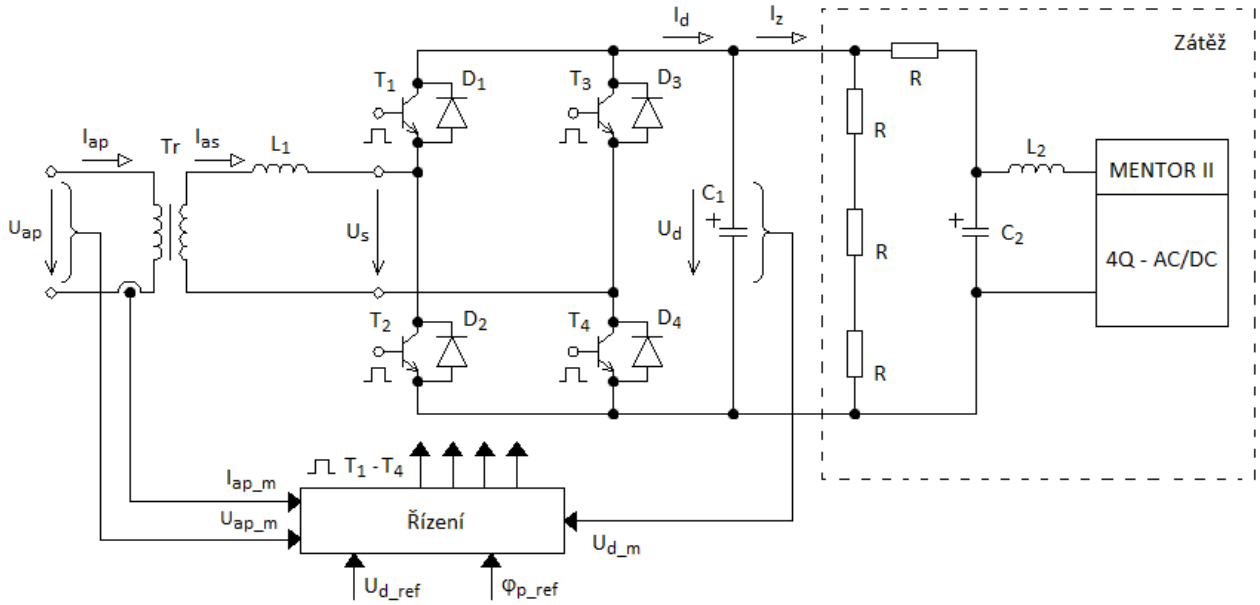
Tabulka s porovnávanými parametry, se nachází v příloze E.

- Přívod proudu: je realizován skrze vysokonapěťové vypínače s velmi vysokou vypínací schopností. Na střídavých systémech je proud veden na primární vinutí trakčního transformátoru, na stejnosměrných systémech jsou napájeny přímo meziobvody trakčních měničů. Baterie pro palubní síť jsou použity buď olověné nebo Ni-Cd.
- Trakční transformátor: transformátor obsahuje vždy tolik trakčních sekundárních vinutí s odbočkou pro druhý AC systém, kolik je v lokomotivě použito trakčních motorů. Pouze transformátor lokomotivy ŠKODA 109E obsahuje vinutí dvojnásobek, z důvodu zapojení motorů do dvojité hvězdy. Dále je na jádru transformátoru navinuto vinutí pro napájení topení.
- Trakční měniče: meziobvody trakčních měničů jsou napájeny přímo ze stejnosměrné sítě o jmenovitém napětí 3 kV ss +/- tolerance sítě, minimálně tedy 2100 V, maximálně 3600 V a po dobu 5 minut až 3900 V. Při jízdě na střídavý proud jsou meziobvody napájeny skrze čtyřkvadrantové usměrňovače, složené ze čtyř převážně IGBT prvků. Střídač je složen většinou ze šesti IGBT prvků, u lokomotivy ŠKODA 109E ze dvanácti.
- Trakční motory: jsou převážně šestipólové asynchronní s kotvou nakrátko, u lokomotiv o výkonu přibližně 1,6 MW, u elektrických jednotek potom přibližně 500 kW. Motory jsou zapojeny do hvězdy, na nízkých napájecích hladinách 1,5 kV DC pak do trojúhelníka. Lokomotiva ŠKODA 109E má vinutí motorů zapojeno fixně do dvojité hvězdy.
- Elektrodynamická brzda: maximální výkon EDB, a tedy i hodnota rekuperované energie je vždy o něco vyšší, než hodnota jmenovitého výkonu lokomotivy či jednotky.
- Brzdové odporníky: odporníky jsou naopak dimenzovány na nižší hodnoty výkonu, než výkon EDB, a to až na jeho polovinu. Pokud je potřeba brzdit s nemožností rekuperace, je brzděno EDB při omezeném výkonu a tlakovou pneumatickou brzdou soušasně.

2.6 Řešení výkonových měničů současných moderních lokomotiv

Uvedené řešení je použito v lokomotivě ŠKODA 109E.

2.6.1 Princip činnosti pulsního usměrňovače



Obr. 9 : Blokové schéma výkonového obvodu pulsního usměrňovače, překresleno z [11].

Základní zapojení pulsního usměrňovače je zřejmé z *Obr. 9*. Napětí U_d generované pulsním usměrňovačem má tvar daný typem PWM. V okamžicích nulového napětí je střídavý obvod zkratován a energie je v indukčnosti hromaděna, v okamžicích vedení je energie dodávána přes diody do stejnosměrného meziobvodu. Aby pulzní usměrňovač pracoval s harmonickým proudem a účiníkem $cos\ \varphi_p = 1$ je nutné, aby napětí meziobvodu bylo vždy větší, než amplituda střídavého napětí U_{apm}. Princip činnosti je tedy podobný, jako u měničů pro zvyšování napětí. Pro amplitudu 1. harmonické průběhu U_{vm} lze psát:

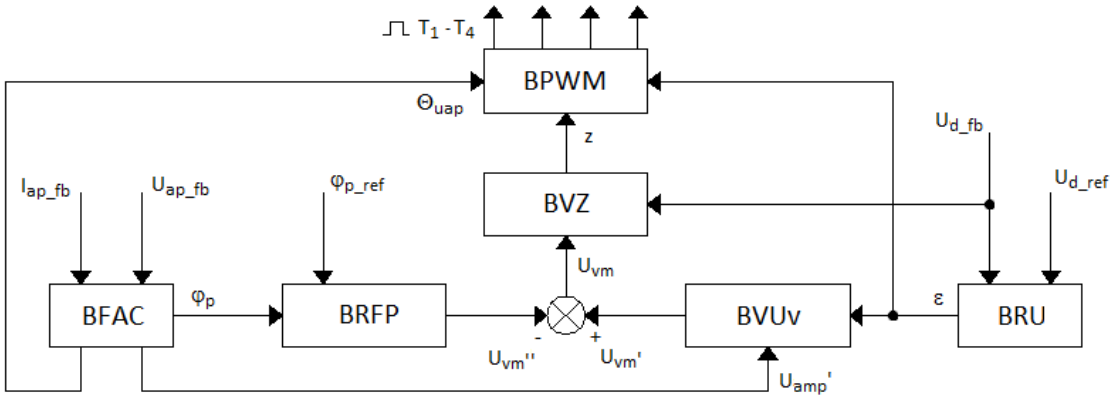
$$U_{vm} = z\, U_d \tag{1}$$

kde z označuje střídu, tedy poměrné zapnutí, určené poměrem amplitudy modulačního signálu k amplitudě pilovitého napětí. Čerpáno z [11].

Algoritmus řízení

Základním úkolem algoritmu řízení je regulace napětí U_d stejnosměrného meziobvodu, na požadovanou hodnotu U_{d_ref} a zajištění požadovaného fázového posunu mezi napětím U_{ap} a proudem I_{ap}, odebíraným z trolejového vedení. Pro dosažení účiníku $cos\ \varphi_p = 1$ je fázový posun nulový.

Blokové schéma řízení je uvedeno na *Obr. 10*. Synchronizace s napětím sítě je zajištěna v bloku BFAC, kde je také vypočítán fázový posun mezi napětím a proudem. Aktuální amplitudy a úhly vstupních periodických signálů, jsou vypočítány s využitím metod Fourierových aproximací a aproximace signálu s minimalizací chyby metodou nejmenších čtverců. Regulaci napětí v meziobvodu a fázového posunu zajišťují bloky BRU, BRFP. Bloky BVUv a BVZ realizují vztahy vycházející z fázových diagramů trakčního transformátoru. Blok BPWM zajišťuje modulaci střídavého napětí U_{vm} na vstupu pulzního usměrňovače. Údaje byly převzaty z [11].



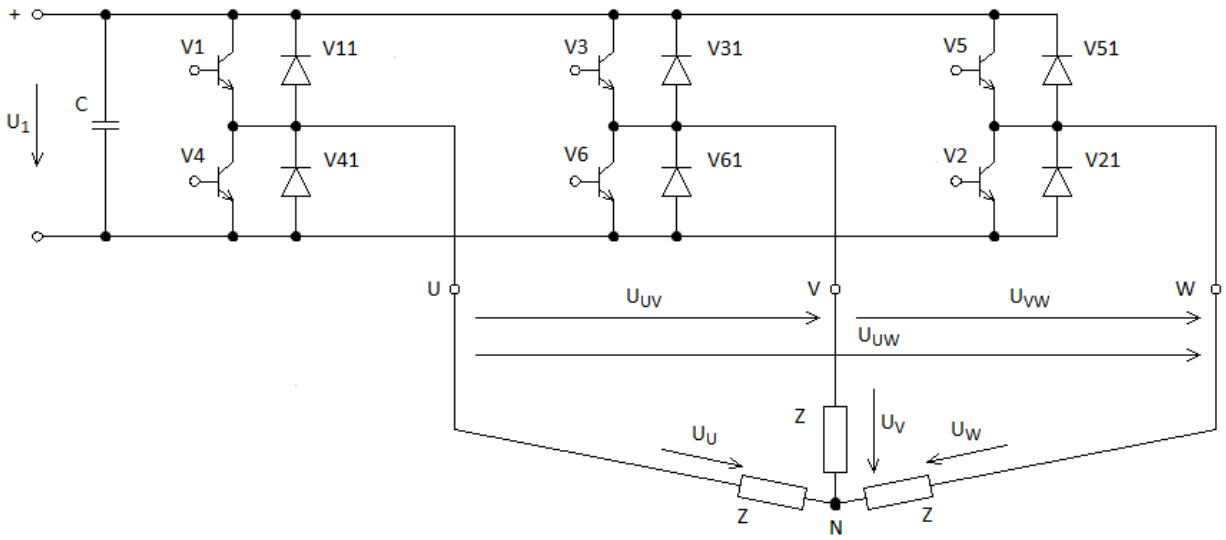
Obr. 10 : Blokové schéma regulačního obvodu pulsního usměrňovače, překresleno z [11].

2.6.2 Princip činnosti střídače

Současná koncepce uspořádání trakčních pohonů s asynchronními motory s frekvenčním řízením, vychází z varianty nepřímého měniče (řízeného střídače) napěťového typu. Moderní trakční pohon s bezkomutátorovým motorem má v podstatě dvě části, výkonovou a řídicí.

Výkonovou část tvoří indukční asynchronní motor s kotvou nakrátko a frekvenční měnič, ve kterém dochází k vlastní prakticky bezeztrátové přeměně energie. Vlastní obvod tedy sestává ze stejnosměrného meziobvodu, který tvoří kondenzátor C_f. Paralelně ke stejnosměrnému meziobvodu je ještě připojen brzdný obvod, který tvoří pulsní měnič s brzdným rezistorem R_b.

Vlastní střídač v základním provedení na *Obr. 11*, sestává ze šesti vypínatelných prvků (GTO, IGBT nebo IGCT) a šesti antiparalelně připojených diod, přes které se uzavírá doznívající proud při přepínání spínacích prvků nebo působí jako usměrňovače pro zpětný tok energie z motoru do meziobvodu. Údaje byly čerpány z [12].

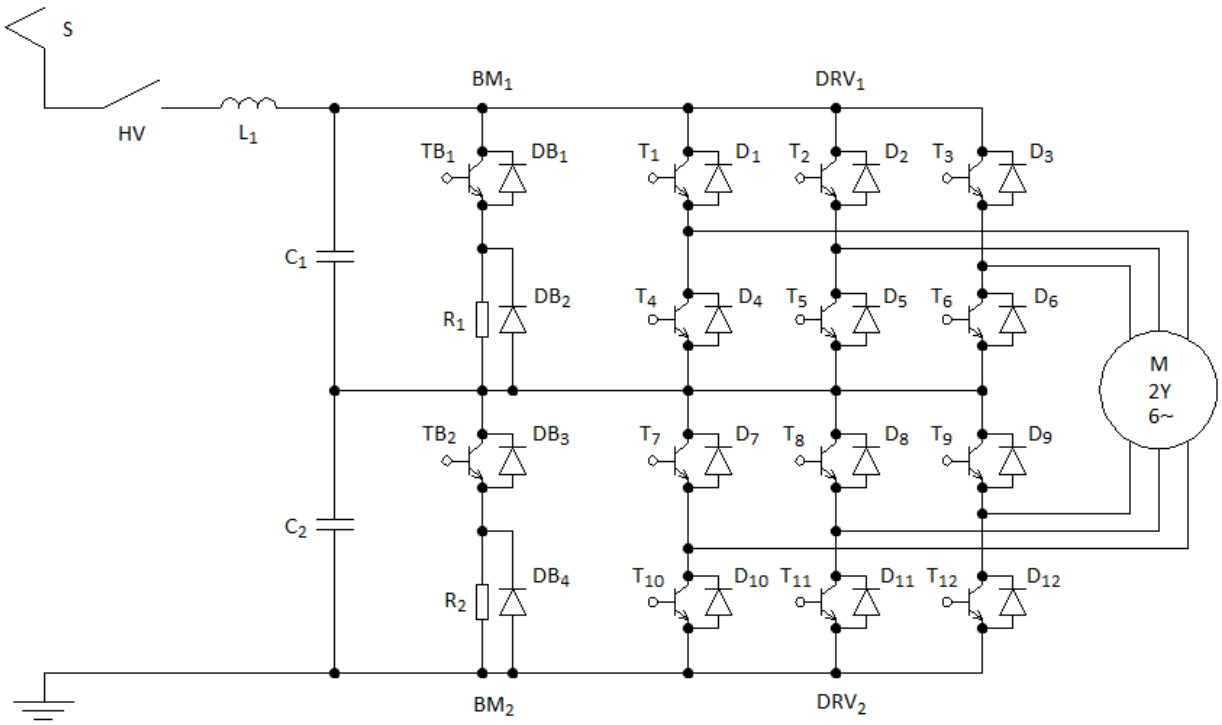


Obr. 11 : Výkonová část čtyřkvadrantového třífázového střídače, překresleno z [12].

Další možností je pro pohon použít zdvojený měnič a motory se dvěma vinutími spojenými do hvězdy. Proud z troleje se zde dostává přes sběrač, odrušovací filtry a hlavní vypínač do stejnosměrného meziobvodu, který je tvořen tlumivkou a kapacitním filtrem. Ten je dělen do dvou stejných částí s polovičním napětím troleje. Kapacitní filtr je součástí trakčního střídače,

který napájí paralelní vinutí dvou trakčních motorů v podvozku. Vinutí těchto motorů se skládá ze dvou oddělených, na plné napětí izolovaných třífázových vinutí zapojených do hvězdy. Tato vinutí jsou plně symetrická a jsou napájena z IGBT střídačů zcela synchronně. Stejně symetricky jsou rozděleny měniče a odporníky pro elektrodynamickou brzdu. Hlavní myšlenkou tohoto pohonu je použití speciálního asynchronního trakčního motoru s dvojitou hvězdou.

Na *Obr. 12* se nachází zapojení měniče využívajícího zapojení motoru do dvojité hvězdy, při napájení ze sítě 3 kV DC. V zapojení jsou rozkresleny i jednotlivé tranzistory a diody měniče. Údaje byly čerpány z [12].



Obr. 12 : Trakční měnič s asynchronním motorem zapojeným do dvojité hvězdy, překresleno z [12].

Řešení trakčního pohonu s IBGT tranzistory má v porovnání s klasickým řešením pomocí GTO měničů pro systém 3 kV tyto výhody:

- je možné vypustit komplikovaný stabilizační pulsní měnič,
- dochází ke značné úspoře silových součástek (kondenzátory, tlumivky, polovodiče),
- zařízení zabírá menší prostor a je konstrukčně kompaktnější,
- trakční pohon jako celek, vykazuje menší ztráty při lepším tvaru proudu v asynchronních trakčních motorech,
- při lepších parametrech pohonu je nižší cena elektrické výzbroje.

3 VÝPOČET PARAMETRŮ, POTŘEBNÝCH PRO PŘEKONÁNÍ DRÁHY VLEČKY

Do výpočtu je nutné zahrnout mnoho odporových koeficientů lokomotivy, ale i celého vlaku, jako například valivé odpory kol, aerodynamické odpory, odpory vznikající při deformaci kolejnice následkem tlaku kol, odpory vznikající při tření nákolků o kolejnice v obloucích apod.

Z důvodu velkých nepřesností, které by při výpočtu v důsledku používání těchto koeficientů vznikaly, jsou použity výpočty pomocí empirických vztahů. Tyto vztahy jsou většinou převzaty z literatury [14], [15] a z poznámek z předmětu Elektrické pohony. Postup výpočtu je veden podle literatury [13].

Ve výpočtech jsou pro zaručení vysoké přesnosti výpočtu používány mechanické a elektrické parametry lokomotivy ŠKODA 109E.

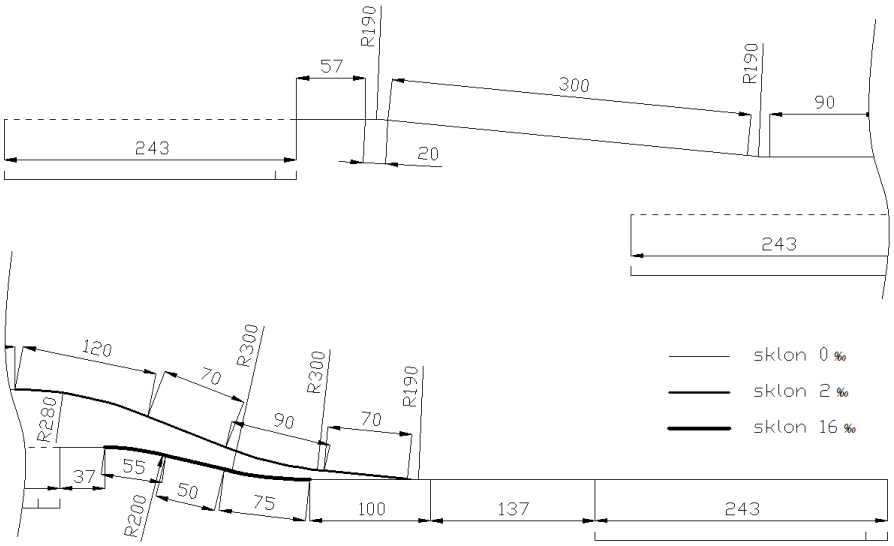
Překonávaná dráha

Byla vytvořena definovaná dráha vlečky dle skutečné předlohy. Jedná se o vlečku společnosti Žďas a.s., která je využívána k přepravě vozů ložených uhlím z přilehlého nádraží do uhelny, v opačném směru dopravy po vlečce je již souprava vozů prázdná.

Vlak je na nádraží rozdělen do dvou souprav o počtu 16 vozů. Každý z vozů soupravy a lokomotiva musí na trati zdolat vzdálenost 1934 m, a to v obou směrech. Celkem tedy 2 x 3868 m s oběma soupravami. Trať se skládá ze tří výhybkových oblouků R190, z oblouku R200, R280 a dvou oblouků R300. Stoupání trati je o sklonu 2 ‰ v délce 350 m a 16 ‰ v délce 180 m, obě dvě stoupání jsou ve smyslu klesání s loženým vlakem a stoupání s prázdným vlakem.

Maximální rychlost, které vlak dosáhne je z hlediska vlečkových předpisů a hmotnosti vlaku 15 km/h (4,17 m/s). Podle daných parametrů, bude spočítána potřebná tažná síla lokomotivy v nejnepříznivějším úseku trati, bez složky síly potřebné k překonání zrychlení, která z ní a trvalé tažné síly lokomotivy bude určena zpětně. Z určené síly bude získáno maximální možné zrychlení a určeno optimální, se kterým budou probíhat další výpočty. Ty budou provedeny vždy pro samostatnou lokomotivu, plně ložený vůz a prázdný vůz dle směru jízdy.

Následující grafy dráhu vlečky kompletně popisují.



Obr. 13 : Okótovaný půdorys vlečky.

Hmotnost lokomotivy a vlaku

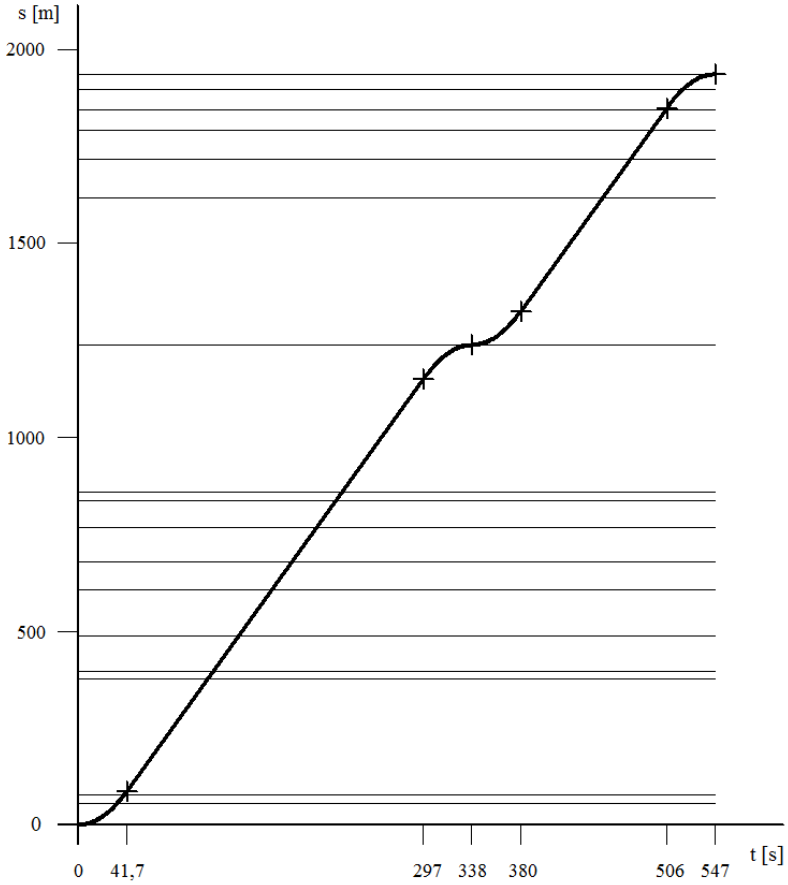
Dle směrnice TSI je maximální povolená hmotnost na nápravu lokomotivy, pro jízdu do maximální rychlosti 230 km/h 22,5 t, tedy pro celou čtyřnápravovou lokomotivu je povolena maximální hmotnost 90 t. Pro dodržení určité rezervy, je uvažováno maximální zatížení nápravy lokomotivy 22 t. Celková hmotnost čtyřnápravové, dvoupodvozkové lokomotivy je tedy 88 t.

Dle drážních předpisů je dovolené maximální zatížení nápravy loženého nákladního vozu 20 t. Výpočet je proveden pro nákladní čtyřnápravový vůz typu Eas plně ložený uhlím, jeho maximální hmotnost je tedy 80 t, hmotnost prázdného vozu je 21,5 t. Souprava je složena buď z plně ložených nebo prázdných vozů, tomu při počtu vozů 16 odpovídají hmotnosti 1280 t pro pleně ložené vozy a 344 t pro prázdné vozy.

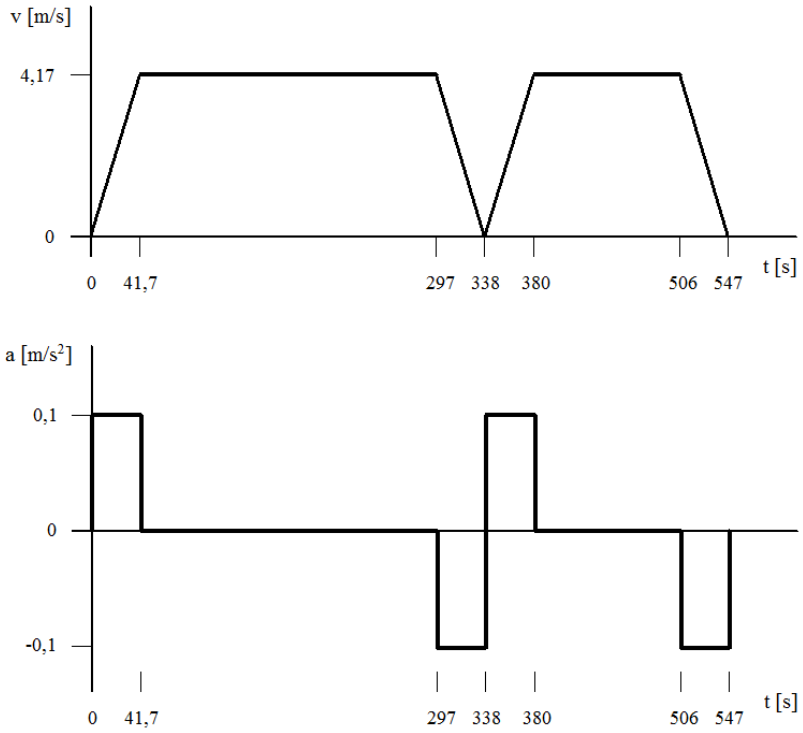
Celková hmotnost soupravy s lokomotivou je tedy 1368 t pro plně loženou soupravu a 432 t pro prázdnou soupravu. Délka vozu je 14,04 m a lokomotivy 18 m. Délky vozů a úseků tratí jsou při součtech zaokrouhlovány na celé metry a dobře čitelné hodnoty, celková délka vlaku je 243 m.

Potřebné síly uvažované při výpočtu

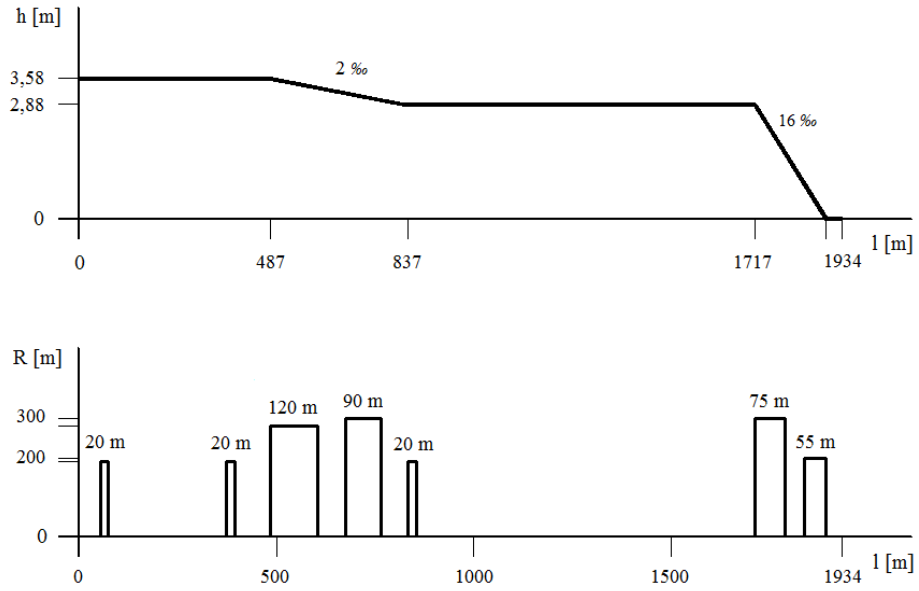
- Síla potřebná pro překonání vozidlového odporu - F_{to},
- síla potřebná pro překonání odporu z oblouku - $F_{R190,R200,\ R280,R300}$,
- síla potřebná pro překonání stoupání - $F_{st1,2}$,
- síla potřebná pro zrychlení - ΔF.



Obr. 14 : Graf definující ujetou dráhu v závislosti na čase jízdy, při zvoleném zrychlení 0,1 m/s^2.



Obr. 15 : Grafy průběhů rychlosti a zrychlení v závislosti na čase jízdy vlaku.



Obr. 16 : Grafy závislostí sklonů trati a poloměrů oblouků na vzdálenosti od počátku vlečky.

Zjednodušující předpoklady

Popis pohybu vlaku po koleji, s uvažováním všech odporů a sil, které na něj působí je velice obtížný. Proto jsou použita zjednodušení, která zanedbávají vlivy s malým účinkem na jízdu vozidel:

- jsou uvažovány pouze tíhové a rovnoběžné síly,
- je uvažován pouze rovnoběžný pohyb vozidel,
- je zanedbáno vzájemné působení vozidel při tlačení a tažení.

Vysvětlení veličin:

M_l - hmotnost lokomotivy v t,
m_l - hmotnost lokomotivy v kg,
M_v - hmotnost vozu v t,
m_v - hmotnost vozu v kg,
V - rychlost v km/h,
v - rychlost v m/s.

3.1 Pohybová rovnice vlaku

Pohybová rovnice je součet vektorů sil, působících v tomto případě v jedné ose, avšak nikoliv vždy ve stejném směru. Výchozí rovnici je tedy třeba zapsat obecně vektorově.
Pohybová rovnice vlaku složeného pouze z vozů, tedy síla potřebná na háku lokomotivy:

$$\overrightarrow{F_{hák}} = \overrightarrow{F_{to,v}} + \overrightarrow{F_{st,v}} + \overrightarrow{F_{R,v}} + \overrightarrow{\Delta F_v} \tag{2}$$

vysvětlení rovnice: aby se souprava vozů mohla pohybovat po trati, musí lokomotiva na háku vyvíjet sílu, o velikosti součtu síly potřebné k překonání vozidlového odporu $F_{to,v}$, se sílou potřebnou pro překonání stoupání $F_{st,v}$, sílou potřebnou pro překonání oblouku $F_{R,v}$ a sílou potřebnou pro zrychlení ΔF_v. K vyřešení pohybové rovnice vlaku, musíme určit všechny tyto potřebné síly, ve všech případech, ve kterých se při pohybu vlaku po vlečce vyskytují.

3.2 Síla potřebná k překonání vozidlových odporů F_{to}

Pokud jede vůz po přímé trati ustálenou rychlostí je jediná síla potřebná k jízdě ta, kterou překonává vozidlový odpor vozu O_v, tedy síla $F_{to,v}$. Velikost vozidlového odporu závisí na stavu a konstrukci vozu, skládá se z:

- odporu vznikajícího při valení kola po kolejnici,
- odporu vznikajícího třením v ložiskách,
- odporu prostředí vyvolaného odporem vzduchu.

Definice vozidlového odporu: 1 N/kN měrného vozidlového odporu znamená, že na každých 1000 N tíhové síly vozidla, připadá 1 N vozidlového odporu.

U vozidlového odporu byl zaveden pojem měrný vozidlový odpor o_v, který se vypočítává z jízdního odporu tak, že jízdní odpor dělíme tíhou vozidla v kN. Při zpětném přepočtu na sílu pak postupujeme opačně, tedy násobíme měrný vozidlový odpor tíhou vozidla v kN.
Měrný vozidlový odpor:

$$o_v = \frac{O_v}{M_v\ g} = \text{N/kN} \tag{3}$$

kde M_v je hmotnost vozidla v tunách, g je tíhové zrychlení, g = 9,81 m/s^2. Jednotka je bezrozměrná, avšak používá se N/kN.

Velikost jízdních odporů vztažená na jednotku tíhy, umožňuje vytvořit tabulky měrných odporů pro jednotlivé typy vozidel. Tabelovanou hodnotu měrného odporu pouze vynásobíme jeho hmotností v tunách a tíhovým zrychlením, protože jeden N/kN měrného vozidlového odporu znamená, že na každých 1000 N tíhové síly vozidla, připadá 1 N vozidlového odporu. Pro výpočty se používají statisticky určené matematické výrazy.

Obecný matematický výraz pro výpočet měrného vozidlového odporu:

$$o_v = a + b\,V + c\,V^2 = \text{N/kN} \tag{4}$$

měrnému vozidlovému odporu prázdných čtyřnápravových nákladních vozů, kterým je i prázdný vůz typu Eas, odpovídá rovnice vozidlového odporu typu U4, měrný vozidlový odpor prázdného vozu, při rychlosti 15 km/h je tedy:

$$o_{v,vp} = 2 + 0{,}0008\,V^2 = 2 + 0{,}0008 \cdot 15^2 = \underline{\underline{2{,}18\,\text{N/kN}}} \tag{5}$$

měrnému vozidlovému odporu ložených čtyřnápravových nákladních vozů, kterým je i ložený vůz typu Eas, odpovídá rovnice vozidlového odporu typu T4, měrný vozidlový odpor loženého vozu, při rychlosti 15 km/h je tedy:

$$o_{v,vl} = 1{,}3 + 0{,}00033\,V^2 = 1{,}3 + 0{,}00033 \cdot 15^2 = \underline{\underline{1{,}374\,\text{N/kN}}} \tag{6}$$

a měrnému vozidlovému odporu lokomotivy S 489.0, která má podobnou stavbu, aerodynamiku a rozložení mechanických částí, jako počítaná lokomotiva, odpovídá následující rovnice, měrný vozidlový odpor lokomotivy při rychlosti 15 km/h pak bude:

$$o_{v,l} = 1{,}4 + 0{,}00056\,V^2 = 1{,}4 + 0{,}00056 \cdot 15^2 = \underline{\underline{1{,}526\,\text{N/kN}}}\,. \tag{7}$$

Pro zjištění konkrétních potřebných sil, je třeba vypočtené hodnoty měrných vozidlových odporů, vynásobit výrazem $M\,g$, kde M je hmotnost počítaného vozu či lokomotivy.
Síla potřebná k překonání vozidlového odporu prázdného vozu $F_{to,vp}$ je:

$$F_{to,vp} = o_{v,vp}\;M_{vp}\;g = 2{,}18 \cdot 21{,}5 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{459{,}8\,\text{N}}} \tag{8}$$

síla potřebná k překonání vozidlového odporu loženého vozu $F_{to,vl}$ je:

$$F_{to,vl} = o_{v,vl}\;M_{vl}\;g = 1{,}374 \cdot 80 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{1079\,\text{N}}} \tag{9}$$

a síla potřebná k překonání vozidlového odporu lokomotivy $F_{to,l}$ je:

$$F_{to,l} = o_{v,l}\;M_l\;g = 1{,}526 \cdot 88 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{1317\,\text{N}}}\,. \tag{10}$$

3.3 Síla potřebná k překonání traťových odporů

Pokud se vlak pohybuje po nepřímé trati, musíme k výše zmíněným jízdním odporům přičíst odpory traťové, do kterých počítáme:

- odpor z oblouku trati,
- odpor ze sklonu trati.

Traťové odpory jsou vyjadřovány v měrných veličinách značených malými písmeny.

3.3.1 Síla potřebná k překonání odporu z oblouku trati F_R

Při průjezdu obloukem působí na vozidlo přídavné vnější síly, které tvoří odchýlení z přímého směru a vnucují mu dráhu, určenou zakřivením kolejnic. Mezi jízdní plochou kol a kolejnicemi vznikají vodící a třecí síly, které se projeví i nárůstem pasivního jízdního odporu.

Velikost jízdního odporu při průjezdu obloukem je ovlivněna poloměrem oblouku, součinitelem tření kolo-kolejnice a tvarem kol. Pro výpočty jsou používány empirické vztahy podle Rockwella, které zohledňují veličinu s největším vlivem na velikost jízdního odporu, kterou je poloměr oblouku R.

Vzorec pro výpočet měrného odporu oblouku, pro vedlejší tratě a rozchod kolejnic 1435 mm:

$$o_R = \frac{500}{R - 30} = \text{N/kN} \tag{11}$$

pro zopakování, definice měrného odporu: 1 N/kN měrného vozidlového odporu znamená, že na každých 1000 N tíhové síly vozidla, připadá 1 N vozidlového odporu.

Při průjezdu protisměrnými oblouky je vypočtený měrný odpor násoben konstantou 1,5. Na trati se nachází, jak bylo již řečeno tyto oblouky: *R190*, *R200*, *R280* a *R300*.

Výpočet měrných odporů oblouků z empirického vztahu:

$$o_{R190} = \frac{500}{R-30} = \frac{500}{190-30} = \underline{\underline{3{,}125\,\text{N/kN}}} \tag{12}$$

$$o_{R200} = \frac{500}{R-30} = \frac{500}{200-30} = \underline{\underline{2{,}941\,\text{N/kN}}} \tag{13}$$

$$o_{R280} = \frac{500}{R-30} = \frac{500}{280-30} = \underline{\underline{2\,\text{N/kN}}} \tag{14}$$

$$o_{R300} = \frac{500}{R-30} = \frac{500}{300-30} = \underline{\underline{1{,}852\,\text{N/kN}}} \tag{15}$$

nyní realizujeme výpočty potřebných sil, pro překonání oblouků jedním prázdným vozem:

$$F_{R190,vp} = o_{R190}\ M_{vp}\ g = 3{,}125 \cdot 21{,}5 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{659{,}1\,\text{N}}} \tag{16}$$

$$F_{R200,vp} = o_{R200}\ M_{vp}\ g = 2{,}941 \cdot 21{,}5 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{620{,}3\,\text{N}}} \tag{17}$$

$$F_{R280,vp} = o_{R280}\ M_{vp}\ g = 2 \cdot 21{,}5 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{421{,}8\,\text{N}}} \tag{18}$$

$$F_{R300,vp} = o_{R300}\ M_{vp}\ g = 1{,}852 \cdot 21{,}5 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{390{,}6\,\text{N}}} \tag{19}$$

jedním loženým vozem:

$$F_{R190,vl} = o_{R190}\ M_{vl}\ g = 3{,}125 \cdot 80 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{2452\,\text{N}}} \tag{20}$$

$$F_{R200,vl} = o_{R200}\ M_{vl}\ g = 2{,}941 \cdot 80 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{2308\,\text{N}}} \tag{21}$$

$$F_{R280,vl} = o_{R280}\ M_{vl}\ g = 2 \cdot 80 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{1570\,\text{N}}} \tag{22}$$

$$F_{R300,vl} = o_{R300}\ M_{vl}\ g = 1{,}852 \cdot 80 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{1453\,\text{N}}} \tag{23}$$

a lokomotivou:

$$F_{R190,l} = o_{R190}\ M_{l}\ g = 3{,}125 \cdot 88 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{2698\,\text{N}}} \tag{24}$$

$$F_{R200,l} = o_{R200}\ M_{l}\ g = 2{,}941 \cdot 88 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{2539\,\text{N}}} \tag{25}$$

$$F_{R280,l} = o_{R280}\ M_{l}\ g = 2 \cdot 88 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{1727\,\text{N}}} \tag{26}$$

$$F_{R300,l} = o_{R300}\ M_{l}\ g = 1{,}852 \cdot 88 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{1599\,\text{N}}}\,. \tag{27}$$

3.3.2 Síla potřebná k překonání odporu ze sklonu trati F_{st}

Sklon trati, se vyjadřuje jako přírůstek zvýšení trati na úseku o délce 1000 metrů. Velikost sklonu vyjadřujeme v promilích, při jízdě do klesání má hodnota sklonu záporné znaménko.

Měrný odpor sklonu trati je roven sklonu trati v promilích:

$$o_s\,[\text{N/kN}] = s\,[‰] \tag{28}$$

při nízkých rychlostech, klade odpor ze sklonu trati největší nároky na tažnou sílu lokomotivy.

Výpočet potřebné síly, pro překonání stoupání 2 ‰, jedním prázdným vozem, pomocí hodnoty překonávané výšky h, dráhy l, hmotnosti prázdného vozu m_{vp} a tíhového zrychlení g:

$$F_{st1,vp+} = \frac{h_1}{l_1}\, m_{vp}\; g = \frac{0{,}7}{350} \cdot 2{,}15 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{421{,}8\,\mathrm{N}}} \tag{29}$$

výpočet potřebné síly, pro překonání druhého stoupání 16 ‰, jedním prázdným vozem:

$$F_{st2,vp+} = \frac{h_2}{l_2}\, m_{vp}\; g = \frac{2{,}88}{180} \cdot 2{,}15 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{3375\,\mathrm{N}}} \tag{30}$$

výpočty potřebných sil, pro překonání klesání, jedním loženým vozem:

$$F_{st1,vl-} = \frac{-h_1}{l_1}\, m_{vl}\; g = \frac{-0{,}7}{350} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{-1570\,\mathrm{N}}} \tag{31}$$

$$F_{st2,vl-} = \frac{-h_2}{l_2}\, m_{vl}\; g = \frac{-2{,}88}{180} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{-12{,}56\,\mathrm{kN}}} \tag{32}$$

pro překonání klesání lokomotivou:

$$F_{st1,l-} = \frac{-h_1}{l_1}\, m_{l}\; g = \frac{-0{,}7}{350} \cdot 8{,}8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{-1727\,\mathrm{N}}} \tag{33}$$

$$F_{st2,l-} = \frac{-h_2}{l_2}\, m_{l}\; g = \frac{-2{,}88}{180} \cdot 8{,}8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{-13{,}81\,\mathrm{kN}}} \tag{34}$$

pro překonání stoupání lokomotivou:

$$F_{st1,l+} = \frac{h_1}{l_1}\, m_{l}\; g = \frac{0{,}7}{350} \cdot 8{,}8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{1727\,\mathrm{N}}} \tag{35}$$

$$F_{st2,l+} = \frac{h_2}{l_2}\, m_{l}\; g = \frac{2{,}88}{180} \cdot 8{,}8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 = \underline{\underline{13{,}81\,\mathrm{kN}}}\,. \tag{36}$$

3.4 Výpočet optimálního zrychlení

Maximální možné zrychlení, v nejnepříznivějším úseku trati pro rozjezd, lze určit pomocí potřebné tažné síly, pro tažení celého vlaku v tomto úseku bez složky zrychlení a tažné síly lokomotivy. Jejich rozdílem získáme hodnotu tažné síly dostupnou pro zrychlení.

Celková tažná síla, potřebná na háku lokomotivy, při stoupání z uhelny, bez složky zrychlení:

$$\begin{aligned} F_{hák,s,bz} &= 4\,(F_{to,vp} + F_{R300,vp} + F_{st2,vp+}) + 4\,(F_{to,vp} + F_{st2,vp+}) + 4\,(F_{to,vp} + F_{R200,vp} + F_{st2,vp+}) + \\ &+ 4\,F_{to,vp} = 4 \cdot (459{,}8 + 390{,}6 + 3375) + 4 \cdot (459{,}8 + 3375) + 4 \cdot (459{,}8 + 620{,}3 + 3375) + \\ &+ 4 \cdot 459{,}8 = 16{,}9 \cdot 10^3 + 15{,}34 \cdot 10^3 + 17{,}82 \cdot 10^3 + 1839 = \underline{\underline{51{,}9\,\mathrm{kN}}} \end{aligned} \tag{37}$$

celková tažná síla, potřebná pro jízdu lokomotivy, při stoupání z uhelny, bez složky zrychlení:

$$F_{l,s,bz} = F_{to,l} + F_{st2,l+} + F_{R300,l} = 1317 + 13{,}81 \cdot 10^3 + 1599 = \underline{\underline{16{,}73\,\mathrm{kN}}} \tag{38}$$

celková potřebná tažná síla, na kolech lokomotivy, při stoupání z uhelny, bez složky zrychlení:

$$T_{s,bz} = F_{hák,s,bz} + F_{l,s,bz} = 51{,}9 \cdot 10^3 + 16{,}73 \cdot 10^3 = \underline{\underline{68{,}63\,\mathrm{kN}}}\,. \tag{39}$$

Maximální tažná síla lokomotivy ŠKODA 109E je 274 kN, trvalá tažná síla dosahuje hodnoty 213 kN. Tyto hodnoty jsou však udávány na háku lokomotivy, proto bude k hodnotě tažné síly přičtena síla, potřebná pro pojezd lokomotivy po rovině. Výpočet bude dále proveden při uvažování trvalé tažné síly.

Rozdíl trvalé tažné síly lokomotivy a potřebné tažné síly, bez složky zrychlení:

$$T_r = T_{trv} + F_{to,l} - T_{s,bz} = 213 \cdot 10^3 + 1317 - 68{,}63 \cdot 10^3 = \underline{\underline{145{,}7\,\text{kN}}} \tag{40}$$

maximální možné zrychlení, je poté dáno podílem rozdílu tažných sil a hmotnosti vlaku:

$$a_{\max} = \frac{T_r}{m_{vlak}} = \frac{145{,}7 \cdot 10^3}{432 \cdot 10^3} = \underline{\underline{0{,}3373\,\text{m/s}^{-2}}} \tag{41}$$

jako optimální, vzhledem k hmotnosti vlaku a skutečnosti použití bateriového napájení, bude zvoleno zrychlení a = 0,1 m/s^2. Při tomto zrychlení, dosáhne vlak maximální rychlosti 15 km/h v čase 41,7 s, a to ve vzdálenosti 86,94 m od započetí rozjezdu.

3.5 Síla potřebná pro zrychlení ΔF

Projevuje se při urychlování a rozjezdu soupravy, a je závislá na hmotnosti zrychlujícího vozu m_v a velikosti součinitele rotačních hmot p_d. Součinitel rotačních hmot je pro prázdný nákladní vůz roven $p_{d,vp}$ = 0,1; pro ložený vůz $p_{d,vl}$ = 0,04 a pro elektrické lokomotivy $p_{d,l}$ = 0,2.
Z teorie víme, že pro nerovnoměrně zrychlený pohyb tělesa platí:

$$s = f(t);\ v = \frac{ds}{dt};\ a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} \tag{42}$$

zrychlení budeme uvažovat konstantní, dle grafu na *Obr. 15*, bude se tedy jednat o rovnoměrně zrychlený nebo zpomalený pohyb, a tedy o lineární průběh rychlosti. Při respektování konstantního zrychlení, je možno z předchozích vztahů odvodit vzorce pro výpočet zrychlení a, času jízdy t a uražené dráhy s:

$$a = \frac{v}{t};\ t = \frac{v}{a};\ s = v_0\ t + \frac{1}{2}\ a\ t^2. \tag{43}$$

Potřebná síla, pro zrychlení prázdného vozu:

$$\Delta F_{vp} = m_{vp}\ (1 + p_{d,vp})\ a = 2{,}15 \cdot 10^4 \cdot (1 + 0{,}1) \cdot 0{,}1 = \underline{\underline{2365\,\text{N}}} \tag{44}$$

potřebná síla, pro zrychlení loženého vozu:

$$\Delta F_{vl} = m_{vl}\ (1 + p_{d,vl})\ a = 8 \cdot 10^4 \cdot (1 + 0{,}04) \cdot 0{,}1 = \underline{\underline{8320\,\text{N}}} \tag{45}$$

a potřebná síla, pro zrychlení lokomotivy:

$$\Delta F_l = m_l\ (1 + p_{d,l})\ a = 8{,}8 \cdot 10^4 \cdot (1 + 0{,}2) \cdot 0{,}1 = \underline{\underline{10{,}56\,\text{kN}}}\ . \tag{46}$$

3.6 Celková potřebná síla a výkon v nejnepříznivějším úseku trati

V celkovém součtu potřebných sil, je vypočten nejhorší možný stav, který nastává při dokončování rozjezdu s prázdnými vozy, při přepravě z uhelny. Vlak přitom zabírá část úseku se sklonem trati 16 ‰ a obloukem R200 o délce 55 metrů a část trati beze sklonu a oblouků.
Tažná síla, potřebná na háku lokomotivy v nejnepříznivějším úseku trati:

$$\begin{aligned} F_{hák,ns} &= 3\ (F_{to,vp} + F_{R200,vp} + F_{st2,vp+} + \Delta F_{vp}) + 13\ (F_{to,vp} + \Delta F_{vp}) = \\ &= 3 \cdot (459{,}8 + 620{,}3 + 3375 + 2365) + 13 \cdot (459{,}8 + 2365) = \\ &= 20{,}46 \cdot 10^3 + 36{,}72 \cdot 10^3 = \underline{\underline{57{,}18\,\text{kN}}} \end{aligned} \tag{47}$$

tažná síla, potřebná pro jízdu lokomotivy v nejnepříznivějším úseku trati:

$$F_{l,ns} = F_{to,l} + F_{R200,l} + F_{st2,l+} + \Delta F_l = 1317 + 2539 + 13{,}81 \cdot 10^3 + 10{,}56 \cdot 10^3 = \underline{\underline{28{,}23\,\text{kN}}} \quad (48)$$

celková potřebná tažná síla, na kolech lokomotivy v nejnepříznivějším úseku trati:

$$T_{ns} = F_{hák,ns} + F_{l,ns} = 57{,}18 \cdot 10^3 + 28{,}23 \cdot 10^3 = \underline{\underline{85{,}41\,\text{kN}}} \quad (49)$$

potřebný výkon, na kolech lokomotivy, pro tažení vlaku i lokomotivy, při uvažování konstantní rychlosti 15 km/h (4,17 m/s), v nejnepříznivějším úseku trati:

$$P_{kola,ns} = T_{ns}\ v = 85{,}41 \cdot 10^3 \cdot 4{,}17 = \underline{\underline{356{,}2\,\text{kW}}}\ . \quad (50)$$

3.7 Výpočet adhezního koeficientu

Kolo zatížené kolmou silou *N*, vyvíjí na svém obvodě tečnou sílu *T*. Poměr těchto sil, je adhezní poměr (koeficient) μ. Bude uvažována celková síla *N*, kterou lokomotiva působí na všechna kola dohromady, a ty pak styčně na kolejnice. Za *T* bude dosazena celková potřebná tažná síla na kolech lokomotivy, potřebná k tažení vlaku a lokomotivy, při nejnepříznivějším stavu, tedy dokončování rozjezdu při započetí stoupání z uhelny.

Výpočet adhezního koeficientu μ, v nejnepříznivějším úseku trati:

$$\mu = \frac{T_{ns}}{N} = \frac{85{,}41 \cdot 10^3}{8{,}8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81} = \underline{\underline{0{,}0989}} \quad (51)$$

porovnání hodnot:

$$0{,}0989 < 0{,}31 \quad (52)$$

výrobci lokomotiv uvádějí hodnotu μ_{max}, tedy adhezní poměr, při kterém ještě nedojde k prokluzu kol 0,31. V tomto případě je tedy neprotáčení kol při jízdě splněno.

3.8 Výpočet potřebné energie, pro realizování pojezdu po vlečce

Pro získání celkové potřebné energie je třeba sečíst potřebné energie pro zdolání jednotlivých úseků, a to pro ložené vozy při klesání, prázdné vozy při stoupání a lokomotivu při klesání a stoupání.

Potřebná energie pro zdolání daného úseku je součet potřebných sil, násobený délkou daného úseku. Dráha je přizpůsobena tak, že se vlak ve všech třech úsecích, kde stojí, nachází na rovině, proto není třeba počítat sílu potřebnou pro tažení každého vozu zvlášť. Ve výsledku projedou stejnou dráhu jak lokomotiva, tak i každý vůz.

Výpočet potřebné energie, pro pojezd vozů, při klesání na vlečku:

$$\begin{aligned}
W_{v,k} &= 16\ ((F_{to,vl} + \Delta F_{vl})\ 154 + (F_{to,vl} + F_{R190,vl} + \Delta F_{vl})\ 20 + F_{to,vl}\ 1190 + \\
&+ 2\ (F_{to,vl} + F_{R190,vl})\ 20 + (F_{to,vl} + F_{R280,vl} + F_{st1,vl-})\ 120 + (F_{to,vl} + F_{st1,vl-})\ 140 + \\
&+ (F_{to,vl} + F_{R300,vl} + F_{st1,vl-})\ 90 + (F_{to,vl} + F_{R300,vl} + F_{st2,vl-})\ 75 + (F_{to,vl} + F_{st2,vl-})\ 50 + \\
&+ (F_{to,vl} + F_{R200,vl} + F_{st2,vl-})\ 55) = \\
&= 16 \cdot ((1079 + 8320) \cdot 154 + (1079 + 2452 + 8320) \cdot 20 + 1079 \cdot 1190 + \\
&+ 2 \cdot (1079 + 2452) \cdot 20 + (1079 + 1570 - 1570) \cdot 120 + (1079 - 1570) \cdot 140 + \\
&+ (1079 + 1453 - 1570) \cdot 90 + (1079 + 1453 - 12{,}56 \cdot 10^3) \cdot 75 + (1079 - 12{,}56 \cdot 10^3) \cdot 50 + \\
&+ (1079 + 2308 - 12{,}56 \cdot 10^3) \cdot 55) = \\
&= 16 \cdot (1{,}447 \cdot 10^6 + 237 \cdot 10^3 + 1{,}284 \cdot 10^6 + 141{,}2 \cdot 10^3 + 129{,}5 \cdot 10^3 + 0 + 86{,}58 \cdot 10^3 + \\
&+ 0 + 0 + 0) = \underline{\underline{53{,}2\,\mathrm{MJ} = 14{,}78\,\mathrm{kWh}}}
\end{aligned} \tag{53}$$

výpočet potřebné energie, pro pojezd vozů, při stoupání z vlečky:

$$\begin{aligned}
W_{v,s} &= 16\ ((F_{to,vp} + \Delta F_{vp})\ 124 + (F_{to,vp} + F_{R200,vp} + F_{st2,vp+} + \Delta F_{vp})\ 55 + \\
&+ (F_{to,vp} + F_{st2,vp+})\ 50 + (F_{to,vp} + F_{R300,vp} + F_{st2,vp+})\ 75 + F_{to,vp}\ 1220 + \\
&+ 3\ (F_{to,vp} + F_{R190,vp})\ 20 + (F_{to,vp} + F_{st1,vp+})\ 140 + (F_{to,vp} + F_{R300,vp} + F_{st1,vp+})\ 90 + \\
&+ (F_{to,vp} + F_{R280,vp} + F_{st1,vp+})\ 120) = \\
&= 16 \cdot ((459{,}8 + 2365) \cdot 124 + (459{,}8 + 620{,}3 + 3375 + 2365) \cdot 55 + \\
&+ (459{,}8 + 3375) \cdot 50 + (459{,}8 + 390{,}6 + 3375) \cdot 75 + 459{,}8 \cdot 1220 + \\
&+ 3 \cdot (459{,}8 + 659{,}1) \cdot 20 + (459{,}8 + 421{,}8) \cdot 140 + (459{,}8 + 390{,}6 + 421{,}8) \cdot 90 + \\
&+ (459{,}8 + 421{,}8 + 421{,}8) \cdot 120) = \\
&= 16 \cdot (350{,}3 \cdot 10^3 + 375{,}1 \cdot 10^3 + 191{,}7 \cdot 10^3 + 316{,}9 \cdot 10^3 + 561 \cdot 10^3 + 67{,}13 \cdot 10^3 + \\
&+ 123{,}4 \cdot 10^3 + 114{,}5 \cdot 10^3 + 156{,}4 \cdot 10^3) = \underline{\underline{36{,}1\,\mathrm{MJ} = 10{,}03\,\mathrm{kWh}}}
\end{aligned} \tag{54}$$

výpočet potřebné energie, pro pojezd lokomotivy, při klesání na vlečku:

$$\begin{aligned}
W_{l,k} &= (F_{to,l} + \Delta F_l)\ 154 + (F_{to,l} + F_{R190,l} + \Delta F_l)\ 20 + F_{to,l}\ 1190 + \\
&+ 2\ (F_{to,l} + F_{R190,l})\ 20 + (F_{to,l} + F_{R280,l} + F_{st1,l-})\ 120 + (F_{to,l} + F_{st1,l-})\ 140 + \\
&+ (F_{to,l} + F_{R300,l} + F_{st1,l-})\ 90 + (F_{to,l} + F_{R300,l} + F_{st2,l-})\ 75 + (F_{to,l} + F_{st2,l-})\ 50 + \\
&+ (F_{to,l} + F_{R200,l} + F_{st2,l-})\ 55 = \\
&= (1317 + 10{,}56 \cdot 10^3) \cdot 154 + (1317 + 2698 + 10{,}56 \cdot 10^3) \cdot 20 + 1317 \cdot 1190 + \\
&+ 2 \cdot (1317 + 2698) \cdot 20 + (1317 + 1727 - 1727) \cdot 120 + (1317 - 1727) \cdot 140 + \\
&+ (1317 + 1599 - 1727) \cdot 90 + (1317 + 1599 - 13{,}81 \cdot 10^3) \cdot 75 + (1317 - 13{,}81 \cdot 10^3) \cdot 50 + \\
&+ (1317 + 2539 - 13{,}81 \cdot 10^3) \cdot 55 = \\
&= 1{,}829 \cdot 10^6 + 291{,}5 \cdot 10^3 + 1{,}567 \cdot 10^6 + 160{,}6 \cdot 10^3 + 158 \cdot 10^3 + 0 + 107 \cdot 10^3 + 0 + 0 + 0 = \\
&= \underline{\underline{4{,}113\,\mathrm{MJ} = 1{,}143\,\mathrm{kWh}}}
\end{aligned} \tag{55}$$

výpočet potřebné energie, pro pojezd lokomotivy, při stoupání z vlečky:

$$\begin{aligned}
&W_{l,s} = (F_{to,l} + \Delta F_l)\,124 + (F_{to,l} + F_{R200,l} + F_{st2,l+} + \Delta F_l)\,55 + \\
&+ (F_{to,l} + F_{st2,l+})\,50 + (F_{to,l} + F_{R300,l} + F_{st2,l+})\,75 + F_{to,l}\,1220 + \\
&+ 3\,(F_{to,l} + F_{R190,l})\,20 + (F_{to,l} + F_{st1,l+})\,140 + (F_{to,l} + F_{R300,l} + F_{st1,l+})\,90 + \\
&+ (F_{to,l} + F_{R280,l} + F_{st1,l+})\,120 = \\
&= (1317 + 10{,}56 \cdot 10^3) \cdot 124 + (1317 + 2539 + 13{,}81 \cdot 10^3 + 10{,}56 \cdot 10^3) \cdot 55 + \\
&+ (1317 + 13{,}81 \cdot 10^3) \cdot 50 + (1317 + 1599 + 13{,}81 \cdot 10^3) \cdot 75 + 1317 \cdot 1220 + \\
&+ 3 \cdot (1317 + 2698) \cdot 20 + (1317 + 1727) \cdot 140 + (1317 + 1599 + 1727) \cdot 90 + \\
&+ (1317 + 1727 + 1727) \cdot 120 = \\
&= 1{,}473 \cdot 10^6 + 1{,}552 \cdot 10^6 + 756{,}3 \cdot 10^3 + 1{,}254 \cdot 10^6 + 1{,}607 \cdot 10^6 + 240{,}9 \cdot 10^3 + \\
&+ 426{,}1 \cdot 10^3 + 417{,}9 \cdot 10^3 + 572{,}5 \cdot 10^3 = \underline{\underline{8{,}3\,MJ = 2{,}306\,\text{kWh}}}
\end{aligned} \tag{56}$$

výpočet potřebné energie, pro zajištění dvojnásobného dopravení celého vlaku na vlečku a z vlečky, koeficient $R_{20\%}$ vyjadřuje rezervu +20%:

$$\begin{aligned}
&W_c = 2\,(W_{v,k} + W_{v,s} + W_{l,k} + W_{l,s})\,R_{20\%} = \\
&= 2 \cdot (14{,}78 \cdot 10^3 + 10{,}03 \cdot 10^3 + 1{,}143 \cdot 10^3 + 2{,}306 \cdot 10^3) \cdot 1{,}2 = \underline{\underline{67{,}82\,\text{kWh}}}
\end{aligned} \tag{57}$$

z toho vypočteme potřebnou energii, přepočtenou na vstup střídače, $\eta_{mot,n}$ = 0,8 - účinnost motoru při nízkých otáčkách, η_p = 0,98 - účinnost převodovky, η_s = 0,99 - účinnost střídače:

$$W_{el} = \frac{W_c}{\eta_{mot,n}\ \eta_p\ \eta_s} = \frac{67{,}82 \cdot 10^3}{0{,}8 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}99} = \underline{\underline{87{,}38\,\text{kWh}}} \tag{58}$$

tato hodnota, bude ještě při dalších výpočtech navýšena o ztrátové koeficienty baterií, tedy koeficient stárnutí baterie a koeficient klimatických vlivů.

3.9 Výpočet maximálního možného počtu připojených vozů, při tažení do daných stoupání

V této kapitole, se nachází výpočty maximálního možného počtu připojených, plně ložených vozů, které je lokomotiva schopna při daném stoupání a zrychlení táhnout. Maximální tažná síla lokomotivy je 274 kN, protože je hodnota zadána na háku lokomotivy, jsou zanedbány síly potřebné k jejímu pojezdu. Výpočty budou tedy provedeny vždy přímo pro sílu, potřebnou na háku lokomotivy, tedy pouze pro plně ložené vozy.

Na každý vůz musí působit síla, potřebná pro překonání vozidlových odporů $F_{to,vl}$, síla potřebná pro zrychlení loženého vozu ΔF_{vl}, při zrychlení 0,1 m/s^2 a síla, potřebná k překonání odporu ze sklonu trati, která je v každém výpočetním vztahu rozdílná. Síla potřebná pro překonání odporu z oblouku trati nebude uvažována.

Výpočet je proveden pro sklony 1 ‰, až 40 ‰ viz níže.

Výpočet maximálního počtu ložených vozů, který lokomotiva utáhne, při nepřekročení maximální tažné síly na háku lokomotivy, při jízdě do stoupání 1‰:

$$x_{1‰} = \frac{F_{hák,\max}}{F_{to,vl} + \frac{h_1}{l}\,m_{vl}\,g + \Delta F_{vl}} = \frac{274 \cdot 10^3}{1079 + \frac{1}{1000} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 + 8320} = \underline{\underline{26{,}91 \Rightarrow 26\,\text{vozů}}} \tag{59}$$

při jízdě do stoupání 5‰:

$$x_{5‰} = \frac{F_{hák,\max}}{F_{to,vl} + \frac{h_5}{l} m_{vl}\ g + \Delta F_{vl}} = \frac{274 \cdot 10^3}{1079 + \frac{5}{1000} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 + 8320} = \underline{\underline{20{,}57 \Rightarrow 20\,\text{vozů}}} \qquad (60)$$

při jízdě do stoupání 10‰:

$$x_{10‰} = \frac{F_{hák,\max}}{F_{to,vl} + \frac{h_{10}}{l} m_{vl}\ g + \Delta F_{vl}} = \frac{274 \cdot 10^3}{1079 + \frac{10}{1000} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 + 8320} = \underline{\underline{15{,}89 \Rightarrow 15\,\text{vozů}}} \qquad (61)$$

při jízdě do stoupání 20‰:

$$x_{20‰} = \frac{F_{hák,\max}}{F_{to,vl} + \frac{h_{20}}{l} m_{vl}\ g + \Delta F_{vl}} = \frac{274 \cdot 10^3}{1079 + \frac{20}{1000} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 + 8320} = \underline{\underline{10{,}92 \Rightarrow 10\,\text{vozů}}} \qquad (62)$$

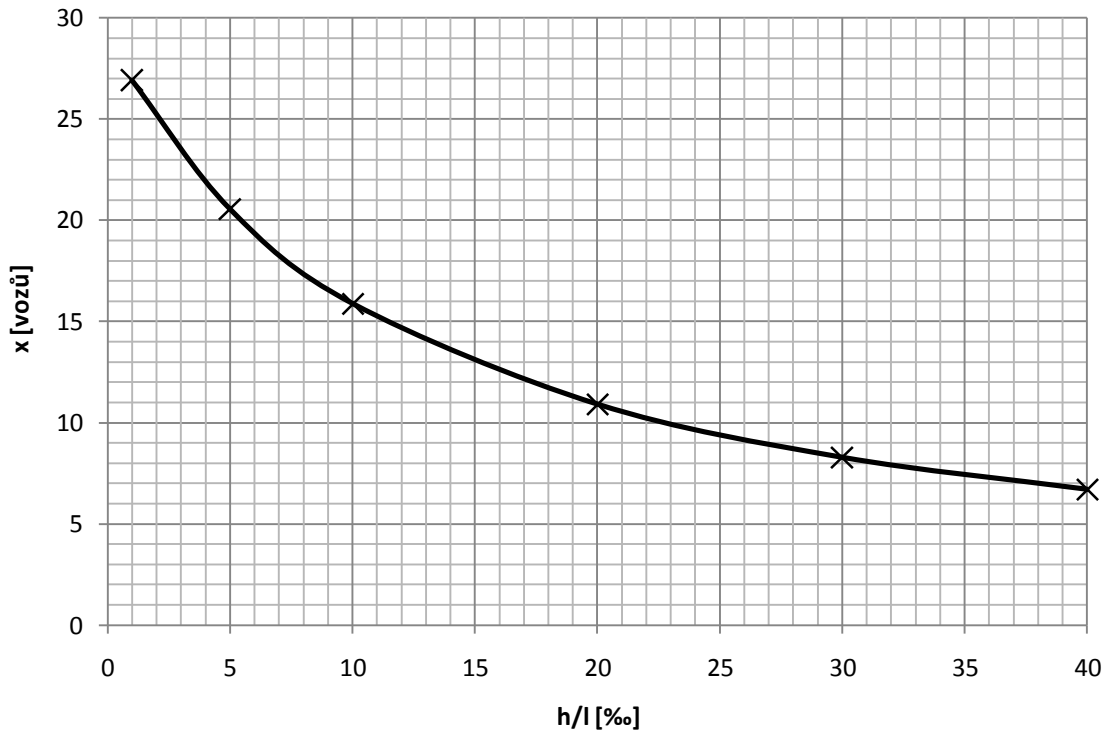
při jízdě do stoupání 30‰:

$$x_{30‰} = \frac{F_{hák,\max}}{F_{to,vl} + \frac{h_{30}}{l} m_{vl}\ g + \Delta F_{vl}} = \frac{274 \cdot 10^3}{1079 + \frac{30}{1000} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 + 8320} = \underline{\underline{8{,}31 \Rightarrow 8\,\text{vozů}}} \qquad (63)$$

při jízdě do stoupání 40‰:

$$x_{40‰} = \frac{F_{hák,\max}}{F_{to,vl} + \frac{h_{40}}{l} m_{vl}\ g + \Delta F_{vl}} = \frac{274 \cdot 10^3}{1079 + \frac{40}{1000} \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 9{,}81 + 8320} = \underline{\underline{6{,}72 \Rightarrow 6\,\text{vozů}}} \qquad (64)$$

vpočtené hodnoty jsou pro názornost vyneseny v grafu na *Obr. 17*.



Obr. 17 : Graf závislosti maximálního možného počtu připojených vozů, na stoupání trati.

Výpočty, nacházející se v této kapitole jsou pouze informativní. Vypočtené hodnoty platí přímo pro lokomotivu ŠKODA 109E a jsou nezávislé na systému napájení, tedy napájení z baterií nebo napájení z trolejového vedení.

4 NÁVRH BATERIOVÝCH SKUPIN

Při výběru typu baterií, k použití v železničním vozidle, a zejména pak v lokomotivě je nutno dbát na mnoho podmínek, které musí baterie splnit, jedná se zejména o:

- široký rozsah pracovních teplot od -20 °C do 50 °C s teplotními extrémy -30 °C až 70 °C,
- dlouhou životnost baterií,
- vysokou přetížitelnost,
- odolnost vůči otřesům,
- malou hmotnost a velikost,
- minimální údržbu,
- vysokou spolehlivost.

4.1 Použité baterie

Jako nejpřijatelnější byly vybrány Ni-Cd články řady SRX, firmy Saft Ferak a. s., které jsou určeny přímo pro aplikace v kolejových vozidlech. Informace o bateriích byly čerpány z [16].

4.1.1 Ni-Cd baterie řady SRX

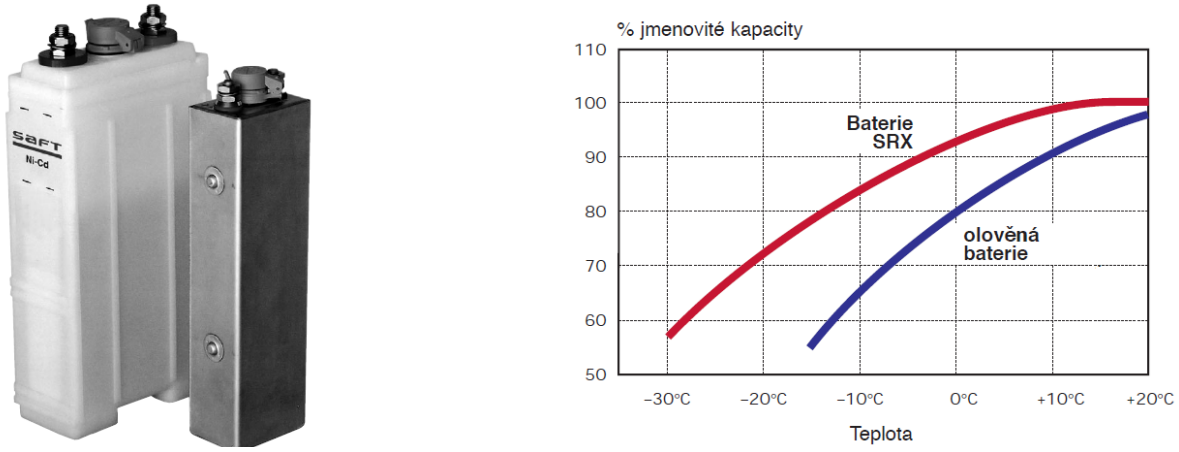
Baterie řady SRX, se vyznačují vysokou spolehlivostí při extrémně nízkých teplotách, a to od teploty -50 °C až do teploty 70 °C. Při teplotě -20 °C, si baterie SRX udrží více než 70 % své jmenovité kapacity.

Nízké náklady životního cyklu baterií jsou zajištěny pevnou konstrukcí článků, velkou rezervou elektrolytu a špičkovou technologií výroby desek. Baterie pak mnohdy dosahuje patnácti let spolehlivé služby a s pravidelnou údržbou životnosti až 30 let.

Baterie řady SRX disponují vysokou přetížitelností, jsou schopné krátkodobě, do 1 minuty dodávat proud o velikosti pětinásobku jmenovité kapacity. Baterii je také možno vybíjet proudem ve výši trojnásobku jmenovité kapacity, a to až po dobu tří minut.

Nižší hmotnost i zastavěný objem baterií SRX, oproti výkonově odpovídajícím běžně navrhovaným bateriím, přímo vedou k nižším provozním nákladům a zvýšení celkové účinnosti systému. Celkové náklady na pořízení a třicetiletý provozní cyklus jsou ve srovnání s olověnými akumulátory méně než poloviční. Centrální systém dolévání vody minimalizuje doplňkové provozní náklady až o desítky procent.

Baterie SRX nabízí také naprostou spolehlivost, tedy předvídatelnou výkonnost bez rizika „náhlé smrti“ baterie. Baterie jsou také díky svojí konstrukci velmi odolné proti otřesům a jsou dodávány v ocelových, plastových nebo nerezových nádobách podle místa použití. Vysoké ekologické nároky jsou splněny recyklací baterií, při které je recyklováno až 99 % kovů [16].



Obr. 18 : Vlevo bateriové články SRX [17], vpravo závislost jmenovité kapacity na teplotě [16].

4.1.1.1 Elektrické a mechanické parametry článků

Napětí

Minimální tabelované koncové napětí článku je uváděno 0,85 V, při výpočtu však bude uvažováno nejbližší vyšší tabelované koncové napětí 1 V, a to jak z důvodu mírného zvýšení životnosti článku, tak i z důvodu předimenzování. Jmenovité napětí článku je 1,2 V, v plně nabitém stavu pak napětí článku dosahuje hodnoty 1,35 V. Články, se doporučuje nabíjet napětím v rozmezí 1,45 V až 1,55 V při 20 °C. Doporučená hodnota je pak 1,47 V [17].

Proud

Hodnoty vybíjecích proudů, se odvíjejí zejména od doby vybíjení článků a jejich kapacity, hodnoty jsou tabelované v literatuře [16]. Kapacita článků, se pohybuje v řadě od 22 Ah do 220 Ah u článků v plastových nádobách a od 73 Ah do 375 Ah u článků v ocelových nádobách.

Velikost

Velikosti článků, se řídí podobou rozmístění v nosiči, pro 5 článků vedle sebe v rozměru *d*:

- články v plastových nádobách (*v* x *š* x *d*), (277 – 343 x 90 – 170 x 242 – 701) mm,
- články v ocelových nádobách (*v* x *š* x *d*), (362 x 190 x 355 – 672) mm.

Hmotnost

Hmotnost článku, se pohybuje v rozmezí od 1,6 kg do 11,6 kg u článků v plastových nádobách a od 5,3 kg do 18,6 kg u článků v ocelových nádobách.

4.2 Dimenzování baterií

4.2.1 Potřebná energie jedné bateriové skupiny

Z předchozích výpočtů je známa hodnota potřebné energie, přepočtené na vstup střídače, tedy na meziobvod měniče W_{el} = 87,38 kWh. Tuto energii je ještě nutno podělit koeficientem stárnutí baterie η_{st}, vyjadřujícím procentuální zůstatek jmenovité kapacity baterie v patnáctém roku života baterie a klimatickým koeficientem η_k, určujícím poměrnou kapacitu baterie při teplotě -20 °C.

Výpočet celkové potřebné energie *W*, se zohledněním koeficientů η_{st} = 0,9 - koeficient stárnutí baterie typu SRX a η_k = 0,73 - klimatický koeficient baterie SRX při teplotě -20 °C:

$$W = \frac{W_{el}}{\eta_{st}\ \eta_k} = \frac{87{,}38 \cdot 10^3}{0{,}9 \cdot 0{,}73} = \underline{\underline{133\,\text{kWh}}} \tag{65}$$

tato energie je nutná pro zajištění dříve definovaných pojezdů vlakem po vlečce.

Protože se v lokomotivě nachází dva měničové meziobvody, budou použity i dvě bateriové skupiny, každá o poloviční potřebné energii.

Výpočet potřebné energie, jedné bateriové skupiny:

$$W_{bat} = \frac{W}{n_s} = \frac{133 \cdot 10^3}{2} = \underline{\underline{66{,}5\,\text{kWh}}} \tag{66}$$

4.2.2 Určení počtu článků bateriové skupiny

Meziobvod měniče je na stejnosměrné síti napájen přímo z troleje, napětí se tedy pohybuje v rozmezí hodnot 2,1 kV až 3,6 kV, pokud použijeme jmenovité napětí meziobvodu 3 kV a jmenovité napětí článku 1,2 V, dostaneme počet článků:

$$x_{cl} = \frac{U_{mo,\,jm}}{U_{cl,\,jm}} = \frac{3 \cdot 10^3}{1{,}2} = \underline{\underline{2500\,\text{článků}}} \tag{67}$$

napětí v meziobvodu, při použití 2500 článků a koncového napětí článku 0,85 V bude:

$$U_{mo,0{,}85V\,/\,cl} = x_{cl}\ U_{konc,cl,0{,}85V} = 2500 \cdot 0{,}85 = \underline{\underline{2125\,\text{V}}} \tag{68}$$

napětí v meziobvodu, při použití 2500 článků a koncového napětí článku 1 V:

$$U_{mo,1V\,/\,cl} = x_{cl}\ U_{konc,cl,1V} = 2500 \cdot 1 = \underline{\underline{2500\,\text{V}}} \tag{69}$$

napětí v meziobvodu, při použití 2500 článků a napětí při plně nabitém článku 1,35 V:

$$U_{mo,1{,}35V\,/\,cl} = x_{cl}\ U_{cl,1{,}35V} = 2500 \cdot 1{,}35 = \underline{\underline{3375\,\text{V}}} \tag{70}$$

nabíjecí napětí bateriové skupiny, při použití 2500 článků a nabíjecího napětí článku 1,5 V:

$$U_{mo,1{,}5V\,/\,cl} = x_{cl}\ U_{cl,1{,}5V} = 2500 \cdot 1{,}5 = \underline{\underline{3750\,\text{V}}} \tag{71}$$

z výpočtu (71) je patrné, že pro dobíjení baterií bude potřeba použít měniče zvyšujícího napětí.

Z výpočtů dále vyplývá, že použití počtu 2500 článků v jedné bateriové skupině bude ideálním řešením, celkově bude tedy v lokomotivě použito 5000 článků.

4.2.3 Určení potřebné energie jednoho článku

Pro určení potřebné energie jednoho článku, je třeba provést převod potřebné energie jedné bateriové skupiny na základní jednotky, tedy Ws:

$$W_{bat,Ws} = 3600\ W_{bat} = 3600 \cdot 66{,}5 \cdot 10^3 = \underline{\underline{239{,}4\,\text{MWs}}} \tag{72}$$

potřebná energie jednoho článku potom bude:

$$W_{cl} = \frac{W_{bat,Ws}}{x_{cl}} = \frac{239{,}4 \cdot 10^6}{2500} = \underline{\underline{95{,}76\,\text{kWs}}} \tag{73}$$

nyní je třeba převést údaje kapacit článků v Ah, udaných výrobcem [16] na základní jednotky a vybrat správný článek, při převodu na Ws je uvažováno jmenovité napětí článku, tedy 1,2 V.

Výpočty jsou provedeny pro články SRX 22 P a SRX 25 P, údaj C_5 udává kapacitu článku v Ah:

$$W_{cl,22P} = 3600\ C_{5,22P}\ U_{cl,jm} = 3600 \cdot 22 \cdot 1{,}2 = \underline{\underline{95{,}04\,\mathrm{kWs}}} \tag{74}$$

$$W_{cl,25P} = 3600\ C_{5,25P}\ U_{cl,jm} = 3600 \cdot 25 \cdot 1{,}2 = \underline{\underline{108\,\mathrm{kWs}}} \tag{75}$$

pro počítaný případ, nejnižší nabízený článek SRX 22 P nevyhovuje, nejbližší vyšší článek SRX 25 P, však již vyhovuje, a to s rezervou více než 11 %. Budou tedy použity články SRX 25 P, které budou instalovány v nosičích po dvaceti článcích.

4.2.4 Ověření výkonnosti baterie, při jízdě v nejnepříznivějším úseku trati

Potřebný výkon na kolech lokomotivy, pro tažení vlaku i lokomotivy v nejnepříznivějším úseku trati má hodnotu 356,2 kW, tento výkon je pro ověření výkonnosti baterie třeba přepočítat přes všechny účinnosti na vstup střídače, stejně jako u potřebných energií:

$$P_p = \frac{P_{kola,ns}}{\eta_{mot,n}\ \eta_p\ \eta_s\ \eta_{st}\ \eta_k} = \frac{356{,}2 \cdot 10^3}{0{,}8 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}73} = \underline{\underline{698{,}5\,\mathrm{kW}}} \tag{76}$$

výpočet výkonu pro porovnání, při průměrném vybíjecím napětí článku 1,175 V, tedy počátečním 1,35 V a koncovém 1 V a době vybíjení 1 minuta při teplotě 20 °C, pro článek SRX 25 P:

$$P_{celk,20°C} = 2\ U_{mo,1V}\ U_{cl,vp}\ I_{25P,1\min,20°C} = 2 \cdot 2500 \cdot 1{,}175 \cdot 202 = \underline{\underline{1{,}187\,\mathrm{MW}}} \tag{77}$$

výpočet výkonu pro porovnání, při průměrném vybíjecím napětí článku 1,175 V a době vybíjení 3 minuty při teplotě -20 °C, pro článek SRX 25 P:

$$P_{celk,-20°C} = 2\ U_{mo,1V}\ U_{cl,vp}\ I_{25P,3\min,-20°C} = 2 \cdot 2500 \cdot 1{,}175 \cdot 116 = \underline{\underline{681{,}5\,\mathrm{kW}}} \tag{78}$$

v prvním případě, při teplotě 20 °C, době vybíjení 1 minuta a koncovém napětí 1 V s velkou rezervou baterie SRX 25 P vyhoví.

Ve druhém případě, při teplotě -20 °C, době vybíjení 3 minuty a koncovém napětí 1 V, potřebnému výkonu v nejnepříznivějším úseku trati, baterie SRX 25 P zdánlivě nevyhoví, avšak při zohlednění doby odběru daného výkonu pouze po dobu několika sekund a možnosti vybití baterie až na koncové napětí 0,85 V, baterie s dostatečnou rezervou také vyhoví.

Pro pohon lokomotivy budou použity baterie, sestavené z článků Saft Ferak a. s., SRX 25 P.

4.2.5 Parametry zvolených bateriových skupin

Jak bylo již řečeno, v lokomotivě se budou nacházet dvě bateriové skupiny po 2500 článcích. Každá bateriová skupina náleží jednomu meziobvodu měniče, který je složen ze jmenovitých napětí 0 V, 3 kV a z poloviního napětí, to znamená, že z každé bateriové skupiny bude vyveden střed. Budou použity nosiče o počtu 20 článků a dva o počtu 10 článků k vytvoření středního vývodu baterie.

V jedné bateriové skupině bude použito:

- 124 nosičů o počtu 20 článků na nosič,
- 2 nosiče o počtu 10 článků na nosič.

Celkem bude tedy použito:

- 248 nosičů o počtu 20 článků na nosič,
- 4 nosiče o počtu 10 článků na nosič.

Hmotnost bateriových skupin

Hmotnost nosiče s dvaceti články SRX 25 P je 36 kg, s deseti články potom 19 kg. Ze známých dílčích hmotností, může být vypočtena hmotnost jedné bateriové skupiny:

$$m_{bat,sk} = n_{n20}\ m_{20} + n_{n10}\ m_{10} = 124 \cdot 36 + 2 \cdot 19 = \underline{\underline{4502\,\text{kg} = 4{,}502\,\text{t}}} \quad (79)$$

hmotnost jedné bateriové skupiny bude tedy 4,502 t. Celková hmotnost, kterou budou baterie v lokomotivě vytvářet, bude dvojnásobná, a tedy 9,004 t.

Prostorové nároky bateriových skupin

Velikosti nosičů s články jsou následující (*v* x *š* x *d*) mm:

- 20 článků – 277 x 177 x 472
- 10 článků – 277 x 90 x 472

Protože nejsou známy přesné rozměry strojovny lokomotivy a zejména pak prostoru vymezeného pro navrhované baterie, bude proveden pouze výpočet objemu, který baterie ve strojovně zabírají:

$$V = n_{n20}\ a_{20}\ b_{20}\ c_{20} + n_{n10}\ a_{10}\ b_{10}\ c_{10} = 124 \cdot 277 \cdot 177 \cdot 472 + 2 \cdot 277 \cdot 90 \cdot 472 = \underline{\underline{2{,}893\,\text{m}^3}} \quad (80)$$

jedna bateriová skupina tedy zabere prostor o objemu 2,893 m^3, celkem tedy baterie ve strojovně lokomotivy zabírají prostor 5,786 m^3, pokud do výpočtu zahrneme použití centrálního dolévání vody, bude celkový zastavěný objem přibližně 6 m^3.

Cena bateriových skupin

Cena jednoho článku, se započtením poměrné části nosiče a spojek je 85,52 €, při výpočtu budeme uvažovat kurz 27,35 Kč/€, celková cena jedné bateriové skupiny tedy bude:

$$c_{bat,sk} = c_{cl}\ \ x_{cl}\ \ k_{Kc/€} = 85{,}52 \cdot 2500 \cdot 27{,}35 = \underline{\underline{5{,}847\,\text{mil.Kč}}} \quad (81)$$

celková cena obou bateriových skupin pak bude dvojnásobná, tedy 11,69 milionů Kč.

4.3 Výpočet výkonu fotovoltaických fólií, umístěných na střeše osobního vozu

V posledních několika letech, se velmi rozmáhá získávání elektrické energie ze slunečního svitu, tedy pomocí solárních panelů. Jejich instalace a výroba je však stále velmi nákladná nejenom na finance, ale zejména na zastavěný prostor. Solární pole zbytečně zabírají nejenom louky, ale především ornou půdu, na níž je poměrná zástavba z důvodu rovinatosti terénu největší. Podoba terénu a střech domů, na které by bylo možno solární panely umístit je dalším problémem pro jejich využitelnost. Například při použití fotovoltaických panelů na střeše domu je nutno postavit kompletní střešní systém, a až na něj je možno panely montovat, tyto pak mnohdy činí do výšky až 15 cm nad střešní krytinu. Finanční náklady jsou tedy vysoké, protože nevzniká úspora nepoužitím střešní krytiny.

Novinkou posledních dvou let jsou fotovoltaické fólie, které mají přibližně poloviční účinnost oproti klasickým panelům, avšak většina zmíněných problémů u nich nevzniká. Výška fólie je 4 mm, a proto dosahuje hmotnosti pouze 4 až 5 kg na m^2, fólie je hydroizolační, a proto se dá použít přímo jako střešní krytina. Výroba fólie je méně finančně nákladná, než výroba panelů a přibližně sedmkrát ekologičtější. Po současně vyráběných fóliích, se dá také chodit, avšak pouze při údržbě, tento problém bude jistě v krátkém časovém období vyřešen a bude umožněno pokládat fotovoltaické fólie i například na chodníky.

4.3.1 Fotovoltaická fólie Fatrasol

Fólie Fatrasol je složena z PV modulů, které jsou výsledkem spojení technologie tenkovrstvých flexibilních fotovoltaických laminátů, se střešním fóliovým systémem společnosti Fatra a.s.. Moduly jsou primárně určeny pro ploché a mírně šikmé střechy, se sklonem od 3° do 15°, maximálně 30°. Moduly produkují elektrickou energii i při částečném zastínění. Fólie je možno použít přímo jako střešní krytinu a při dodržení minimálního sklonu jsou fólie samočistící [18].

Následuje určení výkonu, který jsou schopny fotovoltaické fólie umístěné na střeše osobního vozu vytvořit. Uvažuje se osobní vůz typu Bmee, jehož délka je 26,4 m a šířka 2,825 m. Aby byl splněn maximální možný sklon střechy 30°, je použitelná šířka střechy asi 1,3 m. Tento rozměr splňuje fólie PV 288, která byla pro tuto aplikaci vybrána, zdroj hodnot [18]:

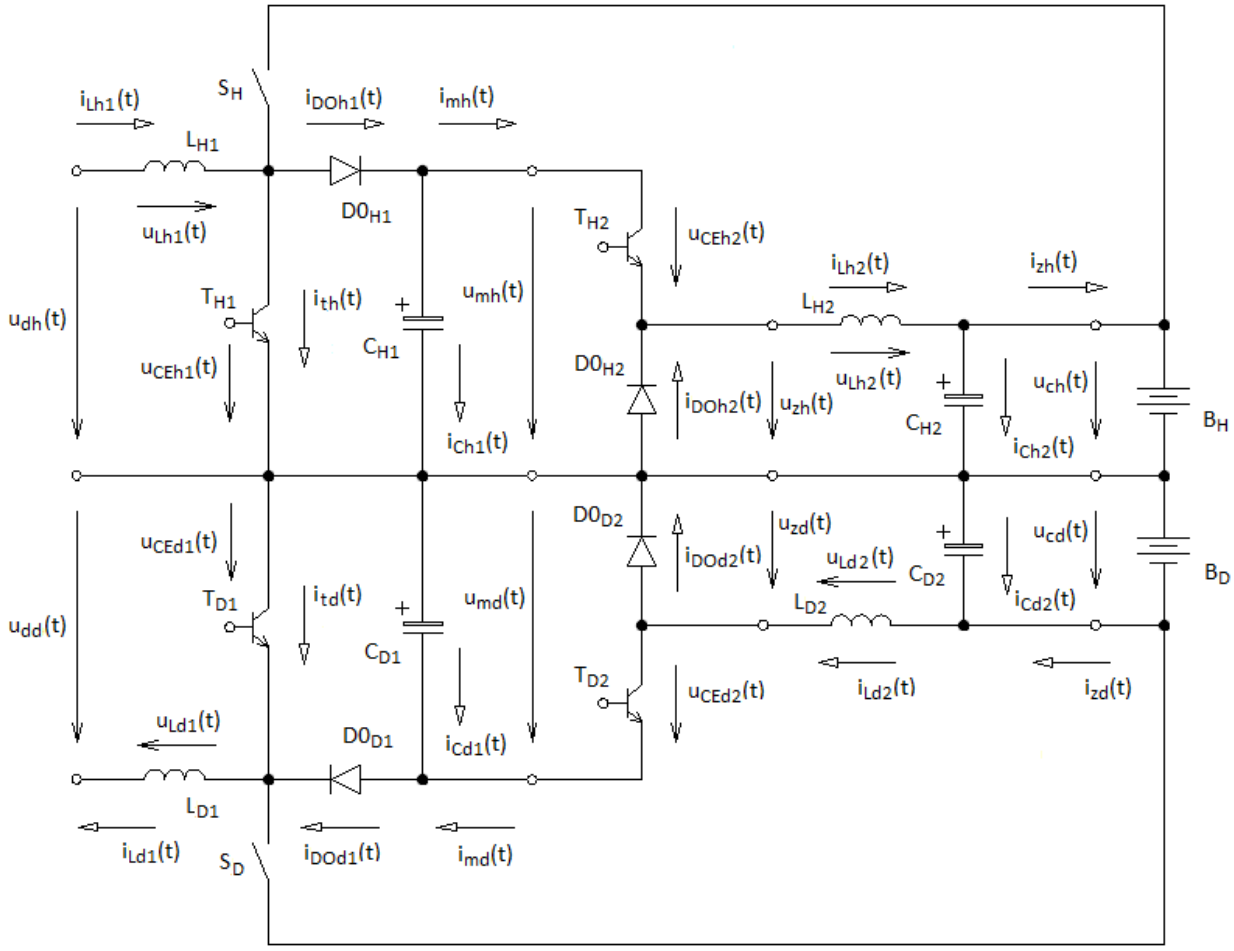
- délka fólie: 5,8 m,
- šířka: 1,075 m,
- tloušťka: 4 mm,
- moduly: 2 x Uni-Solar PVL 144 W, zapojení do série,
- hmotnost: 28,2 kg,
- poměrné zatížení: 4,53 kg/m^2,
- jmenovitý výkon P_{mp}: 288 W_p,
- provozní napětí V_{mp}: 62 V,
- provozní proud I_{mp}: 4,3 A,
- maximální napětí: 1000 V,
- 25 let záruka na minimálně 80 % jmenovitého výkonu P_{mp},
- odolnost proti zasažení proudem, tedy proudem z troleje a bleskem.

Z délky fólie a délky střechy vozu vyplývá použití čtyř fólií typu PV 288, celkový výkon tedy bude čtyřnásobkem výkonu jedné fólie, a to 1152 W při plném nasvětlení fólií.

Vytvořená energie by mohla být například akumulována do baterií, umístěných přímo ve voze a v nočních hodinách zabezpečovat osvětlení vozu, výkonu 1152 W odpovídá 192 LED svítilen o výkonu 6 W. Při použití na vozech s rovnými střechami nebo při možnosti montáže fólií na sklon až 90°, tedy vertikálně, by vzrostl jmenovitý výkon dvakrát až třikrát. Poté by se již vytvořená elektrická energie mohla přímo podílet například na pohonu klimatizace vozu.

5 NÁVRH NABÍJECÍHO MĚNIČE AKUMULÁTORŮ

Nabíjecí měnič jedné bateriové skupiny, se bude skládat ze čtyř typických a hojně používaných měničů, a to ze dvou měničů STEP-UP zvyšujících napětí a dvou měničů snižujících STEP-DOWN. Napětí je potřeba nejdříve měničem STEP-UP zvýšit na konstantní hodnotu 2200 V a poté snížit měničem STEP-DOWN na hodnotu, odvozenou od teploty bateriových článků. Obvodové zapojení celého měniče se nachází na *Obr. 19*. Výpočetní algoritmy a vzorce byly čerpány z literatury [19].



Obr. 19 : Nabíjecí měnič STEP-UP-DOWN.

Tento měnič bude zajišťovat regulaci napětí, potřebného pro nabíjení bateriových článků. Jejich nabíjecí napětí se pohybuje v rozsahu 1763 až 2025 V v závislosti na teplotě. Měnič je při výpočtu pro zjednodušení rozdělen do čtyř částí, počítány budou pouze dvě, a to horní měnič STEP-UP a STEP-DOWN.

5.1 Výpočet měniče STEP-DOWN

Jednokvadrantový pulsní měnič STEP-DOWN pracující v I. kvadrantu je použit v nabíjecím měniči dvakrát, a je realizován pomocí horního spínače, pro horní polovinu měniče a pomocí dolního spínače, pro dolní polovinu. Zátěž je realizována LC-filtrem, ke kterému je připojena polovina bateriové skupiny, druhá polovina pak k dolní polovině měniče.

Další teorie a postup výpočtu náleží již přímo hornímu měniči STEP-DOWN.

Na výstupních svorkách, tedy za LC-filtrem, produkuje měnič impulsní napětí $u_{ch}(t)$ o střední

hodnotě U_{ch} a vytéká z něj pilovitě zvlněný proud $i_{zh}(t)$ o střední hodnotě I_{zh}. Zvlnění tohoto proudu závisí na nerovnosti:

$$T < \frac{L}{R}, \qquad T = \frac{1}{f} \tag{82}$$

kde T, f jsou opakovací pracovní perioda a kmitočet měniče.

Obecně platí, že se zvyšující se pracovní frekvencí měniče a indukčností L, velikost zvlnění proudu klesá. Pokud měnič pracuje na kmitočtu 2 kHz až 20 kHz, bývá zvlnění velice malé a není nutno počítat s exponenciálními průběhy. Analýza měniče je v takovém případě velmi přesná i při nahrazení exponenciál šikmými přímkami. Budeme tedy předpokládat podmínku $R = 0$.

Střední hodnota vstupního napětí měniče STEP-DOWN U_{mh} je konstantní, a to 2200 V, zvlnění tohoto napětí by nemělo překročit hodnotu +/- 5 V. Výstupní napětí měniče je požadováno v rozmezí od 1763 V do 2025 V, dle teploty bateriových článků, tyto hodnoty byly vypočteny ze vztahů (83) a (84).

Doporučované nabíjecí napětí, jednoho bateriového článku je 1,45 V až 1,55 V při teplotě 20 °C, jako ideální, byla zvolena hodnota 1,5 V.

Teplotní kompenzace nabíjecího napětí, odpovídá hodnotě -3 mV/°C/článek.

Výpočet minimálního nabíjecího napětí, při teplotě 50 °C:

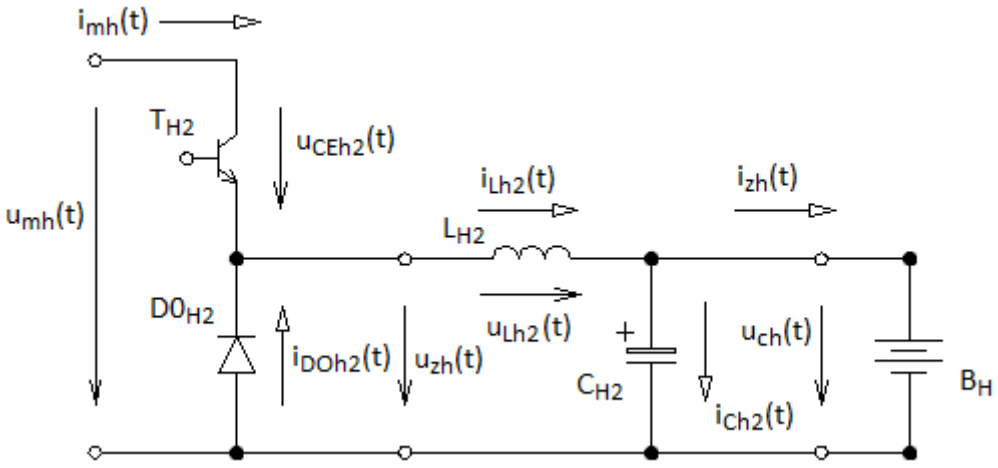
$$U_{n,\min} = \left(u_{n,cl} + \left(\vartheta_{20} - \vartheta_{50}\right) 3 \cdot 10^{-3}\right) \frac{x_{cl}}{2} = \left(1{,}5 + \left(20 - 50\right) \cdot 3 \cdot 10^{-3}\right) \cdot \frac{2500}{2} = \underline{\underline{1763\,\mathrm{V}}} \tag{83}$$

výpočet maximálního nabíjecího napětí, při teplotě -20 °C:

$$U_{n,\max} = \left(u_{n,cl} + \left(\vartheta_{20} - \vartheta_{-20}\right) 3 \cdot 10^{-3}\right) \frac{x_{cl}}{2} = \left(1{,}5 + \left(20 - \left(-20\right)\right) \cdot 3 \cdot 10^{-3}\right) \cdot \frac{2500}{2} = \underline{\underline{2025\,\mathrm{V}}} \tag{84}$$

vzorec pro výpočet nabíjecího napětí byl čerpán z literatury [17].

Na *Obr. 20* je vykreslen kompletní měnič STEP-DOWN, se zakreslenými proudy a napětími, který bude napětí 2200 V snižovat na hodnotu 2025 V až 1763 V.



Obr. 20 : Měnič STEP-DOWN s připojenou polovinou, jedné bateriové skupiny.

Zadání hodnot, pro výpočet ve stavu maximálního a minimálního výstupního napětí:

U_{mh} = 2200 V,
$U_{ch,max}$ = 2025 V,
$U_{ch,min}$ = 1763 V,
I_{zh} = 5 A,
ΔI = 0,5 A,
ΔU = 0,4 V,
f = 10 kHz.

Nejprve určíme poměrnou dobu zapnutí tranzistoru, tedy střídu s:

$$s = \frac{t_z}{T} \tag{85}$$

střída s, může dosahovat pouze hodnot 0 až 1.

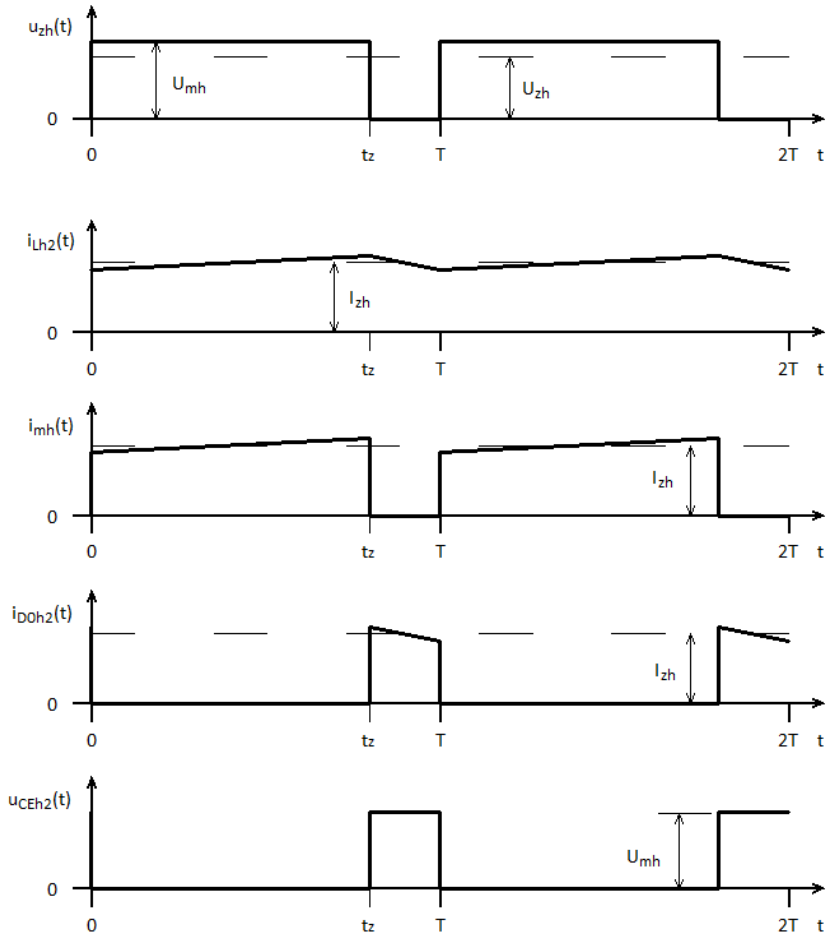
Význam obou časů je zřejmý z *Obr. 21*. Z něj vidíme, že střední hodnota U_{zh} výstupního napětí měniče má velikost:

$$U_{zh} = U_{mh}\ s \tag{86}$$

protože v ustáleném stavu, musí být střední hodnota napětí na indukčnosti rovna nule, tedy $U_{Lstř}$ = 0, můžeme rovnici zatěžovací charakteristiky v režimu spojitých proudů zapsat ve tvaru:

$$U_{ch} = U_{mh}\ s - R\ I_{zh} \tag{87}$$

kde střída s, je parametrem. Vidíme, že se jedná o rovnici šikmé přímky. Regulační schopnost měniče je určena změnou střídy.



Obr. 21 : Průběhy napětí a proudů v měniči STEP-DOWN pro případ R = 0, s = 0,8014.

Z rovnice (87) můžeme za podmínky $R = 0$ odvodit vztah pro výpočet střídy.
Výpočet střídy je proveden pro maximální a minimální výstupní napětí měniče $U_{ch,max}$ a $U_{ch,min}$:

$$s_{\max} = \frac{U_{ch,\max}}{U_{mh}} = \frac{2025}{2200} = \underline{\underline{0{,}9205}} \tag{88}$$

$$s_{\min} = \frac{U_{ch,\min}}{U_{mh}} = \frac{1763}{2200} = \underline{\underline{0{,}8014}}\,. \tag{89}$$

5.1.1 Výpočet indukčnosti tlumivky

Zavedením zjednodušující podmínky $R = 0$, získáme linearizaci průběhu pilovitě zvlněného proudu podle *Obr. 21*.
Z rovnice (87) lze prokázat, že při této zjednodušující podmínce $R = 0$ platí:

$$U_{ch} = U_{zh} = U_{mh}\ s \tag{90}$$

při zapnutí tranzistoru je podle *Obr. 20* tlumivka L_{H2} připojena přímo k napěťovým zdrojům U_{mh} a U_{ch}, jejichž napětí se odečítají. Na základě toho lze psát:

$$\left|\frac{di_{zh}(t)}{dt}\right| = \frac{2\ \Delta I}{T\ s} = \frac{U_{mh} - U_{ch}}{L_{H2}} \tag{91}$$

při vypnutí tranzistoru vede celý proud zátěže nulová dioda, na které vzniká napěťový úbytek. Na indukčnosti L_{H2}, se proto objeví napětí U_{ch}, platí tedy:

$$\left|\frac{di_{zh}(t)}{dt}\right| = \frac{2\ \Delta I}{T\ (1-s)} = \frac{U_{ch}}{L_{H2}} \tag{92}$$

pak lze z rovnic (92) a (90) vytvořit rovnici, pro výpočet zvlnění proudu:

$$\Delta I = \frac{U_{mh}}{2\ f\ L_{H2}}\ (1-s)\ s \tag{93}$$

kde f je pracovní kmitočet měniče.
Ze vzorce (93) lze vyjádřit indukčnost tlumivky L_{H2}:

$$L_{H2} = \frac{U_{mh}\ (1-s)\ s}{2\ f\ \Delta I} \tag{94}$$

výpočet indukčnosti tlumivky, při maximální a minimální střídě:

$$L_{H2,\max} = \frac{U_{mh}\ (1-s_{\max})\ s_{\max}}{2\ f\ \Delta I} = \frac{2200\cdot(1-0{,}9205)\cdot 0{,}9205}{2\cdot 1\cdot 10^4\cdot 0{,}5} = \underline{\underline{16{,}1\,\mathrm{mH}}} \tag{95}$$

$$L_{H2,\min} = \frac{U_{mh}\ (1-s_{\min})\ s_{\min}}{2\ f\ \Delta I} = \frac{2200\cdot(1-0{,}8014)\cdot 0{,}8014}{2\cdot 1\cdot 10^4\cdot 0{,}5} = \underline{\underline{35{,}01\,\mathrm{mH}}} \tag{96}$$

pro další výpočty bude uvažována tlumivka o indukčnosti 35,01 mH a střída 0,8014.

5.1.2 Výpočet kapacity LC-filtru

Velikost kapacity není nijak kritická, teoreticky by mohla být i nulová, protože tlumivka L_{H2} v součinnosti s vnitřním odporem baterie, tvoří dolní propust 1. řádu. Přidáním kondenzátoru pouze zlepšíme kvalitu filtrace. Podle Thomsonova vztahu musíme zkontrolovat, zda vlastní rezonanční kmitočet filtru, neleží v blízkosti pracovního kmitočtu měniče (vznik rezonance):

$$\frac{1}{4\ \pi^2\ f^2\ L} << C\,. \tag{97}$$

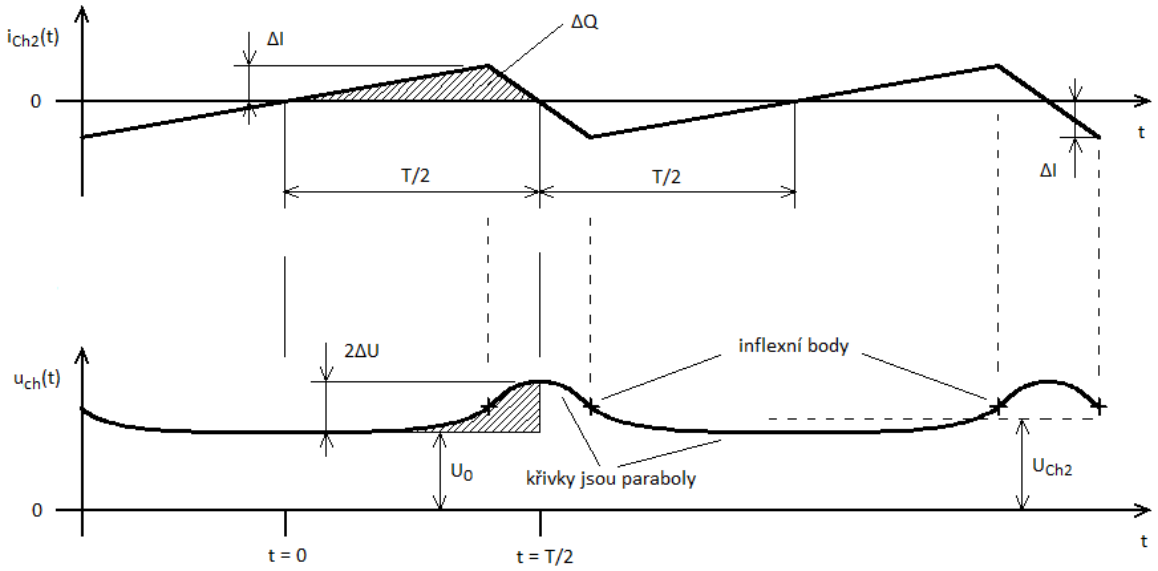
Bude použit výkonový impulsní elektrolytický kondenzátor, který má malý parazitní sériový odpor. Nevýhodou však je, že má vlastní parazitní sériovou indukčnost, tu potlačíme paralelním propojením s kvalitním bezindukčním impulsním elektrolytickým kondenzátorem, nejlépe polypropylénovým o kapacitě 100 nF až 1 μF, podle výstupního proudu.

Jedním z nejdůležitějších parametrů, pro výpočet kapacity kondenzátoru je zvlnění výstupního napětí. Řešení je velmi přesné za předpokladu, že zvlnění ΔU, případně $2\ \Delta U$ na kondenzátoru je daleko menší, než střední hodnota napětí na kondenzátoru U_{ch}:

$$2\ \Delta U << U_{ch} \tag{98}$$

Platí zde 1. Kirchhoffův zákon ve tvaru:

$$i_{Ch2}(t) = i_{Lh2}(t) - I_{zh}\ . \tag{99}$$



Obr. 22 : Graf průběhu proudu a nepětí na kondenzátoru, k výpočtu kondenzátoru LC-filtru.

Z fyzikálního pohledu plyne, že v ustáleném stavu je střední hodnota kapacitního proudu $I_{Cstř} = 0$. Pak na *Obr. 22* vidíme, podle rovnice (99), jaký časový průběh má kapacitní proud kondenzátoru $i_{Ch2}(t)$. Vzhledem k nerovnici (98) je zatěžovací proud I_{zh} tekoucí do baterie zcela konstantní, kondenzátor tedy podle rovnice (99) musí pohlcovat zvlnění proudu tekoucího indukčností L_{H2}. Podle *Obr. 22*, pak při zvoleném počátečním okamžiku $t = 0$, pro napětí kondenzátoru platí:

$$u_{ch}(t) = U_0 + \frac{1}{C_{H2}} \int i_{Ch2}(t)dt \tag{100}$$

integrováním šikmých přímek průběhu $i_{Ch2}(t)$ vzniknou paraboly, které na sebe plynule navazují v inflexních bodech. Derivace zleva a zprava v inflexních bodech jsou si rovny, protože lomené přímky na sebe spojitě navazují.

Přírůstek náboje ΔQ z *Obr. 22* má velikost:

$$\Delta Q = \frac{1}{4}\ \Delta I\ T \tag{101}$$

z toho můžeme derivací určit vzorec, pro výpočet kapacity kondenzátoru C_{H2}:

$$C_{H2} = \frac{dQ}{dU} = \frac{\Delta Q}{2\ \Delta U} = \frac{\Delta I\ T}{8\ \Delta U} = \frac{\Delta I}{8\ f\ \Delta U} \tag{102}$$

s použitím rovnice (93) lze psát:

$$C_{H2} = \frac{U_{mh}\,(1-s)\,s}{16\,f^2\,L_{H2}\,\Delta U} = \frac{2200\cdot(1-0{,}8014)\cdot 0{,}8014}{16\cdot(1\cdot 10^4)^2\cdot 35{,}01\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}4} = \underline{\underline{15{,}63\,\mu\text{F}}} \tag{103}$$

výpočet rezonančního kmitočtu LC-filtru:

$$f_0 = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{L_{H2}\,C_{H2}}} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot\sqrt{35{,}01\cdot 10^{-3}\cdot 15{,}63\cdot 10^{-6}}} = \underline{\underline{215{,}2\,\text{Hz}}} \tag{104}$$

rezonanční kmitočet LC-filtru je tedy dostatečně menší, než pracovní kmitočet měniče.
Kontrola zamezení rezonance pomocí Thomsonova vztahu:

$$\frac{1}{4\,\pi^2\,f^2\,L_{H2}} << C_{H2} \Rightarrow \frac{1}{4\cdot\pi^2\cdot(1\cdot 10^4)^2\cdot 35{,}01\cdot 10^{-3}} << 15{,}63\cdot 10^{-6}$$
$$\underline{\underline{7{,}235\cdot 10^{-9} << 15{,}63\cdot 10^{-6}\ \text{F}}} \tag{105}$$

podmínka zamezení rezonance je tedy splněna a ověřena dvěma nezávislými výpočty.

5.1.3 Napěťové a proudové dimenzování polovodičů

Z *Obr. 21* plyne, že tranzistor ve vypnutém stavu a nulová dioda v závěrném směru jsou namáhány vstupním napětím měniče U_{mh}. V ideálním případě je tedy pracovní napětí obou součástek rovno U_{mh}.
Napěťové dimenzování tranzistoru a diody:

$$U_{CE,\max} = U_{mh} = \underline{\underline{2200\,\text{V}}} \tag{106}$$

$$U_{D0,\max} = U_{mh} = \underline{\underline{2200\,\text{V}}} \tag{107}$$

na obou prvcích, vzniká přídavný přepěťový impuls v průběhu jejich vypínání, se kterým je třeba počítat při soupisu potřebných součástek, tato dynamická přepětí dosahují hodnot řádově 10 až 20 % U_{mh}. Vzhledem k tomu, že střední hodnota napětí U_{mh} bude konstantní, můžeme oba prvky dimenzovat na závěrné napětí přibližně 1,3 U_{mh}.

Při proudovém dimenzování zanedbáváme, mimo maximální hodnoty, pilovité zvlnění proudu, pak lze z *Obr. 21* určit špičkovou, střední a efektivní hodnotu proudů, tekoucích oběma součástkami.
Výpočet proudů, tekoucích tranzistorem:

$$I_{mh,\max} = I_{zh} + \Delta I = 5 + 0{,}5 = \underline{\underline{5{,}5\,\text{A}}} \tag{108}$$

$$I_{mh,stř} = I_{zh}\ s_{\max} = 5\cdot 0{,}9205 = \underline{\underline{4{,}603\,\text{A}}} \tag{109}$$

$$I_{mh,ef} = I_{zh}\ \sqrt{s_{\max}} = 5\cdot\sqrt{0{,}9205} = \underline{\underline{4{,}797\,\text{A}}} \tag{110}$$

výpočet proudů, tekoucích diodou:

$$I_{D0h2,\max} = I_{zh} + \Delta I = 5 + 0{,}5 = \underline{\underline{5{,}5\,\text{A}}} \tag{111}$$

$$I_{D0h2,stř} = I_{zh}\ (1 - s_{\min}) = 5\cdot(1-0{,}8014) = \underline{\underline{0{,}993\,\text{A}}} \tag{112}$$

$$I_{D0h2,ef} = I_{zh}\ \sqrt{1-s_{\min}} = 5\cdot\sqrt{1-0{,}8014} = \underline{\underline{2{,}228\,\text{A}}} \tag{113}$$

z vypočtených hodnot střídy a proudů vyplývá, že při provozu měniče bude třeba chladit především tranzistor, který bude v jakémkoliv stavu navrženého provozu hřát více, než nulová dioda. Nad hodnotu $I_{mh,max}$ nesmí být tranzistor ani krátkodobě špičkově přetěžován.

Proudové dimenzování kondenzátoru:

$$I_{Ch2,\max} = \frac{\Delta I}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}5}{\sqrt{3}} = \underline{\underline{0{,}2887\,\mathrm{A}}}\,. \tag{114}$$

5.2 Výpočet měniče STEP-UP

Měnič STEP-UP, tedy měnič zvyšující napětí, pracující ve II. kvadrantu je v nabíjecím měniči použit dvakrát, každý pro jednu polovinu bateriové skupiny.

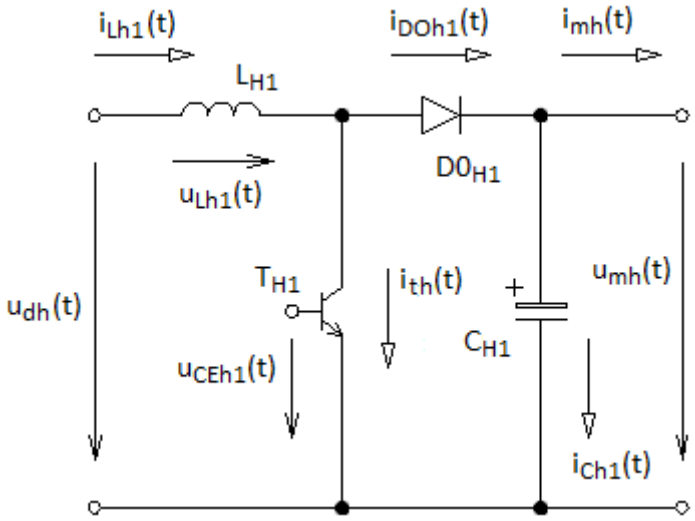
Při působení měniče je energie čerpána ze zdroje U_{dh} v době zapnutí tranzistoru T_{H1} a současně akumulována v tlumivce L_{H1}. V době vypnutí tranzistoru je energie tlumivky předávána přes diodu $D0_{H1}$ do kondenzátoru C_{H1}, tedy do zátěže paralelně k němu připojené.

Zavedeme zjednodušující podmínky $L_{H1} \to \infty$, $C_{H1} \to \infty$, tedy vlastní rezonanční kmitočet LC-obvodu leží hluboko pod pracovním přepínacím kmitočtem tranzistoru.

Měnič STEP-UP pracuje pouze v režimu zvyšování napětí:

$$U_{mh} \geq U_{dh} \tag{115}$$

při nedodržení nerovnosti by proud $i_{Lh1}(t)$ tlumivky neomezeně rostl do nekonečna, a to bez ohledu na střídu spínání tranzistoru.



Obr. 23 : Měnič STEP-UP.

Podle *Obr. 23* platí při zapnutí tranzistoru:

$$u_{Lh1}(t) = U_{dh} \tag{116}$$

při vypnutí tranzistoru potom:

$$u_{Lh1}(t) = U_{dh} - U_{mh} \tag{117}$$

protože střední hodnota napětí na tlumivce $U_{Lstř}$ musí být v ustáleném stavu nulová, můžeme podle *Obr. 24* psát:

$$U_{LH1stř} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{Lh1}(t)dt = \frac{1}{T}\left[U_{dh}\ t_z - (U_{mh} - U_{dh})\ (T - t_z)\right] \overset{!}{=} 0 \tag{118}$$

s uvažováním střídy z intervalu 0 až 1:

$$s = \frac{t_z}{T} \tag{119}$$

lze rovnici (119) přepsat na:

$$U_{mh} = U_{dh}\frac{1}{1-s} \tag{120}$$

pro $s \rightarrow 1$ roste výstupní napětí nade všechny meze. Tímto napětím jsou namáhány oba polovodičové prvky.

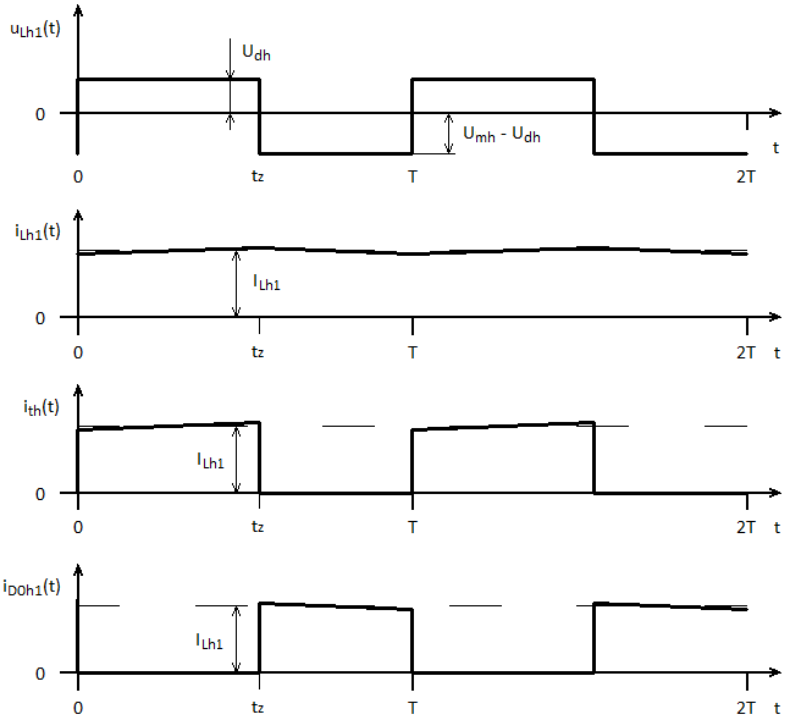
Zadání hodnot, pro výpočet při maximálním a minimálním vstupním napětí:

$U_{dh,max}$ = 2100 V,
$U_{dh,min}$ = 1000 V,
U_{mh} = 2200 V,
I_{mh} = 4,603 A,
ΔI = 0,5 A,
ΔU = 5 V,
f = 10 kHz.

Ze vzorce (121) můžeme odvodit vztahy pro výpočet střídy s, při napájecím napětí $U_{dh,max}$, $U_{dh,min}$:

$$s_{\max} = 1 - \frac{U_{dh,\max}}{U_{mh}} = 1 - \frac{2100}{2200} = \underline{\underline{0{,}0455}} \tag{121}$$

$$s_{\min} = 1 - \frac{U_{dh,\min}}{U_{mh}} = 1 - \frac{1000}{2200} = \underline{\underline{0{,}5455}}\,. \tag{122}$$



Obr. 24 : Průběhy napětí a proudů v měniči STEP-UP pro případ s = 0,5455.

5.2.1 Dimenzování tlumivky a kondenzátoru

Vztah pro výpočet tlumivky můžeme odvodit z *Obr. 24* z průběhu $i_{Lh1}(t)$, zde při zapínacím ději:

$$\frac{di_{Lh1}(t)}{dt} = \frac{2\,\Delta I}{t_z} = \frac{U_{dh}}{L_{H1}} \quad \text{dosadíme za } t_z\text{:} \quad \frac{2\,\Delta I}{T\,s} = \frac{U_{dh}}{L_{H1}} \tag{123}$$

nyní vyjádříme indukčnost tlumivky L_{H1}:

$$L_{H1} = \frac{U_{dh}\ T\ s}{2\ \Delta I} = \frac{U_{dh}\ s}{2\ f\ \Delta I} \tag{124}$$

pomocí vztahu (125) můžeme vypočítat indukčnost tlumivky L_{H1}, při maximálním a minimálním vstupním napětí:

$$L_{H1,\max} = \frac{U_{dh,\max}\ s_{\max}}{2\ f\ \Delta I} = \frac{2100 \cdot 0{,}0455}{2 \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 0{,}5} = \underline{\underline{9{,}555\,\text{mH}}} \tag{125}$$

$$L_{H1,\min} = \frac{U_{dh,\min}\ s_{\min}}{2\ f\ \Delta I} = \frac{1000 \cdot 0{,}5455}{2 \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 0{,}5} = \underline{\underline{54{,}55\,\text{mH}}} \tag{126}$$

pro další výpočty budeme uvažovat tlumivku o indukčnosti 54,55 mH a střídu 0,5455.

Pro výpočet kapacity kondenzátoru, potřebujeme nejdříve zjistit střední hodnotu proudu protékajícího tlumivkou I_{Lh1}. Tento proud tvoří horní hranici obálek idealizovaných průběhů proudů, kdy $L_{H1} \to \infty$, tekoucích tranzistorem i nulovou diodou, a tedy i kondenzátorem.
Výpočet střední hodnoty proudu I_{Lh1}, procházejícího tlumivkou:

$$I_{Lh1} = \frac{I_{mh}}{1-s} = \frac{4{,}603}{1-0{,}5455} = \underline{\underline{10{,}13\,\text{A}}} \tag{127}$$

pro napětí na kondenzátoru C_{H1} platí:

$$U_{poč} = U_{mh} - \Delta U \tag{128}$$

$$U_{konc} = U_{mh} + \Delta U \tag{129}$$

kapacitu kondenzátoru určíme poté následovně:

$$C = \frac{dQ}{dU} = \frac{\Delta Q}{2\ \Delta U} = \frac{I_{Lh1}\ (1-s)\ T}{2\ \Delta U} = \frac{I_{Lh1}\ (1-s)}{2\ \Delta U\ f} \tag{130}$$

výpočet kapacity kondenzátoru C_{H1}:

$$C_{H1} = \frac{I_{Lh1}\ (1-s)}{2\ \Delta U\ f} = \frac{10{,}13 \cdot (1-0{,}5455)}{2 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 10^4} = \underline{\underline{46{,}04\,\mu\text{F}}}\ . \tag{131}$$

5.2.2 Napěťové a proudové dimenzování polovodičů

Napěťově jsou oba prvky namáhány výstupním napětím měniče, podle rovnice (120), tedy napětím vyšším, než je vstupní napětí měniče U_{dh}.

Na obou prvcích vzniká přídavný přepěťový impuls v průběhu jejich vypínání, tedy při zániku proudu tekoucího tranzistorem nebo nulovou diodou. Vzhledem k tomu, že prvky spínají relativně malé proudy, budou při soupisu součástek napěťově předimenzovány na dostačující hodnotu minimálně 1,3 U_{mh}.
Napěťové dimenzování tranzistoru a nulové diody:

$$U_{CE,\max} = U_{mh} = \underline{\underline{2200\,\text{V}}} \tag{132}$$

$$U_{D0,\max} = U_{mh} = \underline{\underline{2200\,\text{V}}} \tag{133}$$

při proudovém dimenzování zanedbáme, mimo maximální hodnoty, pilovitě zvlněný proud, podle *Obr. 24* lze pak určit špičkovou, střední a efektivní hodnotu proudů tekoucích oběma součástkami.

Výpočet proudů, tekoucích tranzistorem:

$$I_{th,\max} = I_{Lh1} + \Delta I = 10{,}13 + 0{,}5 = \underline{\underline{10{,}63\,\text{A}}} \tag{134}$$

$$I_{th,stř} = I_{Lh1}\ s = 10{,}13 \cdot 0{,}5455 = \underline{\underline{5{,}526\,\text{A}}} \tag{135}$$

$$I_{th,ef} = I_{Lh1}\ \sqrt{s} = 10{,}13 \cdot \sqrt{0{,}5455} = \underline{\underline{7{,}482\,\text{A}}} \tag{136}$$

výpočet proudů, tekoucích diodou:

$$I_{D0h1,\max} = I_{Lh1} + \Delta I = 10{,}13 + 0{,}5 = \underline{\underline{10{,}63\,\text{A}}} \tag{137}$$

$$I_{D0h1,stř} = I_{Lh1}\ (1-s) = 10{,}13 \cdot (1 - 0{,}5455) = \underline{\underline{4{,}604\,\text{A}}} \tag{138}$$

$$I_{D0h1,ef} = I_{Lh1}\ \sqrt{1-s} = 10{,}13 \cdot \sqrt{1 - 0{,}5455} = \underline{\underline{6{,}829\,\text{A}}} \tag{139}$$

z vypočtených hodnot střídy a proudů vyplývá, že při provozu měniče bude třeba chladit především nulovou diodu.

Pro činný výkon na vstupu a výstupu měniče platí tyto vztahy:

$$P_{dh} = U_{dh}\ I_{Lh1} \qquad P_{mh} = U_{mh}\ I_{D0h1,stř} \qquad P_{dh} = P_{mh} \tag{140}$$

kde $I_{Lh1} = I_{dh}$, $I_{D0stř} = I_{mh}$, jsou střední hodnoty proudu tlumivky a nulové diody.

Proudové dimenzování kondenzátoru, se odvíjí od středního proudu cívky.

Výpočet maximálního proudu tekoucího kondenzátorem C_{H1}, jehož hodnota je shodná s maximálním proudem tlumivky, tranzistoru a maximálním vstupním proudem měniče:

$$I_{Ch1,\max} = I_{Lh1} + \Delta I = 10{,}13 + 0{,}5 = \underline{\underline{10{,}63\,\text{A}}}\ . \tag{141}$$

5.3 Parametry součástek nabíjecího měniče

Součástky měniče je třeba napěťově a proudově předimenzovat, a to asi o 30 %. Výjimkami jsou tranzistory a diody, které nejsou při potřebném závěrném napětí k sehnání, při nižším kolektorovém proudu než 200 A.

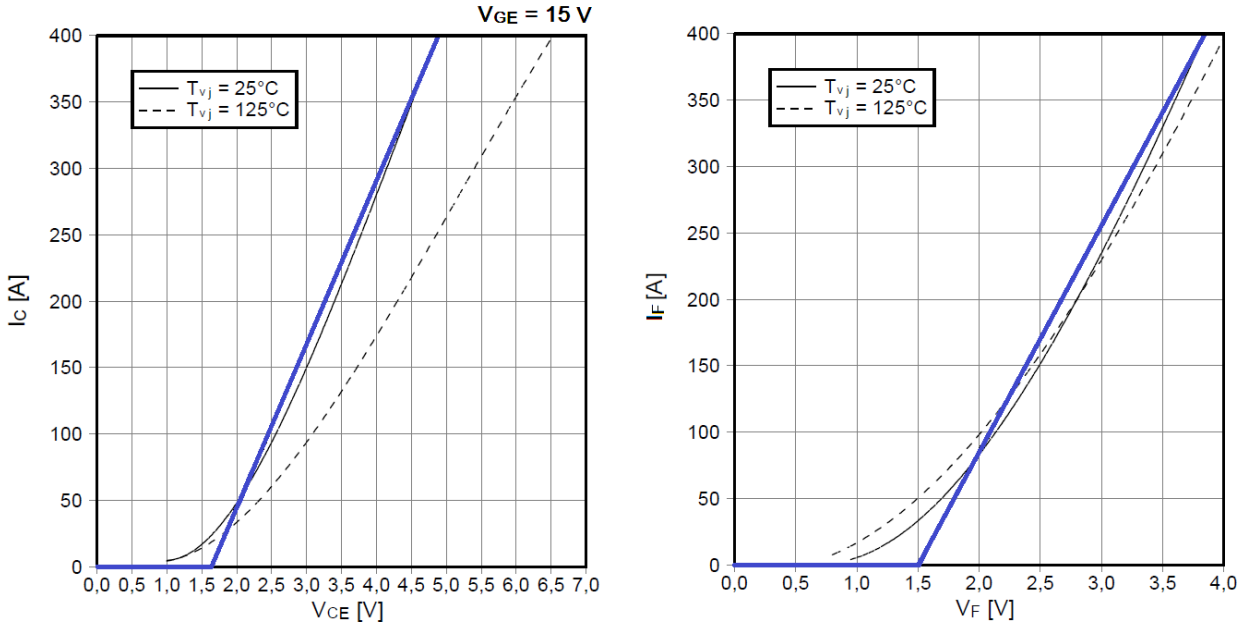
Měnič	Prvek	Základní, minimální parametry	Označení	Základní atributy
STEP-DOWN	Tranzistor	$I_{C,max}$ = 5,5 A; $U_{CE,max}$ = 2200 V	FF200R33KF2C	I_C = 200 A; U_{CES} = 3300 V
	Dioda	$I_{DO,max}$ = 5,5 A; $U_{DO,max}$ = 2200 V	DD200S33K2C	I_F = 200 A; U_{RRM} = 3300 V
	Tlumivka	L_{H2} = 35,01 mH; $I_{Lh2,max}$ = 5,5 A	-	-
	Kondenzátor	C_{H2} = 15,63 μF; $I_{CH2,max}$ = 0,2887 A	-	-
STEP-UP	Tranzistor	$I_{C,max}$ = 10,63 A; $U_{CE,max}$ = 2200 V	FF200R33KF2C	I_C = 200 A; U_{CES} = 3300 V
	Dioda	$I_{DO,max}$ = 10,63 A; $U_{DO,max}$ = 2200 V	DD200S33K2C	I_F = 200 A; U_{RRM} = 3300 V
	Tlumivka	L_{H1} = 54,55 mH; $I_{Lh1,max}$ = 10,63 A	-	-
	Kondenzátor	C_{H1} = 46,04 μF; $I_{CH1,max}$ = 10,63 A	-	-

Tab. 1 : Parametry součástek měniče STEP-DOWN a STEP-UP.

5.4 Výpočet účinnosti nabíjecího měniče

5.4.1 Výpočet účinnosti měniče STEP-DOWN

K určení účinnosti měniče, musíme nejprve vypočítat ztrátový výkon, vznikající v tranzistoru důsledkem vedení proudu a přepínací ztrátový výkon tranzistoru a nulové diody.



Obr. 25 : Vlevo výstupní charakteristika IGBT tranzistoru FF200R33KF2C, použitého v obou měničích, vpravo charakteristika $I_F = f(V_F)$ diody DD200S33K2C, použité v obou měničích. Proloženo tzv. lomenými přímkami [20], [21].

Z grafu, bylo pomocí proložení určeno prahové napětí tranzistoru, o hodnotě 1,65 V. Dále je třeba dopočítat odpor tranzistoru v sepnutém stavu $R_{d,t}$:

$$R_{d,t} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{4{,}85 - 1{,}65}{400 - 0} = \underline{\underline{8\,\mathrm{m\Omega}}} \tag{142}$$

nyní je možno vypočítat ztráty, vznikající průchodem proudu tranzistorem.
Výpočet ztrát vedením, způsobených průchodem proudu tranzistorem:

$$P_{ved,t} = U_{p,t}\ I_{mh,stř} + R_{d,t}\ I_{mh,ef}{}^2 = 1{,}65 \cdot 4{,}603 + 8 \cdot 10^{-3} \cdot 4{,}797^2 = \underline{\underline{7{,}779\,\mathrm{W}}} \tag{143}$$

z druhého grafu, bylo dále pomocí proložení, určeno prahové napětí diody o hodnotě 1,5 V. Nyní je třeba dopočítat odpor diody v sepnutém stavu $R_{d,D0}$:

$$R_{d,D0} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \frac{3{,}8 - 1{,}5}{400 - 0} = \underline{\underline{5{,}75\,\mathrm{m\Omega}}} \tag{144}$$

výpočet ztrát vedením, způsobených průchodem proudu nulovou diodou:

$$P_{ved,D0} = U_{p,D0}\ I_{D0h2,stř} + R_{d,D0}\ I_{D0h2,ef}{}^2 = 1{,}5 \cdot 0{,}993 + 5{,}75 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}228^2 = \underline{\underline{1{,}518\,\mathrm{W}}} \tag{145}$$

dále je třeba vypočítat hodnotu ztrát, vznikajících při přepínání tranzistoru [22].

Výpočet přepínacích ztrát tranzistoru, zapínací a vypínací časy jsou uvedeny v literatuře [20]:

$$P_{pr} = \frac{1}{T}(W_{on} + W_{off}) = f\left(\frac{1}{4} U_{mh}\ I_{zh}\ (t_{on} + t_{off})\right) = \\ = 1 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 2200 \cdot 5 \cdot (0{,}28 + 1{,}55) \cdot 10^{-6}\right) = \underline{\underline{50{,}33\,\mathrm{W}}} \tag{146}$$

výpočet celkové účinnosti měniče STEP-DOWN:

$$\eta_{SD} = \frac{P_z}{P_d} = \frac{U_{ch,\min}\ I_{zh}}{U_{ch,\min}\ I_{zh} + P_{ved,t} + P_{ved,D0} + P_{pr}} = \frac{1763 \cdot 5}{1763 \cdot 5 + 7{,}779 + 1{,}518 + 50{,}33} = \\ = 0{,}9933 = \underline{\underline{99{,}33\,\%}}\ . \tag{147}$$

5.4.2 Výpočet účinnosti měniče STEP-UP

Výpočet ztrát vedením, způsobených průchodem proudu tranzistorem:

$$P_{ved,t} = U_{p,t}\ I_{th,stř} + R_{d,t}\ I_{th,ef}^{\ 2} = 1{,}65 \cdot 5{,}526 + 8 \cdot 10^{-3} \cdot 7{,}482^2 = \underline{\underline{9{,}566\,\mathrm{W}}} \tag{148}$$

výpočet ztrát vedením, způsobených průchodem proudu nulovou diodou:

$$P_{ved,D0} = U_{p,D0}\ I_{D0h1,stř} + R_{d,D0}\ I_{D0h1,ef}^{\ 2} = 1{,}5 \cdot 4{,}604 + 5{,}75 \cdot 10^{-3} \cdot 6{,}829^2 = \underline{\underline{7{,}174\,\mathrm{W}}} \tag{149}$$

nyní je třeba vypočítat hodnotu ztrát, vznikajících při přepínání tranzistoru.
Výpočet přepínacích ztrát tranzistoru:

$$P_{pr} = \frac{1}{T}(W_{on} + W_{off}) = f\left(\frac{1}{4} U_{dh,\min}\ I_{mh}\ (t_{on} + t_{off})\right) = \\ = 1 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 1000 \cdot 4{,}603 \cdot (0{,}28 + 1{,}55) \cdot 10^{-6}\right) = \underline{\underline{21{,}06\,\mathrm{W}}} \tag{150}$$

výpočet celkové účinnosti měniče STEP-UP:

$$\eta_{SU} = \frac{P_z}{P_d} = \frac{U_{mh}\ I_{mh}}{U_{mh}\ I_{mh} + P_{ved,t} + P_{ved,D0} + P_{pr}} = \frac{2200 \cdot 4{,}603}{2200 \cdot 4{,}603 + 9{,}566 + 7{,}174 + 21{,}06} = \\ = 0{,}9963 = \underline{\underline{99{,}63\,\%}}\ . \tag{151}$$

5.4.3 Výpočet účinnosti měniče STEP-UP-DOWN

Výpočet celkové účinnosti nabíjecího měniče akumulátorů STEP-UP-DOWN:

$$\eta_{SUD} = \eta_{SD}\ \eta_{SU} = 0{,}9933 \cdot 0{,}9963 = 0{,}9896 = \underline{\underline{98{,}96\,\%}} \tag{152}$$

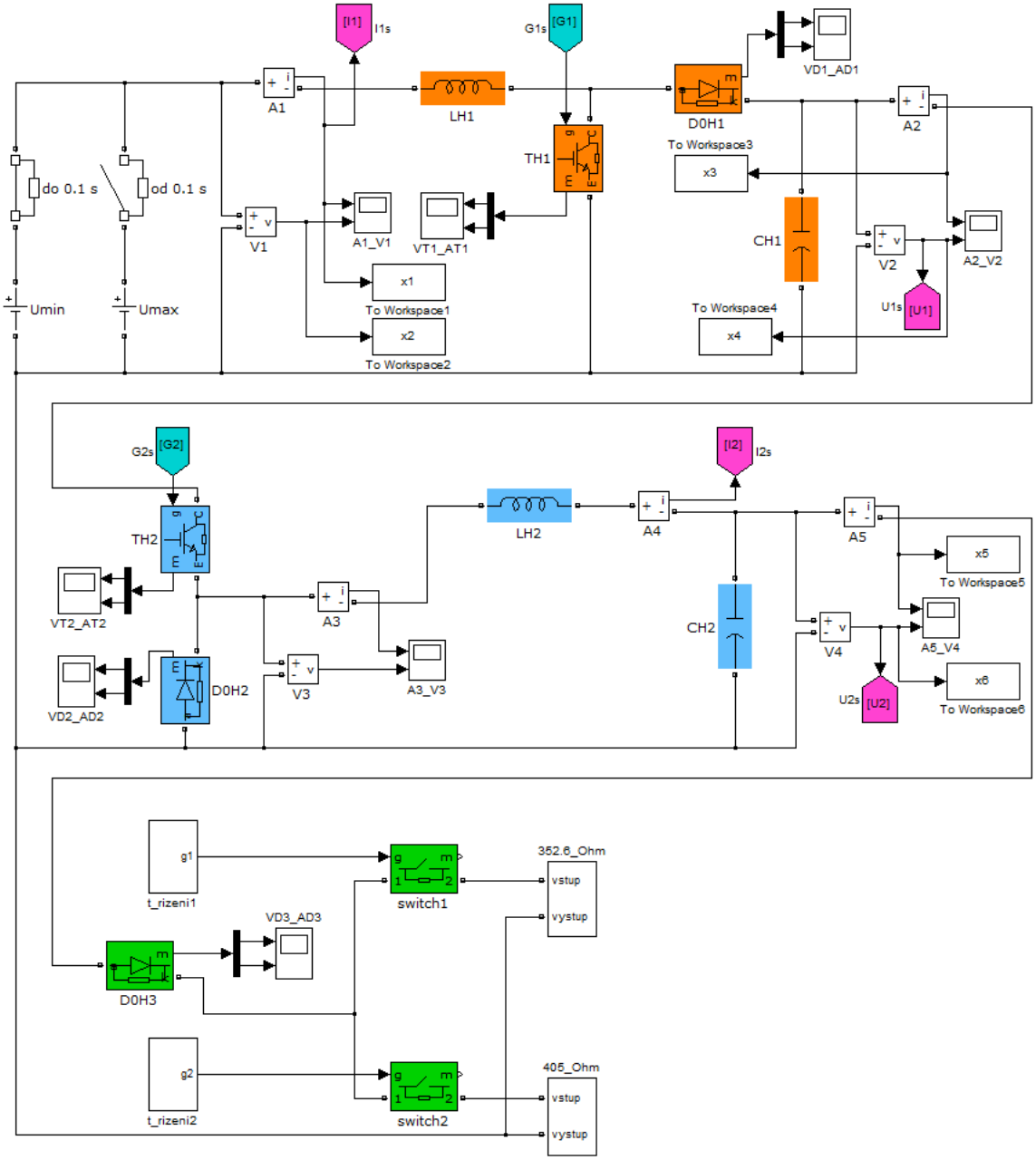
vypočtená účinnost měniče, vypovídá o kvalitě použité regulace, pomocí IGBT tranzistorů. Účinnost měniče dosahuje hodnoty jen o málo nižší, než 99 %, a to pouze z důvodu zařazení dvou měničů do kaskády.

6 MATEMATICKÝ MODEL NABÍJECÍHO MĚNIČE

Matematický model měniče STEP-UP-DOWN je vytvořen v prostředí Matlab Simulink pomocí knihovny SimPowerSystem, která obsahuje silové části měniče a knihovny Simulink pomocí které je vytvořeno řízení měniče a měření hodnot pro řízení.

6.1 Model silové části nabíjecího měniče

Silová část nabíjecího měniče je znázorněna na *Obr. 26*, měnič je opticky rozčleněn do tří řádků, v prvním se nachází měnič STEP-UP a přepínatelný zdroj napětí, který v čase 0,1 s vytváří nejhorší možný skok napětí za provozu měniče, a to z minimální hodnoty napětí meziobvodu trakčního měniče na maximální, tedy z 1000 V na 2100 V. Druhý řádek obsahuje měnič STEP-DOWN, který snižuje napětí meziobvodu nabíjecího měniče na hodnotu 2025 V až 1763 V. V posledním řádku je vytvořena přepínatelná zátěž měniče, skrze řízené ideální spínače.

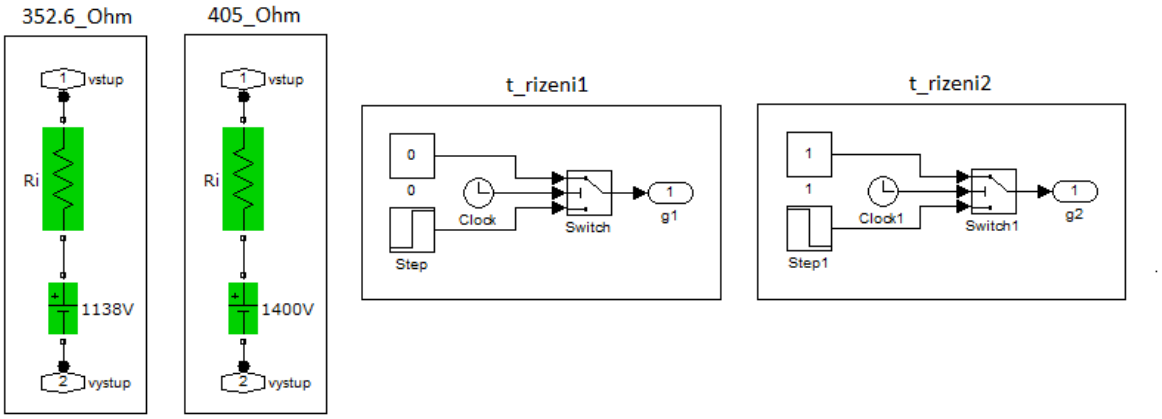


Obr. 26 : Model silové části měniče STEP-UP-DOWN v prostředí Matlab Simulink.

V měniči STEP-UP je provedeno vstupní měření proudu i_{Lh1}, protékajícího tlumivkou a napětí zdroje u_{dh}, tyto dvě hodnoty jsou odečítány do prostředí Workspace a budou z nich v následující kapitole vytvořeny grafy. Měřený proud procházející tlumivkou je použit jako zpětnovazební proud pro podřízenou proudovou smyčku měniče STEP-UP. Další měření proudu a napětí probíhá na výstupu měniče STEP-UP, zde je odebíráno napětí meziobvodu měniče STEP-UP-DOWN pro nadřízenou napěťovou smyčku řízení měniče STEP-UP. Tento měnič je řízen IGBT tranzistorem T_{H1}, který je skrze řídící elektrodu ovládán signálem G1.

Měnič STEP-DOWN obsahuje měření v části mezi spínacími součástkami a LC-filtrem, naměřené hodnoty jsou pouze informativní a nebudou vynášeny do grafů. Měření proudu pro podřízenou proudovou smyčku měniče je realizováno bezprostředně za tlumivkou L_{H2}, naměřený průběh opět nebude vynesen, slouží pouze ke zpětnovazebnímu řízení měniče STEP-DOWN. Napětí pro nadřízenou napěťovou smyčku je odebíráno za kondenzátorem, tedy na výstupu měniče STEP-DOWN, je zde provedeno i měření proudu, oba průběhy budou vyneseny do grafů v následující kapitole. Měnič je řízen IGBT tranzistorem T_{H2}, který je ovládán skrze řídící elektrodu signálem G2.

Zátěž měniče je reálně tvořena bateriovou skupinou, pro účel simulace byl však použit napěťový zdroj o napětí 1138 V pro napětí jednoho článku baterie 1 V a teplotu 50°C a napětí 1400 V pro stejný stav nabití a teplotu -20°C. Napěťové zdroje byly doplněny o vnitřní odpory R_i tak, aby výsledná napětí a proudy těchto podsystémů odpovídaly požadovaným hodnotám, tedy při napájení napětím 1763 V musí baterie odebírat proud 5 A, odpor celého bloku je tedy 352,6 Ω, při napájení napětím 2025 V a stejném proudovém odběru je odpor bloku 405 Ω. Zapojení podsystémů je rozkresleno na *Obr. 27* i s řízením ideálních spínačů ovládajících zátěže.

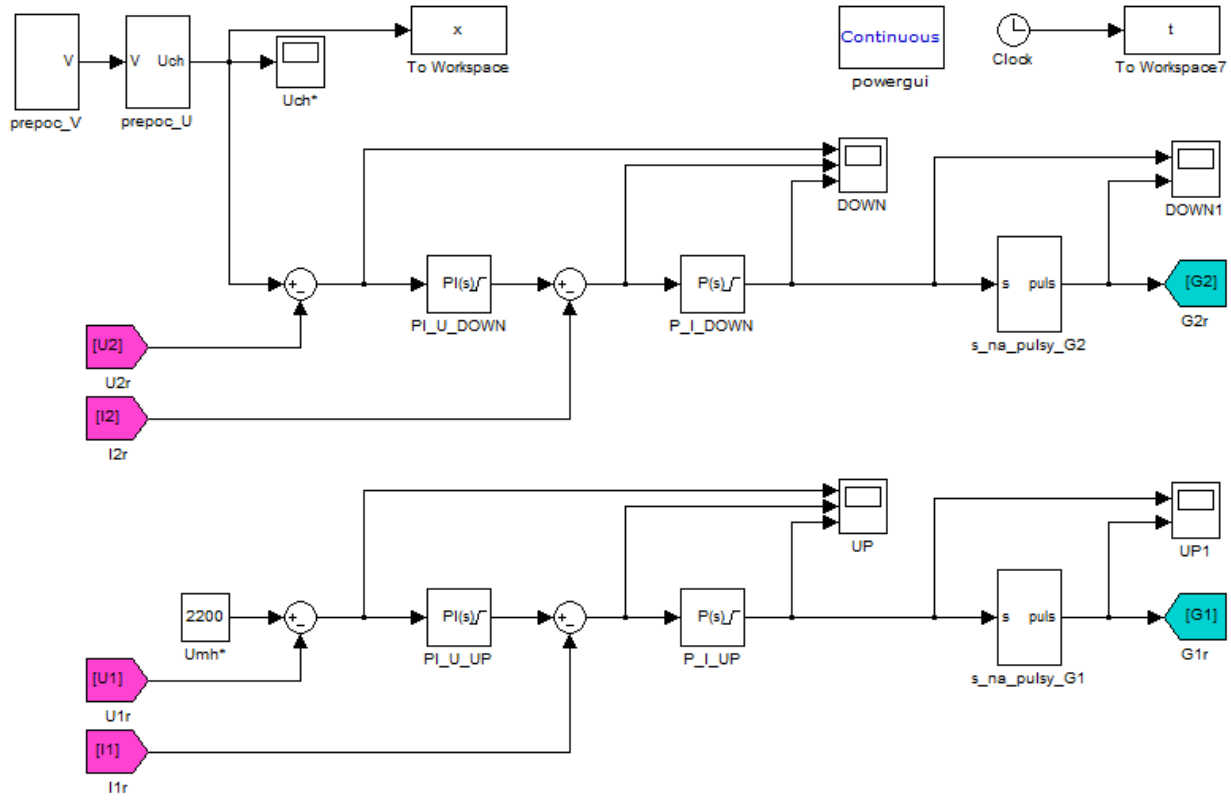


Obr. 27 : Rozkreslení podsystémů modelu silové části měniče STEP-UP-DOWN.

Podsystémy t_rizeni pouze pomocí jednoduché logiky generují spínací a vypínací jednotkové skoky pro ideální spínače ovládající připojení zátěží. Na vstupu zátěže je použita dioda, která zamezuje zápornému překmitu proudu při zapínání měniče, tento překmit vzniká v důsledku připojení baterie, tedy působením jejího koncového napětí při započetí nabíjení. Při simulaci s čistě odporovou zátěží záporný překmit nenastává.

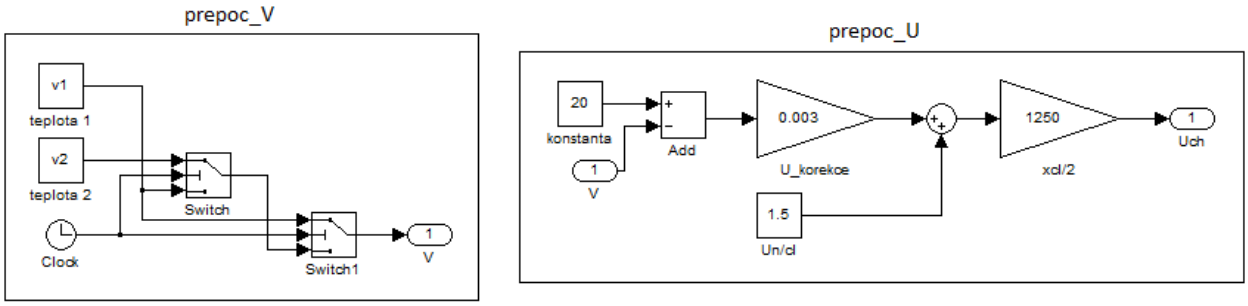
6.2 Model řídící části nabíjecího měniče

Řídící část modelu obsahuje zejména regulátory a převodníky pro generování optimálních signálů, přiváděných na řídící elektrody tranzistorů obou měničů, tedy STEP-UP i STEP-DOWN. Model řízení měniče se nachází na *Obr. 28*, z obrázku je patrné že řídící části měničů STEP-UP a STEP-DOWN nejsou nijak propojeny a jsou tedy plně samostatné.



Obr. 28 : Model řídící části měniče STEP-UP-DOWN v prostředí Matlab Simulink.

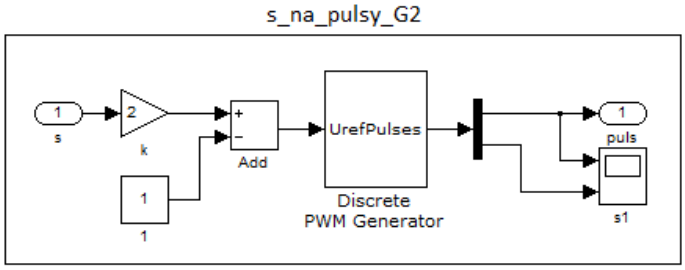
Řízení měniče STEP-DOWN obsahuje podsystém prepoc_V ve kterém dochází k nastavování teploty baterií přímo pro simulovaný průběh, blok prepoc_U poté provádí výpočet požadovaného napětí na výstupu měniče, v závislosti na vstupním údaji o teplotě baterií, oba podsystémy jsou rozkresleny na *Obr. 29*. Požadované napětí je odečítáno jako výstup do prostředí Workspace, odkud bude v další kapitole vykreslen graf pro porovnání požadovaného a reálného výstupního napětí měniče.



Obr. 29 : Rozkreslení podsystémů řídící části měniče STEP-UP-DOWN, výpočet požadovaného napětí na výstupu měniče.

Od požadovaného napětí u_{ch}* je odečítáno napětí měřené na výstupu z měniče, vytvářející nadřízenou napěťovou smyčku, výsledný signál vstupuje do regulátoru napětí nazvaného PI_U_DOWN. Z názvu plyne, že je regulátor typu PI, složka P je nastavena na hodnotu 0,0027

a složka I pak na hodnotu 0,68. Horní saturační limit výstupního signálu je nastaven na hodnotu 5,1. Z regulátoru vystupuje signál, určující požadovaný proud i_{Lh2}* tlumivkou L_{H2}, který může dosahovat hodnot 0 až 5,1. Od tohoto signálu je odečítán proud, měřený bezprostředně za tlumivkou, jako zpětná vazba podřízenou proudovou smyčkou, výsledný signál dále vstupuje do regulátoru proudu nazvaného P_I_DOWN. Regulátor je typu P, hodnota jeho proporcionální složky je 1000, saturační limity jsou nastaveny na minimum 0 a maximum 1. Výsledný signál určuje přímo hodnotu střídy udané číslem 0 až 1, tento signál je v podsystému s_na_pulsy_G2 převeden na šířkově modulovaný signál, který je přiváděn přímo na řídící elektrodu tranzistoru T_{H2}. Signál dosahuje pouze hodnoty 0 nebo 1, je řízena pouze šířka pulsů, jejichž frekvence je rovna 10 kHz. Hodnoty proporcionálních a integračních členů regulátorů byly určeny optickou optimalizací signálů, při simulacích na jednotlivých částech měniče a poté i na celém měniči dohromady. Nejdříve probíhalo ladění regulátoru proudu, při zadání konstantního požadovaného proudu a posléze ladění samostatného regulátoru napětí, při napájení konstantním napětím. Na obrázku níže je znázorněn podsystém převodu hodnoty střídy na pulsně šířkově modulovaný signál.

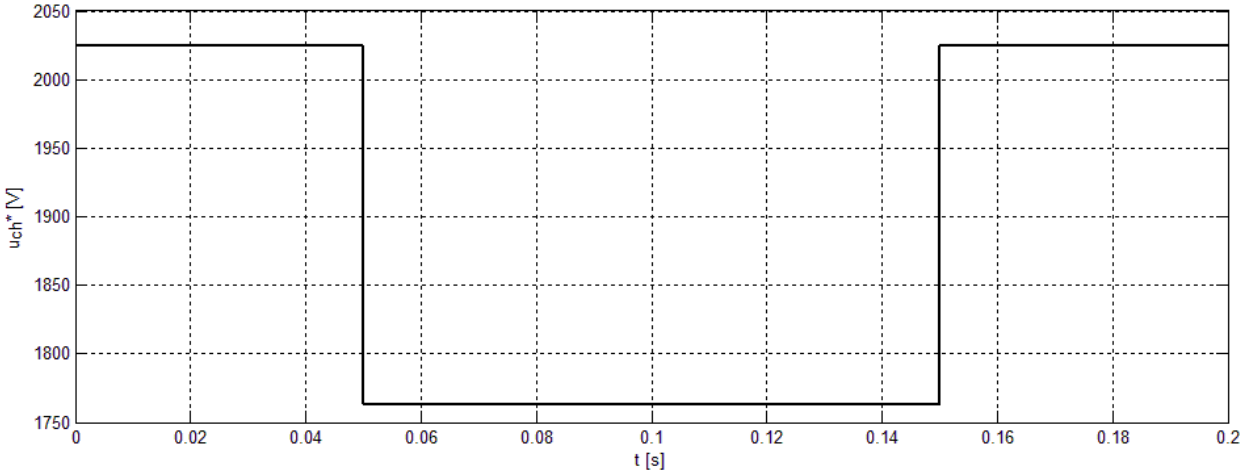


Obr. 30 : Rozkreslení podsystému řídící části měniče STEP-UP-DOWN, převodník hodnoty střídy na pulsně šířkově modulovaný signál.

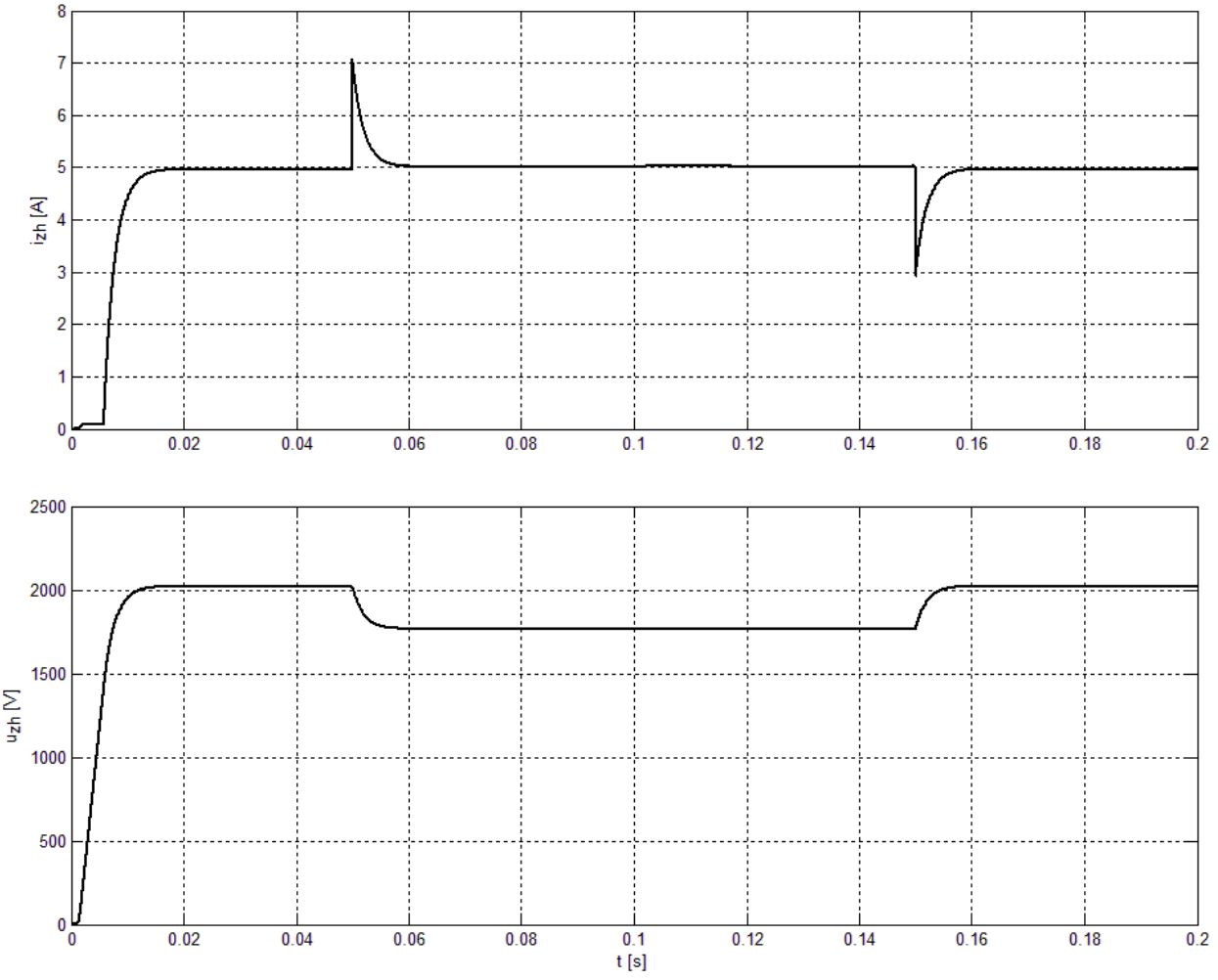
Řízení měniče STEP-UP je vytvořeno velice podobně jako u měniče STEP-DOWN. Od požadovaného napětí v meziobvodu nabíjecího měniče u_{mh}*, nastaveného na konstantní hodnotu 2200 V je odečítáno napětí měřené na výstupu měniče STEP-UP, tedy v meziobvodu nabíjecího měniče. Toto napětí vytváří zpětnou vazbu pro nadřízenou napěťovou smyčku měniče STEP-UP. Výsledný signál vstupuje do napěťového regulátoru PI_U_UP, hodnota členu P je 0,014 a členu I 1,745. Horní saturační limit je nastaven na hodnotu 13,85 a určuje maximální chtěný proud i_{Lh1}* procházející tlumivkou L_{H1}, tedy maximální chtěný vstupní proud celého měniče. Od tohoto signálu je odečítán proud, měřený bezprostředně před tlumivkou L_{H1}, vytvářející zpětnou vazbu podřízenou proudovou smyčkou. Výsledný signál pak vstupuje do regulátoru proudu P_I_UP. Regulátor je proporcionální, jeho konstanta je 1000, saturační limity jsou nastaveny na minimum 0 a maximum 1. Výstupem je signál určující hodnotu střídy, který je převeden v bloku s_na_pulsy_G1 na pulsně šířkově modulovaný signál, kterým je přímo řízen tranzistor T_{H1}. Postup návrhu konstant regulátorů je prakticky totožný s postupem u předchozího měniče.

7 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ NABÍJECÍHO MĚNIČE SIMULACÍ

Simulace je provedena pro čtyři rozdílné stavy, a to pro vstupní napětí 1000 V a výstupní napětí 2025 V, vstupní napětí 1000 V a výstupní 1763 V, vstupní napětí 2100 V a výstupní napětí 1763 V, a pro vstupní napětí 2100 V a výstupní 2025 V. Celkový čas simulace je 0,2 s, průběh vstupního napětí měniče u_{dh} je zobrazen v grafu na *Obr. 34*. Výstupní chtěné napětí je zobrazeno v grafu na *Obr. 31*.



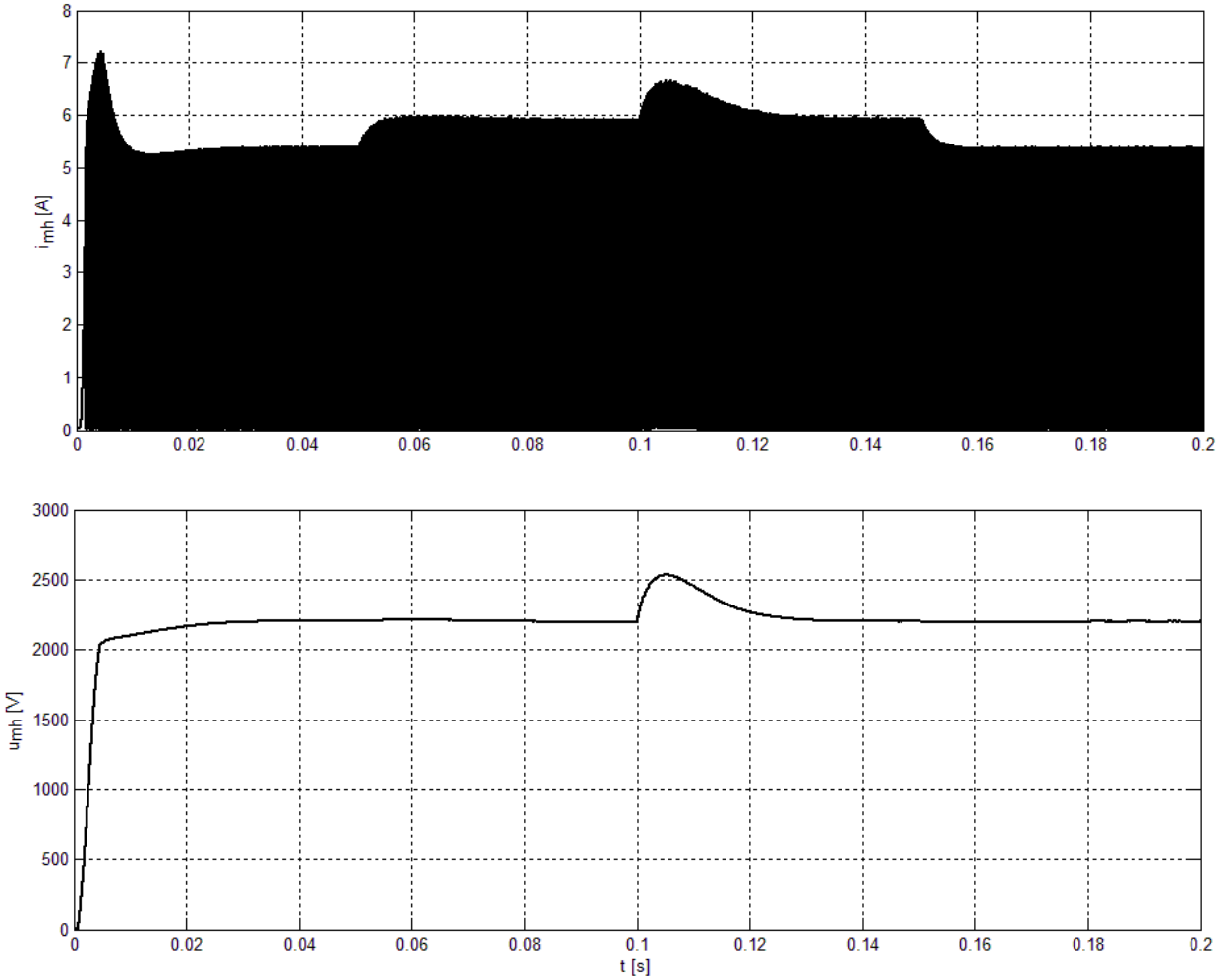
Obr. 31 : Graf závislosti požadovaného výstupního napětí měniče u_{ch}* na čase simulace.



Obr. 32 : Grafy závislostí výstupního prudu i_{zh} a napětí u_{zh} měniče na čase simulace.

Výstupní nabíjecí proud i_{zh} dosahuje při zapnutí měniče požadované hodnoty 5 A v čase přibližně 20 ms, počáteční zpoždění nárůstu proudu je způsobeno vlivem připojené zátěže a indukčností tlumivky. Proudové překmity při přepínání zátěží jsou důsledkem funkce kondenzátoru. Proud se při tomto přepínání zátěží ustaluje za čas asi 10 ms a překmit dosahuje velikosti přibližně 2 A. Překmit vznikající při přepnutí vstupního napětí, v čase 0,1 s je nepatrný a zanedbatelný.

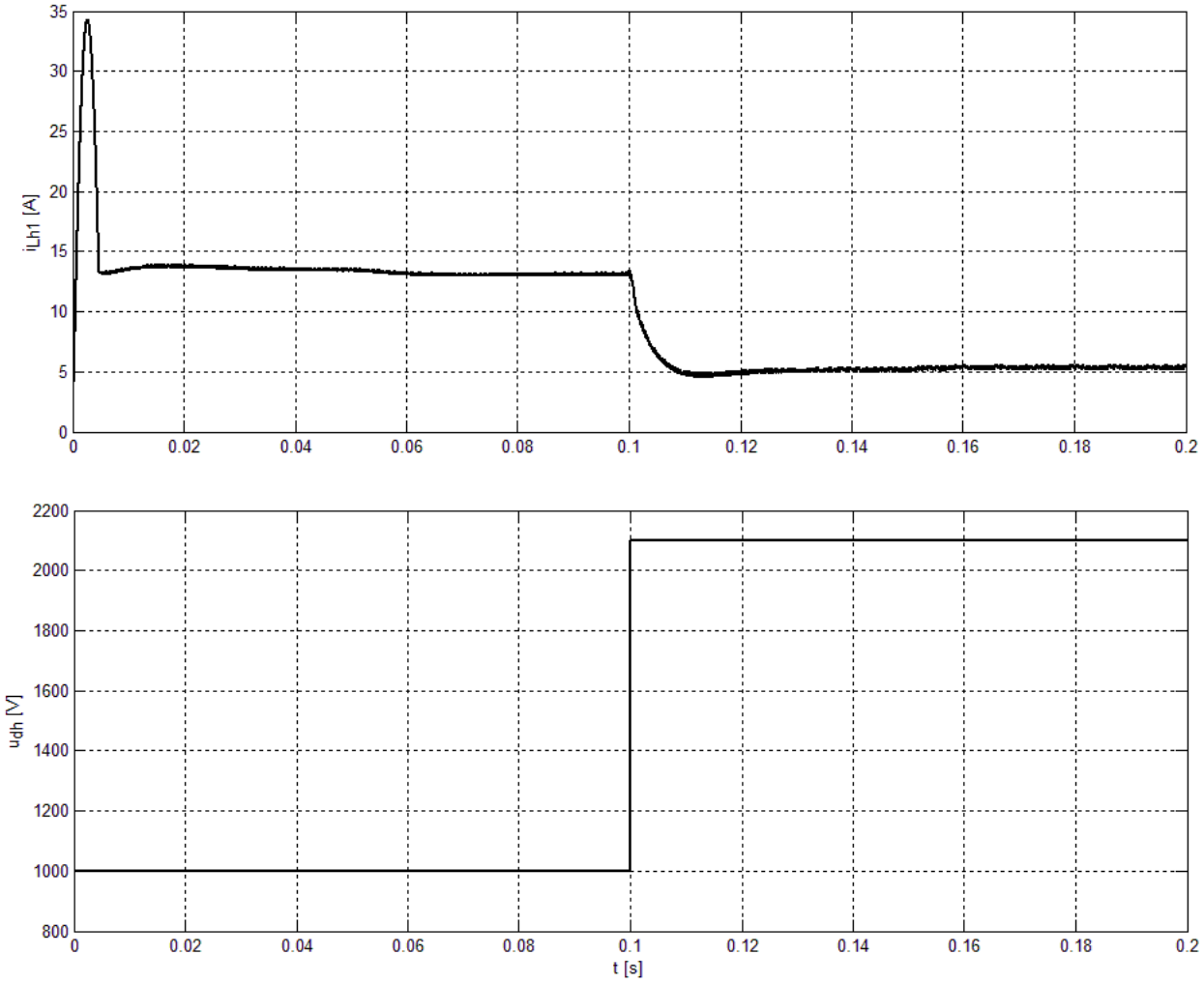
Výstupní nabíjecí napětí u_{zh} dosahuje při zapnutí měniče požadované hodnoty 2025 V v čase asi 15 ms, při následném přepínání zátěží je doba ustálení rovna času přibližně 10 ms. Průběhy napětí a proudu mimo přechodné děje a počáteční děj odpovídají průběhům požadovaným.



Obr. 33 : Grafy závislostí prudu i_{mh} a napětí u_{mh} v meziobvodu měniče na čase simulace.

Maximální proud v meziobvodu měniče dosahuje hodnoty 7,25 A, a to v čase 5 ms po zapnutí měniče. V ustáleném stavu, při napětí na zátěži 2025 V dosahuje proud maximální hodnoty přibližně 5,4 A, a při napětí na zátěži 1763 V maximální hodnoty asi 6 A. Překmit vznikající při přepnutí vstupního napětí na hodnotu 2100 V dosahuje hodnoty přibližně 0,8 A. Proud je impulsního charakteru, proto lze z grafu odečíst pouze maximální hodnoty.

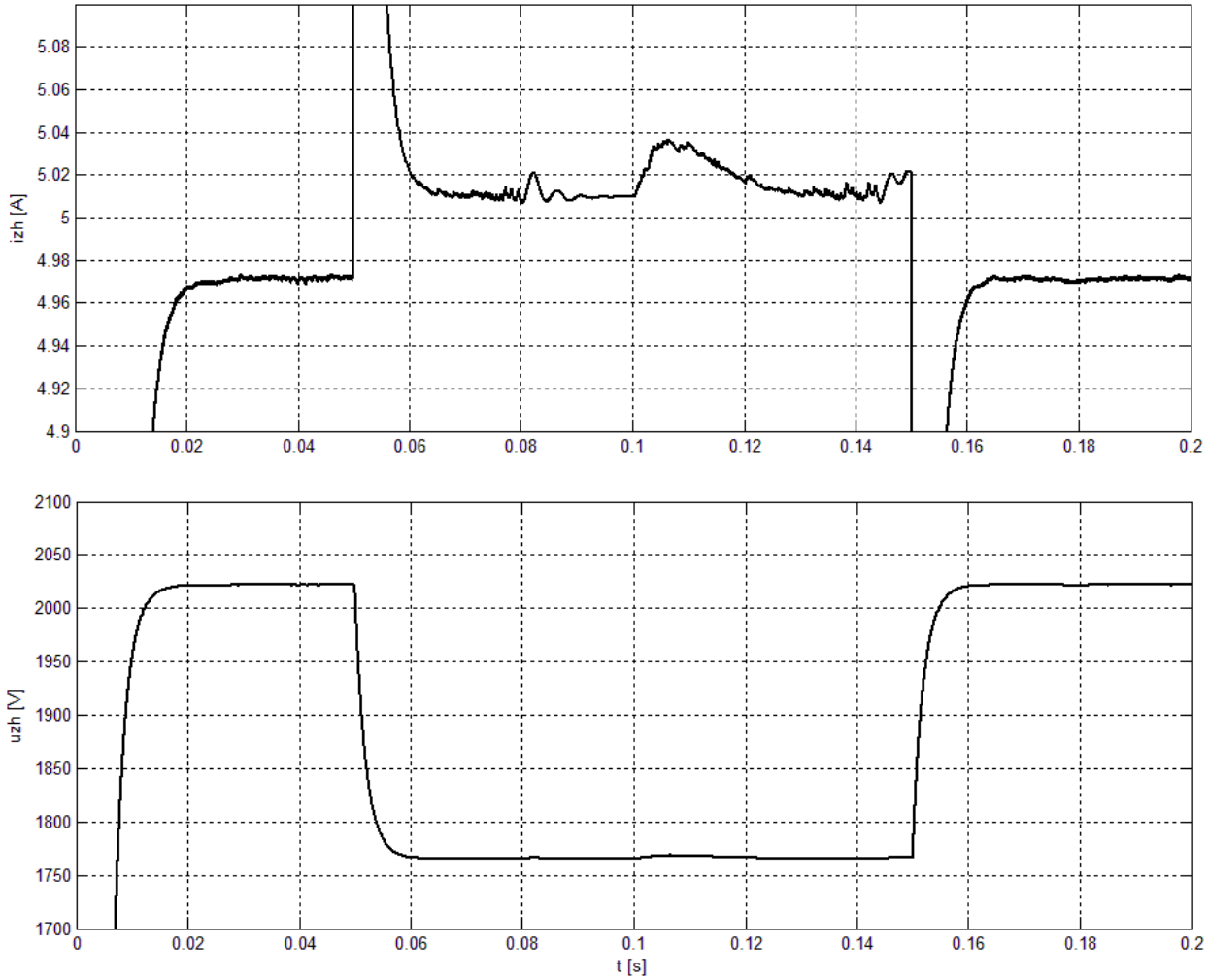
Napětí v meziobvodu dosahuje při zapnutí měniče velice rychle hodnoty asi 2050 V, z této hodnoty vzroste na požadovanou hodnotu přibližně za dobu 30 ms. Překmity napětí v meziobvodu při změně zátěže jsou nepatrné a zanedbatelné, pouze při přepnutí napájecího napětí na hodnotu 2100 V vznikne překmit až na hodnotu 2550 V. Tranzistory a diody jsou tedy dostatečně dimenzovány na napětí až 3,3 kV.



Obr. 34 : Grafy závislostí vstupního prudu i_{Lh1} a napětí u_{dh} měniče na čase simulace.

Překmit vstupního proudu i_{Lh1} při zapnutí měniče dosahuje hodnoty téměř 35 A, překmit je způsoben nabíjením kondenzátorů měniče. Tento překmit není pro zdroj napětí, tedy meziobvod trakčního měniče žádným problémem, protože meziobvodem protékají při provozu lokomotivy mnohonásobně větší proudy. Ustálení proudu při přepínání vstupního napětí dosahuje času 10 ms. Odebíraný proud z meziobvodu trakčního měniče v ustáleném stavu dosahuje hodnoty 13,5 A při napájecím napětí 1000 V a napětí na výstupu 2025 V, při napětí na výstupu 1763 V, pak proud dosahuje hodnoty 13,1 A. Při napájení napětím 2100 V a výstupním napětí 1763 V dosahuje vstupní proud hodnoty 5,2 A, a při výstupním napětí 2025 V dosahuje proud hodnoty 5,4 A.

Vstupní napětí měniče u_{dh} je řízeno přepnutím napěťových zdrojů, dle závislosti vstupního napětí měniče u_{dh} na čase simulace, vynesené v grafu na *Obr. 34*.



Obr. 35 : Detaily grafů závislostí výstupního prudu i_{zh} a napětí u_{zh} měniče na čase simulace.

Z detailu průběhu výstupního proudu měniče i_{zh} vyplývá, že se proud mimo přechodné děje a počáteční děj pohybuje v odchylkách maximálně +/- 0,04 A od požadované hodnoty, a to ve všech případech zatížení a napájení.

Výstupní napětí měniče u_{zh} dosahuje mimo počáteční děj a přechodné děje požadovaných hodnot s maximální odchylkou +/- 4 V, a to ve všech případech zatížení a napájení.

8 VÝPOČET ÚČINNOSTI TRAKČNÍHO STŘÍDAČE

V této kapitole je proveden výpočet přepínacích ztrát a ztrát vedením, vznikajících v prvcích měniče, tedy v tranzistorech a diodách. Z vypočtených hodnot lze poté vypočítat účinnost celého měniče. Výpočty jsou prováděny dle literatury [23], kapitola 8.1, ve které je odvozen postup výpočtu přepínacích ztrát a ztrát vedením je z této literatury [23] v podstatě převzata.

Trakční měnič lokomotivy ŠKODA 109E, pro který je výpočet proveden, je zobrazen na *Obr. 12*. Výpočet bude proveden pro jmenovitý a maximální výkonový bod měniče, jako výstupní proudy a napětí měniče budou uvažovány vstupní proudy a napětí motoru, tedy jmenovité sdružené napětí 1130 V a jmenovitý proud 518 A, maximální pak 600 A.

8.1 Teorie výpočtu ztrát v tranzistorovém měniči

Pokud nahradíme VA-charakteristiku výkonové spínací součástky, v sepnutém stavu lomenou přímkou dle *Obr. 36*, je možné vypočítat ztráty způsobené vedením proudu dle rovnice:

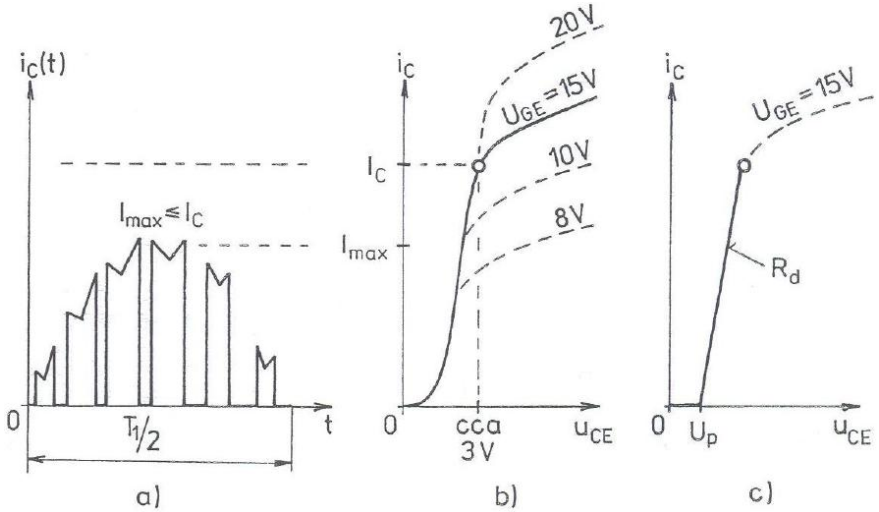
$$P_{ved} = U_p \; I_{str} + R_d \; I_{ef}^{\,2} \tag{153}$$

ztráty přepínací určíme podle rovnice:

$$P_{pr} = f(W_{on} + W_{off}) = f(W_{pr}) \tag{154}$$

tímto postupem, se ve výkonové elektronice běžně vypočítávají ztráty v měničích a jejich účinnosti. Výpočet přepínacích ztrát i výpočet střední a efektivní hodnoty proudu, protékajícího součástkou je jednoduchý, avšak pouze v ustáleném stavu.

U trojfázového střídače podle *Obr. 37*, se jedná o matematicky značně obtížný úkol, jak lze vidět na *Obr. 36 a)* a *Obr. 40 d, e)*.

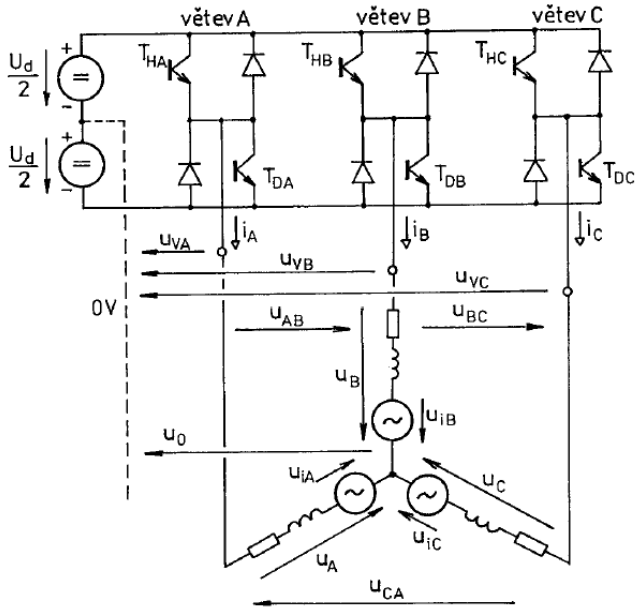


Obr. 36 : Náhrada VA-charakteristiky IGBT tranzistoru, v sepnutém stavu „lomenou přímkou“, a) unipolární pulsy, b) křivka pro U_{GE} = 15 V, c) lomená přímka [23].

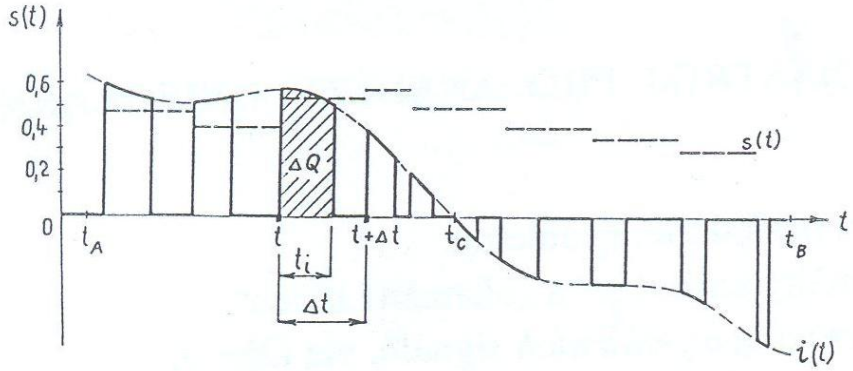
8.1.1 Matematický nástroj pro analýzu unipolárních PWM signálů

Matematický nástroj řeší následující problémy:

- definice pojmů „okamžitý kmitočet“ a „okamžitá střída“,
- definice „unipolárních“ signálů, viz *Obr. 39*,
- obecný výpočet střední a efektivní hodnoty unipolárních signálů.



Obr. 37 : Trojfázový střídač s označením všech napětí a proudů v systému motor – střídač [23].



Obr. 38 : K výpočtu střední hodnoty unipolárních proudových impulsů [23].

Definice kmitočtu a střídy impulsního signálu, na nejkratším možném časovém intervalu Δt podle *Obr. 38*:

$$f[t;\, t+\Delta t] = \frac{1}{\Delta t} \tag{155}$$

$$s[t;\, t+\Delta t] = \frac{t_i}{\Delta t} \qquad t_i \in \langle 0\,;\, \Delta t \rangle \qquad s \in \langle 0\,;\, 1 \rangle\,. \tag{156}$$

Přechod k okamžitým hodnotám kmitočtu a střídy je přibližně možný za předpokladu, že:

$$\Delta t << t_B - t_A \tag{157}$$

v případě sinusové PWM, musí být splněny nerovnosti:

$$\Delta t << T_1 \qquad f_1 << f \tag{158}$$

kde f_1, T_1 jsou kmitočet a perioda 1. harmonické, f, Δt jsou kmitočet a perioda vf. nosného kmitočtu. K okamžitým hodnotám můžeme přejít s velmi dobrou přesností skrze rovnice:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{dt} \tag{159}$$

$$s(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{t_i}{\Delta t} = \frac{t_i}{dt} \tag{160}$$

na základě rovnic (159) a (160) můžeme funkci *s(t)*, na *Obr. 38* nahradit makroskopicky spojitou funkcí času.

Unipolární signál je charakterizován tím, že polarita impulsů zůstává dlouhodobě zachována.

8.1.2 Střední hodnota unipolárního signálu

Vyjádření přírůstku náboje na nejkratším možném intervalu Δt podle *Obr. 38*:

$$\Delta Q[t;\, t+\Delta t] = i(t)\; t_i = i(t)\; \frac{t_i}{\Delta t}\; \Delta t = i(t)\; s(t)\; \Delta t \tag{161}$$

nyní provedeme limitní přechod, na diferenciální přírůstek náboje:

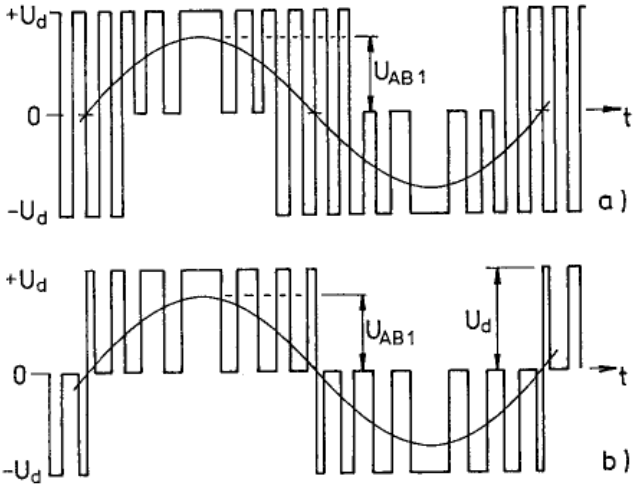
$$dQ(t) = \lim_{\Delta t \to 0} i(t)\; s(t)\; \Delta t = i(t)\; s(t)\; dt \tag{162}$$

$$Q(t_B) - Q(t_A) = \int_{t_A}^{t_B} i(t)\; s(t)\; dt \tag{163}$$

střední hodnota proudových impulsů, pokud jsou obě funkce *i(t) a s(t)* periodické na periodě T_1:

$$I_{stř} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i(t)\; s(t)\; dt \tag{164}$$

kde *i(t)* má význam spojité obálky impulsů a *s(t)* má význam okamžité spojité střídy impulsů. Z matematického hlediska, se jedná o skalární součin funkcí *i(t)* a *s(t)* na intervalu T_1.



Obr. 39 : Příklad sdruženého napětí $u_{ab}(t)$ střídače, a) částečně bipolární napětí, b) unipolární napětí [23].

8.1.3 Efektivní hodnota unipolárního signálu

Efektivní hodnota je řešena podobně jako střední hodnota, ale pomocí přírůstku energie ΔW, daného plochou pod výkonovým pulsem o okamžité hodnotě *p(t)*, na nejmenším intervalu Δt:

$$\Delta W[t;\, t+\Delta t] = p(t)\; t_i = p(t)\; \frac{t_i}{\Delta t}\; \Delta t = p(t)\; s(t)\; \Delta t \tag{165}$$

nyní můžeme provést limitní přechod, na diferenciální přírůstek energie:

$$dW(t) = \lim_{\Delta t \to 0} p(t)\; s(t)\; \Delta t = p(t)\; s(t)\; dt \tag{166}$$

$$W(t_B) - W(t_A) = \int_{t_A}^{t_B} p(t)\; s(t)\; dt \tag{167}$$

střední, tedy činný výkon v případě, že obě funkce *p(t)* a *s(t)* jsou periodické na intervalu T_1:

$$P_{str} \equiv P_c = \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} p(t)\ s(t)\ dt = \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} u(t)\ i(t)\ s(t)\ dt \tag{168}$$

pro lineární rezistor platí Ohmův zákon ve tvaru:

$$u(t) = R\ i(t) \tag{169}$$

po dosazení můžeme psát:

$$P_{str} \equiv P_c = R\ \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} i^2(t)\ s(t)\ dt \overset{!}{=} R\ I_{ef}{}^2 \tag{170}$$

z rovnice (170) lze pak snadno určit efektivní hodnotu proudových unipolárních impulsů:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} i^2(t)\ s(t)\ dt} \tag{171}$$

podobně lze určit i efektivní hodnotu napěťových unipolárních impulsů:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} u^2(t)\ s(t)\ dt} \tag{172}$$

kde funkce *i(t)* a *u(t)* mají význam obálky impulsů, funkce s(t) pak okamžité střídy impulsů.

8.1.4 Přepínací ztráty tranzistoru

Přepínací ztrátová energie tranzistoru v rámci jednoho spínacího cyklu Δt je funkcí okamžitého proudu zátěže $i_z(t)$:

$$W_{pr} = W_{pr}[I_z] = W_{pr}[i_z(t)] = W_{pr}(t) \tag{173}$$

pokud na intervalu Δt proběhne právě jedno zapnutí a vypnutí tranzistoru, tak je přírůstek energie ΔW na intervalu Δt roven přepínací ztrátové energii $W_{on} + W_{off} = W_{pr}$

$$\Delta W[t;\ t+\Delta t] \equiv W_{pr}[i_z(t)] = W_{pr}[i_z(t)]\ \frac{1}{\Delta t}\ \Delta t \tag{174}$$

z toho limitním přechodem na diferenciál *dW(t)* vznikne:

$$dW(t) = \lim_{\Delta t \to 0} W_{pr}[i_z(t)]\ \frac{1}{\Delta t}\ \Delta t = W_{pr}[i_z(t)]\ f(t)dt \tag{175}$$

celková ztrátová energie na sledovaném intervalu $[t_A;\ t_B]$ tedy činní:

$$W = \int_{t_A}^{t_B} W_{pr}[i_z(t)]\ f(t)dt \tag{176}$$

potom činný ztrátový přepínací výkon, pro periodické funkce $i_z(t)$ a *f(t)* odpovídá:

$$P_{pr} = \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} W_{pr}[i_z(t)]\ f(t)dt \tag{177}$$

pro $i_z(t)$ = konst. a *f(t)* = konst. přechází rovnice (177) do známého tvaru (154).

8.1.5 Střední a efektivní hodnota proudu tranzistoru a nulové diody

Definice modulačního činitele plyne z *Obr. 39 b)*:

$$M = \frac{U_{AB1}}{U_d} \qquad M \in \left\langle 0\,;\,\frac{\sqrt{3}}{2} \right\rangle \qquad \text{nebo} \qquad M \in \langle 0\,;\,1 \rangle \tag{178}$$

okamžitá střída je dána čistou sinusovou křivkou na *Obr. 40 b)*:

$$s(t) = s_1(t) = \frac{1}{2}\left(1 + M\,\frac{2}{\sqrt{3}}\sin 2\,\pi\,\frac{t}{T_1}\right) \qquad \text{pro} \qquad M \in \left\langle 0\,;\,\frac{\sqrt{3}}{2} \right\rangle \tag{179}$$

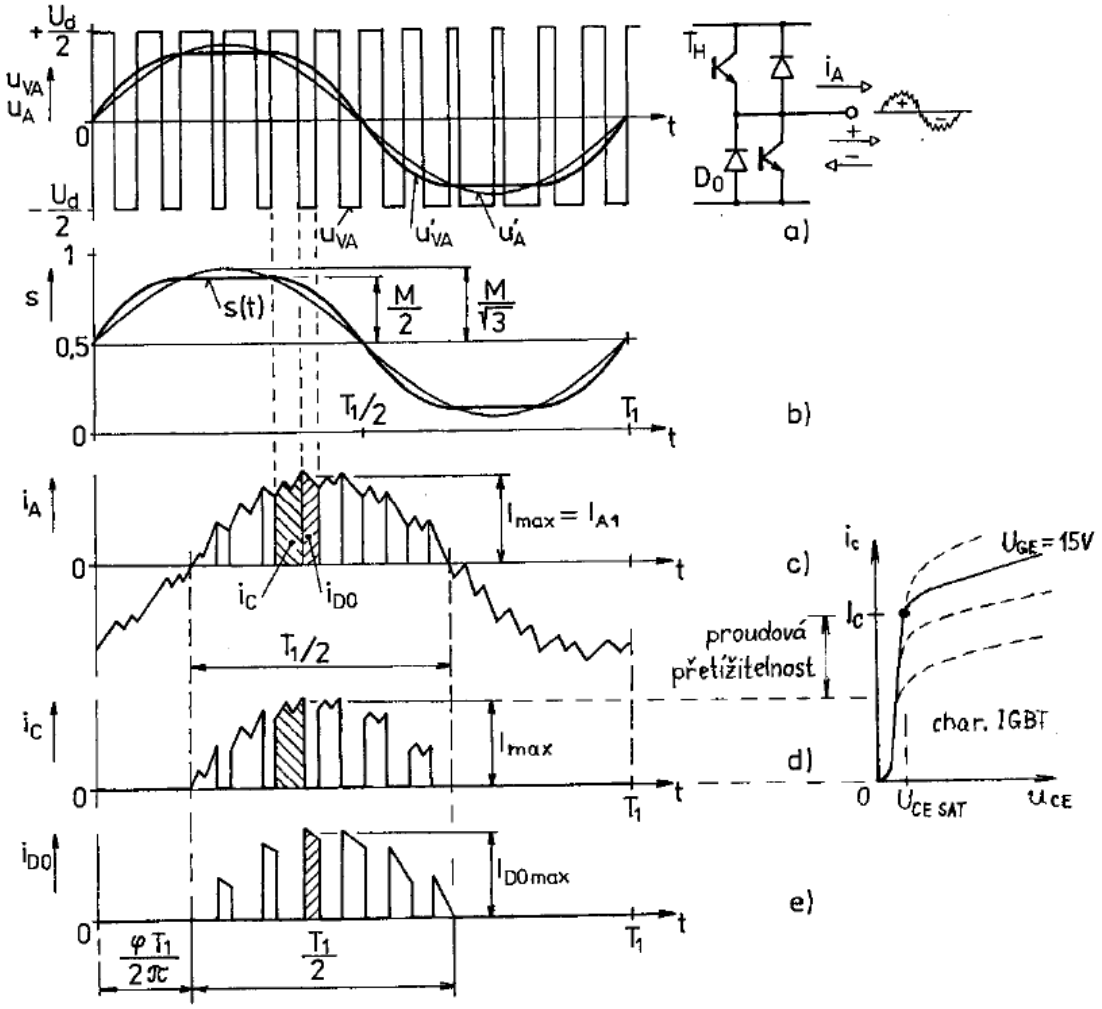
nebo lze k čisté sinusoidě přičíst sinusové úseče $s_u(t)$ o šířce 60°, viz *Obr. 40 b)*:

$$s_u(t) = \frac{M}{2}\left[-1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\sin\left(\frac{2\,\pi}{T_1}\,t + \frac{\pi}{3}\right)\right] \qquad \text{pro} \qquad t \in \left\langle 0\,;\,\frac{T_1}{6} \right\rangle \tag{180}$$

pak

$$s(t) = s_1(t) + s_u(t) \qquad \text{pro} \qquad M \in \langle 0\,;\,1 \rangle \tag{181}$$

tak lze zvýšit modulační činitel až na hodnotu $M = 1$.



Obr. 40 : Větev A střídače, a) větvové a fázové napětí, b) okamžitá střída, c) fázový proud zátěže, d) kolektorový proud tranzistoru T_H, e) proud diody D0 [19].

Obálka kolektorových proudových impulsů je určena sinusoidou fázového proudu viz *Obr. 40 c, d, e)*, pilovité vf. zvlnění zanedbáme, můžeme tedy napsat:

$$i_A(t) = I_{1A}\ \sin\left(2\ \pi\ \frac{t}{T_1} - \varphi\right) \tag{182}$$

pokud dosadíme (179) nebo (181) do (164), bude pro střední hodnotu proudu tranzistoru a nulové diody platit:

$$I_{Cstř} = \frac{1}{T_1} \int_{\frac{\varphi}{2\cdot\pi}\ T_1}^{\frac{\varphi}{2\cdot\pi}\ T_1+\frac{T_1}{2}} i_A(t)\ s(t)\ dt \qquad I_{D0stř} = \frac{1}{T_1} \int_{\frac{\varphi}{2\cdot\pi}\ T_1}^{\frac{\varphi}{2\cdot\pi}\ T_1+\frac{T_1}{2}} i_A(t)\ \left[1-s(t)\right] dt \tag{183 a, b}$$

z rovnic (179) nebo (181), (182) a (183) vyplývá, *M* je z intervalu 0 až 1:

$$I_{Cstř} = I_{1A}\left(\frac{1}{2\ \pi} + \frac{M}{4\ \sqrt{3}}\cos\varphi\right) \qquad I_{D0stř} = I_{1A}\left(\frac{1}{2\ \pi} - \frac{M}{4\ \sqrt{3}}\cos\varphi\right) \tag{184 a, b}$$

podobně lze určit efektivní hodnoty z (171), (179) a (182):

$$I_{Cef} = I_{1A}\ \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2\ M}{3\ \sqrt{3}\ \pi}\cos\varphi} \qquad I_{D0ef} = I_{1A}\ \sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2\ M}{3\ \sqrt{3}\ \pi}\cos\varphi}\ . \tag{185 a, b}$$

8.1.6 Matematický aparát výpočtu přepínacích ztrát v tranzistoru střídače

Nejprve musíme definovat činitel proudového využití tranzistoru, jako poměr amplitudy fázového proudu I_{1A} a typového proudu I_C tranzistoru:

$$K = \frac{I_{1A}}{I_C} \qquad K \in \langle 0\ ;\ 1 \rangle \tag{186}$$

změřenou závislost ztrátové přepínací energie na zatěžovacím proudu z *Obr. 41*, můžeme aproximovat například lineární nebo kvadratickou funkcí:

$$W_{pr}\left[i_{A1}(t)\right] = E_{\max}\ K\ \sin\frac{2\ \pi}{T_1}\ t \quad \text{nebo} \quad W_{pr}\left[i_{A1}(t)\right] = E_{\max}\ K^2\ \sin^2\frac{2\ \pi}{T_1}\ t \tag{187 a, b}$$

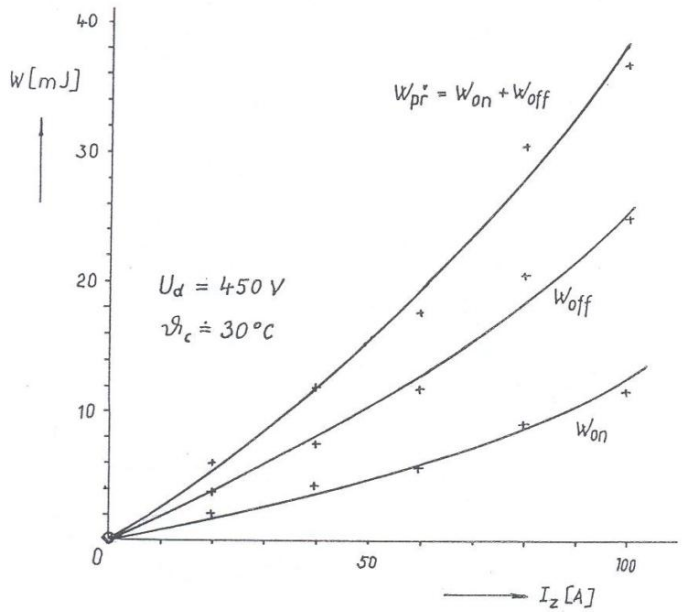
kde E_{max} je katalogová hodnota ztrátové energie, při spínání nominálního proudu I_C tranzistoru.
Pokud je vf. nosný kmitočet konstantní:

$$f(t) = f \qquad (= \text{konst.}) \tag{188}$$

pak z rovnic (178), (187) a (188) vyplývá:

$$P_{pr} = \frac{1}{\pi}\ f\ E_{\max}\ K = 0{,}318\ f\ E_{\max}\ K$$
$$P_{pr} = \frac{1}{4}\ f\ E_{\max}\ K^2 = 0{,}25\ f\ E_{\max}\ K^2 \tag{189 a, b}$$

ze vzorců vidíme, že ztrátový přepínací výkon, způsobený zpracováním půlsinusoidy fázového proudu, je asi třetinový až čtvrtinový oproti případu, kdy by tranzistor zpracovával trvalý stejnosměrný proud o velikosti rovné amplitudě téže půlsinusoidy.



Obr. 41 : Změřená závislost ztrátové energie na spínaném proudu. Příklad pro IGBT 1000 V, 100A, Toshiba, MG 100 N2Y S1.

Soubor rovnic (153), (184), (185), a (189) je velmi významný pro přesné určení celkových ztrát v trojfázovém střídači.

Ztráty střídače, tedy (6 T + 6 D0) mohou být určeny s přesností až +/- 5% v libovolném režimu pohonu. Tedy při libovolné otáčivé rychlosti dané napětím, a tedy modulačním činitelem *M* a při libovolném momentu daném proudem, tedy činitelem proudového využití *K*.

8.2 Výpočet ztrát v trakčním střídači lokomotivy ŠKODA 109E

Pro výpočet je nutné nejdříve určit velikosti amplitud prvních harmonických, výstupních proudů střídače, pro oba počítané případy.

Výpočet velikosti amplitudy první harmonické, výstupního proudu střídače, pro jmenovitý bod:

$$I_{A1,jm} = \sqrt{2}\, I_{s,ef,jm} = \sqrt{2} \cdot 518 = \underline{\underline{732{,}6\,\mathrm{A}}} \tag{190}$$

pro maximální bod:

$$I_{A1,\max} = \sqrt{2}\, I_{s,ef,\max} = \sqrt{2} \cdot 600 = \underline{\underline{848{,}5\,\mathrm{A}}} \tag{191}$$

dále je podle vztahu (178) potřeba určit modulační činitel *M*, který lze vypočítat jako poměr velikosti amplitudy výstupního napětí měniče U_{AB1} a napětí v meziobvodu měniče U_d. Modulační činitel se výrazně mění s napětím meziobvodu, pro názornost jsou uvedeny výpočty pro minimální, jmenovitá a maximální napětí, která se v meziobvodu měniče mohou vyskytovat.

Výpočet modulačního činitele, při minimálním možném napětí meziobvodu:

$$M_{1000} = \frac{U_{AB1}}{U_{d,1000}} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3}}\sqrt{2}}{U_{d,1000}} = \frac{\frac{1130}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}}{1000} = \frac{922{,}6}{1000} = \underline{\underline{0{,}9226}} \tag{192}$$

při jmenovitém napětí meziobvodu při napájení z DC sítě:

$$M_{1500} = \frac{U_{AB1}}{U_{d,1500}} = \frac{922{,}6}{1500} = \underline{\underline{0{,}6151}} \tag{193}$$

při jmenovitém napětí meziobvodu při napájení z AC sítě:

$$M_{1600} = \frac{U_{AB1}}{U_{d,1600}} = \frac{922{,}6}{1600} = \underline{\underline{0{,}5767}} \tag{194}$$

při maximálním možném napětí meziobvodu:

$$M_{2100} = \frac{U_{AB1}}{U_{d,2100}} = \frac{922{,}6}{2100} = \underline{\underline{0{,}4394}} \tag{195}$$

pro výpočet je dále použit modulační činitel M_{1500}, pro jmenovité napětí meziobvodu, při napájení z DC sítě, který bude dále uvažován jako veličina M.

Účiník motoru $\cos\varphi$, se u velkých asynchronních motorů pohybuje okolo hodnoty 0,85. Daný asynchronní motor lokomotivy ŠKODA 109E o jmenovitém výkonu 1600 kW, má při jmenovitých i maximálních otáčkách účiník roven přibližně hodnotě 0,824.

Výpočty proudů procházejících tranzistorem, při provozu střídače ve jmenovitém bodě:

$$I_{c,stř,jm} = I_{A1,jm}\left(\frac{1}{2\,\pi} + \frac{M}{4\,\sqrt{3}}\cos\varphi\right) = 732{,}6\cdot\left(\frac{1}{2\cdot\pi} + \frac{0{,}6151}{4\cdot\sqrt{3}}\cdot 0{,}824\right) = \underline{\underline{170{,}2\,\mathrm{A}}} \tag{196}$$

$$I_{c,ef,jm} = I_{A1,jm}\sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2\,M}{3\,\sqrt{3}\,\pi}\cos\varphi} = 732{,}6\cdot\sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2\cdot 0{,}6151}{3\cdot\sqrt{3}\cdot\pi}\cdot 0{,}824} = \underline{\underline{316{,}9\,\mathrm{A}}} \tag{197}$$

diodou, při provozu střídače ve jmenovitém bodě:

$$I_{D0,stř,jm} = I_{A1,jm}\left(\frac{1}{2\,\pi} - \frac{M}{4\,\sqrt{3}}\cos\varphi\right) = 732{,}6\cdot\left(\frac{1}{2\cdot\pi} - \frac{0{,}6151}{4\cdot\sqrt{3}}\cdot 0{,}824\right) = \underline{\underline{63\,\mathrm{A}}} \tag{198}$$

$$I_{D0,ef,jm} = I_{A1,jm}\sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2\,M}{3\,\sqrt{3}\,\pi}\cos\varphi} = 732{,}6\cdot\sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2\cdot 0{,}6151}{3\cdot\sqrt{3}\cdot\pi}\cdot 0{,}824} = \underline{\underline{183{,}7\,\mathrm{A}}}\,. \tag{199}$$

Následují výpočty proudů, při provozu střídače v maximálním bodě.

Výpočty proudů procházejících tranzistorem, při provozu střídače v maximálním bodě:

$$I_{c,stř,\max} = I_{A1,\max}\left(\frac{1}{2\,\pi} + \frac{M}{4\,\sqrt{3}}\cos\varphi\right) = 848{,}5\cdot\left(\frac{1}{2\cdot\pi} + \frac{0{,}6151}{4\cdot\sqrt{3}}\cdot 0{,}824\right) = \underline{\underline{197{,}1\,\mathrm{A}}} \tag{200}$$

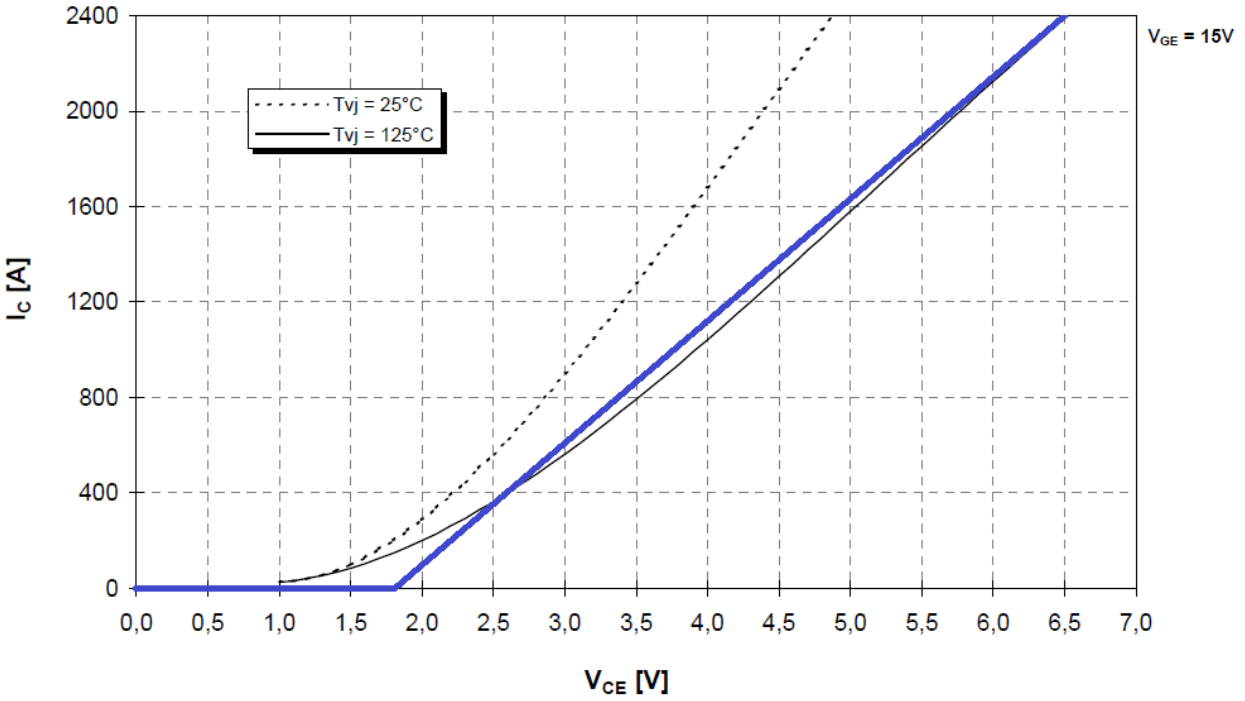
$$I_{c,ef,\max} = I_{A1,\max}\sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2\,M}{3\,\sqrt{3}\,\pi}\cos\varphi} = 848{,}5\cdot\sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2\cdot 0{,}6151}{3\cdot\sqrt{3}\cdot\pi}\cdot 0{,}824} = \underline{\underline{367\,\mathrm{A}}} \tag{201}$$

diodou, při provozu střídače v maximálním bodě:

$$I_{D0,stř,\max} = I_{A1,\max}\left(\frac{1}{2\,\pi} - \frac{M}{4\,\sqrt{3}}\cos\varphi\right) = 848{,}5\cdot\left(\frac{1}{2\cdot\pi} - \frac{0{,}6151}{4\cdot\sqrt{3}}\cdot 0{,}824\right) = \underline{\underline{72{,}97\,\mathrm{A}}} \tag{202}$$

$$I_{D0,ef,\max} = I_{A1,\max}\sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2\,M}{3\,\sqrt{3}\,\pi}\cos\varphi} = 848{,}5\cdot\sqrt{\frac{1}{8} - \frac{2\cdot 0{,}6151}{3\cdot\sqrt{3}\cdot\pi}\cdot 0{,}824} = \underline{\underline{212{,}8\,\mathrm{A}}} \tag{203}$$

z vypočtených hodnot proudů je možno vypočítat energetické ztráty, vznikající v tranzistoru a v nulové diodě důsledkem vedení proudu. Pro výpočet je třeba zjistit z grafů poskytnutých výrobcem prahová napětí a odpory polovodičových součástek v otevřeném stavu.



Obr. 42 : Výstupní charakteristika IGBT tranzistoru FZ 1200 R 33 KF2_B5, použitého ve střídači lokomotivy ŠKODA 109E, proloženo tzv. lomenou přímkou [24].

Z grafu, bylo pomocí proložení určeno prahové napětí tranzistoru o hodnotě 1,8 V. Dále je potřeba dopočítat odpor tranzistoru v otevřeném stavu $R_{d,t}$:

$$R_{d,t} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{6{,}5 - 1{,}8}{2400 - 0} = \underline{\underline{1{,}958\,\mathrm{m\Omega}}} \tag{204}$$

nyní je možno dle vztahu (153) vypočítat ztráty, vznikající v důsledku průchodu proudu tranzistorem.

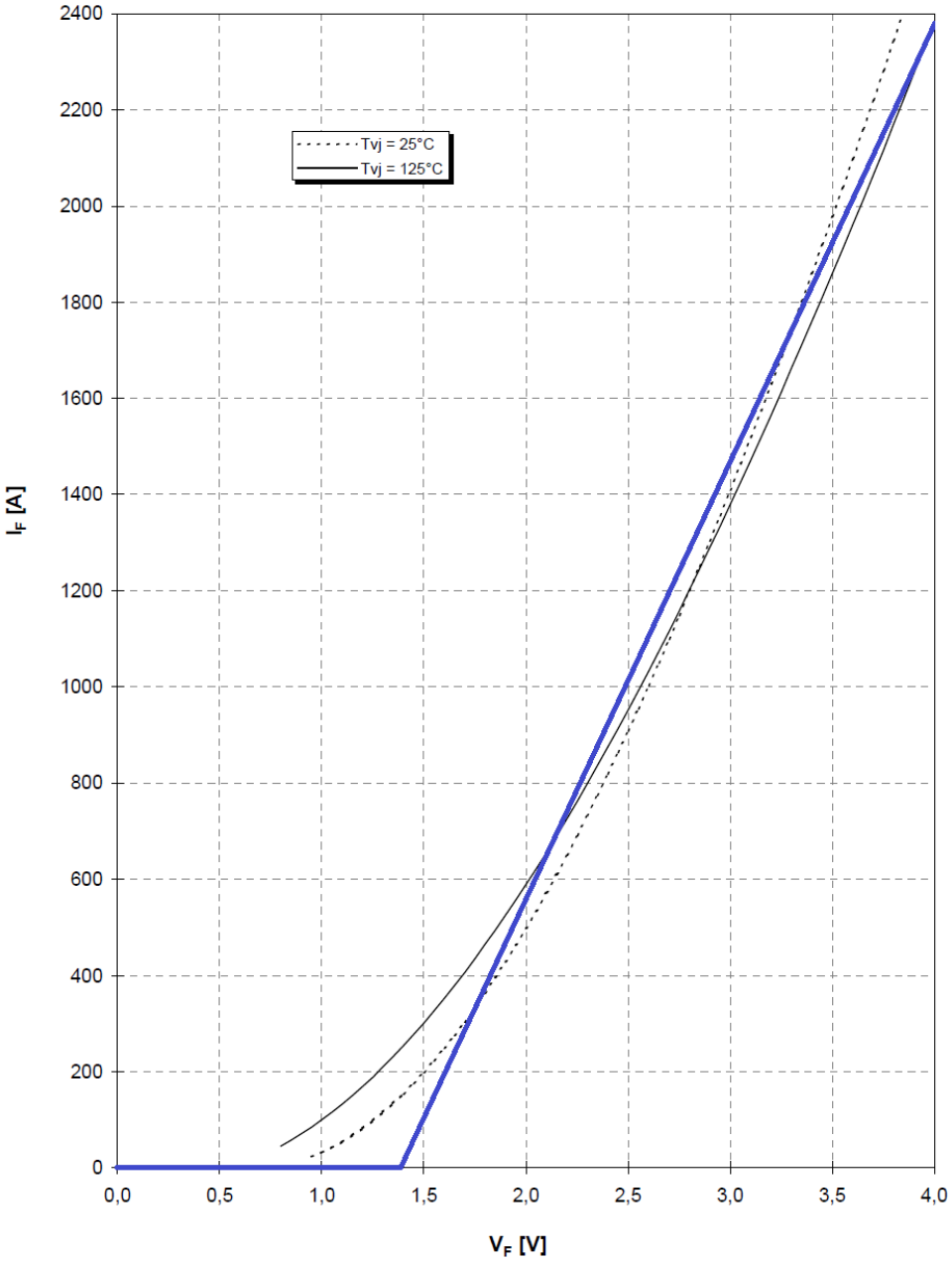
Výpočet ztrát vedením, způsobených průchodem proudu tranzistorem, pro jmenovitý bod měniče:

$$P_{ved,t,jm} = U_{p,t}\ I_{c,stř,jm} + R_{d,t}\ I_{c,ef,jm}{}^2 = 1{,}8 \cdot 170{,}2 + 1{,}958 \cdot 10^{-3} \cdot 316{,}9^2 = \underline{\underline{503\,\mathrm{W}}} \tag{205}$$

pro maximální bod měniče:

$$P_{ved,t,\max} = U_{p,t}\ I_{c,stř,\max} + R_{d,t}\ I_{c,ef,\max}{}^2 = 1{,}8 \cdot 197{,}1 + 1{,}958 \cdot 10^{-3} \cdot 367^2 = \underline{\underline{618{,}5\,\mathrm{W}}}\,. \tag{206}$$

Stejným způsobem bude určeno U_p a R_d u diody.



Obr. 43 : Charakteristika $I_F = f(V_F)$ diody DD 1200 S 33 K2 B5, použité ve střídači lokomotivy ŠKODA 109E, proloženo tzv. lomenou přímkou [25].

Z grafu, bylo pomocí proložení určeno prahové napětí diody o hodnotě 1,4 V. Dále je potřeba dopočítat odpor $R_{d,D0}$ diody:

$$R_{d,D0} = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F} = \frac{4-1{,}4}{2380-0} = \underline{\underline{1{,}092\,\mathrm{m\Omega}}} \tag{207}$$

výpočet ztrát, způsobených průchodem proudu diodou, pro jmenovitý bod měniče:

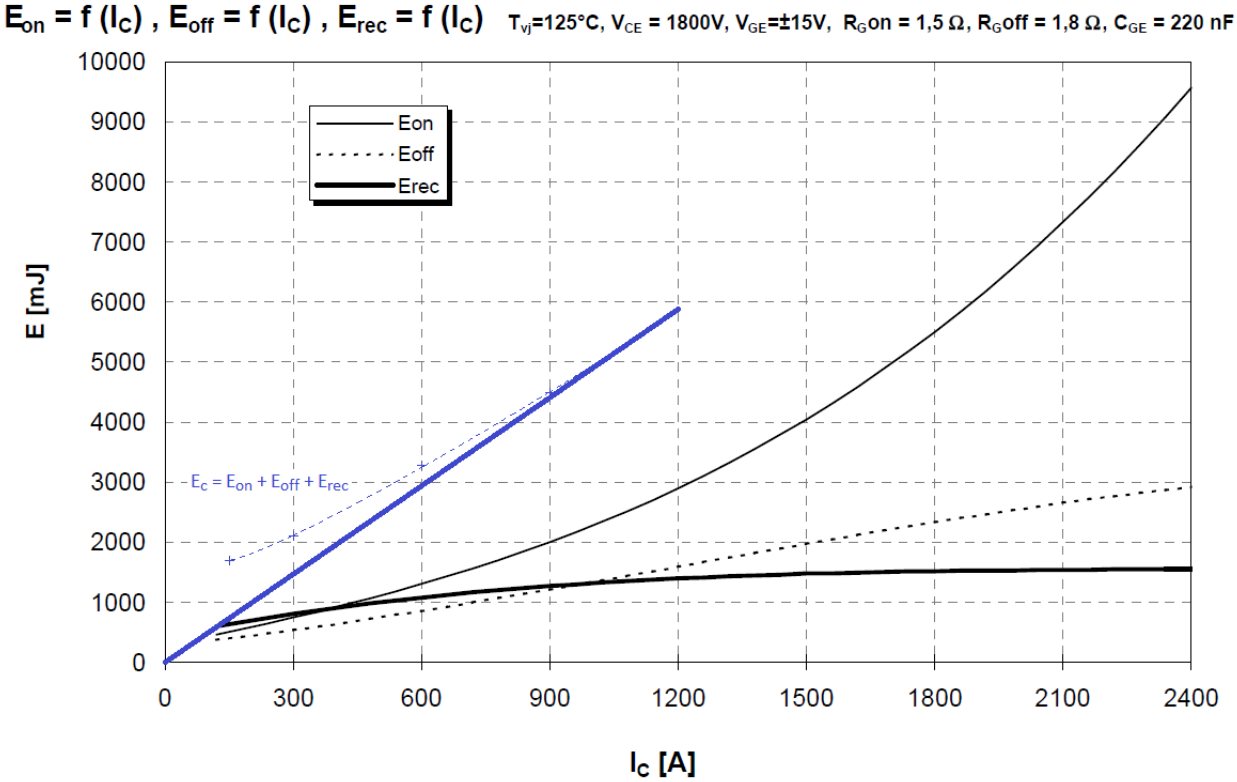
$$P_{ved,D0,jm} = U_{p,D0}\ I_{D0,stř,jm} + R_{d,D0}\ I_{D0,ef,jm}{}^2 = 1{,}4 \cdot 63 + 1{,}092 \cdot 10^{-3} \cdot 183{,}7^2 = \underline{\underline{125{,}1\,\mathrm{W}}} \tag{208}$$

pro maximální bod měniče:

$$P_{ved,D0,\max} = U_{p,D0}\ I_{D0,stř,\max} + R_{d,D0}\ I_{D0,ef,\max}{}^2 = \\ = 1{,}4 \cdot 72{,}97 + 1{,}092 \cdot 10^{-3} \cdot 212{,}8^2 = \underline{\underline{151{,}6\,\mathrm{W}}}\ . \tag{209}$$

Další ztráty, které v měniči působí, jsou ztráty vznikající přepínáním prvků, ty lze vypočítat pomocí odvozených vztahů, hodnot zapínací a vypínací energie a dalších koeficientů.

Zapínací a vypínací energii určíme z grafu poskytnutého výrobcem tranzistoru [24].



Obr. 44 : Závislost zapínací a vypínací energie IGBT tranzistoru a ztrátové energie diody, na kolektorovém proudu tranzistoru, lineárně proloženo do součtu energií ve jmenovitém kolektorovém proudu I_C tranzistoru [24].

Z grafu byly odečteny hodnoty ztrátových energií, při kolektorovém proudu 1200 A. Z těchto hodnot byla vypočtena celková přepínací energie, při jmenovitém proudu I_C tranzistoru:

$$E_{1200A} = E_{on} + E_{off} + E_{rec} = 2{,}9 + 1{,}6 + 1{,}4 = \underline{\underline{5{,}9\,\mathrm{J}}} \tag{210}$$

tato hodnota určuje bod, do kterého je sestrojena úsečka z počátku souřadnic. Pomocí této úsečky, budou určeny hodnoty ztrátové přepínací energie tranzistoru a nulové diody, pro jmenovitý a maximální výkonový bod provozu měniče.

Dále je třeba určit činitele proudového využití tranzistoru podle vztahu (186), jako poměry amplitud fázových proudů I_{A1} a typového proudu I_C tranzistoru, pro jmenovitý a maximální bod:

$$K_{jm} = \frac{I_{A1,jm}}{I_c} = \frac{732{,}6}{1200} = \underline{\underline{0{,}6105}} \tag{211}$$

$$K_{\max} = \frac{I_{A1,\max}}{I_c} = \frac{848{,}5}{1200} = \underline{\underline{0{,}7071}} \tag{212}$$

nyní můžeme dosadit do vzorce (189) pro výpočet celkových přepínacích ztrát. Dle *Obr. 34* použijeme lineární aproximaci závislosti ztrátové přepínací energie, tedy koeficient 0,318, za E dosazujeme hodnoty odečtené z grafu na *Obr. 44*.

Výpočet celkových přepínacích ztrát IGBT tranzistoru a diody:

$$P_{pr,jm} = \frac{1}{\pi}\, f\, E_{jm}\, K_{jm} = 0{,}3183 \cdot 800 \cdot 3{,}625 \cdot 0{,}6105 = \underline{\underline{563{,}5\,\mathrm{W}}} \tag{213}$$

$$P_{pr,\max} = \frac{1}{\pi}\, f\, E_{\max}\, K_{\max} = 0{,}3183 \cdot 800 \cdot 4{,}625 \cdot 0{,}7071 = \underline{\underline{832{,}8\,\mathrm{W}}} \tag{214}$$

celkové ztráty pro jmenovitý a maximální bod měniče tedy budou:

$$P_{c,jm} = n_t \left(P_{ved,t,jm} + P_{ved,D0,jm} + P_{pr,jm}\right) = 12 \cdot \left(503 + 125{,}1 + 563{,}5\right) = \underline{\underline{14{,}3\,\mathrm{kW}}} \tag{215}$$

$$P_{c,\max} = n_t \left(P_{ved,t,\max} + P_{ved,D0,\max} + P_{pr,\max}\right) = 12 \cdot \left(618{,}5 + 151{,}6 + 832{,}8\right) = \underline{\underline{19{,}23\,\mathrm{kW}}} \tag{216}$$

nyní je třeba určit účinnost motoru ve jmenovitém bodě, která není udána v materiálech od výrobce:

$$P_{mot,jm} = m\, U_{mot,f}\; I_{mot,f,jm}\; \cos\varphi_{mot}\; \eta_{mot,jm} \tag{217}$$

z tohoto vztahu je nutné vyjádřit účinnost:

$$\eta_{mot,jm} = \frac{P_{mot,jm}}{m\, \dfrac{U_{mot,s}}{\sqrt{3}}\; I_{mot,f,jm}\; \cos\varphi_{mot}} = \frac{1{,}6 \cdot 10^6}{6 \cdot \dfrac{1130}{\sqrt{3}} \cdot 518 \cdot 0{,}824} = \underline{\underline{0{,}9576}} \tag{218}$$

z vypočtených hodnot můžeme určit účinnost střídače, jako podíl výstupního činného výkonu 1. harmonické a součtu výstupního činného výkonu 1. harmonické s vypočtenými ztrátami. Vyšší harmonické z důvodu složitosti výpočtu zanedbáváme:

$$\eta_{s,jm} = \frac{\dfrac{P_{mot,jm}}{\eta_{mot,jm}}}{\dfrac{P_{mot,jm}}{\eta_{mot,jm}} + P_{c,jm}} = \frac{\dfrac{1{,}6 \cdot 10^6}{0{,}9576}}{\dfrac{1{,}6 \cdot 10^6}{0{,}9576} + 14{,}3 \cdot 10^3} = 0{,}9915 \Rightarrow \underline{\underline{99{,}15\,\%}} \tag{219}$$

stejným způsobem je proveden výpočet účinnosti motoru, při provozu v maximálním bodě:

$$\eta_{mot,\max} = \frac{P_{mot,\max}}{m\, \dfrac{U_{mot,s}}{\sqrt{3}}\; I_{mot,f,\max}\; \cos\varphi_{mot}} = \frac{1{,}85 \cdot 10^6}{6 \cdot \dfrac{1130}{\sqrt{3}} \cdot 600 \cdot 0{,}824} = \underline{\underline{0{,}9559}} \tag{220}$$

a výpočet účinnosti střídače, při provozu v maximálním bodě:

$$\eta_{s,\max} = \frac{\dfrac{P_{mot,\max}}{\eta_{mot,\max}}}{\dfrac{P_{mot,\max}}{\eta_{mot,\max}} + P_{c,\max}} = \frac{\dfrac{1{,}85 \cdot 10^6}{0{,}9559}}{\dfrac{1{,}85 \cdot 10^6}{0{,}9559} + 19{,}23 \cdot 10^3} = 0{,}9902 \Rightarrow \underline{\underline{99{,}02\,\%}} \tag{221}$$

na základě vypočtených hodnot lze konstatovat, že při maximálním výkonu, účinnost střídače mírně klesá, oproti účinnosti při provozu ve jmenovitém bodě. Účinnost střídače se v obou případech pohybuje nad hodnotou 99 %, což potvrzuje velice dobré vlastnosti použitého pohonu, využívajícího IGBT tranzistory. I při takto vysoké účinnosti však IGBT tranzistory a diody jednoho střídače produkují tepelný výkon 14,3 kW, při provozu motoru ve jmenovitém bodě. Tento výkon odpovídá výkonu, přibližně jedenácti domácích rychlovarných konvic, a je třeba jej vychladit.

8.3 Výpočet kapalinového chladiče trakčního střídače

U kapalinových chladičů je přestup tepla realizován prouděním kapaliny, těmito chladiči je nutno chladit výkonové polovodičové součástky, se ztrátovým výkonem vyšším než 1,5 kW. Celkový tepelný odpor chladiče se pohybuje v rozsahu 20 až 5 K/kW v závislosti na množství protékající kapaliny a sestává z tepelného odporu vlastní kovové masy chladiče a z tzv. ekvivalentního tepelného odporu kapaliny.

Ekvivalentní tepelný odpor kapaliny lze spočítat tam, kde kapalina proudí rychlostí v, dutinou o délce l_{DUT} a průřezu S. T_0 a T_1 jsou vstupní a výstupní teploty kapaliny, jejich rozdíl vypočteme jako $\Delta T = T_1 - T_0$, tento udává celkové oteplení kapaliny na výstupu z chladiče. $\Delta T/2$ je střední oteplení kapaliny za předpokladu, že nárůst teploty kapaliny podél dutiny je lineární, Q je objemové množství kapaliny za 1 s a P je tepelný výkon chlazené součástky [22].

Vlastnosti kapaliny: γ – měrná hmotnost, c – měrné teplo, m – hmotnost.

S využitím středního oteplení kapaliny, platí pro tepelnou kapacitu kapaliny rovnice:

$$C = \frac{W}{\frac{\Delta T}{2}} = c\ m \tag{222}$$

vydělíme-li celou rovnici časem, přejdeme od tepelné energie W k výkonu P a lze psát:

$$\frac{P}{\frac{\Delta T}{2}} = c\ \frac{m}{t} = c\ \gamma\ \frac{V}{t} = c\ \gamma\ Q = c\ \gamma\ S\ \frac{l}{t} = c\ \gamma\ S\ v \tag{223}$$

pak ekvivalentní tepelný odpor kapaliny bude:

$$R_{\vartheta ekv} = \frac{\frac{\Delta T}{2}}{P} = \frac{1}{c\ \gamma\ Q} = \frac{1}{c\ \gamma\ S\ v} \tag{224}$$

vztah pro výpočet potřebného množství kapaliny za sekundu:

$$Q = \frac{2\ P}{c\ \gamma\ \Delta T} \tag{225}$$

vztah pro výpočet potřebné rychlosti proudění kapaliny v dutině chladiče:

$$v = \frac{2\ P}{c\ \gamma\ S\ \Delta T}\ . \tag{226}$$

Výpočet potřebného množství kapaliny

Výpočet potřebného množství kapaliny za minutu, při třech rozdílných, celkových otepleních kapaliny na výstupu z chladiče, pro ΔT = 10 K:

$$Q_{10K} = \frac{2\ P_{cjm}}{c\ \gamma\ \Delta T_{10}} = \frac{2 \cdot 14{,}3 \cdot 10^3}{4{,}18 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 10} = 6{,}842 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^3/s} = \underline{\underline{41{,}05\ \mathrm{l/min}}} \tag{227}$$

pro ΔT = 15 K:

$$Q_{15K} = \frac{2\ P_{cjm}}{c\ \gamma\ \Delta T_{15}} = \frac{2 \cdot 14{,}3 \cdot 10^3}{4{,}18 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 15} = 4{,}561 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^3/s} = \underline{\underline{27{,}37\ \mathrm{l/min}}} \tag{228}$$

pro ΔT = 20 K:

$$Q_{20K} = \frac{2\ P_{cjm}}{c\ \gamma\ \Delta T_{20}} = \frac{2 \cdot 14{,}3 \cdot 10^3}{4{,}18 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 20} = 3{,}421 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^3/s} = \underline{\underline{20{,}53\ \mathrm{l/min}}}\ . \tag{229}$$

Pro chlazení jednoho trakčního měniče, při provozu ve jmenovitém bodě, bude při celkovém oteplení kapaliny 10 K potřeba množství vody 41,05 l/min. Při dvojnásobném celkovém oteplení kapaliny, tedy 20 K bude potřebné množství vody poloviční.

Výpočet potřebné rychlosti proudění kapaliny

Výpočet potřebné rychlosti proudění kapaliny v dutině chladiče, se odvíjí zejména od průřezu profilu chladicího kanálu. Plocha průzoru chladícího kanálu bude mít tvar obdélníka, její geometrie vychází z rozmístění součástek na chladiči. Součástky budou umístěny na dvou deskách, mezi kterými bude chladící voda proudit v meandrovitých kanálech. Obě desky mají stejné rozměry, a to 390 x 280 mm. Použijeme celkem 7 přepážek, rozměr *a* plochy kanálu tedy bude 48,75 mm a rozměr *b* zvolíme 20 mm.

Pro ΔT = 10 K:

$$v_{10K} = \frac{2\,P_{c,jm}}{c\,\gamma\,S\,\Delta T_{10}} = \frac{2\cdot 14{,}3\cdot 10^3}{4{,}18\cdot 10^3\cdot 10^3\cdot 48{,}75\cdot 10^{-3}\cdot 20\cdot 10^{-3}\cdot 10} = \underline{\underline{0{,}7018\,\mathrm{m/s}}} \tag{230}$$

pro ΔT = 15 K:

$$v_{15K} = \frac{2\,P_{c,jm}}{c\,\gamma\,S\,\Delta T_{15}} = \frac{2\cdot 14{,}3\cdot 10^3}{4{,}18\cdot 10^3\cdot 10^3\cdot 48{,}75\cdot 10^{-3}\cdot 20\cdot 10^{-3}\cdot 15} = \underline{\underline{0{,}4678\,\mathrm{m/s}}} \tag{231}$$

pro ΔT = 20 K:

$$v_{20K} = \frac{2\,P_{c,jm}}{c\,\gamma\,S\,\Delta T_{20}} = \frac{2\cdot 14{,}3\cdot 10^3}{4{,}18\cdot 10^3\cdot 10^3\cdot 48{,}75\cdot 10^{-3}\cdot 20\cdot 10^{-3}\cdot 20} = \underline{\underline{0{,}3509\,\mathrm{m/s}}} \tag{232}$$

z výsledků uvedených výpočtů vyplývá, že je výhodné zvolit vyšší celkový teplotní rozdíl ΔT, v důsledku toho je potřeba menší objem chladící vody a sníží se i rychlost jejího proudění.

9 ZÁVĚR

Z úvodní kapitoly vyplývá další možný způsob snižování nákladů na provoz nákladních vlaků, a to použitím nezávislé trakce pro zajištění pojezdu vlaku po neelektrifikovaných vlečkách, jako nezávislá trakce byl vybrán akumulátorový systém, jehož parametry jsou v práci vypočteny pomocí energií, potřebných pro pojezd vlaku po určené dráze vlečky.

Na základě analýzy současně vyráběných pohonů elektrických lokomotiv lze konstatovat, že se u všech analyzovaných lokomotiv trakční měniče skládají z usměrňovačů a střídačů sestavených z IGBT nebo GTO ventilů a napěťového meziobvodu, ke kterému je při provozu na stejnosměrném systému přes tlumivku přímo připojeno napětí z troleje. K tomuto meziobvodu je připojen i navrhovaný měnič pro nabíjení baterií a při provozu s nezávislou trakcí pak i baterie.

Pro návrh parametrů baterií byla nejdříve vytvořena definovaná dráha, po které vlak při použití nezávislé trakce pojede, pro názornost byla použita reálná vlečka společnosti Žďas a.s.. Dle empirických a statistických vztahů byly vypočteny potřebné síly a energie pro zdolání stanovené trasy. Výsledné hodnoty jsou relativně nízké, a to zejména z důvodu profilu vlečky, ta obsahuje dvě stoupání, která jsou obě situována ve smyslu klesání s loženými vozy a stoupání s prázdnými vozy, vzniká tedy úspora jízdou bez použití pohonu. Při využití setrvačnosti vlaku a rekuperace brzdné energie, které nejsou při výpočtu uvažovány, by energetické nároky na zdolání dané trasy dále znatelně poklesly.

Na základě získaných hodnot byl proveden návrh dvou bateriových skupin, které jsou připojeny přímo do napěťových meziobvodů trakčních měničů. Výsledná celková hmotnost baterií je přibližně 9 t, zastavěný prostor 6 m^3 a cena téměř 12 milionů korun. Prostor 6 m^3 ve strojovně lokomotivy zabírá přibližně 1,5 m délky lokomotivy. Hmotnost a cena baterií odpovídají přibližně desetině hodnoty daného parametru celé lokomotivy. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že možnost instalace bateriových skupin do běžné traťové lokomotivy nebo těžké nákladní lokomotivy je velice reálná.

V práci je dále proveden návrh nabíjecího měniče jedné poloviny jedné bateriové skupiny. Tento měnič zvyšuje napětí meziobvodu trakčního měniče na konstantní hodnotu 2200 V a posléze toto napětí snižuje na požadovanou hodnotu pro nabíjení baterií, měnič se tedy skládá z kaskádně řazených měničů STEP-UP a STEP-DOWN. Pro realizaci těchto měničů byly použity IGBT tranzistory 3,3 kV; 200A a k nim analogické nulové diody, oba měniče dále obsahují po jednom kondenzátoru a tlumivce. Tyto měniče jsou k meziobvodům trakčních měničů připojeny tak, aby respektovaly dělení meziobvodů na dvě poloviční napětí. Ve výsledku jsou tedy pro jednu bateriovou skupinu použity vždy dva měniče STEP-UP a dva měniče STEP-DOWN.

Silová a řídící část navržené poloviny nabíjecího měniče je vymodelována v prostředí Matlab Simulink. Samostatné měniče, ze kterých se nabíjecí měnič skládá, tedy STEP-UP i STEP-DOWN jsou řízeny vždy podřízenou proudovou a nadřízenou napěťovou smyčkou.

Provedená simulace prokazuje správnou funkci nabíjecího měniče STEP-UP-DOWN. Při skocích z minimálního na maximální napětí, na vstupu i výstupu měniče dochází k ustálení přechodných dějů za čas přibližně 10 ms.

V závěru práce je uvedena teorie výpočtu ztrát, vznikajících v tranzistoru a nulové diodě střídače. Na jejím základě je proveden výpočet účinnosti trakčního střídače lokomotivy ŠKODA 109E, účinnost tohoto střídače dosahuje hodnoty přes 99%, to potvrzuje důvody použití asynchronního motoru v kombinaci se střídačem, generujícím napětí s proměnnou frekvencí. Ztrátový výkon trakčního střídače při provozu ve jmenovitém bodě dosahuje hodnoty 14,3 kW. Dále byl vypočten potřebný objem vody a rychlost proudění vody v chladiči střídače.

LITERATURA

[1] Vlaky.net. „Spirit of Brno“ První Taurus v barvách Českých drah [on line]. poslední změna 19.9.2013 [cit. 2014-2-24]. http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/5061-Spirit-of-Brno-prvni-Taurus-v-barvach-Ceskych-drah/

[2] Stránky přátel železnic, Evropská lokomotiva ES 64 F4 / 189 [on line]. Jiří Konečný 2005, poslední změna 16.8.2010 [cit. 2014-2-24]. http://spz.logout.cz/vozidla/189/189.html

[3] ES64U4. Vysoce výkonná vícesystémová lokomotiva [on line]. poslední změna 7.12.2007 [cit. 2013-2-24]. http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/et/DB-ES64U4-CZ-03.pdf

[4] Atlas lokomotiv. 680 / Pendolino [on line]. poslední změna 16.4.2006 [cit. 2014-2-24]. http://www.atlaslokomotiv.net/loko-680.html

[5] Stránky přátel železnic. Elektrická vysokorychlostní jednotka řady 680 ČD [on line]. Jiří Konečný 2004, poslední změna 16.8.2010 [cit. 2014-2-24]. http://spz.logout.cz/vozidla/680/680_cd.html

[6] Pražská integrovaná doprava. Linka S4 / R4 [on line]. poslední změna 12.4.2013 [cit. 2014-2-24]. http://www.ropid.cz/data/Galleries/140/151/p1414_2_91-s4,-cityelefant_471-029-9.jpg

[7] Atlas lokomotiv. 471 [on line]. poslední změna 12.11.2013 [cit. 2014-2-24]. http://www.atlaslokomotiv.net/loko-471.html

[8] Popis elektrického vozu ř. 471 [on line]. poslední změna 14.12.2010 [cit. 2014-2-24]. http://pantograf.wz.cz/471-popis.html

[9] Atlas lokomotiv. 380 [on line]. poslední změna 31.5.2010 [cit. 2014-2-24]. http://www.atlaslokomotiv.net/loko-380.html

[10] Lokomotiva 109 E. Popis lokomotivy 109 E [on line]. poslední změna 16.11.2013 [cit. 2014-2-24]. http://109-e.wgz.cz/rubriky/popis-lokomotivy-109-e/elektricka-vyzbroj

[11] Pulzní usměrňovač - vstupní část třísystémové lokomotivy [on line]. poslední změna 23.1.2013 [cit. 2014-2-24]. http://media0.wgz.cz/files/media0:50ffae777acfa.pdf.upl/princ_puls_usmer.pdf

[12] Koncepce vozidel elektrické vozby [on line]. poslední změna 11.3.2011 [cit. 2014-2-24]. http://homen.vsb.cz/~s1i95/phv/Koncepce%20vozidel%20eletrick%C3%A9%20vozby.pdf

[13] Vagóny. Co spotřebuje vagón? [on line]. poslední změna 2.12.2013 [cit. 2014-2-24]. http://www.vagony.cz/vagony/energie.html

[14] JANSA F. : *Trakční mechanika a energetika kolejové dopravy.* Praha: Dopravní nakladatelství, 1959. 539 s. 30105/23

[15] DRÁBEK J. : *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Bratislava: Alfa, 1987. 188 s.

[16] *Nikl-kadmiové baterie SRX.* Praha: ITR International Translation Resources Ltd, 2004. Dok. č. 21130.21 – 0704. 8 s.

[17] *Nikl-kadmiové baterie SRX.* Praha: ITR International Translation Resources Ltd, 2004. Dok. č. 21123.21 – 0604. 2 s.

[18] *Instalační manuál pro PV moduly FATRASOL.* Napajedla: FATRA, a. s., 2012. Dok. č. PN 5417/2012. 24 s.

[19] PATOČKA M. : *Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 2.* Skriptum, FEKT, VUT Brno: 2005. 173 s.

[20] *Technical Information FF200R33KF2C.* eupec, 2003. 8 s.

[21] *Technical Information DD200S33K2C.* eupec, 2003. 5 s.

[22] PATOČKA M. : *Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 1.* Skriptum, FEKT, VUT Brno: 2005. 60 s.

[23] PATOČKA M. : *Matematický nástroj pro analýzu PWM signálů, jeho užití ve střídavých pohonech.* Teze Habilitační Práce, Brno: VUTIUM, 2000. 26 s. ISBN 80-214-1646-7

[24] *Technical Information FZ 1200 R 33 KF2_B5.* eupec, 2002. 9 s.

[25] *Technical Information DD 1200 S 33 K2 B5.* eupec, 2002. 6 s.

[26] Karl Gerhard Baur: *TAURUS - Lokomotiven für Europa*. Eisenbahn-Kurier-Verlag, Freiburg 2003. ISBN 3-88255-182-8 (němčina)

PŘÍLOHY

Příloha A : Nahoře řez kompletně hotovým pohonem lokomotivy ES64U4 [26], dole uspořádání zařízení ve strojovně lokomotivy ES64U4 [3].

Příloha B : Trakční / brzdová charakteristika lokomotivy ES64U4, nahoře provoz na střídavé napětí, dole provoz na stejnosměrné napětí [3].

Příloha C : Nahoře pohled na střechu lokomotivy 109E s popisky, dole pohled na strojovnu lokomotivy 109E s popisky [10].

Příloha D : Trakční blokové schéma lokomotivy 109E [10].

Příloha E : Technické údaje analyzovaných elektrických lokomotiv, čerpáno z [3], [4], [7] a [9].