

**Univerzita Hradec Králové**  
**Pedagogická fakulta**  
**Katedra technických předmětů**

**ENERGETICKÝ MIKROZDROJ MALÉHO VÝKONU SE  
SYNCHRONNÍM ALTERNÁTOREM V OSTROVNÍM REŽIMU,  
STABILIZOVANÝ SINUSOVÝM STRÍDAČEM.**

**Diplomová práce**

Autor: Ondřej Gregor  
Studijní obor: Učitelství pro základní školy - fyzika  
Učitelství pro základní školy - základy techniky  
Vedoucí práce: doc. PaedDr. René Drtina, Ph.D.  
Hradec Králové

2020

## Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta

|                      |  |
|----------------------|--|
| Jméno a příjmení:    | <b>Ondřej Gregor</b>   |
| Osobní číslo:        | <b>P14P0075</b>  |
| Adresa:              | Křížová 104, Trutnov – Voletiny, 54101 Trutnov 1, Česká republika  |
| Téma práce:          | Energetický mikrozdvoj malého výkonu se synchronním alternátorem v ostrovním režimu, stabilizovaný sinusovým střídačem |
| Téma práce anglicky: | A sinusoidal inverter stabilized energy low power microsource with synchronous alternator in island mode               |
| Vedoucí práce:       | doc. PaedDr. René Drtina, Ph.D.<br>Katedra technických předmětů  |

### Zásady pro vypracování:

Cílem DP je návrh a realizace modelového energetického mikrozdvoje pro provoz v ostrovní síti 230 V s výkonem do 1 kVA, se synchronním alternátorem s proměnnými otáčkami a stabilizací výstupního napětí sinusovým střídačem. Struktura práce: Význam energetických mikrozdvoje v ostrovních sítích, typy synchronních alternátorů a jejich možné použití s různými typy pohonů, možnosti využití automobilových alternátorů pro konstrukci mikroelektrárny, lineární a pulzní regulace buzení alternátoru, statické a dynamické budící a zátěžové charakteristiky alternátoru, přímá transformace napětí, sinusový měnič jako stabilizátor výstupního napětí a frekvence. Návrh mechanické a elektrické koncepce modelového mikrozdvoje. Realizace navržené konstrukce, ověření funkčnosti, zátěžové charakteristiky, vyhodnocení účinnosti, doporučení pro aplikaci mikrozdvoje do 1 kVA. The objective of the diploma thesis is to design and implement a model power micro-source for operation on a 230 V island network with a power of up to 1 kVA, with a synchronous alternator with variable speeds and stabilization of output voltage by a sinusoidal inverter. Significance of energy microelectronics in island networks, types of synchronous alternators and their possible use with different types of drives, possibilities of utilization of automotive alternators for construction of water or wind microelectronics, linear and pulse regulation of alternator excitation, static and dynamic excitation and load characteristics of alternator, direct voltage transformation, sine changer as a voltage and frequency stabilizer. Design of mechanical and electrical concept of model micro-source. Realization of designed design, verification of functionality, measurement of characteristics, evaluation of efficiency, recommendations for application of microsources up to 1 kVA.

### Seznam doporučené literatury:

DRTINA, R. – LOKVENC, J. – ŠEDIVÝ, J. – ŠKODA, J. The concept of mechanical part of the model micro-energy sources for electrical laboratories. In Advanced Engineering Technology II. Pfaffikon. Trans Tech Publications. 2016. pp. 810-815. DRTINA, R. – LOKVENC, J. – ŠEDIVÝ, J. – ŠKODA, J. The concept of electrical part of the model micro-energy sources for electrical laboratories. In Advanced Engineering Technology II. Pfaffikon. Trans Tech Publications. 2016. pp. 805-809. ŠKODA, J. Asynchronní generátory a jejich využití v praxi. Hradec Králové. UHK. 2016. Diplomová práce. LÁNÍČEK, T. Asynchronní generátor v izolované (ostrovní) síti. Brno. VUT. 2004. HORNÍK, V. Operation of small hydroelectric power plants and employment of self-excited induction generators. Brno. VUT. 2013. LOKVENC, J. – DRTINA, R. Asynchronous machine sets for electrical laboratories – Part 2: Power characteristics. Bern. IEEE. 2017. ČSN EN 50438 ed. 2. Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. Praha. ČNI. 2014. ČSN ISO 8528-3. Zdrojová soustrojí střídavého proudu poháněná pístovými spalovacími motory – Část 3: Generátory střídavého proudu pro zdrojová soustrojí. Praha. ČNI. 2011. ČSN EN 60034-22 ed. 2. Točivé elektrické stroje – Část 22: Střídavé generátory pro zdrojová soustrojí poháněná pístovými spalovacími motory. Praha. ČNI. 2010. ČSN IEC/TR 61439-0. Rozváděče nízkého napětí – Část 0: Návod na specifikaci rozváděčů. Praha. ČNI. 2015. ČSN EN 61439-1 ed. 2. Rozváděče nízkého napětí – Část 1: Všeobecná ustanovení. Praha. ČNI. 2012. ČSN EN 61439-1 ed. 2. Rozváděče nízkého napětí – Část 2: Výkonové rozváděče. Praha. ČNI. 2012. ČSN EN 61439-5 ed. 2. Rozváděče nízkého napětí – Část 5: Rozváděče pro veřejné

distribuční sítě. Praha. ČNI. 2015. ČSN EN 61140 ed. 3. Ochrana před úrazem elektrickým proudem – Společná hlediska pro instalaci a zařízení. Praha. ČNI. 2016. ČSN 33 2000-4-41 ed. 2. Elektrické instalace nízkého napětí – Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti – Ochrana před úrazem elektrickým proudem. Praha. ČNI. 2007. další související normy

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum:

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité zdroje.

Diplomová práce byla zpracována s podporou SV PdF 2126/2018.

V Hradci Králové dne:

## **Citace**

GREGOR, O. *Energetický mikrozdroy malého výkonu se synchronním alternátorem v ostrovním režimu, stabilizovaný sinusovým střídačem*. Hradec Králové: Pedagogická fakulta Univerzity Hradec Králové, 2020. Diplomová práce.

## **Anotace**

Klíčová slova: alternátor, sinusový střídač, buzení, charakteristiky.

Diplomová práce popisuje celý průběh specifického výzkumu, od návrhu po realizaci až k jeho výsledku. Práce je rozdělena do pěti hlavních částí. První část se zabývá možnostmi využití generátorů pro větrné a vodní mikrozdroje, které pracují v ostrovním režimu. Dále popisuje návrh a stavbu motorgenerátorového soustrojí a parametry každého základního komponentu, především točivých strojů.

Druhá část je zaměřena na provozní zkoušky motorgenerátorového soustrojí. Obsahuje popis okruhu hnací jednotky, jištění hnací jednotky a její ovládání frekvenčním měničem. U okruhu alternátoru jsou uvedeny podrobnosti ohledně jeho měření a jištění. Dále uvádí několik možných způsobů buzení alternátoru, obvod sinusového střídače a také návrh rozvaděče.

Třetí část představuje průběh měření motorgenerátorového soustrojí s různými možnostmi zapojení. Nejprve jsou zde zobrazeny charakteristiky motoru bez zátěže. Další charakteristiky se týkají různých typů buzení a jejich porovnání, a také napájení ze sítě či s frekvenčním měničem. Kromě zmíněných charakteristik jsou zde také k nalezení termosnímky, které znázorňují zahřívání a chladnutí soustrojí. Také jsou zde uvedeny situace, kdy došlo k havárii alternátoru a problému s kolísáním výstupního proudu ze sinusového střídače.

Čtvrtá část se zaměřuje na zlepšení motorgenerátorového soustrojí. Je zde zmíněno, proč došlo k nutnosti vyměnit motor a upravit regulátor. Kromě vylepšení a úprav také znázorňuje voltampérové charakteristiky a jejich porovnání.

Pátá část je zaměřena na pedagogické využití motorgenerátorového soustrojí na základních, středních a vysokých školách. Popisuje teoretické i praktické možnosti využití soustrojí v široké nabídce vyučovacích předmětů podle oboru, náročnosti a využití pro studenty, žáky a učitele.

## References

GREGOR, O. *A sinusoidal inverter stabilized energy low power microsource with synchronous alternator in island mode*. Hradec Králové: Faculty of Education, University of Hradec Králové, 2020. Diploma thesis.

## Annotation

Keywords: alternator, sine wave inverter, excitation, characteristics.

The diploma thesis describes the whole course of the specific research since its draft to its implementation and the result. The thesis is divided into five main parts. The content of the first part is focused on the possibilities of using generators for wind and water island mode micro sources. It also describes the proposition of a motor-generator set construction, the parameters of each basic component, especially rotating machines.

The second part is focused on the motor generator set operational tests. There is the description of the drive unit circuit, drive unit protection, and its control by the frequency converter. There are also the details of the alternator circuit measurement and protection. It also states several possible ways of exciting the alternator, the circuit of the sine wave inverter and the proposition of the switchboard.

The third part presents the motor generator set practical tests. It states the characteristics of the engine idle at first. Further characteristics concerns different types of excitation and their comparison and mains supply and frequency converter power supply. In addition to the mentioned characteristics there are also several thermal images pictured that show the heating and cooling of the unit. There are also some descriptions stated of the unhappy moments that have occurred during the research, such as alternator crash situations and a problem with output current fluctuations from a sinusoidal inverter.

The fourth part focuses on the improvement of the motor generator set. The necessity of replacing the motor and adjusting the controller is mentioned in this part. In addition to improvements and modifications, it also shows volt-ampere characteristics and their comparison.

The fifth part is focused on the pedagogical use of the motor generator set at primary and secondary schools and universities. It describes the theoretical and practical possibilities of the set use in a wide range of educational subjects in compliance with the field, complexity and use for students, pupils and teachers.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že diplomová práce je uložena v souladu s rektorským výnosem č. 1/2013 (Řád pro nakládání se školními a některými jinými autorskými díly na UHK).

Datum:

Podpis:

## OBSAH

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
|          | <b>OBSAH</b>  | <b>8</b>  |
|          | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>                                     | <b>10</b> |
|          | <b>SEZNAM TABULEK</b>                                     | <b>13</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>                 | <b>14</b> |
|          | <b>ÚVOD</b>   | <b>20</b> |
| <b>1</b> | <b>KONCEPCE MĚŘÍCIHO SOUSTROJÍ</b>                        | <b>21</b> |
| 1.1      | Generátory pro mikrozdroje                                | 21        |
| 1.2      | Základní požadavky modelového soustrojí                   | 24        |
| 1.2.1    | Mechanické parametry                                      | 24        |
| 1.2.2    | Elektrické parametry                                      | 24        |
| <b>2</b> | <b>ŘEŠENÍ MECHANICKÉ ČÁSTI</b>                            | <b>26</b> |
| 2.1      | Základová deska   | 26        |
| 2.2      | Točivé stroje   | 27        |
| 2.2.1    | Motor   | 27        |
| 2.2.2    | Generátor   | 28        |
| 2.3      | Řemenový převod   | 29        |
| 2.4      | Spojovací materiál  | 30        |
| <b>3</b> | <b>PROVOZNÍ ZKOUŠKA MOTORGENERÁTOROVÉ JEDNOTKY</b>        | <b>32</b> |
| 3.1      | Remanentní magnetismus                                    | 32        |
| 3.2      | Převodní charakteristiky alternátoru                      | 34        |
| <b>4</b> | <b>OKRUH HNACÍ JEDNOTKY</b>                               | <b>35</b> |
| 4.1      | Jištění hnací jednotky                                    | 35        |
| 4.2      | Provozní spínač   | 35        |
| 4.3      | Frekvenční měnič  | 36        |
| 4.4      | Schéma zapojení hnací jednotky                            | 37        |
| <b>5</b> | <b>OKRUH ALTERNÁTORU</b>                                  | <b>39</b> |
| 5.1      | Měření a jištění alternátoru                              | 40        |
| 5.2      | Buzení alternátoru  | 41        |
| 5.2.1    | Pulzní buzení   | 41        |
| 5.2.2    | Externí buzení  | 42        |
| 5.2.3    | Lineární buzení   | 43        |
| 5.3      | Výkonové obvody alternátoru                               | 43        |
| 5.3.1    | Obvod malého napětí                                       | 43        |
| 5.3.2    | Obvod sinusového střídače                                 | 44        |
| <b>6</b> | <b>ROZVADĚČ SOUSTROJÍ</b>                                 | <b>46</b> |
| 6.1      | Proporcionální regulátor                                  | 47        |
| <b>7</b> | <b>VSTUPNÍ CHARAKTERISTIKY POHONU SOUSTROJÍ</b>           | <b>49</b> |
| 7.1      | Rozběh motoru naprázdno                                   | 49        |
| 7.2      | Rozběh motoru s připojeným alternátorem                   | 51        |
| <b>8</b> | <b>PŘEDVODNÍ CHARAKTERISTIKY ALTERNÁTORU</b>              | <b>54</b> |
| 8.1      | Charakteristiky pulzního buzení                           | 54        |
| 8.2      | Charakteristiky externího lineárního buzení               | 56        |
| 8.3      | Porovnání charakteristik alternátoru                      | 58        |
| 8.4      | Nové poznatky - přínos havárie alternátoru                | 60        |
| 8.4.1    | Vnitřní zapojení alternátoru                              | 60        |
| 8.4.2    | Vlastnosti pulzních regulátorů                            | 61        |
| <b>9</b> | <b>VÝKONOVÉ CHARAKTERISTIKY SOUSTROJÍ</b>                 | <b>65</b> |
| 9.1      | Výkonové charakteristiky při napájení frekvenčním měničem | 65        |
| 9.2      | Výkonové charakteristiky při napájení ze sítě             | 69        |



|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>10</b> | <b>TEPELNÉ ZATÍŽENÍ ALTERNÁTORU PŘI PROVOZU</b>                       | <b>71</b>  |
| 10.1      | Průběh tepelného zatížení alternátoru v provozu                       | 71         |
| 10.2      | Průběh tepelného zatížení alternátoru po zastavení provozu            | 74         |
| <b>11</b> | <b>MOŽNOSTI KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ STŘÍDAČŮ</b>                         | <b>76</b>  |
| 11.1      | Transformátorové střídače   | 76         |
| 11.2      | Beztransformátorové střídače  | 78         |
| <b>12</b> | <b>STŘÍDAČ MW TS-1500-212B</b>  | <b>80</b>  |
| 12.1      | Provozní zkouška - první problém                                      | 81         |
| 12.2      | Náběhová charakteristika střídače MW TS-1500-212B                     | 82         |
| 12.3      | Ochrana proti přepětí   | 83         |
| 12.4      | Vypínání střídače   | 84         |
| <b>13</b> | <b>VÝKONOVÉ A ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY STŘÍDAČE MW TS-1500-212B</b> | <b>86</b>  |
| 13.1      | Základní výkonová charakteristika střídače MW TS-1500-212B            | 86         |
| 13.2      | Kolísání vstupního proudu střídače                                    | 87         |
| 13.3      | Charakteristiky střídače v závislosti na vstupním napětí a výkonu     | 89         |
| 13.4      | Srovnávací charakteristiky  | 92         |
| <b>14</b> | <b>SIMULAČNÍ OPTIMALIZACE</b>   | <b>95</b>  |
| <b>15</b> | <b>ÚPRAVA REGULÁTORU</b>  | <b>97</b>  |
| <b>16</b> | <b>VÝMĚNA HNACÍHO MOTORU</b>  | <b>99</b>  |
| <b>17</b> | <b>STABILITA REGULAČNÍHO OBVODU</b>                                   | <b>101</b> |
| 17.1      | Stabilita napětí  | 101        |
| 17.2      | Rychlost odezvy (překmit napětí)                                      | 103        |
| <b>18</b> | <b>VOLTAMPÉROVÉ A BUDICÍ CHARAKTERISTIKY</b>                          | <b>105</b> |
| 18.1      | Charakteristiky podle otáček  | 105        |
| 18.2      | Elektrický výkonový zisk  | 108        |
| 18.3      | Srovnávací charakteristiky  | 109        |
| 18.4      | Omezující faktory charakteristik                                      | 112        |
| 18.4.1    | Mechanický výkon  | 112        |
| 18.4.2    | Magnetická indukce v mezeře   | 112        |
| 18.4.3    | Reaktance statorového vinutí  | 112        |
| <b>19</b> | <b>DIDAKTICKÉ VYUŽITÍ</b>   | <b>114</b> |
| 19.1      | Možnosti didaktického využití návrhů elektrických obvodů              | 114        |
| 19.2      | Elektrotechnika 1 a Elektrotechnika 2                                 | 114        |
| 19.3      | Průmyslová elektrotechnika, Technická praktika elektro                | 114        |
| 19.4      | Integrované obvody, výkonová elektrotechnika a řídicí systémy         | 115        |
| 19.5      | Bezpečnost především  | 115        |
| 19.6      | Nezávislost na distribuční síti                                       | 115        |
|           | <b>ZÁVĚR</b>  | <b>116</b> |
|           | <b>POUŽITÉ ZDROJE</b>   | <b>117</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| Obr.1 Diskový generátor VAWT Seahawk   | 21 |
| Obr.2 Oběžné kolo turbíny VAWT Seahawk s pomaloběžným diskovým generátorem           | 21 |
| Obr.3 Synchronní generátor Rotek STC5-1  | 22 |
| Obr.4 Automobilový alternátor  | 23 |
| Obr.5 Části alternátoru  | 24 |
| Obr.6 Motor KEM 2L-100L-4 2,2 kW 1 445 ot/min  | 27 |
| Obr.7 Typový štítek motoru KEM 2L-100L-4   | 28 |
| Obr.8 Alternátor Bosch CA1394IR 14 V/120 A s pevnou šestidrážkovou řemenicí PK 65 mm | 28 |
| Obr.9 Drážková řemenice PK200-6 TB3020 s upínacím pouzdem                            | 29 |
| Obr.10 Sestavené soustrojí bez rozvaděče   | 31 |
| Obr.11 Rotor alternátoru Bosch CA1394IR  | 32 |
| Obr.12 Závislost výstupního napětí alternátoru na otáčkách (remanentní magnetismus)  | 33 |
| Obr.13 Převodní charakteristiky alternátoru  | 34 |
| Obr.14 Motorová spoušť SEZ MIS   | 35 |
| Obr.15 Frekvenční měnič Hitachi WJ200-022HFE   | 36 |
| Obr.16 Schéma zapojení hnací jednotky  | 38 |
| Obr.17 Stator alternátoru CA1394IR   | 39 |
| Obr.18 Rotor alternátoru CA1394IR  | 40 |
| Obr.19 Schéma zapojení generátorové jednotky   | 41 |
| Obr.20 Regulátor Bosch F00M A45 209 BR14-TO bez krytu elektroniky                    | 42 |
| Obr.21 Připojovací body regulátoru Bosch   | 42 |
| Obr.22 Závislost ztrátového výkonu regulačního tranzistoru na budicím proudu         | 43 |
| Obr.23 Střídač MeanWell TS-1500  | 44 |
| Obr.24 Vnitřní uspořádání střídače MeanWell TS-1500                                  | 45 |
| Obr.25 Návrh panelu rozvaděče  | 46 |
| Obr.26 Návrh lineárního PNP regulátoru pro alternátor CA1394IR                       | 47 |
| Obr.27 Návrh lineárního regulátoru pro alternátor CA1394IR s NPN tranzistorem        | 48 |
| Obr.28 Rozběh asynchronního motoru naprázdno při $f = 50$ Hz                         | 49 |
| Obr.29 Rozběh asynchronního motoru naprázdno řízený frekvenčním měničem              | 50 |
| Obr.30 Rozběh zatíženého asynchronního motoru při $f = 50$ Hz                        | 51 |
| Obr.31 Detail na začátku rozběhové charakteristiky zatíženého motoru                 | 52 |
| Obr.32 Rozběh zatíženého asynchronního motoru řízený frekvenčním měničem             | 53 |
| Obr.33 Převodní charakteristiky alternátoru pro stanovení pracovního rozsahu otáček  | 54 |
| Obr.34 Zapojení koncového stupně pulzního regulátoru typu EE                         | 55 |
| Obr.35 Charakteristiky alternátoru   | 55 |
| Obr.36 Charakteristiky alternátoru   | 55 |
| Obr.37 Charakteristiky alternátoru   | 56 |
| Obr.38 Pulzní buzení alternátoru   | 56 |
| Obr.39 Charakteristiky alternátoru   | 57 |
| Obr.40 Charakteristiky alternátoru   | 57 |
| Obr.41 Charakteristiky alternátoru   | 58 |
| Obr.42 Externí lineární buzení alternátoru   | 58 |
| Obr.43 Budicí proud bez zátěže   | 59 |
| Obr.44 Budicí proud a výstupní napětí  | 59 |
| Obr.45 Budicí proud a výstupní napětí  | 59 |
| Obr.46 Budicí proud při zatížení   | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Obr.47 Propojky v diodovém můstku   | 61 |
| Obr.48 Vnitřní zapojení alternátoru   | 61 |
| Obr.49 Původní regulátor s připájenými vývody                                       | 61 |
| Obr.50 Elektronika regulátoru nové generace   | 62 |
| Obr.51 Průběhy budicího napětí alternátoru  | 63 |
| Obr.52 Průběh výstupního napětí alternátoru   | 63 |
| Obr.53 Pulzní regulátor Topran 100-134 14V s připájenými spojovacími vodiči         | 63 |
| Obr.54 Průběh budicího napětí alternátoru   | 64 |
| Obr.55 Průběh výstupního napětí alternátoru   | 64 |
| Obr.56 Charakteristiky soustrojí při otáčkách alternátoru 2 890 ot/min              | 65 |
| Obr.57 Charakteristiky soustrojí při otáčkách alternátoru 4 335 ot/min              | 66 |
| Obr.58 Termická komprese ve vinutí alternátoru                                      | 67 |
| Obr.59 Termosnímek alternátoru zatíženého jmenovitým proudem 120 A                  | 68 |
| Obr.60 K rovnicím (9) a (10)  | 68 |
| Obr.61 Charakteristiky soustrojí při otáčkách alternátoru 5 780 ot/min              | 69 |
| Obr.62 Charakteristiky soustrojí při napájení ze sítě a z frekvenčního měniče       | 70 |
| Obr.63 Snímek v časovém intervalu 0 minut   | 71 |
| Obr.64 Snímek v časovém intervalu 1 minuta  | 71 |
| Obr.65 Snímek v časovém intervalu 2 minuty  | 72 |
| Obr.66 Snímek v časovém intervalu 3 minuty  | 72 |
| Obr.67 Snímek v časovém intervalu 4 minuty  | 72 |
| Obr.68 Snímek v časovém intervalu 5 minut   | 73 |
| Obr.69 Snímek v časovém intervalu 10 minut  | 73 |
| Obr.70 Snímek v časovém intervalu 15 minut  | 73 |
| Obr.71 Snímek 1 minuta po zastavení   | 74 |
| Obr.72 Snímek 5 minut po zastavení  | 74 |
| Obr.73 Snímek 8 minut po zastavení  | 75 |
| Obr.74 Snímek 10 minut po zastavení   | 75 |
| Obr.75 Průběhy výstupního napětí střídačů   | 76 |
| Obr.76 Principiální schéma samokmitajícího střídače                                 | 77 |
| Obr.77 Principiální schéma výkonového transformátorového střídače                   | 77 |
| Obr.78 Principiální schéma střídače bez výstupního transformátoru                   | 78 |
| Obr.79 K principu pulzně-šifkové modulace   | 78 |
| Obr.80 Střídač MicroControl 12/300  | 79 |
| Obr.81 Výstupní napětí při 10% zatížení   | 79 |
| Obr.82 Výstupní napětí při 80% zatížení   | 79 |
| Obr.83 Střídač MW TS-1500-212B nainstalovaný na rozvaděči soustrojí                 | 80 |
| Obr.84 Vnitřní uspořádání střídače MW TS-1500-212B s vyznačením tepelných toků      | 81 |
| Obr.85 Náběhová charakteristika střídače MW TS-1500-212B                            | 82 |
| Obr.86 Upravené schéma zapojení generátorové jednotky                               | 83 |
| Obr.87 Vstupní filtr na střídače MW TS-1500-212B                                    | 84 |
| Obr.88 Pokles výstupního napětí střídače MW TS-1500-212B při přerušení napájení     | 84 |
| Obr.89 Oscilogram výstupního napětí střídače MW TS-1500-212B při přerušení napájení | 85 |
| Obr.90 Výkonová charakteristika střídače MW TS-1500-212B                            | 86 |
| Obr.91 Proudový snímač  | 87 |
| Obr.92 Oscilogram zvlnění napájecího proudu   | 87 |
| Obr.93 Výpis dat z oscilogramu z obr.92   | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| Obr.94 Kolísání napájecího proudu v závislosti na výstupním výkonu střídače     | 88  |
| Obr.95 Omezovač přepětí 15 V/60 A   | 88  |
| Obr.96 Charakteristiky střídače bez zatížení                                    | 89  |
| Obr.97 Charakteristiky při zátěži 250 W   | 90  |
| Obr.98 Charakteristiky při zátěži 500 W   | 90  |
| Obr.99 Charakteristiky při zátěži 1 kW  | 91  |
| Obr.100 Charakteristiky při zátěži 1,25 kW                                      | 91  |
| Obr.101 Charakteristiky výstupního napětí                                       | 92  |
| Obr.102 Charakteristiky vstupního proudu  | 93  |
| Obr.103 Charakteristiky příkonu střídače  | 93  |
| Obr.104 Charakteristiky účinnosti střídače                                      | 94  |
| Obr.105 Schéma zapojení ověřovací verze lineárního regulátoru                   | 95  |
| Obr.106 Deska plošných spojů lineárního regulátoru (skutečná velikost)          | 95  |
| Obr.107 Osazená deska plošných spojů ověřovacího lineárního regulátoru          | 96  |
| Obr.108 Odezva na jednotkový skok   | 97  |
| Obr.109 Schéma zapojení finální verze lineárního regulátoru                     | 98  |
| Obr.110 Upravená deska plošných spojů lineárního regulátoru                     | 98  |
| Obr.111 Měřicí soustrojí s novým motorem Celma-Indukta 2SIE112M6                | 100 |
| Obr.112 Otevřený rozvaděč soustrojí   | 101 |
| Obr.113 Lineární regulátor v rozvaděči měřícího soustrojí                       | 102 |
| Obr.114 Pokles výstupního napětí alternátoru naprázdno v závislosti na otáčkách | 102 |
| Obr.115 Překmit napětí při odpojení zátěže                                      | 104 |
| Obr.116 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru              | 105 |
| Obr.117 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru              | 106 |
| Obr.118 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru              | 106 |
| Obr.119 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru              | 107 |
| Obr.120 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru              | 107 |
| Obr.121 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru              | 108 |
| Obr.122 Porovnání elektrického výkonového zisku                                 | 109 |
| Obr.123 Porovnání výstupního napětí   | 109 |
| Obr.124 Porovnání budicího napětí   | 110 |
| Obr.125 Porovnání budicího proudu   | 110 |
| Obr.126 Porovnání budicího výkonu   | 111 |
| Obr.127 Porovnání výstupního výkonu   | 111 |
| Obr.128 Zjednodušené náhradní schéma fáze generátoru                            | 113 |

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tab.1 Parametry turbíny VAWT Seahawk   | 22 |
| Tab.2 Parametry generátoru Rotek STC5-1  | 23 |
| Tab.3 Vlastnosti materiálu Textit HGW 2082   | 26 |
| Tab.4 Základní parametry hnacího motoru  | 27 |
| Tab.5 Základní parametry generátoru  | 29 |
| Tab.6 Základní parametry převodu   | 30 |
| Tab.7 Výstupní napětí alternátoru indukované remanentním magnetismem                     | 33 |
| Tab.8 Základní parametry frekvenčního měniče Hitachi WJ200-022HFE                        | 37 |
| Tab.9 Funkce sekcí hlavního spínače  | 38 |
| Tab.10 Funkční význam sekcí hlavního spínače   | 38 |
| Tab.11 Základní parametry alternátoru  | 39 |
| Tab.12 Spínání budicího okruhu alternátoru   | 41 |
| Tab.13 Základní parametry střídače MeanWell TS-1500                                      | 44 |
| Tab.14 Vstupní data rozběhu asynchronního motoru naprázdno                               | 49 |
| Tab.15 Vstupní data rozběhu asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem            | 50 |
| Tab.16 Vstupní data rozběhu zatíženého asynchronního motoru                              | 52 |
| Tab.17 Vstupní data rozběhu zatíženého asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem | 53 |
| Tab.18 Výstupní hodnoty při otáčkách alternátoru 2 890 ot/min                            | 66 |
| Tab.19 Výstupní hodnoty při otáčkách alternátoru 4 335 ot/min                            | 67 |
| Tab.20 Výstupní hodnoty při otáčkách alternátoru 5 780 ot/min                            | 69 |
| Tab.21 Výstupní hodnoty při proměnných otáčkách alternátoru                              | 70 |
| Tab.22 Základní parametry střídače MW TS-1500-212B                                       | 81 |
| Tab.23 Vybrané body charakteristik   | 86 |
| Tab.24 Základní parametry nového hnacího motoru Celma-Indukta                            | 99 |

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

|                    |   |
|--------------------|---|
| $^{\circ}\text{C}$ | stupeň Celsia   |
| %                  | procento  |
| $\emptyset$        | průměr  |
| A                  | ampér   |
| AC                 | střídavý proud  |
| $A_P$              | výkonový zisk   |
| B                  | magnetická indukce  |
| b                  | útlum (potlačení změny)   |
| c                  | aerodynamický součinitel odporu                                   |
| C                  | konstanta (stálé výstupní napětí), normované konstanta generátoru |
| cm                 | centimetr   |
| $\cos\varphi$      | účiník  |
| D                  | průměr motoru strojí  |
| DC                 | stejnoseměrný proud   |
| EXT                | externí buzení  |
| $F_a$              | aerodynamická síla  |
| $F_{G(j\omega)}$   | frekvenční přenos generátoru                                      |
| FQC                | připojení frekvenčního měniče k síti                              |
| $F_{R(j\omega)}$   | frekvenční přenos regulátoru                                      |
| $\text{g/cm}^3$    | gram na centimetr krychlový                                       |
| Hz                 | hertz   |
| I                  | elektrický proud  |
| $I_b$              | budicí proud  |
| $I_{BA}$           | budicí proud alternátoru  |
| $I_{in}$           | proud měniče  |
| $I_{mot}$          | proud ve fázi   |
| $I_{out}$          | výstupní proud  |
| J                  | moment setrvačnosti rotujících částí                              |
| kA                 | kiloampér   |
| kg                 | kilogram  |
| $\text{kJ/m}^2$    | kilojoule na metr čtverečný                                       |
| kN                 | kilonewton  |
| KTP                | katedra technických předmětů                                      |
| $\text{kV/mm}$     | kilovolt na milimetr  |
| kVA                | kilovoltampér   |
| kW                 | kilowatt  |
| l                  | délka vodiče, aktivní délka vinutí                                |
| LIN                | lineární buzení   |

|               |   |
|---------------|---|
| M             | točivý (kroutící) moment  |
| m/s           | metr za sekundu   |
| mA            | miliampér   |
| $M_G$         | točivý moment na hřídeli  |
| $M_i$         | vnitřní elektromagnetický moment                                    |
| min           | minuta  |
| mm            | milimetr  |
| MOT           | přímé připojení hnacího motoru k napájecí síti                      |
| MPa           | megapascal  |
| ms            | milisekunda   |
| mV/A          | milivolt na ampér   |
| N             | newton  |
| n             | počet otáček, počet závitů cívky, počet lopatek ventilátoru         |
| Nm            | newtonmetr  |
| ot/min        | otáčky za minutu  |
| P             | výkon   |
| $P_a$         | mechanický výkon  |
| $P_b$         | budicí výkon  |
| $P_c$         | tepelný výkon   |
| PDF           | pedagogická fakulta   |
| $P_G$         | výkon generátoru  |
| $P_{in}$      | příkon  |
| $P_m$         | mechanických výkon na hřídeli                                       |
| $P_{out}$     | výstupní výkon  |
| PWR           | přímé připojení frekvenčního měniče k hnacímu motoru, pulzní buzení |
| r             | vzdálenost od osy   |
| $R_0$         | odpor studeného vinutí  |
| $R_{ff}$      | mezifázový odpor  |
| $R_m$         | magnetický odpor  |
| $R_t$         | odpor teplého vinutí  |
| $R_v$         | odpor vinutí  |
| S             | čelní plocha ve směru proudění                                      |
| $S_{Fe}, S_m$ | průřez magnetického obvodu  |
| t             | čas   |
| $t_0$         | teplota okolí   |
| $t_{Cu}$      | teplota vinutí  |
| U             | elektrické napětí, indukované napětí, výstupní napětí               |
| $U_0$         | výstupní napětí   |
| $U_b$         | budicí napětí   |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $U_{CE}$              | napětí na regulačním tranzistoru                     |
| UHK                   | Univerzita Hradec Králové                            |
| $U_{mot}$             | napájecí napětí                                      |
| $U_z$                 | mezní napětí   |
| $v$                   | rychlost vodiče v magnetickém poli, rychlost vzduchu |
| V                     | volt   |
| VA                    | voltampér  |
| W                     | watt   |
| $\Delta U_1$          | rozdíl vstupních napětí                              |
| $\Delta U_2$          | rozdíl výstupních napětí                             |
| $\eta$                | účinnost   |
| $\mu$                 | mikro  |
| $\rho$                | měrná hmotnost vzduchu                               |
| $\tau$                | časová konstanta                                     |
| $\varphi_{G(\omega)}$ | fázový posuv generátoru                              |
| $\varphi_{R(\omega)}$ | fázový posuv generátoru                              |
| $\Omega$              | ohm  |
| $\omega$              | úhlová rychlost                                      |



## ÚVOD

V dnešní době se často mluví o modernizaci, především v automobilovém průmyslu. Od vzniku prvního elektromobilu se spustila lavina požadavků, které by měly elektromobily splňovat. Elektromobilů neustále přibývá a tím se neúměrně zvyšuje poptávka po dobíjecích stanicích, po kterých se vyžaduje rychlodobíjení. Tím se obrovsky zvyšuje spotřeba elektrické energie. Mnoha zemích už se narazilo na problém, že elektromobily není z čeho dobíjet. Proto se klade velký důraz na výzkum, aby elektromobily měly menší spotřebu elektrické energie. Kvůli enormnímu zvyšování počtů elektromobilů je nutné, aby se zvýšila výroba elektrické energie. Pokud možno stavět elektrárny, které jsou levné na stavbu, levné na provoz, mají velký výkon a nejlépe bezemisní.

Jako alternativní zdroje elektrické energie se v současné době čím dál více využívá energie větru a vody. Větrných elektráren neustále přibývá. U vodních elektráren je problém v tom, že na stavbu je potřeba vodní dílo a dostatečný průtok vody pro pohon generátorů. Ale i její stavba je velmi drahá. Výhodou vodní elektrárny je, že pokud nenastávají dlouhá období sucha, vyrábějí elektrickou energii bez výpadků a naprosto ekologicky. Větrné elektrárny jsou také ekologické, ale aby dodávaly elektrický proud, musí být vítr dostatečně silný, na druhou stranu nesmí být příliš silný, jinak se generátor odpojí a do veřejné sítě žádný elektrický proud nedodává. Obě elektrárny jsou tedy dobře využívány, ale může dojít ke stavu, že nedodávají elektrický proud a tím mohou nastat problémy. Pokud tyto elektrárny nedodávají energii do veřejné sítě, musí je nahradit uhelné a atomové elektrárny.

V dnešní moderní době je na elektrickou energii závislý téměř každý a potřebuje ji pro každodenní život. U každého elektrického zdroje může dojít k poruše. Částečným způsobem je lze nahradit generátory, které dokáží pracovat v ostrovním režimu. Např. domácí vodní či větrná elektrárna, která dokáže udržet důležité spotřebiče v chodu. I když je dům připojený k veřejné síti, tak generátor, který dokáže pracovat v ostrovním režimu dokáže snížit náklady domácnosti, je ekologický a levný na provoz. Vytvořením elektrické energie generátorem v ostrovním režimu uspoří energii veřejné sítě, která se může využít např. na dobíjení elektromobilů.

Vývoj generátorů ještě neskončil a neustále se vyvíjejí nová vylepšení, která zvyšují jejich účinnost. Diplomová práce uvádí výsledky měření na modelovém soustrojí energetického mikrozdroje s automobilovým alternátorem, a to s pulzním i lineárním buzením. Soustrojí je navrženo jako energetický mikrozdroj pro ostrovní provoz, jehož výstup stabilizuje sinusový střídač.

## 1 KONCEPCE MĚŘÍCIHO SOUSTROJÍ

Snaha elektrotechnických laboratoří KTP o získání univerzálního měřicího soustrojí pro podporu výuky elektrotechnických předmětů sahá až do roku 1988. Problémem však vždy bylo získání potřebných finančních prostředků. Ani v současné době není pořízení měřicího soustrojí levnou záležitostí, a podstatným faktorem jsou i dané možnosti provozního režimu a měření, která lze na daném soustrojí realizovat.

### 1.1 Generátory pro mikrozdroje

Podle pohonné jednotky mohou mikrozdroje využívat různé typy generátorů. Jako pohon alternátoru lze uvažovat o vodních nebo větrných motorech. Je možné použít pomaloběžné diskové generátory s přímým náhonem nebo středně rychloběžné generátory 750-1 500 ot/min s převodem do rychla plochým nebo drážkovým řemenem. Diskové generátory jsou vhodné zejména pro větrné turbíny typu Savonius nebo Darrieus (obr.1 a 2) [1] pro větrná kola či rychloběžné vrtule.



*Obr.1 Diskový generátor VAWT Seahawk [1]*



*Obr.2 Oběžné kolo turbíny VAWT Seahawk s pomaloběžným diskovým generátorem [1]*

Příklad parametrů diskového generátoru VAWT Seahawk je uveden v tabulce 1.

**Tab.1 Parametry turbíny VAWT Seahawk**

| parametry turbíny VAWT Seahawk |               |
|--------------------------------|---------------|
| průměr oběžného kola           | 3 200 mm      |
| výška oběžného kola            | 1 570 mm      |
| průměr generátoru              | 820 mm        |
| provozní otáčky                | 80-420 ot/min |
| počet pólů generátoru          | 36            |
| maximální výstupní napětí      | 96 V          |
| maximální výkon                | 3,2 kW        |

Podle [1]

Diskové generátory nejsou žádnou technickou novinkou. Návod na amatérskou stavbu malé větrné elektrárny s diskovým generátorem byl publikován již v roce 1984 [2]. Osmnáctipólový jednofázový generátor měl disk s dvaceti feritovými magnety  $\varnothing 26 \times 10$  mm. Výkon generátoru, je závislý na rychlosti větru a v rozmezí 4 až 15 m/s, výkon dosahoval přibližně 12-125 W.

Pomaloběžné diskové generátory jsou vhodným řešením i pro přímé energetické využití vodních kol, kde budící magnety mohou být osazeny přímo do boku věnce vodního kola. Vzhledem k tomu, že použité stroje mají podle rychlosti větru nebo průtoku vody proměnné otáčky a jejich regulace a stabilizace je téměř nemožná, předpokládá se u diskových generátorů využití invertorové technologie AC/DC/AC, kdy je výstupní napětí stabilizované sinusovým měničem a stejnosměrný proud meziobvodu lze ukládat v akumulátorové sadě.

Klasické synchronní generátory malých výkonů jsou obvykle samobudící s regulací napětí AVR (Automatic Voltage Regulation), vyžadují však stabilizaci otáček hnacího stroje. Příkladem může být jednofázový synchronní generátor z nové řady generátorů Rotek, typ STC5-1 s výkonem 5 kW/5 kVA (obr.3) [3]. Na rozdíl od diskových generátorů s permanentními magnety má generátor STC5-1 buzení kotvy pomocí sběracích kroužků a kartáčů.



**Obr.3 Synchronní generátor Rotek STC5-1 [3]**

Parametry generátoru Rotek STC5-1 jsou uvedeny v tabulce 2.

**Tab.2 Parametry generátoru Rotek STC5-1**

| parametry generátoru Rotek STC5-1 |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| výstupní výkon                    | 5 kW/5 kVA         |
| maximální fázový proud            | 21,8 A             |
| jmenovité napětí                  | 230 V              |
| jmenovitý kmitočet                | 50 Hz              |
| provozní otáčky                   | 1 500 ot/min       |
| počet pólů generátoru             | 4                  |
| buzení                            | stejnoseměrné      |
| napětí                            | 49 V               |
| proud                             | 2,8 A              |
| cosφ                              | 1,0                |
| dynamická stabilita regulace      | ±20 %              |
| rozměry                           | 570 × 300 × 450 mm |
| hmotnost                          | 80 kg              |

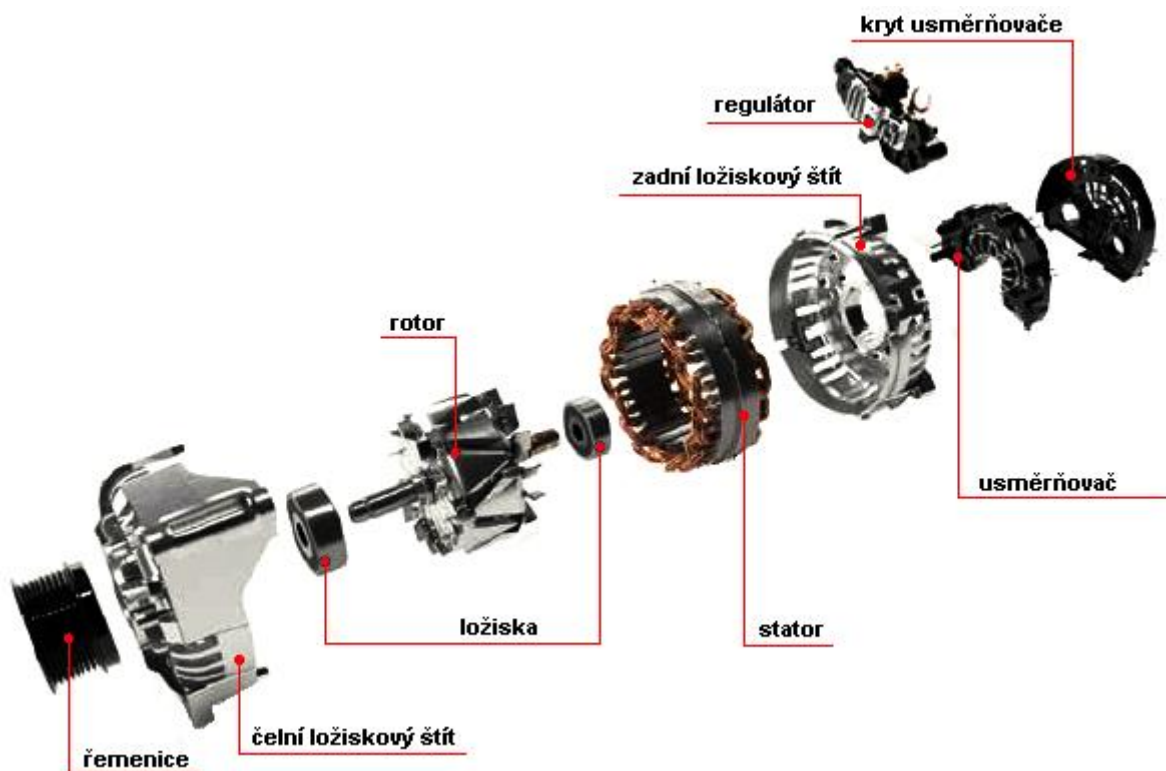
Podle [3]

Invertorová technologie AC/DC/AC se používá u klasických synchronních generátorů malých výkonů jako dokonalejší alternativa k AVR. Malé benzínové generátory díky ní vykazují menší spotřebu paliva a výrazně vyšší stabilitu výstupního napětí.

Pro malé zdroje s jednoduchou konstrukcí a výkonem do cca 1,5 kW se nabízí využití zvláštního, ale celkem běžně používaného generátoru v automobilech. Tyto alternátory jsou vysokoobrátkové točivé stroje s axiální budicí cívkou v rotoru tzv. drápkovou kotvou. V podstatě se jedná o třífázové středofrekvenční generátory. Jejich výhodou je relativně jednoduchá lehká konstrukce, velký výkon vestavěný v malém objemu (obr.4) a integrovaný regulátor napětí, takže automobilový alternátor nepotřebuje žádné další příslušenství a akumulátor je možné připojit přímo na jeho výstup. Na druhé straně je nutné použít od hnacího stroje převod do rychla. Protože současná vozidla používají drážkové řemeny formátu PK s roztečí drážek 3,56 mm, jsou ztráty v převodu relativně malé.



**Obr.4 Automobilový alternátor**



Obr.5 Části alternátoru [8]

## 1.2 Základní požadavky modelového soustrojí

S ohledem na prostorové možnosti elektrotechnické laboratoře KTP a její umístění ve čtvrtém podlaží budovy S musí být soustrojí mobilní, což nutně vede ke kompromisnímu řešení a hledání nejuvhodnější alternativy.

### 1.2.1 Mechanické parametry

Požadavky na mechanické vlastnosti laboratorního soustrojí jsou dány současnými prostorovými možnostmi elektrotechnické laboratoře ve 4. podlaží budovy S.

- Manipulaci se soustrojím musejí bez větších problémů zvládnout čtyři lidé, přesun po rovině je třeba zvládnout v jedné nebo dvou osobách. Hmotnost celého soustrojí by proto neměla přesáhnout 100-120 kg.
- Mobilitu musejí zajistit dostatečně únosná, relativně velká a měkká kola, která umožní bezproblémové přejíždění prahů a současně omezí kontaktní přenos hluku do podlahy při provozu.
- Soustrojí musí bezpečně projít (projet) dveřmi laboratoře, učeben a skladů o šířce 80 cm. Jeden půdorysný rozměr tak může být maximálně 75 cm.
- Soustrojí by samo o sobě mělo produkovat co nejmenší hluk. To předpokládá použití materiálů s velkým a vnitřním tlumením a určitou pružností, které nebudou fungovat jako rezonanční deska. Součástí návrhu proto je i volba vhodného mechanického spojení mezi motorem a generátorem.

### 1.2.2 Elektrické parametry

Požadované elektrické parametry jsou pro návrh soustrojí klíčové, ale zároveň jsou determinovány mezními mechanickými parametry. Soustrojí musí umožňovat provoz a měření v nejrůznějších provozních podmínkách, které lze vysledovat v reálném provozu v ostrovním

režimu, pro který je energetický mikrozdroj primárně určen, tj. v jednofázových izolovaných sítích. Základní požadavky tedy jsou:

- Střídavá napěťová soustava TN-S, TN-C, TT nebo IT se jmenovitým sinusovým napětím 230 V, maximálním výkonem 1,5 kW a frekvencí výstupního napětí 50 Hz.
- Možnost připojení externího buzení generátoru.
- Možnost připojení externího budiče, nezávisle na výzbroji vlastního rozvaděče soustrojí.

## 2 ŘEŠENÍ MECHANICKÉ ČÁSTI

Vstupní částí projektu specifického výzkumu je mechanická konstrukce celého soustrojí.

### 2.1 Základová deska

Na základě provozních zkušeností se soustrojím s asynchronním generátorem [4] byla navržena základová deska o rozměrech 650 × 700 mm ze 40 mm silného textitu HGW 2082.

Textit HGW 2082 [5] je houževnatý konstrukční materiál na bázi tvrzené textilní tkaniny a fenolické pryskyřice, s výbornými mechanickými a elektroizolačními vlastnostmi, nízkou specifickou hmotností vůči porovnatelným materiálům, dobrou opracovatelností a odolností vůči vodě, olejům, benzínům a slabým kyselinám. Používá se pro stavbu strojů a zařízení, na výrobu kluzných ložisek, kluzných částí strojů a zařízení, větších ozubených kol a kladek. V elektrotechnickém průmyslu se používá pro výrobu součástí se zaručenou elektrickou pevností a izolačním odporem, na izolační desky, kostry, tělesa přístrojů, skříňových částí rozvodů a rozvaděčů, elektrických strojů, transformátorů, atd. Základní vlastnosti textitu HGW 2082 jsou uvedeny v tabulce 3.

**Tab.3 Vlastnosti materiálu Textit HGW 2082**

| vlastnosti materiálu textit hgw 2082 |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| typ izolantu                         | tvrzená textilní tkanina   |
| typ výztuhy                          | bavlněná tkanina           |
| typ pojiva                           | fenolformaldehydová živice |
| tepelná třída                        | E (120 °C)                 |
| měrná hmotnost                       | 1,4 g/cm <sup>3</sup>      |
| pevnost v ohybu                      | 130 MPa                    |
| pevnost v tlaku                      | 170 Mpa                    |
| pevnost v tahu                       | 80 Mpa                     |
| modul pružnosti                      | 7 000 Mpa                  |
| pevnost ve smyku                     |                            |
| rovnoběžně s vrstvami                | 25 Mpa                     |
| rázová houževnatost                  |                            |
| kolmo na vrstvy                      | 30 kJ/m <sup>2</sup>       |
| rovnoběžně s vrstvami                | 8,8 kJ/m <sup>2</sup>      |
| elektrická vodivost                  | Min 5 kV/mm                |

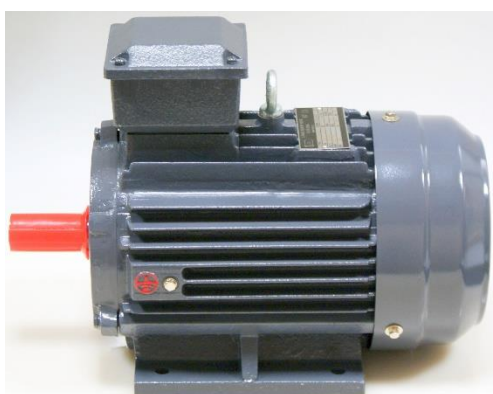
Podle [5]

Po získaných provozních zkušenostech byla pod základovou desku použita čtyři otočná transportní kola Montako CIN-SED 200/GR o průměru 200 mm a maximální nosnosti 200 kg, která umožňují relativně snadnou manipulaci se soustrojím i jedné osobě. Použitá kola CIN-SED 200/GR jsou odolná proti deformacím při dlouhodobém stání se zátěží, která nepřesáhne 25 % nosnosti kola.

## 2.2 Točivé stroje

### 2.2.1 Motor

Realizaci soustrojí provázely od počátku určité problémy. Jako hnací motor byl vybrán z nové řady elektromotorů typ 1TZ9 100L04K 2,2 kW 1 420 ot/min IE3. Motory jsou standardně osazeny zesílenými ložisky řady 6308-2Z v litinovém ložiskovém uložení. Jak se však ukázalo, výrobce kapacitně nestačí poptávce a dodací lhůty se tak výrazně prodlužují. Po konzultaci s firmou AB-elektropohony byla zvolena jako pohonná jednotka třífázový asynchronní elektromotor KEM 2L-100L-4 2,2 kW 1 445 ot/min (obr.6 a 7).



**Obr.6 Motor KEM 2L-100L-4 2,2 kW 1 445 ot/min**

Jedná se o těžký celolitinový průmyslový čtyřpólový asynchronní stroj s kotvou nakrátko s vyšší účinností (třída IE2) s osovou výškou 100 mm. Robustní litinová konstrukce a zesílená ložiska řady 6308-2Z vytvářejí předpoklad relativně tichého chodu a dlouhodobé provozní spolehlivosti. Základní parametry hnacího motoru jsou v tabulce 4.

**Tab.4 Základní parametry hnacího motoru**

| základní parametry hnacího motoru |                |
|-----------------------------------|----------------|
| typ                               | 2L-100L-4      |
| provedení                         | B3 - patkový   |
| osová výška                       | 100 mm         |
| délka                             | 397 mm         |
| rozteč upevňovacích šroubů        | 160 mm         |
| průměr hřídele                    | 28 mm          |
| dovolená radiální síla na hřídel  | 1,06 kN        |
| hmotnost                          | 37 kg          |
| rotor                             | kotva nakrátko |
| jmenovité otáčky pro 50 Hz        | 1 445 ot/min   |
| synchronní otáčky pro 50 Hz       | 1 500 ot/min   |
| maximální přípustné otáčky        | 3 600 ot/min   |
| jmenovitý výkon                   | 2,2 kW         |
| kroučící moment                   | 14,55 Nm       |
| jmenovité napětí D/Y              | 230/400 V      |
| jmenovitý proud při 400 V         | 4,7 A          |
| účinnost                          | 84,5 %         |
| účinník (cosφ)                    | 0,81           |

Podle [6]



| 3-PHASE ASYNCHR. MOTOR |               |         |                         |
|------------------------|---------------|---------|-------------------------|
| IEC/EN 60034           |               | IE 2    |                         |
| www.kem.cz             |               |         |                         |
| TYPE                   | 2L-100L1-4 B3 | SER.NO. | 162038151               |
| kw                     | 2.2           | IE2     | 84.5 %                  |
| VOLTS                  | 230/400 V     | CONN    | $\Delta/Y$ RATING S1    |
| AMPS                   | 8.1/4.7 A     | INSUL.  | 155 (F) COS $\Phi$ 0.81 |
| RPM                    | 1445          | Hz      | 50 IP 55 kg 37          |

**Obr.7** Typový štítek motoru KEM 2L-100L-4

Hnací motor je usazen na jednodílné napínací desce Tyma MP307-90/112 Monoplate. Na rozdíl od univerzálních dělených napínacích desek je provedení Monoplate robustnější, s většími dosedacími plochami a ve výsledku s nižší hlučností při chodu soustrojí.

### 2.2.2 Generátor

Jako kompromisní řešení pro modelové laboratorní soustrojí energetického mikrozdroje byl zvolen automobilový alternátor Bosch CA1394IR 14 V/ 120 A. Standardně jsou tyto alternátory osazovány pětidrážkovou volnoběžnou řemenicí s průměrem 55 mm. Pro účely soustrojí byla na alternátor osazena pevná šestidrážková řemenice typu PK s průměrem 65 mm (obr.8).

Alternátor Bosch CA1394IR je dvanáctipólový třífázový synchronní stroj o průměru 175 mm s dvanáctipólovou kroužkovou drápkovou kotvou, vnitřním chlazením a čtyřbodovým uchyacením. K základové desce je alternátor upevněn pomocí čtyř bloků 25 × 25 × 50 mm z kaleného duralu EN AW-2017 T451 [7]. Dostupné parametry jsou uvedeny v tabulce 5, podrobné parametry výrobce neudává, alternátor nemá ani typový štítek a jmenovité údaje nejsou uvedeny ani na krytu diodového bloku.



**Obr.8** Alternátor Bosch CA1394IR 14 V/120 A s pevnou šestidrážkovou řemenicí PK 65 mm

**Tab.5 Základní parametry generátoru**

| základní parametry generátoru   |                     |
|---------------------------------|---------------------|
| typ                             | Bosch CA1394IR      |
| provedení                       | s vnitřní ventilací |
| typ řemenice                    | Pevná PK6 *)        |
| průměr řemenice                 | 65 mm               |
| jmenovité výstupní napětí       | 14 V DC             |
| maximální výstupní proud        | 120 A               |
| jmenovité otáčky                | 6 000 ot/min        |
| hmotnost                        | 7,5 kg              |
| rotor                           | drápková kotva      |
| maximální statický budicí proud | 5,6 A při 14 V      |
| výstupní proud při 1 800 ot/min | 35 A                |
| maximální přípustné otáčky      | 12 000 ot/min       |

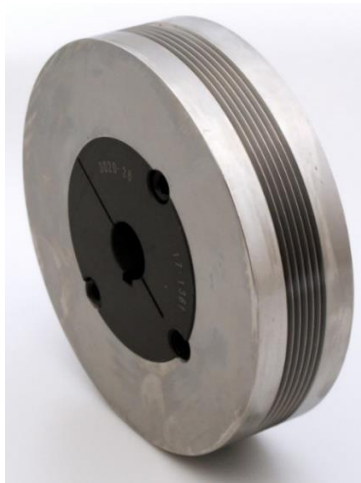
\*) zakázková montáž od fy Janota Autoelektroservis Zlín  
Podle [8]

### 2.3 Řemenový převod

Pro přenos hnacího výkonu je od počátku uvažováno s řemenovým převodem. Jedním z důvodů jsou menší prostorové nároky, než kdyby byly oba stroje spojeny hřídelovou spojkou, druhým důvodem je větší univerzalita a větší využitelnost soustrojí v rámci interdisciplinárních vazeb a hlavním důvodem je použití rychloběžného stroje a z toho vyplývající nutnost použít převod do rychla.

Pro výpočet a optimalizaci řemenového převodu byl použit program Transmission Designer v.7.2 firmy Continental [9]. Pro pohon automobilových alternátorů se dnes používají téměř bezvýhradně čtyř až šesti drážkové řemeny profilu PK s roztečí drážek 3,56 mm [10]. Řemenice pro alternátor je jednoznačně daná možností výběru ze standardně dodávaných řemenic, kdy pro pevnou šesti drážkovou verzi (určenou pro diesellové motory a automobily s klimatizací) je jediný dostupný průměr 65 mm. Větší průměr řemenice je výhodný i z hlediska délky styku řemene s řemenicí a většího úhlu opásání.

Pro hnací motor byla vyrobena zakázková řemenice typu PK200-6 TB3020 o průměru 200 mm s upínacím pouzdem Taper TB3020 - 28 mm. Zakázková řemenice PK200-6 TB3020 je vyrobena z ocelového masivu s šířkou věnce 52 mm a průměrem náboje 106 mm. Délka upínacího pouzdra 52 mm odpovídá šířce řemenice (obr.9).



**Obr.9 Drážková řemenice PK200-6 TB3020 s upínacím pouzdem**

Drážkový řemen PK6 je široký 21 mm a běží po středu běhounu řemenice. Ta díky velkému momentu setrvačnosti působí jako tlumič rázů a energetický zásobník při skokovém zvýšení zátěže alternátoru.

Převodový poměr řemenového převodu je 2,99:1 a při osové vzdálenosti strojů 351 mm jsou úhly opásání  $\beta_M = 203^\circ$  a  $\beta_A = 157^\circ$ . Drážkové řemeny řady PK mají podle výrobce povolenou maximální pracovní rychlost 60 m/s [11]. Základní parametry řemenového převodu jsou uvedeny v tabulce 6.

**Tab.6 Základní parametry převodu**

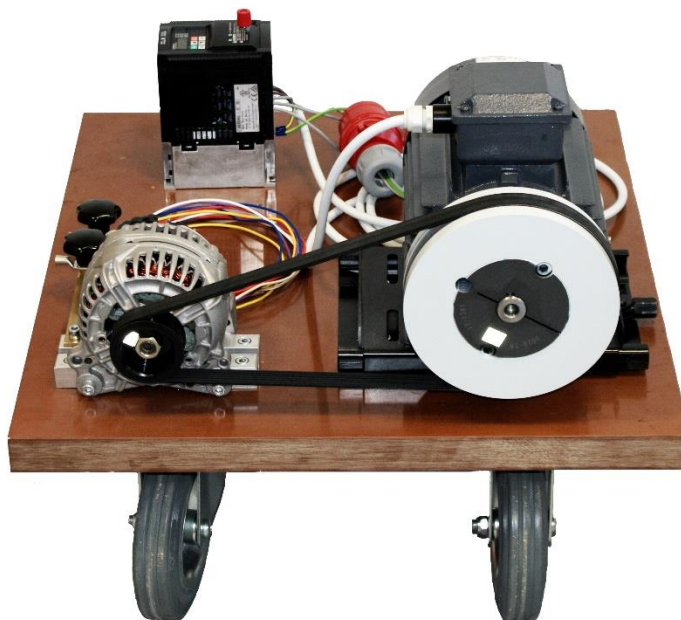
| <b>základní parametry převodu</b> |  |
|-----------------------------------|--|
| typ převodu                       | řemenový   |
| řemen                             |  |
| typ                               | drážkový   |
| profil                            | PK – ISO 9982  |
| počet drážek                      | 6  |
| výpočtová délka řemenu            | 1 132 mm   |
| osová vzdálenost                  | 351,5 mm   |
| <b>hnací řemenice</b>             |  |
| typ                               | zakázková PL-200-6 TB3020                                |
| upínací pouzdro                   | TB3020 - 28 mm   |
| výpočtový průměr                  | 200 mm   |
| účinný průměr                     | 206 mm   |
| úhel opásání                      | 230°   |
| kroučící moment                   | 14,55 Nm   |
| hmotnost s pouzdem                | Cca 12,74 kg   |
| <b>hnaná řemenice</b>             |  |
| typ                               | PK6 $\varnothing$ 65 mm                                  |
| výpočtový průměr                  | 65 mm  |
| účinný průměr                     | 67 mm  |
| úhel opásání                      | 157°   |
| kroučící moment                   | 4,87 Nm  |
|                                   |  |
| převodový poměr                   | 2,99:1   |
| jmenovité otáčky motoru           | 1 445 ot/min   |
| otáčky alternátoru                | 4 314 ot/min   |
| maximální otáčky motoru           | 3 600 ot/min   |
| maximální otáčky alternátoru      | 10 747 ot/min  |
| přenášený výkon                   | 2,2 kW   |
| maximální výkon                   | 12,24 kW   |
| zatížení                          | střední, s ojedinělými rázy                              |
| rychlost řemenu                   | 15,36 m/s při 1 445 ot/min<br>38,26 m/s při 3 600 ot/min |
| ohybová frekvence                 | 26,91 Hz při 1 445 ot/min<br>67,05 Hz při 3 600 ot/min   |
| obvodová síla                     | 143,24 N   |

Podle [9]

## 2.4 Spojovací materiál

Upevnění všech mechanických dílů, včetně připravené montáže rozvaděče a pojezdových kol je provedeno šrouby a maticemi jednotné velikosti M10 a jim odpovídajícími podložkami, dle norem

ČSN EN ISO 4762 [12], ČSN EN ISO 7093-1 [13], ČSN EN ISO 4014 [14], ČSN EN ISO 4032 [15] a ČSN 02 1740 [16]. Použití jednotné velikosti šroubů vedlo k úspoře času při výrobě základové desky a k výraznému zrychlení vrtacích a závitovacích prací, kdy nebylo nutné měnit jednotlivé nástroje. Ke kotvicím blokům je alternátor připevněn pevnostními šrouby M8. Soustrojí bez rozvaděče je na obr.10.



**Obr.10 Sestavené soustrojí bez rozvaděče**

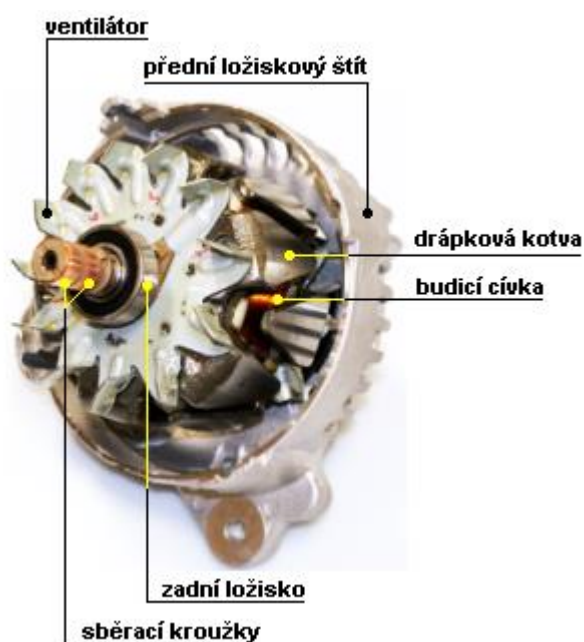
### 3 PROVOZNÍ ZKOUŠKA MOTORGENERÁTOROVÉ JEDNOTKY

Sestavené soustrojí bylo s oběma točivými stroji s osazeným převodem zaběhnuto po dobu 20 hodin při budicí frekvenci motoru 15 Hz (synchronní otáčky motoru 450 ot/min, otáčky alternátoru 1 310 ot/min). Postupný pokles hladiny hluku a prodlužující se doba doběhu byly známkou toho, že se náplň ložisek rovnoměrně rozprostřela.

Cílem provozní zkoušky bylo ověření možnosti samočinného nabuzení synchronního generátoru a změření některých parametrů, potřebných pro optimalizaci finální verze návrhu elektrické části měřicího soustrojí a také ověření chodu soustrojí při maximálních provozních otáčkách.

#### 3.1 Remanentní magnetismus

Magnetický obvod automobilového alternátoru tvoří statorový svazek ze vzájemně izolovaných křemíkových plechů a tzv. drápková kotva, která je vyrobena z masivního magneticky měkkého materiálu a uzavírá v sobě axiální budicí cívku na hřídeli alternátoru (obr.11).



Obr.11 Rotor alternátoru Bosch CA1394IR

Přestože se v obou případech jedná o magneticky měkký materiál, zůstává zpravidla v magnetickém obvodu tzv. zbytkový (remanentní) magnetismus. Při roztočení alternátoru magnetická indukce pocházející z remanentního magnetismu kotvy vybudí ve statorových cívkách napětí. Pro indukované napětí při pohybu vodiče v magnetickém poli (ale také při pohybu magnetického pole kolem vodiče) platí základní rovnice

$$U = Bvl \quad (1)$$

kde je:

$U$  - indukované napětí,

$B$  - magnetická indukce.

$v$  - rychlost pohybu vodiče vůči mag. poli,

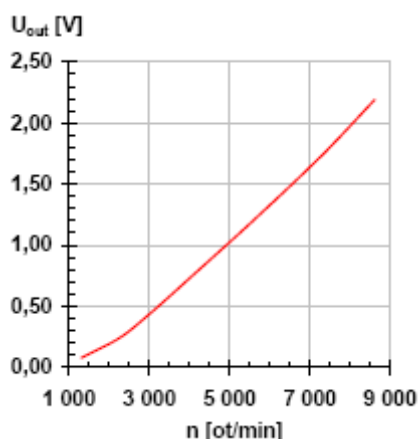
$l$  - aktivní délka vodiče.

Pokud je magnetická indukce a aktivní délka vodiče konstantní, potom z rovnice (1) vyplývá, že indukované napětí je lineární funkcí rychlosti.

Napětí na výstupu alternátoru, indukované remanentním magnetismem, je měřeno v pracovním rozsahu otáček od 1 300 ot/min do 9 000 ot/min. Předpokládají se maximální běžné provozní otáčky na úrovni 6 000 ot/min. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 7 a v grafu na obr.12.

**Tab.7 Výstupní napětí alternátoru indukované remanentním magnetismem**

| otáčky n [ot/min] | výstupní napětí $U_o$ [V] |
|-------------------|---------------------------|
| 1 310             | 0,065                     |
| 1 471             | 0,075                     |
| 2 209             | 0,235                     |
| 2 950             | 0,428                     |
| 4 403             | 0,841                     |
| 5 873             | 1,284                     |
| 7 341             | 1,743                     |
| 8 801             | 2,191                     |



**Obr.12 Závislost výstupního napětí alternátoru na otáčkách (remanentní magnetismus)**

Pro nabuzení alternátoru je však důležitý proud, který prochází budicí cívkou. Velikost magnetické indukce je dána základní rovnicí (2), vycházející z Hopkinsonova zákona

$$B = \frac{nI}{R_m S_m} \quad (2)$$

kde je:

$B$  - magnetická indukce,

$n$  - počet závitů budicí cívky,

$I$  - proud ve vinutí budicí cívky,

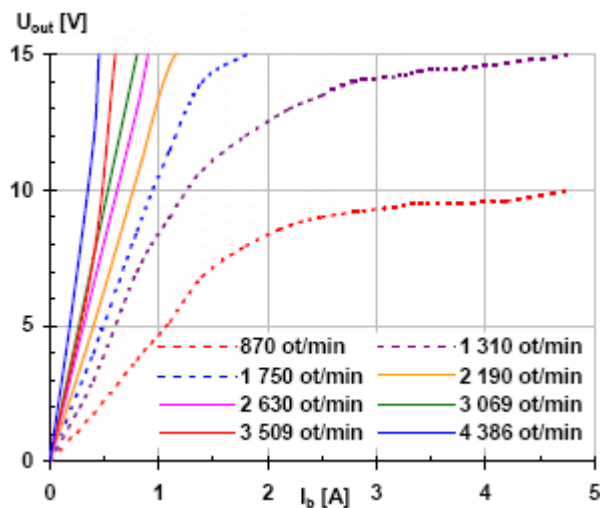
$R_m$  - magnetický odpor magnetického obvodu,

$S_m$  - průřez magnetického obvodu.

Remanentní magnetismus vybudí na výstupu alternátoru do zátěže  $2,7 \Omega$  proud 15-17 mA v pásmu nad 4 500 ot/min, což postačuje k tomu, aby se alternátor při přímém připojení budicí cívky na jeho výstup nabudil. Zjištěné výsledky dokazují, že dosavadní tvrzení (které můžeme považovat za jednu z technických pověr), že se automobilový alternátor sám nenabudí, není pravdivé. Cílem dalšího vývoje tak bude, mimo jiné, navržení regulačního obvodu, který dokáže alternátor samočinně nabudít.

### 3.2 Převodní charakteristiky alternátoru

Aby byl pro alternátor určen využitelný rozsah provozních otáček, byly změřeny charakteristiky závislosti výstupního napětí alternátoru naprázdno na budicím proudu při konstantních otáčkách. Z grafu na obr.13 vyplývá, že pro nízké provozní otáčky (do 1 310 ot/min) není možné alternátor vybudit na jmenovité výstupní napětí 14 V.



**Obr.13 Převodní charakteristiky alternátoru**

Na základě výsledků měření byl pro měřicí soustrojí zvolen provozní otáčkový rozsah 1 310 až 10 260 ot/min, přičemž pro dlouhodobá měření předpokládáme maximální provozní otáčky alternátoru na hranici 6 000 ot/min.



## 4 OKRUH HNACÍ JEDNOTKY

Napájení měřicího soustrojí je primárně navrženo ze sítě TN-S 3+PE+N 3 × 230/400 V - 50 Hz. Lze použít i napájení ze sítí TN-C, TN-C-S nebo TT. Napájení ze sítě IT je možné v případě, že je provedena jako pětivodičová.

### 4.1 Jištění hnací jednotky

S ohledem na setrvačné hmoty (moment setrvačnosti motoru s řemenicí je 0,148 kgm<sup>2</sup>) a záběrný proud při přímém rozběhu je jištění po honu provedeno jako dvoustupňové. Při přímém připojení k síti, kdy motor při rozběhu odebírá maximální proud na úrovni proudu nakrátko, je motor jištěn motorovou spouští SEZ MIS-6,3 [17] (obr.14). Motorová spoušť je kombinací elektromagnetické a tepelné ochrany, přičemž elektromagnetická ochrana vypíná na úrovni desetinásobku jmenovitého proudu a nereaguje tak na záběrný proud motoru, který nelze rozbíhat přepínačem Y/D (hvězda/trojúhelník). Tepelná ochrana motorové spouště se nastavuje podle jmenovitého proudu motoru a reaguje na dlouhodobé přetížení a výpadek jedné fáze.



Obr.14 Motorová spoušť SEZ MIS [17]

Je-li hnací motor napájen z frekvenčního měniče, je jištěn napájecí přívod měniče. Ochranu motoru potom zajišťují obvody frekvenčního měniče podle zadaných parametrů motoru, druhu pohonu, setrvačných hmot, požadované doby rozběhu, nastavení náběhové a doběhové rampy, posílení momentu, atd.

### 4.2 Provozní spínač

Volba provozního režimu hnací části se provádí provozním spínačem soustrojí. Čtyřpolohový zákaznický radič Obzor typ VSR16-10003059C8, má polohy označené FQC-PWR-0-MOT, umožňující následující typy připojení a provozu:

**0** - vypnuto

**MOT** - zapojení vinutí hnacího motoru do hvězdy. Při připojení k normální síti chod soustrojí při jmenovitých otáčkách s plným výkonem se standardní momentovou charakteristikou. Poloha MOT se použije také při napájení hnacího motoru ze zvláštní externí jednotky, kdy může být pomocí reostatu, regulačních tlumivek, regulačního autotransformátoru nebo externího měniče měněna momentová charakteristika motoru, otáčky a výkon soustrojí.

**PWR** - *power regulation* - vinutí hnacího motoru je zapojeno do hvězdy a připojeno na výstup frekvenčního měniče v rozvaděči soustrojí. Měnič je odpojen od sítě.



**FQC** - *frequency control* - frekvenční měnič je s připojeným motorem připojen k síti a řídí rozběh, otáčky, momentové charakteristiky, kompenzaci skluzu, přetížitelnost pohonu, výkon, atd.

Posloupnost spínání od nulové polohy je 0→MOT a 0→PWR→FQC. Pevné řazení poloh brání nežádoucím spínacím režimům, jako například odpojení motoru od měniče pod napětím či spojení výstupních svorek měniče se sítí. Prakticky se tak eliminují nebezpečné poruchové nebo dokonce destruktivní stavy, zaviněné lidským faktorem, tj. nesprávnou obsluhou zařízení.

### 4.3 Frekvenční měnič

Řídicím prvkem hnací části soustrojí, při provozu v autonomním režimu, je osvědčený frekvenční měnič Hitachi řady WJ200, typ 022HFE (obr.15).

Frekvenční měniče řady WJ200 jsou kompaktní vektorové měniče, určené pro tzv. malé pohony až do výkonu 15 kW. Mají zdokonalené vektorové řízení výstupního proudu bez zpětné vazby, umožňují vektorové momentové řízení s otevřenou zpětnovazební smyčkou s počátečním zvýšením momentu motoru až na 200 % jmenovité hodnoty, a to již od frekvence 0,5 Hz. Nastavit lze dvojí typování pro konstantní a kvadratický moment. Pro komunikaci s počítačem je určen vstup USB. Měnič splňuje standardy CE a RoHS. Základní parametry měniče jsou uvedeny v tabulce 8.



**Obr.15 Frekvenční měnič Hitachi WJ200-022HFE**

**Tab.8 Základní parametry frekvenčního měniče Hitachi WJ200-022HFE**

| <b>základní parametry frekvenčního měniče Hitachi WJ200-022HFE</b> |                              |
|--|------------------------------|
| jmenovité vstupní napětí   | 400 V                        |
| přípustné vstupní napětí   | 345-480 V                    |
| <b>požadované jištění</b>  |                              |
| konstantní točivý moment   | 6 A                          |
| proměnný točivý moment   | 8 A                          |
| jmenovité vstupní napětí   | 400 V                        |
| <b>maximální výkon motoru</b>                                      |                              |
| konstantní točivý moment   | 2,2 kW                       |
| proměnný točivý moment   | 3,0 kW                       |
| <b>jmenovitý výstupní proud</b>                                    |                              |
| konstantní točivý moment   | 5,5 A                        |
| proměnný točivý moment   | 6,9 A                        |
| výstupní frekvence   | 0,1-1 000 Hz                 |
| krok nastavení frekvence   | 0,01 Hz                      |
| nosná frekvence  | 2-15 kHz                     |
| řízení   | sinusová pulzní modulace PWM |

Podle [18]

Frekvenční měnič umožňuje nastavit dobu rozběhu a doběhu v rozmezí od 10 ms do 1 hodiny. Tvary náběhových a doběhových charakteristik lze volit mezi jednostupňovou a dvoustupňovou lineární náběhovou rampou (otáčky rostou nebo klesají lineárně s časem) nebo tzv. S-křivkou, která se používá zejména u výtahových strojů a zvedacích zařízení, kdy se po velmi pozvolném počátečním rozběhu v krátkém čase dosáhne téměř provozních otáček. Následně je s menším zrychlením dosaženo požadovaných provozních otáček. Podle [18] není nutné omezovat výstupní proud měniče v závislosti na nosné frekvenci, je však nutné brát v potaz, že s rostoucí nosnou frekvencí se při plném zatížení měniče výrazně zvyšuje ztrátový výkon na spínacích tranzistorech a měnič potom signalizuje poruchu v důsledku překročení mezní teploty chladiče.

#### 4.4 Schéma zapojení hnací jednotky

Schéma zapojení hnací jednotky je na obr.16. Napájecí napětí se do rozvaděče soustrojí přivádí pětipólovou vestavnou přívodkou MN-1408 (XS1), 400 V/16 A/6 h, dle ČSN EN 60309-1 [19]. Soustrojí má dvojité nezávislé jištění napájecích větví dle ČSN EN 60947-2 [20]. Jističem pohonu soustrojí při přímém připojení k síti nebo při napájení z externího zdroje je motorová spoušť MIS-6,3 (FA1) nastavená na jmenovitý proud  $I_m = 4,8$  A. Napájení frekvenčního měniče je jištěno trojpólovým jističem PR63 D6 (FA2). Charakteristika D je zvolena z důvodu odolnosti proti rázovým proudům při nabíjení kondenzátorů vstupního filtru při připojení měniče k napájecí síti. Oba jisticí prvky zároveň splňují požadavky ČSN EN 60947-3 [21] a lze je použít i jako odpojovače.

Čtyřpatrový zákaznický vačkový spínač Obzor typ VSR16-10003059C8 s funkcí řadiče provozních funkcí soustrojí je rozdělen do čtyřech sekcí. Funkční význam sekcí uvádí v přehledu tabulka 9.

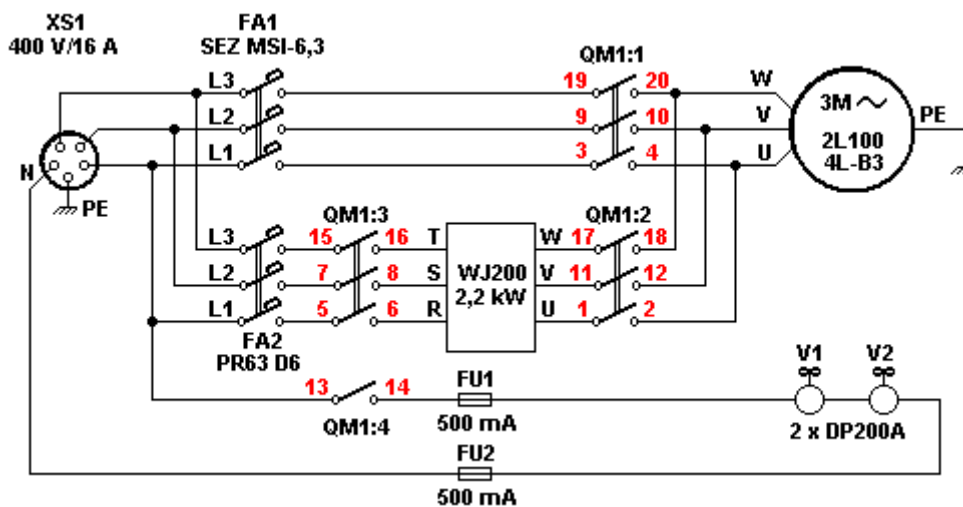
**Tab.9 Funkce sekcí hlavního spínače**

| sekce        | kontakty              | význam   |
|--------------|-----------------------|--|
| <b>GM1:1</b> | 3-4<br>9-10<br>19-20  | přímé připojení hnacího motoru k napájecí síti         |
| <b>QM1:2</b> | 1-2<br>11-12<br>17-18 | připojení výstupu frekvenčního měniče k hnacímu motoru |
| <b>QM1:3</b> | 5-6<br>7-8<br>15-16   | napájení frekvenčního měniče                           |
| <b>QM1:4</b> | 13-14                 | spínání ventilátorů v rozvaděči                        |

V jednotlivých polohách pak sekce spínají podle následující tabulky (tab.10).

**Tab.10 Funkční význam sekcí hlavního spínače**

| poloha     | význam  | sepnuté sekce                                |
|------------|---|--|
| <b>0</b>   | Vypnuto   | -  |
| <b>MOT</b> | přímé připojení hnacího motoru k napájecí síti  | <b>QM1:1</b><br><b>QM1:4</b>                 |
| <b>PWR</b> | připojení výstupu frekvenčního měniče k hnacímu motoru  | <b>QM1:2</b><br><b>QM1:4</b>                 |
| <b>FQC</b> | připojení výstupu frekvenčního měniče k hnacímu motoru,<br>připojení frekvenčního měniče k síti | <b>QM1:2</b><br><b>QM1:3</b><br><b>QM1:4</b> |



**Obr.16 Schéma zapojení hnací jednotky**

## 5 OKRUH ALTERNÁTORU

Měřicí soustrojí je osazeno automobilovým středofrekvenčním synchronním alternátorem Bosch CA1394IR 14 V/120 A. Základní parametry alternátoru jsou uvedeny v tabulce 11.

**Tab.11 Základní parametry alternátoru**

| základní parametry alternátoru  |                |
|---------------------------------|----------------|
| typ                             | Bosch CA1394IR |
| jmenovité výstupní napětí       | 14 V DC        |
| maximální výstupní proud        | 120 A          |
| maximální statický budicí proud | 5,6 A při 14V  |
| jmenovité otáčky                | 6 000 ot/min   |
| výstupní proud při 1 800 ot/min | 35 A           |

Podle [8]

Koncepce elektrických obvodů alternátoru plně odpovídá laboratornímu charakteru soustrojí a požadované variabilitě provozních režimů. Výstup alternátoru odpovídá izolované síti SELV, v případě potřeby je možné alternátor v rozvaděči uzemnit a přejít na zemněnou síť PELV.

Alternátor CA1394IR je třífázový dvanáctipólový stroj. Stator alternátoru (obr.17) má 36 drážek, ve kterých je osazeno 36 cívek. Zadní ložisko je izolované, aby nedocházelo k poškození tzv. ložiskovými proudy, které vznikají při impulzní regulaci budicího proudu rotoru [22]. Rotor alternátoru tvoří dvanáctipólová drápková kotva s axiální budicí cívkou napájenou z kartáčů přes sběrací kroužky (obr.18).



**Obr.17 Stator alternátoru CA1394IR**

Alternátor může pracovat ve třech základních režimech buzení:

**PWR** - buzení alternátoru je stejně jako při provozu v automobilu řízeno pulzním regulátorem.

**EXT** - buzení alternátoru je řízeno zcela nezávisle z externího zdroje.

**LIN** - buzení alternátoru je řízeno lineárním regulátorem s možností regulace výstupního napětí v rozmezí 8-15 V.



**Obr.18 Rotor alternátoru CA1394IR**

Pro každý typ buzení může mít alternátor dvě základní provozní zátěže:

**Z1** - zátěž vytvořená zatíženým sinusovým DC/AC měničem s výstupním napětím 230 V.

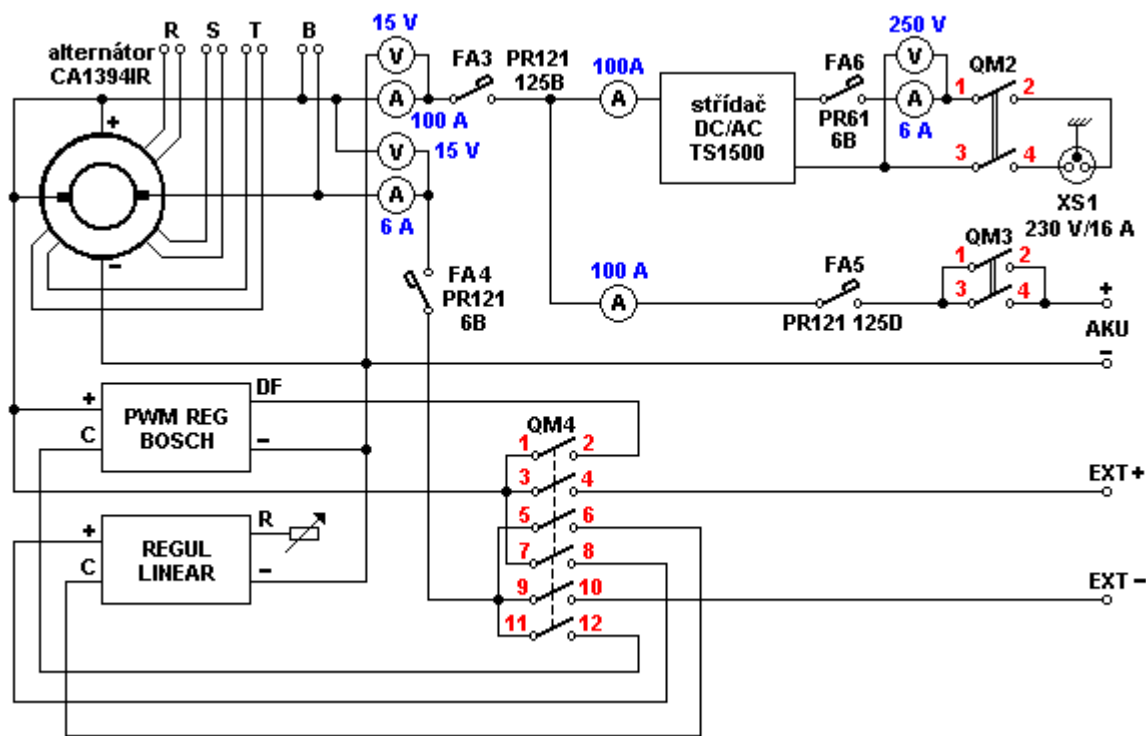
**Z2** - přímé zatížení výstupu alternátoru odporovou zátěží na úrovni malého napětí.

Možná je i kombinace zátěží Z1+Z2 v libovolném poměru, pokud nedojde k přetížení alternátoru.

Pro výukové a výzkumné účely jsou na svorky samostatně vyvedeny jednotlivé fáze alternátoru. Přípustné trvalé zatížení měřicích svorek je 10 A, krátkodobé zatížení (do cca 5 minut) může dosahovat až 25 A. Při používání přímých výstupů je nutné dbát maximální opatrnosti. Přímé výstupy nejsou jištěny a primárně nejsou určeny pro odebrání výkonu.

### **5.1 Měření a jištění alternátoru**

Základní zapojení alternátorového okruhu je na obr.19. Alternátor má jištění jak na straně buzení, tak na straně výstupu. Buzení alternátoru je jištěno standardním jednopólovým jističem PR61-B6 (FA4). V budicím okruhu je zapojen voltmetr a ampérmetr pro měření parametrů buzení. Výstup je chráněn jističem PR121-B125 (FA3). Na výstupu alternátoru je připojení ampérmetr a voltmetr pro kontrolu výstupního proudu a napětí. Nejištěné výstupy třífázového vinutí jsou vyvedeny na výstupní svorky R-S-T



Obr.19 Schéma zapojení generátorové jednotky

## 5.2 Buzení alternátoru

Jednou z podmínek návrhu měřicího soustrojí je schopnost tzv. nájezdu do tmy [24]. To znamená, že se alternátor musí nabudit sám nebo z malého pomocného zdroje a pracovat v autonomním režimu. Nabuzení alternátoru je možné buď remanentním magnetismem, z pomocného zdroje, z pomocného nebo hlavního akumulátoru. Alternátor CA1394IR používá regulaci buzení typu EE, tj. regulaci na tzv. studeném konci budicí cívky [23]. Budicí cívka je napájena standardním způsobem přes sběrací kroužky. Napájecí kartáč budicí cívky je připojen přímo na výstup alternátoru. Při připojeném akumulátoru je tak na výstupu alternátoru plné napájecí napětí, i když je alternátor v klidu. Druhý kartáč je regulátorem spínán proti zemi (- pól alternátoru). Na měřicích svorkách B (obr.19) lze sledovat průběhy budicího napětí.

Režim buzení alternátoru se volí třípolohovým řadičem QM4, kterým je vačkový spínač Obzor typ VSR16-2352C8. Řazení kontaktů pro jednotlivé režimy buzení je uvedeno v tabulce 12.

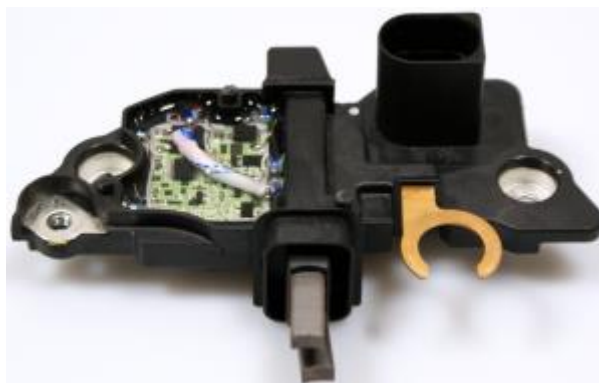
Tab.12 Spínání budicího okruhu alternátoru

| poloha | buzení   | sepnuté kontakty | regulace     |
|--------|----------|------------------|--------------|
| PWR    | pulzní   | 1-2, 11-12       | samočinná    |
| EXT    | externí  | 3-4, 9-10        | libovolná    |
| LIN    | lineární | 5-6, 7-8         | nastavitelná |

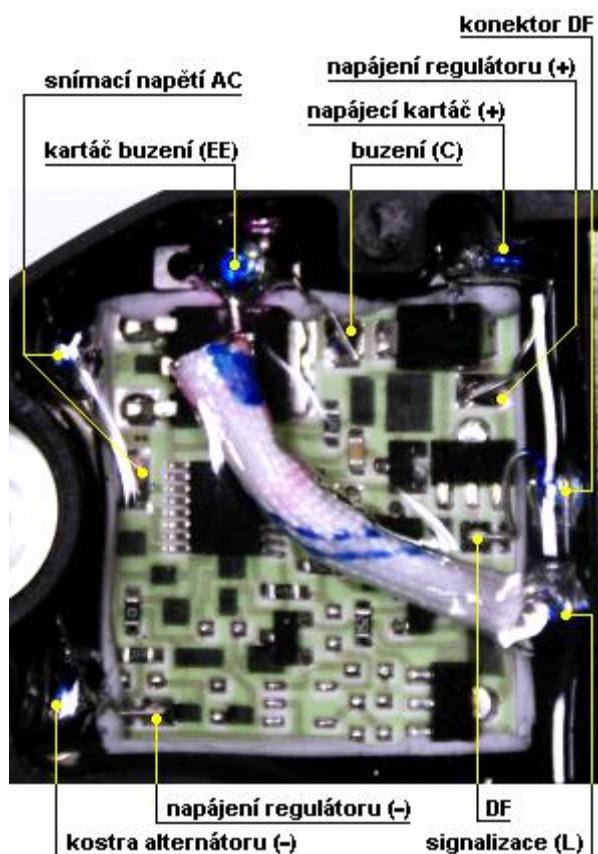
### 5.2.1 Pulzní buzení

Režim pulzního buzení (poloha PWR na QM4, sepnuté kontakty 1-2; 11-12) využívá originální regulátor Bosch F00M A45 209 BR14-TO, který je upevněn přímo na alternátoru (obr.20). Jedná se o víceúčelový regulátor [23] pro alternátory bez pomocného usměrňovače, postavený na součástkách SMD. Součástí regulátoru je i držák kartáčů pro sběrací kroužky kotvy alternátoru. Pro naše účely tedy musely být odstraněny vnitřní spoje regulátoru a jednotlivé připojovací body byly vyvedeny samostatnými vodiči do rozvaděče soustrojí. Na detailním snímku (obr.21) jsou popsány

jednotlivé připojovací body regulátoru. Z výroby je regulátor nastaven na úroveň 14 V a tuto hodnotu není možné měnit.



**Obr.20** Regulátor Bosch F00M A45 209 BR14-TO bez krytu elektroniky



**Obr.21** Připojovací body regulátoru Bosch

### 5.2.2 Externí buzení

V režimu nezávislého externího buzení alternátoru (poloha EXT na QM4, sepnuté kontakty 3-4; 9-10) jsou vstupní svorky EXT+ a EXT- (obr. 19) přímo připojené ke kartáčům a alternátor lze budit proudem z libovolného napájecího zdroje. Režim externího buzení je primárně určen pro experimentální činnost jako je měření výkonových charakteristik, měření přenosové funkce alternátoru a vývoj regulačních obvodů. Externí buzení umožňuje zavedení libovolného typu zpětné



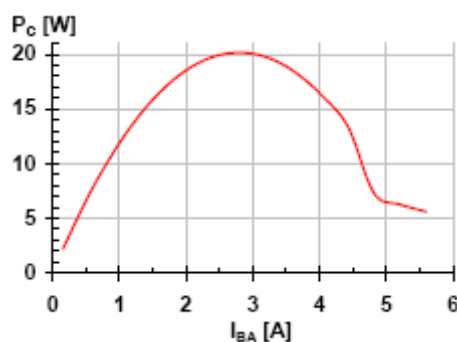
vazby, včetně vazby proudové a tím změnu voltampérové charakteristiky alternátoru. Proti přetížení je budicí vinutí chráněno jističem FA4.

### 5.2.3 Lineární buzení

Režim lineárního buzení alternátoru (poloha LIN na QM4, sepnuté kontakty 5-6; 7-8) využívá plynulou (spojitou) regulaci budicího proudu alternátoru. Na rozdíl od pulzní regulace je spojitá regulace výkonově ztrátová, protože se na regulačním prvku mění v teplo výkon  $P_C$  daný součinem úbytku napětí na regulačním tranzistoru  $U_{CE}$  a budicího proudu alternátoru  $I_{BA}$ .

$$P_C = U_{CE} \cdot I_{BA} \quad (3)$$

Předpokládáme-li lineární závislost mezi výstupním napětím a budicím proudem alternátoru, je možné odvodit závislost ztrátového výkonu  $P_C$  na budicím proudem  $I_{BA}$ . V grafu na obr.22 je výpočet ztrátového výkonu regulačního tranzistoru při maximálním napájecím napětí 14,4 V a budicím proudem v rozsahu 0,2-5,6 A.



**Obr.22** Závislost ztrátového výkonu regulačního tranzistoru na budicím proudem

Pro dané parametry můžeme uvažovat s maximálním ztrátovým výkonem 22-25 W. Na tento výkon musí být dimenzován chladič regulačního tranzistoru při maximální teplotě okolí 40 °C.

## 5.3 Výkonové obvody alternátoru

Schéma zapojení alternátoru můžeme rozdělit do tří hlavních elektrických obvodů (obr.19). Obvod buzení, obvod akumulátoru a malého napětí a obvod sinusového střídače.

### 5.3.1 Obvod malého napětí

Obvod malého napětí (svorky AKU+ a AKU-) je určen k přímému zatěžování alternátoru nízkohmovou zátěží, např. bezindukční odporovou dekádou pro proudový rozsah 4-210 A [25]. Na svorky obvodu je možné připojit také akumulátor (doporučená kapacita 140-500 Ah), který zajistí externí nabuzení alternátoru, plní funkci zátěže a v případě potřeby může zpětně napájet obvod sinusového střídače. Zátěž i akumulátor se připojují kabely H07V-K o minimálním průřezu 25 mm<sup>2</sup> (maximální dovolený proud 175 A) přes svorníky M10 na základové desce soustrojí.

Obvod malého napětí se spíná vačkovým spínačem QM3 (obr.19), což je jednopatrový dvou-pólový spínač Obzor VSN150-02001006A4, který je odvozen ze standardního typu VSN150 paralelním propojením kontaktů. Maximální tepelný proud spínače je 350 A. Zatížení spínače bude odpovídat kategorii použití DC-20 dle ČSN EN 60947-3 [21], připojování a odpojování bez zatížení, případně pro malé proudy do 10 A v kategorii DC-21, spínání odporových zátěží. Velikost proudu v obvodu se měří ampérmetrem s prodlouženou stupnicí 100/200 A. Jištění obvodu je provedeno jednopólovým jističem SEZ PR121-D125 (FA5).



### 5.3.2 Obvod sinusového střídače

Obvod sinusového střídače je hlavním silovým výstupem modelového soustrojí. Střídač Mean-Well TS-1500 (obr.23) je dvojitý DC/AC měnič s pulzně-šířkovou modulací, na jehož výstupu je napětí 230 V s frekvencí 50 Hz. Hlavní parametry střídače jsou uvedeny v tabulce 13.



Obr.23 Střídač MeanWell TS-1500

Tab.13 Základní parametry střídače MeanWell TS-1500

| základní parametry střídače MeanWell TS-1500 |                    |
|--|--------------------|
| typ  | TS-1500-212        |
| jmenovité vstupní napětí                     | 12 V DC            |
| dovolené vstupní napětí                      | 10,5-15 V          |
| jmenovitý vstupní proud                      | 150 A              |
| jmenovitý výstupní výkon                     | 1,5 kW             |
| jmenovité výstupní napětí                    | 230 V AC $\pm 3$ % |
| frekvence                                    | 50 Hz $\pm 0,1$ %  |
| zkreslení výstupního napětí (THD)            | < 3 %              |
| hmotnost                                     | 6,85 kg            |

Podle [26]

Vstupní svorky střídače (obr.24) jsou propojeny s obvodem malého napětí přes ampérmetr s prodlouženou stupnicí 100/200 A. Střídač je tak připojen přímo k alternátoru. Spínačem QM3 lze na vstup střídače přivést napětí z akumulátoru nebo z externího napájecího zdroje (obr.19). Výstup ze střídače je chráněn jednopólovým jističem SEZ PR61-B6. Voltmetr a ampérmetr slouží ke sledování zatížení střídače a ke kontrole výstupního napětí. Zátěž se připojuje dvoupólovým vačkovým spínačem Obzor VSR16-1102A8 (QM2), přes zásuvku SEZ VZ16 250 V/16 A (ČSN EN 60309-1 [17]). Vnitřní uspořádání střídače je na obr.24.



*Obr.24 Vnitřní uspořádání střídače MeanWell TS-1500*

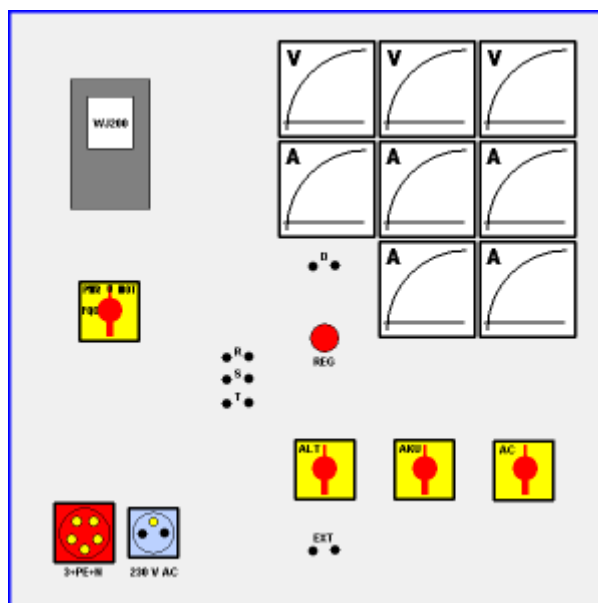
## 6 ROZVADĚČ SOUSTROJÍ

Rozvaděč měřicího soustrojí obsahuje kompletní elektrickou výzbroj, potřebnou pro autonomní provoz. Je navržen plně v souladu s normami ČSN EN 61439-1 [27] a ČSN EN 61439-2 [28]. K základové desce měřicího soustrojí je rozvaděč přišroubován osmi šrouby M6. Vnější rozměry rozvaděče vycházejí z podmínek pro rozměry základové desky celého soustrojí [24] a rozměrů použitých přístrojů. Skříň rozvaděče je ve standardním oceloplechovém provedení o rozměrech  $600 \times 600 \times 210$  mm, typ WSM6060210 z produkce firmy Schrack [29]. Celý rozvaděč je vyroben z hlubokotažného plechu tloušťky 1,4 mm. Dveře rozvaděče, na kterých jsou instalovány měřicí přístroje, přepínače a připojovací místa mají po celém obvodu lité polyuretanové těsnění.

Pro měření proudů a napětí jsou použity rozvaděčové magnetoelektrické a elektromagnetické měřicí přístroje řady PQ96K a EQ96K s třídou přesnosti 1,5 dle ČSN EN 60051-1 [30]. Přesnost elektromagnetických měřicích přístrojů je pro střídavé proudy zaručena výrobcem ve frekvenčním rozsahu 16-100 Hz. Ampérmetry mají prodlouženou stupnici na dvojnásobek jmenovité hodnoty. Trvalá přetížitelnost všech přístrojů je 120 % jmenovitého rozsahu. Po dobu 5 s mají voltmetry dvojnásobnou přetížitelnost, u ampérmetrů je přetížitelnost desetinásobná [31].

Propojení motorového obvodu je provedeno vodiči H07V-K (dříve CYA) o průřezu  $2,5 \text{ mm}^2$ , barevné značení vodičů odpovídá ČSN 33 0165 [32]. Zvláštní barevné označení je použito pro měřicí obvody alternátoru. Budicí okruhy alternátoru a výstup střídače jsou propojeny vodiči H07V-K o průřezu  $1,5 \text{ mm}^2$ . Obvody malého napětí jsou propojeny vodiči H07V-K o průřezu  $25 \text{ mm}^2$  nebo holými přípojnicemi z elektrovodné mosazi CuZn39Pb3 (CW614N) dle ČSN EN 12164 [33] o průřezu  $20 \times 5$  mm. Hnací motor je připojen kabelem H05VV-F 4G2,5 (CYSY) o průřezu  $4 \times 2,5 \text{ mm}^2$  přes svorkovnice RSA4 uvnitř rozvaděče. Všechny vodiče mají v souladu s ČSN EN 50109 [34] nalisované izolované ukončovací prvky.

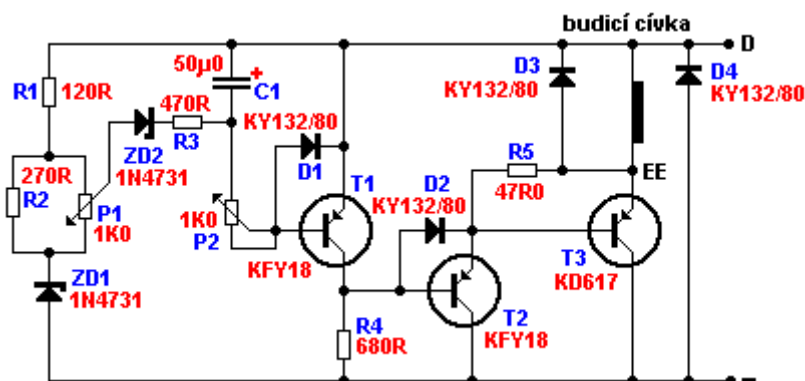
Odvod ztrátového tepla z rozvaděče (frekvenční měnič, obvody malého napětí, jističe, ampérmetry) zajišťují dva ventilátory Sunon DP203A se sníženou hlučností, instalované do stropu skříně. Pro spolehlivý provoz byly zvoleny ventilátory osazené kuličkovými ložisky. Povrchová úprava rozvaděče je již z výroby provedena epoxy-polyesterovým strukturovaným lakováním v odstínu RAL7035 světle šedá [29]. Návrh řešení čelního panelu je na obr.25.



Obr.25 Návrh panelu rozvaděče

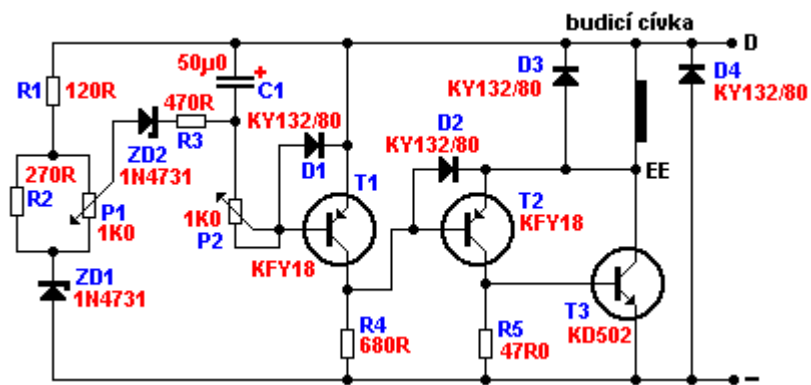
## 6.1 Proporcionální regulátor

V rozvaděči je instalován zpětnovazební lineární regulační obvod pro spojitě řízení buzení alternátoru, s možností ručního nastavení výstupního napětí v rozsahu 8-15 V. Součástky byly navrženy na základě změřených parametrů alternátoru a požadovaných regulačních charakteristik. Z oprávněného požadavku dlouhodobé vysoké provozní spolehlivosti se pro desku plošných spojů předpokládá použití sklotextitu plátovaného mědi o tloušťce 105  $\mu\text{m}$  s minimální návrhovou šířkou spojů 1,27 mm. Abychom zajistili co nejlepší odvod ztrátového tepla z výkonového regulačního tranzistoru, je navržena jeho montáž bez galvanického oddělení na samostatném izolovaném chladiči, který je nezávislý na desce plošných spojů. Lineární regulátor je navržen ve dvou variantách. V PNP provedení, schéma návrhu regulátoru je na obr.26, a s kvazikomplementárním koncovým stupněm, jehož schéma je na obr.27. Základem regulátoru je tzv. referenční normál, tvořený zenerovou diodou ZD1 s napětím 4,3 V. Ta spolu s odporovým děličem R1, R2 a potenciometrem P1 (desetiotáčkový Aripot) vytváří zdroj referenčního napětí pro napěťový zesilovač osazený tranzistorem T1. Zenerova dioda ZD2 omezuje regulační rozsah výstupního napětí alternátoru na 8-15 V. Rezistor R3 s kondenzátorem C1 tvoří filtr, který potlačuje zbytkové zvlnění řídicího napětí a upravuje rychlost odezvy regulátoru na změnu napětí na výstupu alternátoru (svorka D). Potenciometrem P2 lze nastavit stejnosměrný napěťový zisk regulátoru v rozmezí 10-30. Tranzistory T2 a T3 představují proudový zesilovač (emitorový sledovač) v darlingtonově zapojení. Diody D1-D4 tvoří ochranu proti záporným napěťovým špičkám a zpětnému napětí z bodu EE (regulace buzení).



Obr.26 Návrh lineárního PNP regulátoru pro alternátor CA1394IR

Návrh druhé varianty lineárního regulátoru využívá identickou vstupní část, tj. referenční normál, zdroj referenčního napětí (zenerova dioda ZD1, rezistory R1, R2, potenciometr P1) a napěťový zesilovač T1 s regulací stejnosměrného napěťového zisku. Proudový zesilovač tentokrát tvoří tranzistory PNP a NPN (T2, T3) v zapojení, které je známé především z tzv. kvazikomplementárních zapojení výkonových zesilovačů. Funkčně jsou oba regulátory prakticky rovnocenné.



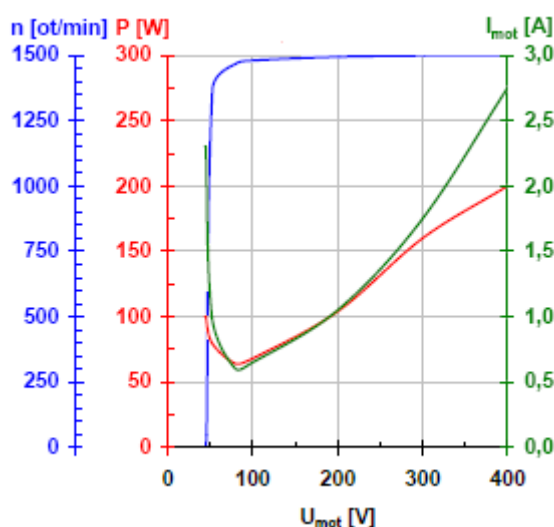
Obr.27 Návrh lineárního regulátoru pro alternátor CA1394IR s NPN tranzistorem

## 7 VSTUPNÍ CHARAKTERISTIKY POHONU SOUSTROJÍ

Pohon laboratorního soustrojí lze provozovat ve třech režimech [35]: přímým napájením z rozvodné sítě, napájením z instalovaného frekvenčního měniče a napájením z nezávislé externí jednotky. Podle toho se mění výkonové charakteristiky (příkon) hnacího motoru. Úvodním měřením bylo měření motoru při chodu naprázdno. V tomto režimu se v motoru uplatňují ztráty na odporu vinutí (tzv. ztráty v mědi), ztráty způsobené magnetizací (tzv. ztráty v železe) a mechanické ztráty, způsobené valivým odporem ložisek, třecím odporem těsnících kroužků hřídele a aerodynamickým odporem chladičového ventilátoru.

### 7.1 Rozběh motoru naprázdno

V grafu na obr.28 je soubor typických charakteristik rozběhu asynchronního motoru s kotvou nakrátko regulovaného proměnným napětím napájením z regulačního autotransformátoru.



**Obr.28** Rozběh asynchronního motoru naprázdno při  $f = 50$  Hz (rozběh řízeným napětím)

Motor se začíná rozbíhat při napětí 45 V (sdružené napětí). Nejmenší příkon a téměř synchronní otáčky má při napětí 80 V. Do 400 V potom už výrazně roste pouze magnetizační proud a ztrátový výkon v železe a v mědi. Vstupní data rozběhu asynchronního motoru naprázdno při frekvenci 50 Hz řízeného napětím uvádí tabulka 14.

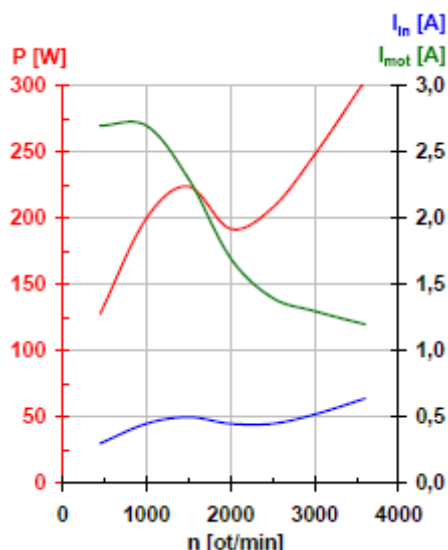
**Tab.14** Vstupní data rozběhu asynchronního motoru naprázdno

| napájecí napětí $U_m$ [V] | otáčky $n$ [ot/min] | proud ve fázi $I_{mot}$ [A] | příkon motoru $P$ [W] |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 44                        | 0                   | 2,30                        | 100                   |
| 45                        | 47                  | 2,30                        | 100                   |
| 52                        | 1 370               | 1,00                        | 80                    |
| 80                        | 1 468               | 0,60                        | 64                    |
| 100                       | 1 480               | 0,65                        | 68                    |
| 200                       | 1 494               | 1,05                        | 104                   |
| 300                       | 1 499               | 1,75                        | 160                   |
| 400                       | 1 500               | 2,75                        | 200                   |

Rozběh motoru při řízení frekvenčním měničem dává zcela odlišný soubor charakteristik (obr.29). Základní osou grafu na obr.29 jsou otáčky motoru. Kromě toho jsou uváděny dvě hodnoty proudu: vstupní proud frekvenčního měniče a proud motoru. V dané aplikaci je frekvenční měnič nastaven pro pohon s konstantním momentem, to znamená, že se výkon motoru mění lineárně se změnou otáček podle rovnice

$$P = M\omega \quad (4)$$

až do jmenovitých otáček. V nadsynchronní oblasti otáček se výkon mění podle nastavení proudových ochran frekvenčního měniče.



**Obr.29** Rozběh asynchronního motoru naprázdno řízený frekvenčním měničem

Vstupní data rozběhu asynchronního motoru naprázdno řízeného frekvenčním měničem uvádí tabulka 15.

**Tab.15** Vstupní data rozběhu asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem

| Otáčky<br>n<br>[ot/min] | Proud<br>měniče<br>I <sub>in</sub> [A] | Proud<br>ve fázi<br>I <sub>mot</sub> [A] | Příkon<br>motoru<br>P [W] |
|-------------------------|--|--|---------------------------|
| 450                     | 0,30                                   | 2,70                                     | 128                       |
| 1 000                   | 0,45                                   | 2,70                                     | 200                       |
| 1 500                   | 0,50                                   | 2,30                                     | 224                       |
| 2 000                   | 0,45                                   | 1,70                                     | 192                       |
| 2 500                   | 0,45                                   | 1,40                                     | 208                       |
| 3 000                   | 0,52                                   | 1,30                                     | 248                       |
| 3 600                   | 0,64                                   | 1,20                                     | 304                       |

Zvětšující se příkon motoru v nadsynchronních otáčkách je, mimo jiné, způsoben ventilátorem, jehož odebíraný mechanický výkon teoreticky roste s třetí mocninou otáček, což lze odvodit ze základních rovnic aerodynamického odporu  $F_a$  a mechanického výkonu.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho c S v^2 \quad (5)$$

$$P_a = F_a v = \frac{1}{2} \rho c S v^3 \quad (6)$$

kde je:

$F_a$  - aerodynamická síla,

$\rho$  - měrná hmotnost vzduchu,

$c$  - aerodynamický součinitel odporu,

$S$  - čelní plocha ve směru proudění,

$v$  - rychlost vzduchu,

$P_a$  - výkon.

Protože vrtule ventilátoru chlazení mají obvykle proměnný profil, je potřeba vzít v úvahu závislost na vzdálenosti od osy nejen u odporové plochy  $cS(r)$ , ale i změnu rychlosti  $\omega r$ . Za předpokladu konstantní hustoty vzduchu lze pro výkon ventilátoru podle rovnice (6) odvodit zjednodušenou rovnici.

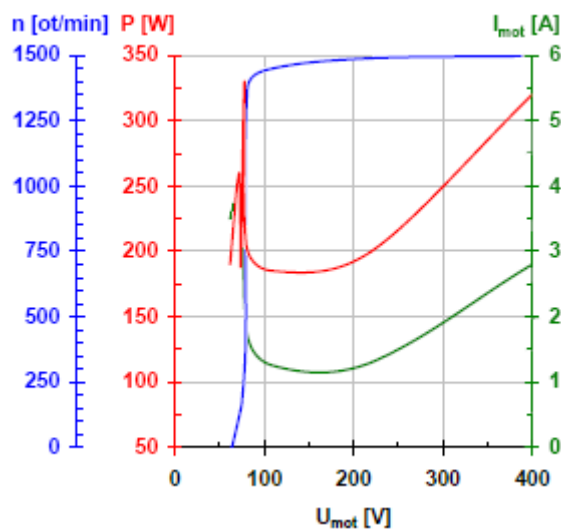
$$P_a = \frac{1}{2} \rho n \int_0^r (cS(r)) \omega^3 r^3 dr \quad (7)$$

V praxi je výpočet příkonu ventilátoru mnohem složitější, protože musíme brát v úvahu, že část vzduchu rotuje společně s vrtulí v částečně uzavřeném krytu ventilátoru.

## 7.2 Rozběh motoru s připojeným alternátorem

Po změření rozběhových charakteristik motoru naprázdno bylo dalším měřením v pořadí měření rozběhových charakteristik motoru zatíženého řemenovým převodem a nenabuzeným alternátorem. Rozběhové charakteristiky zatíženého asynchronního motoru s kotvou nakrátko, spouštěného změnou napětí (obr.30), se výrazně odlišují od rozběhových charakteristik naprázdno (obr.28).

Vstupní data rozběhu zatíženého asynchronního motoru řízeného napětím při frekvenci 50 Hz jsou uvedena v tabulce 16. Vlivem mechanických odporů se motor začíná rozbíhat při sdruženém napětí 72 V, detail začátku rozběhové charakteristiky je na obr.31.

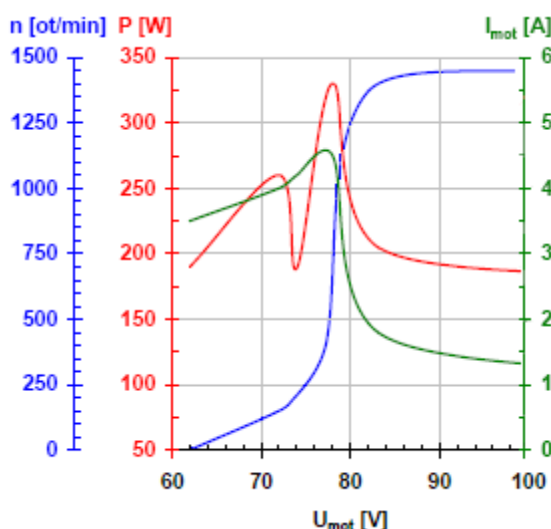


**Obr.30** Rozběh zatíženého asynchronního motoru při  $f = 50$  Hz (rozběh řízení napětím)



**Tab.16 Vstupní data rozběhu zatíženého asynchronního motoru**

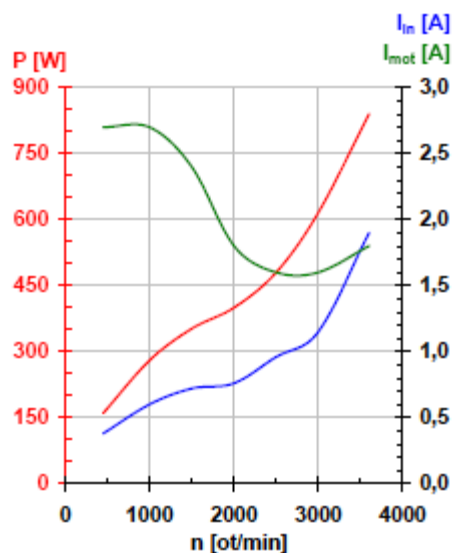
| napájecí napětí<br>$U_m$ [V] | otáčky<br>$n$ [ot/min] | proud ve fázi<br>$I_{mot}$ [A] | příkon motoru<br>$P$ [W] |
|------------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 62                           | 0                      | 3,50                           | 190                      |
| 72                           | 142                    | 4,00                           | 260                      |
| 74                           | 189                    | 4,20                           | 189                      |
| 78                           | 402                    | 4,50                           | 330                      |
| 83                           | 1 374                  | 1,80                           | 205                      |
| 110                          | 1 449                  | 1,25                           | 185                      |
| 220                          | 1 488                  | 1,30                           | 200                      |
| 400                          | 1 497                  | 2,80                           | 320                      |



**Obr.31 Detail na začátku rozběhové charakteristiky zatíženého motoru**

První výkonové maximum odpovídá okamžiku, kdy točivý moment motoru překoná statické mechanické odpory a soustrojí se začíná rozbíhat, to znamená, že motor přechází ze stavu nakrátko do provozních podmínek. Pokles činného příkonu při rostoucím proudu dokládá, že se část příkonu přesouvá z téměř čistě činné složky u motoru nakrátko do jalové složky u otáčejícího se motoru. Na otáčkové charakteristice tomu odpovídá zlom, za kterým začínají otáčky rychle narůstat. Druhé výkonové maximum odpovídá i maximu fázového proudu motoru a zlomu na charakteristice motoru a v daném případě odpovídá 402 ot/min. Další zvýšení napětí (ze 78 na 81 V) je charakterizováno postupným rozběhem soustrojí na téměř provozní otáčky se současným poklesem proudu motoru i příkonu.

Rozběh zatíženého asynchronního motoru při řízení frekvenčním měničem dává, stejně jako při rozběhu naprázdno, odlišný soubor charakteristik (obr.32). Stejně jako na obr.29 jsou základní osou grafu otáčky motoru a stejně tak jsou uváděny hodnoty vstupního proudu frekvenčního měniče a proudu motoru. Frekvenční měnič je nastaven pro pohon s konstantním momentem a rozběhovým časem 5 s. V nadsynchronních otáčkách je maximální proud dodávaný měničem 6,9 A a maximální výkon motoru je omezen na 3 kW [18]. Vstupní data rozběhu zatíženého asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem jsou uvedena v tabulce 17.



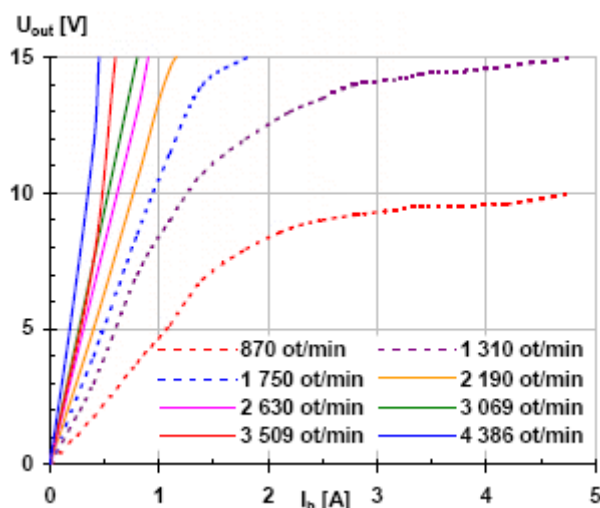
**Obr.32** Rozběh zatíženého asynchronního motoru řízený frekvenčním měničem

**Tab.17** Vstupní data rozběhu zatíženého asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem

| otáčky<br>n<br>[ot/min] | proud<br>měniče<br>$I_{in}$ [A] | proud<br>ve fázi<br>$I_{mot}$ [A] | příkon<br>motoru<br>P [W] |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 450                     | 0,38                            | 2,7                               | 160                       |
| 1 000                   | 0,60                            | 2,7                               | 280                       |
| 1 500                   | 0,72                            | 2,4                               | 352                       |
| 2 000                   | 0,76                            | 1,8                               | 400                       |
| 2 500                   | 0,96                            | 1,6                               | 480                       |
| 3 000                   | 1,15                            | 1,6                               | 616                       |
| 3 600                   | 1,90                            | 1,8                               | 840                       |

## 8 PŘEDVODNÍ CHARAKTERISTIKY ALTERNÁTORU

Pro určení využitelného rozsahu provozních otáček alternátoru CA1394IR byly změřeny charakteristiky závislosti výstupního napětí alternátoru naprázdno na budicím proudu při konstantních otáčkách. Z grafu na obr.33 vyplývá, že pro nízké provozní otáčky (do 1 310 ot/min) není možné alternátor vybudit na jmenovité výstupní napětí 14 V. Na základě výsledků uvedeného měření byl proto pro měřicí soustrojí zvolen provozní rozsah otáček 1 310 až 10 260 ot/min, přičemž 6 000 ot/min považujeme za maximální provozní otáčky alternátoru pro dlouhodobá měření. Uvedené charakteristiky jsou jedním z původních výstupů projektu specifického výzkumu [36].



Obr.33 Převodní charakteristiky alternátoru pro stanovení pracovního rozsahu otáček

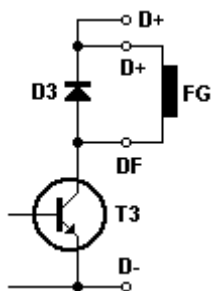
V dalších měřeních byly měřeny a porovnávány závislosti budicího proudu alternátoru při lineárním a pulzním buzení v závislosti na jeho otáčkách při chodu naprázdno, při konstantním výstupním proudu 45 a 87,5 A a také budicí a zatěžovací charakteristiky při nízkých otáčkách, tj. při minimálních otáčkách 1 308 ot/min, kdy je alternátor schopen vygenerovat výstupní napětí 14 V, a při minimálních provozních otáčkách [8] 1 800 ot/min, kdy je alternátor už schopen dodávat výkon do zátěže.

### 8.1 Charakteristiky pulzního buzení

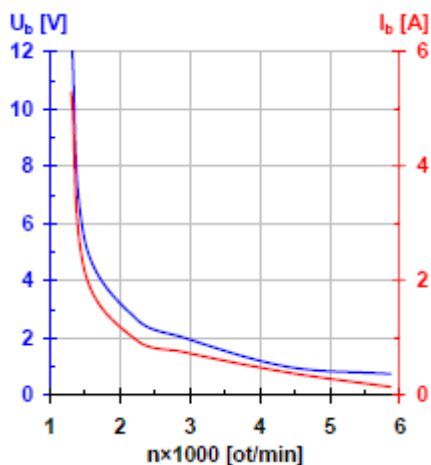
Výhodou pulzního buzení jsou relativně malé výkonové ztráty na regulačním prvku. Nevýhodou je nespojitý magnetický tok v rotorovém obvodu. Na obr.34 je typické zapojení koncového stupně pulzního regulátoru typu EE [38]. Budicí vinutí alternátoru FG je připojeno k výstupu alternátoru a spínacím tranzistorem T3 je spínáno proti zemi. Ochranná dioda D3 omezuje indukované napěťové špičky při rozepnutí tranzistoru.

Z mechanického hlediska vytváří pulzní buzení pro hnací jednotku proměnný (pulzující) brzdící moment.

V grafu na obr.35 jsou budicí charakteristiky nezátěženého alternátoru v závislosti na otáčkách při výstupním napětí 14,4 V, které udržuje pulzní regulátor alternátoru.



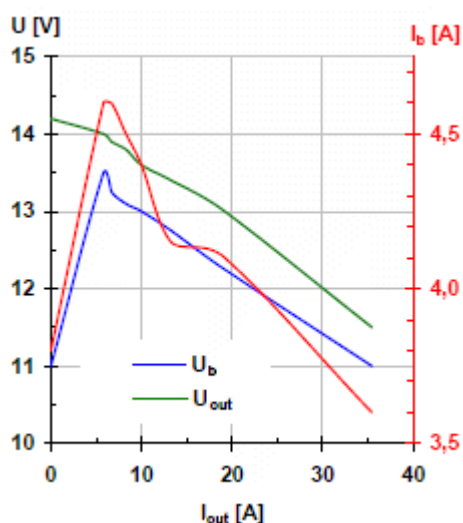
**Obr.34** Zapojení koncového stupně pulzního regulátoru typu EE [23]



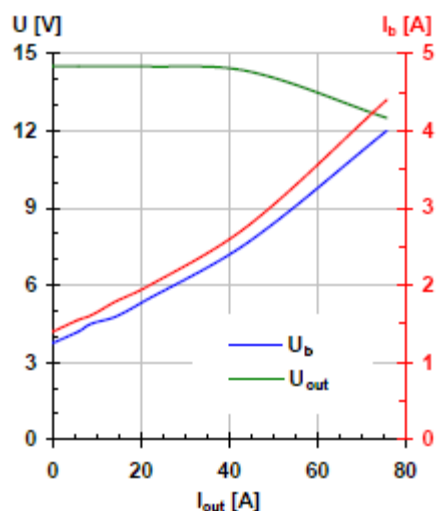
**Obr.35** Charakteristiky alternátoru  
(pulzní buzení, bez zátěže)

Na obr.36 jsou budicí a zatěžovací charakteristiky do odporové zátěže při 1 308 ot/min, tj. při minimálních otáčkách, kdy je alternátor ještě schopen vygenerovat výstupní napětí 14 V. Z grafu je zřejmé, že výstupní napětí alternátoru při zatížení velmi rychle klesá. Maximální proud, který lze odebrat bez poklesu pod 14 V je 5,8 A. V tomto bodě je rovněž maximum budicího proudu.

Budicí a výstupní charakteristiky odporově zatěžovaného alternátoru při minimálních provozních otáčkách (podle údajů výrobce 1 800 ot/min [8]) jsou na obr.37. Při 1 800 ot/min alternátor dodává do zátěže proud až 40 A bez poklesu napětí. Budicí proud s budicím napětím při zatěžování trvale stoupá.

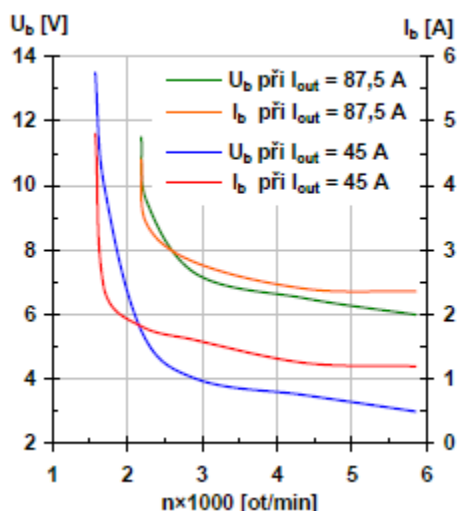


**Obr.36** Charakteristiky alternátoru  
(pulzní buzení, 1 308 ot/min)



**Obr.37 Charakteristiky alternátoru**  
(pulzní buzení, 1 800 ot/min)

V souborném grafu na obr.38 jsou budicí charakteristiky alternátoru v typickém rozpětí provozních otáček do 1 800 do 6 000 ot/min [8]. Ze změřených výsledků můžeme odvodit, že za optimální provozní rozsah je možné považovat rozpětí otáček od 2 500 do 4 500 ot/min.



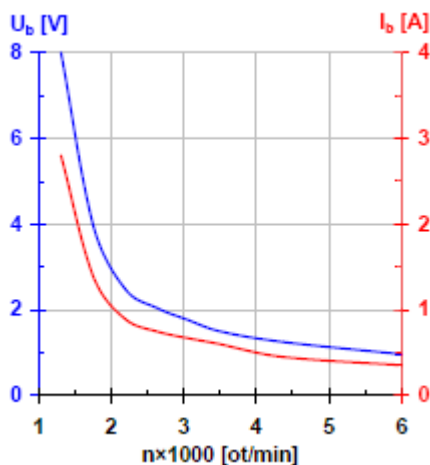
**Obr.38 Pulzní buzení alternátoru**

## 8.2 Charakteristiky externího lineárního buzení

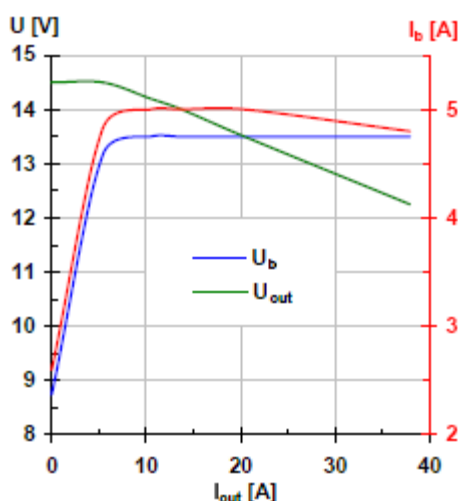
Lineární buzení alternátoru se částečně vrací k původní třístavové odporově-reléové regulaci alternátorů [23]. Plně lineární (spojité) buzení představuje režim obvyklý u velkých energetických strojů. Jeho nevýhodou jsou sice větší výkonové ztráty na regulačním prvku, na druhé straně však lineární buzení přináší spojitý magnetický tok v rotorovém obvodu a tím i spojitě proměnnou magnetickou indukci v mezeře rotor-stator. Z mechanického hlediska vytváří lineární buzení pohonací jednotku stabilní nebo plynule proměnný brzdící moment.

V grafu na obr.39 jsou budicí charakteristiky nezátíženého alternátoru v závislosti na otáčkách při výstupním napětí 14,4 V nastaveném stejnosměrným budícím proudem z externího zdroje. Na obr.40 jsou budicí a zatěžovací charakteristiky odporově zatíženého alternátoru při minimálních otáčkách, kdy alternátor ještě vygeneruje výstupní napětí 14 V, tj. 1 308 ot/min.

Z grafu je vidět, že výstupní napětí alternátoru při zatížení při stabilním buzení klesá. Maximální proud bez poklesu napětí pod 14 V je 13,75 A.



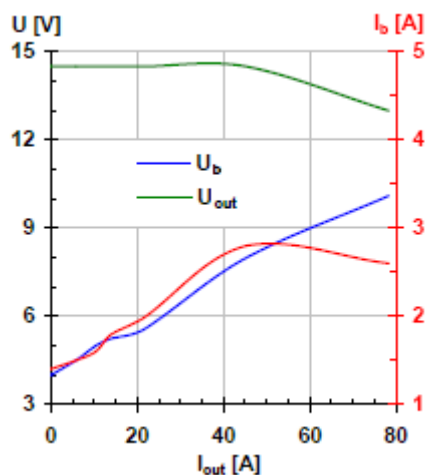
**Obr.39 Charakteristiky alternátoru**  
(externí lineární buzení, bez zátěže)



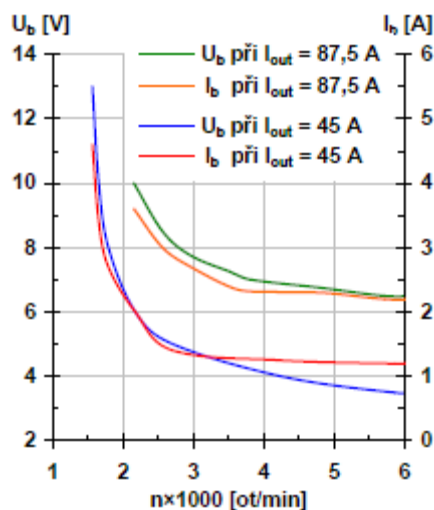
**Obr.40 Charakteristiky alternátoru**  
(externí lineární buzení, 1 308 ot/min)

Budicí a výstupní charakteristiky alternátoru při odporové zátěži při výrobcem stanovených minimálních provozních otáčkách 1 800 ot/min [8] jsou na obr.41. Při těchto otáčkách alternátor dodává do zátěže proud až 46 A bez poklesu napětí. Při poklesu napětí na 14 V je výstupní proud 55 A a 78 A při výstupním napětí 13,2 V.

V souborném grafu na obr.42 jsou budicí charakteristiky alternátoru v typickém rozpětí provozních otáček do 1 800 do 6 000 ot/min [8]. Podle výsledků měření a průběhu charakteristik můžeme za optimální provozní rozsah otáček, při lineárním buzení alternátoru, považovat otáčky v rozmezí od 2 500 do 4 500 ot/min.



**Obr.41 Charakteristiky alternátoru**  
(externí lineární buzení, 1 800 ot/min)

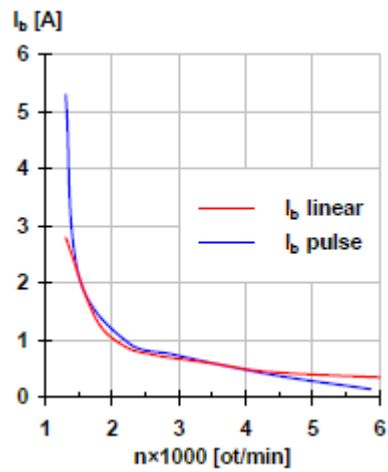


**Obr.42 Externí lineární buzení alternátoru**

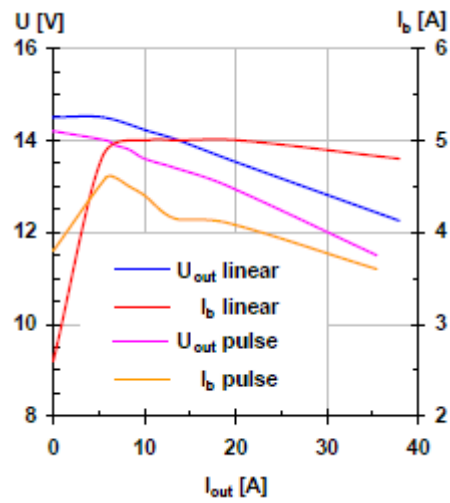
### 8.3 Porovnání charakteristik alternátoru

Porovnáním výsledků provedených měření výstupních charakteristik a budicího proudu, dojdeme k zajímavým zjištěním. Při chodu alternátoru naprázdno je při malých otáčkách proud pulzního buzení výrazně vyšší oproti stálému proudu externího lineárního buzení (obr.43).

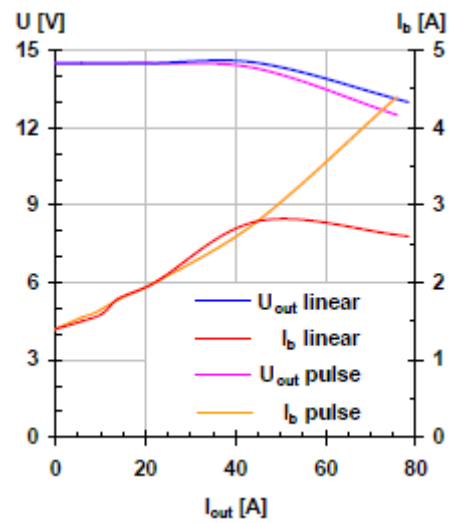
V grafu na obr.44 je porovnání budicích proudů a výstupních napětí při minimálních otáčkách alternátoru. Externí lineární buzení v tomto případě pracuje s vyšším budicím proudem, přičemž pokles budicího proudu s rostoucím zatížením alternátoru a poklesem výstupního napětí je oproti pulznímu buzení menší. Také výstupní napětí klesá při lineárním buzení pomaleji a při zátěži do 40 A neklesne pod 12 V.



**Obr.43 Budicí proud bez zátěže**



**Obr.44 Budicí proud a výstupní napětí (1 308 ot/min)**

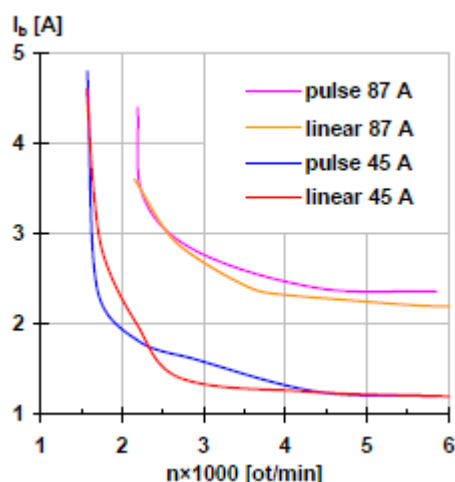


**Obr.45 Budicí proud a výstupní napětí (1 800 ot/min)**



Podobné výsledky jsou vidět také na grafu na obr.45, kde jsou charakteristiky při otáčkách alternátoru 1 800 ot/min. Z grafu je zřejmé, že při externím lineárním buzení dochází k menšímu poklesu výstupního napětí se zatížením alternátoru a pro buzení postačuje menší proud.

Porovnání budicích charakteristik zatíženého alternátoru při proměnných otáčkách je v grafu na obr.46. Z grafu je zřejmé, že lineární buzení vyžaduje menší budicí proud s výjimkou rozsahu otáček mezi 1 795 ot/min až 2 180 ot/min při zatěžovacím proudu 45 A. Porovnání změřených charakteristik (obr.43-46) je možné konstatovat, že příznivější výsledky dává lineární buzení alternátoru, které zpravidla vyžaduje menší budicí proud.



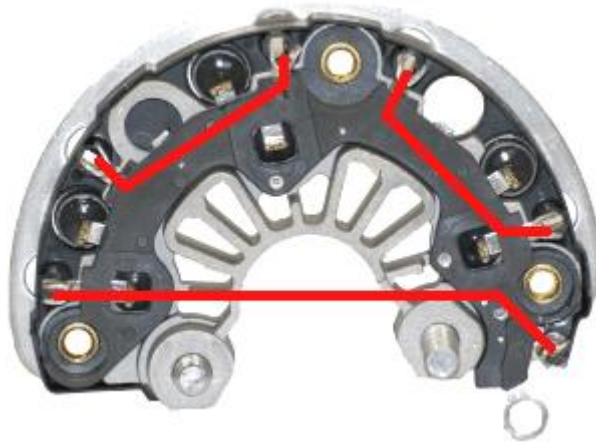
**Obr.46 Budicí proud při zatížení**

## 8.4 Nové poznatky - přínos havárie alternátoru

Při experimentálním výzkumu se někdy vyskytnou nečekané komplikace, které je velmi obtížné předvídat. Při prvních zátěžových testech s připojeným DC/AC měničem došlo při nečekaném výpadku měniče ke skokovému zvýšení výstupního napětí alternátoru. To následně vedlo k prořazení jedné z diod v záporné sekci usměrňovacího můstku a zničení regulátoru. Oprava si vyžádala náklady ve výši 3 500 Kč.

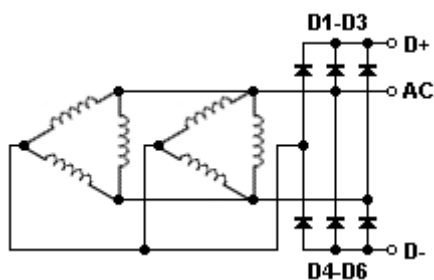
### 8.4.1 Vnitřní zapojení alternátoru

Havárie alternátoru paradoxně přinesla nové poznatky. Z vadného diodového můstku se podařilo odvodit vnitřní zapojení alternátoru, které není dostupné ani v katalogu výrobce [8]. Měřením se v diodovém můstku objevila vzájemná propojení mezi šesti vývody vinutí alternátoru (obr.47).



**Obr.47 Propojky v diodovém můstku**

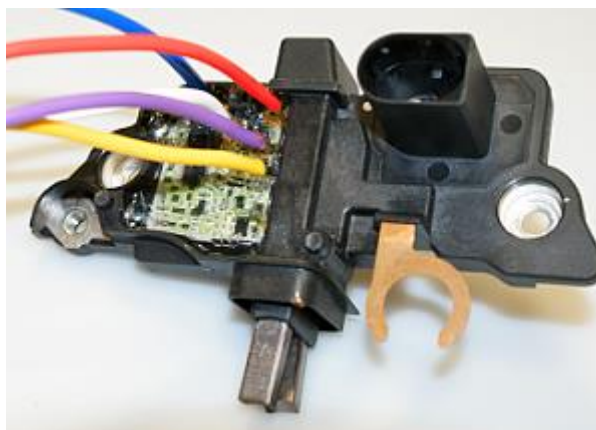
Vinutí alternátoru tedy tvoří šest cívek, které jsou zapojeny do dvou paralelně spojených trojúhelníků (obr.48).



**Obr.48 Vnitřní zapojení alternátoru**

#### 8.4.2 Vlastnosti pulzních regulátorů

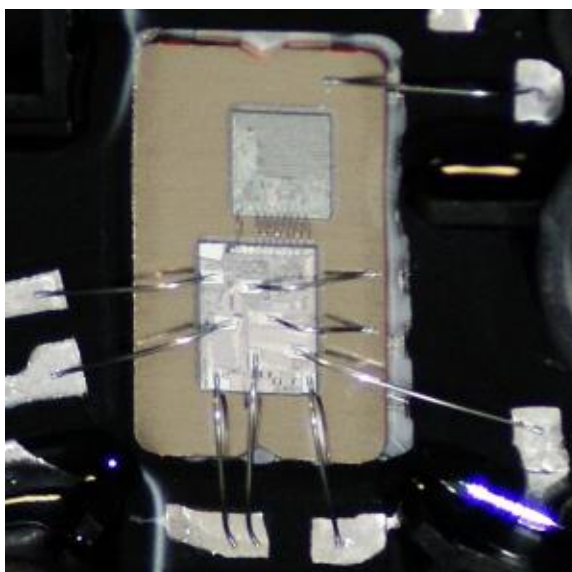
Nečekané problémy přinesla výměna poškozeného regulátoru. Původní regulátor alternátoru ze série R20-008Y YY13276 je víceúčelový regulátor pro alternátory bez pomocného usměřovače [23], postavený na součástkách SMD (obr.49).



**Obr.49 Původní regulátor s připojenými vývody**

Regulátor nové generace (obr.50) je už realizován na bázi mikroelektroniky a jeho vývody jsou navařeny na nepájitelné hliníkové plošky. Pro jeho připojení k alternátoru tak muselo být využito

stávající připojení na kartáče původního regulátoru a nasvorkování vývodu DF z kartáče regulátoru.



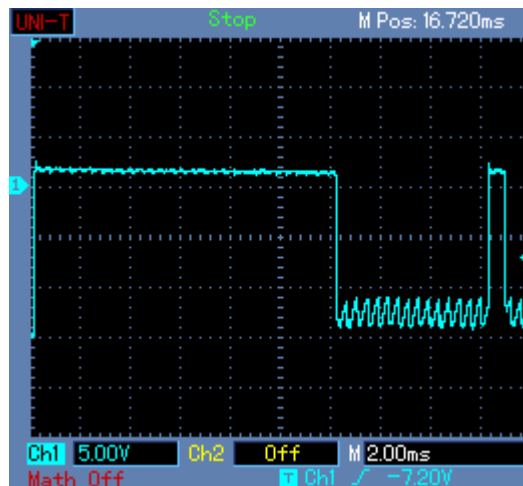
**Obr.50 Elektronika regulátoru nové generace**

Provozní zkoušky však ukázaly, že regulátor je značně nestabilní a jak budicí proud, tak výstupní napětí výrazně kolísá. Naměřeny byly výkyvy v rozmezí 13,6-14,4 V při konstantní zátěži. Ve spojení s akumulátorem se napětí neovladatelně zvýšilo na 16 V a došlo ke zničení regulátoru, naštěstí bez poškození diodového můstku. Po instalaci druhého náhradního regulátoru byly nasnímány oscilogramy budicího a výstupního napětí, přičemž alternátor z důvodu eliminace možných havarijních stavů pracoval pouze do odporové zátěže.

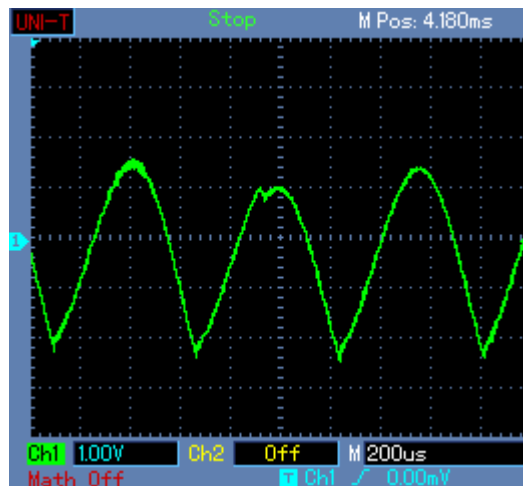
Vyhodnocení oscilogramů a zaznamenaných dat poskytlo vysvětlení nestability buzení a kolísání výstupního napětí. I při konstantní zátěži mají obdélníkové budicí impulsy produkované regulátorem silně proměnnou střídu (obr.51). Šířka naměřených impulsů kolísá v obrovském rozpětí od 400  $\mu$ s do 12 ms a důsledkem je kolísání výstupního napětí. Oscilogram na obr.52 zobrazuje nestejnou výšku vrcholů usměrněného napětí na výstupu alternátoru. Další projevy nestability regulátoru byly zjištěny při zátěžových zkouškách, kdy zejména při skokové změně zatížení se alternátor několikrát nečekaně odbudil.

Na základě uvedených zjištění byl pro buzení alternátoru pokusně použit alternativní pulzní regulátor Topran 100-134 14 V (obr.53). Jedná se o jednoduchý levný regulátor, přednostně určený pro alternátory 70 a 90 A. Lze ho bez problémů použít i pro alternátor 120 A.

Přes konstrukční jednoduchost, chybějící vazbu na střídavé napětí alternátoru a desetinou cenu oproti originálnímu regulátoru Bosch poskytuje regulátor Topran dostatečnou stabilitu a dle dosavadních výsledků i spolehlivý provoz alternátoru. Na obr.54 je oscilogram budicího napětí z regulátoru Topran. Oproti regulátoru Bosch jsou na průběhu napětí viditelné výrazné tlumené kmity na vzestupných i sestupných hranách. Šířka impulsů je téměř konstantní a pohybuje se v rozsahu 160 až 200  $\mu$ s.



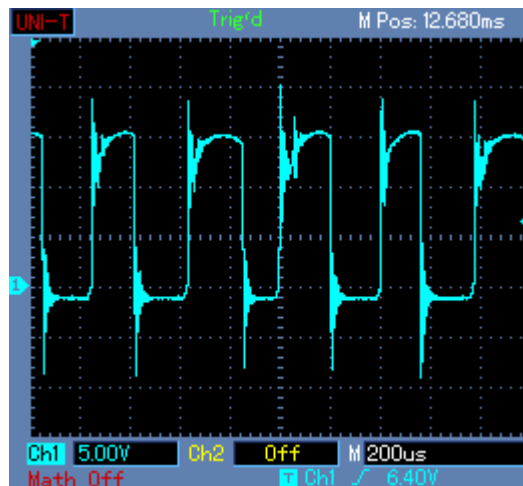
**Obr.51 Průběhy budicího napětí alternátoru**  
(regulátor Bosch, 4 335 ot/min, 125 A)



**Obr.52 Průběh výstupního napětí alternátoru**  
(regulátor Bosch, 2 890 ot/min, 88 A)

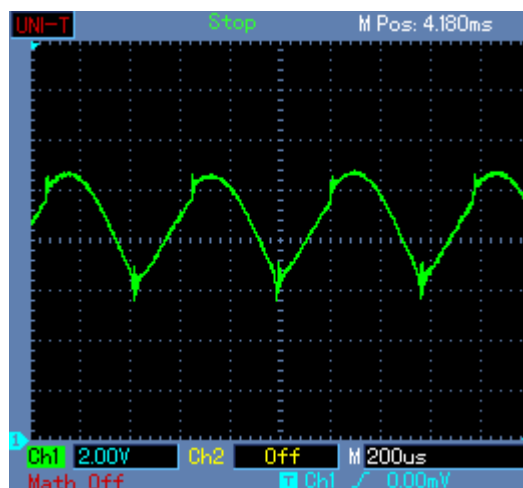


**Obr.53 Pulzní regulátor Topran 100-134 14V s připojenými spojovacími vodiči**



**Obr.54 Průběh budicího napětí alternátoru**  
(regulátor Topran, 4 335 ot/min, 120 A)

Zákmity v budicím okruhu alternátoru se zcela pochopitelně projeví i na průběhu výstupního napětí. Na oscilogramu (obr.55) jsou viditelné drobné deformace průběhu před vrcholem i zákmity mezi navazujícími sinusovými úsečky usměrněného napětí. Průběh napětí je však stabilní se stále stejnými úrovněmi.



**Obr.55 Průběh výstupního napětí alternátoru**  
(regulátor Topran, 2 890 ot/ min, 88 A)

Mezi testovanými regulátory je ještě jeden podstatný rozdíl. Regulátor Bosch začíná pracovat od napětí 8-9 V v závislosti na otáčkách alternátoru. Při použití regulátoru Topran začíná buzení pracovat již při napětí 5-6 V. Na základě dosavadních výsledků bylo proto rozhodnuto, že soustrojí zůstane prozatím osazeno pulzním regulátorem Topran 100-134. Mimo jiné i z toho důvodu, že se regulátor Topran při provozu méně zahřívá.

Při zkušebním provozu se zatěžovacím proudem 87,5 A se regulátor Topran po 15 minutách ohřál při teplotě okolí 24 °C na teplotu 38 °C (měřeno na krytu regulátoru). Teplota chladiče regulátoru Bosch za stejných podmínek dosáhla 62 °C. Získat vysvětlení k některým negativním jevům bude cílem dalšího zkoumání.

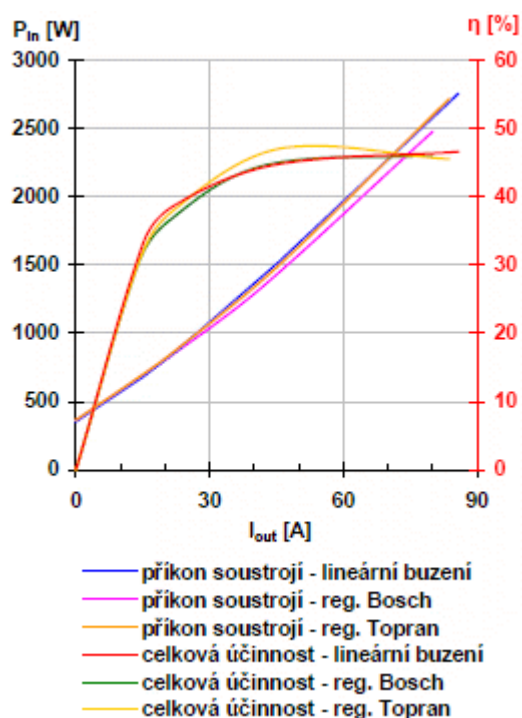
## 9 VÝKONOVÉ CHARAKTERISTIKY SOUSTROJÍ

### 9.1 Výkonové charakteristiky při napájení frekvenčním měničem

Východiskem pro výkonové charakteristiky měřicího soustrojí bylo měření příkonu soustrojí a stanovení celkové účinnosti podle rovnice

$$\eta = 100 \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad [\%] \quad (8)$$

při zátěži alternátoru 0-120 A, při jmenovitém výstupním napětí alternátoru 14,4 V. Reálné výstupní napětí alternátoru kolísalo v závislosti na typu regulace v rozmezí 14,2-15,7 V, přičemž výstupní výkon byl vždy vypočítán z aktuálních hodnot výstupního proudu a napětí. V grafu (obr.56) jsou zobrazeny průběhy příkonu a celkové účinnosti soustrojí při otáčkách alternátoru 2 890 ot/min, při kterých je alternátor schopen dodávat proud ještě 80 A, přičemž výstupní napětí alternátoru neklesne pod hranici 14,2 V. Motor byl napájen frekvenčním měničem a podle katalogových údajů [6] má při 100% zatížení a účinnosti 84,5 % jmenovitý příkon 2,6 kW a fázový proud 4,7 A. Celková účinnost soustrojí je pod hranicí 50 %. V rozpětí zatěžovacího proudu 30-70 A pracuje s vyšší účinností pulzní regulace s regulátorem Topran. Je ale třeba vzít v úvahu i skutečnost, že vlivem rozdílného výstupního napětí regulátorů Bosch a Topran se výstupní výkon alternátoru liší. Porovnání výkonových charakteristik soustrojí v oblasti vyšších proudů při otáčkách alternátoru 2 890 ot/min je v tabulce 18.

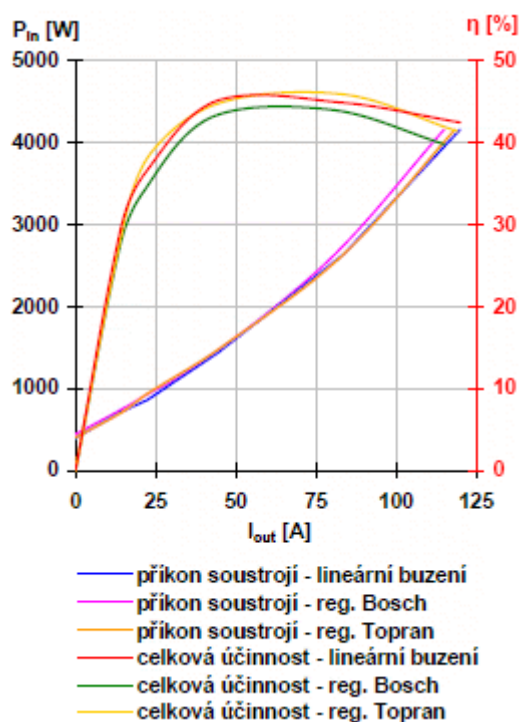


Obr.56 Charakteristiky soustrojí při otáčkách alternátoru 2 890 ot/min

**Tab.18 Výstupní hodnoty při otáčkách alternátoru 2 890 ot/min**

| buzení alternátoru | výstupní napětí [V] | výstupní proud [A] | výstupní výkon [W] | celková účinnost [%] |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Bosch              | 14,3                | 42,50              | 608                | 44,69                |
| Topran             | 15,5                | 46,25              | 717                | 47,16                |
| ext. linear.       | 15,0                | 45,42              | 681                | 44,82                |
| Bosch              | 14,3                | 80,00              | 1 144              | 46,13                |
| Topran             | 14,8                | 83,75              | 1 240              | 45,57                |
| ext. linear.       | 15,0                | 85,83              | 1 288              | 46,65                |

Další výkonové charakteristiky soustrojí (obr.57) byly měřeny ve středním pásmu provozních otáček, tj. při 4 335 ot/min. Při uvedených otáčkách je alternátor schopen dodávat do odporové zátěže jmenovitý proud 120 A. Celková účinnost soustrojí je i v tomto případě pod hranicí 50 %, přičemž vyšší účinnosti dosahuje soustrojí při lineárním buzení a příkon při maximálním zatížení přesahuje 4 kW.



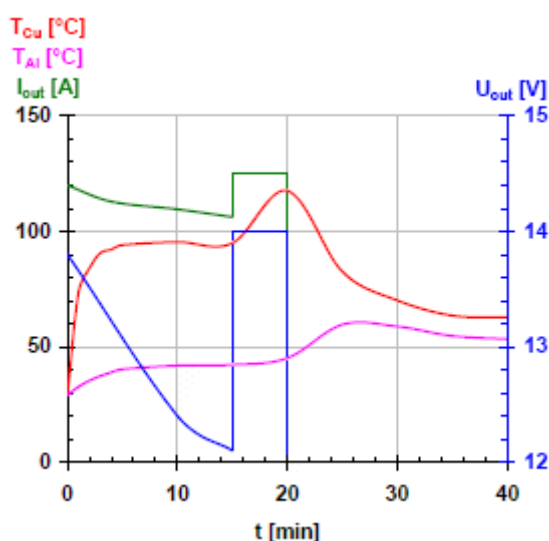
**Obr.57 Charakteristiky soustrojí při otáčkách alternátoru 4 335 ot/min**

Porovnání výkonových charakteristik soustrojí v rozsahu proudů 40-120 A při otáčkách alternátoru 4 335 ot/min je v tabulce 19.

**Tab.19 Výstupní hodnoty při otáčkách alternátoru 4 335 ot/min**

| buzení alternátoru | výstupní napětí [V] | výstupní proud [A] | výstupní výkon [W] | celková účinnost [%] |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Bosch              | 14,2                | 42,92              | 609                | 44,16                |
| Topran             | 15,5                | 45,83              | 710                | 46,99                |
| ext. linear.       | 15,0                | 45,00              | 675                | 46,88                |
| Bosch              | 14,3                | 80,00              | 1 144              | 46,89                |
| Topran             | 15,0                | 83,75              | 1 256              | 47,59                |
| ext. linear.       | 15,0                | 84,58              | 1 269              | 48,06                |
| Bosch              | 14,2                | 114,17             | 1 621              | 43,12                |
| Topran             | 14,8                | 118,33             | 1 751              | 42,10                |
| ext. linear.       | 15,0                | 121,67             | 1 825              | 43,87                |

Za povšimnutí stojí významný pokles účinnosti při maximálním zatížení, který je způsoben jednak ztrátami na odporu vinutí alternátoru a také růstem tohoto odporu v důsledku silného zahřívání vinutí. Vinutí alternátoru vykazuje výraznou termickou kompresi, kterou musí regulace buzení vykompenzovat. V grafu na obr.58 je průběh výstupního napětí, proudu a teplot při konstantním buzení alternátoru. Při poklesu napětí k hranici 12 V bylo buzení upraveno tak, aby alternátor dodával napětí 14 V při proudu 125 A. Jak vyplývá z grafu, teplota vinutí strmě stoupla během pěti minut až na 117,6 °C. Tím bylo měření ukončeno a sledováno následné chladnutí stojícího alternátoru. Termosnímek zatíženého alternátoru před ukončením měření je na obr.59.



**Obr.58 Termická komprese ve vinutí alternátoru**





**Obr.59 Termosnímek alternátoru zatíženého jmenovitým proudem 120 A**

Teplota vinutí, která dosahovala při maximálním zatížení 117,6 °C, byla měřena kontaktně platinovým termočlánkem přímo ve vinutí alternátoru. Vzhledem k zapojení alternátoru (dvojitý paralelní trojúhelník) a malému odporu vinutí nelze pro určení teploty vinutí využít rovnice pro výpočet teploty vinutí podle ČSN 35 0010 [37] při použití standardního ohmmetru.

$$t_{Cu} = t_0 + 255 \cdot \left( \frac{R_t}{R_0} - 1 \right) \quad (9)$$

kde je:

$t_{Cu}$  - teplota vinutí

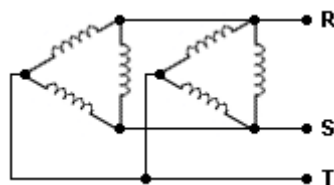
$t_0$  - teplota okolí

$R_t$  - odpor otepleného vinutí

$R_0$  - odpor studeného vinutí

Mezifázový odpor  $R_{ff}$ , měřený ohmmetrem, je při odporu jednoho vinutí  $R_v$  a zapojení podle obr.60 dán rovnicí

$$R_{ff} = \frac{1}{3} R_v \quad (10)$$

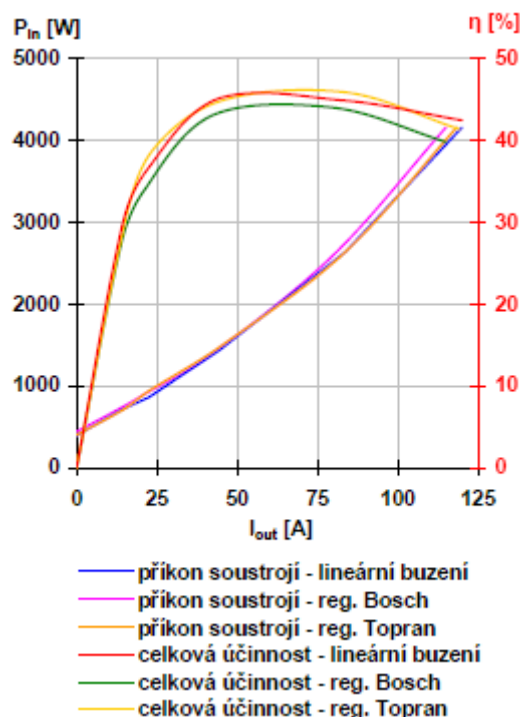


**Obr.60 K rovnicím (9) a (10)**

Úpravou rovnice (10) potom dostaneme hledaný odpor  $R_v$  pro výpočet oteplení podle rovnice (11)

$$R_v = 3R_{ff} \quad (11)$$

Třetí měření výkonových charakteristik soustrojí (obr.61) bylo provedeno v pásmu běžných maximálních provozních otáček při 5 780 ot/min. Při uvedených otáčkách alternátor stejně jako v předcházejícím schopen dodávat do odporové zátěže jmenovitý proud 120 A. Celková účinnost soustrojí je při vysokých otáčkách hluboko pod hranicí 50 % a příkon při maximálním zatížení opět přesahuje 4 kW. Porovnání výkonových charakteristik soustrojí v rozsahu proudů 40-120 A při otáčkách alternátoru 5 780 ot/min je v tabulce 20.



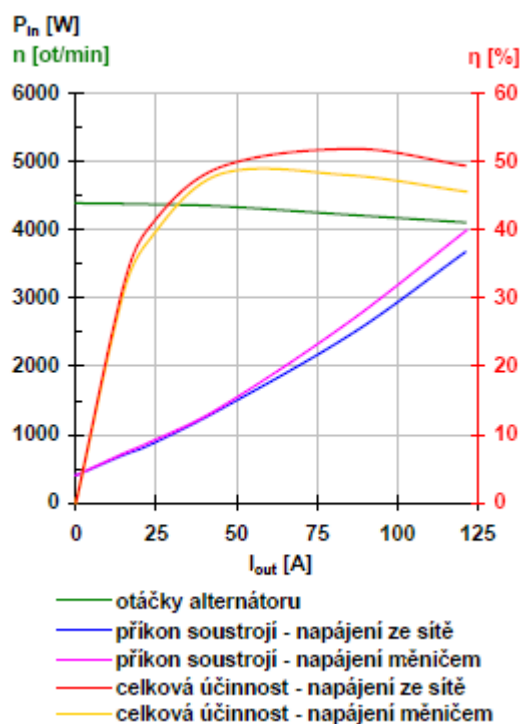
Obr.61 Charakteristiky soustrojí při otáčkách alternátoru 5 780 ot/min

Tab.20 Výstupní hodnoty při otáčkách alternátoru 5 780 ot/min

| buzení alternátoru | výstupní napětí [V] | výstupní proud [A] | výstupní výkon [W] | celková účinnost [%] |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Bosch              | 14,2                | 42,50              | 604                | 43,11                |
| Topran             | 15,3                | 45,83              | 701                | 44,95                |
| ext. linear.       | 15,0                | 44,58              | 669                | 45,19                |
| Bosch              | 14,3                | 80,00              | 1 144              | 44,00                |
| Topran             | 14,9                | 83,75              | 1 248              | 45,88                |
| ext. linear.       | 15,0                | 83,75              | 1 256              | 44,87                |
| Bosch              | 14,4                | 115,00             | 1 656              | 39,81                |
| Topran             | 15,0                | 119,17             | 1 788              | 41,38                |
| ext. linear.       | 15,0                | 120,00             | 1 800              | 42,45                |

## 9.2 Výkonové charakteristiky při napájení ze sítě

Poslední měření, které byla zatím na soustrojí realizováno, porovnává výkonové charakteristiky při napájení soustrojí přímo z rozvodné sítě a při napájení z frekvenčního měniče. V obou případech bylo použito externí lineární buzení. Při napájení ze sítě dochází vlivem zatěžování alternátoru ke zvyšování skluzu hnacího motoru a tím k poklesu otáček. Při napájení motoru z frekvenčního měniče byly otáčky při dané zátěži nastaveny shodně s napájením ze sítě. Výkonové charakteristiky jsou uvedeny v grafu na obr.62 a naměřené hodnoty uvádí tabulka 21. Napájení ze sítě je jediným momentem, kdy celková účinnost měřícího soustrojí přesáhla hranici 50 %. Maximum účinnosti je 52 % při výstupním proudu 85 A. Při napájení z frekvenčního měniče zůstala celková účinnost pod 50% úrovní, shodně s předchozími výsledky.



Obr.62 Charakteristiky soustrojí při napájení ze sítě a z frekvenčního měniče

Tab.21 Výstupní hodnoty při proměnných otáčkách alternátoru

| otáčky alternátoru [ot/min]           | výstupní napětí [V] | výstupní proud [A] | výstupní výkon [W] | celková účinnost [%] |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| <b>napájení z frekvenčního měniče</b> |                     |                    |                    |                      |
| 4 395                                 | 15                  | 0,00               | 0                  | 0,00                 |
| 4 385                                 | 15                  | 14,58              | 218                | 30,38                |
| 4 379                                 | 15                  | 22,50              | 337                | 38,35                |
| 4 350                                 | 15                  | 45,00              | 675                | 48,21                |
| 4 220                                 | 15                  | 84,58              | 1 268              | 48,06                |
| 4 110                                 | 15                  | 121,67             | 1 825              | 45,63                |
| <b>napájení z rozvodné sítě</b>       |                     |                    |                    |                      |
| 4 395                                 | 15                  | 0,00               | 0                  | 0,00                 |
| 4 385                                 | 15                  | 14,58              | 218                | 31,43                |
| 4 379                                 | 15                  | 22,50              | 337                | 40,18                |
| 4 350                                 | 15                  | 44,58              | 668                | 49,17                |
| 4 220                                 | 15                  | 85,83              | 1 287              | 51,92                |
| 4 110                                 | 15                  | 121,25             | 1 818              | 49,42                |

externí lineární buzení

## 10 TEPELNÉ ZATÍŽENÍ ALTERNÁTORU PŘI PROVOZU

Každý vodič klade elektrickému proudu odpor, který se projevuje zvyšováním teploty vodiče. Vinutí cívek rotoru a statoru je nutné intenzivně chladit, proto se využívají vestavěné ventilátory, které se otáčejí s rotorem. Vzniká tu problém, protože proudící vzduch se nedostane do materiálu a teplo může přebírat pouze z vnějších ploch. Je nutné zvolit takové materiály, které dobře vedou teplo.

Nejčastější materiál, který se používá na vinutí cívek je měď, která je nejen dobrým vodičem tepla, ale také dobrým vodičem elektrického proudu, díky relativně malému měrnému odporu. Měď je celkem finančně náročná, proto se někdy volí jiné alternativy např. hliník, který je oproti mědi výrazně levnější. Elektrický odpor je vyšší, tím vznikají vyšší ztráty, takže je nutné zajistit lepší chlazení, příp. se živostnost stroje snižuje. Při provozu se alternátor zahřívá. To dokazují snímky, které byly pořízeny termokamerou. Měření bylo zaznamenáno v minutových intervalech: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15).

### 10.1 Průběh tepelného zatížení alternátoru v provozu

Měření teploty alternátoru v provozu bylo od teploty okolí 25°C při napětí 13,8V a proudu 120 A.



Obr.63 Snímek v časovém intervalu 0 minut

Na obr. 63 jsou vidět různé barvy (teploty) víka alternátoru, které jsou způsobeny přenosem tepla od řemenice. Nejvyšší teplotu 37,4 °C má řemen s řemenicí alternátoru. Řemen má vyšší teplotu, protože vlivem otáček dochází ke tření. Nejvyšší teploty jsou na drážkové straně řemenu a řemenicí, kde ke tření přímo dochází, proto je vnější strana chladnější.



Obr.64 Snímek v časovém intervalu 1 minuta

Po uplynutí první minuty, teplota vinutí na obr.64 vzrostla o 48,2 °C na 73,2 °C. To je poměrně velký nárůst teploty v poměrně malém časovém úseku. Na snímku je také vidět, na jakých místech jsou nejvyšší teploty. Je zajímavé, že teplota řemene a řemenice se téměř nezměnila.



**Obr.65 Snímek v časovém intervalu 2 minuty**

Uplynul stejný časový úsek tj. 1 minuta, ale teplota vinutí na obr.65 se už nezvýšily tolik, jako v první minutě. Zvýšila se pouze o 11,8 °C na 84 °C.



**Obr.66 Snímek v časovém intervalu 3 minuty**



**Obr.67 Snímek v časovém intervalu 4 minuty**



Po 4 minutách dosáhlo vinutí alternátoru na obr.67 teploty 92,1 °C, oproti předchozímu snímku jsou teploty téměř beze změny.



**Obr.68 Snímek v časovém intervalu 5 minut**



**Obr.69 Snímek v časovém intervalu 10 minut**



**Obr.70 Snímek v časovém intervalu 15 minut**

Po 15 minutách dosáhlo vinutí alternátoru na obr.70 teploty až 113 °C. I když má vinutí tak vysokou teplotu, na plášť alternátoru se výrazně nepřenáší. Většina tepla je odvedena vzduchem díky zabudovaným ventilátorům.

## 10.2 Průběh tepelného zatížení alternátoru po zastavení provozu



**Obr.71 Snímek 1 minuta po zastavení**

Po jedné minutě od zastavení už se ventilátor neotáčí a tím není zajištěn průchod vzduchu, který by odváděl teplo. Když není zajištěno chlazení vzduchem dochází k výměně tepla mezi vinutím a pláštěm alternátoru. Na obr.71 je vidět, jak se teplo přenáší na plášť, ale nejvyšší teplota se snižuje. Vzduch v okolí odvádí část tepla, ale jelikož se teplo z vinutí přenáší na plášť, který měl nižší teplotu, tím ochlazuje vinutí. Když pomáhal při chlazení ventilátor, mnoho tepla bylo odvedeno vzduchem a na plášť se nepřenášelo tolik tepla.



**Obr.72 Snímek 5 minut po zastavení**

Na obr.72 je vidět, že teplo z vinutí se přenáší do všech částí alternátoru a tím dochází k ochlazení. Teplota sice klesá, ale má neblahý vliv na řemen. V místech, kde se řemen dotýká řemennice dochází k přenosu tepla na řemen a teplota dosahuje nad 60 °C. Klasické řemeny jsou sice stavěny na provozní teplotu 90 °C, ale takové teploty při běžícím motoru nikdy nedosáhnou, protože svým oběhem se zároveň chladí. Problém nastává, když se motor vypne. Teplota se přenesou pouze v jednom místě na řemen a když teplota přesahuje 60 °C, tak řemen stárne a ztrácí své vlastnosti. Proto při používaném řemenu jsou místa, která jsou tvrdší nebo popraskaná, ale nejsou po celém povrchu. Svůj díl má na tomto právě přenos tepla z alternátoru, když není poháněn.



**Obr.73 Snímek 8 minut po zastavení**

Až po 8 minutách se teplota na řemenu na obr.73 dostala pod hranici 60 °C. Pokud by byl zajištěn doběh, aby řemen nebyl ve styku s řemenicím v jedné poloze, došlo by k rychlejšímu chlazení řemene i řemenice.



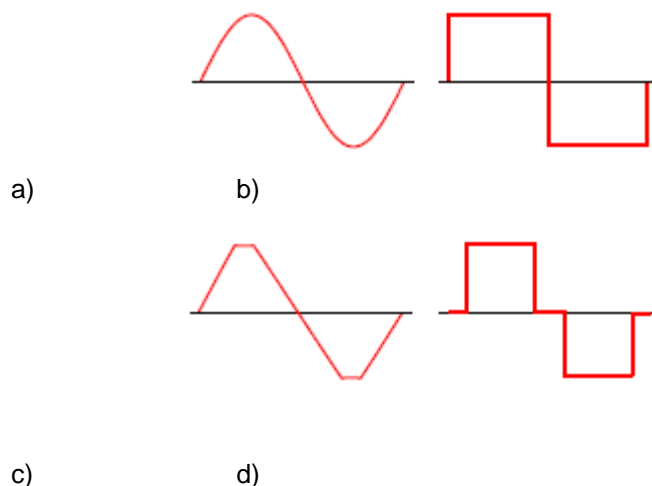
**Obr.74 Snímek 10 minut po zastavení**

Podle přiložených snímků je vidět, že chlazení je pro alternátor velice důležité, protože i při intenzivním chlazení dosáhla teplota vinutí přes 110 °C. Díky vysokým teplotám se zvyšuje elektrický odpor a celková účinnost alternátoru s rostoucí teplotou klesá. Na snímcích byl alternátor použit ve volném okolí, kde byla teplota cca 25 °C, takže celé tělo alternátoru je chlazeno a teploty po vypnutí celkem rychle klesají.



## 11 MOŽNOSTI KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ STŘÍDAČŮ

Úkolem střídačů (DC/AC měničů) je převést stejnosměrný proud na proud střídavý, s čímž se obvykle mění i úroveň napětí. U mikrozdrojů s akumulací energie se zpravidla jedná o převod malého napětí (12, 24 nebo 48 V) na běžné síťové napětí 230 V s frekvencí 50 Hz. Podle provozních nároků potom zpravidla požadujeme určitou míru stability a frekvence i při proměnném zatížení. Důležitým faktorem je také průběh výstupního napětí. U kvalitních a tím také dražších střídačů je výstupní průběh vždy sinusový s harmonickým zkreslením pod 5 % (obr.75a). Levné jednoduché střídače pracují v současné době s obdélníkovým výstupním napětím, nesprávně označovaným jako modifikovaný sinus (obr.75b). Některé střídače využívaly také lichoběžníkový průběh (obr.75c) nebo přerušovaný obdélníkový průběh (obr.75d).

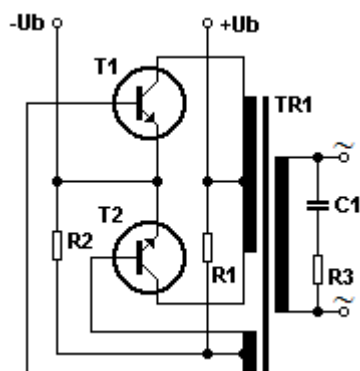


**Obr.75 Průběhy výstupního napětí střídačů**  
a) sinusový, b) obdélníkový, c) lichoběžníkový, d) přerušovaný obdélníkový

Podle konstrukce výkonového stupně střídače potom střídače rozlišujeme na střídače s výstupním transformátorem (tzv. střídače se železem) a střídače beztransformátorové (tzv. střídače bez železa, označované také jako PWM), které zpravidla využívají pulzně-šířkovou modulaci.

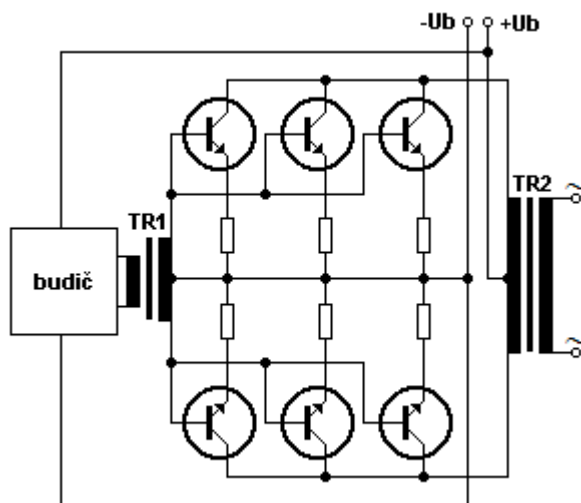
### 11.1 Transformátorové střídače

Transformátorové střídače patří převážně do oblasti analogové techniky. Pracují buď na principu samokmitajícího oscilátoru nebo jsou konstruovány jako výkonový zesilovač buzený generátorem sinusového či obdélníkového napětí [38]. Samokmitající střídač (obr.76) se dříve běžně používal pro malé výkony v řádu jednotek až desítek wattů a v aplikacích, které nevyžadují stabilitu frekvence ani stabilitu výstupního napětí. Obojí se mění v závislosti na zatížení střídače. S oblibou se dodnes používá jako napájecí měnič malých bateriových fotografických blesků nebo pro zvyšování napětí dobíjecích zdrojů napájených z automobilového akumulátoru. Transformátor je na feritovém jádru, pracovní frekvence se zpravidla pohybuje v rozmezí 15-60 kHz. Teoretická účinnost samokmitajícího střídače je 78,5 %, reálná účinnost potom zpravidla nepřesahuje 68 % [39].



**Obr.76 Principiální schéma samokmitajícího střídače [38]**

Výkonové transformátorové střídače jsou zpravidla konstruovány pro výkony řádu stovek wattů, případně až do výkonu cca 2 kW. Koncepce těchto střídačů vychází ze zapojení výkonových nízkofrekvenčních zesilovačů (obr.77). Základem je budicí stupeň tvořený přesným generátorem frekvence, výkonovým budícím stupněm a případně regulačními a zpětnovatebními obvody.



**Obr.77 Principiální schéma výkonového transformátorového střídače [38]**

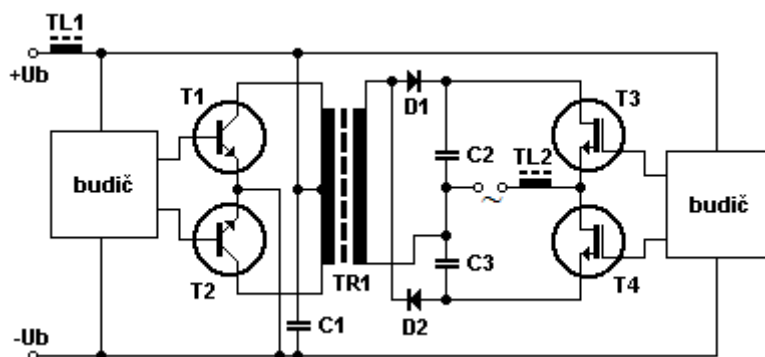
Vlastní výkonový stupeň střídače tvoří paralelně zapojené tranzistory ve dvojčinném zapojení třídy B s transformátorovým buzením. Podle požadované kvality výstupního napětí je buzení koncového stupně buď čistě sinusové, sinusové s buzením koncových tranzistorů až do saturace (výstupním napětím je limitovaná sinusovka připomínající lichoběžníkový průběh (obr.75c) nebo modifikovaným obdélníkovým průběhem. Podle dalších požadavků jsou potom na výstup střídače připojeny výstupní filtry od jednoduchých sériových RC článků, přes LC  $\pi$ -články až po laděné sinusové filtry. Maximální účinnost pro sinusové napětí je přibližně 78 %.

Z dnešního pohledu je nevýhodou transformátorových střídačů pro síťovou frekvenci především jejich hmotnost daná použitými transformátory. Výhodou je naopak jednoduchá konstrukce, možnost plynulého náběhu výstupního napětí a vysoká krátkodobá přetížitelnost (při správném návrhu koncového stupně). Pokud je střídač vybaven zpětnou vazbou s regulací výstupního napětí, je schopen pracovat v poměrně širokém rozsahu napájecích napětí.

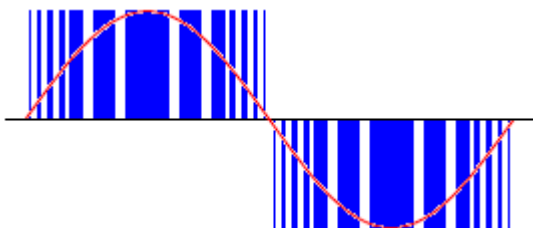
## 11.2 Beztransformátorové střídače

Rozvoj beztransformátorových střídačů (správně střídače bez výstupního transformátoru) umožnil vývoj moderních spínacích tranzistorů na velká napětí. Koncepce střídačů bez výstupního transformátoru je principiálně u všech typů stejná, viz obr.78 [40].

Na vstupu střídače pro malá vstupní je vstupní filtr TL1-C1. Dvojitý měnič s feritovým transformátorem pracuje na vysoké frekvenci. Dellonův zdvojovač na sekundární straně transformátoru TR1, osazený diodami D1-D2 s filtry C2-C3, vytváří symetrická stejnosměrná napětí buď na úrovni vrcholové hodnoty sinusového průběhu pro tzv. sinusové měniče nebo na úrovni efektivní hodnoty sinusového průběhu pro jednoduché měniče s obdélníkovým výstupním napětím (obvykle uváděným jako tzv. modifikovaný sinus). Vlastní střídač tvoří tranzistory T3-T4. Ty jsou buzeny buď obdélníkovým signálem s frekvencí 50 Hz nebo signálem s pulzně šířkovou modulací označovanou jako PWM, nosná frekvence se zpravidla pohybuje v rozsahu 5-20 kHz [66] (obr.79). Na výstupu střídače je filtrační tlumivka potlačující nosnou frekvenci a vyhlazující sinusový průběh. Používají se i různě složité typy LC filtrů.



Obr.78 Principiální schéma střídače bez výstupního transformátoru [40]

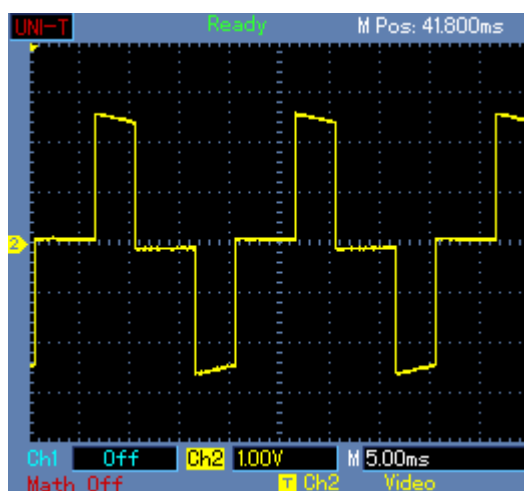


Obr.79 K principu pulzně-šířkové modulace

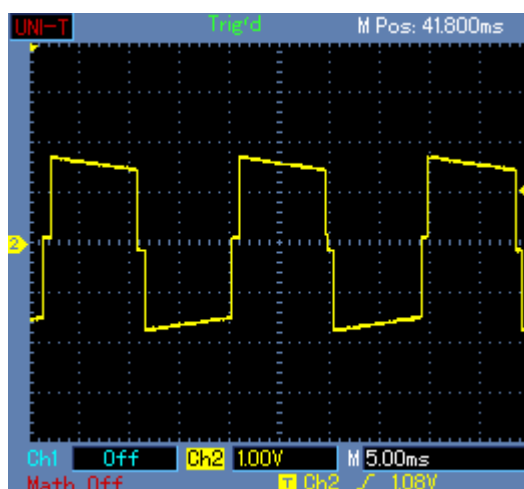
Příkladem malého jednoduchého střídače s tzv. modifikovanou sinusovkou je MicroControl Power Inverter 12/300 (obr.80). Střídač Micro Control Power Inverter 12/300 je určen pro napájení spotřebičů, které nevyžadují sinusový napájecí proud (např. televize, notebooky, nabíječky mobilních telefonů, kompaktní zářivky, malé komutátorové motory...) a mají příkon do 300 VA. Vzhledem k velkému záběrovému proudu mohou být ke střídači připojovány žárovky pouze do 100 W. Z důvodu vysokého obsahu vyšších harmonických ve výstupním napětí není střídač vhodný pro napájení zařízení se síťovým transformátorem a asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Výstupním napětím střídače (tzv. modifikovaný sinus) je přerušovaný obdélníkový průběh s proměnnou šířkou pulzu. Na obr.81 je průběh výstupního napětí při 10% zatížení střídače a vstupním napětím 14,2 V. Průběh na obr.82 odpovídá 80% zátěži při vstupním napětí 13,8 V.



**Obr.80 Střídač MicroControl 12/300**



**Obr.81 Výstupní napětí při 10% zatížení**



**Obr.82 Výstupní napětí při 80% zatížení**

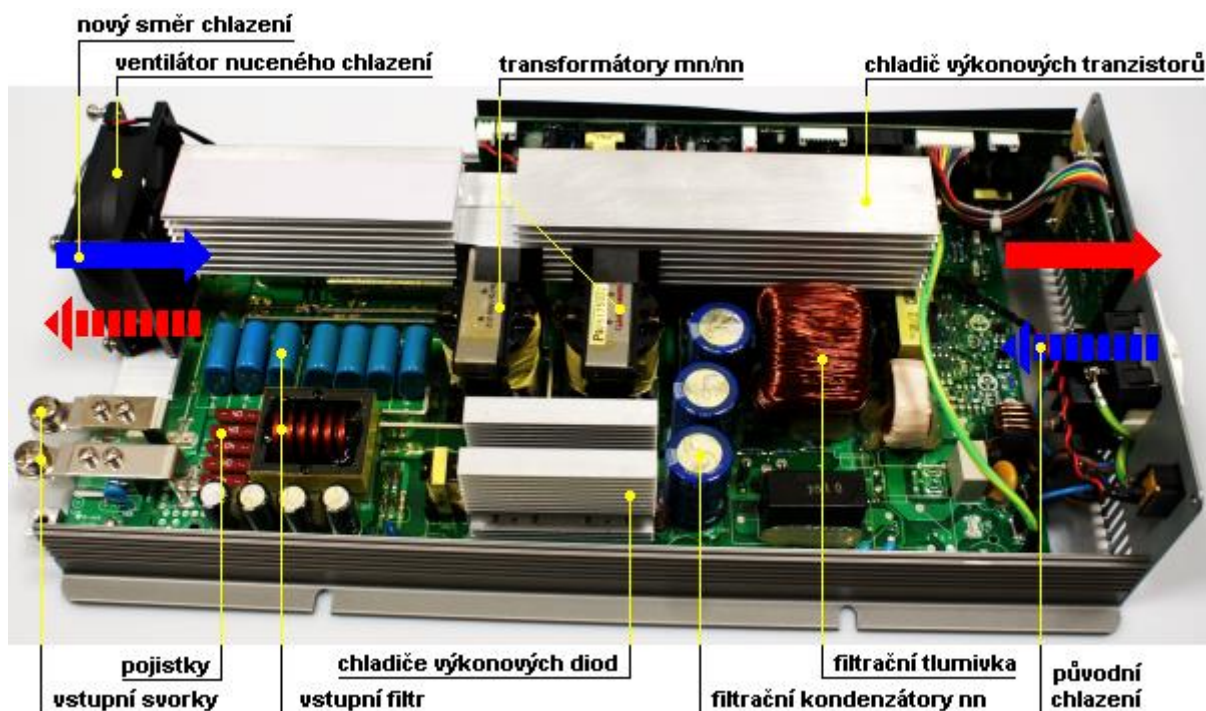
## 12 STŘÍDAČ MW TS-1500-212B

Laboratorní soustrojí je osazeno beztransformátorovým střídačem fy Mean Well MW TS-1500-212B se sinusovým výstupním napětím (obr.83). Základní technické údaje střídače převzaté z firmní dokumentace [26] jsou v tabulce 22. Zajímavostí je, že hmotnost střídače tvoří zhruba ze 78 % jeho plášť a masivní chladič výkonových tranzistorů. Další hmotnější prvky jsou feritové transformátory a filtrační tlumivka. Podle manuálu [26] se střídač montuje v horizontální poloze základnou dolů. Chlazení střídače je nucené, elektronika spíná ventilátor a reguluje jeho otáčky v závislosti na výstupním výkonu, teplotě chladičů a teplotě okolí.



**Obr.83 Střídač MW TS-1500-212B nainstalovaný na rozvaděči soustrojí**

Ve standardním uspořádání je chladicí vzduch nasáván otvory v čelním panelu, prochází vnitřním prostorem a teplý vzduch ventilátor odsává a vyfukuje ven (obr.84). Z prostorových důvodů a s využitím termodynamických pravidel je měnič namontován svisle na zadní stěnu rozvaděče, čelním panelem nahoru. Principiálně tak uvnitř střídače vzniká komínový efekt a teplý vzduch stoupá vzhůru k větracím otvorům. Ventilátor je otočený, takže chladicí vzduch nasává zespodu, žene ho přes chladiče výkonových tranzistorů a výkonových diod a horními větracími otvory vytlačuje ven. Tím se změnilo podtlakové chlazení na účinnější přetlakové chlazení. Další úprava spočívala v odpojení u nás nestandardní zásuvky SCHUKO na čelním panelu a vyvedení výstupního napětí do rozvaděče soustrojí kabelem H05VV-F 3G1,5 mm<sup>2</sup> ČSN 34 7409 [41] (starší značení CYSY 3C1,5 ČSN 34 7401 [42]) přes gumovou průchodku v zadním panelu nad uzemňovací svorkou. Pro napájení střídače jsou v závislosti na délce doporučeny vodiče s průřezem 25-50 mm<sup>2</sup>. V soustrojí jsou použity vodiče H07V-K 25 mm<sup>2</sup>, kterými je provedena celá silová instalace obvodů malého napětí.



Obr.84 Vnitřní uspořádání střídače MW TS-1500-212B s vyznačením tepelných toků

Tab.22 Základní parametry střídače MW TS-1500-212B

| základní parametry střídače MW TS-1500-212B |                    |
|---|--------------------|
| typ   | MW TS-1500-212B    |
| jmenovité vstupní napětí                    | 12 V DC            |
| dovolené vstupní napětí                     | 10,5-15 V          |
| jmenovitý vstupní proud                     | 150 A              |
| jmenovitý výstupní výkon                    | 1,50 kW            |
| maximální výkon po dobu 3 min               | 1,73 kW            |
| maximální výkon po dobu 10 s                | 2,25 kW            |
| špičkový výkon (30 period)                  | 3,00 kW            |
| jmenovité výstupní napětí *)                | 230 V AC $\pm$ 3 % |
| frekvence *)                                | 50 Hz $\pm$ 0,1 %  |
| zkreslení výstupního napětí (THD)           | < 3 %              |
| účinnost                                    | 88 %               |
| hmotnost                                    | 6,85 kg            |

\*) napětí a frekvenci je podle [26] možné programově měnit

## 12.1 Provozní zkouška - první problém

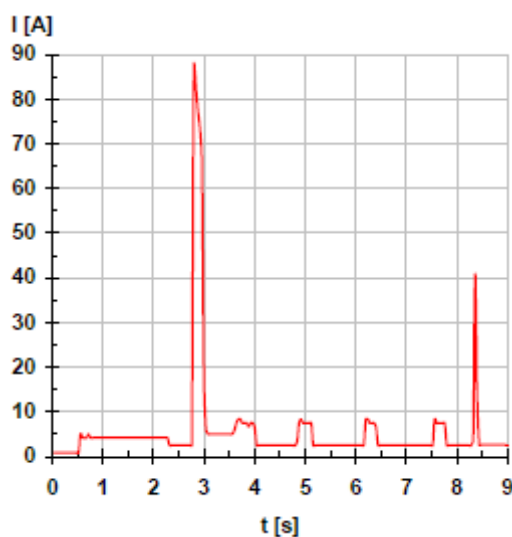
Před měřením zatěžovacích charakteristik střídače byly nejprve provedeny vstupní testy. Při nich byl střídač napájen z výkonových externích stejnosměrných laboratorních zdrojů. První zkouška sledovala funkčnost střídače při chodu naprázdno, tj. bez zatíženého výstupu. Byl použit zdroj 14 V/20 A. Byl předpoklad, že střídač plynule naběhne a na výstupu bude sinusové napětí na úrovni 230 V. Po zapnutí spínače se na čelním panelu rozsvítily indikátory stavu napájení a signalizace funkčnosti, zatím bez napětí na výstupu. Po cca třech sekundách napětí na zdroji skokově pokleslo, ampérmetry ukázaly proudovou špičku a střídač hlásil podpětí v napájení. Kvůli tomu byl připojen paralelně ke zdroji 140Ah akumulátor a střídač asi po 8 sekundách naběhl. Bylo tudíž nutné vysvětlit problematické chování střídače při připojení na síťový zdroj.



## 12.2 Náběhová charakteristika střídače MW TS-1500-212B

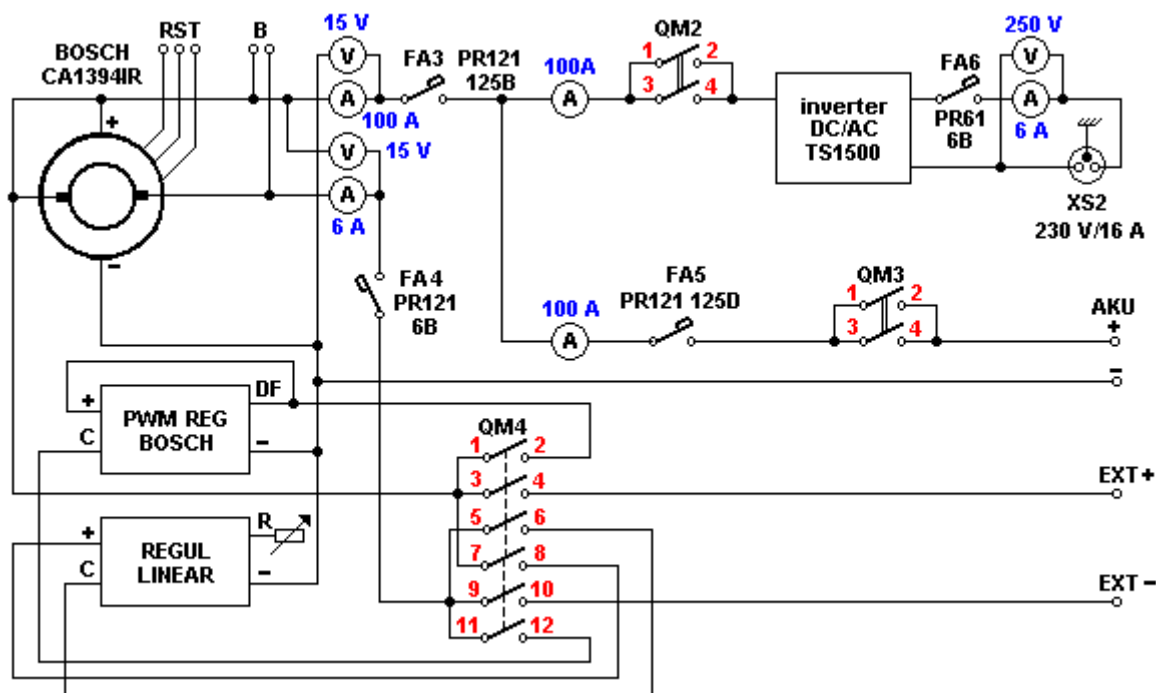
Pro další pokusy byl použit třífázový napájecí zdroj 14 V/210 A s transformátorovou kompenzací rušivého napětí, jehož voltampérová charakteristika je srovnatelná s oloveným akumulátorem s kapacitou 140-160 Ah. Zdroj byl vyvinut podle návrhu doc. Lokvence v elektrotechnických laboratořích Katedry technických předmětů při řešení výzkumného projektu SV PdF 2012/2016 Výkonový stejnosměrný napájecí zdroj se středofrekvenční transformátorovou kompenzací rušivého napětí s vysokou přetížitelností [43]. Pro snímání vstupního proudu střídače byl použit výkonový čtyřbodový bočník třídy přesnosti 0,5 Metra 250 A/60 mV, který byl připojen na digitální paměťový osciloskop UNI-T UTD2025C propojený s počítačem Omnibook HP XE-3.

Údaje zaznamenané osciloskopem přinesly překvapující zjištění. Ve vypnutém stavu (Stand by) střídač odebírá při napětí 13,4 V proud 840 mA, tj. cca 11 W. Po zapnutí stoupne odběr na 4,2 A a elektronika střídače testuje napájecí napětí, nastavení a vnitřní obvody. Tato spouštěcí sekvence trvá přibližně 2,5 sekundy. Poté naskočí napájecí měnič DC/DC, který ze vstupního malého napětí (10,8-15 V) generuje nízké napětí pro koncový stupeň střídače (320-340 V). Vstupní záběrový proud přitom dosahuje hodnoty až 90 A. To je pro start střídače klíčový moment. Pokud totiž v tomto okamžiku dojde, k byt' jen krátkodobému, poklesu napájecího napětí pod 10,5 V, elektronika střídače vypne a hlásí poruchu pro nízké napájecí napětí. Úroveň minimálního napětí není však možné nastavit. Po prvním proudovém rázu elektronika testuje obvody výstupního střídače. V intervalu cca 1 sekundy se objevují čtyři pulzy na úrovni 9 A. Po přibližně 8 sekundách po zapnutí se spustí koncový stupeň střídače. To je provázáno další proudovou špičkou s úrovní 42 A po níž už střídač běží v normálním režimu a při nulovém odběru odebírá proud 2,5-2,6 A. Klidový příkon je přibližně 34 W. Průběh velikosti vstupního proudu při spouštění střídače je v grafu na obr.85.



**Obr.85 Náběhová charakteristika střídače MW TS-1500-212B**  
(aproximace z 10 měření)

Z důvodu velkých proudových rázů a nutnosti faktického odpojení střídače od alternátoru byl do přívodu střídače instalován vačkový spínač QM2 Obzor VSN150-02001006A4. Oproti původnímu návrhu (obr.19) byl vynechán spínač na výstupu střídače. Upravené schéma zapojení generátorové jednotky je na obr.86.



Obr.86 Upravené schéma zapojení generátorové jednotky

Výsledkem analýzy souborů dat z opakovaných měření je relativně nepříznivé zjištění. Napájecí zdroj střídače musí být schopen dodat minimální proud ve špičce alespoň 90 A, přičemž napětí na přívodních svorkách nesmí klesnout pod 10,8 V. To znamená, že k poklesu napětí zatíženého zdroje se musí ještě připočítat úbytky na přívodních vodičích, které při vysokých proudech a malých napětích rozhodně nejsou zanedbatelné. Např. u přípojovacích vodičů s délkou 3 m, průřezem 25 mm<sup>2</sup> a při započítání přechodových odporů na svorkách může být úbytek napětí až 700 mV. Stejně tak může být problematické spustit střídač s akumulátorem, který má např. vlivem vybití nebo stáří zvýšený vnitřní odpor. V podstatě ani nemá význam chtít střídač provozovat s akumulátorem s malou kapacitou. Akumulátor pro střídač by se měl volit podle vybíjecích charakteristik, odběru a předpokládané doby provozu.

### 12.3 Ochrana proti přepětí

Elektronika zajišťující vypnutí střídače při poklesu napětí pod 10,8 V nemá za úkol chránit samotný střídač, ale zajistit ochranu akumulátoru proti hlubokému vybití. Tato ochrana má v praxi zamezit poškození akumulátoru vybitím pod dovolenou mez a především zaručit ještě bezpečné nastartování automobilu. Naproti tomu elektronika přepět'ové ochrany, působící při vstupním napětí větším než 15 V, má za úkol zabránit poškození vstupního měniče a zejména navazujících prvků zvýšeným napětím. Elektronická ochrana je ještě doplněna pasivními přepět'ovými prvky (varistory) přímo na vstupních svorkách střídače. Právě na úrovni přepět'ové ochrany byl objeven další provozní problém.

Pokud je střídač napájen z akumulátoru nebo externího stejnosměrného zdroje se stabilním, případně nepatrně zvlněným napětím je vše v pořádku a střídač pracuje bez problémů. Potíže nastávají v okamžiku, když se v napájení objeví napět'ové špičky. Například při napájení střídače z alternátoru s pulzním buzením bez filtrace výstupního napětí. Příčinou problémů je vstupní LC filtr střídače (obr.87).





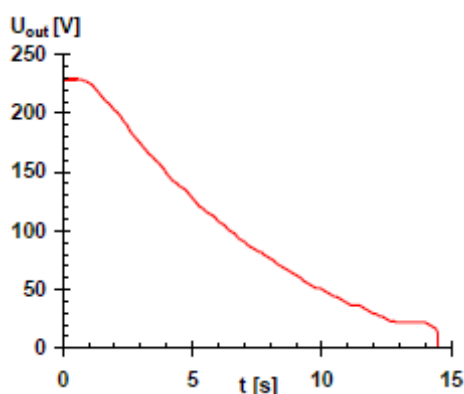
**Obr.87 Vstupní filtr na střídače MW TS-1500-212B**

Filtrační kondenzátory se bez zatížení nabíjí na špičkovou hodnotu napájecího napětí a ta může překročit nastavenou mez 15 V. V případě našeho soustrojí dosahují napěťové špičky na výstupu usměrňovače alternátoru připojeného ke střídači až 16,7 V. V tom okamžiku zareaguje elektronická ochrana. Střídač vypne a signalizuje přepětí na vstupu. Jestliže chceme předcházet náhodnému vypínání střídače způsobenému napěťovými špičkami, musí být do napájecího přívodu instalován napěťový omezovač.

#### 12.4 Vypínání střídače

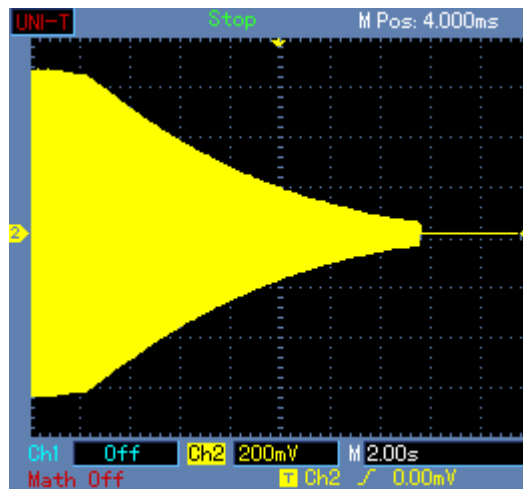
V rámci vstupního měření charakteristik se po výše uvedených zjištěních ještě zkoumalo chování střídače při vypnutí a ztrátě napájení. Pokud se vypne střídač spínačem na čelním panelu (napájení zůstává připojeno) okamžitě se vypíná koncový stupeň střídače a 230V výstup je bez napětí.

Jiná situace nastává, pokud je střídač v zapnutém stavu a přerušíme napájení. S jistým překvapením se ukázalo, že se střídač v režimu naprázdno (tj. bez zatížení) při přerušení napájení nevypne, ale výstupní napětí po krátké prodlevě (1,6 s) začne plynule klesat (obr.88).



**Obr.88 Pokles výstupního napětí střídače MW TS-1500-212B při přerušení napájení**

Když po 14,5 sekundách klesne výstupní napětí na 14,7 V, koncový stupeň střídače vypne. Při zatížení je doba doběhu samozřejmě výrazně kratší, protože je závislá na energii naakumulované ve filtračních kondenzátorech. Na obr.89 je jeden z oscilogramů doběhové charakteristiky střídače. Ty byly použity jako zdroje dat pro graf na obr.88.



**Obr.89** Oscilogram výstupního napětí střídače MW TS-1500-212B při přerušení napájení

## 13 VÝKONOVÉ A ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY STŘÍDAČE MW TS-1500-212B

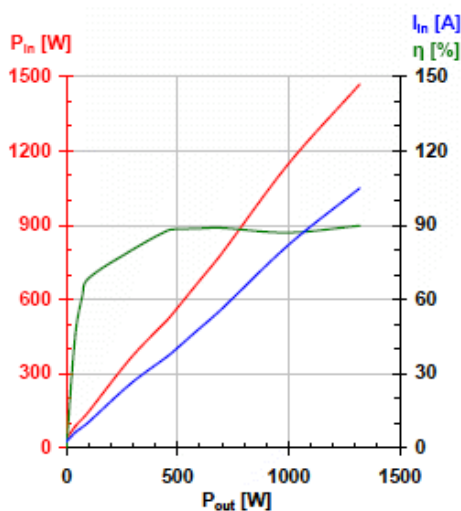
Měření výkonových charakteristik patří k základním měřením všech elektrických zdrojů. Patří též mezi základní měřicí úlohy v elektrotechnických laboratořích. Cílem rozsáhlých testů bylo jednak ověřit katalogové údaje střídače a především tyto údaje doplnit o zatěžovací charakteristiky střídače a o charakteristiky vstupních a výstupních parametrů v závislosti na vstupním napětí. Všechny charakteristiky byly změřeny na odporových zátěžích. V rámci provedených zkoušek se také zjišťovala odolnost střídače proti krátkodobému přetížení přímým zapínáním výkonových žárovek. Experimentálně zjištěný maximální možný výkon přímo zapínané žárovky je 300 W. Pro větší zátěže, které při zapínání vyžadují krátkodobý výkonový impuls (žárovky nad 500 W, komutátorové motory, atd.) je nutné zajistit plynulé spouštění, např. spínacími termistory nebo odporovým spouštěčem. Experimenty v podstatě potvrdily, že udávaný špičkový výkon střídače nemá pro praktické použití žádný význam. Střídač musí být dimenzován tak, aby jeho jmenovitý výkon odpovídal záběrovému proudu připojeného spotřebiče. Z tohoto hlediska proto nemusí v případě tzv. těžkých rozběhů postačovat ani přípustné desetisekundové přetížení střídače.

### 13.1 Základní výkonová charakteristika střídače MW TS-1500-212B

Základní měření výkonové charakteristiky střídače MW TS-1500-212B (napájecí proud  $I_{in}$ , příkon  $P_{in}$ , účinnost  $\eta$ ) v závislosti na výstupním výkonu ( $P_{out}$ ) probíhalo na odporové zátěži při konstantním vstupním napětí 14 V. Výstupní napětí střídače bylo nastaveno na úroveň energetických zdrojů, tj. 240 V/50 Hz. Významné body měření uvádí v přehledu tabulka 23, výsledné charakteristiky jsou v grafu na obr.90.

Tab.23 Vybrané body charakteristik

| výkon [W] | proud [A] | příkon [W] | účinnost [%] |
|-----------|-----------|------------|--------------|
| 0         | 2,5       | 35         | 0,0          |
| 100       | 10,4      | 145        | 68,6         |
| 300       | 20,8      | 362        | 79,6         |
| 500       | 40,4      | 566        | 88,4         |
| 700       | 56,3      | 788        | 88,9         |
| 1000      | 82,0      | 1149       | 87,0         |
| 1320      | 105,0     | 1470       | 89,8         |



Obr.90 Výkonová charakteristika střídače MW TS-1500-212B

Z naměřených hodnot a průběhů charakteristik vyplývá, že vstupní proud a příkon rostou lineárně se zatížením střídače, maximální účinnost je téměř 90 % při plném zatížení a v rozmezí výkonů od 500 W do 1,5 kW dosahuje minimální hodnoty 88 %, což plně odpovídá katalogovým údajům [26]. Na druhé straně stojí zjištění, že používat výkonný střídač pro malé výkony je neefektivní. To vše ale platí pouze pro odporovou zátěž. U indukčních a kapacitních zátěží musíme vzít v úvahu také tzv. jalový výkon a rázové zapínací proudy.

### 13.2 Kolísání vstupního proudu střídače

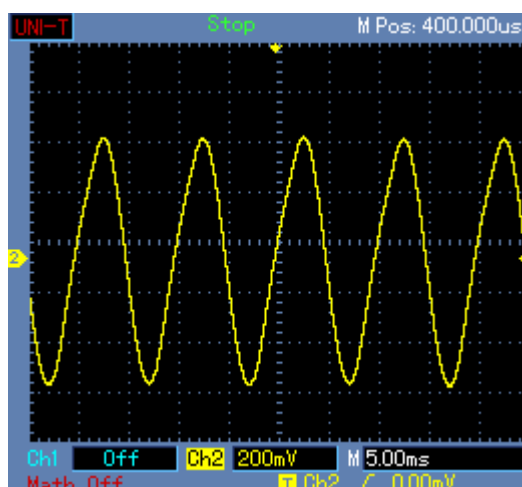
Napájení střídače je limitováno mezemi napájecího napětí v rozsahu 10,8-14,8 V (hraniční hodnoty na mezi nestability jsou 10,5-15 V) a minimálním proudem 90 A. Při maximálním zatížení střídače dosahuje napájecí proud až 160 A. Předpoklad, že střídač odebírá stálý proud (který měříme běžným ampérmetrem) je mylný. Proud odebíraný střídačem výrazně kolísá podle jeho zatížení. Filtrační obvody na vstupu střídače nemají takovou kapacitu, aby vyrovnaly odběr mn/mn měniče, který napájí koncový stupeň.

Pro měření kolísání napájecího proudu střídače jsme použili speciální derivační snímač s jádrem z lité magnetické pryskyřice [44, 45]. Pro zvýšení citlivosti bylo snímačem protaženo pět závitů vodiče H07V-K 25 mm<sup>2</sup> (obr.91). Výstupní napětí snímače zpracovává integrační zesilovač, takže charakteristika snímače je zaručeně lineární do 1,2 kA a mezní frekvence přesahuje 100 kHz [46]. Kalibrace byla provedena při frekvenci 50 Hz sinusovým proudem 20 a 40 A, to odpovídá proudu 100 a 200 A procházejícího snímačem. Pro danou konfiguraci je citlivost snímače 31,68 mV/A.



Obr.91 Proudový snímač

Výsledky měření ukazují, že vstupní proud kolísá s dvojnásobnou frekvencí výstupního napětí. Oscilogram na obr.92 a výpis hodnot na obr.93. platí pro výstupní výkon střídače 1,25 kW a napájecí proud 105 A při napětí 14 V. Rozdíl vrcholových hodnot je 1 V, což po přepočtu představuje kolísání proudového odběru 31,57 A.

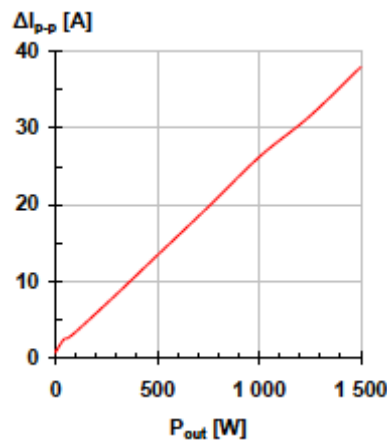


Obr.92 Oscilogram zvlnění napájecího proudu

|           |          |           |           |
|-----------|----------|-----------|-----------|
| Freq      | 100.00Hz | Average   | -8.00mV   |
| Period    | 10.00ms  | Peak      | 1.00V     |
| Rise      | 3.20ms   | RMS       | 337.05mV  |
| Fall      | 2.40ms   | High      | 432.00mV  |
| +Width    | 5.40ms   | Low       | -480.00mV |
| -Width    | 4.60ms   | Middle    | -24.00mV  |
| Overshoot | 6.1%     | Max       | 488.00mV  |
| Preshoot  | 3.5%     | Min       | -512.00mV |
| +Duty     | 54.0%    | Amplitude | 990.00mV  |
| -Duty     | 46.0%    |           |           |

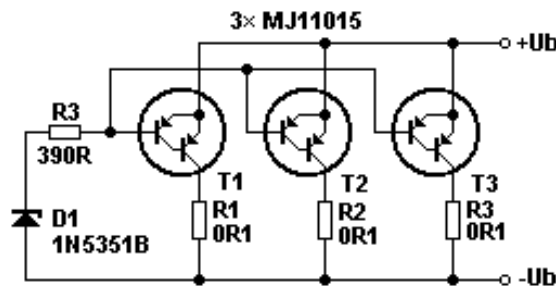
**Obr.93** Výpis dat z oscilogramu z obr.92

Kolísání napájecího proudu se prakticky lineárně zvyšuje se zatížením střídače (obr.94) a pohybuje se na úrovni 30-33 % hodnoty proudu měřené stejnosměrným ampérmetrem.



**Obr.94** Kolísání napájecího proudu v závislosti na výstupním výkonu střídače

Pro buzení alternátoru musí být regulátor (ať pulzní nebo lineární) i při takto proměnném zatížení schopen udržet výstupní napětí (napájecí napětí střídače) v povolených mezích. Provozní zkoušky ukázaly, že kritické může být zejména náhlé odlehčení střídače s následným vzestupem napájecího napětí, který vyvolá vypnutí střídače v důsledku přepětí. Je vhodné použít omezovač přepětí, např. podle obr.95, který je odvozen od ověřeného návrhu [47] a je určen pro maximální svodový proud 60 A.



**Obr.95** Omezovač přepětí 15 V/60 A

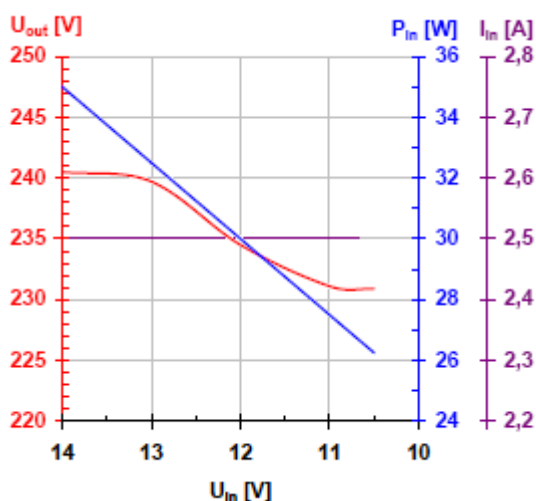
Svodový proud je určen odpory R1-R3 v kolektorech tranzistorů T1-T3. V konkrétní případě je jejich hodnota nastavena tak, aby každá větev při vzrůstu napětí o 2 V vedla proud 20 A. Změnou odporů a paralelním řazením dalších tranzistorů lze parametry omezovače téměř libovolně měnit. Mezní napětí, při kterém začíná omezovač působit je přibližně  $U_Z + 1,6$  V.

### 13.3 Charakteristiky střídače v závislosti na vstupním napětí a výkonu

Stejně jako pro veřejnou distribuční síť, jsou i pro ostrovní síť jsou důležité čtyři základní parametry: maximální dodávaný výkon, stabilita napětí, stabilita frekvence a harmonické zkreslení. Reálně je v řadě případů velmi problematické a často i z technických důvodů nemožné dodržet požadované parametry distribuční sítě (kolísání napětí do  $\pm 5$  %, harmonické zkreslení  $< 3$  %, kolísání frekvence maximálně  $\pm 0,5$  Hz) v ostrovní síti, na druhé straně ale v mikrosítích nemusí vadit ani dvojnásobné překročení uvedených parametrů. K tomu často dochází zejména při skokové změně zátěže. Pro ostrovní síť napájené střídačem bývá kritický pokles výstupního napětí v závislosti na napětí napájecího zdroje. Napětí na výstupu střídače je určeno napájecím napětím jeho koncového stupně. Pro stabilitu výstupního napětí jsou tak klíčové vstupní obvody střídače (viz obr.78). Na nich závisí do jaké míry dokáží udržet konstantní napájecí napětí koncového stupně při změně napětí na vstupu.

V grafech na následujících obrázcích jsou komplexní charakteristiky střídače Mean Well MW TS-1500-212B v závislosti na napájecím napětí. Ze střídače byl odebíráán konstantní výkon. Měřilo se napájecí napětí, napájecí proud, výstupní napětí, příkon střídače a ze změřených hodnot se vypočítala účinnost střídače. Napájecí napětí se plynule snižovalo ze 14,2 V k 10,5 V, což je mez, kdy ochrana akumulátoru proti vybití střídač vypíná. Výstupní napětí střídače bylo programově nastaveno na jmenovité zdrojové napětí distribuční sítě, tj. 240 V.

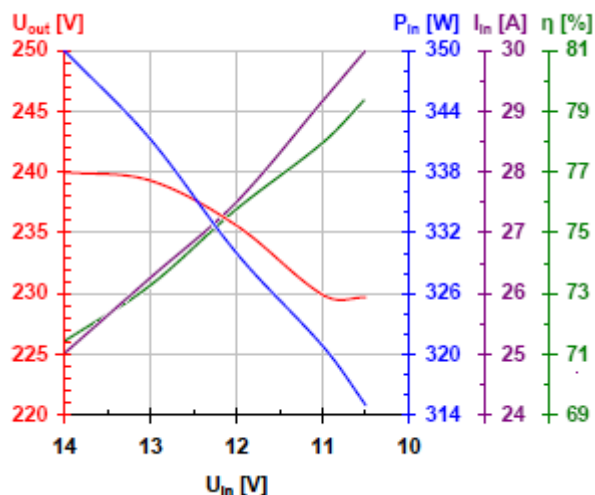
V grafu na obr.96 jsou charakteristiky nezatíženého střídače. Napájecí proud má konstantní hodnotu 2,5 A, příkon střídače lineárně klesá s napájecím napětím a výstupní napětí při změně napájení klesá z 240,5 V na 231 V. Je tedy zřejmé, že regulační obvody nedokáží výstupní napětí střídače ustabilizovat ani při chodu naprázdno a pokles napětí je na úrovni 4 %.



Obr.96 Charakteristiky střídače bez zatížení

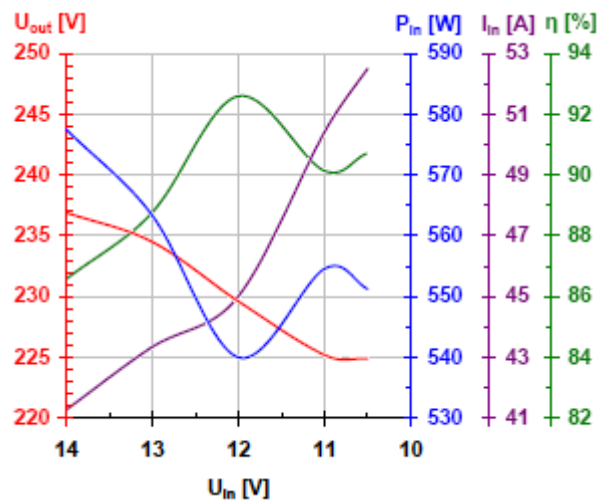
Při zatěžování střídače se jeho charakteristiky samozřejmě mění. Pro měření zatěžovacích charakteristik se jako zátěž používaly žárovky 250 W a 1 kW/230 V řízené reostatem a paralelní reostat pro zvyšování zátěže při poklesu napětí. Pro měření výstupního (zatěžovacího) výkonu se použila wattmetrická souprava Metra typ QN-11.

V grafu na obr.97 jsou charakteristiky střídače při trvale odebíraném výkonu 250 W. V závislosti na napájecím napětí klesá výstupní napětí z 240 V na 230 V, tj. pokles o 4,2 %. Příkon střídače téměř lineárně klesá, zato vstupní proud a účinnost střídače téměř lineárně rostou. Při minimálním napájecím napětí a výstupním výkonu 250 W je vstupní proud 30 A a maximální účinnost dosahuje 79,4 %.



**Obr.97 Charakteristiky při zátěži 250 W**

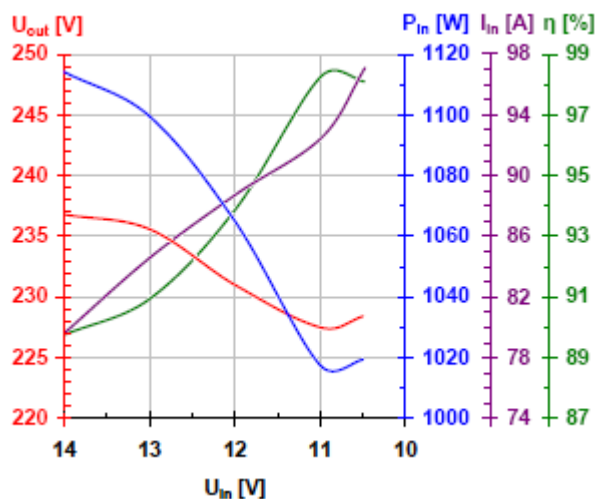
Se zvyšováním odebíraného výkonu lze pozorovat výrazné změny v průbězích charakteristik již od 500 W (obr.98).



**Obr.98 Charakteristiky při zátěži 500 W**

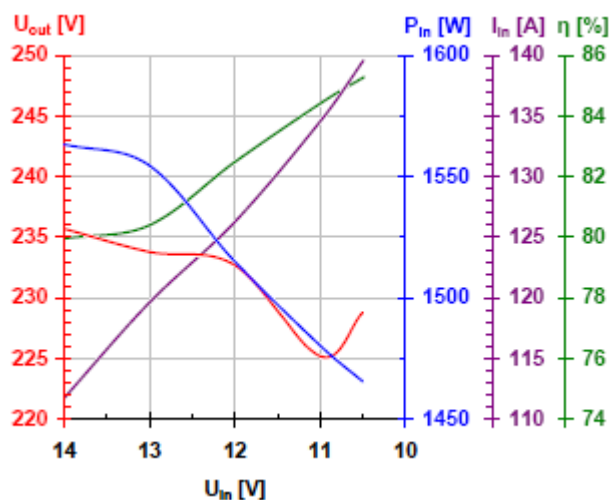
Při výkonu 500 W, odebíraného z výstupu střídače, nedosáhne výstupní napětí ani při maximálním napájecím napětí 14,2 V nastavené úrovně 240 V. Výstupní napětí v závislosti na napájecím napětí klesá od 237 V k 225 V, tj. relativní pokles o 5,1 %. Při vztažení ke jmenovitému napětí 240 V jde o pokles v rozmezí 1,3-6,3 %. Proudová charakteristika má dva přibližně lineární úseky, od 14 V do 12 V a od 12 V do 10,5 V. Změna strmosti proudové charakteristiky koresponduje s maximem účinnosti 92,6 % a minimem příkonu při napájecím napětí 12 V. Při dalším snižování napětí příkon střídače opět narůstá a účinnost klesá.

Tvarově podobné charakteristiky jsme naměřili také při výstupním výkonu 1 kW (obr.99). Napětí na výstupu střídače klesá z 237 V na 227 V podle napájecího napětí, tj. relativní pokles o 4,2 %. Při vztažení ke jmenovitému napětí 240 V jde o pokles v rozmezí 1,3-5,4 %. Maximální účinnost 98,3 % má střídač při vstupním napětí 10,8 V. Je to nejvyšší hodnota účinnosti získaná z celé série měření.



**Obr.99** Charakteristiky při zátěži 1 kW

Výstupní výkon 1,25 kW, odebíraný ze střídače, je maximum, které může dodávat alternátor soustrojí při mezním proudu 125 A a napětí 12,2 V.



**Obr.100** Charakteristiky při zátěži 1,25 kW

Charakteristiky v grafu na obr.100 vykazují, oproti předcházejícím charakteristikám, zejména plošší křivku poklesu výstupního napětí mezi napájecím napětím 14-12 V, kdy napětí na výstupu střídače klesne pouze o 3 V z 236 V na 233 V. V celém rozsahu napájecího napětí je relativní pokles výstupního napětí 4,5 % (z 236 V na 225 V). Při vztažení ke jmenovitému napětí 240 V jde o pokles v rozmezí 1,8-6,2 %. Nárůst vstupního proudu je téměř lineární, ve srovnání se zátěží 1 kW je při výstupním výkonu 1,25 kW účinnost střídače výrazně horší (80-85 %).

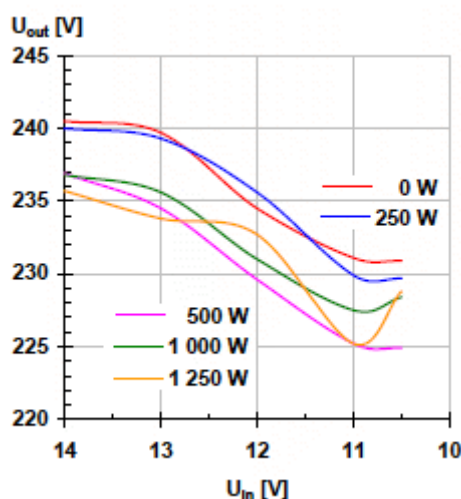


Z dosavadních výsledků měření můžeme odvodit, že vzhledem k dosahované účinnosti lze za optimální zátěž považovat výkon v rozmezí 500 W až 1 kW, tj. zátěž na úrovni  $\frac{1}{3}$  až  $\frac{2}{3}$  maximálního výstupního výkonu. Pro větší přehlednost jsou v následující kapitole uvedeny srovnávací charakteristiky jednotlivých veličin v závislosti na vstupním napájecím napětí.

### 13.4 Srovnávací charakteristiky

Srovnávací charakteristiky vycházejí ze souborných charakteristik závislosti výstupního napětí, příkonu, vstupního proudu a účinnosti na vstupním napětí a výstupním výkonu v kap.13.3. Jsou uspořádány po jednotlivých veličinách a zobrazují jejich závislost na vstupním napájecím napětí a výstupním výkonu střídače při odporové zátěži.

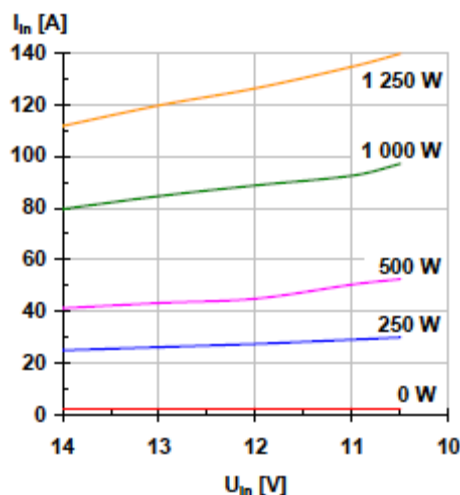
Za klíčové je možné považovat charakteristiky závislosti výstupního napětí na napájecím napětí a zatížení střídače. Z průběhů v grafu na obr.101 je zřejmé, že střídač udrží požadované výstupní napětí jen na úrovni 14-13 V na vstupu při zátěži do 250 W. Při vyšším zatížení je výstupní napětí už výrazně nižší, přičemž strmost poklesu pod 13 V je prakticky stejná.



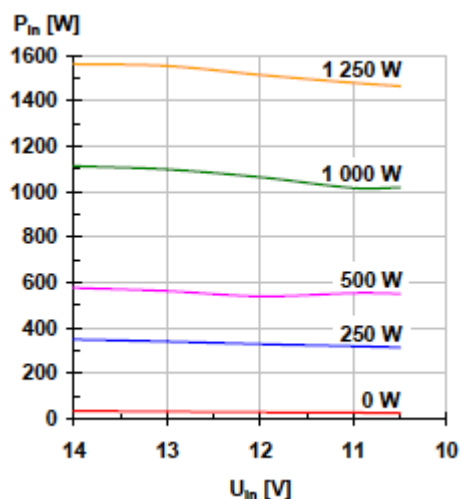
Obr.101 Charakteristiky výstupního napětí

Výjimkou je charakteristika při zatížení 1 250 W, kdy je výstupní napětí v rozmezí 14-12 V napájecího napětí střídače nečekaně relativně stabilní.

Napájecí proud zatíženého střídače s klesajícím napájecím napětím téměř lineárně narůstá, drobné změny jsou viditelné na charakteristikách pro zatížení 500 a 1 000 W (obr.102). Žádné výrazné výkyvy nejsou patrné ani na průbězích charakteristik příkonu střídače. Prakticky ve všech výkonových režimech s klesajícím napájecím napětím příkon střídače mírně klesá. To vytváří předpoklad rostoucí účinnosti střídače při poklesu napájecího napětí (obr.103).

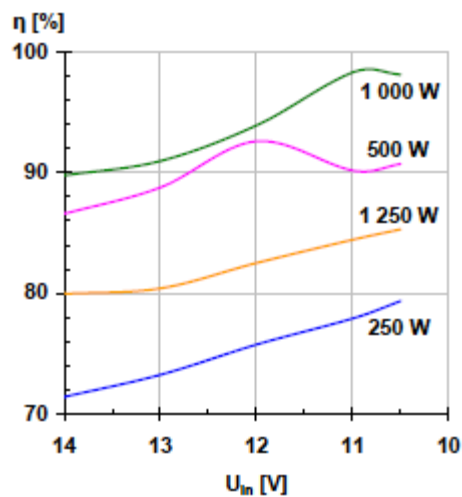


**Obr.102** Charakteristiky vstupního proudu



**Obr.103** Charakteristiky příkonu střídače

Zatímco jsou charakteristiky výstupního napětí důležité z hlediska stability sítě, z provozně-ekonomického hlediska je nezanedbatelná účinnost střídače. V technických údajích je sice pro střídač MW TS-1500-212 B uvedena účinnost 88 %, ale bez bližší specifikace provozních podmínek. Charakteristiky v grafu na obr.104 ukazují, jak výrazná je změna účinnosti střídače v závislosti na jeho zatížení a napájecím napětí, kdy pro malé výkony (250 W) nedosahuje účinnost střídače ani 80 %. Nejvyšší účinnosti dosahuje střídač při zatížení v rozmezí 500-1 000 W, kde se účinnost (podle napájecího napětí) pohybuje v rozsahu 86,6-98,3 %. Při dalším zvyšování zátěže se účinnost střídače opět výrazně snižuje. Společným znakem pro všechny charakteristiky je růst účinnosti střídače s klesajícím napájecím napětím na vstupu.

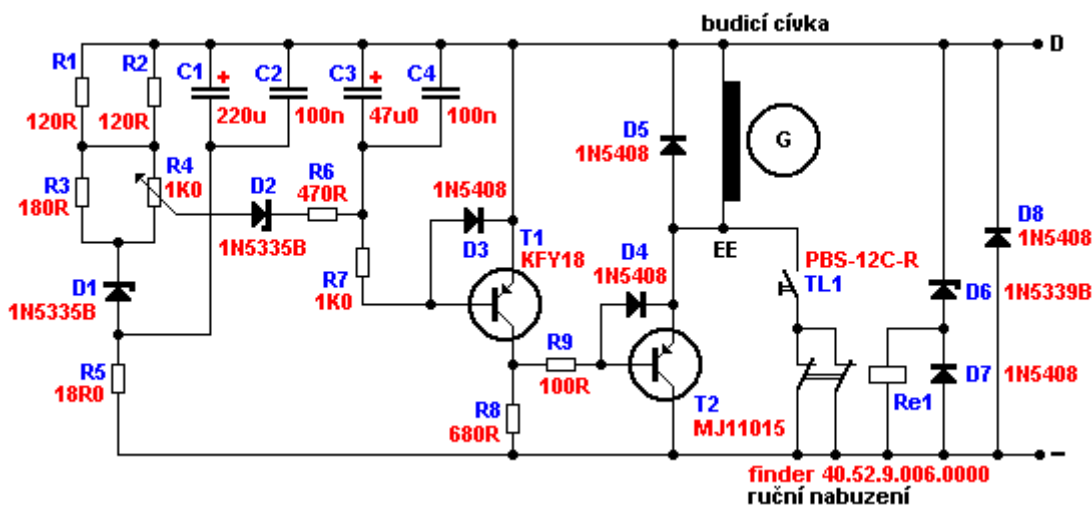


**Obr.104 Charakteristiky účinnosti střídače**

Z výsledků měření vyplývá, že z energetického hlediska je nevýhodné používat pro malé zátěže výkonné střídače, kdy se téměř 30 % příkonu střídače mění v neužitečné teplo. Podobně i zatížení na úrovni maximálního výkonu představuje relativně velké ztrátové teplo. V našem případě musí ventilátor ze střídače odvést až 300 W tepelného výkonu.

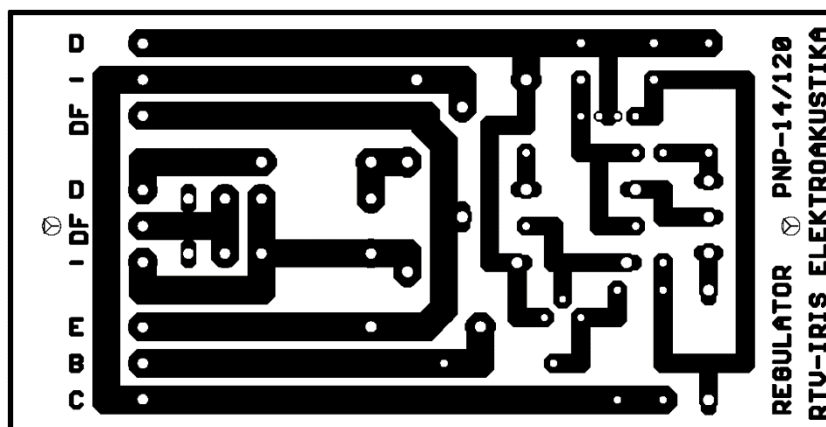
## 14 SIMULAČNÍ OPTIMALIZACE

Prvotní návrh lineárního regulátoru [48] byl ověřován na simulátorech Workbench EWB 5.12 a Multisim v.12. Zvolena byla teoreticky výhodnější PNP verze. Simulace vycházely z vlastností rotoru a statoru generátoru, které byly s omezenou přesností zjištěny experimentálně. Následně byl regulátor upraven do minimalistické verze, kdy byla dvojice tranzistorů T2-T3 z původního návrhu (KFY18-KD617) nahrazena výkonovým Darlingtonovým tranzistorem MJ11015 s proudovým zesilovacím činitelem  $h_{21E} = 1\ 000$  a kolektorovou ztrátou  $P_C = 200\ W$ . Výsledky simulací přinesly doporučení použít na vstupu regulátoru integrační RC filtry R5-C1 a R6-C3 (obr.105), které měly za úkol odfiltrout případné rušivé napětí na výstupu, částečně zpomalit odezvu regulátoru a zamezit tak rozkmitání regulačního obvodu regulátor-generátor. Kmitání omezoval i rezistor R7 (1K0), který snižoval napěťový zisk tranzistoru T1. Podle simulace byla potom realizována první ověřovací verze lineárního regulátoru.



Obr.105 Schéma zapojení ověřovací verze lineárního regulátoru

Na desku plošných spojů (obr.106) byl ještě přidán obvod ručního nabuzení generátoru (Re1-TL1-D6-D7), který umožňuje nabudit generátor s využitím remanentního magnetismu i bez připojeného akumulátoru.



Obr.106 Deska plošných spojů lineárního regulátoru (skutečná velikost)

Trvalým propojením kontaktů tlačítka TL1 dojde k převedení obvodu do funkce samočinného nabuzení generátoru. Osazená deska je na obr.107.



**Obr.107 Osazená deska plošných spojů ověřovacího lineárního regulátoru**

Prvotní provozní zkoušky při nízkých otáčkách generátoru (cca do 3 000 ot/min) ukázaly, že lineární regulátor i přes svoji jednoduchost a minimalistické řešení pracuje naprosto spolehlivě od nulového zatížení po maximální výstupní proud 80 A při výstupním napětí 13,6 V. Problémy se objevily zejména v pásmu nad 4 000 ot/min, kdy při chodu naprázdno nebo s malou zátěží docházelo k rozkolísání výstupního napětí v rozpětí přibližně  $\pm 2-2,5$  V s frekvencí 8-10 Hz. Při zatížení generátoru na 70-100 % kmitání výstupního napětí ustalo. To bylo jasným důkazem toho, že regulační obvod je nestabilní, respektive je podmíněně stabilní pro určitou kombinaci otáček a zatížení. Bylo tedy nezbytně nutné vlastnosti regulačního obvodu upravit a stabilizovat regulaci napětí v celém provozním rozsahu otáček a proudů.

## 15 ÚPRAVA REGULÁTORU

Podle teorie regulace musí každý regulační obvod splňovat amplitudovou a fázovou podmínku stability [49,50]. Pro tento případ platí:

$$F_{G(j\omega)} \cdot F_{R(j\omega)} = 1 \quad (12)$$

a současně

$$\varphi_{G(\omega)} + \varphi_{R(\omega)} = -\pi \quad (13)$$

kde je:

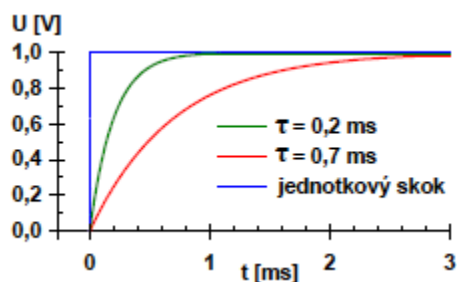
$F_{G(j\omega)}$  - frekvenční přenos generátoru

$F_{R(j\omega)}$  - frekvenční přenos regulátoru

$\varphi_{G(\omega)}$  - fázový posuv generátoru

$\varphi_{R(\omega)}$  - fázový posuv regulátoru

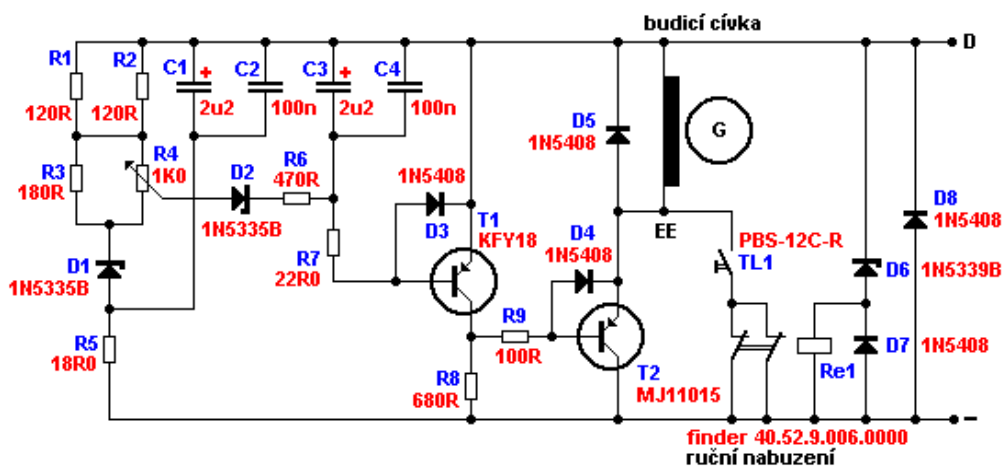
Z analýzy výsledků prvních měření a vyhodnocení nestability regulačního obvodu vyplynulo, že bude nutné regulátor tzv. zrychlit, což v automatizační technice představuje rychlost odezvy (časovou prodlevu) na tzv. jednotkový skok (příklad je na obr.108,  $\tau$  je tzv. časová konstanta).



Obr.108 Odezva na jednotkový skok

To znamená, že se musí zkrátit časové konstanty regulátoru, protože časová konstanta generátoru je daná jeho konstrukcí a nelze ji změnit. Časové konstanty regulátoru určují především RC filtry R5-C1 a R6-C3 (obr.103). Hodnoty kondenzátorů C1 a C3 byly změněny na 2,2  $\mu\text{F}$  a snížením hodnoty rezistoru R7 na 22  $\Omega$  byl zvýšen napěťový zisk tranzistoru T1. S ohledem na dlouhodobou stabilitu je vhodné použít na místě C1 a C3 fóliové kondenzátory 2 $\mu\text{F}/100\text{ V}$ . Upravené schéma lineárního regulátoru je na obr.109. Nová verze regulátoru podle obr.109 je postavena na totožné desce plošných spojů (v našem případě s elektrolytickými kondenzátory 2 $\mu\text{F}/70\text{ V}$  (obr.110). Provedené úpravy byly ověřeny provozní zkouškou.

V napěťovém regulačním rozsahu 8-15 V při otáčkách v rozmezí 850-6 000 ot/min a zatížení 0-100 % se neprojevil žádná (ani náznaková) nestabilita regulačního obvodu. Tudiž bylo možné přistoupit k ověřování činnosti regulátoru a změřit voltampérové zátěžové charakteristiky generátoru a parametry buzení v různých provozních podmínkách.



Obr.109 Schéma zapojení finální verze lineárního regulátoru



Obr.110 Upravená deska plošných spojů lineárního regulátoru

## 16 VÝMĚNA HNACÍHO MOTORU

Po zkušenostech z předchozích měření zatěžovacích charakteristik bylo rozhodnuto o výměně hnacího motoru. Původní hnací jednotkou [51] byl třífázový asynchronní elektromotor KEM typ 2L-100L-4 2,2 kW 1 445 ot/min, který se v provozu neosvědčil. Zejména v nízkých otáčkách se značně se přehříval a nebyl schopen dodat požadovaný mechanický výkon. Vzhledem k příznivé finanční situaci bylo možné objednat od firmy Herott osvědčený těžký průmyslový motor Celma-Indukta typ 2SIE112M6 2,2 kW 955 ot/min. Jedná se o šestipólový asynchronní stroj s osovou výškou 112 mm s vinutím D 400 V (zapojení do trojúhelníku). Motor má tlakově odlitý hliníkový plášť, litinová čela a je osazen zesílenými ložisky 6306 2Z C3. Protože je průměr hřídeli obou motorů 28 mm nebylo nutné v hnací řemenici měnit upínací pouzdro. Parametry nového motoru jsou v tabulce 24.

**Tab.24 Základní parametry nového hnacího motoru Celma-Indukta**

| základní parametry motoru Celma-Indukta |                |
|---|----------------|
| typ                                     | 2SIE112M6      |
| provedení                               | B3 - patkový   |
| osová výška                             | 112 mm         |
| délka                                   | 389 mm         |
| rozteč upevňovacích šroubů              | 190 mm         |
| průměr hřídele                          | 28 mm          |
| dovolená radiální síla na hřídel        | 1,62 kN        |
| hmotnost                                | 32 kg          |
| rotor                                   | kotva nakrátko |
| jmenovité otáčky pro 50 Hz              | 955 ot/min     |
| synchronní otáčky pro 50 Hz             | 1 000 ot/min   |
| maximální přípustné otáčky              | 2 400 ot/min   |
| jmenovitý výkon                         | 2,2 kW         |
| kroučící moment                         | 22 Nm          |
| jmenovité napětí D/Y                    | 400/690 V      |
| jmenovitý proud při 400 V               | 5,1 A          |
| účinnost                                | 83,1 %         |
| účinník (cosφ)                          | 0,75           |

Převzato z [52]

Výměna problematického motoru KEM za motor Celma-Indukta umožňuje provozovat generátor již od 600 ot/min. Použití šestipólového motoru a zachování stávajícího řemenového převodu vedlo v důsledku jeho povolených mezních otáček k poklesu maximálních otáček generátoru z původních 10 800 ot/min na 7 200 ot/min. To plně postačuje, protože dosud provedená měření ukazují, že nemá význam používat vyšší otáčky generátoru než 6 000 ot/min. Snímek soustrojí s novým hnacím motorem je na obrázku 111.

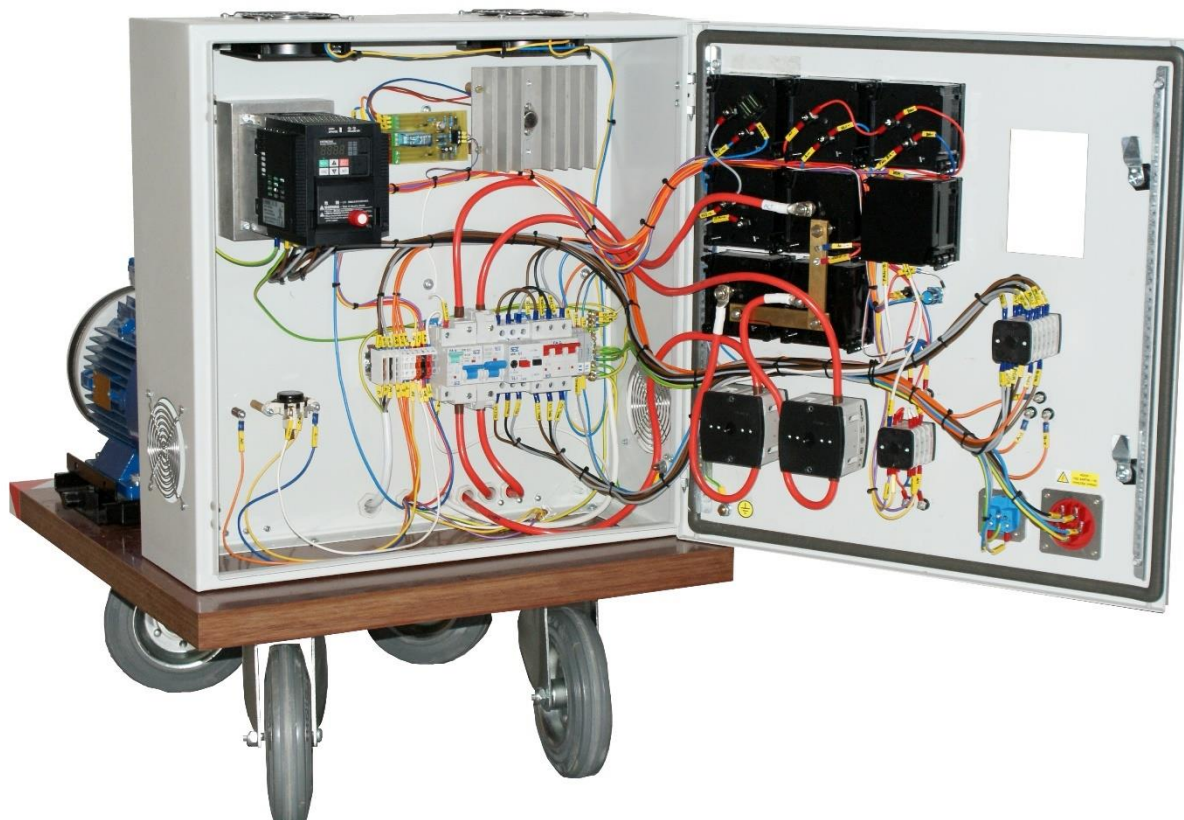




**Obr.111 Měřící soustrojí s novým motorem Celma-Indukta 2SIE112M6**

## 17 STABILITA REGULAČNÍHO OBVODU

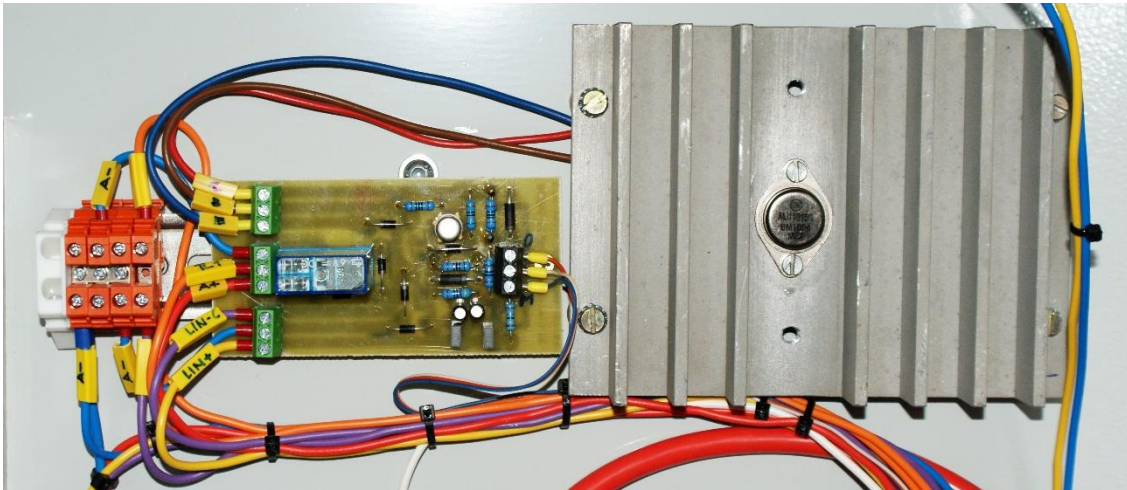
Lineární regulátor je namontován do pravého horního rohu rozvaděče pod chladicím ventilátorem (obr.112 a 113). Chladič výkonového Darlingtonova tranzistoru je dimenzován tak, aby se ani při teplotě okolí +40 °C a výpadku chladicího ventilátoru tranzistor neohřál o více než 20 °C. Vlastní deska plošných spojů regulátoru se svorkovnicemi pro připojení vodičů je pomocí držáků připevněna na lištu DIN 35. Propojení regulačního obvodu je ve smyslu ČSN EN 61439-1 [53], ČSN EN 61439-2 [54] a ČSN 33 0165 [55] provedeno vodiči H07V-K 1,5 (CYA 1,5) s nalisovanými izolačními ukončovacími prvky.



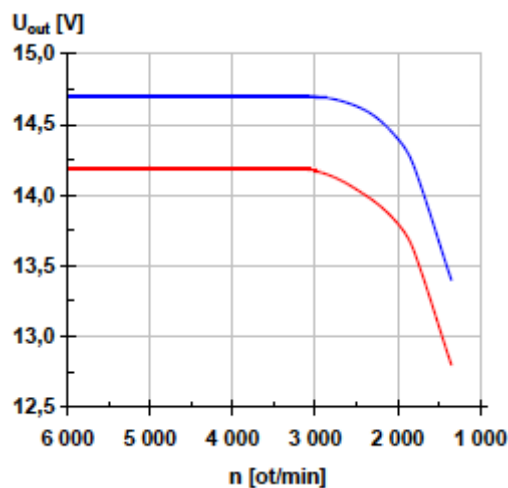
*Obr.112 Otevřený rozvaděč soustrojí*

### 17.1 Stabilita napětí

Prvním zkušebním měřením byla stabilita napětí generátoru při změně otáček. Měřil se pokles napětí naprázdno v rozsahu 1 350-6 000 ot/min. Výchozím bodem bylo výstupní napětí 14,2 V při 6 000 ot/min (obr.112). Při minimálních jmenovitých provozních otáčkách 1 800 ot/min [8] bylo výstupní napětí 13,6 V (červená charakteristika), což postačuje pro trvalé dobíjení připojeného akumulátoru.



**Obr.113 Lineární regulátor v rozvaděči měřícího soustrojí**



**Obr.114 Pokles výstupního napětí alternátoru naprázdno v závislosti na otáčkách**

Pokud při 1 800 ot/min nastavíme výstupní napětí na hodnotu 14,2 V (modrá charakteristika), tedy na úroveň 12V palubní sítě při běžícím generátoru (lineární regulátor má nastavitelné napětí) stoupne výstupní napětí při 3-6 tisících otáčkách za minutu na úroveň 14,7 V. To odpovídá plně nabitému akumulátoru při trvalém dobíjení.

Předpokládáme-li, že pro okamžité výstupní napětí generátoru platí rovnice [24]

$$U = \frac{1}{2} B D l \omega \sin \omega t \quad (14)$$

kde je:

- $U$  - indukované napětí,
- $B$  - magnetická indukce,
- $D$  - průměr rotoru stroje,
- $l$  - aktivní délka vinutí,
- $\omega$  - úhlová rychlost,
- $t$  - čas,

je možné pro výstupní napětí v závislosti na otáčkách odvodit formální vztah

$$U = n \cdot C \quad (15)$$

kde je:

$U$  - výstupní napětí,

$n$  - počet otáček za jednotku času,

$C$  - normovaná konstanta generátoru.

Normovaná konstanta generátoru udává teoretickou hodnotu výstupního napětí pro  $n = 1$  otáčka za zvolenou jednotku času. z toho lze odvodit, že

$$\frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2} \Rightarrow U_2 = U_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (16)$$

Pro tento příklad, kdy  $U_1 = 14,2$  V při 1 800 ot/min vychází pro 6 000 ot/min a konstantní buzení generátoru

$$U_2 = 14,2 \cdot \frac{6\,000}{1\,800} = 47,3 \text{ V} \quad (17)$$

rozdíl napětí je tedy 33,1 V. Vlivem působení regulačního obvodu je však reálný růst napětí pouze 0,5 V. Úroveň potlačení růstu napětí (regulační zásah) se vypočítá z rovnice pro určení útlumu obecného čtyřpólu

$$b = 20 \log \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \quad (18)$$

kde je:

$b$  - útlum (potlačení změny),

$\Delta U_1$  - rozdíl výstupních napětí,

$\Delta U_2$  - rozdíl vstupních napětí.

Pro použitý regulační obvod platí

$$b = 20 \log \frac{33,1}{0,5} = 36,4 \text{ dB} \quad (19)$$

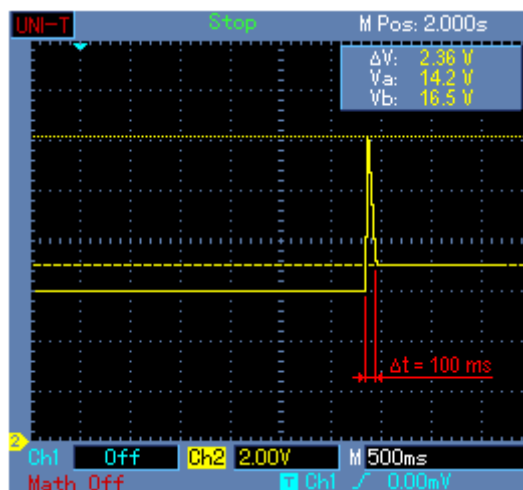
což je pro jednoduchý regulátor velmi dobrý výsledek. V praxi to znamená, že regulační obvod 66× zmenšuje závislost výstupního napětí generátoru na otáčkách.

## 17.2 Rychlost odezvy (překmit napětí)

Kritickým okamžikem pro diodový můstek generátoru je náhlé odpojení zátěže, kdy může dojít ke krátkodobému vysokému nárůstu napětí (tzv. napěťová špička). Tomu ale nemusí usměrňovací diody odolat. Velikost překmitu napětí závisí jak na rychlosti (časových konstantách) regulátoru, tak na indukčnosti budicího vinutí (časové konstantě) generátoru. Při testování pulzních regulátorů se při nečekaném odpojení zátěže vygeneroval tak velký překmit napětí, že došlo k průrazu PN přechodu jedné z diod v usměrňovacím můstku a tím k jeho zničení. Výsledkem bylo zjištění, že při provozu generátoru s pulzním budičem je nezbytně nutné zajistit určitou minimální zátěž či mít trvale připojený akumulátor s dostatečnou kapacitou, který dokáže napěťovou špičku vlivem malého vnitřního odporu absorbovat.

Pro ověření chování regulačního obvodu s lineárním regulátorem při náhlém odpojení zátěže se pro jistotu postupovalo od malých napětí (8 V) a malých proudů (od 4 A) až ke jmenovitému napětí 14,2 V a proudu 75 A. Výsledek posledního měření je v oscilogramu na obr.115. Pro otáčky generátoru  $n = 3\,000$  ot/min bylo při chodu naprázdno nastaveno jmenovité výstupní napětí

14,2 V. Následně byl generátor zatížen proudem 75 A a výstupní napětí kleslo na 13,6 V. Po odpojení zátěže vznikl překmit výstupního napětí (napětíová špička) o velikosti 2,36 V nad jmenovitým výstupním napětím 14,2 V. Doba ustálení na jmenovité napětí 14,2 V byla 100 ms. Je zřejmé, že výrazné zkrácení časových konstant regulátoru se projevilo na výrazném omezení překmitu napětí, což můžeme (s ohledem na jednoduchost lineárního regulátoru) považovat za vynikající výsledek.



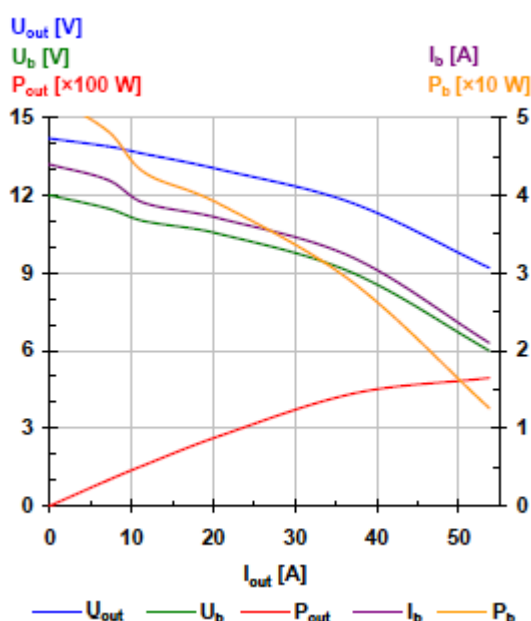
**Obr.115 Překmit napětí při odpojení zátěže**  
 $n = 3\,000 \text{ ot/min}$ ,  $U_m = 14,2 \text{ V}$ ,  $I = 75 \text{ A}$

## 18 VOLTAMPÉROVÉ A BUDICÍ CHARAKTERISTIKY

Poslední sérií měření na modelovém soustrojí se středofrekvenčním synchronním generátorem buzeným lineárním regulátorem byla měření zátěžových a budicích charakteristik a jejich závislost na otáčkách generátoru. Při měření byly otáčky generátoru udržovány na konstantních hodnotách 1 350, 1 800, 2 500, 3 000, 4 000 a 5 000 ot/min, jako zátěž byla použita výkonová bezindukční odporová dekáda [25].

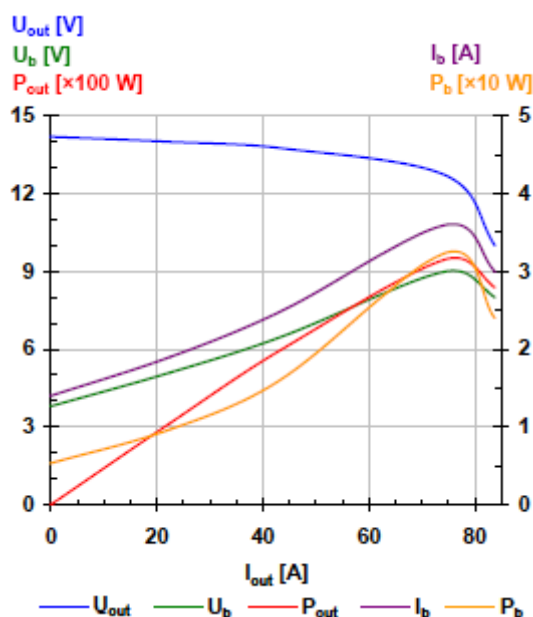
### 18.1 Charakteristiky podle otáček

Dílní výsledky pro jednotlivé otáčky jsou v grafech na obr.116 až 121. Vzhledem k rozsahům stupnic je nutné v grafech výstupní výkon násobit  $100\times$  a budicí výkon  $10\times$ . Za minimální v praxi využitelné otáčky můžeme považovat 1 350 ot/min (s uvažovanou tolerancí  $\pm 100$  ot/min). Při napětí 12,6 V, které odpovídá jmenovitému napětí šestičlánekového olověného akumulátoru, je výstupní proud 25 A a výstupní výkon 315 W (obr.116).



Obr.116 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru  
( $n = 1\,350$  ot/min)



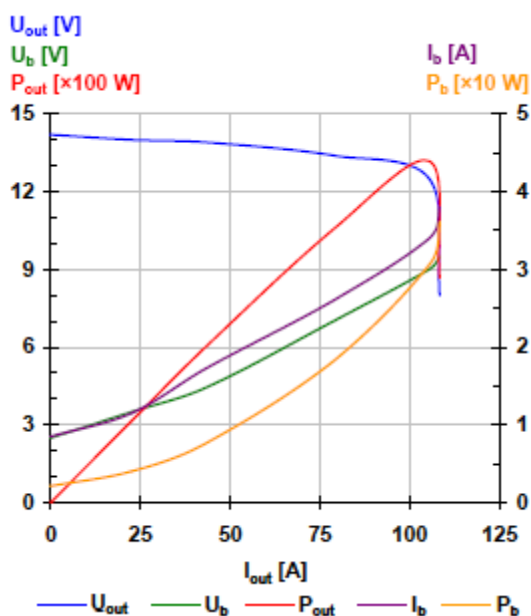


**Obr.117 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru**  
( $n = 1\,800$  ot/min)

Pro minimální jmenovité provozní otáčky podle údajů výrobce [8], tj. 1 800 ot/min, je výstupní proud 75 A při napětí 12,8 V, což odpovídá výkonu 960 W (obr.117).

Od 2 000 ot/min začínají mít zátěžové, budicí a výkonové charakteristiky typově stejný průběh. Liší se pouze strmostí poklesu napětí se zatížením, maximálním výkonem a mírným poklesem budicích parametrů.

Pro 2 500 ot/min dává generátor 105 A při napětí 12,6 V, výstupní výkon je 1,32 kW (obr.118).

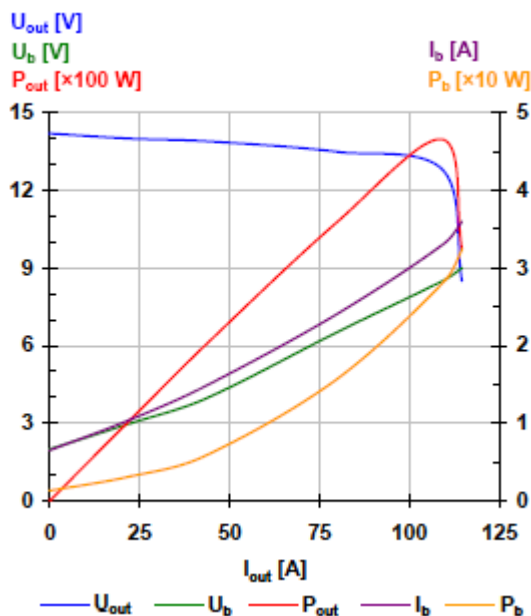


**Obr.118 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru**  
( $n = 2\,500$  ot/min)

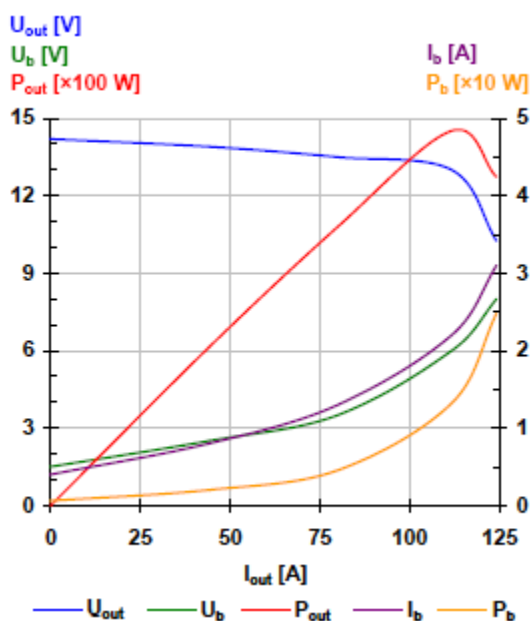
Pro 3 000 ot/min je při napětí 12,7 V výstupní proud 110 A a výkon 1,4 kW (obr.119). Zvyšování otáček nad 3 000 ot/min už nepřináší významný nárůst výkonu ani snižování budicího proudu.

Pro 4 000 ot/min dosahuje proud při napětí 12,6 V hodnoty 113,5 A a výkon je 1,43 kW (obr.120). Oproti 3 000 ot/min výkon vzrostl pouze o 30 W. Pro 5 000 ot/min je při napětí 12,6 V a proudu 115 A výkon 1,45 kW (obr.121). Nárůst výkonu je oproti 3 000 ot/min jen 50 W.

Při orientačním měření pro rychlost 6 000 ot/min, ve srovnání s 5 000 ot/min byly rozdíly zanedbatelné. Proto nejsou charakteristiky pro 6 000 ot/min uvedeny.



**Obr.119 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru**  
( $n = 3\,000$  ot/min)

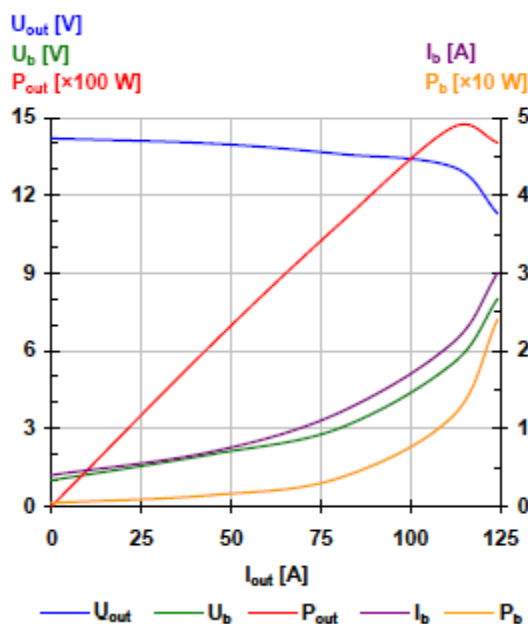


**Obr.120 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru**  
( $n = 4\,000$  ot/min)

Z analýzy naměřených hodnot je možné odvodit doporučení pro dlouhodobý provoz energetického mikrozdroje, jehož generátorem je automobilový alternátor. Za optimální otáčky



můžeme podle výsledků měření považovat rozsah od 1 800 do 3 000 ot/min, přičemž pro oblast maximálního provozního výkonu je možné v praxi uvažovat otáčky v rozmezí 2 500-3 000 ot/min.



**Obr.121 Voltampérové, budicí a výkonové charakteristiky generátoru**  
( $n = 5\,000$  ot/min)

## 18.2 Elektrický výkonový zisk

Zajímavé výsledky poskytuje srovnání elektrického výkonového zisku. Podle definice výkonového zisku obecného čtyřpólu platí

$$A_p = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (20)$$

kde je:

$A_p$  - výkonový zisk,  
 $P_{out}$  - výstupní výkon,  
 $P_{in}$  - vstupní výkon.

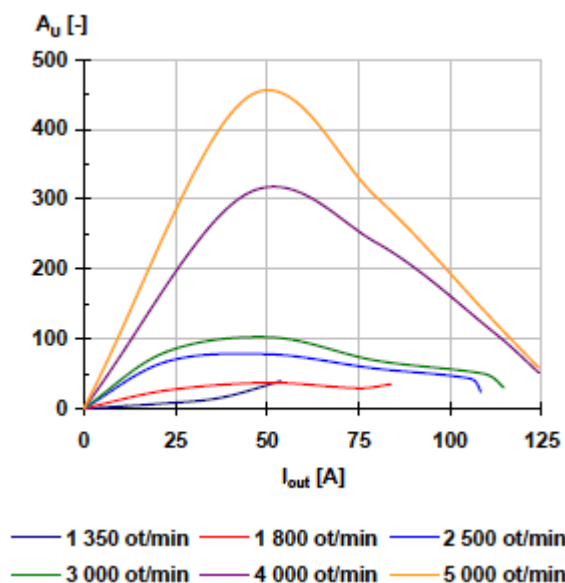
Pro tento účel vyjádříme elektrický výkonový zisk generátoru z rovnice (20) v absolutní míře jako

$$A_p = \frac{U_{out} I_{out}}{U_b I_b} \quad (21)$$

kde je:

$A_p$  - elektrický výkonový zisk,  
 $U_{out}$  - výstupní napětí,  
 $I_{out}$  - výstupní proud,  
 $U_b$  - budicí napětí,  
 $I_b$  - budicí proud.

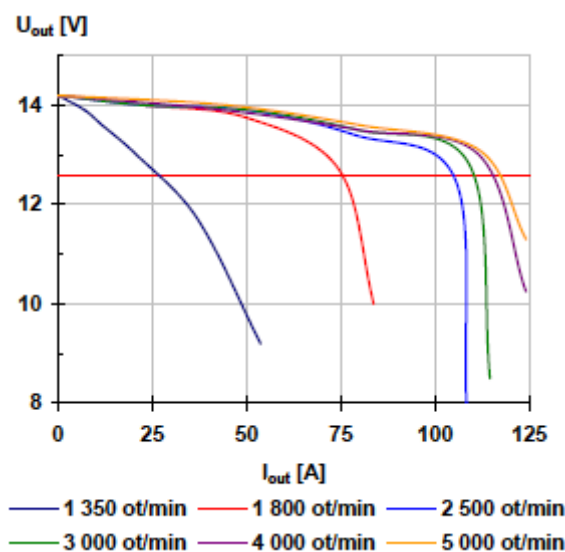
Porovnání výsledků výpočtů jsou uvedeny v grafu na obr.122. Nečekaným a velkým překvapením bylo zjištění, že prakticky pro jakékoliv otáčky je maximální elektrický výkonový zisk (vypočítaný jako podíl výstupního a budicího výkonu) na úrovni 50 A výstupního proudu. To v otáčkovém rozsahu 1 800-5 000 ot/min odpovídá výstupnímu napětí 13,7-14 V.



**Obr.122 Porovnání elektrického výkonového zisku**  
(závislost na otáčkách a zatěžovacím proudu)

### 18.3 Srovnávací charakteristiky

V grafu na obr.123 jsou základní voltampérové (zatěžovací) charakteristiky generátoru.

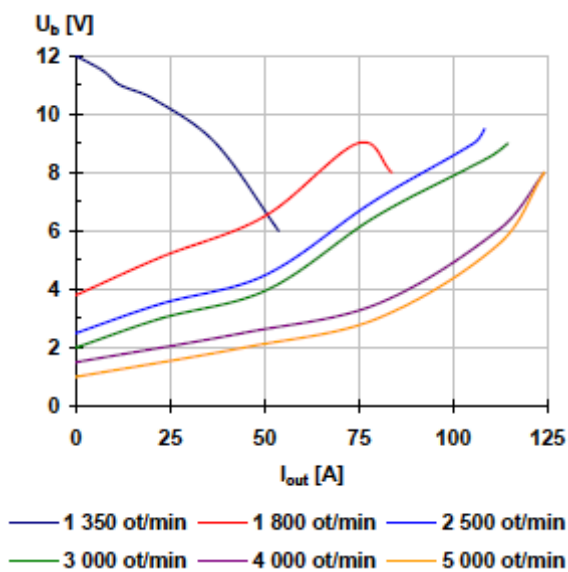


**Obr.123 Porovnání výstupního napětí**  
(závislost na otáčkách a zatěžovacím proudu)

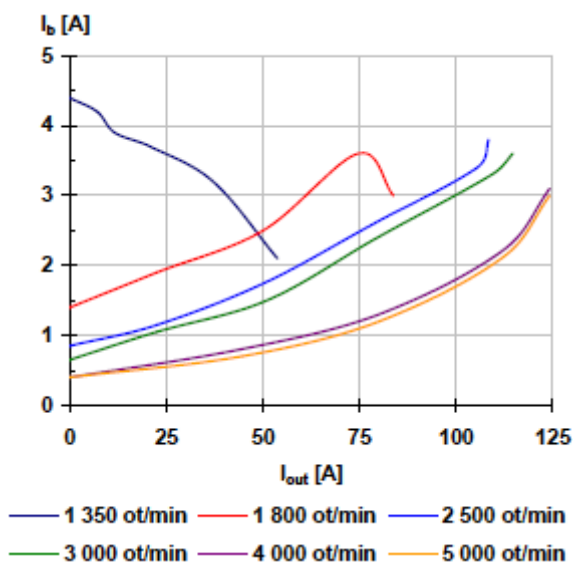
Z průběhu zatěžovacích charakteristik je vidět, že strmost poklesu napětí je kromě 1 350 ot/min pro celý rozsah provozních otáček prakticky stejná. V grafu je vyznačena úroveň 12,6 V, což je jmenovité napětí 12V olověného akumulátoru.

Srovnávací charakteristiky budicího napětí a budicího proudu v grafech na obr.124 a 125 jsou tvarově téměř identické. Budicí vinutí představuje prakticky pouze činný odpor a drobné odchylky v průbězích charakteristik jsou způsobeny přesností použitých měřicích přístrojů a

změnou přechodového odporu mezi kroužky kotvy a sběracími kartáči, které přivádějí budící proud.

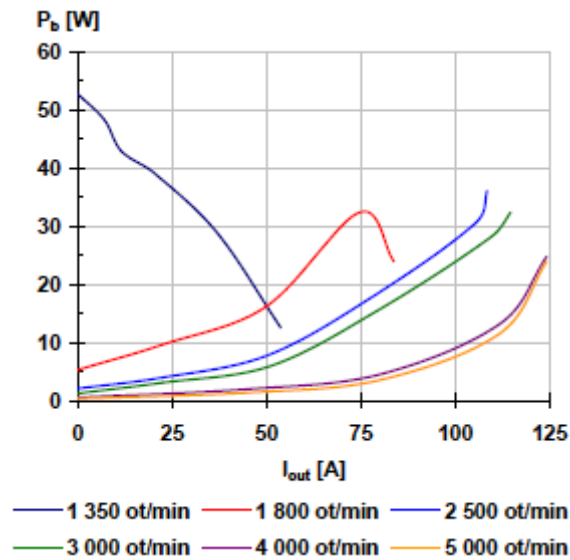


**Obr.124 Porovnání budícího napětí**  
(závislost na otáčkách a zatěžovacím proudu)



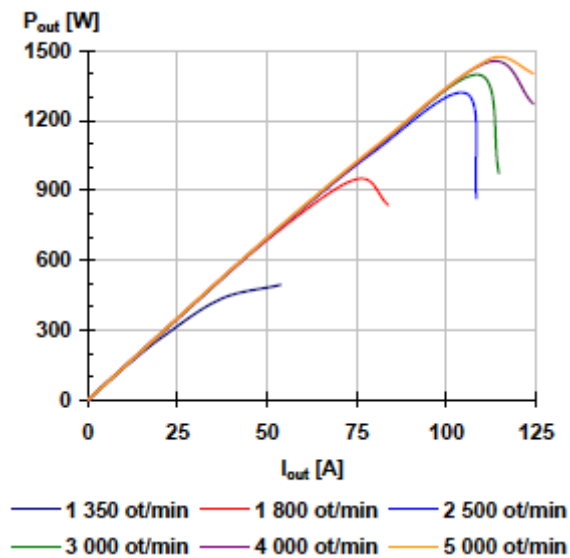
**Obr.125 Porovnání budícího proudu**  
(závislost na otáčkách a zatěžovacím proudu)

Navazující graf na obrázku 126 představuje budící výkon. Stejně jako u budícího napětí a budícího proudu i potřebný budící výkon narůstá se zatížením generátoru a klesá s rostoucími otáčkami, kdy potřebný budící výkon nahrazuje mechanický výkon na hřídeli stroje. Výjimkou je charakteristika pro 1 350 ot/min, tady generátor pracuje pod minimálními provozními otáčkami stanovenými výrobcem [8].



**Obr.126 Porovnání budícího výkonu**  
(závislost na otáčkách a zatěžovacím proudu)

Výkonové charakteristiky v grafu na obr.127 mají spolu s napěťovými charakteristikami na obr.123 největší vypovídací hodnotu a z aplikačního hlediska největší význam.



**Obr.127 Porovnání výstupního výkonu**  
(závislost na otáčkách a zatěžovacím proudu)

Výkonové charakteristiky jsou až do zlomových bodů prakticky lineární. Výkon generátoru roste úměrně se zatěžovacím proudem, teoreticky podle rovnice

$$P_G = C \cdot I_{out} \quad (22)$$

kde je:

$P_G$  - výkon generátoru

$C$  - konstanta (stálé výstupní napětí)

$I_{out}$  - výstupní proud

to znamená, že regulátor udržuje v určitých mezích výstupní napětí na požadované úrovni. Zlomové body charakteristik a následný pokles výkonu jsou důsledkem několika faktorů, které spolu navzájem souvisejí.

## 18.4 Omezující faktory charakteristik

### 18.4.1 Mechanický výkon

Klíčovým faktorem je mechanický výkon

$$P_m = M \cdot \omega \quad (23)$$

daný součinem hnacího momentu na hřídeli generátoru a úhlovou rychlostí  $\omega$ , který generátor převádí na výkon elektrický. Pro technickou praxi můžeme rovnici (23) upravit do tvaru

$$P_m = M \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (24)$$

kde je:

$P_m$  - mechanický výkon na hřídeli,

$M$  - točivý (kroutící) moment,

$n$  - počet otáček za minutu.

Točivý moment na hřídeli generátoru, který vyvolává působení magnetických sil mezi rotorem a statorem je dán obecnou pohybovou rovnicí

$$M_G = M_i - J \frac{d\omega}{dt} \quad (25)$$

kde je:

$M_G$  - točivý moment na hřídeli,

$M_i$  - vnitřní elektromagnetický moment,

$J$  - moment setrvačnosti rotujících částí,

$\omega$  - úhlová rychlost.

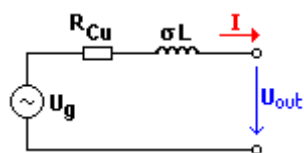
Točivý moment ale není možné zvyšovat neomezeně. Jeho maximální velikost je omezena právě elektromagnetickým momentem generátoru  $M_i$  a mimo jiné závisí i na magnetické indukci v mezeře mezi rotorem a statorem a tvarem statorového a rotorového a rotorového svazku [56].

### 18.4.2 Magnetická indukce v mezeře

Dalším omezujícím faktorem je mez sycení magnetického obvodu a tím i omezení maximální dosažitelné magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi rotorem a statorem. A právě magnetická indukce je podle rovnice (14) jedním z určujících faktorů pro velikost indukovaného napětí. Magnetická indukce přímý vliv na silové působení mezi rotorem a statorem tím, že spoluvytváří elektromagnetický moment.

### 18.4.3 Reaktance statorového vinutí

Třetím nezanedbatelným faktorem je reaktance statorového vinutí (tj. kombinace jeho ohmického odporu a sériové rozptylové indukčnosti). Náhradní zjednodušené schéma jedné fáze generátoru je na obr.128.



Obr.128 Zjednodušené náhradní schéma fáze generátoru

Úbytek napětí na vinutí generátoru, který vzniká průchodem proudu  $I$ , tvoří úbytek napětí na odporu vinutí (tzv. ztráty v mědi)

$$U_{Cu} = I \cdot R_{Cu} \quad (26)$$

a úbytek napětí na rozptylové reaktanci vinutí  $\sigma L$

$$U_{X_{\sigma L}} = I \cdot 2\pi f \sigma L \quad (27)$$

Napěťové ztráty ve vinutí generátoru  $U_{zv}$  jsou

$$U_{zv} = \sqrt{U_{Cu}^2 + U_{X_{\sigma L}}^2} \quad (28)$$

a po dosazení z (26) a (27)

$$U_{zv} = I \sqrt{R_{Cu}^2 + (2\pi f \sigma L)^2} \quad (29)$$

K tomu ještě přistupuje tzv. termická komprese. S použitím výpočtu teploty vinutí podle ČSN 35 0010 [37]

$$t_{Cu} = t_0 + 255 \cdot \left( \frac{R_t}{R_0} - 1 \right) \quad (30)$$

se určí odpor otepleného vinutí pro rovnici (29)

$$R_{Cu} = R_0 \left( 1 + \frac{t_{Cu} - t_0}{255} \right) \quad (31)$$

a po dosazení

$$U_{zv} = I \sqrt{\left[ R_0 \left( 1 + \frac{t_{Cu} - t_0}{255} \right) \right]^2 + (2\pi f \sigma L)^2} \quad (32)$$

Z rovnice (32) tak vyplývá, že při konstantním napětí  $U_g$  roste úbytek napětí ve vinutí v závislosti na velikosti výstupního proudu, teplotě vinutí a frekvenci. V ideálním případě by měl regulátor tento úbytek napětí vyrovnat. V technické praxi je však regulační rozsah vždy limitován mezemi daného regulačního obvodu soustavy, tedy tzv. okrajovými podmínkami matematického popisu.

## 19 DIDAKTICKÉ VYUŽITÍ

### 19.1 Možnosti didaktického využití návrhů elektrických obvodů

Měřicí soustrojí představuje z didaktického hlediska širokospektrální učební pomůcku, přestože měl projekt specifického výzkumu čistě odborný elektrotechnický charakter. Kromě praktických aplikací multidisciplinárních vazeb a přiblížení se komerční i průmyslové praxi se elektrické obvody modelového soustrojí uplatní jako názorný příklad prakticky ve všech elektrotechnických předmětech, které se na KTP vyučují. Zejména pro oblast základního školství je považováno za mimořádně důležité, aby absolventi měli široký přehled v technických oborech, dokázali jednotlivé technické obory propojovat mezi sebou (což je jedna část multidisciplinárních vazeb), znali základní principy prvků a zařízení, a tomu odpovídající teoretická východiska. Při reálném pohledu na obsah Rámcového vzdělávacího plánu (RVP) v oblasti 5.9 Člověk a svět práce je možné za téměř ideální stav považovat to, kdyby v oblasti elektrotechniky učitel praktických činností precizně ovládal látku na úrovni elektrotechnické průmyslovky, s mírným přesahem do vysokoškolské elektrotechniky. Je pochopitelné, že při širokém záběru, jaký musí na základní škole zvládnout, nelze jít příliš do hloubky ve všech technických disciplínách.

V následujícím textu jsou některé příklady propojení teoretické výuky s konkrétní aplikací na praktické využití návrhu měřicího soustrojí a jeho využití v prakticky orientovaných předmětech. Není cílem konkurovat technickým univerzitám a jejich laboratořím, ale poskytnout studentům učitelství technických předmětů pomůcku, která má charakter a vlastnosti reálného zařízení. Zároveň sleduje i aktuální trendy v oblasti mikrozdvořů pro domácnosti, kde se opouští původní model prodeje a zpětného nákupu elektrické energie a přechází se na poloostrovní model, který předpokládá přímé využití vyrobené elektrické energie v daném objektu včetně její akumulace a jen nadbytečná energie se odvádí do distribuční sítě, z níž se v případě nedostatku vlastního výkonu elektrická energie odebírá.

### 19.2 Elektrotechnika 1 a Elektrotechnika 2

Předměty Elektrotechnika 1 a Elektrotechnika 2 tvoří základní kurz elektrotechniky pro studenty 2. a 3. ročníku. Teoreticky probírané tematické celky: Vedení proudu, vodiče; Základní zákony elektrotechniky; Střídavý proud; Obvody RLC; Třífázová soustava; Točivé a netočivé stroje; lze v rámci navazujících cvičení zopakovat na konkrétních příkladech a početních řešeních. Např. výpočty odporu vodičů, výpočty ztrátových výkonů, středních, efektivních a maximálních hodnot střídavých napětí a proudů, výpočty činného, zdánlivého a jalového výkonu, výpočet účinníku a účinnosti, štitkové údaje točivých strojů a práce s nimi, výpočty obvodů RLC, atd. Podstatné je také to, že studenti nejsou nuceni používat při výpočtech pouze jedinou cestu, ale mají právo volby. Je to velice vhodné, protože v technické praxi obvykle neexistuje jediné správné řešení a jediný správný postup. Volba postupu je vhodná i na základní škole, kdy si žák vybere postup, kterému rozumí nebo je pro něj lepší a dojde ke správnému řešení. Za připomínku stojí i skutečnost, že ačkoliv to na první pohled nemusí být zřejmé, má, v rámci multidisciplinárních vazeb, výuka elektrotechniky velmi blízko k předmětu Materiály a technologie. V případě točivých strojů potom i k předmětu Části strojů. Propojenost mezipředmětových vztahů je např. pro výuku praktických činností velkým přínosem.

### 19.3 Průmyslová elektrotechnika, Technická praktika elektro

Předmět Průmyslová elektrotechnika a na něj navazující Technická praktika elektro jsou orientovány na oblast silnoproudých zařízení, rozvod elektrické energie a rozvodné sítě, připojování energetických zdrojů a malých i velkých spotřebičů. Dnes je kladen veliký důraz na digitalizaci, ale stále je mnoho příkladů, kde je např. manuální spínač velkou předností především z pohledu spolehlivosti, jednoduchosti, atd.

## 19.4 Integrované obvody, výkonová elektrotechnika a řídicí systémy

Předměty Integrované obvody a výkonová elektrotechnika a moderní řídicí systémy představují další z možných multidisciplinárních vazeb. Spojovacími tématy jsou výkonové prvky pro silno-proudou elektrotechniku, Požadavky na řídicí elektroniku, řízené výkonové spínače, vlastnosti regulačních obvodů, ukazatele kvality regulace, stabilita regulačních obvodů a koncepce frekvenčních měničů. V dnešní době jsou integrované obvody velice využívány, proto je dobré, aby o nich studenti měli alespoň základní znalosti.

## 19.5 Bezpečnost především

Jak jsme již uvedli v [24] měřicí soustrojí je silové energetické zařízení průmyslového charakteru. V žádném případě proto nelze podceňovat rizika, vyplývající z jeho provozu. Práce v elektrotechnických laboratořích jsou podřízeny normám ČSN EN 50110-1 [57], ČSN EN 50110-2 [58] a provoznímu řádu elektrotechnických laboratoří. V úvodních hodinách je nutné žáky a studenty seznámit s bezpečností na pracovišti, bezpečnosti práce a první pomocí při úrazech. Podle provozního řádu musí být na pracovišti odborný dozor.

Při měření na motorgenerátorovém soustrojí je důležité omezit pohyb kolem celého soustrojí. Jelikož se jedná o elektrické točivé stroje jsou zde rizika úrazu elektrickým proudem a rizika mechanického úrazu, která mohou mít fatální následky. Bezpečná manipulace je však nutná i na straně malého napětí, zejména při připojování akumulátoru. Jmenovitý výstupní proud alternátoru je až 125 A, tzv. startovací schopnost akumulátoru je 800 A a zkratový proud akumulátoru s přívodními vodiči 25 mm<sup>2</sup>/2 m přesahuje 1,2 kA. To postačuje k tomu, aby došlo k roztavení připojovacích vodičů s maximálním dovoleným proudem 175 A, a následně možné explozi akumulátoru.

Celková minimalizace rizik spočívá v tom, že veškerá propojování, včetně připojování zátěží před měřením, se provádějí zásadně v klidovém (vypnutém) stavu soustrojí, pro ovládání a připojování zátěží jsou používány spínače v rozvaděči a připojovací místa osazená odpovídajícími zásuvkami podle ČSN EN 60309-1 [19], pro připojení akumulátoru jsou použity rychloupínací izolované svorky Heyner QuickClip [59].

## 19.6 Nezávislost na distribuční síti

Téma obnovitelných zdrojů je i přes jejich zjevné nedostatky, jako je kolísající výkon, prozatím problematické akumulování přebytečné energie, rentabilita provozu a v budoucnu problematická likvidace vysloužilých zařízení, stále aktuální a zejména současný trend směřuje mimo fotovoltaické a větrné farmy k mikrozdrojům zásobujícím elektrickou energií jednotlivé objekty. Koncepce energetické soběstačnosti objektu tak postupně nahrazuje původně podporovaný výkup elektrické energie do distribuční sítě a následný zpětný prodej.

Pro malé objekty na samotách stojí za úvahu, jestli je z energetického hlediska vhodné řešit jejich elektrickou instalaci jako dvousystémovou. To znamená kombinaci rozvodů malého a nízkého napětí, kdy se například pro osvětlení použijí úsporné světelné zdroje pro malé napětí 12 nebo 24 V. Stejně lze napájet další spotřebiče s malým příkonem, aby pro instalaci malého napětí postačovaly vodiče s průřezem do 4 mm<sup>2</sup>. Pro napájení klasických síťových spotřebičů je potom výhodné použít střídač, který se automaticky zapíná až po připojení zátěže a tudíž neběží zbytečně naprázdno a neodčerpává z akumulátorů energii. Je však nutné si uvědomit, že energetické mikrozdroje nejsou vždy schopné tzv. utáhnout velké spotřebiče z oblasti bílé techniky s příkony několika kilowattů, jako jsou například sporáky, automatické pračky, sušičky, atd. Také klasické kompresorové chladničky a mrazničky potřebují pro rozběh motoru krátkodobě příkon až 1,5 kW, na který musí být napájecí střídač dimenzován.



## ZÁVĚR

Obnovitelné zdroje energie zahrnují široké spektrum energetických jednotek. Přestože módním trendem a též dotacemi podporovanými systémy jsou především fotovoltaické a větrné elektrárny, disponuje Česká republika velkým energetickým potenciálem v oblasti malých vodních elektráren, které kdysi bývaly i na malých tocích. Každý vodní mlýn měl vlastní dynamo nebo alternátor pro výrobu elektrické energie a napájení osvětlení ve mlýně i v bytě mlynáře. Stejně, jako se dnes mezi vodní motory vracejí vodní kola, tak se i znovu objevené energetické mikrozdroje, určené pro napájení lokálních sítí a pracující v ostrovním režimu, stávají skutečností.

Koncepce elektrické části měřicího motorgenerátorového soustrojí se středofrekvenčním synchronním alternátorem představuje komplexní návrh didaktické pomůcky pro podporu výuky elektrotechnických předmětů na pedagogických fakultách. Není však vyloučeno její použití v laboratořích technických univerzit a středních odborných škol.

Zdánlivě jednoduchá konstrukce elektrické části s manuálním ovládáním se může zdát krokem zpět (zejména z pohledu všeobecné, někdy i překotné a zbytečné digitalizace čehokoliv), na druhé straně však zvolené řešení umožňuje kombinační možnosti, které nejsou u běžného digitálního řízení proveditelné.

Koncepce měřicího soustrojí umožňuje jeho spolupráci s dalšími zdrojovými jednotkami, např. asynchronním generátorem, připojeným přes výkonový stejnosměrný zdroj k sinusovému střídači, fotovoltaickými panely, generátory s permanentními magnety, atd. Spolupracovat tak mohou naprosto rozdílné energetické zdroje. Je možné tak například ověřit použití neregulovaného nebo jen hrubě regulovaného asynchronního generátoru s usměrňovačem s filtrací stejnosměrného napětí na výstupu, kdy stabilitu výstupního napětí a frekvence zajišťuje DC/AC měnič.

Z průběhů naměřených hodnot lze odvodit, že při využití automobilového alternátoru jako energetického zdroje není nutné dosahovat vysokých provozních otáček. V základním provozním režimu postačují pro dosažení maximálního výkonu otáčky v rozmezí 3 500-4 500 ot/min. Dalším důležitým zjištěním je skutečnost, že nejvyšší celková účinnost soustrojí a tím i alternátoru je při výstupním proudu v oblasti 80 A. Pokud se od příkonu soustrojí v daném zatěžovacím bodu odečte příkon při chodu naprázdno, dostaneme maximální účinnost alternátoru na úrovni až 62 % při výstupním proudu 85 A. Z dalších naměřených hodnot je možné odvodit, že při použití lineárního regulátoru není nutné provozovat generátor při vysokých provozních otáčkách. Otáčky v rozmezí 2 500-3 000 ot/min postačují pro dosažení výkonu 1,4 kW a i při minimálních provozních otáčkách (1 800 ot/min) poskytuje generátor výkon téměř 1 kW. Jedině v případě, když bude potřeba provozovat generátor bez připojeného akumulátoru a využívat samočinné nabuzení, musí být hnací stroj schopen roztočit nezatížený generátor na 4 500 ot/min.

Na základě naměřených výsledků je možné o automobilových alternátorech uvažovat jako o možné variantě pro nenáročné aplikace v oblasti tzv. obnovitelných zdrojů. Vzhledem k jejich relativně nízké pořizovací ceně (v porovnání s jinými typy generátorů se srovnatelným výkonem) a provozním vlastnostem lze předpokládat jejich využití především u neregulovaných vodních motorů na tocích se značně proměnným průtokem. Ve spojení s akumulátorem či sadou akumulátorů lze vytvořit ostrovní systém malého výkonu, který při trvalém chodu může sloužit také k přípravě teplé užitkové vody nebo vytápění pasivního objektu. Základním provozním předpokladem pro další rozvoj zůstává 100% nezávislost na distribuční síti a schopnost tzv. nájezdu do tmy.

Překvapivým zjištěním byla elektrická energetická bilance generátoru, kdy se ukázalo, že maximum elektrického výkonového zisku generátor dosahuje při výstupním proudu 50 A, což představuje výstupní výkon cca 700 W pro libovolné pracovní otáčky. Lineární regulátor dává celému systému mimořádnou stabilitu, zejména tím, že výrazně omezuje překmit napětí při náhlém odlehčení zatíženého generátoru.

## POUŽITÉ ZDROJE

- [1] PAC-WIND. *Windkraftanlage VAWT Seahawk für Objekte, die an an das Stromnetz angeschlossen sind nicht*. Heidelberg. WIND.COM. 2005. Informationsblatt.
- [2] ŠTASTNÝ, J. *Větrná elektrárna TCD-1*. Udělej/Urob si sám. Bratislava. ALFA. 1984. MDT 379.826:645.
- [3] IMATECH GROUP s.r.o. *Generátor ROTEK 5 kW/5 kVA, STC5-1*. Zlín. Imatech Group s.r.o. 2018. Produktový list.
- [4] ŠKODA, J. *Asynchronní generátory v praxi*. Hradec Králové. UHK. 2016. Diplomová práce.
- [5] ARCO technik. *Technické údaje elektroizolantů typu "tvrzený papír" - "tvrzená textilní tkanina"*. Praha. ARCO technik. 2012.
- [6] KEM CZ. *Asynchronní třífázové elektromotory s kotvou nakrátko řady 2L*. Lichnov. KEM. 2017. Produktový katalog.
- [7] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. Praha, ČNI. 2014.
- [8] BOSCH, GmbH. *Innovativ, robust und langlebig: Starter und Generatoren von Bosch*. Karlsruhe. Robert Bosch GmbH. 2014. Technische Änderungen und Programmänderungen vorbehalten. AA/RM F026P04100/201409.
- [9] CONTINENTAL POWER - CONTITECH. *Transmission Designer 7.2*. Hannover. ContiTech Antriebssysteme GmbH. 2012.
- [10] ISO 9982. *Belt drives. Pulleys and V-ribbed belts for industrial applications. PH, PJ, PK, PL and PM profiles. Dimensions*. Geneva. International Organization for Standardization. 1998.
- [11] TYMA CZ. *Maximální obvodové rychlosti řemenů*. Trmice. TYMA CZ. Řemeny, převody a dopravní pásy. 2017. Produktový list.
- [12] ČSN EN ISO 4762. *Šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem*. Praha, ČNI. 2004.
- [13] ČSN EN ISO 7093-1. *Ploché kruhové podložky - Velká řada - Část 1: Výrobní třída A*. Praha, ČNI. 2001.
- [14] ČSN EN ISO 4014. *Šrouby se šestihrannou hlavou - Výrobní třídy A a B*. Praha, ÚNMZ. 2011.
- [15] ČSN EN ISO 4032. *Šestihranné matice (typ 1) - Výrobní třídy A a B*. Praha, ÚNMZ. 2014.
- [16] ČSN 02 1740. *Pružné podložky s čtvercovým průřezem*. Praha, ČNI. 1971.
- [17] SEZ-CZ. *Modulární přístroje*. Žďár nad Sázavou. SEZ-CZ. 2016. Produktový katalog.
- [18] HITACHI. *WJ200 Series Inverter - Instruction Manual*. Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd. 2017. Manual No: NTZ329BX.
- [19] ČSN EN 60309-1 ed.3. *Vidlice, zásuvky a zásuvková spojení pro průmyslové použití - Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha. ČNI. 2000.
- [20] ČSN EN 60947-2 ed.3. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 2: Jističe*. Praha. ČNI. 2007.
- [21] ČSN EN 60947-3 ed.3. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 3: Spínače, odpojovače, odpínače a pojistkové kombinace*. Praha. ČNI. 2010.
- [22] LEXA, V. - BERNAT, F. *Ložiskové proudy v moderních pohonných systémech*. Praha. ABB ENERGO s.r.o. 2010. Informační list.
- [23] HAMMERBAUER, J. *Regulace alternátorů*. Plzeň. FEL ZČU. 2007.
- [24] GREGOR, O. - DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Podpora výuky předmětu Obnovitelné zdroje energie v elektrotechnických laboratořích. Část 5: Koncepce modelového mikrozdroje se středofrekvenčním synchronním alternátorem*. Media4u Magazine, 4/2018. s.16-26. ISSN 1214-9187.
- [25] LOKVENC, J. - DRTINA, R. *Využití výsledků výzkumu a vývoje ve výuce elektrotechnických předmětů na pedagogických fakultách - Část 8: Analýza funkčnosti středofrekvenčního transformátorového kompenzátoru rušivého napětí*. Media4u Magazine. 2/2018. s.30-41. ISSN 1214-9187.
- [26] MEAN WELL. *1500W True Sine Wave DC-AC Power Inverter: TS-1500 series*. New Taipei City. Mean Well Enterprises Co. Ltd. 2009. Instruction Manual. File Name: TS-1500\_SPEC 2009-8-18.
- [27] ČSN EN 61439-1 ed.2. *Rozváděče nízkého napětí - Část 1: Všeobecná ustanovení*. Praha. ČNI. 2012.

- [28] ČSN EN 61439-2 ed.2. *Rozváděče nízkého napětí - Část 2: Výkonové rozváděče*. Praha. ČNI. 2012.
- [29] SCHRACK TECHNIK. *Skříně pro rozváděče, rozvodnice, IT rozvaděče - pro průmyslové aplikace*. Praha. Schrack Technik - Česká republika. 2015. Produktový katalog. K-GEHI-CZ5.
- [30] ČSN EN 60051-1. *Elektrické měřicí přístroje přímopůsobící ukazovací analogové a jejich příslušenství - Část 1: Definice a všeobecné požadavky společné pro všechny části*. Praha. ČNI. 2000.
- [31] GHV Trading. *Měřicí rozváděčové přístroje*. Brno. GHV Trading. 2012. Výrobní katalog Weigel.
- [32] ČSN 33 0165 ed.2. *Značení vodičů barvami nebo číslicemi - Prováděcí ustanovení*. Praha. ČNI. 2014.
- [33] ČSN EN 12164. *Měď a slitiny mědi - Tyče pro třískové obrábění*. Praha. ČNI. 2017.
- [34] ČSN EN 50109. *Ruční lisovací nástroje - Nástroje pro lisovaná zakončení elektrických kabelů a vodičů pro nízkofrekvenční a vysokofrekvenční aplikace*. Praha. ÚNMZ. 1997.
- [35] DRTINA, R. - LOKVENC, J. - ŠKODA, J. *Podpora výuky předmětu Obnovitelné zdroje energie v elektrotechnických laboratořích - Část 1: Koncepce modelového mikrozdroje v ostrovním režimu*. Media4u Magazine, 3/2015. s.51-59. ISSN 1214-9187.
- [36] GREGOR, O. - DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Energy Micro-Source with Mid-Frequency Synchronous Alternator*. Bern. EECS. 2018.
- [37] ČSN 35 0010. *Točivé elektrické stroje. Zkoušky*. Praha. ÚNMZ. 1992.
- [38] SYROVÁTKO, M. *Zapojení s polovodičovými součástkami*. Praha. SNTL. 1973. 04-529-73.
- [39] NEČASEK, S. *100 praktických námětů z elektrotechniky a radiotechniky*. Praha. Práce. 1967. 24-005-67.
- [40] INTERNATIONAL RECTIFIER. *MOS-gate Driver Databook*. Kansas. International Rectifier. 1995. MJW09\95-E5016I.
- [41] ČSN 34 7409. *Systém značení kabelů a vodičů*. Praha. ČNI. 1999.
- [42] ČSN 34 7401. *Silové vodiče*. Praha. ÚNMZ. 1976.
- [43] LOKVENC, J. - DRTINA, R. *Atypický návrh výkonového stejnosměrného zdroje se středofrekvenčním transformátorovým filtrem rušivého napětí*. Praha. FCC Public. Elektro 2/2017. s.6-9. ISSN 1210-0889.
- [44] LOKVENC, J. - DRTINA, R. - ŠEDIVÝ, J. *The modern current sensors of synthetic magnetic resin*. In Advances in civil engineering. Zurich. Trans tech publications. 2013. s.2387-2391. ISBN 978-3-03785-565-2.
- [45] LOKVENC J. - DRTINA R. - ŠEDIVÝ J. *The modern current sensors of synthetic magnetic resin. Part 2 - AC current sensor up to 2 000 amps*. Advanced materials research. 1082/2015. s. 581-587. ISSN 1022-6680.
- [46] LOKVENC, J. - DRTINA, R. - ŠEDIVÝ, J. - JIŘÍČEK, R. - ČIŽINSKÝ, L. *The modern current sensors of synthetic magnetic resin. Part 3 - Transmission characteristics and design of the sensor amplifie*. Advanced materials research. 1082/2015. s.562-569. ISSN 1022-6680.
- [47] LOKVENC, J. - DRTINA, R. *Power supply voltage with the transformer ripple filter*. In The 11th WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. Penang. Malaysia. 2011. s.60-64. ISBN 978-1-61804-041-1.
- [48] GREGOR, O. - DRTINA, R. - LOKVENC, J. *Podpora výuky předmětu obnovitelné zdroje energie v elektrotechnických laboratořích - Část 6: Koncepce elektrické části modelového mikrozdroje se středofrekvenčním synchronním alternátorem*. Media4u Magazine, 1/2019. s.44-57. ISSN 1214-9187.
- [49] LOKVENC, J. *Automatizace a kybernetika pro studenty pedagogické fakulty*. Hradec Králové. Pedagogická fakulta. Katedra fyziky a základů techniky. 1983. Rukopis přednášek.
- [50] PRCHAL, J. *Signály a soustavy*. Praha - Bratislava. SNTL/ALFA. 1987.
- [51] GREGOR, O. - LOKVENC, J. - DRTINA, R. *Podpora výuky předmětu obnovitelné zdroje energie v elektrotechnických laboratořích - Část 8: Měřicí soustrojí v laboratorní praxi 4 - Výkonové charakteristiky střídače Mean Well MW TS-1500-2 12B*. Media4u Magazine, 3/2019. s.44-57. ISSN 1214-9187.

- [52] KROLIK, M. *Trójfazowe silniki indukcyjne z wirnikiem klatkowym o wysokiej sprawności wielkości mechanicznej 90÷180 klasy IE2*. Bielsko-Biała. Fabryka maszyn elektrycznych Indukta s.a. 2012. KK-32-01, ed.8.
- [53] ČSN EN 61439-1. *Rozváděče nízkého napětí - Část 1: Všeobecná ustanovení*. Praha, ČNI. 2012.
- [54] ČSN EN 61439-2. *Rozváděče nízkého napětí - Část 2: Výkonové rozváděče*. Praha, ČNI. 2012.
- [55] ČSN 33 0165. *Značení vodičů barvami nebo číslicemi - Prováděcí ustanovení*. Praha, ČNI. 2014.
- [56] MĚŘIČKA, J. - ZOUBEK, Z. *Obecná teorie elektrického stroje*. Praha. SNTL.1973.
- [57] ČSN EN 50110-2 ed.2. *Obsluha a práce na elektrických zařízeních - Část 2: Národní dodatky*. Praha. ČNI. 2011.
- [58] ČSN IEC/TS 60479-1. *Účinky proudu na člověka a domácí zvířectvo - Část 1: Obecná hlediska*. Praha. ČNI. 2013.
- [59] HEYNER GERMANY. *Premium Batterie Polklemmen QuickClip*. Storkow. Anni Heyner. 2018.