

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Analýza využití výkonových polovodičových měničů v  
praxi**

**vedoucí práce: Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
autor: Jan Švec**

**2012**

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na analýzu polovodičových výkonových měničů, jejich vývoj, užití v praxi a důvody pro jejich používání.

## **Klíčová slova**

Polovodiče, měniče, regulované pohony, vývoj, ceny, tranzistor, tyristor, dioda, analýza, GTO, IGCT, IGBT.

## **Abstract**

The present thesis focuses on the analysis of semiconductor power converters, their development, practical application and the reasons for their use.

## **Key words**

Semiconductors, inverters, controlled drives, development, pricing, transistor, thyristor, diode, analysis, GTO, IGCT, IGBT.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/ diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 22.8.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## **Obsah**

|   |    |
|---|----|
| Obsah.....  | 6  |
| 1. Úvod .....   | 7  |
| 2. Přehled výkonových polovodičových součástek.....             | 8  |
| 2.1 Rozdělení.....  | 8  |
| 2.1.1 Řízené polovodičové součástky – neřízené vypnutí.....     | 8  |
| 2.1.2 Řízené polovodičové součástky – řízené vypnutí.....       | 8  |
| 2.2 Jednotlivé součástky .....                                  | 8  |
| 2.2.1 Polovodičová dioda .....                                  | 9  |
| 2.2.2 Bipolární tranzistory .....                               | 10 |
| 2.2.3 Tyristor .....  | 11 |
| 2.3.3 IGBT tranzistor.....                                      | 13 |
| 2.3.4 Tranzistor typu MOSFET .....                              | 14 |
| 2.3.5 Diak .....  | 14 |
| 2.3.5 Triak .....   | 15 |
| 2.3.6 Optotyristor.....   | 16 |
| 3. Historie a vývoj využití výkonových polovodičů v praxi ..... | 17 |
| 4. Použití výkonových polovodičových součástek.....             | 19 |
| 5. Výkonové polovodičové měniče .....                           | 20 |
| 5.1 Stejnoseměrné měniče.....                                   | 21 |
| 5.2 Střídavé měniče .....                                       | 21 |
| 5.2.2 Pulzní usměřňovače.....                                   | 21 |
| 5.2.3 Frekvenční měniče.....                                    | 22 |
| 5.3 Podíl jednotlivých výkonových měničů v praxi .....          | 22 |
| 6. Regulované pohony .....                                      | 25 |
| 7. Cenové relace .....  | 29 |
| Závěr.....  | 31 |

## **1. Úvod**

Výkonové polovodičové součástky jsou dnes používány ve velkém množství všech různých přípravků, aplikací, strojů a přístrojů. Jejich fungování a využívání je v podstatě nezbytné.

Tato práce se zabývá jejich analýzou. Bude v ní zevrubně popsána historie vývoje a principy funkcí těchto součástek. Následovat bude analýza jejich využití jak ve spotřebitelské sféře, tak v průmyslové oblasti, především v regulovaných pohonech.

Pro představu budou také uvedeny konkrétní příklady použití v praxi. Záměrem práce je také zjistit přibližné cenové relace, ve kterých se dané součástky pohybují a výrobce, kteří se na tuto výrobu specializují a jsou tak zárukou kvality nabízených výrobků. Dále budou uvedeny důvody pro jejich využívání a neustálé rozšiřování jejich působnosti.

## **2. Přehled výkonových polovodičových součástek**

### **2.1 Rozdělení**

Neřízené polovodičové součástky

V součástce se nevyskytují žádné řídicí členy. Základem těchto součástek jsou dvě elektrody a funkce je dána polaritou nebo velikostí napětí, které je přiloženo. Tyto součástky plní funkce ochranné nebo usměrňovací.

#### **2.1.1 Řízené polovodičové součástky – neřízené vypnutí**

Oproti neřízeným obsahují tyto polovodiče elektrody 3 – 2 proudové a 1 řídicí. Řídicí elektroda je využita pouze na počátku sepnutí, poté musí být hlavní proud přerušen zvenčí. Funkci plní jako fázový spínač ve střídavých obvodech.

#### **2.1.2 Řízené polovodičové součástky – řízené vypnutí**

Součástí těchto polovodičů jsou 2 elektrody a minimálně 1 řídicí. K vypnutí i zapnutí hlavního proudu slouží právě řídicí elektroda.

### **2.2 Jednotlivé součástky**

Všechny výkonové polovodiče mají v podstatě stejný základ a pracují na stejném principu, kterým je pohyb valenčních elektronů a vytváření přechodů P-N díky příměsím a pohybům donorů a akceptorů.

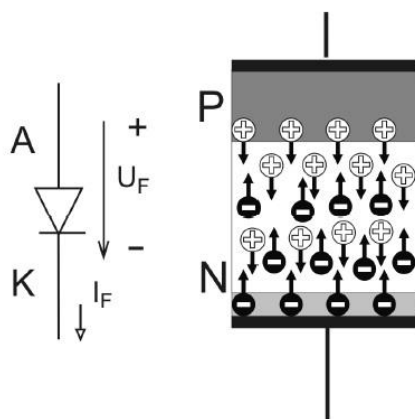
Tato práce se zabývá hlavně využitím výkonových polovodičových součástek. Před dalším rozбором je však potřeba alespoň zevrubně popsat tyto používané součástky.



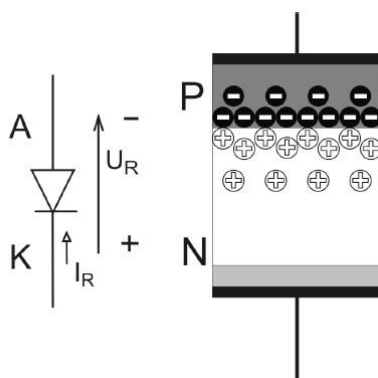
## 2.2.1 Polovodičová dioda

### 2.2.1.1 Funkce

Funkce diody je založena na dvou elektrodách. Je zde využito vlastností přechodu mezi polovodiči typu P a N. Diodu je možné polarizovat ve dvou směrech – v propustném a závěrném. Propustného směru dosáhneme přiložením kladného napětí na anodu a záporného napětí na katodu. Následně dojde k pohybu nosičů náboje. Závěrného směru naopak dosáhneme přiložením kladného napětí na katodu a záporného napětí na anodu.



Obr. 1 Dioda v propustném směru<sup>1</sup>



Obr. 2 Dioda závěrný směr<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Převzato z [1] a upraveno

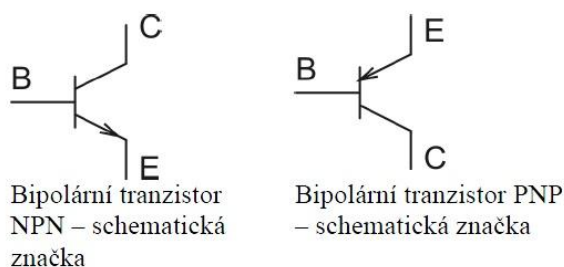
<sup>2</sup> Převzato z [1] a upraveno

### 2.2.1.2 Rozdělení diod

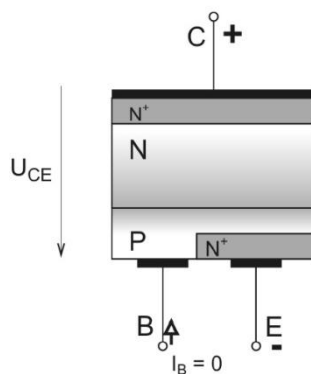
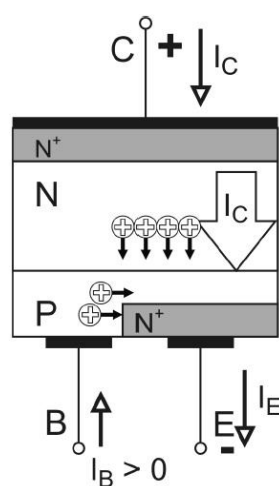
- síťové diody – použití v usměrňovačích pro síťové napětí
- lavinové diody – použití v usměrňovačích
- svářecí diody – použití do svařovacích automatů pro sváření plechu odporovou metodou
- rychlé diody – použití v tyristorových měničích a rychlých usměrňovačích
- Shottkyho výkonové diody – pouze pro nízká napětí a malé propustné proudy
- rychlé diody s měkkou zotavovací charakteristikou – použití v tyristorových měničích hlavně s tyristory typu GTO a IGTC

### 2.2.2 Bipolární tranzistory

Bipolární tranzistory jsou na rozdíl od polovodičové diody tvořeny 3 elektrodami. Elektrody nazýváme kolektor C, emitor E a báze B. Proud, který přichází do kolektoru a vychází z emitoru, je možné řídit proudem báze, což je popis funkce pro tranzistory s NPN přechodem. Existuje také verze, kde figurují opačné typy nosičů náboje a které jsou napájeny proudem s opačným směrem proudu a jsou označovány jako tranzistory typu PNP.



Obr. 3

Obr. 4 Schéma bipolárního tranzistoru NPN v blokovacím stavu<sup>3</sup>Obr. 5 Schéma bipolárního tranzistoru v sepnutém stavu<sup>4</sup>

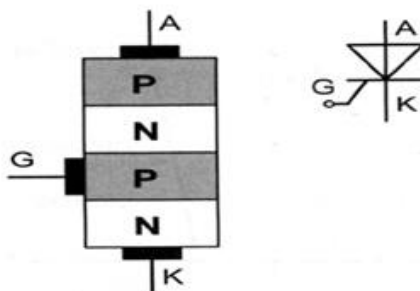
### 2.2.3 Tyristor

Tyristor je používán jako základní součástka řízených usměrňovačů. Jeho princip je založen na 3 elektrodách, 4 vrstvách a 3 přechodech PN, NP a PN. Elektrody zde označujeme jako anodu A, katodu K a řídicí elektroda je označována jako G. V případě nulového napětí na řídicí elektrodě G, můžeme připojit na anodu a katodu jakékoliv napětí ve smyslu polarity, avšak průtok proudu je přerušen přechody PN nebo NP. Do propustného stavu je tyristor uveden přivedením napětí na řídicí elektrodu G. Napětí není nutné přivádět po celou dobu, kdy chceme, aby byl tyristor propustný. Stačí přivést pouze krátký impuls pro zapnutí.

<sup>3</sup> Převzato z [1] a upraveno

<sup>4</sup> Převzato z [1] a upraveno

Tyristor poté setrvává v propustném stavu již bez napětí na řídicí elektrodě. Kromě tyristorů s řízeným vypnutím, jako jsou tyristory GTO, IGCT, MCT, je možné tyristory vypnout pouze přerušením proudu do anody.

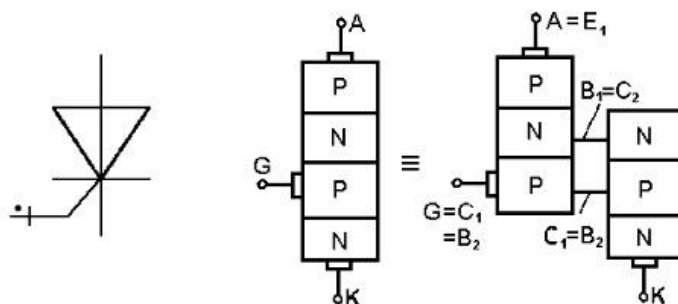


Obr. 6 Struktura a schematická značka tyristoru<sup>5</sup>

### 2.3.2.1 Vypínatelné tyristory

#### 2.3.2.1.1 Tyristor GTO

Jedná se o tyristor se stejným počtem elektrod, počtem vrstev a počtem PN přechodů jako obyčejný tyristor. Tento tyristor má však specifickou strukturu. Je složen ze dvou tranzistorů. Jeden je typu PNP a druhý typu NPN. V sepnutém stavu je do řídicí elektrody přiváděn trvalý kladný řídicí proud. K vypnutí tyristoru je použito záporné napětí, které je přivedeno na řídicí elektrodu.

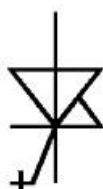


Obr. 7 Schematická značka a analogie dvou tranzistorů<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Převzato z [1] a upraveno

### 2.3.2.1.2 Tyristor IGCT

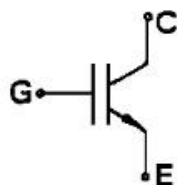
Tento tyristor je v podstatě velmi rychle vypínaným tyristorem GTO. Základní rozdíl oproti GTO tyristoru tkví v tom, že na řídicí elektrodu není přivedeno záporné napětí, ale strmost nárůstu řídicího proudu musí být velmi vysoká, tudíž celý anodový proud je skokově přiveden na řídicí elektrodu G. Výhodami tohoto tyristoru jsou hlavně rychlost jeho vypínání, jednoduchá a robustní konstrukce a spolehlivost.



Obr. 8 Schematická značka tyristoru IGTC<sup>7</sup>

### 2.3.3 IGBT tranzistor

Tento tranzistor v sobě spojuje vlastnosti bipolárního tranzistoru a tranzistoru typu MOSFET. Toto spojení vytváří tranzistorovou strukturu PNP a strukturu řízenou polem (MOSFET), která přivádí proud a spíná tak strukturu PNP. Jsou zde spojeny dvě požadované vlastnosti těchto struktur – bipolární tranzistor se strukturou PNP má velmi dobré propustné vlastnosti a tranzistor MOSFET má velmi nízké nároky na řídicí zdroj. Ke spínání tranzistoru IGBT tedy nedochází tyristorovým sepnutím, jelikož tranzistor by již nemohl vypnout, ale přivedením pomocného napětí na řídicí elektrodu G z řídicího obvodu, který právě díky nízkým nárokům tranzistoru MOSFET vyžaduje minimální výkon.



Obr. 9 Schematická značka IGBT tranzistoru<sup>8</sup>

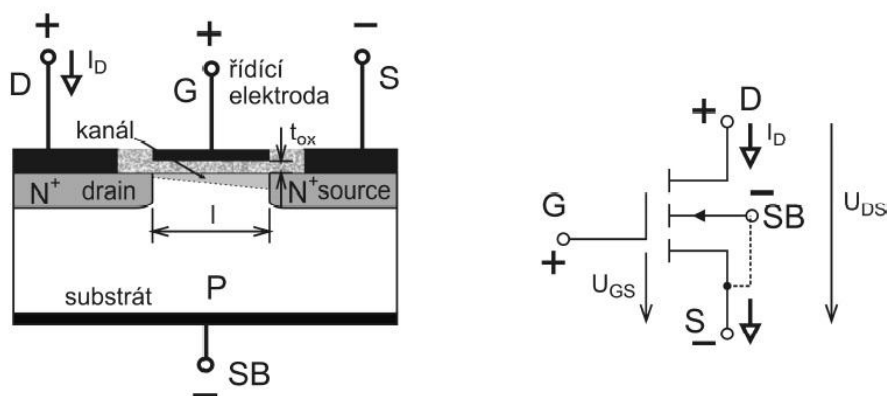
---

<sup>6</sup> Převzato z [1] a upraveno

<sup>7</sup> Převzato z [1] a upraveno

### 2.3.4 Tranzistor typu MOSFET

Jedná se o součástku se dvěma elektrodami a jednou řídicí. Řídící elektroda je u této součástky izolována. Jedná se o strukturu NPN. Existují dva typy – s vodivým a s indukovaným kanálem. Pro výkonovou elektroniku má význam tranzistor s indukovaným kanálem, kvůli možnosti odpojení řídicího napětí a tím pádem vypnutí součástky. Sepnutí tranzistoru je zajištěno přivedením napětí na řídicí elektrodu a vytvořením tak vodivého kanálu. Tento tranzistor se používá v přípravcích s malým napětím.



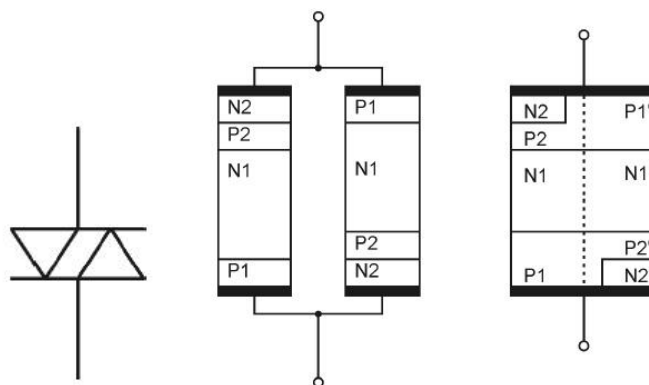
Obr. 10 Struktura a schematická značka tranzistoru MOSFET<sup>9</sup>

### 2.3.5 Diak

Diak se skládá z dvou elektrod a v podstatě pěti vrstev, které zajišťují čtyři PN přechody. Nemá řídicí elektrodu a dokáže pracovat v obousměrném režimu. K jeho sepnutí je potřeba dostatečně velkého spínacího napětí. V sepnutém stavu má charakteristiku podobnou diodě. Tato součástka se používá hlavně do ochranných obvodů a do řídicích obvodů triaku.

<sup>8</sup> Převzato z [1] a upraveno

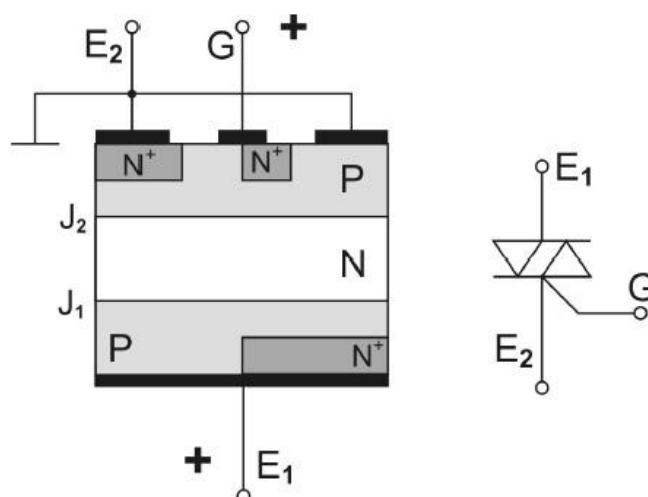
<sup>9</sup> Převzato z [1] a upraveno



Obr. 11 Schematická značka a struktura diaku<sup>10</sup>

### 2.3.5 Triak

U triaku se jedná o strukturu s pěti vrstvami, dvěma elektrodami A a jednou řídicí elektrodou G. Pracuje také v obousměrném režimu. V podstatě jde o diak s řídicí elektrodou. Sepnutí je zajištěno přivedením proudu na řídicí elektrodu a nezáleží přitom na polaritě dvou zbylých elektrod. Triak vypne stejně jako tyristor při poklesu anodového proudu.



Obr. 12 Struktura a schematická značka triaku<sup>11</sup>

<sup>10</sup> Převzato z [1] a upraveno

<sup>11</sup> Převzato z [1] a upraveno

### **2.3.6 Optotyristor**

Je zde třeba také zmínit součástku používanou pro vysokonapěťové aplikace, jejímž základem je tyristor, který je možné sepnout pulsem infračerveného záření. Do tyristoru je toto záření zavedeno díky optickému vláknu.



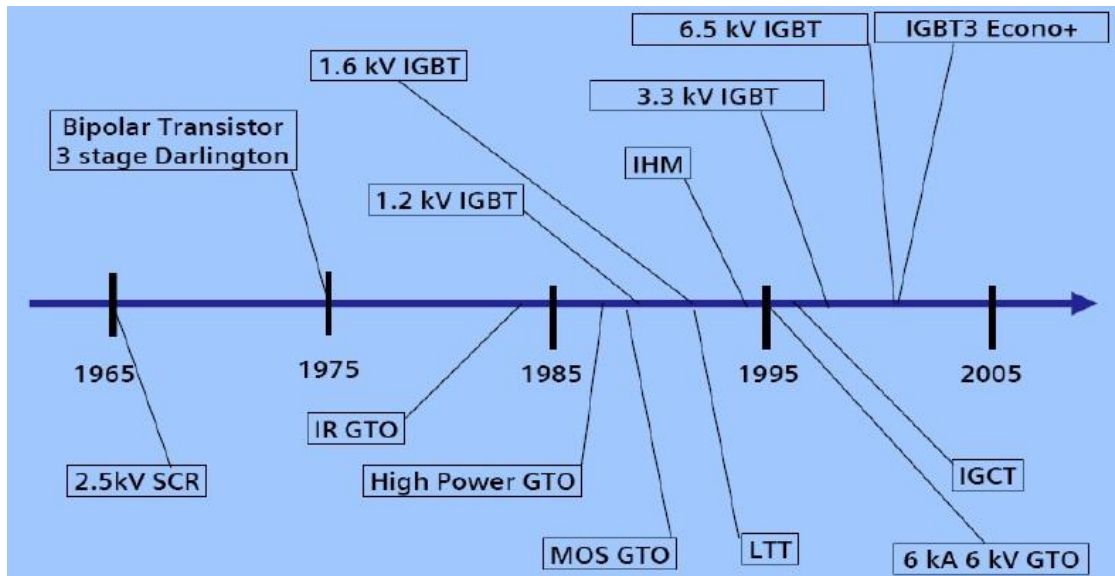
### **3. Historie a vývoj využití výkonových polovodičů v praxi**

Pro vývoj výkonových polovodičů byl velmi důležitým krokem vznik výkonového tyristoru. V současné době jsou tyto tyristory k dispozici pro proudy v hodnotách řádově kA a napětí řádově v hodnotách kV. Nyní jsou využívány hlavně v usměrňovačích a střídavých měničích. Jako další hojně využívanou součástí pro usměrňovací techniku je již od poloviny minulého století polovodičová dioda. Díky vývoji a novým technologickým a výrobním postupům dosahují dnešní polovodičové diody obdobných výkonů jako tyristory.

Vlastnosti řízeného tyristoru však nebyly dostačující a díky jeho nemožnosti vypnutí, byli výrobci nuceni k vývoji dalších součástek s ještě lepšími parametry a možností většího rozsahu použití. S narůstající výkonovou a proudovou náročností na tyto součástky zejména v usměrňovačích a pulzních měničích se začaly využívat výkonové bipolární tranzistory, které jsou schopny ve spínacím režimu pracovat s hodnotami proudu řádově stovek ampérů a s hodnotami napětí do 1 kV. S těmito tranzistory přišla možnost jejich řízeného vypnutí a zvýšení pracovní frekvence až do 20 kHz. Problémem však je složitost řešení řídicích obvodů, které je nutné kvůli malému proudovému zesílení těchto tranzistorů. Jako odpověď na tento nedostatek byly vyvinuty výkonové tranzistory řízené polem tzv. FET (Field Effect Transistor).

Oba tyto typy tranzistorů jsou však využívány pouze pro aplikace výkonových měničů menších výkonů, kvůli možnosti mnohem nižšího výkonového namáhání oproti tyristoru.

Bylo však nutné najít takové součástky, které budou mít vlastnosti a parametry klasického tyristoru a bude možné je vypínat. Řešením se staly vypínatelné tyristory. Prvním z jejich zástupců je tyristor GTO. Tento tyristor je možné vypnout impulsem do řídicí elektrody a značně se tím zjednodušila konstrukce střídačů a pulzních měničů. I u tohoto tyristoru se však projeví určité nevýhody a jako odpověď došlo k vyvinutí vypínatelného tyristoru IGCT. Základní princip GTO tyristoru je v IGCT zachován, je zde však změna v řídicích obvodech. V IGCT se jedná o tyristor s integrovanou řídicí elektrodou. Jedná se tedy v podstatě o GTO s integrovanými obvody řídicí elektrody.

Graf 1 Vývoj výkonových polovodičových součástek<sup>12</sup>

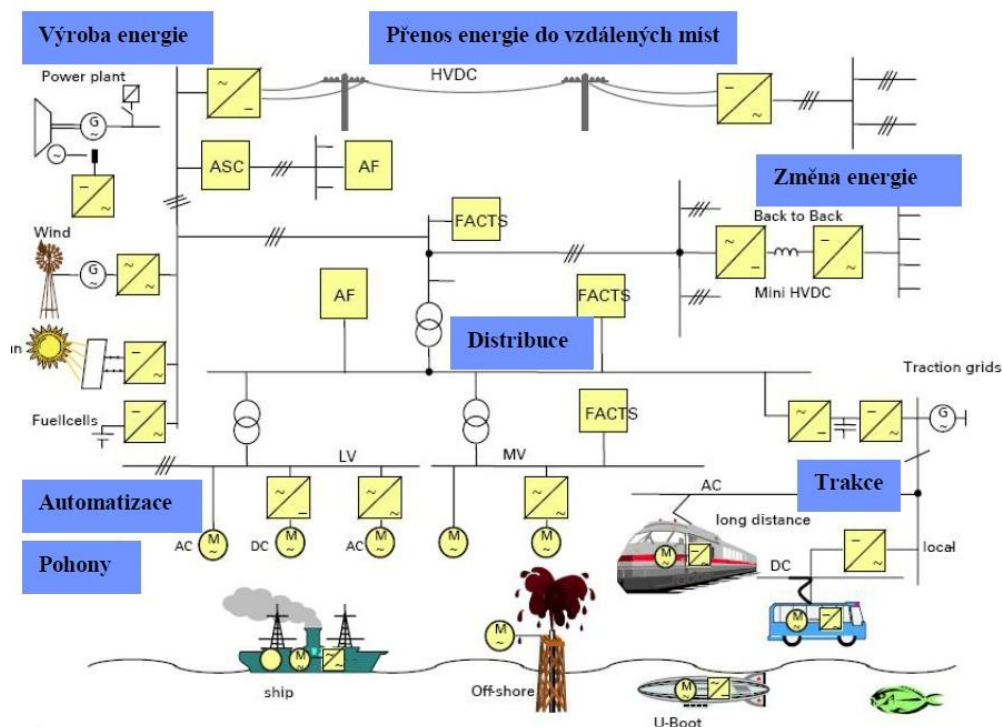
Asi jednou z nejvyžívanějších součástek ve výkonových měničích poslední doby je tranzistor IGBT. Jde o bipolární tranzistor s izolovanou řídicí elektrodou. IGBT se výrazně prosazuje v odvětví střídačů pro nízká napětí, ale díky neustále rostoucím parametrům se poměrně rychle rozšiřuje i do měničů s napětím nad 1 kV. S objevováním nových technologií a prvků vhodných pro konstrukci těchto tranzistorů se zvyšuje také jeho proudová a napěťová hladina.

Díky neustále se vyvíjejícím technologiím pro výrobu a objevování nových vhodných materiálů k výrobě výkonových polovodičových součástek, je možné zkracovat zapínací a vypínací časy a také je možné využívat je v systémech pracujících se spínacími frekvencemi v řádech až stovek kHz.

<sup>12</sup> Převzato z [3]

## 4. Použití výkonových polovodičových součástek

Výkonové polovodiče jsou celosvětově využívány v mnoha důležitých aplikacích a jejich vývoj nabral v poslední době rychlý spád. Vše je možné díky velmi vysoké profesionalitě a odbornosti vývojových pracovišť. Využití tyto součástky nacházejí v širokém spektru oblastí, ať už je to sdělovací technika, kde jsou použity jako součást zesilovačů, usměrňovačů, filtrů nebo obvodů pro přenos a zpracování signálů, nebo technika měřící, kde je nejen díky nim umožněno měření stejnosměrných a střídavých veličin při nízkých i vysokých frekvencích. Dále lze uplatnění odhalit například ve zdrojích, generátorech signálu nebo komutačních prvcích. Jejich hlavním působištěm je však automatizace, díky využití převodníků, usměrňovačů, dále regulační a řídicí technika, výroba a distribuce energie, trakční systémy a pohony.



Obr. 13 Využití aplikací tvořených polovodičovými součástkami<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Převzato z [3]

Na obrázku č. 13 je ilustračně znázorněno možné použití výkonových polovodičových součástek. To, že výroba energie je pro naše životy v této době absolutně nezbytná, je bezpochyby. Měniče jsou v této oblasti nutné k upravení vyrobené veličiny na takový tvar, který umožňuje využití v dalších aplikacích a také jejich přenos. Na obrázku je pro přenos energie uvedena technologie HVDC. Jedná se o technologii přenosu stejnosměrným proudem velmi vysokého napětí. Oproti přenosu střídavým napětím, umožňuje přenášet elektřinu s mnohem menšími ztrátami. V elektrárnách je vyráběn střídavý proud a je většinou přenášen vedením v podobě střídavého proudu. Pokud proud měničem změním na stejnosměrný, dojde k menším ztrátám. Tato technologie je využívána hlavně při přenosu energie na velmi dlouhé vzdálenosti. Do zásuvek nám pak opět proudí střídavý proud, což je opět zásluhou výkonových měničů.

Velmi důležitou oblastí využití polovodičových měničů je automatizace. Každý průmyslový podnik, továrna nebo výrobná, se snaží minimalizovat své náklady a zvyšovat efektivitu výroby a práce. Toto je umožněno celými systémy sledování daných výrobních procesů, jejich vyhodnocováním a následným řízením ke zvýšení efektivity, což je přímo spojeno se snižováním spotřebované energie a také snižováním chybovosti řízení a kontroly, způsobeným lidským faktorem. Automatizací je v podstatě zajištěna optimální regulace pohonů. Díky čidlům dochází ke sledování daného pohonu, vše následně vyhodnocuje určený software a upravuje potřebná nastavení výkonů. Regulace pohonů se v dnešní době již bez výkonových polovodičových součástek neobejde.

Další využití, které je patrné z obrázku č. 13, je v oblasti trakčních pohonů. Opět se jedná o změnu energie na její požadovanou formu. Ať už se jedná o zvyšování nebo snižování potřebného napětí nebo proudu, dokážou měniče zajistit vše potřebné, změnit střídavý proud na stejnosměrný nebo naopak, tak jak je to vhodné z hlediska účinnosti a potřeby.

## **5. Výkonové polovodičové měniče**

Jak bylo zmíněno již výše, nejširší spektrum uplatnění polovodičových součástek lze nalézt ve výkonových polovodičových měničích. Jejich důležitost v použití a aplikacích užívaných v oblasti elektroniky a elektrické energie vzrostla natolik, že dnes již v podstatě není možné se bez nich obejít v běžném životě. Výkonový polovodičový měnič můžeme obecně popsat jako zařízení, určené ke změně elektrické energie, ať už je to přeměna stejnosměrné složky na jinou velikost stejnosměrné složky, přeměna stejnosměrné na střídavou, přeměna střídavé na stejnosměrnou nebo přeměna střídavé složky na jinou velikost střídavé.

### **5.1 Stejnosměrné měniče**

Stejnosměrné měniče jsou využívány buď pro snižování, nebo zvyšování napětí.

### **5.2 Střídavé měniče**

Do této kategorie řadíme usměrňovač a střídač. Funkce usměrňovače je měnit střídavé napětí a proud na stejnosměrné. Střídač má za úkol změnit stejnosměrné napětí a proud na střídavé. Tvar výstupní veličiny je pak závislý na zátěži.

#### **5.2.2 Pulzní usměrňovače**

Tento usměrňovač zajišťuje převod střídavého napětí ze sítě, na stejnosměrné napětí dodávané do zátěže. Díky jeho vlastnostem je velmi používanou verzí měniče jelikož je zde možný jak střídačový tak usměrňovačový chod a tím pádem také možnost rekuperace.

### 5.2.3 Frekvenční měniče

Tyto měniče jsou schopny měnit napětí z napájecí sítě o konstantní frekvenci a amplitudě na napětí proměnné frekvence a amplitudy. V praxi je s nimi potom možné plynule regulovat otáčky například třífázových asynchronních a synchronních elektromotorů.

## 5.3 Podíl jednotlivých výkonových měničů v praxi

Za posledních deset let zaznamenaly polovodičové výkonové měniče velký rozmach. Začaly být nasazovány ve spoustě aplikací, které vyžadují přesně řízení a výbornou energetickou účinnost. Lze říci, že tyto součástky postupně nahrazují staré neefektivní způsoby různých úloh, ale také vznikají nové úlohy vhodné pro tyto měniče. Podíl výkonových měničů v praxi tedy stoupá a zřejmě nadále stoupat bude i díky jejich klesající ceně, způsobené velkosériovou výrobou.

Při svém pátrání po tom, které měniče by se v průmyslu daly označit jako nejvyužívanější, jsem narazil na jeden, který se objevuje asi nejvíce. Jedná se frekvenční měnič. Tento měnič je výhodný nejen možností regulace otáček pohonů, ale také pro rozběhy motorů, kde bývá použit jako softstartér.

Frekvenční měniče jsou také používány k napájení asynchronních motorů. Při porovnání pohonu asynchronních motorů pomocí frekvenčního měniče a pomocí měniče střídavého napětí, je nutné se podívat na momentovou charakteristiku těchto dvou způsobů. Velikost maximálního momentu je přímo úměrná kvadrantu napájecího napětí. Při řízení asynchronního motoru měničem napětí je vidět, že uvedená vlastnost výrazně omezuje možnosti řízení otáček tímto způsobem. Je proto využíván hlavně k rozběhu asynchronních motorů. Pokud je však motor řízen měničem frekvence, momentová charakteristika má jiný tvar. Měnič frekvence je nazýván softstartérem, díky jeho vlastnosti hladkého rozběhu spouštěného motoru. Nedochozí k několikanásobnému nárůstu jmenovitého proudu při spouštění a jeho nárůst je lineární právě na hodnotu jmenovitého proudu. Řízení otáček

pomocí frekvenčního měniče je velmi výhodné z hlediska ekonomického, ale pouze u zařízení, která trvale neběží v blízkosti plného výkonu.

Měniče frekvence mají opravdu široké spektrum využití. Můžeme je najít v pračkách, pohonech garážových vrat a závor, v tepelných čerpadlech, dopravnících, jeřábech, drtičích, dmychadlech, kompresorech, odstředivkách, pecích, papírenských strojích a válcovnách, na čerpadlech a ventilátorech v domácnostech i v průmyslu a v mnoha dalších úlohách. Tyto měniče také umožňují tzv. vzdálenou diagnostiku, kdy je možné ovládat je například přes internet nebo dokonce mobilní telefon. Asi hlavním důvodem jejich instalace je jejich energetická účinnost, která se pohybuje kolem 98%. Výrobci k těmto měničům také vyvíjejí specializované programové vybavení, leckdy i na přání zákazníka, se kterým je možné je jednoduše přizpůsobit požadovaným úlohám.

Výkonový rozsah vyráběných měničů frekvence se pohybuje od řádově stovek wattů až po desítku megawattů. Pro napájení se obvykle používají standardní sítě 3 x 400 V, 3 x 500 V, 3 x 690 V s výkony do 5,6 MW a výkony do 100 MW jsou také realizovány vysokonapěťovými měniči.

Je však nutné zmínit také měniče napětí. Tyto měniče jsou využívány dnes a denně a setkává se s nimi každý, aniž by musel působit v elektrotechnickém průmyslu. Nejčastěji jsou použity měniče, které mění napětí stejnosměrné na střídavé. Jako příklad můžeme uvést použití pro napájení síťových spotřebičů, jako jsou vrtačky, rychlovarné konvice, počítače, oběhová čerpadla a jiné. Rozsah použití měničů napětí je v současné době velmi široký, nicméně možnosti použití měničů se neustále rozšiřují s příchodem nových zařízení, se kterými můžete použít měnič napětí. Jedná se například o situaci, kdy chceme použít měnič napětí s notebookem v autě. Toto použití je dnes zcela běžné, nicméně před deseti lety by bylo takové použití měniče patrně považováno za kuriozitu.

Množství využívaných měničů malých výkonů bylo za posledních deset let s jistotou navyšováno. K těmto změnám začalo také přispívat dnes všude skloňované šetření energií. Měniče se totiž dostaly do oblasti přeměny energie pomocí fotovoltaických článků. Solární elektrárny totiž zaznamenaly v posledních letech opravdový boom, k čemuž velkou měrou přispěla politika Evropské Unie, díky své podpoře tohoto odvětví pomocí nemalých dotací.

Dalším důvodem pro jejich rozšiřování je a byla možnost mobility například u malých ručních strojů, které jsou napájeny určitým typem baterií a k jejich nabíjení jsou využívány právě měniče.

Nyní zde bude vyjmenováno několik základních měničů používaných a potřebných pro každodenní užívání:

- střídač – pro změnu napětí například z 12 V nebo 24 V na 230 V jako zdroj síťového napětí pro napájení síťových spotřebičů z baterií
- jako zdroj napětí všude tam, kde je potřeba zajistit napájení spotřebičů při neočekávaném výpadku sítě, například jako záložní zdroje pro počítače a servery
- v domácích fotovoltaických elektrárnách
- jako měniče napětí využívané na cestách, kde například v USA je síťové napětí jiné než v Evropě

Podíl výkonových měničů používaných v praxi je dle mého názoru velmi vysoký. Setkáváme se s nimi všude kolem nás. Myslím si, že všechny druhy měničů jsou ve využívání zastoupeny procentuelně přibližně stejně. Existuje totiž nesčetně mnoho aplikací, které vyžadují různé úrovně a způsoby napájení.



## **6. Regulované pohony**

Rozvoj elektrických pohonů a výkonové elektroniky jde již od přelomu tohoto tisíciletí rychlým tempem kupředu. Děje se tak díky neustálému zdokonalování technologií a zlepšování parametrů výkonových polovodičových součástek. Tento vývoj vede k vzniku nových zapojení měničů, ke zvýšení jejich spolehlivosti účinnosti, zmenšování rozměrů a hlavně také k úspoře energií.

Začátkem posledního desetiletí, jsme se mohli setkávat s používáním výkonových polovodičů v regulovaných pohonech hlavně pro stejnosměrné a komutátorové stroje a asynchronní motory. V této době byl zaznamenán pokles cen výkonových elektronických měničů a zdálo se tak, že spolehlivý a jednoduchý asynchronní motor s frekvenčním měničem z části vytlačí z některých úloh a aplikací složitější komutátorové stroje. Ceny se však za nedlouho stabilizovaly a stále bylo mnoho případů, kdy komutátorové stroje bez zpětnovazební regulace s měničem na základě klasických tyristorů, nebo s pulzním měničem byly výhodnější než asynchronní motory s frekvenčními měniči. Avšak hromadné přivedení asynchronních motorů řízených frekvenčními měniči způsobilo celkem velký ústup stejnosměrných regulovaných pohonů v průmyslových aplikacích a z části také v trakčních aplikacích. Stále však existovaly a zřejmě vždy budou průmyslové stejnosměrné pohony, které se střídavým pohonům nepodaří vytlačit.

Dále se v pohonech s asynchronními motory začal hojně využívat střídavý měnič napětí, sloužící pro měkké rozběhy se sníženým napětím. Tento měnič následně v některých aplikacích nahradil měnič frekvenční, díky své příznivější ceně.

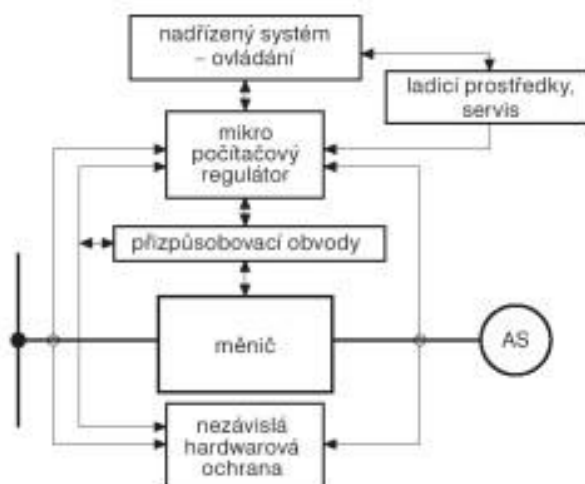
Jak již bylo zmíněno, asynchronní motor s frekvenčně řízením pohonem dominoval zhruba před deseti lety v oblasti průmyslových pohonů a byl velmi rozšířen také v oblasti trakčních pohonů. Jeho vlastnosti vyhovovaly náročnosti požadavků na kvalitu regulace, nenáročnost na údržbu, diagnostiku, dynamiku, robustnost a jednou z dalších výhod byla také cenová dostupnost. Frekvenčně řízený pohon s asynchronním motorem se začal uplatňovat také v aplikacích s velkými výkony s napětími nad 1 kV. To bylo způsobeno hlavně zdokonalováním polovodičových součástek, jako jsou tyristory GTO a IGCT a tranzistory

IGBT. Zde však byla problémem cena, která byla stále ještě vysoká, tudíž se vyplatilo použít vysokonapěťové frekvenční měniče až pro pohony s výkonem v řádech megawattů.

V uvedené době bylo již jasné, že se problematika regulace pohonů bude v nejbližších letech rychle a dynamicky rozvíjet. Jako velmi perspektivní se jevil tranzistor IGBT používaný v technice pulzních a frekvenčních měničů. Bylo pravděpodobné, že poroste variabilita velkosériově dodávaných měničů a že se stále budou zlepšovat vlastnosti, již tak hojně využívaných frekvenčních měničů a bude se rozšiřovat jejich pole působnosti, hlavně ve vysokonapěťových aplikacích.

S vývojem nových a nových technologií a dostupností prostředků k jejich realizaci, bylo možno uplatňovat výkonové polovodiče ve stále větším spektru využití v elektrických pohonech a v regulaci elektrických strojů. Vznikla v podstatě nová kategorie – regulovaný pohon všeobecného použití (systém přizpůsobený mnoha požadavkům technologického zařízení). Nejrozšířenějším typem regulace je zřejmě regulace otáčivé rychlosti.

Regulované pohony můžeme najít v několika běžně užívaných výrobcích s určitým typem pohonu. Reprezentují je pohony pro malou automatizaci, kancelářskou a výpočetní techniku, pohony pro domácí spotřebiče, nářadí a podobné aplikace, nejen v průmyslu se pak jedná o servopohony pro obráběcí stroje, roboty manipulátory a další servomechanismy. Můžeme říci, že v podstatě všechna vývojová zlepšení směřují k úsporám energie a k zefektivnění daných procesů. Nejinak je tomu při vývoji výkonových polovodičových měničů. Oblastmi, kde je pokrok velmi vidět na šetření energií, jsou pohony velkých, středních ale i malých podniků a kategorie trakčních pohonů, které za posledních několik let doznala značného zlepšení, právě z hlediska šetření energií.

Obr. 14 Příklad použití měniče v regulační části pohonu<sup>14</sup>

S šetřením energií jde ruku v ruce zvyšování energetické účinnosti pohonů. Toho lze dosáhnout používáním celkem nově vyvinutých moderních elektrických pohonů, které by měly postupně nahrazovat staré energeticky méně využitelné elektrické pohony. Bohužel stále najdeme společnosti, kde tato možnost není využita.

Dle odhadu, zveřejněného v roce 2008 německým Ústředním svazem elektrotechnického a elektronického průmyslu ZVEI, potřebuje přibližně 10 milionů instalovaných elektrických pohonů v německém průmyslu modernizaci z důvodu energetické účinnosti. Jde hlavně o vedlejší nebo pomocné procesy jako je čerpání, chlazení, transportování, větrání atd. Na tyto procesy někde připadá až 70% spotřeby elektrického proudu průměrného závodu. Pro další úsporu by měly být použity motory s třídy EFF1 a motory s elektronickou regulací otáček pomocí měničů frekvence. Třídy účinnosti motorů EFF1, EFF2 a EFF3 byly zavedeny Evropskou komisí výrobců elektrických strojů a výkonové elektroniky CEMEP na počátku devadesátých let minulého století. Dle údajů ZVEI vzrostl podíl motorů s třídou účinnosti EFF1 od roku 2006, kdy jejich podíl činil asi 12%, do roku 2009 asi dvojnásobně, díky účinné propagaci a zájmům o energeticky účinné motory. Jelikož náklady na spotřebovanou elektrickou energii prostřednictvím starých neregulovaných pohonů činí kolem 90% celkových nákladů na celou dobu životnosti elektrického motoru

<sup>14</sup> Převzato z [9]

nebo pohonu a 10% zbývá na jeho instalaci, měla by být modernizace logickým krokem všech institucí používajících staré neregulované motory a pohony. Elektrické pohony s regulovanými otáčkami dokážou ještě navíc uspořit třikrát až pětkrát více energie než u energeticky úsporných motorů.

Díky plánu Evropské Unie na snižování emisí CO<sub>2</sub> roste také tlak na vyšší efektivitu využití elektrické energie, což je dalším hnacím motorem pro nasazování a zvyšování podílu moderních řízených pohonů. Tyto moderní řízené pohony začaly být totiž také používány v zařízeních, jako jsou ventilátory, čerpadla a kompresory. Zde je celkem dobře vidět energetické srovnání zastaralých metod regulace oproti použití plynule řízených pohonů. Použití měničů frekvence tam, kde to nebylo dříve běžné, sebou přináší snížení emisí CO<sub>2</sub> a také nezanedbatelné úspory. Jak je tedy patrné, regulované pohony dokážou lépe využívat energii a měniče s rekuperací jsou dokonce schopny nevyužitou energii zpět do sítě.

Regulované pohony mají jistě o svoji budoucnost postaráno. Stále se totiž nalézají nová zadání, která jsou svými požadavky předurčena k využití právě regulovaných pohonů. Může se jednat o použití v aplikacích, které ještě v minulosti neexistovaly. Spíše se však nyní prosazují tam, kde nahrazují starší a velmi komplikované mechanismy, nevýhodné také svojí malou účinností. Svoje zaběhnuté místo mají tyto pohony již v oblasti obecně přesného nastavování polohy. Můžeme říci, že regulované pohony a jejich nasazování v praxi velmi dynamicky roste a dnes je možné je najít ve většině moderních strojů vyžadujících regulaci.

Podíl regulovaných pohonů oproti neregulovaným se podle mého pohybuje nad hranicí 90% pro regulované pohony. Mám na mysli samozřejmě aplikace, kde je účinná regulace vyžadována. Bohužel se jistě stále najdou aplikace, kde by modernizace pohonů měla zcela jistě proběhnout kvůli vysoké energetické náročnosti. Je také jisté, že existují aplikace, které regulaci nevyžadují, a zde je samozřejmostí použití neregulovaných pohonů.

## **7. Cenové relace**

Ceny napět'ových měničů nízkých napětí za posledních několik let výrazně klesaly díky výrobcům, kteří reagovali na stále vyšší potřebu těchto přístrojů a trh tak zaplavilo mnoho výrobců, což způsobilo zdravou konkurenci a tyto měniče se staly spotřebním zbožím. Již několik let se jejich ceny pohybují v řádech stovek korun.

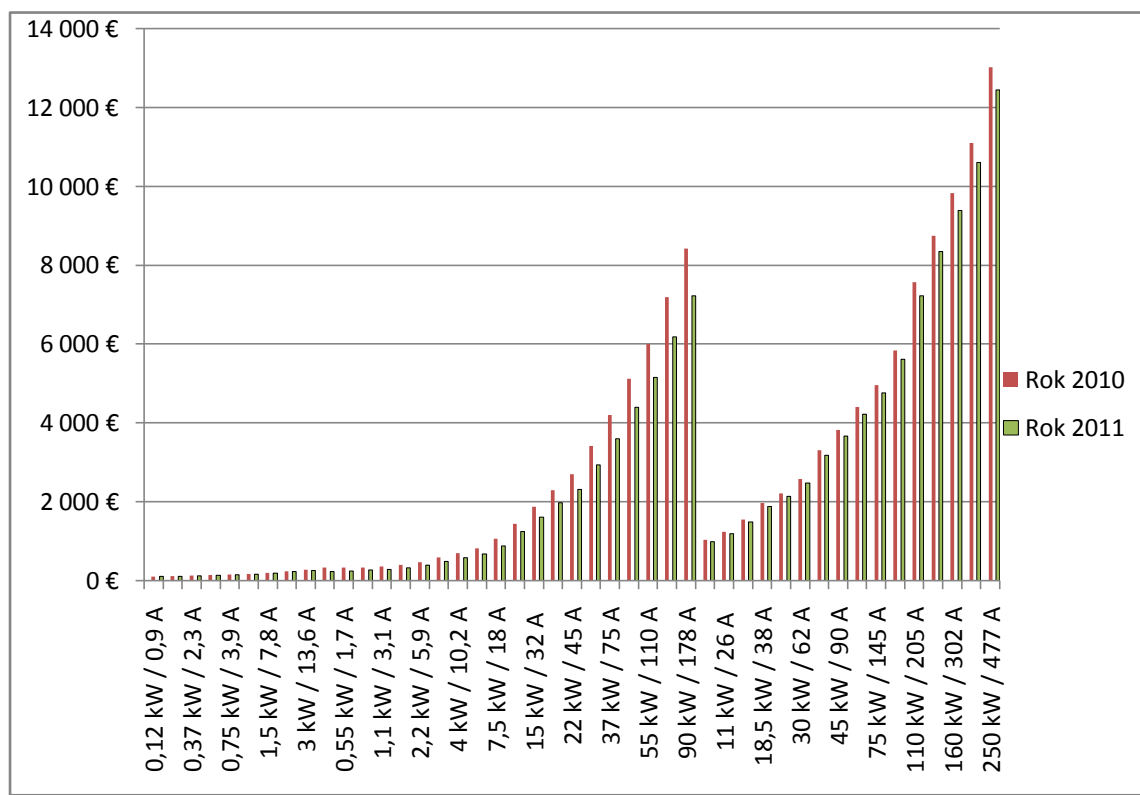
Obdobná situace je u měničů využívaných v průmyslových odvětvích. Jako nejvyužívanější měnič v této oblasti můžeme označit měnič frekvence. Díky stále většímu využití těchto přípravků a rostoucím požadavkům na vlastnosti pohonů, se tyto měniče staly velkosériově vyráběnou položkou a ke zvýšení jejich užívání a nasazování do stále většího spektra aplikací přispěla i jejich klesající cena.

Jako nejsilnější hráče na trhu ve výrobě, distribuci a prodeji měničů pro průmyslové užití, považují společnosti jako ABB, Siemens, Schneider Electric a v České Republice také společnost Danfoss. Rostoucí poptávku po svých výkonových polovodičích potvrdila společnost ABB svým kontraktem na získání výroby polovodičů s českou společností Polovodiče a.s., členem ČKD Group. Společnost ABB nabízí širokou škálu frekvenčních měničů, ať již nízkonapět'ových pro výkony od 0,12 kW do 5,6 MW, nebo vysokonapět'ových pro výkony od 315 kW do 100 MW. V její nabídce lze také nalézt stejnosměrné měniče pro rozmezí výkonů od 9 kW do 18 MW. ABB se drží v popředí také díky svým dalším službám týkajících se měničů, jako jsou softwarové nástroje pro tyto měniče nebo servis dodaných měničů. Software bývá často vytvořen na základě zadání zákazníka. Cenov rozpětí samotných měničů od ABB je závislé na specifické poptávce a dost často zákazník využije i další doplňkové služby této společnosti a ceny samotných měničů jsou tím pádem variabilní.

Pro představu cenového rozpětí měničů využívaných pro průmysl, budou veřejně přístupné ceny společnosti Siemens. Jako nejlevnější měnič vycházející z ceníku společnosti Siemens lze uvést měnič řízený analogovým vstupem pro výkon 0,12 kW a proud 0,9 A, kde se cena pohybuje těsně pod částkou 3000 Kč. S rostoucími požadavky na výkon a možnosti řízení těchto měničů (řídící jednotky bývají dost často součástí měničů) cena samozřejmě roste. U společnosti Siemens je možné se tak dostat k hranici 350 tisíc Kč s měniči pro

trojfázové napájení v rozmezí 380 - 400 V a s výkony 250 kW a proudem 477 A. Cena samozřejmě záleží také na připravenosti daného měniče pro komunikaci s ostatními systémy.

V následujícím grafu můžeme vidět cenové relace měničů pro dané výkony a jejich změnu v poslední době. Je evidentní, že ceny stále klesají.



Graf 3 Vývoj cen měničů pro jednotlivé výkony v poslední době<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Zdroj dat [12]

## **Závěr**

S výkonovými polovodičovými měniči se můžeme setkat v mnoha oblastech elektrotechnického a elektronického průmyslu. Může to být průmysl těžební používající automatické dopravníky, v potravinářském průmyslu kde se používají běžně v nejrůznějších procesech od zpracování surovin pro čerpání a míchání ingrediencí, zpracování dopravníků a ventilátorů, tak i při balení a skladování, v námořním logistickém průmyslu k řízení motorů lodí, v energetickém průmyslu, kde mají za úkol regulovat množství čerpadel, ventilátory, kompresory, dopravníky, mlýny a spouštění turbín, v čistíčkách odpadních vod velké spoustě dalších aplikací.

Použití regulovaných pohonů má za následek úspory energie, snížení emisí a delší životnost mechanických a elektrických zařízení. Dá se předpokládat další dynamický rozvoj tohoto odvětví, jelikož i nové směrnice Evropské Unie tlačí stále více na snižování emisí a šetření energií, což je díky výkonovým polovodičovým měničům efektivně dosahováno. Velké moderní společnosti tyto moderní regulované pohony již používají a začínají je také používat střední i malé podniky. Z důvodu šetření energií a úspory, by se měly k těmto krokům, jako je nahrazení starých způsobů regulace novými, uchýlit všechny průmyslové společnosti, jelikož návratnost jejich investic je v horizontu pouze pár let. Logicky jsou tyto pohony vhodné do aplikací, které vyžadují regulaci a ne tam, kde jsou stroje pouze rozběhnuty a dále běží s konstantním výkonem. Stále vznikají nové úlohy, kde je požadována automatizace pomocí regulovaných pohonů a k nim také nové možnosti jejich řízení, jako například ovládání přes internet nebo mobilní telefon.

Ve spotřebitelské sféře je možné najít měniče v mnoha zařízeních. Jsou to například nabíječky notebooků a mobilních telefonů, měniče pro zařízení v domácím použití jako jsou rychlovarné konvice, AKU vrtačky, čerpadla a jiné. Masové rozšíření těchto výrobků dokázalo velmi snížit jejich cenu.

Dalším velmi perspektivním oborem pro výkonové měniče jsou v současnosti skvěle se rozvíjející motory do hybridních automobilů. Zde je velká účinnost přeměny energie také vyžadována na nejvyšší úrovni a bude se dále dynamicky rozvíjet.

Vývoj polovodičových součástek jde neustále kupředu a cena klesá s objevováním nových levnějších prvků použitelných do těchto součástek. V posledních deseti letech byl nejvíce používaným materiálem pro výrobu polovodičů křemík, ale výkonové vlastnosti tohoto prvku se začínají pomalu ztenčovat. Velké naděje se vkládaly také do struktury karbidu křemíku. Tento směr se však ukázal jako příliš drahý a tím pádem neperspektivní. V poslední době je však pracováno na nové struktuře a to na nitridu gallitém. Tranzistory na bázi nitridu gallia jsou již úspěšně používány například na základnových stanicích mobilních telefonních sítí.

Celkově mají výkonové polovodičové měniče svoje místo v našich životech a jejich důležitost se bude ještě nadále zvyšovat, už díky jejich skvělé vlastnosti šetření našich již dnes vzácných energií.



## **Použité zdroje**

- [1] Černík M.: Výkonové polovodičové spínače a výkonová elektronika, TU Liberec, 2008
- [2] Doc. Ing. Konečná E. CSc., Doc. Ing. Richter A.: Výkonové polovodičové prvky, TU Liberec, 2000
- [3] Chlebiš P., Šimoník P., Osmančík L., Moravčík P.: Trendy v oblasti výkonové elektroniky, VŠB-TU Ostrava
- [4] <http://www.abb.com/cawp/seitp202/b3f1760bf4039bd2c12576f5003811e3.aspx>
- [5] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25453](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25453)
- [6] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37541](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37541)
- [7] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=40420](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40420)
- [8] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=41060](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=41060)
- [9] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=32220](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32220)
- [10] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=40736](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40736)
- [11] <http://www.menice-napeti.cz/>
- [12] <http://www.siemens.cz>