

8.8.2 Usměrňovač

Usměrňovače se dělí na neřízené usměrňovače a řízené usměrňovače.

U neřízeného usměrňovače je výstupní napětí určeno způsobem zapojení. U řízeného usměrňovače je možno výstupní napětí nastavovat.

Polovodičové usměrňovací prvky se nazývají usměrňovací ventily. Při neřízeném usměrňování se používají diody. Výstupní napětí proto není nastavitelné, ale je určeno amplitudou vstupního napětí a zapojením usměrňovače.

Při řízeném usměrňování jsou k usměrňování použity prvky, u kterých je možno nastavit okamžik přechodu z uzavřeného stavu do otevřeného (propustného) a naopak, např. thyristory.

Usměrňovače jsou rozděleny podle parametrů a podle toho označovány (obr. 1). Kromě jiného dává označení informaci o typu zapojení, počtu pulzů za 1 periodu, řízení, a o eventuálním rozšíření zapojení, např. o zkratovací bezpečnostní diodu.

8.8.2.1 Neřízený usměrňovač

Pokus 1: Spojte křemíkovou diodu, např. 1 N 4004, sériově s 12 V žárovkou a připojte na regulační transformátor (obr. 2). Transformátor nastavte na ~ 25 V na výstupu. Sledujte svítivost žárovky a na osciloskopu sledujte průběh napětí U_d na žárovce. *Žárovka svítí, napětí na žárovce má pulzovitý průběh (obr. 3 dole).*

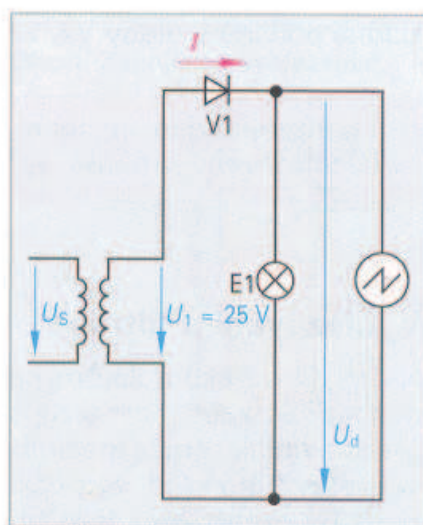
Neřízené jednopulzní jednocestné usměrňování (obr. 3) používá jednu diodu a využívá jejího chování v propustném a závěrném směru. Během kladné půlvlny síťového sinusového napětí je na anodě diody napětí větší než na katodě, dioda vede a protéká proud ze zdroje do spotřebiče. Při záporné půlvlně je dioda zavřená a proud neprotéká. Do spotřebiče protéká proud jen v pulzech jednoho směru.

Jednopulzní jednocestné zapojení nechá projít do spotřebiče jen půlvlny jedné polarizace a zbylé půlvlny nepropustí.

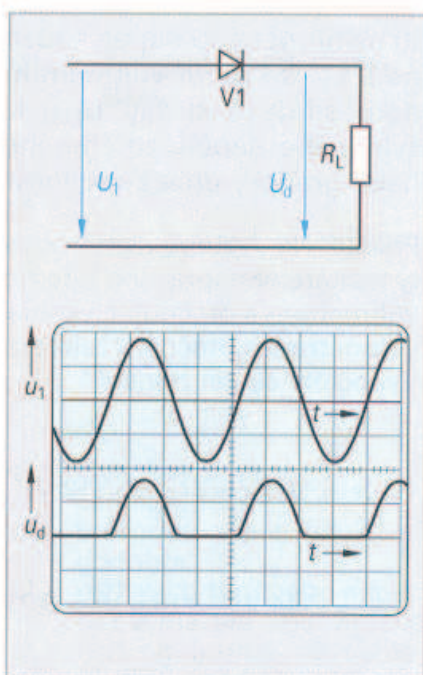
Kvůli nesymetrickému zatížení sítě a impulznímu průběhu proudu na vstupu i výstupu usměrňovače se toto jednoduché zapojení používá jen zřídka a jen pro malé zátěže, například pro malé nabíječky.



Obr. 1 Schéma označování usměrňovačů



Obr. 2 Zapojení k pokusu



Obr. 3 Jednocestné zapojení E1U a průběhy napětí U_1 a U_d

Neřízené dvoucestné usměrňovače s děleným sekundárním vinutím transformátoru (obr. 1) vyžadují transformátor s vyvedeným středem sekundárního vinutí. Během kladné půlvlny teče proud ze svorky 2.1 transformátoru přes diodu V1 a od svorky 2.2 přes diodu V2 a zátěž ke svorce 2.3. Protože dříve byly polovodičové diody drahé, používalo se toto zapojení kde ke dvoucestnému usměrňování stačily 2 diody. Dnes se toto zapojení používá jen zřídka.

Neřízený dvoucestný usměrňovač se dvěma diodami vyžaduje transformátor s vyvedeným středem sekundárního vinutí.

Neřízené dvoucestné usměrňovače v můstkovém zapojení se připojují na běžný transformátor nebo přímo na síť a obsahují 4 usměrňovací diody (obr. 2). Diody V1, V2 vedou proud při kladné půlvlně a diody V2, V3 při záporné půlvlně.

Při neřízeném dvoucestném usměrnění jsou využity obě půlvlny střídavého proudu.

Vyhlazování a filtrace

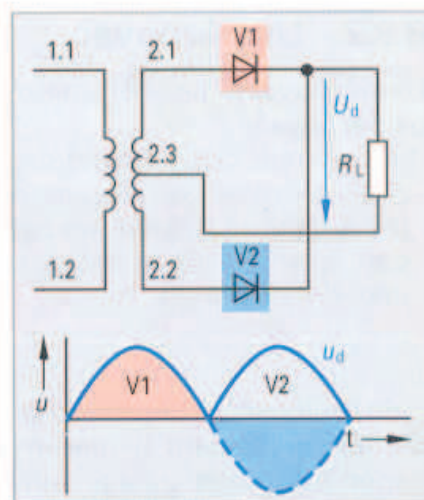
Na rozdíl od akumulátoru nedodává usměrňovač ideální stejnosměrné napětí, ale pulzující stejnosměrné napětí, které si lze představit jako směs ideálního stejnosměrného napětí a střídavé složky. Tato střídavá složka bývá v případě síťového kmitočtu 50 Hz označována jako **brum**. Tvar průběhu tohoto **brumového napětí** U_p je závislý na zapojení usměrňovače. Poměr mezi amplitudou střídavé složky a střední hodnotou napětí usměrněného proudu se nazývá **činitel zvlnění**. Střední hodnotu usměrněného napětí – **ideální stejnosměrné napětí naprázdno** – U_{di} lze měřit voltmetrem s otočnou cívkou. Efektivní hodnotu střídavé složky U_{peff} lze vypočítat z efektivní hodnoty zvlněného napětí, změřeného voltmetrem s otočným železem nebo graficky určit z osciloskopu.

Příklad: Na výstupu usměrňovače v můstkovém zapojení obr. 2 byly naměřeny naprázdno tyto hodnoty napětí:
 voltmetrem s otočnou cívkou: 10,8 V
 voltmetrem s otočným železem: 12,0 V
 Vypočtete činitel zvlnění.

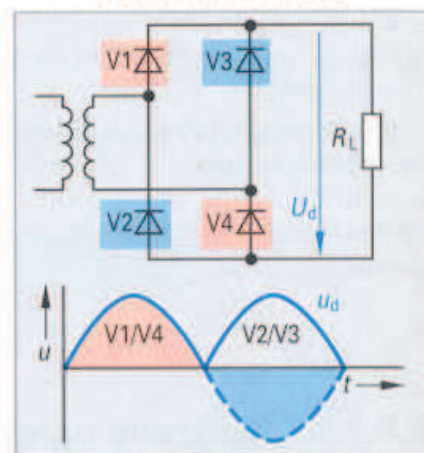
$$U_{p\text{ eff}} = \sqrt{U_{d\text{ eff}}^2 - U_{di}^2} = \sqrt{(12\text{ V})^2 - (10,8\text{ V})^2} =$$

$$= \sqrt{144\text{ V}^2 - 116,6\text{ V}^2} = 5,23\text{ V}$$

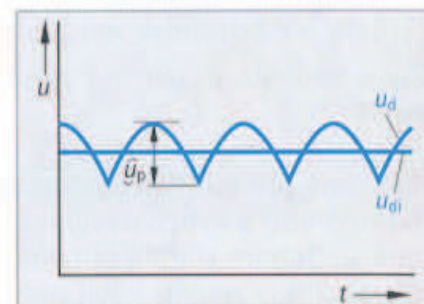
$$w = \frac{U_{p\text{ eff}}}{U_{di}} = \frac{5,23\text{ V}}{10,8\text{ V}} = 0,484 \approx 48,4\%$$



Obr. 1 Dvoucestné zapojení se 2 diodami (označované M2U)



Obr. 2 Dvoucestné můstkové zapojení (označované B2U)



Obr. 3 Stejnosměrná složka s brumem

$$U_{p\text{ eff}} = \sqrt{U_{p\text{ eff}}^2 - U_{di}^2}$$

$$w = \frac{U_{p\text{ eff}}}{U_{di}}$$

- $U_{p\text{ eff}}$ efektivní hodnota brumového napětí
- U_d stejnosměrné napětí na zátěži
- U_{di} střední hodnota usměrněného napětí
- $U_{d\text{ eff}}$ efektivní hodnota usměrněného napětí
- w činitel zvlnění

Pokus 2: Zopakujte pokus 1 na str. 191 s tím, že nahradíte žárovku voltmetrem s velkým vstupním odporem. Výstupní napětí měřte voltmetrem a průběh zobrazte na osciloskopu. Zapojte paralelně k voltmetru kondenzátor s kapacitou $C = 2,2\mu\text{F}$. Znovu měřte napětí a sledujte jeho průběh.

Bez vyhlazovacího kondenzátoru ukazuje voltmetr asi 11 V, s kondenzátorem asi 30 V. Připojením kondenzátoru se výstupní napětí vyhladí a zvýší.

Pulzní (tepavé) výstupní napětí jednocestného usměrňovače může být vyhlazeno kondenzátorem (obr. 1). Tento kondenzátor se nazývá nabíjecí – nebo vyhlazovací kondenzátor.

Kondenzátor na výstupu usměrňovače vyhladí a zvýší výstupní napětí.

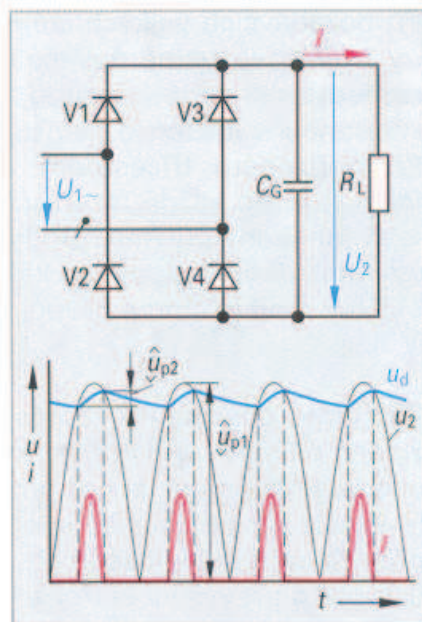
Při zapojení vyhlazovacího kondenzátoru na výstup dvoucestného usměrňovače (obr. 1) se kondenzátor při průchodu špiček amplitud diodami dobíjí a při poklesu napětí na čtveřici diod pod napětí kondenzátoru se kondenzátor vybíjí přes zatěžovací odpor R_L . Poklesy výstupního napětí (na čtveřici diod až na nulu) budou kondenzátorem více nebo méně vyrovnávány. Tím vzroste střední hodnota výstupního napětí. Díky nabitému kondenzátoru je také vyšší napětí na katodách usměrňovacích diod. Tím se zkrátí doba, po kterou je na anodách diod vyšší napětí a tím i doba propustnosti diod. Diody již nejsou vodivé po celou dobu půlvlny, doba průtoku je kratší.

Připojením kondenzátoru na výstup usměrňovače se změní i tvar průběhu výstupního napětí. Zvětší se stejnosměrná a zmenší střídavá složka výstupního napětí. Kondenzátor musí být tím větší, čím větší je proudový odběr na výstupu usměrňovače.

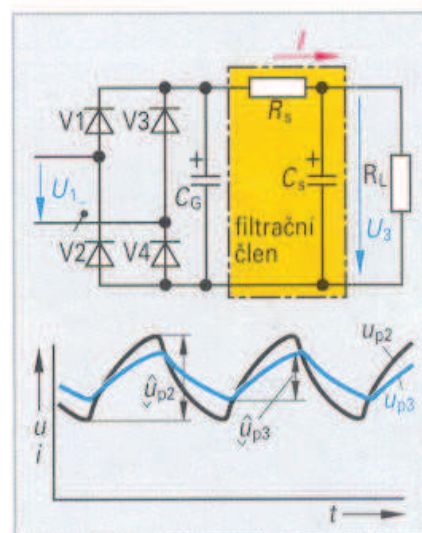
Brumové napětí je tím menší, čím větší je kapacita vyhlazovacího kondenzátoru a čím menší je proudová zátěž výstupu (čím větší je odpor zátěže).

Protože je kapacita vyhlazovacího kondenzátoru ohraničena, není výstupní napětí ani po vyhlazení ideální stejnosměrné napětí. Zůstává zde **zbytkové zvlnění**, a to se odstraňuje připojováním filtračního členu (obr. 2). Filtrační členy jsou typu RC, nebo LC (s tlumivkou), mají charakteristiku dolní propusti a střídavou složku výstupního napětí utlumí.

Kvalita vyhlazení nebo vyfiltrování střídavé složky se posuzuje podle poměru rozkmitu brumu před vyhlazením či filtrací a potom. Relativní zmenšení rozkmitu střídavé složky vyhlazovacím členem se nazývá **činitel vyhlazení G** a relativní zmenšení rozkmitu střídavé složky filtračním členem se nazývá **činitel filtrace s** .



Obr. 1 Zapojení s vyhlazením



Obr. 2 Zapojení RC-filtračního členu

$$G = \frac{U_{p1}}{U_{p2}}$$

$$s = \frac{U_{p2}}{U_{p3}}$$

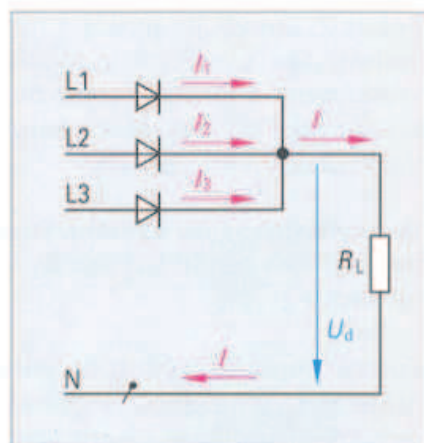
- G činitel vyhlazení
- s činitel filtrace
- U_p brumové napětí (efektivní hodnota)
- U_{p1} rozkmit brumového napětí bez vyhlazení a bez filtrace
- U_{p2} rozkmit brumu po vyhlazení
- U_{p3} rozkmit brumu po vyhlazení a po filtraci

Při požadavcích velkých stejnosměrných výkonů jsou používány trojfázové usměrňovače připojované na trojfázové síťové rozvody.

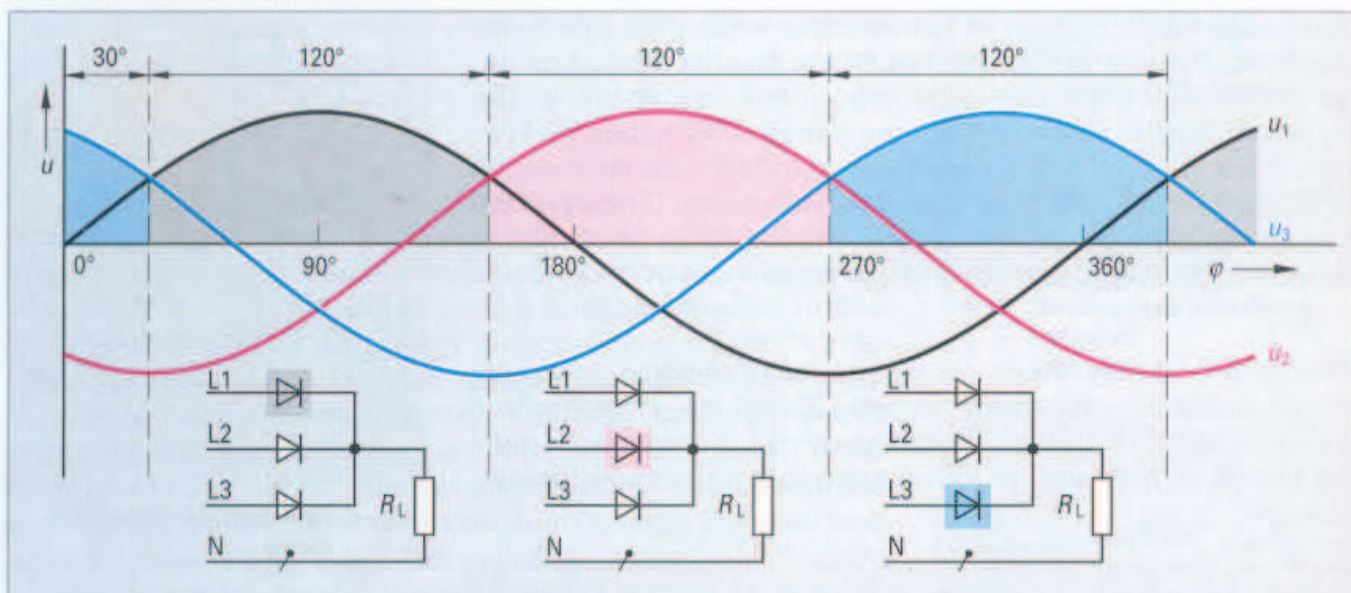
Při neřízeném třicestném usměrnění s nulovým vodičem (obr. 1) je do každé fáze zařazena 1 dioda, takže je využívána vždy jen jedna půlvlna. Diody mají propojeny spolu jeden druh vývodu. Jsou-li spojeny katody diod, označuje se zapojení M3UK, mají-li diody propojeny anody, označuje se zapojení M3UA.

Při tomto speciálním zapojení není dioda vodivá od začátku kladné půlvlny v příslušné fázi, ale až od okamžiku, kdy má její anoda větší potenciál než propojené katody, tedy až o 30° (měřeno fázově) po začátku své kladné půlvlny, když napětí na ní převyší napětí v sousedních 2 fázích, což je patrné z obrázku 2

(k tomuto převýšení je třeba ještě přičíst otevírací napětí diody 0,7 V). **Zapalovací body** (otevírací body) diod jsou tedy od sebe časově vzdáleny $1/3$ periody (úhlově 120°). Přepínání diod nazýváme **komutací**. Usměrňovač (obr. 2) se nazývá síťově řízený usměrňovač a napětí na něm neklesá k nule.



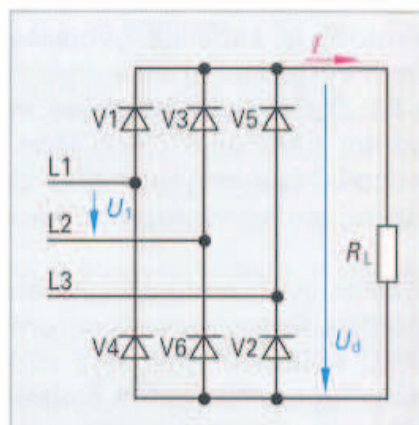
Obr. 1 Zapojení M3UK



Obr. 2 Časový průběh proudů v zapojení M3U

Při zapojení s 6 diodami (obr. 3) v **6-ti cestném můstkovém zapojení B6U** jsou na každou fázi připojeny 2 diody (není potřeba nulový vodič). K průtoku proudu musí být vodivá vždy jedna dioda z horní trojice a současně jedna dioda z dolní trojice můstkového zapojení na obr. 3. Zapojení B6U lze považovat za sériové spojení obvodů M3UA – M3UK. Vzhledem k fázovému posunu napětí ve fázích nelze počítat hodnoty napětí ve fázích, ale lze počítat vždy jen okamžité hodnoty.

• Při trojfázovém usměrnění je zvlnění menší než při jednofázovém a má trojnásobnou frekvenci.



Obr. 3 Zapojení B6U

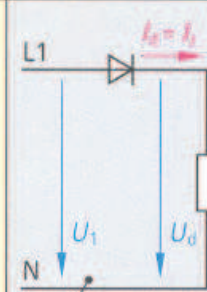
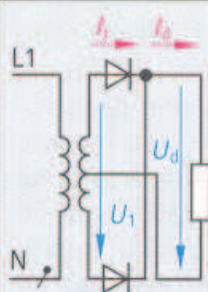
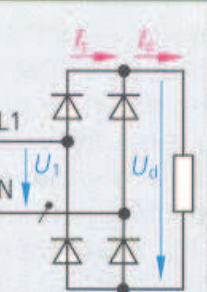
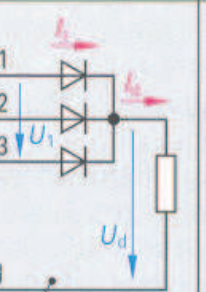
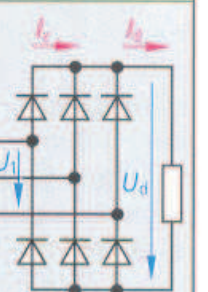
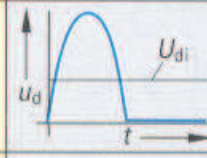
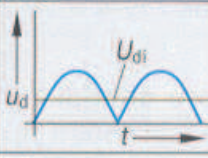
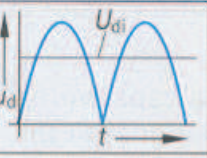
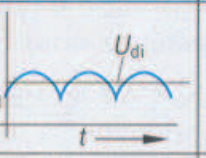
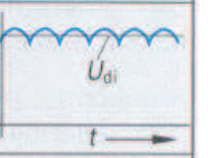
Integrované usměrňovače

Usměrňovače jsou vyráběny jako jednoblokové obvody v jednom pouzdře (obr.), jehož velikost závisí na výkonu a použití. Pro integrované usměrňovače se používají označení a parametry, usnadňující jejich výběr (**tabulka**).

Provedení	význam symbolů v označení
	např. B 40 C 5000 - 3000 B: můstkové zapojení 40: maximální vstupní napětí ve V C: druh zapojení M se středním vývodem 5000: přípustná kapacitní zátěž (vyhlazovací) 3000: jmenovitý proud v mA s chladičem jmenovitý proud v mA bez chladiče

Obr. Integrované usměrňovače a jejich značení

Tabulka: Parametry neřízených usměrňovačů

Druh zapojení	jednocestné jednoduché zapojení	dvoucestné středové zapojení	dvoucestné můstkové zapojení	třícestné středové zapojení	šesticestné můstkové zapojení
označení	E1U	M2U	B2U	M3U	B6U
zapojení					
průběh výstupního napětí					
$\frac{U_{di}}{U_1}$	0,45	0,45	0,9	0,68	1,35
zvlnění w	1,21	0,48	0,48	0,18	0,04
konstrukční výkonový činitel $k = \frac{P_T}{P_d}$	3,1	1,5	1,23	1,5	1,1
proud ve větvi usměrňovače I_Z	I_d	$\frac{I_d}{2}$	$\frac{I_d}{2}$	$\frac{I_d}{3}$	$\frac{I_d}{3}$
U_{di} střední hodnota výstupního napětí U_1 vstupní síťové napětí P_T výkon transformátoru P_d výkon usměrněného proudu U_d stejnosměrné napětí na zátěži I_d stejnosměrný proud					

8.8.2.2 Řízené usměrňovače

Mají-li být např. řízeny otáčky stejnosměrného motoru, musí být měnitelné i usměrněné napětí. Použití předřadného reostatu by bylo při velkých výkonech motoru nevýhodné pro velké ztráty na jeho odporu.

Při použití řízených usměrněných ventilů, většinou tyristorů, může být fáze propustnosti v každé proudové větvi časově omezena a tím je možné výstupní stejnosměrné napětí řídit s minimálními ztrátami.

Při řízení **fázovým spínáním** (fázovém řízení) je tyristor zapálen v určitém okamžiku kladné půlvlny a zhasne při poklesu napětí k nule (poklesu proudu pod úroveň vratného proudu).

Při řízeném jednofázovém jednocestném usměrňování v zapojení E1C (**obr. 1**) protéká proud jen tehdy, je-li tyristor v propustném směru a dostane zapalovací impuls na řídicí elektrodu. **Zapalovací úhel** α udává, o kolik je okamžik zapálení posunut oproti začátku kladné půlvlny napětí. Při čistě činné (ohmické) zátěži protéká zátěží proud od zapálení do uzavření tyristoru. Doba průtoku proudu je dána **úhlem průtoku proudu** Θ .

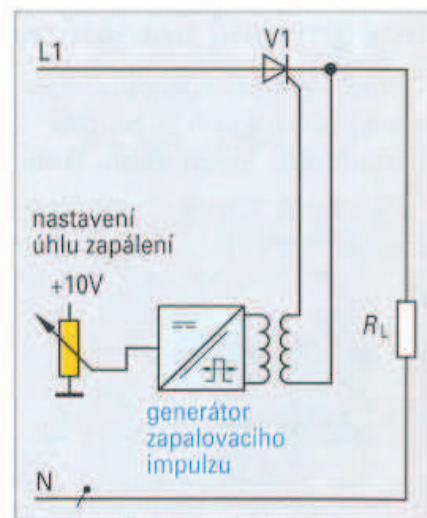
Vlivy různých zátěží (na průběh výstupního proudu)

Proud a napětí na výstupu usměrňovače mají při čisté **ohmické zátěži** stejný časový průběh a jsou ve fázi. To znamená, že krátce po přechodu síťového napětí nulou (do záporné půlvlny) klesne proud pod úroveň vratného proudu a tyristor se uzavře.

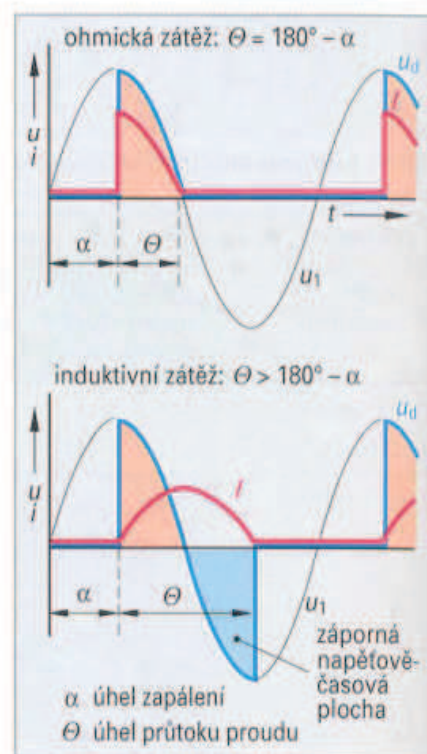
Při induktivní zátěži dochází k fázovému posunu mezi proudem a napětím. Proud se zpožďuje za napětím (**obr. 2**). Při průchodu napětí nulou (do záporné půlvlny) protéká ještě kladný proud a tyristor je otevřený ještě po dobu poloviny záporné půlvlny napětí. Záporný potenciál síťového napětí je přenesen přes vodivý tyristor na výstupní stranu stejnosměrného napětí, kde vznikne (graficky chápáno) **záporná napěťově časová plocha** (**obr. 2**). Indukčnost pracuje v této fázi jako generátor (napětí a proud mají různou polaritu). Při postupném zániku napětí indukovaného v cívce (v indukčnosti zátěže) klesá proud až na úroveň vratného proudu v tyristoru, tyristor se pak zavře a výstupní napětí klesne na nulu.

Indukčnost odebírá od momentu zapálení tyristoru energii ze sítě. Jakmile se indukčnost nabije energií tak, že její napětí je větší než vnější napětí, začne svou energii vybíjet. Ideální indukčnost by se po 90° nabíjela a po 90° vybíjela (při sinusovém vstupním napětí), tedy po zápalu tyristoru při 90° by dosáhla maxima průtoku proudu při 180° a zániku proudu při 270° (**obr. 2**).

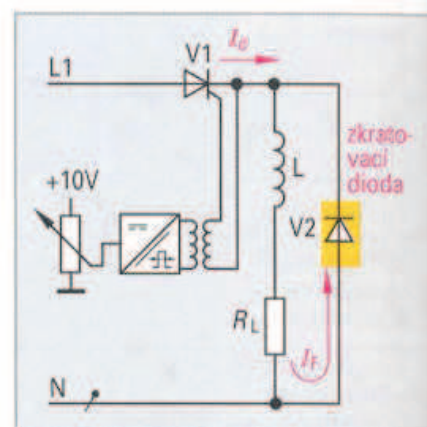
V praxi se nevyskytuje čistě induktivní zátěž, ale jen převážně induktivní zátěž, takže odběr energie z cívky je vždy menší než příjem energie do cívky, tedy záporná napěťově časová plocha (**obr. 2**) je menší než kladná plocha. Má-li být tato záporná napěťově-časová plocha potlačena, zařazuje se paralelně k zátěži **zkratovací dioda** (**obr. 3**).



Obr. 1 Zapojení řízeného usměrňovače E1C



Obr. 2 Vliv různých druhů zátěže



Obr. 3 Zapojení E1C se zkratovací diodou

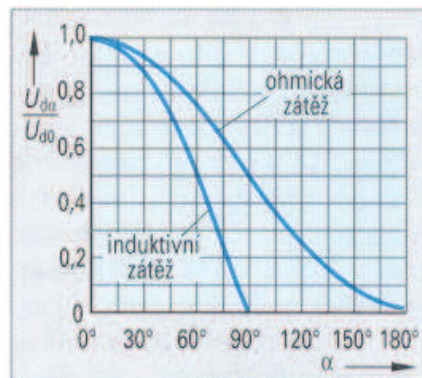
Řídicí charakteristika

Výstupní napětí získané při úhlu zapálení α v zapojení E1C označíme $U_{d\alpha}$. Řídicí charakteristika (obr. 1) ukazuje závislost výstupního napětí na úhlu zapálení α . Napětí získané při plném úhlu otevření od $\alpha = 0$ až po zhasnutí tyristoru označíme U_{d0} a je to střední hodnota výstupního (ideálního stejnosměrného) napětí při $\alpha = 0^\circ$, tj. při neřízeném usměrňování.

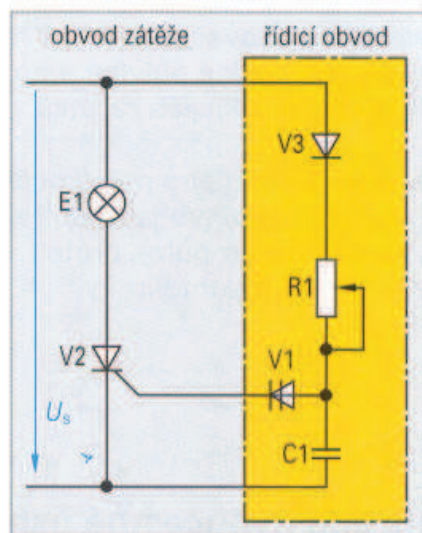
Způsob řízení

Jednoduché ovládání tyristoru lze realizovat pomocí čtyřvrstvé tyristorové diody (str. 188). Přes diodu V3 (obr. 2) se během každé kladné půlvlny nabíjí kondenzátor C1. Nabíjecí proud a tím i nabíjecí dobu lze nastavit proměnným odporem (odporovým trimrem) R1. Napětí kondenzátoru působí přes čtyřvrstvou diodu (diodový zpětně závěrný tyristor) V1 v obvodu mezi katodou a řídicí elektrodou (Gate) usměrňovacího tyristoru V2. Je-li na V1 překročeno blokovací napětí, stane se V1 vodivou a C1 se vybije přes V1 a V2. Tím dojde k zapálení tyristoru V2 a usměrňovačem protéká přes zátěž (E1) proud. Podle nastavení R1 je napětí potřebné pro zapálení V1 dosaženo na C1 dříve nebo později. K zapálení tyristoru musí nejprve síťové napětí dosáhnout blokovacího (spínacího) napětí diody V1 (asi 20 V). Kvůli tomu je možné zapálení teprve při 18° až 20° . Úhel zapálení je tedy tímto řídicím obvodem nastavitelný v rozpětí asi 20° až 160° .

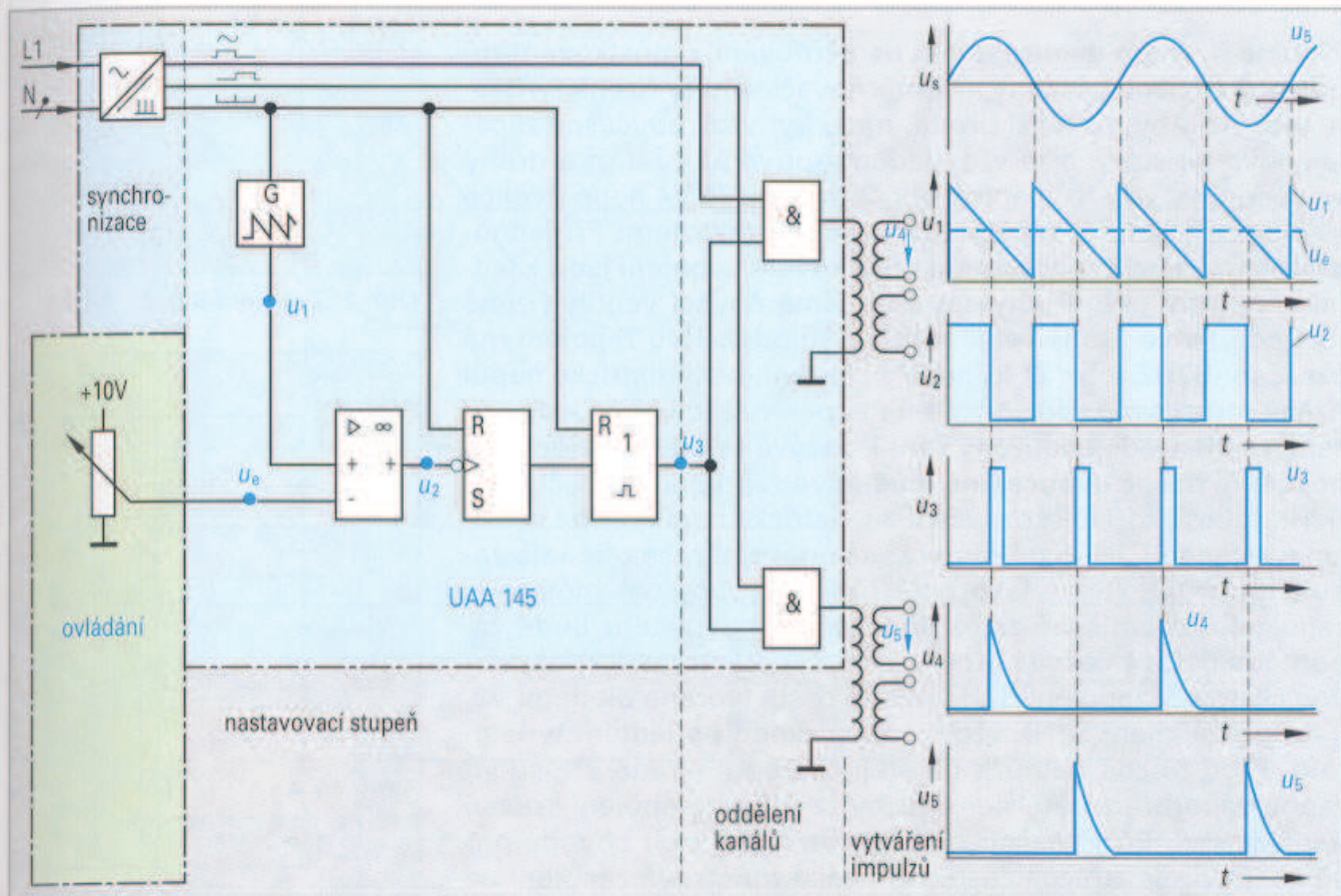
Dnes se k řízení tyristorů používají integrované obvody umožňující zapálení v rozpětí 0° až 180° a nastavení je lineární (vzhledem k řídicímu napětí). Většina těchto integrovaných obvodů pro fázové spínané řízení tyristorů pracuje na stejném principu. Jako příklad je uveden řídicí obvod UAA 145 (obr. 3).



Obr. 1 Řídicí charakteristika E1C



Obr. 2 Impulzní zapalování



Obr. 3 Funkční blokové zapojení obvodu UAA 154 pro řízení spínaných zdrojů

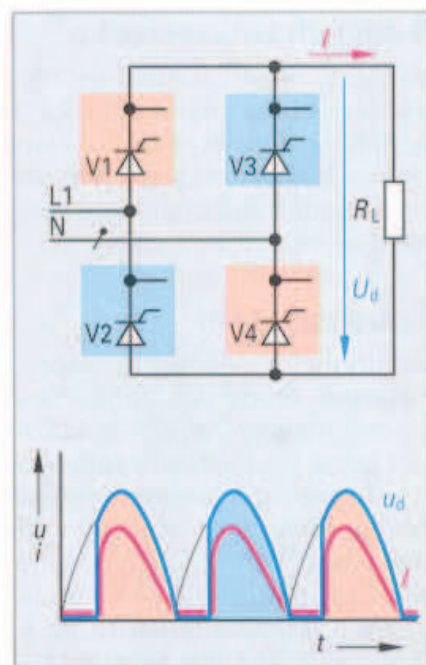
Při průchodu síťového napětí nulou (do kladné půlvlny) je spuštěn generátor pilových kmitů. Operační zesilovač porovná pilovité napětí s řídícím napětím. Převyšuje-li pilovité napětí napětí řídící, sepne operační zesilovač a na jeho výstupu je kladné napětí. Je-li pilovité napětí menší než řídící, přepne operační zesilovač opět do nuly (nebo zůstane na nule). Výstupem operačního zesilovače je obdélníkový pulz s nastavitelnou šířkou (napětí u_2). Sestupná hrana u_2 spouští klopný obvod, jehož impuls je zesílen na signál u_3 a ten je **zapalovacími transformátory** přeměněn na zapalovací impulsy pro tyristory ve 2 větvích 2-cestného usměrňovače.

K získání impulsů pro obě větve dvoucestného usměrňovače slouží oddělovací stupeň. Výstupy pak obsahují oddělené impulsy pro kladné půlvlny a pro záporné půlvlny fázově posunutě o úhel α od jejich začátků.

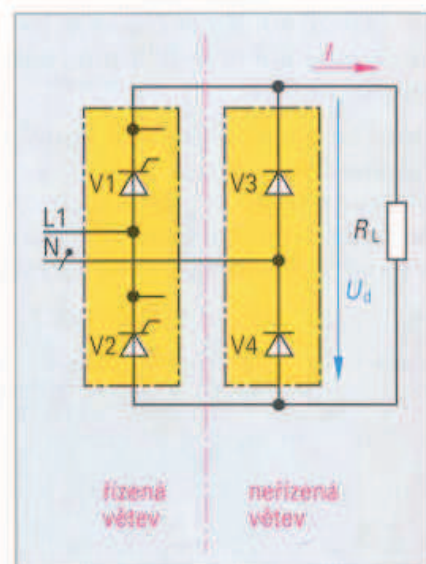
K řízení 2-cestného můstkového usměrňovače (se dvěma tyristory v každé větvi) jsou potřeba v každé větvi (pro každou půlvlnu) 2 řídící impulsy, proto má každý zapalovací transformátor 2 oddělená sekundární vinutí.

Řízené dvoucestné usměrňovače v můstkovém zapojení

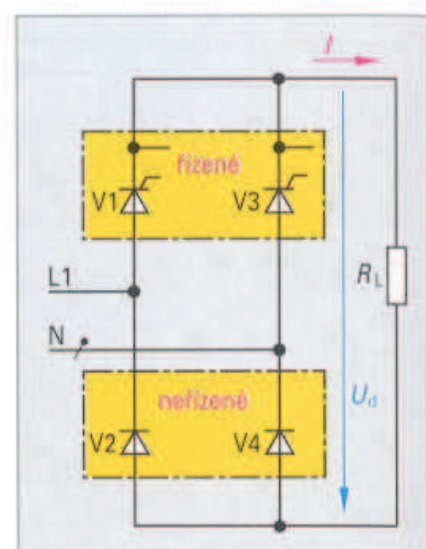
Při **plně řízeném dvoucestném usměrňování** v můstkovém zapojení B2C, jsou všechny 4 usměrňovací ventily řízené tyristory (**obr. 1**). Aby protékal proud, musí být vždy současně zapáleny dva tyristory, a to vždy jeden v přívodu k zátěži a druhý ve vedení od zátěže zpět (na obr. 2 dvojice V1/V4 nebo dvojice V2/V3), oba jedním zapalovacím transformátorem. Při **jednocestně řízeném dvoucestném můstkovém zapojení** jsou v jedné větvi (pro jednu půlvlnu) oba usměrňovací ventily řízené (tyristory) a ve druhé větvi neřízené (diody). Toto zapojení má označení B2HZ (**obr. 2**) (dřívější označení: nesymetrické napůl řízené můstkové zapojení). Je-li naopak v každé větvi jeden řízený ventil a jeden neřízený ventil, nazývá se toto zapojení **jednopolově řízené dvoucestné můstkové zapojení** a označuje se B2HK (**obr. 3**) (dřívější označení: symetrické napůl řízené můstkové zapojení). Při čistě ohmické (činné) zátěži se obě tato zapojení chovají stejně jako plně řízené dvoucestné můstkové zapojení. Při smíšené zátěži indukčního charakteru bude záporná napěťově časová plocha potlačena automaticky zkratovou cestou. V zapojení B2HZ je tato cesta tvořena diodami V3, V4 a při zapojení B2HK vždy jednou diodou a jedním tyristorem. Protože zde nemůže na stejnosměrné straně vzniknout žádné záporné napětí, nemůže být z tohoto zapojení zpětně napájena síť. Při klesající ceně tyristorů i řídících obvodů pro spínané zdroje ztrácí částečně řízená můstková zapojení na významu.



Obr. 1 Zapojení B2C



Obr. 2 Zapojení B2HZ

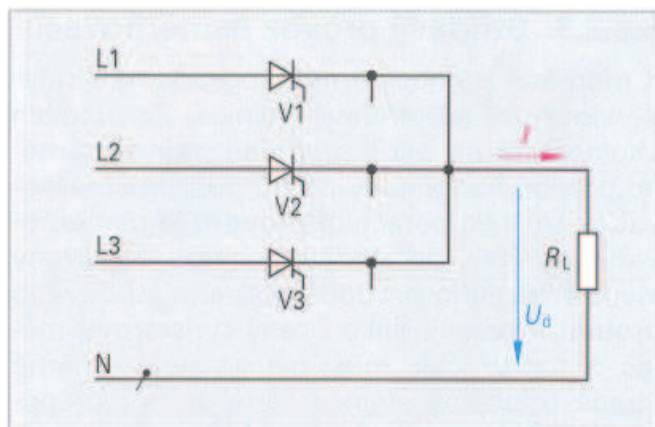


Obr. 3 Zapojení B2HK

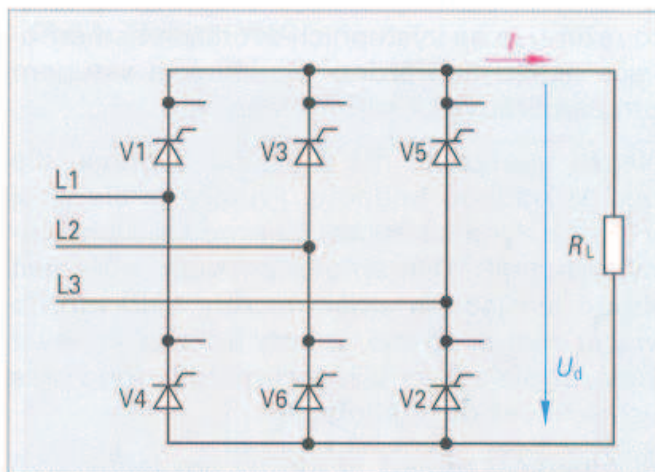
Řízené trojfázové usměrňovače

Při řízeném trojfázovém usměrňování je v závislosti na požadavcích na intenzitu a na zvlnění usměrněného proudu používáno buď **řízené třicestné zapojení s nulovým vodičem M3C (obr. 1)**, nebo **plně řízené šesticestné můstkové zapojení B6C (obr. 2)**. Pro zapojení M3C jsou k řízení potřeba tři řídicí impulzy fázově vzájemně posunuté o 120° .

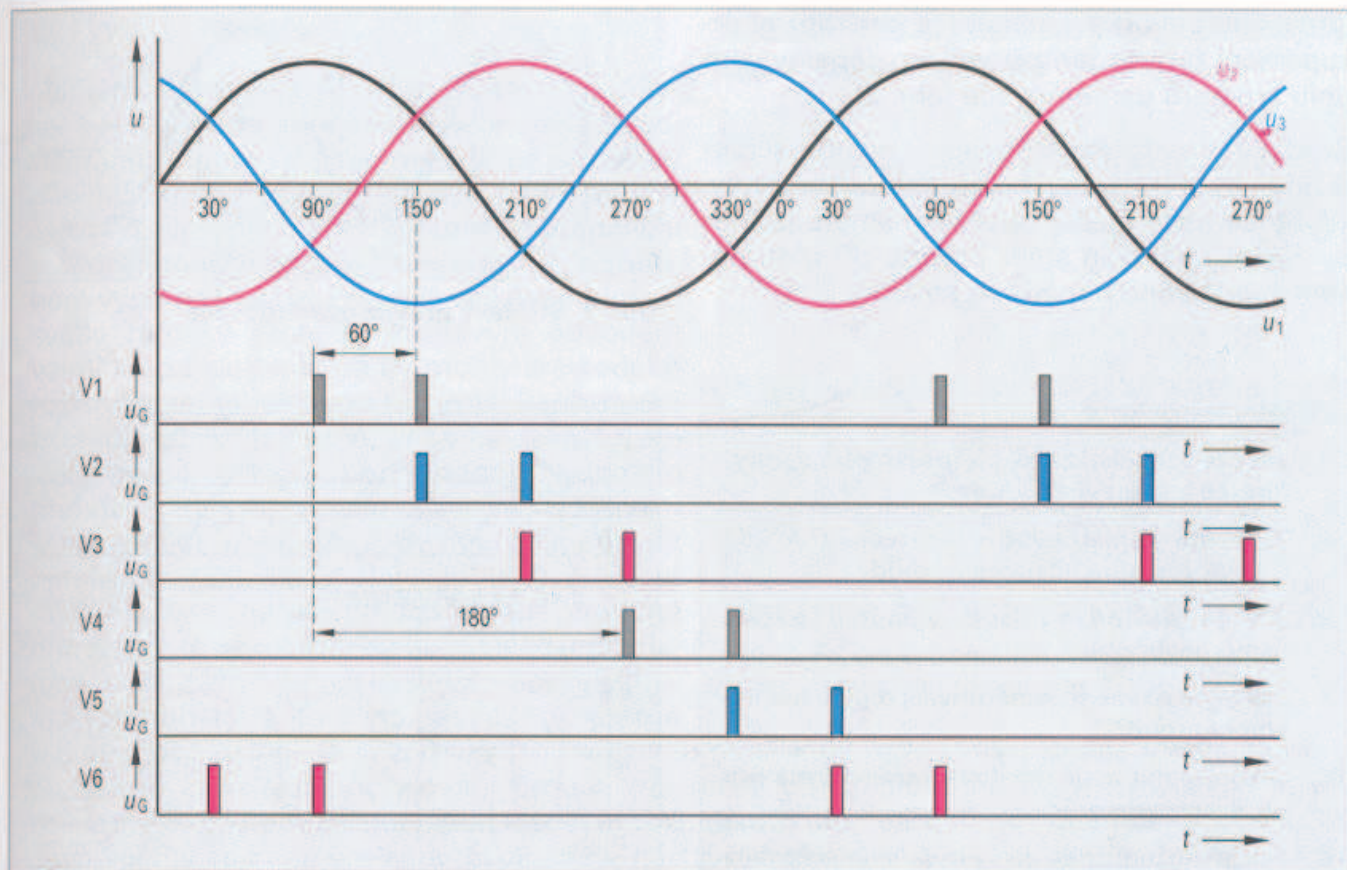
Řízení usměrňovače v zapojení B6C je nákladné. Protože musí být vždy současně otevřen jeden tyristor horní poloviny můstku (obr. 2) a jeden tyristor dolní poloviny můstku, je třeba při prvním zapálení zapojení B6C poslat zapalovací impuls na dva tyristory současně. Aby mohlo být zapojení odstartováno v kterémkoliv okamžiku, musí každý tyristor dostávat za každým zapalovacím impulzem posunutým o α (po eventuelním neřízeném startu) ještě druhý zapalovací impuls současně se zapalovacím impulzem po něm startujícího tyristoru (aby bylo vždy na obou koncích zátěže napětí). Při fázovém posunu zápalu tyristorů o 120° dostáváme posun druhého impulsu o 60° za prvním. Tento druhý impuls je označován jako **60° – následný pulz (obr. 3)**.



Obr. 1 Zapojení M3C



Obr. 2 Zapojení B6C



Obr. 3 Diagram zapalovacích impulsů zapojení B6C