

Životnosť elektrolytických kondenzátorov vo výkonových aplikáciách

doc. Ing. Pavol Špánik, PhD., Ing. Eduard Jadroň, Ing. Andrej Tereň,
Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita,
Ing. Ivan Lokšeninec, Elektrotechnický výskumný a projektový ústav, Nová Dubnica

Predmetom článku je analýza oteplenia elektrolytického kondenzátora pracujúceho v impulzovom režime a jeho vplyvu na životnosť. Uvedená aplikácia je typická pre moderné výkonové elektronické systémy, ako sú zdroje, jednosmerné medziodvody meničov frekvencie a pod. Kondenzátor je pritom považovaný za homogénne teleso, ktorého tepelné zaťaženie reprezentuje teplota povrchu puzdra. V článku je uvedený postup výpočtu oteplenia puzdra kondenzátora a niektoré relevantné otázky týkajúce sa návrhu chladiaceho systému. V závere je ukázaný vplyv oteplenia na životnosť. Informácie z tohoto článku sú použiteľné pri návrhu výkonových elektronických zariadení s elektrolytickými kondenzátormi.

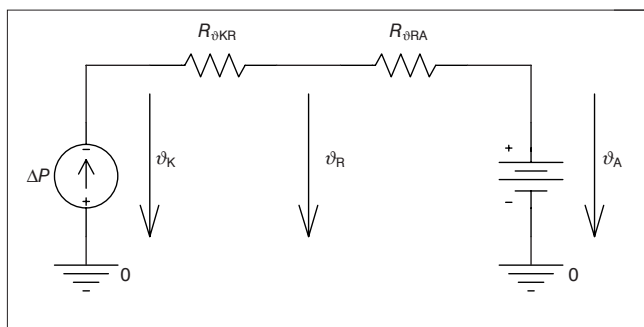
Tiež si je treba uvedomiť, že napätie na svorkách kondenzátora sa mení pomerne málo a vo väčšine prípadov je ho možno považovať za takmer konštantné. To znamená v podstate stále, dobre identifikovateľné namáhanie jednosmerne polarizovaného dielektrika.

Odišná situácia je v prípade prúdového namáhania elektród. Ak ponecháme stranou problematiku mechanických účinkov, ktorá

1. Úvod

Moderné výkonové elektronické systémy sa vyznačujú veľkým množstvom aplikácií kondenzátorov. Ide najmä o filtre na výstupnej strane usmerňovačov, jednosmerné medziodvody statických meničov, spínané (impulzové) zdroje a akumulčné uzly v špeciálnych meničoch, ako sú napr. aktívne filtre a pod. Všetky tieto systémy sú charakteristické tým, že vlastnosti kondenzátora výrazne ovplyvňujú vlastnosti celého systému. Pritom miera tohto vplyvu je porovnateľná s vlastnosťami použitých polovodičových súčiastok. Vzhľadom na to, že uvedené aplikácie vyžadujú akumuláciu pomerne veľkého množstva energie, je kapacita kondenzátora vysoká; dosahuje rádovo stovky až tisíce mikrofaraďov. Z kritéria minimalizácie priestorových požiadaviek vyplýva použitie elektrolytických kondenzátorov.

V uplynulých rokoch došlo, zásluhou rozvoja výrobných technológií, k výraznému zlepšeniu ich parametrov. Najvýznamnejšie sa uvedená zmena prejavila na redukcii ekvivalentného sériového odporu, zvýšení prípustnej hranice striedavej zložky prúdu a predĺžení životnosti. Tiež došlo k zmenšeniu objemu kondenzátorov s danou kapacitou a zvýšeniu faktora mernej objemovej energie akumulovanej v kondenzátore. Pre niektoré špeciálne aplikácie sa začali vyrábať tiež kondenzátory s prídavným chladičom. Určitým negatívnym dôsledkom tejto bezpochyby pozitívnej tendencie bol výraz-



ný nárast cien kondenzátorov, resp. zvýšenie ich podielu v cene komponentov zariadenia. Z tohto hľadiska má veľký význam podrobná analýza činnosti a presný návrh kapacitných prvkov prispievajúci k ekonomicky optimálnemu návrhu elektronického zariadenia.

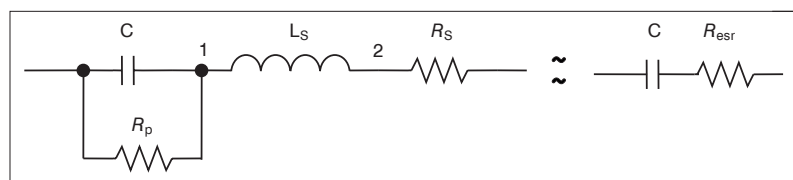
Pri porovnaní podmienok činnosti kondenzátorov vo výkonových elektronických zariadeniach s klasickými aplikáciami je zrejmy podstatný rozdiel v charaktere prúdového odberu, resp. časového priebehu prúdu tečúceho kondenzátorom. Ide o periodický prúd impulzového charakteru, s vysokým činiteľom tvaru a frekvenciou stovky hertzov až jednotky kilohertzov. Amplitúda prúdu pritom dosahuje hodnotu desiatky až stovky ampérov. Tento režim činnosti má za následok cyklické namáhanie dielektrika striedavou zložkou napätia a namáhanie elektród pretekajúcim prúdom. Prvý fenomén nie je príliš závažný, nakoľko vlastnosti dielektrika a vplyv spomenutého namáhania na ne sú dobre známe.

v prípade elektrolytických kondenzátorov nie je príliš významná, vynorí sa problém tepla vznikajúceho v elektródach vplyvom pretekajúceho prúdu s vysokou efektívnou hodnotou, a teda aj s veľkými tepelnými účinkami. V ďalšej časti príspevku bude preto ukázaný spôsob určenia uvedenej tepelnej energie.

2. Vznik tepla v štruktúre kondenzátora

Pri vyjadrení množstva tepelnej energie vzniknutej počas činnosti kondenzátora v jeho štruktúre sa vychádza z vnútornej náhradnej schémy kondenzátora (obr. 1). V ľavej časti tohoto obrázku je znázornená úplná náhradná schéma. Obsahuje dva odpory reprezentujúce prvky, ktoré generujú teplo. Prvý z nich, označený R_p , predstavuje zvodový odpor dielektrika a je určený predovšetkým jeho kvalitou. Teplo na ňom vytvára zvodový prúd, ktorého veľkosť je úmerná napätiu na svorkách kondenzátora. Ak je toto napätie striedavé, uvedená rezistencia reprezentuje tú časť tepla, ktoré v dielektriku vzniká pri vyšších frekvenciách cyklickou polarizáciou (dielektrický ohrev).

Zložka označená R_s , predstavuje odpor elektród kondenzátora, na ktorých teplo vzniká prechodom striedavej zložky prúdu. Podiel oboch zložiek vzniknutého tepla je



variabilný a závisí od typu dielektrika, druhu aplikácie kondenzátora a časového priebehu svorkového napätia, resp. prúdu tečúceho kondenzátorom.

Režim činnosti elektrolytických kondenzátorov vo výkonových elektronických aplikáciách je charakteristický pomerne stálym svorkovým napätím, ktoré sa vyznačuje malou amplitúdou striedavej zložky. Z toho vyplýva, že zložka tepla vzniknutého na zvodovom odpore R_p bude v podstate konštantná a zásluhou priaznivých vlastností dielektrika pomerne malá. Podstatne odlišná situácia je v prípade odporu R_s . Ako už bolo konštatované v predchádzajúcej časti, prúd kondenzátorom má výraznú striedavú zložku, často impulzového charakteru, s pomerne veľkou hodnotou činiteľa tvaru k_i . Z toho vyplýva aj jej relatívne vysoká efektívna hodnota a s ňou spojené tepelné účinky.

To znamená, že dominantnou oblasťou vzniku tepla v štruktúre elektrolytického kondenzátora budú jeho elektródy, zatiaľ čo oteplenie dielektrika prispeje do celkovej bilancie menšou časťou. V praxi sa táto situácia rieši úpravou náhradnej schémy do tvaru sériového zapojenia ideálneho kondenzátora s ekvivalentným sériovým odporom R_{esr} . Stratový výkon vznikajúci v štruktúre kondenzátora je potom možno vyjadriť v tvare:

$$\Delta P = R_{esr} \cdot I_{RMS}^2 \quad (1)$$

kde I_{RMS}^2 je kvadrát efektívnej hodnoty prúdu tečúceho kondenzátorom.

3. Tepelná bilancia systému

Pre tepelný výpočet je potrebné poznať základné parametre kondenzátora, ekvivalentný odpor R_{esr} , hmotnosť m , hmotnostnú tepelnú kapacitu c . Vzťah (2) reprezentuje základné množstvo tepla dQ_{TH} , ktoré sa akumuluje v súčiastke pri náraste teploty o nekonečne malú hodnotu $d\vartheta$:

$$dQ_{TH} = m \cdot c \cdot d\vartheta \quad (2)$$

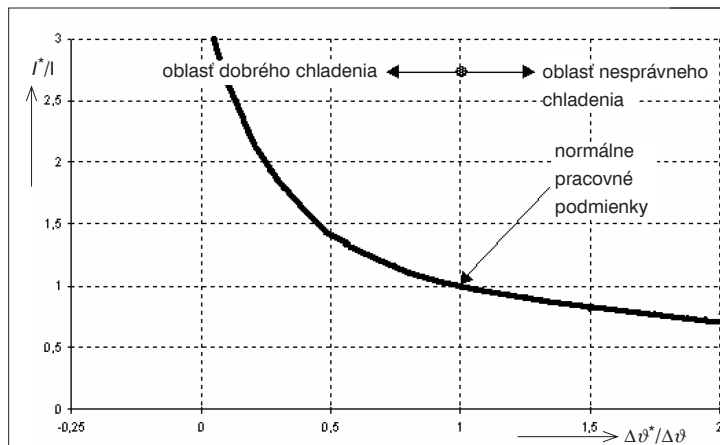
Celkovú tepelnú bilanciu kondenzátora potom opisuje táto rovnica:

$$\Delta P \cdot dt = m \cdot c \cdot d\vartheta + \frac{\vartheta}{R_{TH}} dt \quad (3)$$

kde:

- ΔP je stratový výkon kondenzátora (W),
- m hmotnosť kondenzátora (kg),
- c hmotnostná tepelná kapacita kondenzátora ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$),
- ϑ teplota kondenzátora (K),
- R_{TH} tepelný odpor medzi najteplejším miestom kondenzátora a okolím ($K \cdot W^{-1}$).

Ľavá strana výrazu (3) predstavuje množstvo stratového tepla, ktoré sa vytvorí v kondenzátore stratovým výkonom za nekonečne krátku dobu dt . Prvá časť výrazu na pravej strane vyjadruje základne množstvo tepla akumulované v štruktúre kondenzátora



Obr. 3. Závislosť prúdového činiteľa na korekčnom faktore oteplenia puzdra pre kondenzátor Siemens-Matsushita s chladičom 5 cm*10 cm

s hmotnosťou m pri náraste teploty o diferenciál $d\vartheta$. Druhá časť predstavuje základne množstvo tepla odvedeného do okolia povrchom kondenzátora za nekonečne krátku dobu dt .

Z matematického hľadiska ide o separovateľnú diferenciálnu rovnicu, ktorej riešenie má tvar:

$$\vartheta = \Delta P \cdot R_{TH} \left(1 - e^{-\frac{t}{m \cdot c \cdot R_{TH}}} \right) \quad (4)$$

Ide o časovú závislosť oteplenia kondenzátora, ktorý v tomto konkrétnom prípade je považovaný za tepelne homogénne teleso. To znamená, že je predpokladaná rovnaká teplota všetkých jeho častí a nie je uvažovaný iný spôsob odvodu tepla ako povrchom puzdra. Význam symbolov je uvedený pri vzťahu (3). Ak sa časová konštanta označí $\tau = m \cdot c \cdot R_{TH}$ a dosadí sa do (4), bude:

$$\vartheta = \Delta P \cdot R_{TH} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5)$$

Časová konštanta τ zároveň vyjadruje pomer nahromadeného a vyžiareného tepla a dobu, za ktorú dosiahne teplota ϑ 63 % z maximálnej hodnoty oteplenia v čase $t = \infty$. Fyzikálny rozmer časovej konštanty τ je sekunda.

Po dosadení podmienok $\vartheta = \vartheta_\infty$ a $t = \infty$ do vzťahu (5) sa dostane:

$$\vartheta_\infty = \Delta P \cdot R_{TH} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \quad (6)$$

$$= \Delta P \cdot R_{TH} \left(1 - e^{-\infty} \right) = \Delta P \cdot R_{TH}$$

Vzťah (6) predstavuje teplotu kondenzátora v čase $t = \infty$, kedy je $\vartheta = \text{konst.}$ V tomto prípade je celé množstvo stratového tepla odvádzané povrchom súčiastky do okolia a neuplatňuje sa jeho akumulácia v hmote súčiastky.

Po dosadení výsledku vzťahu (6) do (5) môžeme pre oteplenie písať:

$$\vartheta = \vartheta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (7)$$

Čo je možné pre prípad definovanej začiatočnej teploty rozšíriť na tvar:

$$\vartheta = (\vartheta_\infty - \vartheta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \vartheta_0 \quad (8)$$

A po dosadení $\vartheta_\infty = \Delta P \cdot R_{TH}$ zo vzťahu (4) do vzťahu (6):

$$\vartheta = (R_{esr} \cdot I_{RMS}^2 \cdot R_{TH} - \vartheta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \vartheta_0 \quad (9)$$

kde:

I_{RMS} je efektívna hodnota prúdu tečúceho kondenzátorom (A),

R_{esr} ekvivalentný sériový odpor kondenzátora (Ω),

R_{TH} tepelný odpor najteplejšieho miesta kondenzátora – puzdra ($K \cdot W^{-1}$),

ϑ teplota kondenzátora v ľubovoľnom časovom okamihu t (K),

ϑ_0 počiatočná teplota kondenzátora v čase $t = 0$ (K),

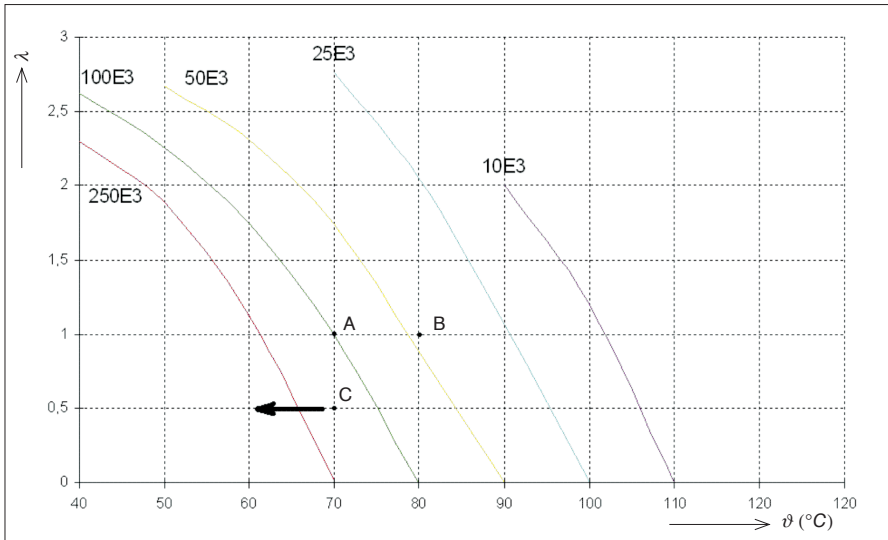
ϑ_∞ maximálna teplota kondenzátora v čase $t = \infty$ (K).

Vzťah (9) predstavuje konečný tvar rovnice časovej závislosti teploty kondenzátora ϑ , vypočítanej na základe jeho parametrov, efektívnej hodnoty prúdu tečúceho kondenzátorom a začiatočnej hodnoty jeho teploty. Podotýkame, že začiatočná teplota ϑ_0 je vo väčšine prípadov totožná s teplotou okolia. Výnimkou je prerušovaná činnosť zariadenia s kratšou prestávkou, ako je šesťnásobok časovej konštanty τ , v prípade zariadenia bez núteného chladenia.

Odvod tepla z kondenzátora

Životnosť elektrolytických kondenzátorov je zásadným spôsobom závislá na teplote. Zvyčajne sa neaplikuje prídavné chladenie kondenzátorov, a tak stratové teplo vyvinuté v štruktúre kondenzátora je odvádzané do okolia jeho povrchom.

Výsledný vzťah (6) umožňuje vypočítať teplotu kondenzátora v ľubovoľnom časovom okamihu, pri prirodzenom prúdení vzduchu a normálnych teplotných podmienkach.



Obr. 4. Relácia medzi životnosťou elektrolytického kondenzátora Sikorel, typ B41550 a B41570, pomerným prúdovým zaťažením a teplotou jeho puzdra

Montážou chladiča na kondenzátor alebo núteným obehom chladiaceho vzduchu je možné, pri zachovaní teploty puzdra, úmerne zvýšiť veľkosť striedavej zložky prúdu.

Týmto spôsobom sa dajú kondenzátory preťažovať, bez skrátenia ich životnosti. Zároveň je však potrebné si uvedomiť, že pri zhoršení chladenia kondenzátora sa skraca jeho životnosť a v extrémnych prípadoch dochádza i k fyzickej deštrukcii kondenzátora. V praxi je bežný jav, že takýto stav nastane pri poruche ventilácie alebo pri zanesení plôch kondenzátora nečistotami, popr. prachom. Je to spôsobené zvýšením tepelného odporu medzi kondenzátorom a okolím.

Nasledujúci príklad umožní jednoduchým spôsobom nadimenzovať chladič na

kondenzátor, ktorý bude odvádzať stratové teplo z puzdra kondenzátora do okolia svojím povrchom. Je možné použiť aj kvapalinové alebo olejové chladenie, ale je treba si uvedomiť, že tekuté média pri poruche môžu byť príčinou rozsiahlejšej havárie zariadenia.

Na obr. 2 je náhradná schéma tepelného obvodu, ktorá je určená k analýze teplotných pomerov pri odvode tepla vznikajúceho v štruktúre kondenzátora jeho povrchom, resp. prídavným chladičom.

Význam jednotlivých označení je takýto: ϑ_K je teplota na povrchu kondenzátora (K), ϑ_R teplota na povrchu chladiča (K), ϑ_A teplota okolia (K),

$R_{\vartheta_{KR}}$ tepelný odpor povrchu kondenzátor – chladič ($K \cdot W^{-1}$),

$R_{\vartheta_{RA}}$ tepelný odpor chladiča – okolie ($K \cdot W^{-1}$).

Celkový tepelný odpor náhradnej schémy je možné vypočítať pomocou nasledujúceho vzťahu, uvedeného napr. v [9]:

$$R_{\vartheta_{KA}} = R_{\vartheta_{KR}} + R_{\vartheta_{RA}} = \frac{\vartheta_K - \vartheta_R}{\Delta P} + \frac{\vartheta_R - \vartheta_A}{\Delta P} = \frac{\vartheta_K - \vartheta_A}{\Delta P} \quad (10)$$

kde:

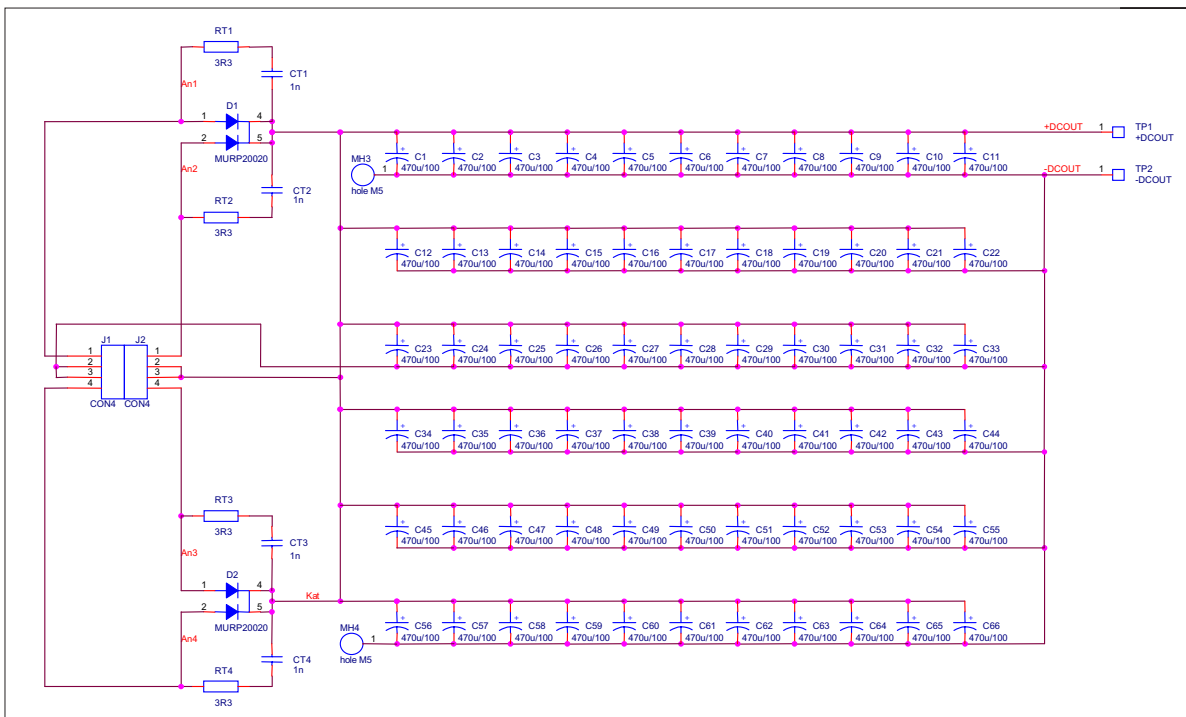
$R_{\vartheta_{KR}}$ je tepelný odpor styku kondenzátor – chladič, ktorý sa môže pohybovať v rozsahu 0,2 až 0,4 $K \cdot W^{-1}$. Po aplikácii silikónovej vazelíny medzi stykové plochy je možno znížiť tento odpor asi o 50 %, $R_{\vartheta_{RA}}$ závisí od použitého typu chladiča, pričom je možné použiť už existujúce chladiace profily alebo jednoduché chladiace plochy.

Pri použití jednoduchého chladiča je potrebné, aby výsledný tepelný odpor vyhovoval vzťahu (10). Tepelný odpor takéhoto chladiča by bolo možné vypočítať pomocou vzťahu (11), pričom sa predpokladá štvorcový tvar chladiacej dosky. Bližšie informácie a postupy sú uvedené v [9].

$$R_{\vartheta_{RA}} = \frac{3,3C^{0,25}}{\sqrt{\lambda \cdot d}} + \frac{650C}{A} \quad (11)$$

kde:

λ je tepelná vodivosť materiálu ($W \cdot K^{-1} \cdot cm$),
 d hrúbka chladiacej dosky chladiča (mm),
 A plocha chladiacej dosky (cm^2),
 C korekčný faktor.



Obr. 5. Schéma zapojenia výstupného filtra meniča DC/DC

V tab. 1 a tab. 2 sú uvedené hodnoty tepelnej vodivosti a korekčného faktora pre technicky relevantné aplikácie.

Aby bolo možné odvietať stratové teplo zo súčiastky do okolia prostredníctvom chladiča, musí platiť tento vzťah:

$$R_{vKR} + R_{vRA} \leq \frac{\vartheta_K - \vartheta_A}{\Delta P} \quad (12)$$

Ak sa dosadí za ΔP zo vzťahu (1), dostane sa:

$$(R_{vKR} + R_{vRA}) \leq \frac{\vartheta_K - \vartheta_A}{R_{ESR} \cdot I_{RMS}^2} \quad (13)$$

kde:

ϑ_K je pracovná teplota kondenzátora (K),

ϑ_A teplota okolia (K),

R_{vKR} tepelný odpor povrchu kondenzátor – chladič ($K \cdot W^{-1}$),

R_{vRA} tepelný odpor chladič – okolie ($K \cdot W^{-1}$),
 I_{RMS} efektívna hodnota prúdu tečúceho kondenzátorom (A),

R_{ESR} ekvivalentný sériový odpor kondenzátora (Ω).

Uvedená rovnica vyjadruje vzťah medzi celkovým tepelným odporom kondenzátor – okolie, ktorý musí byť menší ako podiel tepelnej diferencie medzi povrchom a okolím a stratovým výkonom v štruktúre kondenzátora.

Ak bude výraz (13) platiť, oteplenie kondenzátora sa po dobe $t = 6\tau$ ustáli na prípustnej hodnote, uvažovanej pri návrhu. V prípade neplatnosti vzťahu (13) bude kondenzátor tepelne preťažovaný. To má za následok výraznú redukciu jeho životnosti, popr. v extrémnych prípadoch jeho haváriu. Účinné chladenie môže byť vytvorené aj prirodzeným prúdením vzduchu, popr. nútenou ventiláciou, pričom optimálne je, aby rýchlosť chladiaceho vzduchu bola v rozsahu 0,5 až 2,0 $m \cdot s^{-1}$. V niektorých prípadoch je vhodné použiť aj kvapalinové chladenie. Kvapalinové chlade-

Tab. 1. Tepelná vodivosť pre základné materiály

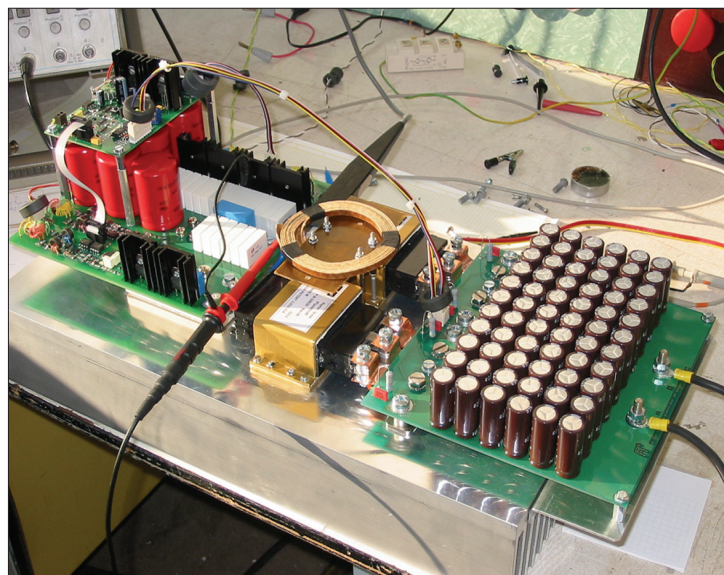
Materiál	Meď	Hliník	Mosadz	Oceľ
λ ($W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot cm$)	3,80	2,10	1,10	0,46

Tab. 2. Korekčné faktory

Umiestnenie	C
vodorovná plocha dosky, povrch čistý	1,00
zvislá plocha, povrch čistý	0,85
vodorovná plocha dosky, povrch černený	0,50
zvislá plocha, povrch černený	0,43

Tab. 3. Možnosť stanoviť veľkosť faktoru oteplenia

Rýchlosť prúdenia ($m \cdot s^{-1}$)	Korekčný činiteľ $\Delta v^* / \Delta v$
0,50	0,55
1,00	0,45
1,50	0,39
2,00	0,35



Obr. 6. Aplikácia paralelného zapojenia kondenzátorov v meniči s mäkkou komutáciou

nie sa využíva v statických meničoch vyšších výkonov v rozsahu 160 až 3 000 kW.

4. Oteplenie a životnosť kondenzátora

Pre určenie životnosti kondenzátora je potrebné poznať katalógové charakteristiky uvedené v [8], kde sú udávané ako závislosti doby životnosti kondenzátora na teplote a pomernom prúdovom zaťažení. Pomerné prúdové zaťaženie λ je definované ako pomer menovitej hodnoty efektívneho prúdu tečúceho kondenzátorom a efektívnej hodnoty prúdu pri maximálnej pracovnej teplote 105 $^\circ C$ a frekvencii 100 Hz.

V katalógových tabuľkách sú udávané menovité efektívne hodnoty I_{RMS} prúdu aj pre teploty 85, 105 a 125 $^\circ C$. Je možné i prepočítať pomerné prúdové zaťaženie aj na iné hodnoty teploty a frekvencie. Bližšie informácie a postupy sú uvedené v [8].

Pomerné prúdové zaťaženie je možné vyjadriť pomocou vzťahu:

$$\lambda = \frac{I_{RMS}}{I_{RMS105}} \quad (14)$$

Ak sa použije prídavné chladenie kondenzátora, zmenší sa celkový tepelný odpor a pri nezmenenej výkonovej bilancii aj teplota jeho puzdra. Definujme korekčný faktor oteplenia rešpektujúci uvedený jav v tvare:

$$\frac{\Delta \vartheta^*}{\Delta \vartheta} = \frac{\vartheta_K^* - \vartheta_A^*}{\vartheta_K - \vartheta_A} \quad (15)$$

kde:

$\Delta \vartheta$ je oteplenie definované rozdielom teploty puzdra a teploty okolia kondenzátora v normálnych podmienkach,

$\Delta \vartheta^*$ oteplenie v prípade, keď je kondenzátor ochladzovaný.

Je zrejmé, že platí:

$$\frac{\Delta \vartheta^*}{\Delta \vartheta} \leq 1 \quad (16)$$

Z uvedeného vzťahu vyplýva možnosť zvýšenia efektívnej hodnoty prúdu tečúceho kondenzátorom pri zachovaní oteplenia puzdra. Túto skutočnosť graficky interpretuje obr. 3. Z uvedeného obrázku je možné, na základe známej hodnoty faktora oteplenia $\Delta \vartheta^* / \Delta \vartheta$, určiť činiteľ zvýšenia prúdu $\Delta I^* / \Delta I$.

Pomocou zmieneného grafu je teda možné stanoviť veľkosť zväčšeného prúdu, ktorý spôsobí rovnaké oteplenie kondenzátora ako prúd za normálnych pracovných podmienok. Inými slovami povedané, podiel $\Delta I^* / \Delta I$ predstavuje činiteľ zvýšenia efektívnej hodnoty striedavého prúdu kondenzátora, bez redukcie jeho životnosti. Veľkosť faktoru oteplenia je možné stanoviť na základe tab. 3, ktorá udáva hodnoty $\Delta \vartheta^* / \Delta \vartheta$ v závislosti na rýchlosti prúdenia vzduchu.

Pre názornosť a na demonštráciu už zmieneného postupu sú na obr. 4 uvedené firemne udávané hodnoty životnosti kondenzátorov typu Sikorel v závislosti na teplote puzdra. Ak sa napr. použije kondenzátor zaťažený menovitým prúdom ($\lambda = 1$) a jeho povrchová teplota bude 70 $^\circ C$, jeho predpokladaná životnosť je 100 000 hodín (bod A). Ak sa zhorší chladenie a teplota stúpne napr. o 10 $^\circ C$, skráti sa životnosť kondenzátora približne na polovicu (bod B). Použitím ďalšieho rovnakého kondenzátora pripojeného paralelne sa prúdové zaťaženie obidvoch kondenzátorov zníži na polovicu ($\lambda = 0,5$). Tým sa predĺži životnosť obidvoch kondenzátorov asi o 60 % (bod C) a zároveň sa zníži oteplenie kondenzátorov na štvrtinu ($\lambda^2 = 0,5^2 = 0,25$). To bude mať za následok ďalšie predĺženie životnosti (šípka od bodu C). Informáciu o absolútnej teplote povrchu kondenzátorov pre odhad predĺženia životnosti však bude nutné zmerať, popr. vypočítať prostredníctvom vzťahu (9). Je treba podotknúť, že uvedený vzťah vychádza z predstavy kondenzátora ako tepelne homogénneho telesa. V súčasnosti pracujeme na metóde výpočtu vychádzajúcej z tepelne heterogénnej náhrady, ktorá umožní presnej-

šie stanoviť tepelné pomery v systéme a tak zvýšiť zafážiteľnosť kondenzátora bez skrátenia jeho životnosti. O tejto metóde budú čitatelia informovaní v budúcom pokračovaní tohto článku.

Už uvedenými spôsobmi zlepšenia chladenia je možné výrazne predĺžiť životnosť hliníkových filtračných elektrolytických kondenzátorov, ktoré sa využívajú v polovodičových usmerňovačoch. To zároveň musí viesť aj k úspore montážneho priestoru. Zariadenie potom môže mať menšiu hmotnosť a mechanické rozmery pri rovnakom inštalovanom výkone.

5. Odporúčania pre aplikácie v praxi

Vzhľadom k nárastu relatívnej ceny elektrolytických kondenzátorov, a teda aj zvýšeniu jej podielu v celkovej cene elektronického zariadenia, je treba venovať patričnú pozornosť ich aplikácii a dimenzovaniu. Pritom je treba rešpektovať tieto pravidlá:

- Veľkosť kapacity kondenzátora je treba určiť na základe analýzy, vykonanej simulačným nástrojom s potrebnou rozlišovacou úrovňou modelu. Výhodné je použitie softvéru OrCAD, ktorý sa v tejto oblasti stal určitým štandardom. Ide najmä o využitie časti PSpice, určenej na analýzu elektronických obvodov, a modulu Capture, umožňujúceho grafické zadanie analyzovaného obvodu. V nutnom prípade vyhovie aj klasická analytická metóda, avšak pravdepodobne za cenu vyššej chyby a dlhšieho časového úseku potrebného na dosiahnutie výsledku. **Treba sa však vyvarovať zbytočného zvyšovania kapacity kondenzátora**, ktoré väčšinou (v prípade sieťových usmerňovačov) vedie k nárastu efektívnej hodnoty striedavej zložky jeho prúdu.
- Z prúdu kondenzátorom, získaného predchádzajúcim postupom, sa stanoví jeho tepelný režim. Ak je efektívna hodnota prúdu menšia ako dovolená, použije sa vyššie uvedená metodika k stanoveniu teploty puzdra a získaniu hodnoty vyjadrujúcej jeho životnosť. Tu je treba upozorniť na dve skutočnosti, ktoré pozitívne ovplyvňujú tepelný režim. V prvom rade ide o neharmonický časový priebeh prúdu kondenzátora. Jeho impulzový charakter svedčí

o vysokom obsahu harmonických zložiek, pre ktoré je (v rozsahu 1 až 10³ kHz) R_{esr} výrazne menší. **Ak teda bude harmonický prúd (100 až 300 Hz) uvažovaný s danou efektívnou hodnotou, návrh je na strane bezpečnosti.**

Druhá skutočnosť sa dotýka topologickej realizácie zapojenia kondenzátora. Tu je nutné upozorniť na výhodu paralelného zapojenia kondenzátorov s menšou kapacitou. **Uvedené usporiadanie vedie k redukcii R_{esr} a zväčšeniu povrchu chladiacej plochy puzdra.** Ako príklad je na obr. 5 uvedená schéma zapojenia výstupného filtra meniča, vyvinutého na našom pracovisku [3], kde bolo použité takéto usporiadanie. Na obr. 6 je pohľad na priestorové usporiadanie kondenzátorovej batérie.

V prípade možnosti vzniku vyššej teploty puzdra kondenzátora bude navrhnutý vhodný chladiaci systém. Väčšinou pôjde o prídavné vzduchové chladenie s núteným pohybom vzduchu. **Pritom sa odporúča použiť samostatný chladič situovaný na vstupe chladiaceho vzduchu.** Umiestnenie kondenzátorov na spoločný chladič s polovodičovými súčiastkami nie je z dôvodu rozdielnych tepelných proporcií uvedených systémov vhodné.

6. Záver

Rastúci význam, parametre, ale ziaľ aj cena sú príčinou zamerania väčšej pozornosti na problematiku dimenzovania elektrolytických kondenzátorov. Rešpektovanie prezentovaných zásad umožní ekonomicky optimalizovať ich návrh, pri zachovaní požadovanej životnosti. Uvedená metodika je úspešne používaná na našom pracovisku už niekoľko rokov – pri konštrukcii výkonových polovodičových meničov rôznych typov.

Získané skúsenosti potvrdili jej dôležitosť. Avšak na druhej strane ukázali aj niektoré negatíva, ktoré sa vyskytujú hlavne v oblasti určitého tepelného predimenzovania systému. Eliminácia tohto problému vyžaduje detailnú znalosť tepelnej bilancie kondenzátora, vrátane hodnoty jeho vnútorného tepelného odporu. Znalosť uvedeného parametra, ktorý však nie je bežne dostupný, by umožnila optimálne využiť tepelnú kapacitu kondenzátora. To

by rozšírilo jeho výkonovú aplikačnú oblasť. Na identifikačnej metóde hodnoty vnútorného tepelného odporu v súčasnosti pracujeme. Po jej overení v praxi predpokladáme publikovanie výsledkov v tomto časopise.

Literatúra:

- [1] ŠPÁNIK, P. – FEŇO, I. – KÁCSOR, G. – LOKŠENINEC, I.: *Ekologicky optimálne riešenie výkonových polovodičových meničov (Advances in Electrical and Electronic Engineering (AEEE))*. 2003, Vol. 2, No. 1, pp. 48–51.
- [2] FEŇO, I. – ŠPÁNIK, P. – LOKŠENINEC, I.: *The Soft-Switching Tester and Applications*. In proceedings: EPE 2003, Toulouse, France, 2–4 September 2003, paper No. 285. P1–P6. ISBN 90-75815-07-7.
- [3] FEŇO, I.: *IGBT switching optimisation and verification in Partial-Series-Resonant-Converter*. PhD. dissertation. University of Zilina, Faculty of Electrical Engineering, Department of Power Electrical Systems, August 2003, Slovakia.
- [4] DUDRÍK, J.: *Návrh vyhladzovacej indukčnosti pre spínané zdroje s premenlivým napätím*. EE, 8/2002, č. 5, s. 6–7.
- [5] DZURKO, P. – DUDRÍK, J.: *Improved Multiresonant DC- to-DC converter for Arc Welding*. In Proceedings: EDEP'01, High Tatras, pp. 266–300.
- [6] KOVÁČ, D. – KOVÁČOVÁ, I.: *Simulation Models of Power IGBT and its Verifying by Measurement*. In: Proceeding of International Conference MICROCAD'99, Miskolc, Hungary, 1999, pp.67–70.
- [7] KOVÁČ, D. – KOVÁČOVÁ, I.: *Výkonové tranzistory MOSFET a IGBT*. Vydavateľstvo Elfa s. r. o., Košice, 1996, 117 strán. ISBN 80-88786-34-7.
- [8] Siemens-Matshushita: *CDROM: Technical Product Information – Passive Components*. 1997.
- [9] Siemens-Matshushita: *Siemens-Matshushita Components*. Application Notes, 1997, München.

Autori vyjadrujú poďakovanie slovenskej grantovej agentúre VEGA a Rade štátnych programov za financovanie výskumnej činnosti prostredníctvom grantového projektu VEGA č. 1/0178/03 a projektu VaV č. 2003 SP 51/028 09 00/028 09 05 – 2003, v rámci ktorých bol napísaný tento článok.