

Stanisław SAKOWICZ
Zbigniew ZAKRZEWSKI

PROBLEMY CHŁODZENIA ELEMENTÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH W FALOWNIKACH WIELKIEJ MOCY*)

STRESZCZENIE *Zamieszczono charakterystykę rury ciepłej wykorzystanej do chłodzenia elementów energoelektronicznych dużej mocy. Na przykładzie falownika napięcia z tyrystorami IGCT o mocy 1,2 MVA dokonano obliczeń temperatury złącz diod i tyrystorów obwodu głównego falownika.*

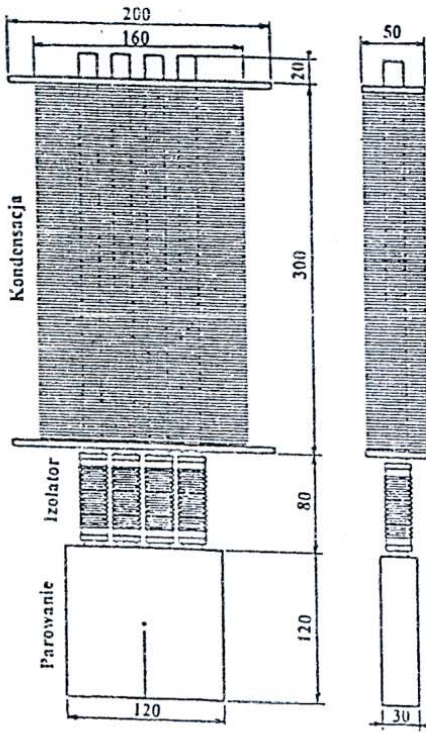
1. WPROWADZENIE

Zagadnienia odprowadzania ciepła wydzielanego w elementach energoelektronicznych falowników wielkiej mocy są niezwykle trudne technologicznie. Przy jednoczesnych ograniczeniach co do wymiarów radiatora, z uwagi na konieczność minimalizacji pasożytniczych indukcyjności połączeń, wymagana jest zdolność do odprowadzania dużych ilości ciepła.

*) Praca wykonana w Instytucie Elektrotechniki - Warszawa w ramach projektu badawczego nr 8 T 10 044 18 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2000-2001.

mgr inż. Stanisław SAKOWICZ, mgr inż. Zbigniew ZAKRZEWSKI

Zakład Przekształtników Mocy
Instytut Elektrotechniki



Rys.1. Rury cieplne typ HP-180/4 firmy SGE - BOSARI.

W oferowanych aktualnie falownikach średniego napięcia o mocy do 2.5 MVA z tyrystorami GTO, do chłodzenia elementów energoelektronicznych stosowane są systemy wymuszonego chłodzenia powietrznego lub cieczowego umożliwiające odprowadzanie strat mocy rzędu 1 kW z pojedynczego elementu. Wpływ występujących pasożytniczych indukcyjności połączeń ograniczany jest obwodami odciażającymi, które są, niestety, źródłem strat komutacyjnych.

Pojawienie się na rynku tyrystorów wyłączalnych komutowanych zintegrowaną bramką (IGCT) o napięciach 6 kV i prądzie do 4 kA stwarza potencjalne możliwości budowy jednostek średniego napięcia o mocy kilku MVA, przy czym wspomniane wyżej problemy odprowadzania strat mocy oraz zjawisk komutacyjnych (brak obwodów odciażających) stają się ostrzejsze.

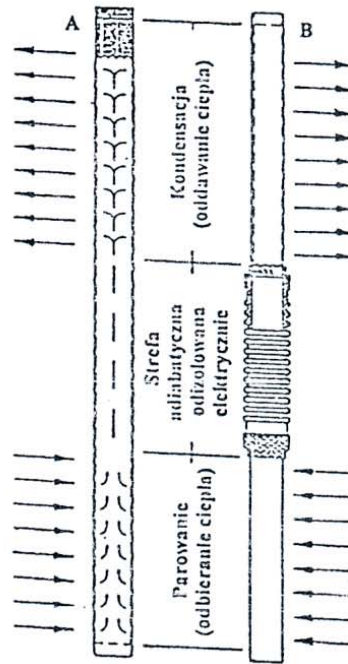
Tym trudnym wymaganiom sprostać może zastosowanie elektrycznie odizolowanej chłodnicy wykorzystującej efekt rury cieplnej. Transport ciepła pomiędzy dwoma ośrodkami za pośrednictwem rury cieplnej wypełnionej cieczą odbywa się tu na zasadzie zjawisk termodynamicznych parowania i kondensacji a siły grawitacyjne i kapilarne powodują krążenie czynnika chłodzącego wewnątrz rury. Gdy jeden koniec rury jest nagrzewany przez zewnętrzne źródło ciepła, czynnik wypełniający rurę paruje i przemieszcza się w kierunku drugiego jej końca wykazującego niższą temperaturę. Tu następuje kondensacja pary (oddawanie ciepła) i powrót czynnika w postaci ciekłej do strefy parowania.

Intensywne odbieranie ciepła przy wykorzystaniu wymuszonej konwekcji pozwala tym sposobem odprowadzić straty mocy ponad 1000 W przy przyroście temperatury elementu chłodzonego rzędu 60 K.

Rury cieplne zazwyczaj składają się z trzech części (rys.2), z których jedna jest konstrukcyjnie dostosowana do styku z chłodzonym elementem, część środkowa izolowana elektrycznie lub galwanicznie połączona z trzecią

częścią, w której następuje kondensacja czynnika chłodzącego. Ta część charakteryzuje się możliwością intensywnego odbierania ciepła np. przez ożebrowanie lub możliwość przyłączenia wymiennika ciepła. Transport ciepła pomiędzy parownikiem i kondensatorem rury ciepłej odbywa się praktycznie bez spadku temperatury, ponieważ przewodność cieplna rury ciepłej w tym fragmencie jest 4-5 rzędów większa w stosunku do przewodności cieplnej miedzi.

W artykule omówiono zastosowanie do chłodzenia tyrystorów i diod mocy radiatorów z rurami cieplnymi na przykładzie falownika napięcia o mocy 1.2 MVA wyposażonego w tyrystory technologii IGCT.



Rys.2. Zasada działania rury ciepłej: a) bez izolacji elektrycznej, b) z izolacją elektryczną.

2. FALOWNIK

Rozważany jest 3-fazowy falownik napięcia PWM o mocy 1.2 MVA o następujących parametrach:

- napięcie obwodu pośredniczącego $U_0 = 950 \text{ V}$,
- prąd obciążenia $I_N = 1000 \text{ A}_{\text{RMS}}$,
- stromość prądu tyrystora $di/dt = 300 \text{ A}/\mu\text{s}$,
- maks. częstotliwość wyjściowa $f_{\text{maks}} = 52 \text{ Hz}$,
- min. częstotliwość wyjściowa $f_{\text{min}} = 5 \text{ Hz}$,
- częstotliwość modulacji $f_m = 450 \text{ Hz}$.

Wstępna analiza strat mocy w tyrystorach i diodach falownika wykazała, że ich wartości mogą w pewnych warunkach obciążenia (częstotliwość, współczynnik mocy) przekraczać wartość 1 kW z jednego elementu. Zdecydowało to o zastosowaniu wysokowydajnego systemu chłodzenia elementu z radiatorem

wyposażonym w rury ciepłone. Ponadto, odprowadzanie strat mocy przy małym spadku temperatury umożliwia, jeśli jest to konieczne, wydzielenie zespołu elementów falownika np. w bloku pyłoszczelnym co może być rozwiązaniem problemów koordynacji izolacji.

Przyjęto, że tyrystory falownika (6szt.) oraz diody zwrotne (6szt.) stanowią będą zwartą konstrukcję wyposażoną w radiatory typu HP-180/4 (rys.1) chłodzone powietrzem, którego obieg wymuszony jest wentylatorem FCO56-4DQ.6F.3.

Radiatory typu HP-180/4 charakteryzują się następującymi parametrami technicznymi:

- rezystancja cieplna $< 0.045 \text{ K/W}$ przy $V_p=5 \text{ m/s}$
 $< 0.05 \text{ K/W}$ przy $V_p=2.5 \text{ m/s}$
- spadek ciśnienia $dP=240 \text{ Pa}$ przy $V_p=5 \text{ m/s}$
 $dP=100 \text{ Pa}$ przy $V_p=2.5 \text{ m/s}$

Określony przez producenta minimalny czas pracy bezawaryjnej radiatora wynosi 50 tys. godzin a okres jego użytkowania (do całkowitego zniszczenia) ponad 12 lat.

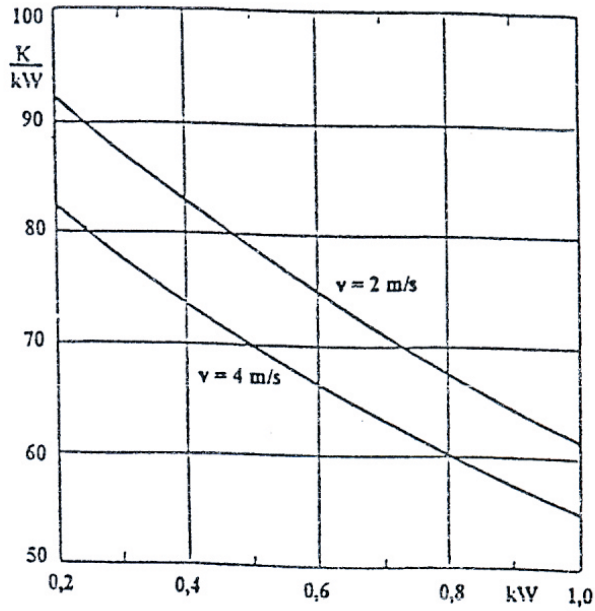
Inne właściwości radiatorów HP-180/4 ujmuje tab.1 a charakterystyki eksploatacyjne przedstawia rys.3.

TABELA 1

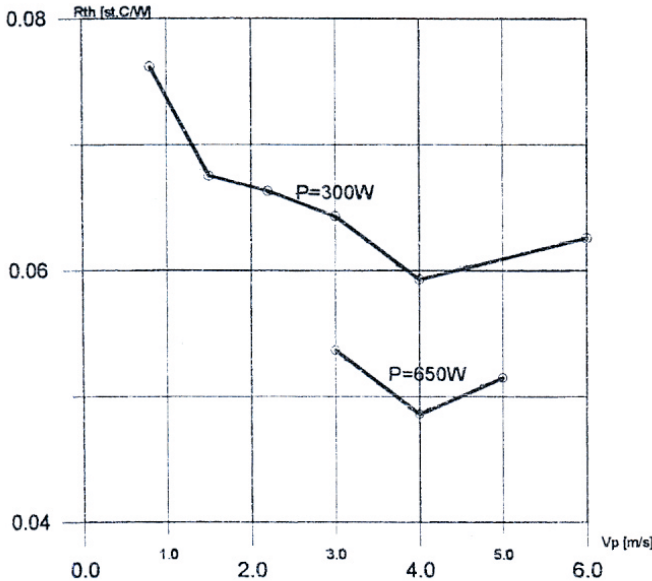
Właściwości chłodnicy z rurami ciepłnymi typu HP-180/4 (SGE-BOSARI) dostosowanej do dwustronnego chłodzenia przyrządów energoelektronicznych w obudowach symetrycznych płaskich (pastylkowych).

Cecha lub parametr	Wartość (lub informacje)
Wytrzymałość dielektryczna izolatora	15 kV
Moc rozpraszana przy $\Delta T = 60 \text{ K}$	Do 1 KW
Rezystancja cieplna (rys.4)	60 K/kW
Zakres temperatur działania	-30.....100°C
Czynnik chłodzący	FC 72
Pozycja podczas działania	Pionowa (część kondensacyjna u góry) lub pozioma
Średnica powierzchni odbierającej ciepło	75 mm
Materiał rury ciepłej	Miedź (Cu)
Liczba rur w zestawie	4 szt. - $\varnothing 16 \text{ mm}$
Liczba żeber miedzianych i ich grubość	115-0,3 mm (odstęp 2,5 mm)

Pomiary weryfikacyjne wartości rezystancji cieplnej radiatorów przeprowadzone w IEL, których wyniki ilustruje rys.4, potwierdziły zgodność z wartościami deklarowanymi przez producenta radiatorów. Dodatkowo zauważono, że dla danego rozwiązania konstrukcyjnego kanału wentylacyjnego może występować optymalna wartość prędkości przepływu powietrza chłodzącego, przy której uzyskuje się minimalną wartość rezystancji cieplnej radiatora co powinno być uwzględnione przy projektowaniu systemu chłodzenia elementów przekształtnika.



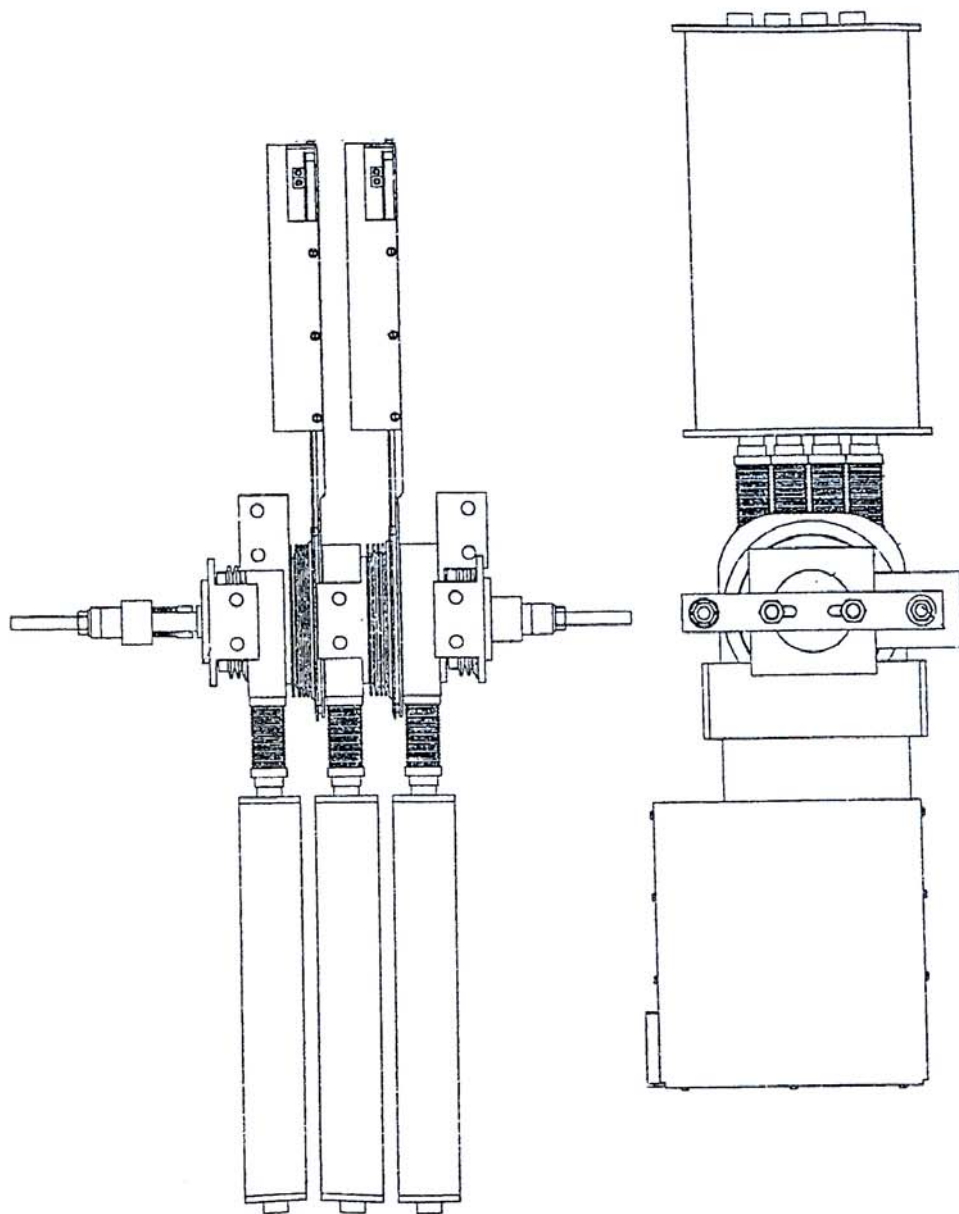
Rys.3. Deklarowane charakterystyki eksploatacyjne rury cieplnej typu HP-180/4. Rezystancja cieplna (K/kW) w funkcji rozpraszanej mocy (kW) dla dwóch prędkości przepływu powietrza między żebrami rury.



Rys.4. Pomiary weryfikacyjne rezystancji cieplnej radiatora typu HP - 180/4.

Wyznaczona podczas pomiarów cieplna stała czasowa radiatora wynosi 60 s. Właściwe określenie obciążenia cieplnego radiatora ma kluczowe znaczenie dla prawidłowej oceny warunków cieplnych chłodzonych elementów.

W zespole jednej fazy rozważanego falownika są 3 radiatorów odprowadzające ciepło od diod i tyristorów (rys.5).



Rys.5 Jedna faza falownika.

Do obu stron radiatora środkowego dopływa strumień ciepła odpowiadający połowom strat mocy w tyrystorze. W przypadku radiatorów skrajnych, z jednej strony dopływa strumień ciepła odpowiadający połowie strat mocy w tyrystorze, z drugiej strony strumień ciepła odpowiadający stratom w diodzie zwrotnej.

3. TYRYSTORY FALOWNIKA

W czasie pracy falownika w tyrystorach wydzielają się straty mocy związane z przewodzeniem prądu (straty przewodzenia) oraz straty związane z cyklicznie powtarzającymi się stanami dynamicznymi załączania i wyłączenia.

W falowniku zastosowano tyrystory IGCT typu 5SHY 35L 4503 f-my ABB o następujących danych:

- napięcie progowe $U_{F(TO)}=1.2$ V,
- nachylenie char. przewodzenia $r_T = 0.37$ m Ω ,
- energia załączania $E_{ON} = 1$ Ws przy: $V_D=2800$ V; $I_T=4000$ A;
 $dI/dt = 360$ A/ μ s,
- energia wyłączenia $E_{OFF} = 16$ Ws przy: $V_D=2800$ V; $I_T=4000$ A; $V_{DM}=4500$ V,
- maksymalna temperatura złącza $T_j=125^\circ$ C,
- rezystancja cieplna tyrystora $R_{thJC}=12$ K/kW,
- rezystancja cieplna przejścia $R_{thCH}= 3$ K/kW.

Straty przewodzenia dla założonych warunków pracy tyrystora tj. $I_{T(AV)}=450$ A, odpowiadającego prądowi falownika $I_N=1000$ A oraz częstotliwości wyjściowej falownika $f=50$ Hz, wyznaczone przy uwzględnieniu modulacji PWM wg. algorytmu $U/f = \text{const}$, wynoszą $P_F=503$ W.

Straty załączania sprowadzone do warunków pracy tyrystora w falowniku tj. $dI/dt=300$ A/ μ s oraz $U_D=950$ V wynoszą:

$$P_{ON} = f_m \cdot E_{ON} \cdot k1$$

gdzie:

- f_m – częstotliwość modulacji,
- E_{ON} – energia załączania,
- $K1$ – współczynnik korekcyjny warunków pracy tyrystora.

Dla omawianego przypadku $P_{ON}=17$ W.

Straty wyłączenia sprowadzone do warunków pracy tyrystora w falowniku tj. $I_{T(AV)}=450$ A oraz $U_D=950$ V wynoszą:

$$P_{OFF} = f_m \cdot E_{OFF} \cdot k_2$$

gdzie:

f_m – częstotliwość modulacji,

E_{OFF} – energia wyłączenia,

k_2 – współczynnik korekcyjny warunków pracy tyrystora.

Dla omawianego przypadku $P_{OFF}=272$ W.

Straty mocy całkowite w tyrystorze wyniosą:

$$P_{TYR} = P_F + P_{ON} + P_{OFF}$$

Dla rozpatrywanego przypadku $P_{TYR}=792$ W.

Dla innych wybranych wartości prądu obciążenia falownika wartości poszczególnych strat mocy w tyrystorze kształtują się jak pokazano w tab.2.

TABELA 2

Prąd obc. $I_N(A_{RMS})$	Straty przew. $P_F(W)$	Straty przeł. $P_{ON}+P_{OFF}$	Straty całk. P_{TYR}
1000	503	289	792
900	441	263	704
800	381	234	615
700	324	204	528
600	269	175	444

4. DIODY FALOWNIKA

W falowniku zastosowano diody typu 5SDF 10H502 f-my ABB o następujących danych:

- napięcie progowe $U_{F(TO)}=1.6$ V,
- nachylenie charakterystyki $r_T = 1.1$ m Ω ,
- energia wyłączenia $E_{OFF} = 5.9$ Ws przy: $V_D=2700$ V,
- maksymalna temperatura złącza $T_j=115^\circ\text{C}$,

- rezystancja cieplna tyrystora (chl. 1-stronne) $R_{th,JC}=24$ K/kW,
- rezystancja cieplna przejścia (chl. 1-stronne) $R_{th,CH}=6$ K/kW.

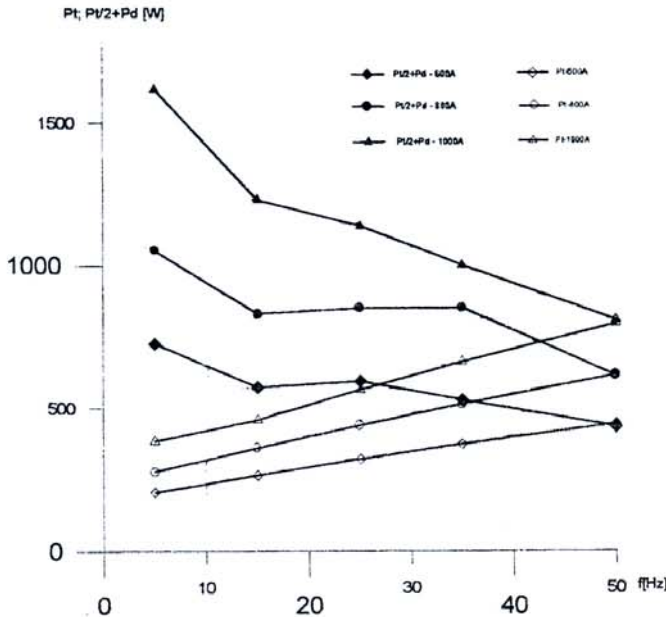
Podczas pracy falownika w diodach wydzielają się straty mocy, które zależą nie tylko od parametrów diody ale także od warunków pracy falownika (wysterowanie, kąt fazowy obciążenia). Przy czym wzrostowi strat mocy w diodzie towarzyszy malenie strat mocy w skojarzonym z nią tyrystorze.

W tabeli 3 podano przykładowo wartości wyznaczonych strat mocy w diodzie zwrotnej dla założonego obciążenia falownika $I_N=1000$ A i częstotliwości wyjściowej falownika w zakresie od 5 Hz do 50 Hz.

TABELA 3

Częstotliwość [Hz]	Straty przew. P_R [W]	Straty przeł. P_{OFF} [W]	Straty całk. P_D [W]
5	713	50	763
15	594	50	644
25	468	50	518
35	364	50	414
50	206	50	256

Ponieważ tyrystory i diody umocowano do wspólnych radiatorów, istotne jest więc dla określenia obciążenia cieplnego radiatora wyznaczenie sumarycznych strat mocy w parze tyrystor - dioda odprowadzanych przez wspólny radiator.



Rys.6. Straty mocy odprowadzane przez radiator HP-180/4 falownika.

Wyznaczone dla wybranych wartości częstotliwości oraz obciążenia falownika straty mocy odprowadzane przez radiatory pokazano na wykresie rys.6, z którego wynika, że dla tyrystora krytyczne warunki cieplne występują przy maksymalnej częstotliwości wyjściowej falownika, natomiast w przypadku diody zwrotnej jest to częstotliwość minimalna.

5. WENTYLATOR

Zespół falownika zawiera 3 zestawy (rys.5) złożone z 2-ch par tyrystor - dioda objęte wspólnym kanałem wentylacyjnym, którego czynny przekrój, wyznaczony przez radiatory HP 180/4, wynosi :

$$S_{KW} = 0.146 \text{ m}^2$$

Zakładając obciążenie falownika $I_N=1000\text{A}$, maksymalne straty mocy wydzielane w elementach zespołu wyniosą:

$$P_{TOT} = 6018\text{W}$$

Dla odprowadzenia odpowiadającej tej mocy ilości ciepła, przy założeniu przyrostu temperatury powietrza chłodzącego $dTp=15 \text{ K}$, konieczne jest wymuszenie przepływu powietrza chłodzącego z prędkością:

$$Vp > 0.24 \cdot P_{TOT} / (S_{KW} \cdot dTp \cdot Cw)$$

gdzie:

Cw - ciepło właściwe powietrza ($Cw=317 \text{ cal/m}^3/\text{K}$).

Dla rozpatrywanego przypadku $Vp=2.08 \text{ m/s}$, zatem wymagany wydatek powietrza wynosi:

$$Q_{MIN} = Vp \cdot S_{KW} = 1103 \text{ m}^3/\text{h}$$

Z charakterystyki przyjętego wentylatora FC 056-4DQ.6F3 wynika, że dla wydatku $Q=1100\text{m}^3/\text{h}$ uzyskuje się spadek ciśnienia $dP=360 \text{ Pa}$, co w odniesieniu

do jednego radiatora zestawu wynosi $dP=120$ Pa. Taki spadek ciśnienia odpowiada, wg. charakterystyki radiatora, prędkości przepływu powietrza pomiędzy żebrami radiatora $V_p=2.5$ m/s, dla którego rezystancja cieplna wynosi $R_{thH-a}=45$ K/kW. Ponadto spełniony jest warunek założonego minimalnego wydatku powietrza chłodzącego ($V_p>2.08$ m/s).

6. TEMPERATURA ZŁĄCZA ELEMENTÓW

Ocenę przyjętego systemu chłodzenia tyrystorów i diod falownika opiera się na określeniu temperatury złącza tych elementów z uwzględnieniem warunków ich obciążenia i zainstalowania.

Temperatura złącza tyrystora rozważanego falownika wyraża się zależnością:

$$T_{JT} = Ta + (P_D + 0.5 \cdot P_{TYR}) \cdot R_{th H-a} + 0.5 \cdot P_{TYR} \cdot (R_{th C-H} + R_{th J-K})$$

gdzie:

- Ta - maksymalna temp. powietrza chłodzącego (50°C),
- P_{TYR} - straty mocy w tyrystorze (792 W ; 600 W),
- P_D - straty mocy w diodzie (256 W ; 700 W),
- $R_{th J-K}$ - rezystancja cieplna tyrystora złącze - katoda (0.03 K/W),
- $R_{th C-H}$ - rezystancja cieplna przejścia do radiatora (0.006 K/W),
- $R_{th H-a}$ - rezystancja cieplna radiatora (0.045 K/W),

skąd dla rozpatrywanego przypadku, dla warunków obciążenia ($I_N=1000$ A; $f=50$ Hz) oraz chłodzenia ($R_{th H-a}=45$ K/kW) przy założeniu ponadto, że maksymalny przyrost temperatury powietrza chłodzącego $dTp=10$ K, otrzymujemy $T_{JT}=94^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C}$, zaś dla przypadku $f=30$ Hz; $T_{JT}=106^\circ\text{C} < 125^\circ\text{C}$, co świadczy o właściwych warunkach chłodzenia tyrystorów falownika.

W przypadku diody zwrotnej falownika temperatura jej złącza wyniesie:

$$T_{JD} = Ta + (P_D + 0.5 \cdot P_{TYR}) \cdot R_{th H-a} + P_D \cdot (R_{th C-H} + R_{th J-C})$$

gdzie:

- $R_{th J-C}$ - rezystancja cieplna diody (0.024 K/W).

Dla określonych wyżej warunków obciążenia oraz chłodzenia, otrzymujemy dla $f=50$ Hz $T_{jD}=87^{\circ}\text{C} < 115^{\circ}\text{C}$, zaś dla przypadku $f=30$ Hz; $T_{jD}=116^{\circ}\text{C}$. Wyznaczone wartości przyrostów temperatury złącza wskazują, że warunki pracy elementów energoelektronicznych falownika, a zwłaszcza diod przy obniżonej do 30 Hz częstotliwości wyjściowej falownika, stają się bardzo trudne. Przy dalszym obniżaniu częstotliwości wyjściowej należy liczyć się z koniecznością redukcji obciążalności falownika.

7. PODSUMOWANIE

Przytoczone przykładowe obliczenia dotyczące systemu chłodzenia tyristorów i diod falownika napięcia o mocy 1,2 MVA pokazują, że obciążenia cieplne na jakie mogą być one narażone są znaczne i odprowadzanie generowanych strat mocy nasuwa szereg problemów.

Właściwości radiatorów z rurami cieplnymi, takie jak niska wartość ich rezystancji cieplnej oraz możliwość minimalizacji długości połączeń pomiędzy elementami, a przez to zredukowanie indukcyjności pasożytniczych, daje szansę rozwiązania tych problemów i rozszerza możliwości budowy falowników wielkiej mocy o wyższych parametrach.

W przypadkach środowiska o dużym zapyleniu, gdy wymagane są znaczne odstępy izolacyjne, możliwość odprowadzenia strat poza obszar szczelnej konstrukcji przekształtnika może być jedyną szansą na spełnienie wymogów w zakresie koordynacji izolacji przekształtnika.

LITERATURA

1. Pouziti tepelnych trubic v technicke praxi. Sbornik referatu k seminari konanemu v Praze 7.11.1985r.
2. Polasek F. Heat Pipe Reserch and Development in East European Countries. Proceeding of the 5 th Int. Heat Pipe Conference. Tsukuba May 14-18 1984. Vol.2.pp 15-51.
3. IGCT-a New Ennerging Technology for High Power, Low Cost Inverters. IEEE IAS New Orleans 97.
4. Gate Comutated Thyristors (IGCT). EPE Trondheim 97.
5. iGCTs - megawatt power switches for medium - voltage aplications ABB Rewiew Zurich 97.
6. IGCTs- Megawatt - Halbleiterschalter fuer den Mittelspannungsbereich ABBTechnik 3/97.

Rękopis dostarczono, dnia 30.10.2001 r.

Opiniował: prof. dr hab. Marian P. Kaźmierkowski

SOME PROBLEMS OF SEMICONDUCTOR DEVICES COOLING IN HIGH POWER CONVERTERS

S. SAKOWICZ, Z. ZAKRZEWSKI

SUMMARY *The paper presents characteristics of pipes used for cooling of high power semiconductor devices. Voltage source 1,2 MVA inverter with IGCT thyristors is used as an example for calculating of junction temperatures of diodes and thyristors in power circuit of the converter.*

Mgr inż. Stanisław Sakowicz urodzony w roku 1942. Wydział Elektryczny Politechniki Łódzkiej ukończył w 1966 r. W latach 1967 do 1972 pracował w Biurze Konstrukcyjnym Przekształtników w Zakładach ELTA w Łodzi. Od roku 1973 pracuje w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Jest współautorem wielu prac naukowo-badawczym dla przemysłu oraz ponad dwudziestu publikacji z zakresu układów przekształtnikowych.



Mgr inż. Zbigniew Zakrzewski urodzony w 1938 r. Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej ukończył w 1964 r. W latach 1964 do 1967 pracował w Zakładach ZWAR A-1. Od 1967 r. pracuje w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie, gdzie zajmuje się energoelektronicznymi napędami prądu przemiennego dużej mocy. Jest autorem lub współautorem około sześćdziesięciu artykułów w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz kilkunastu patentów.

