

# Zmanjšanje toplotnih izgub elektromagnetnega ventila

Simon Nosan<sup>1</sup>, Urban Tomc<sup>1</sup>, Katja Klinar<sup>1</sup>, Danjel Vončina<sup>2</sup>, Andrej Kitanovski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

<sup>2</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

E-pošta: [simon.nosan@fs.uni-lj.si](mailto:simon.nosan@fs.uni-lj.si)

## Heat loss reduction of an electromagnetic valve

**Abstract.** This paper explains a principle of reducing heat losses of solenoid valve in magnetocaloric cooling application. Magnetocaloric material is the core of operating structure. Other important parts are magnetic source (which can include permanent magnets or electromagnets) and hydraulic system. Heat gains are unwanted due to reduction of total efficiency and cooling power.

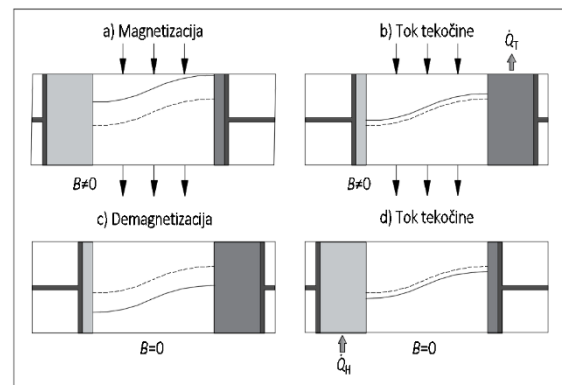
### 1 Uvod

Magnetno hlajenje pri temperaturi okolice je okolju prijazna tehnologija v razvoju, ki veliko obeta. V prihodnosti bi lahko nadomestila razširjeno parno-kompresorsko tehnologijo. Tehnologija magnetnega hlajenja temelji na t. i. magnetokaloričnem efektu (MKE), prisotnem v magnetokaloričnih materialih (MKM) ob spremenljivem magnetnem polju. Ob magnetizaciji MKM temperatura v njem naraste, medtem ko ob demagnetizaciji upade [1]. Zaradi svetovne težnje po napravah s čim višjim izkoristkom je potrebno spreminjanje magnetnega polja izvajati čim bolj učinkovito, sicer se vloženo delo pretvori v toploto. Dandanes je večina raziskav s področja magnetenja MKM usmerjenih v trajne magnetne [2-4]. Ti za obstoj magnetnega polja ne potrebujejo dovoljanja energije, potrebujejo pa gibljiv sklop za spreminjanje magnetne poljske jakosti v MKM. MKM je oblikovan v porozno strukturo, ki jo imenujemo aktivni magnetni regenerators (AMR). Preko njega se pretaka tekočina za prenos toplote, za katero je potreben hidravlični sistem primerne vezave, ki omogoča pretok tekočine v eno ali drugo smer. S stališča AMR je nezaželeno, da bi hidravlični sistem vplival na hladilni sistem s toplotnimi dobrotki, zato je v prispevku obširneje predstavljen način, kako zmanjšati del toplotnih dobrotkov hidravličnega sistema.

### 2 Aktivni magnetni regenerators

AMR je porozna struktura iz MKM in predstavlja osrednji del magnetne hladilne naprave. Magnetna hladilna naprava poleg AMR vsebuje še magnetilni sistem, ki je lahko izveden s pomočjo trajnih magnetov ali z elektromagnetno strukturo. Hidravlični sistem sestavljata dva zunanja prenosnika toplote, tekočina za

prenos toplote, štiri ventili za usmerjanje toka tekočine in črpalka. Tekočina prenaša toploto iz AMR na okolico preko zunanjih prenosnikov toplote. Tekom delovanja naprave se izvajajo štiri faze, ki jih lahko vidimo na sliki 1:



Slika 1: Štiri glavne faze delovanja AMR.

A: magnetenje, ko se MKM zaradi MKE segreje.

B: Tok tekočine iz hladnega prenosnika toplote skozi segret MKM v tople prenosnik toplote, pri čemer ohranjamo konstantno (visoko) magnetno polje. Tekočina, namenjena prenosu toplote, se ob obtakanju MKM segreje, MKM pa se ohladi. V tople prenosnik toplote vstopa tekočina s temperaturo, ki je višja od okoliške, zato odda toploto v okolico.

C: Razmagnetenje, ko se MKM zaradi MKE ohladi.

D: Tok tekočine iz toplega prenosnika toplote skozi ohlajen MKM v hladni prenosnik toplote, pri čemer ohranjamo konstantno (nizko) magnetno polje. Tekočina, namenjena prenosu toplote, se ob obtakanju MKM ohladi, MKM pa se segreje. V hladni prenosnik toplote vstopa tekočina s temperaturo, ki je nižja od temperature hlajenega prostora, zato iz njega absorbira toploto.

### 3 Krmiljenje ventilov

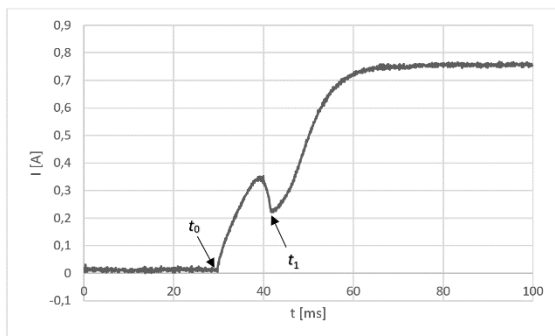
Smer pretoka tekočine skozi MKM spreminjamo s štirimi električno krmiljenimi direktnimi 2/2 (NC) solenoidnimi ventili. Tekočina enkrat ogreva, drugič ohlaja AMR, zato je pomembno, da nanjo ne vplivamo nekontrolirano. Ventili se ob svojem delovanju segrevajo, s stališča delovanja naprave pa bi bilo bolje, če se ne bi. Zato je v nadaljevanju opisan način, kako zmanjšati izgube na ventilu in s tem prenos toplotnih dobrotkov na tekočino.

Znotraj ventila je navitje, ki ob električnem toku generira magnetno polje. Takrat magnetna sila pritegne feromagnetno jedro – ventil se iz zaprtega stanja premakne v odprto. Čas preklopa iz enega stanja v drugo podaja proizvajalec za vsak ventil posebej ob predpisanih obratovalnih pogojih. Nanj lahko vplivamo z velikostjo magnetne sile, ki je odvisna od toka po navitju, vrednost toka pa je različna pri različnih priključnih napetostih. Ker je navitje ohmsko-induktivnega značaja, bo tok večji ob višji napetosti. Po odklopu napajalne napetosti vzmet vrne jedro ventila v prvotno (zaprto) stanje.

Največja vrednost toka skozi navitje ventila je odvisna od priključne napetosti, katere nazivno vrednost poda proizvajalec, in upornosti navitja, ki je določena s snovno-geometrijskimi lastnostmi navitja. Ker se energija ne more hipoma spremeniti, lahko po enačbi 1 vidimo, da se tudi tok skozi navitje ne bo hipoma spremenil – je zvezen.

$$W_{mag} = \frac{LI^2}{2} \quad (1)$$

Za primer vzemimo zaprt ventil, ki ga ob času  $t_0$  (glej sliko 2) priklopimo na napajanje.



Slika 2: Potek toka skozi ventil ob nazivni napetosti.

Tok najprej narašča po eksponentni funkciji, dokler ne doseže prvega maksimuma. Tedaj je magnetna sila dovolj velika, da začne premikati feromagnetno jedro proti zračni reži, zaradi česar se povečuje induktivnost tuljave. V enačbi 2 za inducirano napetost vidimo, da se mora ob nespremenjeni napajalni napetosti (ventil je priključen na napajalnik, ki vzdržuje konstantno napetost) in ob povečevanju induktivnosti, tok zmanjševati.

$$U_i = \frac{d(LI)}{dt} + RI \quad (2)$$

Ko se jedro ne more več premikati, se induktivnost ne spreminja več. Feromagnetno jedro bo v končni poziciji tako, da bo magnetni pretok skozi njega največji, kar vidimo na sliki 2 ob času  $t_1$ . Tok potem še nekaj časa narašča, nato pa se ustali – prehodni pojav izzveni. Takrat je priključna napetost enaka ohmskemu padcu na navitju.

V odprtem stanju ventila se bo na njem trošila moč v obliki toplote, ki jo lahko opišemo z enačbo 3.

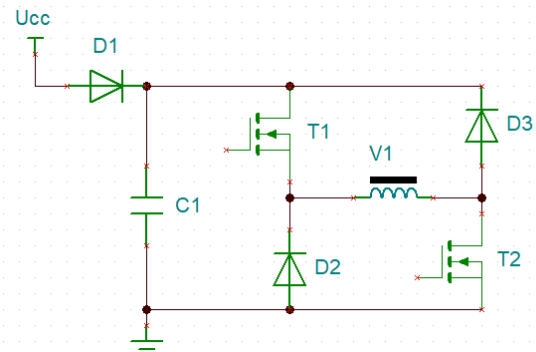
$$P_{joule} = RI^2 \quad (3)$$

Sila, ki jo potrebujemo za držanje feromagnetnega jedra v poziciji, ko je ventil odprt, je zaradi mirujočega

jedra v končni legi sedaj manjša, kot na začetku, ko je morala hitro premakniti jedro. Magnetna upornost je po premiku v odprto stanje najmanjša zaradi najmanjše zračne reže. Držalno magnetno silo lahko zmanjšamo do te mere, da bo še vedno večja od sile vzmeti, vendar manjša od maksimalne vrednosti. S tem se zmanjša tudi potreben tok skozi navitje, ki nam magnetno silo ustvarja, to pa pomeni manjše toplotne izgube.

### 3.1 Uporaba pulzno širinske modulacije

Tok skozi navitje elektromagneta lahko zmanjšamo s pomočjo pulzno širinske modulacije (PŠM) [5]. Vezje, ki dopušča napajanje ventila s PŠM, je prikazano na sliki 3.



Slika 3: Krmilno vezje.

Ventil  $V_1$  je preko MOSFET tranzistorjev  $T_1$  in  $T_2$  vezan na kondenzator  $C_1$ , ki se napaja preko diode  $D_1$  iz napajalnika  $U_{cc}$ . Ob vklopu krmilnega signala na tranzistorjih, ki je isti za  $T_1$  in  $T_2$ , bosta oba tranzistorja v prevodnem stanju. Tok bo iz napajalnika stekel skozi diodo  $D_1$ , tranzistor  $T_1$ , ventil  $V_1$ , tranzistor  $T_2$  in se zaključil v napajalnik. Ob električnem toku skozi ventil je v njem shranjene nekaj magnetne energije. Ko krmilni signal na tranzistorjih izklopimo, se le-ti zaprejo. Tok bo prešel iz ventila na diodo  $D_3$ , stekel v kondenzator  $C_1$  in se zaključil preko diode  $D_2$  nazaj do ventila  $V_1$ . V tem primeru imamo ob vklopu in izklopu ventila enak prehodni pojav, saj je višina inducirane napetosti ob vklopu in izklopu enaka (ob kondenzatorju z dovolj veliko kapacitivnostjo, da napetost na njem ne zraste bistveno). Torej potrebuje ventil enako časa za preklop iz zaprtega stanja v odprto in obratno.

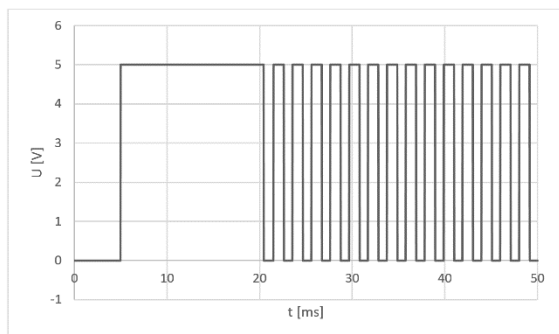
Za vzdrževanje ventila v odprtem stanju je potrebno dovajati vsaj tolikšno moč, da vzmet jedra ne potisne nazaj v zaprto stanje. Vse, kar je več od tega minimuma, se pretvori v nepotrebno dodatno toploto. Vendar pa morajo biti za zagotavljanje preklonih časov ventila s strani proizvajalca prisotni nazivni obratovalni pogoji, kar lahko dosežemo s kombinacijo nazivne vrednosti napetosti in PŠM.

### 3.2 Kombinacija nazivne vrednosti napetosti in PŠM

V nadaljevanju je predstavljen princip krmiljenja, kjer ventilu omogočimo hiter preklop skupaj z nizkim

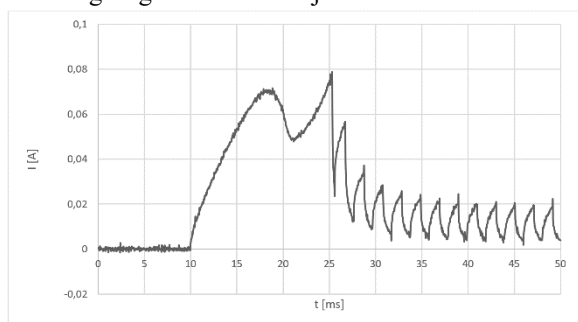
segrevanjem v odprtem stanju. Proizvajalec ventilov običajno poda preklonni čas ventila iz zaprtega v odprto stanje. Med tem časom se na ventilu zahteva nazivna priključna napetost, po tem času pa je lahko napetost nižja. Krmilni signal tranzistorja mora biti na visokem nivoju vsaj za čas preklopa, potem pa se lahko spreminja glede na frekvenco in delovno razmerje PŠM.

Na sliki 4 vidimo krmilni signal za tranzistorja.



Slika 4: Krmilni signal za tranzistorja.

Na začetku je tranzistor izklopljen in s tem tudi ventil zaprt. Sledi visok nivo, ki mora biti prisoten vsaj toliko časa, da ventil zagotovo prekloni v odprto stanje. Potem sledi vklop in izklop krmilnega signala. Obliko toka, posneto na osciloskopu s tokovnimi kleščami, vidimo na sliki 5. Ob visokem nivoju krmilnega signala tok narašča, ob nizkem nivoju pa pada. Srednja vrednost toka, ko je ventil v prevodnem stanju, in s tem posledično magnetna sila, mora biti večja od sile vzmeti, ki potiska jedro ventila proti zaprtemu stanju. Opazimo, da je vrednost toka skozi ventil ob uporabi PŠM po 20 ms od vklopa krmilnega signala znatno nižja.



Slika 5: Tok skozi ventil ob PŠM.

V naslednjem podpoglavju si bomo ogledali, kako lahko ovrednotimo zmanjšanje potrebnega toka skozi ventil v prevodnem stanju.

### 3.3 Določanje toplotnih izgub ventila

Toplota, s katero se segreva ventil, se pretvori iz električne energije. Moč, ki se troši na ventilu, je v vsakem trenutku enaka

$$P_V = U_V i_V \quad (4)$$

ali

$$P_V = R_V i_V^2 \quad (5)$$

kjer je  $U_V$  enosmerna nazivna napajalna napetost ventila,  $R_V$  upornost navitja v ventilu,  $i_V$  pa trenutna efektivna vrednost toka v navitju. Energija enega cikla delovanja ventila je odvisna od frekvence, s katero želi uporabnik preklapljeti ventil. V režimu delovanja, kjer ventil najprej priklopimo na enosmerno nazivno napetost, potem pa vklopimo PŠM, lahko energijo enega cikla, ki se na ventilu pretvori v toploto, razdelimo na dva prispevka: energijo za preklon in energijo, ko je magnetna sila zaradi PŠM manjša.

$$W_V = W_{preklop} + W_{PŠM} \quad (6)$$

Energija, ki jo dovedemo ventilu v času preklopa, se ne spreminja glede na obratovalno frekvenco. Preklon ventila je v vseh primerih enak, zato je enaka tudi energija za preklon. Energija, ki je potrebna za vzdrževanje prevodnega stanja, je odvisna od frekvence delovanja. Višja, kot je frekvenca, krajši bo čas, ko bo ventil v prevodnem stanju, torej bo posledično energija manjša.

Energijo, potrebno za preklon, bomo izračunali s pomočjo enačbe 4, ki jo je potrebno še pomnožiti s časom.

$$W_{V,preklop} = \int_{t_0}^{t_{preklop}} U_V i_V(t) dt \quad (7)$$

Moč integriramo v času od začetka vklopa krmilnega signala  $t_0$  do časa  $t_{preklop}$ , ko ventil prenehamo napajati z napajalno napetostjo in začnemo s PŠM načinom.

Nazivno napetost poda proizvajalec, časovni potek toka pa smo določili s pomočjo osciloskopa. Energijo v odprtem stanju ventila lahko določimo s pomočjo enačbe 5.

$$W_{V,ON} = \int_{t_{preklop}}^{t_{OFF}} R_V i_V^2(t) dt \quad (8)$$

Moč integriramo v času od preklopa ventila v prevodno stanje  $t_{preklop}$  do izklopa krmilnega signala ob času  $t_{OFF}$ , ko ventil preide v zaprto stanje.

## 4 Rezultati

V tem poglavju so podani rezultati izboljšav glede zmanjšanja toplotnih izgub na elektromagnetnem ventilu proizvajalca Jakša. V tabeli 1 so navedeni uporabljena oprema in elementi.

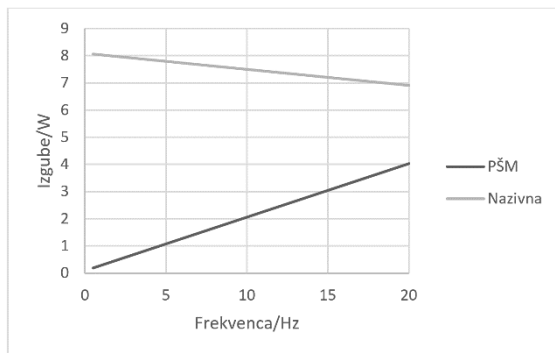
Tabela 1: Uporabljena oprema in elementi.

Oprema	Proizvajalec	Tip
Ventil	Jakša	D221
Osciloskop	Keysight	EDUX1002A
Tokovne klešče	Chauvin Arnoux	E3N 10A/V
Napajalnik	Tenma	DC 0-30V5AX2
Krmilnik	Arduino	Mega 2560
Diode	ON Semiconductor	MBR1045G
Tranzistorji	infineon	IRF540NPBF
Kondenzator	Panasonic	ECA-1VHG472

Nazivne vrednosti uporabljenega ventila, ki jih podaja proizvajalec, so:  $U_V = 24 \text{ V}$ ,  $P_V = 16 \text{ W}$ , nazivni prekopni čas iz zaprtega v odprto stanje pa 10 ms. Iz tega lahko določimo upornost navitja  $R = 36 \Omega$  in nazivni tok  $I = 0,67 \text{ A}$ .

Krmilni signal smo generirali s pomočjo krmilnika Arduino Mega, ki lahko na digitalnih izhodih generira PŠM signal prednastavljene frekvence 490 Hz. Delovno razmerje, ki je znašalo 50%, smo določili eksperimentalno tako, da smo izenačili tlačni padec in pretok skozi ventil ob napajanju s PŠM s tistim, ki ustreza obratovanju z nazivno napetostjo. Tako je ventil v obeh načinih krmiljenja popolnoma odprt. Čas, ko ventil prehaja iz zaprtega v odprto stanje, je podan s strani proizvajalca. Zaradi varnosti smo ta čas, ko je ventil priklopljen na nazivno napetost (pred izvajanjem PŠM), podaljšali z 10 ms na 16 ms.

Ker je prekopni čas ventila neodvisen od frekvence, s katero želimo odpirati in zapirati ventil, sta na sliki 6 podani moči na ventilu ob nazivnem delovanju in ob delovanju s PŠM, obe v odvisnosti od frekvence prekopov ventila iz zaprtega v odprto stanje in nazaj v zaprto. Izgube krmilne elektronike smo zanemarili, saj ne vplivajo na segrevanje ventila.



Slika 6: Primerjava izgub na ventilu.

Opazimo lahko, da je ob krmiljenju ventila s PŠM moč na njem ves čas nižja, kakor bi bila ob napajanju z nazivno napetostjo. Izgube se ob nazivnem delovanju s povečevanjem števila vklopov na časovno enoto znižujejo, kar je logično, saj tok takoj ob vklopu ne naraste skočno na nazivno vrednost. Torej se ob višjem številu vklopov na časovno enoto daljši delež časa nahajamo v prehodnem območju, ko je produkt napetosti in toka nižji, kot je ob povsem odprtem ventilu.

Po drugi strani potrebna moč ob krmiljenju ventila s PŠM narašča s številom prekopov v časovni enoti, kar lahko utemeljimo s tem, da je efektivna vrednost toka v času preklapljanja večja od toka ob času PŠM. Energija, potrebna za prekop, je neodvisna od frekvence, prišteje se ji pa še energija med PŠM, ki pa se s povečevanjem prekopov zmanjšuje.

Frekvenca prekopov ventila je izbrana glede na ostali hidravlični sistem, ki najbolje deluje pri nižjih frekvencah, zato nadaljnje povečevanje števila prekopov ni bilo izvedeno.

## 5 Zaključek

V prispevku je opisano zmanjšanje toplotnih izgub elektromagnetnega ventila, ki spreminja smer pretoka tekočine za prenos toplote. Toplotne izgube predstavljajo toplotne dobitke v hladilnem sistemu in ga nezaželeno segrevajo.

Zmanjšanje izgub na ventilu je izvedeno s pomočjo pulzno širinske modulacije. Predstavljena je električna shema, ustrezna oblika krmilnega signala, izračun potrebne energije za prekop ventila in rezultati. Potrebna moč za delovanje ventila s pomočjo pulzno širinske modulacije se izkaže za 7-krat manjšo od moči ob nazivnem delovanju pri frekvenci prekopov ventila 5 Hz. Z višanjem frekvence prekopov ventila pa metoda s pulzno širinsko modulacijo izgublja na prednosti.

## Literatura

- [1] Kitanovski A, Tušek J, Tomc U et al (2015) Magnetocaloric energy conversion: From theory to applications. Series: Green energy and technology. Springer Publications
- [2] Lu DW, Xu XN, Wu HB et al (2005) A permanent magnet magneto-refrigerator study using Gd/Gd-Si-Ge/Gd-Si-Ge-Ga alloys, in: First IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag I, Montreux, Switzerland, 2005, p 291-296
- [3] Okamura T, Yamada K, Hirano N et al (2005) Performance of a room-temperature rotary magnetic refrigerator. In: First IIF-IIR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Thermag I, Montreaux, Switzerland, 2005, p 319-324
- [4] Huang J, Liu J, Jin P et al (2006) Development of permanent magnetic refrigerator at room temperature. Rare Metals 25, Spec Issue, p 641
- [5] Taghizadeh M, Ghaffari A, Najaf F (2009) Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications, C. R. Mecanique 337: 131-140