

Сравнителен анализ на характеристиките на електрическите и термостатичните регулиращи вентили

Цветан Божков, Светослав Влашки, Йордан Стоянов

Резюме: Докладът представя сравнение в приложението на електрическите и термостатичните регулиращи вентили в съвременните хладилни системи. Направен е кратък обзор на двете технологии и анализ на възможностите за повишаване на енергийната ефективност на хладилните системи чрез приложение на EPB.

Ключови думи: EPB, TPB, хладилна система

Comparative performance analysis of electric and thermostatic expansion valves

Tsvetan Bozhkov, Sevtoslav Vlashki, Jordan Stoyanov

Resume: The following article represents comparison in the application of electric and thermostatic expansion valves in modern refrigeration systems. A short overview of the two technologies and analysis of the possibilities for increasing the energy efficiency of refrigeration systems with application of EEV is carried out.

Key words: EEV, TEV, refrigeration system

1. Въведение

Терминология

В настоящият доклад авторите използват понятието **Термостатичен Регулиращ Вентил** – **TPB** (от англ. **Thermostatic Expansion Valve** – **TEV**, от немски **Thermostatisches ExpansionsVentil** - **TEV**), считайки го за по-правилно от използваното – терморегулиращ вентил. Абревиатурата **EPB** авторите тълкуват като **Електрически Регулиращ Вентил**. Аргументът за това е, че, макар често срещан в практиката като електронен регулиращ вентил, самият вентил е съставен от чисто електрическа (стъпков електромотор или соленоид с котва) и механична част. Електронният контролер е неразделна част от работата на този тип вентили, но не представлява пряк елемент от тяхната конструкция.

Работата на регулиращата система дроселиращ вентил – разпределително устройство – изпарител влияе пряко, както върху ефективността и надеждността на хладилната система, така и върху прецизното поддържане на параметрите на охлаждащата среда. Макар и разпространени от десетилетия и изпълняващи успешно своята функция, термостатичните регулиращи вентили имат характеристики, които налагат определени ограничения в ефективността и прецизността на хладилните системи. Наложилата се алтернатива е замената на изцяло механичните TPB с електронно управлявани електрически регулиращи вентили. EPB са разработени едва през 70-те години на 20 век и със своите предимства са се наложили като утвърдена технология в развитите страни през последните две десетилетия, най-вече в търговските (комерсиалните) хладилни системи. В България, EPB навлизат първо чрез заводски изградените хладилни системи. Това са най-вече системите с променлив дебит на хладилния агент (VRF/ VRV), в основата на чиято технология стоят именно EPB, както някои водоохлаждащи и покривни агрегати и термopомпи. В тези системи практиката на хладилните специалисти по отношение на EPB се изразява най-вече в експлоатация на вентилите, т.е. диагностика и сервиз на възникнали повреди. В на място асемблираните системи, макар и тяхното приложение да нараства през последните две-три години, в България се наблюдава недобра информираност сред инженерите и техническите

специалисти ангажирани в бранша, по отношение на проектирането и инсталирането на хладилни системи използващи ЕРВ. Резултатът от това е значително ограниченото използване на възможностите на електрическите регулиращи вентили за подобряване на енергийната ефективност и цялостните технически характеристики на хладилните системи.

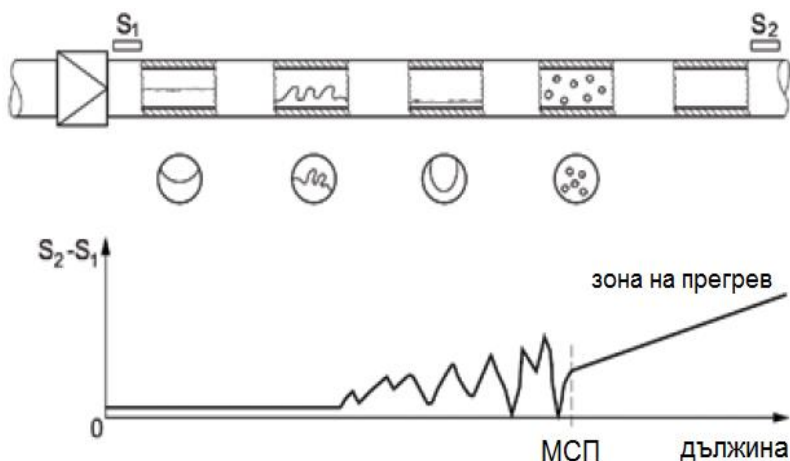
Докладът си поставя за цел да обърне внимание на следните аспекти:

- някои основни недостатъци в характеристиките на термостатичните регулиращи вентили
- принципът на работа на електрическите регулиращи вентили
- видове електрически регулиращи вентили и разликите между тях
- техническите и енергийните предимства на електрическите пред термостатичните регулиращи вентили

2. Минимален стабилен прегрев – МСП (от англ. minimum stable superheat – MSS)

Тази теория е разработена през 80-те години на 20 век и от тогава се прилага в алгоритмите на електронните управления, контролиращи работата на електрическите регулиращи вентили.

Фиг. 1 показва схематично процеса протичащ в изпарителя, който се разглежда като дълъг тръбопровод в чието начало се дроселира хладилен агент. По дължина на изпарителя, с развитие на процеса на фазов преход, се наблюдава прогресивно нарастване на паросъдържанието, до достигане на зона на прегрев, в която съдържанието на течен хладилен агент е минимално. МСП – линията описва стойностите на минималния стабилен прегрев, който изпарителя може да осигури при дадена хладилна мощност. Тя представлява границата между все още стабилния сигнал от прегрев и възникването на нестабилност вследствие на нарастващото съдържание на капчици хладилен агент в потока.



Фиг. 1 Процес в изпарителя [1]

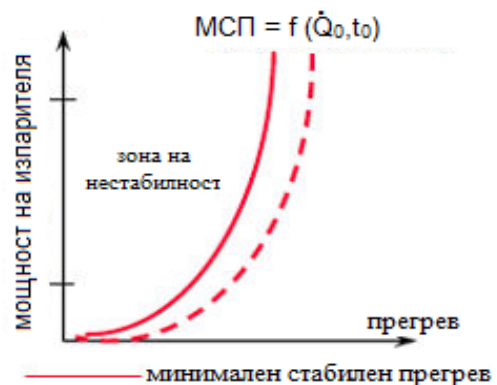
По продължение на МСП - линията се намират стойностите на оптималния прегрев, който означава най-висок EER/COP, както и най-висока мощност на изпарителя. В зависимост обаче от типа и конструкцията на изпарителя, измененията в топлинния товар и налягането (температурата) на изпарение, МСП линията се променя (Фиг. 2). С промяна на МСП линията се променят и стойностите на оптималния прегрев (Фиг. 3).

Ако прегревят се понижи твърде много, процесът преминава в зоната на нестабилност. Това на практика означава неустойчива работа на регулиращия вентил съответно и на цялата хладилна система, изразяваща се в резки колебания на прегрева и налягането (температурата) на изпарение, позната като "хънтинг" (от англ. hunting). Резултатът е

компрометиране на поддържаните параметри на охладаната среда, влошаване на ефективността и риск от повреда в следствие на мокър ход на компресора.



Фиг. 2 МСП - линия като функция от темп. на изпарение [2]



Фиг. 3 Промяна на оптималния прегрева като функция от товара [2]

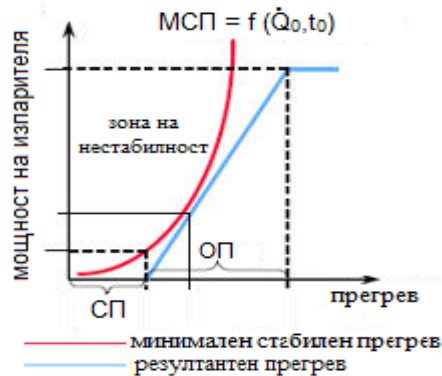
При редуциране на количеството хладилен ефект постъпващо в изпарителя, прегревът се увеличава и достига стабилни стойности, но с цената на увеличаване на частта от топлообменната повърхност, използвана за прегрев. Резултатът е понижаване на температурата на изпарение и ефективността на хладилната система.

3. Термостатични Регулиращи Вентили - ТРВ

Технологията на термостатичните регулиращи вентили е добре позната тематика, поради което настоящият доклад описва само някои основни характеристики на ТРВ, с цел те да послужат за база за сравнение с електрическите регулиращи вентили.

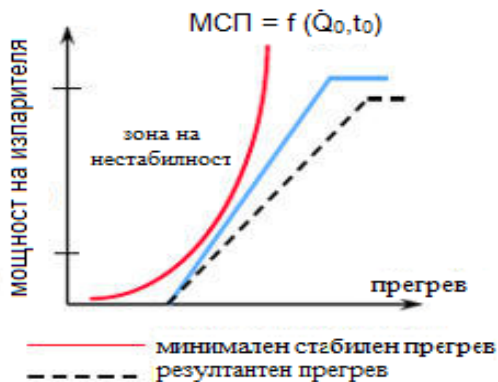
Положението на вентила се определя от баланса на три налягания – налягането на изпарение p_0 , което действа като затваряща сила, налягането на регулиращата пружина, което също действа като затваряща сила и налягането на термостатичния елемент, което се определя от температурата на парите хладилен агент на изхода на изпарителя и противодейства на p_0 и p_s като отваряща сила. ТРВ е механичен регулатор с пряко действие, т.е. не използва помощна енергия. Вентилът се нуждае от определен статичен прегрев – СП, за да се преодолее силата в регулиращата пружина и да започне неговото отваряне.

СП заводски е настроен нормално между $3 \div 5$ К. За да осигури дадена мощност ТРВ трябва да се отвори в определено положение при повишаване на прегрева. Прегревът осигуряващ това отваряне се нарича отварящ прегрев – ОП. Отварянето на вентила се осъществява по линейна характеристика, която определя ТРВ като П-регулатор (пропорционален регулатор). Пълното отваряне на вентила настъпва при около 6 К ОП, който отговаря на пропорционалния диапазон на вентила. Това означава, че при пълно отваряне изпарителят трябва да осигури работен прегрев – РП от около $(3 \div 5 \text{ К}) + 6 \text{ К} = 9$ до 11 К. Пропорционалната характеристика на вентила означава, че оптималният прегрев може да бъде постигнат само в една работна точка (Фиг. 4). При всички други работни условия прегревът не е оптимален.



Фиг. 4 Работна характеристика на TRV [2]

Регулиращата характеристика на TRV се определя от разликата между наляганията на кондензация и изпарение. Това е показано на Фиг. 5 чрез поставените под различен наклон мощности характеристики на вентила (мощност на вентила като функция от прегрева), отговарящи на зимен и летен работен режим. В този случай при достигане на определена разлика в наляганията през вентила (през лятото) настъпва неустойчиво регулиране на прегрева или „хънтинг“, при който осезателят реагира спорадично, на капчици течност напускащи изпарителя, който работи „на мокро“ (Фиг. 6). Статичният прегрев трябва да бъде увеличен. При по-малка разлика в наляганията през вентила (през зимата) изпарителят работи при по-висок прегрев. Необходимата за това допълнителна зона на прегрев ограничава ефективната топлообменна повърхност на изпарителя. Температурата на изпарение се понижава, което води от една страна до намаляване на ефективността, от друга страна до отделяне на по-голямо количество влага в изпарителя, т.е. изсушаване на въздуха в охлаждания обем и съхранявания не опакован продукт. Допълнителен резултат е увеличаване на заскрежаването, което означава повече и по-дълги цикли на обезскрежаване.



Фиг. 5 Характеристики на TRV в зимен и летен режим [2]



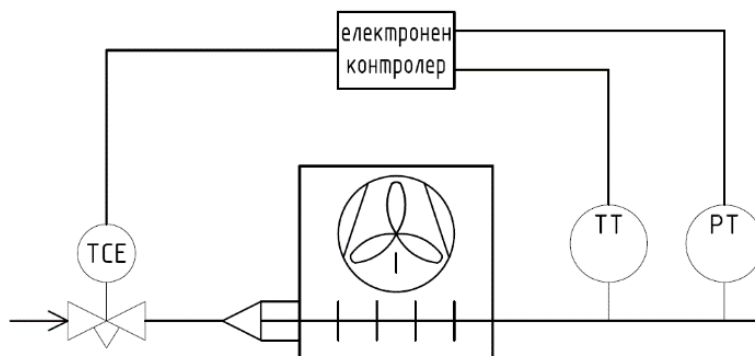
Фиг. 6 Пресичане на характеристика на TRV и МСП – линията [2]

Съществен недостатък на TRV е, че отварящата сила зависи от налягането в термостатичния елемент, което се определя от налягането на заряда. При ниски температури на изпарение това налягане се понижава. Като резултат при понижаване се температури на изпарение прогресивно намалява мощността на вентила. Този ефект трябва да се компенсира чрез повишаване на разликата в наляганията през вентила. Това налага „изкуствено“ поддържане на налягането на кондензация. При ниски температури на външния въздух минималното налягане на кондензация се ограничава до температура на насищане от около 25÷30 °C. Енергийните последици от тази мярка, поради увеличеното енергопотребление и по-дългите работни времена на системата, са съществени.

4. Електрически Регулиращи Вентили - EPB

Фиг. 7 представя схематично елементите съставлящи регулиращата система на EPB. Тя се състои от:

- регулиращ вентил с електрическа задвижка
- електронен регулатор с ПИ или ПИД – характеристика
- два сензора, съответно за температура и налягане



Фиг. 7 Регулираща система на EPB

Измерване на величините определящи прегрева

Прегревът се определя на същия принцип както при TPB, като разлика между измерената температура на хладилния агент и температурата на насищане, съответстваща на измереното налягане на изхода на изпарителя. Разликата е, че измерените температура и налягане се преобразуват в електрически сигнали, които не действат пряко върху положението на вентила.

Използва се и вариант с два температурни сензора, който е характерен не толкова за на място асемблираните хладилни системи, колкото за заводските, използвани в комфортната климатизация – системите с променлив дебит на хладилния агент и климатизаторите от разделен тип. При този вариант се получава грешка в измерването на прегрева, като неговата реална стойност е винаги по-голяма от измерената. Тази грешка съответства на пада на налягане в изпарителя и се изменя с квадрата на неговото натоварване, т.е. масовия дебит на хладилния агент.

EPB със стълков електромотор

Положението на този тип вентили се изменя плавно, в зависимост от броя на импулсите, които електронният контролер подава към стълковия електромотор. Ротационното движение на ротора се преобразува в линейно посредством винтогаечен механизъм.

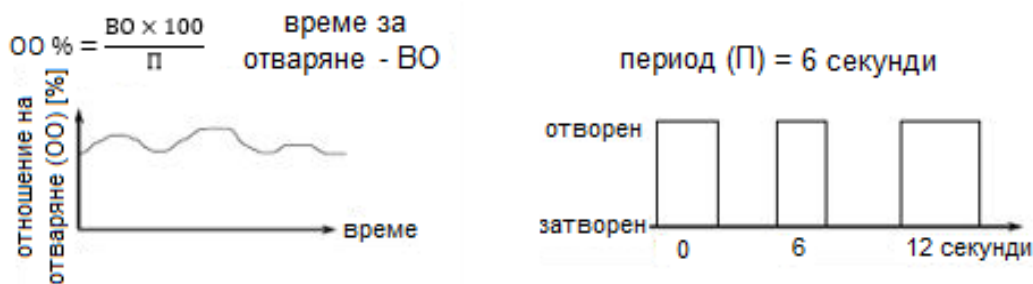
EPB със стълков електромотор се използват в множество хладилни системи, които работят с един изпарител и в които не се допускат пулсации в налягането, характерни за EPB с широчинно-импулсна модулация, както и в приложения, които изискват плавно регулиране, като например изпарител-кондензатори в каскадни системи. Вентилите притежават работен диапазон от няколко стотин стъпки (обикновено от 200 до 400), който позволява плавно и прецизно контролиране на масовия дебит на хладилния агент, постъпващ в изпарителя. Тази им характеристика ги прави ефективни при много малки натоварвания, когато вентилът може да стои стабилно отворен, едва на няколко процента от своя диапазон. Същевременно обаче, трябва да се вземе под внимание факта, че е необходимо определено време, от порядъка на над 10 секунди, за изпълнение на пълния ход на вентила. Това би могло да предизвика проблеми, поради закъсняла реакция, в приложения, свързани с голяма динамика.

Задвижването на този тип вентили на малки стъпки, понякога довежда до не приемане на сигнала от контролера и пропускане на стъпка от страна на вентила. При периоди на дълга работа, тези грешки се натрупват и би могло да се получи съществено разминаване между реалното положение на вентила и положението, в което контролера “мисли“, че той се намира. Въпреки това инициализацията, състояща се в презатваряне на вентила в началото на всеки работен цикъл, гарантира, че контролерът започва управлението от 0 % и познава коректно положението на вентила.

ЕРВ с широчинно-импулсна модулация

Този тип вентили работят като магнетвентил, т.е. имат само напълно отворено и напълно затворено положение. Задвижването се осъществява от соленоид с котва, като механизмът е пригоден за значително по-големия брой работни цикли в сравнение с обикновен магнетвентил.

На Фиг. 8 е показана графика, описваща работния принцип на този тип вентили. В зависимост от натоварването, се променя отношението на времето, за което вентилът е отворен, към това, за което той е затворен, като тези действия се ограничават в рамките на фиксиран цикъл (обикновено 4 до 8 секунди). В отворено положение вентилът пропуска 100% от масовия дебит на хладилния агент. Това гарантира доброто разпределение на двуфазната смес хладилен агент, дори при минимални натоварвания. Рязкото пропускане на хладилен агент турбулизира потока и значително подобрява топлообмена в изпарителя. Също така се благоприятства връщането на маслото при частичен товар, което може да представлява проблем при вентилите със стъпков електромотор. Тези характеристики правят този тип вентили, изключително подходящи за хладилни системи със силно изразен частичен товар, както и за приложения с голяма динамика.



Фиг. 8 Работен принцип на ЕРВ с широчинно-импулсна модулация [2]

Двупозиционната функция на ЕРВ с широчинна модулация определя работа с големи пулсации в налягането, които могат да доведат до повреди особено при системи с един изпарител. Ето защо, този тип вентили се прилагат предимно в хладилни системи, като например в супермаркетите, където пулсациите в налягането се компенсират от едновременната работа на големия брой изпарители.

5. Основни енергийни предимства на електрическите регулиращи вентили

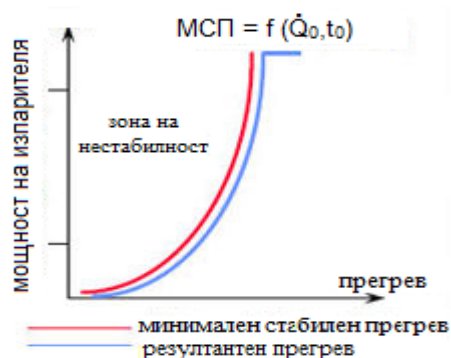
1. Понижаване на прегрева в изпарителя

Едно от основните предимства на електрическите регулиращи вентили в сравнение с термостатичните е поддържането на по-нисък прегрев в изпарителя. Това води до увеличаване на ефективната топлообменна повърхност на изпарителя и съответно до по-висока температура на изпарение. Резултатът е по-голяма хладилна мощност на системата, т.е. по-висок EER/COP.

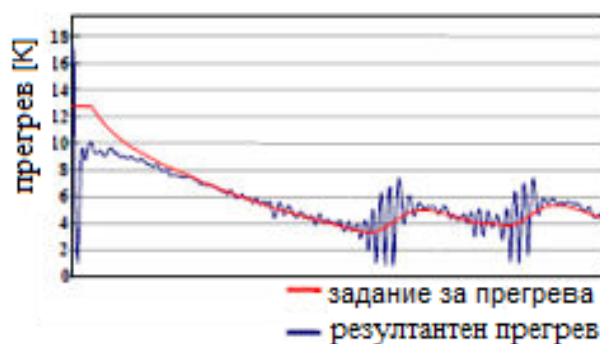
Това е възможно по две причини. Първата е, че ЕРВ е регулатор с непряко действие, т.е. използва помощна енергия. Това позволява вентилът да се отваря без статичен

прегрев и съответно да може да поддържа по-нисък работен прегрев в сравнение с ТРВ. Втората е адаптивната характеристика на електронния ПИД-контролер на вентила.

Принципът на работа на адаптивния ПИД - контролер се изразява в първоначално намаляване на прегрева от дадена референтна стойност до достигане на зоната на нестабилност, след което постепенно се увеличава, докато контролера регистрира стабилен сигнал. Така процеса непрекъснато се повтаря, като по този начин контролера следва МСП – линията на изпарителя и поддържа оптимален прегрев, независимо от промяната на натоварването и работните условия.



Фиг. 9 Работна характеристика на ЕРВ [2]



Фиг. 10 Адаптивен контрол на ЕРВ [2]

2. Понижаване на налягането на кондензация

Както вече беше изяснено, характеристиките на ТРВ налагат ограничаване на минималното налягане на кондензация, което при ниски външни температури води до излишно изразходване на електроенергия от страна на системата. Поради факта, че ЕРВ използва помощна енергия, неговото отваряне не зависи от температурата на изпарение. Така при ниски външни температури или при частичен товар ЕРВ позволява използването на пълната мощност на кондензатора. По този начин, за въздушни кондензатори, поддържаната минимална температура (налягане) на кондензация може да се понижи до 10 – 15 °С (за среднотемпературния работен диапазон – $t_0 = -15$ до -5 °С). Възможността за работа при ниски температури на кондензация води до съществено редуциране на електропотреблението на хладилната система.

Количествените измерения на ефектите от понижаване на прегрева и температурата на кондензация, чрез приложение на ЕРВ, предстои да бъдат разгледани в самостоятелен доклад.

3. Намаляване на времето за обезскрежаване

Поради ефективното използване на топлообменната повърхност на изпарителя, което ЕРВ осигурява, се намалява изсушаването на въздуха и интензивността на заскрежаване при ламелните изпарители. Този ефект води до намаляване, както на боря, така и на продължителността на циклите за обезскрежаване. Така, не само се подобрява качеството на съхранение на охлаждащия продукт, но се намалява и потреблението на енергия за обезскрежаване на изпарителите.

6. Заключение

Настоящият доклад демонстрира, че основните технически и енергийни предимства в характеристиките на електрическите регулиращи вентили се дължат на:

- факта, че ЕРВ е регулатор с непряко действие
- ПИД характеристиката и адаптивната функция на електронния контролер

Тези характеристики на ЕРВ позволяват:

- понижаване на прегрева в изпарителя
- понижаване на налягането (температурата) на кондензация
- намаляване на продължителността и броя на циклите на обезскрежаване при въздушните изпарители

ЛИТЕРАТУРА

1. Holloway, J. (2012). "Stepper motor vs. pulse width modulation", RSES Journal, November issue.
2. Luckmann, E. (2011). *Danfoss – The Pioneer in Electronic Expansion Valve Control*. Available at: <http://www.danfoss.com/BusinessAreas/RefrigerationAndAirConditioning/Articles/Danfoss+-+The+Pioneer+in+Electronic+Expansion+Valve+Control.htm> (accessed 28 July 2014).
3. Korn, D. (2011). *Effizienter Betrieb von Kälteanlagen*. VDE VERLAG GMBH. Berlin. Offenbach.
4. Sidel, R. and Noack, H. (2011). *Der Kältemonteur*. VDE VERLAG GMBH. Berlin. Offenbach.
5. Breidenbach, K. (2010). *Der Kälteanlagenbauer Band 2: Grundlagen der Kälteanwendung*. VDE VERLAG GMBH. Berlin. Offenbach.

Автори:

доц. д-р инж. Цветан Николов Божков, ТУ – София, ЕМФ, катедра ТХТ, моб. тел: +359/ 899 933 600,
е-mail: emco_ltd@abv.bg

инж. Светослав Руменов Влашки - студент, ТУ – София, ЕМФ, катедра ТХТ,
моб. тел: +359/ 878 126 622, е-mail: svetoslav.vlashki@gmail.com

инж. Йордан Георгиев Стоянов - студент, ТУ – София, ЕМФ, катедра ТХТ, моб. тел: +359/ 899 833 513,
е-mail: danko_st@abv.bg