

DESIGN FEATURES OF THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS IN ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES⁵

Ivan Dyankov, PhD Student

Department of Engines and Vehicles,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Tel.: 082888526

E-mail: idyankov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Georgi Kadikyanov, PhD

Department of Engines and Vehicles,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Tel.: 082888526

E-mail: gakadikyanov@uni-ruse.bg

Abstract: *One of the main reasons for the slower mainstream adoption of battery electric vehicles is their limited range, higher cost than conventional vehicles and limited battery life. The need to reduce the electrical energy of auxiliary systems in electric vehicles is of prime importance. There is a system that greatly affects the mileage of the electric car, but always the electric car users do not pay enough attention. This is an electric vehicle thermal management system. Many on-board systems of an EV require thermal management, battery, electric motors, cabin and power electronics. The thermal management system is not only extremely important for the energy-efficient operation of an electric car, but also plays a key role in the safety caused by overheating of all devices. cabin and electric motors overheating can prevent the normal operation of the electric car, while battery overheating can lead to catastrophic thermal runaway, which can end with undesirable consequences. This thermal management system is extremely important for the range covered on a single charge of the battery and the driving safety of the electric vehicle.*

Keywords: *electric vehicles, hybrid vehicles, thermal management system.*

ВЪВЕДЕНИЕ

След като Международната агенция по енергетика отчита 57% увеличение на глобалните емисии на въглероден диоксид (CO₂) от 1990 г., сега светът произвежда около 30 милиарда тона CO₂ всяка година, като автомобилният транспорт представлява приблизително 18% от общия брой (IEA, 2018). Тези емисии са пряк резултат от увеличеното търсене на транспорт, произтичащо от фактори като нарастване на населението, икономически растеж и разрастване на градовете. Като реакция на тези цифри и увеличаващите се изисквания от страна на законодателните органи за бързо намаляване на емисиите от превозни средства, индустрията наблюдава нарастване на производството на превозни средства, използващи и електрическа енергия. Много от автомобилните компании ще се отдалечат от конвенционалните превозни средства с двигател с вътрешно горене към по-ефективните хибридни и електрически превозни средства.

Производителите на хибридни електрически и електрически превозни средства обръщат особено значение на разхода на енергия. Проблем има около екстремните климатични условия и ефектите, които произтичат от това върху обхвата на електрическите превозни средства, живота на батерията и производителността ѝ.

Установено е, че системата за управление на топлината е една от най-ограничаващите обхвата на електрическите превозни средства (Farrington, R. & Rugh, J., 2000). Системата за управление на топлината е отговорна за поддържането на работните условия на задвижването и осигуряването на ефективен климатичен контрол в салона с пътници. За

⁵ Докладът е представен на 25 октомври 2024 с оригинално заглавие на български език: КОНСТРУКТИВНИ ОСОБЕНОСТИ НА СИСТЕМИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ТОПЛИНАТА В ЕЛЕКТРИЧЕСКИ И ХИБРИДНИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА

конвенционалните двигатели с вътрешно горене целта на системата за управление на топлината е да регулира температурата на двигателя, за да създаде среда за оптимален горивен процес и минимални емисии. Освен това, системата за управление на топлината контролира вискозитета на маслото, така че правилният граничен слой се поддържа между компонентите, за да се избегне ранното износване на двигателя, термично разрушаване на маслото или ненужно вискозно триене. Поради присъщите големи топлинни загуби на двигателите с вътрешно горене, в студен климат топлината на двигателя може да се използва за отопление на кабината. Докато в горещ климат се използва чист въздух или отделна климатична система.

Електрическите превозни средства нямат това високо ниво на отпадна топлина поради естествено по-високата ефективност на електрическото задвижване. В резултат на това отоплението на кабината с други средства, като например нагревател, е довело до по-висока консумация на енергия при излагане на изключително студен климат. Отоплението на купето обаче не е единственият проблем, който възниква при системата за управление на топлината. В нея вече има три основни компонента на силовото предаване за управление: батерията, електрическият двигател и инвертора.

Литиево-йонните батерии търпят значителни загуби при ниски температури под стайната. Това се дължи на намалените енергийни възможности, повишения импеданс, както и сериозното разреждане на батерията поради литиевото покритие (Wang, F.; Lin, Z.; Liu, L.; Wei, X.; Lin, S.; Dai, L.; Wei, Y.; Liang, C. & Liaw, B.Y., 2020; Aris, A.M. & Shabani, B., 2017). Когато е твърде горещо, батерията е изложена на риск от загуба на активен материал, разлагане на повърхността на твърдия електролит и вътрешна реакция, което в крайна сметка ще доведе до термично изтичане (Abada, S.; Petit, M.; Lecocq, A.; Marlair, G.; Sauvante-Moynot, V. & Huet, F., 2018).

От друга страна, двигателите и инверторите обикновено са по-малко чувствителни към температурата. Като цяло електрическите двигатели и инверторите страдат от ограничено въздействие при ниски температури. Електрическите двигатели обаче могат да страдат от размагнитване и приплъзване на ротора при високи температури (Baranski, M.; Szelag, W. & Lyskawinski, W., 2020). Докато за инверторите по-високите температури могат да доведат до ускоряване на загубата на мощност и откази от умора на материала (Sathik, M.H.M.; Sundararajan, P.; Sasongko, F.; Pou, J. & Natarajan, S., 2020).

Целта на доклада е да се извърши конструктивен анализ на системите за управление на топлината в електрически и хибридни превозни средства.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Дизайнът на системата за управление на топлината претърпя сериозно развитие през последните години. Има прости конструкции на системата за управление на топлината, които използват стандартния цикъл на съгъстяване на парите на хладилен агент и нагревател с положителен температурен коефициент за обслужване на кабината и прост контур на охлаждащата течност на радиатора за поддържане на температурата на инвертора и електрическият двигател. За батерията се използва система за управление на батерията, за да се регулират ограниченията на мощността, намалявайки генерирането на топлина, което води до прегряване на батерията. За борба със стареенето на литиево-йонната батерия, разграждането и термичното изпускане, стана обичайна практика включването на трети контур, отговорен за контролиране на температурата на литиево-йонната батерия в диапазон от 15°C до 35°C. Този температурен диапазон е толкова близък до нормалната околна среда, че охлаждането с помощта на радиатор не би било възможно. По този начин е обичайно да видите батерията, свързана към хладилната верига, използвайки двуфазен термичен течен изпарител, известен като чилър. За да се предотврати повишен импеданс на батерията и литиево покритие поради ниски температури, нормално е да видите нагревател за нагряване на охлаждащата течност, влизаща в батерията или директно да загрява корпуса на батерията.

Работата на компресор естествено изисква много мощност, което води до намаляване на обхвата на електрическите превозни средства. Следователно, някои системи включват

втори радиатор за охлаждане на батерията в студен климат. Радиаторът работи в унисон с чилъра за охлаждане на батерията, за да обхване регулирането на температурата на батерията във всички климатични условия. В студен климат използването на радиатора вместо чилъра значително ще намали консумацията на енергия. Новите системи за оползотворяване на отпадна топлина са в центъра на изследванията напоследък. Тези системи са склонни да използват сложни охлаждащи вериги с много клапани за свързване на батерията, инвертора, електрическият мотор и климатичната система за преместване на отпадната топлина към ограничени системи, вместо да отхвърлят отпадната топлина направо в околната среда.

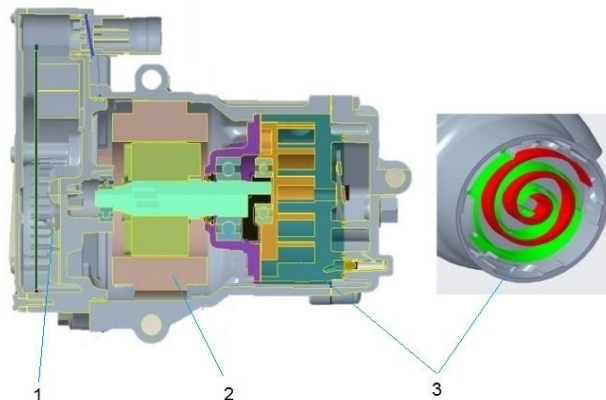
Компоненти на системите за управление на топлината

Редовното поддръжане на системите за управление на топлината става още по-важно, тъй като климатичната система има и други функции и е практически свързана със задвижването в електрическите и хибридните превозни средства. Климатичната система спомага за поддръжане на тяговата батерия в оптимални граници температурен диапазон, което има положителен ефект върху пробега и дълготрайността на тяговата батерия. Ако климатичната система се повреди или ако не функционира оптимално, резултатите вече не са ограничени до некомфортно и небезопасно шофиране – какъвто беше случаят с двигателите с вътрешно горене.

Поради спецификата на работа на системите за управление на топлината в хибридните и електрическите превозни средства компонентите ѝ имат своите конструктивни различия в сравнение с конвенционалните климатични системи. Най-често конструкциите на системите за управление на топлината включват следните компоненти:

Компресор

В хибридните и електрически превозни средства се използва спирален компресор с електрическо задвижване (Фиг. 1). Той приема газообразен хладилен агент с ниска температура и ниско налягане и го сгъстява с висока температура и високо налягане.



Фиг. 1. Спирален компресор с електрическо задвижване

1 – електронно управление; 2 – електрически двигател; 3 – компресорна част

По време на сгъстяването състоянието на хладилния агент остава непроменено, но температурата и налягането непрекъснато се увеличават, образувайки прегрял газ. Спиралният компресор намалява разхода на енергия с 20% в сравнение с буталния.

Компресорът е електрически задвижван с високо напрежение. Това позволява климатизация на автомобила дори когато двигателят е изключен. В допълнение, климатичната система може да се използва и за охлаждане на охлаждащата течност.

Топлообменник (Чилър)

Чилърът (Фиг. 2) е специален топлообменник, свързан както към веригата на охлаждащата течност, така и към веригата на хладилния агент, което позволява температурата на охлаждащата течност да бъде допълнително намалена от хладилния агент в климатичната система. Това позволява допълнително индиректно охлаждане на батерията

чрез климатичната система, ако е необходимо. За тази цел охлаждащата течност от втория кръг преминава през охлаждащите плочи на батерията. След като топлината бъде абсорбирана, охлаждащата течност се охлажда до първоначалната температура в чилъра. Намаляването на температурата в чилъра се предизвиква от изпарението на хладилния агент, циркулиращ в първичен кръг.

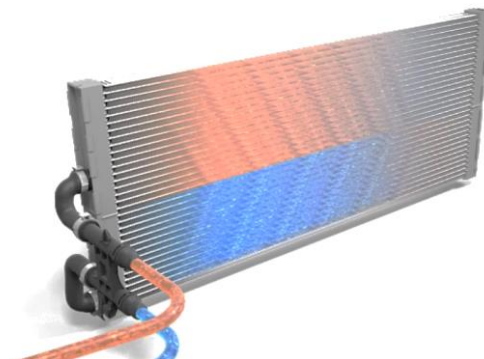


Фиг. 2. Теплообменник (Чилър)

1 – терморегулиращ вентил; 2 – вход и изход на хладилния агент; 3 – вход и изход на охлаждащата течност; 4 – корпус на теплообменника

Нискотемпературен радиатор

Температурата на охлаждащата течност за електродвигателя и силовата електроника се поддържа под 60°C в отделен охлаждателен кръг с помощта на нискотемпературен радиатор (Фиг. 3).



Фиг. 3. Нискотемпературен радиатор

Термостат

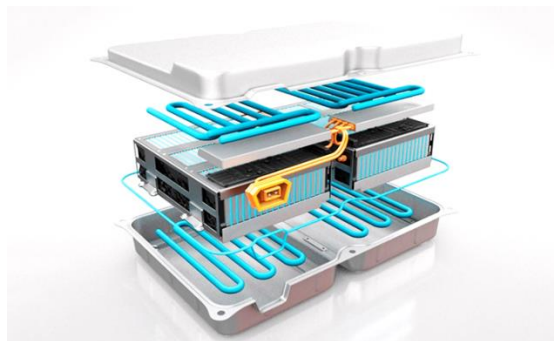
Термостатите (Фиг. 4), независимо дали са електрически или механични, поддържат температурата на охлаждащата течност при постоянно ниво. Те отварят или затварят пътя на охлаждащата течност към различни компоненти в зависимост от нуждите.



Фиг. 4. Електрически термостат

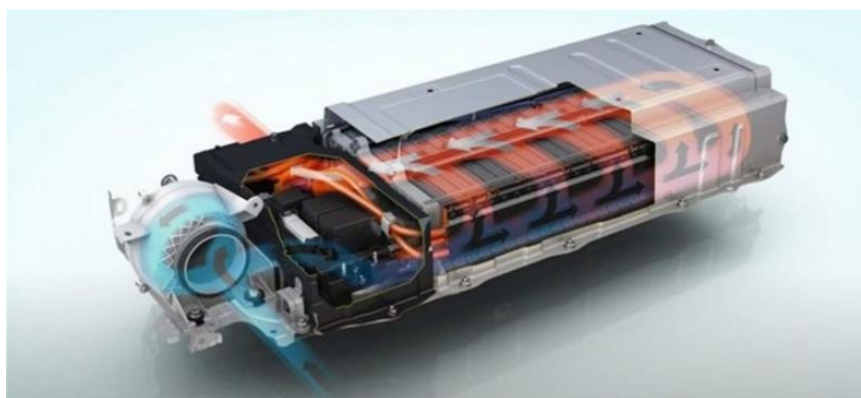
Охлаждане на батерията

Заедно с електрическият мотор, високоволтовата батерия е един от ключовите компоненти на електрическото превозно средство. Състои се от свързани помежду си батерийни модули, които от своя страна са съставени от клетки. Батериите обикновено са базирани на литиево-йонна технология. Имат висока енергийна плътност. Поради намаляване на химичната реакция, производителността при температури под 0°C намалява значително. При температури над 30°C процесът на стареене се ускорява рязко, а при температури над 40°C батерията може да се повреди. За да се постигне възможно най-дълъг експлоатационен живот и ефективност, батерията трябва да работи в определен температурен спектър.



Фиг. 5. Охлаждане на батерията с охлаждащи плочи

Сегмент на батерията е разположен от всяка страна на охлаждащите плочи (Фиг. 5). Сегментите на батерията и охлаждащите плочи образуват постоянно фиксиран модул на батерията. При директно охлаждане на батерията, хладилният агент на климатичната система протича през охлаждащите плочи. С индиректенохлаждане на батерията, охлаждащата течност протича през охлаждащите плочи. Ако охлаждащият капацитет не е достатъчен за непряко охлаждане на батерията, охладителната течност може да се охлади допълнително чрез чилър. Съществува и въздушно охлаждане показано на фиг. 6.



Фиг. 6. Виздушно охлаждане на батерията

Допълнителен електрически нагревател/ спомагателен нагревател с високо напрежение

Електрическите превозни средства нямат разсеяната топлина от двигателя, която се прехвърля към охлаждащата течност. Следователно е възможно вътрешното пространство в салона с пътници на автомобила да се затопли с помощта на допълнителен електрически нагревател (Фиг. 7), разположен във вентилационната система.



Фиг. 7. Спомагателен нагревател с високо напрежение

Силова електроника

Задача ѝ в автомобила е да управлява електродвигателите, да комуникира със системата за управление на автомобила и да извършва диагностика на задвижването. По правило силовата електроника се състои от електронен блок за управление, инвертор и DC/DC преобразувател. За да се поддържа силовата електроника в определен температурен диапазон, се свързва към системата за управление на топлината на автомобила.

Допълнителен нагревател на охлаждащата течност с високо напрежение

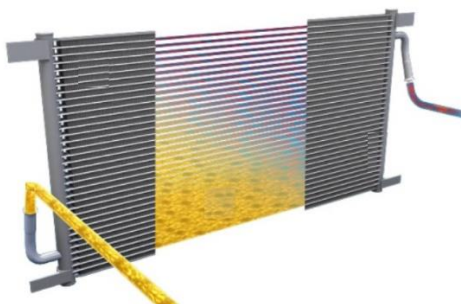
Когато температурите станат твърде ниски, охлаждащата течност се нагрива чрез допълнителен електрически нагревател с високо напрежение (Фиг. 8). Той е интегриран в охладителната верига.



Фиг. 8. Допълнителен нагревател на охлаждащата течност с високо напрежение

Кондензатор

Кондензаторът от фиг. 9 е необходим за охлаждане на хладилния агент, който се е нагривал по време на сгъстяването в компресора. Горещият хладилен агент се влива в кондензатора, освобождавайки топлина към околната среда през външната повърхност на тръбата и ребрата. Охлаждайки се хладилният агент преобразува агрегатното си състояние от газообразно на течно.



Фиг. 9. Кондензатор

Е-охлаждаща помпа

Електрическите помпи за охлаждаща течност с интегрирано електронно управление (Фиг. 10) се активират индивидуално според изискваната за охлаждаща производителност. Те могат да се използват като главни, спомагателни или циркулационни помпи. Те работят независимо от двигателя.



Фиг. 10. Е-охлаждаща помпа

Терморегулиращ вентил с електрическо управление

За да се контролира по-добре процеса на впръскване на течен хладилен агент в изпарителите се използва терморегулиращ вентил с електрическо управление (Фиг. 11). Той се използват и за активно контролиране на зададената точка на прегряване на изпарителите или дори за пълно блокиране на потока към изпарител, когато не е необходимо. При липса на външен кондензатор топлината трябва да използва кондензатора в салона с пътници или радиатора, за да пренася топлината към околната среда.



Фиг. 11. Терморегулиращ вентил с електрическо управление

Осемпътен клапан

За да се подпомогне контролирането на топлинния поток между салона с пътници, задвижването и околната среда, в някои системи с термopомпи се използва осемпътен клапан (Фиг. 12). Този клапан е ротационен клапан с осем порта, който позволява на охлаждащата течност да тече в пет уникални контура. Всеки контур може да изпълнява множество функции в зависимост от работата на термopомпата.



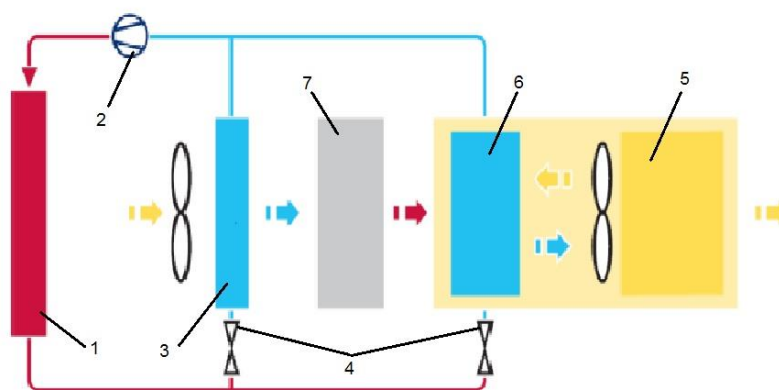
Фиг. 12. Осемпътен клапан

Разновидности на системите за управление на топлината

Вариант 1:

Система за управление на топлината с въздушно охлаждане на батерията е показана на фиг. 13. Въздухът се засмуква от салона с пътници на автомобила от климатичната система и се използва за охлаждане на батерията. Хладният въздух, преминал през салона с пътници,

има температура под 40°C. Този въздух циркулира около достъпни повърхности на батерията.



Фиг. 13. Система за управление на топлината с въздушно охлаждане на батерията
1 – кондензатор; 2 – електрически компресор; 3 – изпарител в салона с пътници; 4 – терморегулиращи вентили; 5 – батерия; 6 – изпарител на батерията; 7 – салон с пътници

Тази система има следните недостатъци:

Ниска охлаждаща ефективност.

Всмуканият въздух от салона с пътници не може да се използва за намаляване на температура равномерно.

Необходимо е значително усилие за насочване на въздуха.

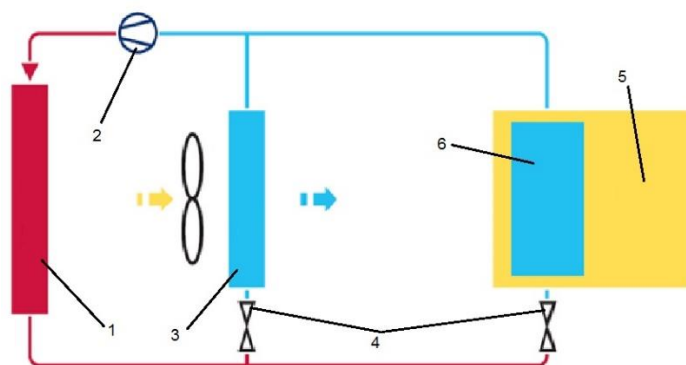
Възможни шумове в кабината поради работата на вентилатора.

Има директна връзка между салона с пътници и батерията през въздуховодите. Това е проблемно за безопасността. Причина за това е отделяне на газове от батерията.

Друг фактор, който не бива да се подценява, е рискът от мръсотия, навлизаща в акумулаторния пакет, защото въздухът от салона с пътници също съдържа прах. Прахът се отлага между клетките на батерията, където се комбинира с кондензираната влага и се образува проводим слой. Този слой позволява възникването на утечки на ток в рамката на батерията. За да се избегне този риск, входящият въздух се филтрира. Като алтернатива въздушното охлаждане може да бъде осигурено и от отделен малък климатичен модул по подобен начин към отделните климатични системи в превозните средства от премиум клас. В клетката на батерията е свързана специална изпарителна плоча към климатичната система на автомобила. Интериорният изпарител и изпарителната плоча на батерията, която работи като конвенционален изпарител са свързани към една и съща верига. Различните задачи за двата изпарителя водят до съответно различни изисквания за потока на хладилния агент. Докато в интериорът охладителната система има за цел да задоволи комфорта на пътниците, високоволтовата батерия трябва да се охлади до различни степени на интензивност в зависимост от ситуацията на шофиране и температура на околната среда.

Вариант 2:

На фиг. 14 е показана система за управление на топлината с охлаждане на батерията с хладилен агент. Различните задачи за двата изпарителя водят до съответно различни изисквания за потока на хладилния агент. Докато интериорната охладителната система има за цел да задоволи търсенето на комфорт на пътници, високоволтовата батерия трябва да се охлади до различни степени на интензивност в зависимост от ситуацията на шофиране и температура на околната среда.

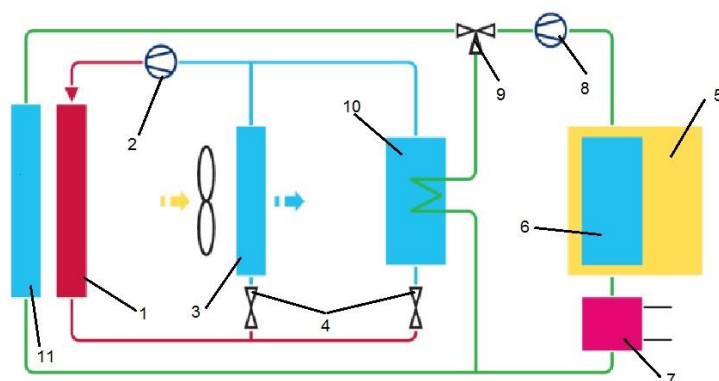


Фиг. 14. Система за управление на топлината с охлаждане на батерията с хладилен агент
1 – кондензатор; 2 – електрически компресор; 3 – изпарител в салона с пътници; 4 – терморегулиращи вентили; 5 – батерия; 6 – изпарител на батерията

Тези изисквания са определящи фактори за комплексния контрол от количеството изпарен хладилен агент. Специалният дизайн на плочата на изпарителя и произтичащото от това интегриране в батерията се стремят към голяма контактна повърхност за пренос на топлина. Това означава и гарантира, че критичната максимална температура от 40°C не се превишава. Когато външните температури са много ниски, повишаването на температурата на батерията трябва да бъде максимално близо до идеалната температура. Плочата на изпарителя обаче не може да помогне в тази ситуация. Студената батерия е с по-малка мощност от тази при правилната температура. Също така е трудно да се зареди батерията, когато температурите са значително под нулата. В меките хибриди, това може да се толерира: в екстремни случаи хибридната функция се използва в ограничен капацитет. Въпреки това все още е възможно да се шофира с двигател с вътрешно горене. В акумулаторно електрическо превозно средство, от друга страна, трябва да се монтира нагревател на батерията, така че превозното средство може да се стартира и управлява във всяка ситуация през зимата.

Вариант 3:

На фиг. 15 е показана система за управление на топлината с охлаждане на батерията с термopомпа. Правилната температура играе ключова роля за батерии с по-високи капацитети. Следователно, при много ниски температури, допълнителното отопление на батерията е необходимо, за да се достигне до идеалния температурен диапазон. Това е единственият начин да се постигнат задоволителни електрически режими на шофиране. За да се даде възможност за това допълнително отопление в батерията е интегрирана вторична верига. Тази схема гарантира идеалната работа през цялото време, като се поддържа температура от 15°C до 30°C. Охлаждащата течност съдържа вода и гликол и тече през охлаждаща плоча, която е интегрирана в ядрото на батерията. При по-ниски температури, охлаждащата течност може бързо да се нагрее от нагревател до достигане на идеалната температура. Нагревателят се изключва, ако температурата в батерията се повишава, когато се използват хибридните функции. Облаготелствана от насрещния вятър охлаждащата течност може да се охлади чрез охладител или нискотемпературен радиатор, разположен в предната част на превозно средство. Ако охлаждането, осигурено от охладителя на батерията, не е достатъчно при високи външни температури, охлаждащата течност протича през чилър. Това е мястото, където хладилен агент от климатичната система на автомобила се изпарява.

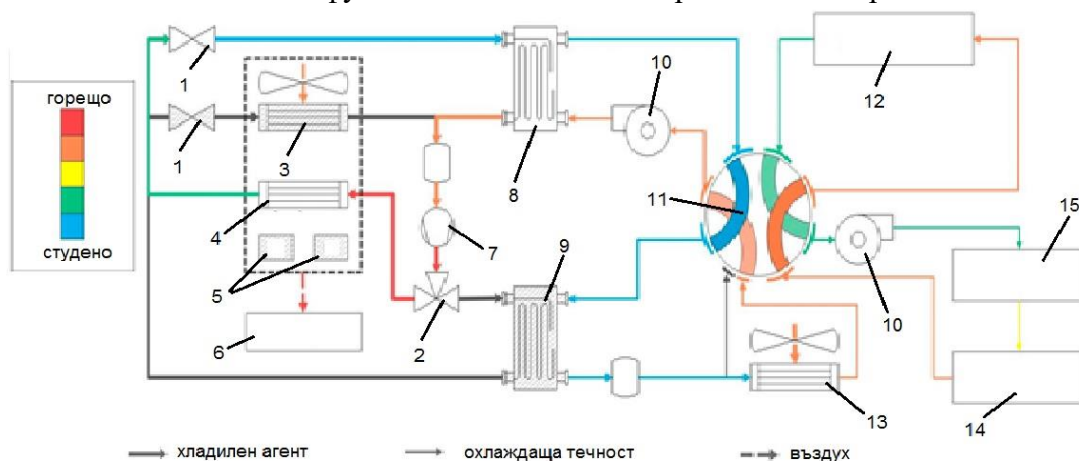


Фиг. 15. Система за управление на топлината с охлаждане на батерията с термopомпа
 1 – кондензатор; 2 – електрически компресор; 3 – изпарител в салона с пътници; 4 –
 терморегулиращи вентили; 5 – батерия; 6 – изпарител на батерията; 7 – нагревател; 8 –
 електрическа водна помпа; 9 – трипътен терморазширителен вентил; 10 –
 топлообменник (чилър); 11 – охлаждащ радиатор

Освен това топлината може да се пренася от вторична верига към изпаряващия се хладилен агент в много компактно пространство и с висока плътност. Допълнително охлаждане на охлаждащата течност се извършва благодарение на използването на специален топлообменник и батерията може да работи в рамките на най-ефективния температурен режим.

Система за управление на топлината с охлаждане на батерията с термopомпа, вградена в електромобили Tesla

Тесла внедри индиректна система с най-иновативни функции, базирана на течни флуиди, в която система за отопление, вентилация и климатизация контролира температурата на охлаждащата течност. Основното внимание на тази нова технология е съсредоточено върху нов компонент, патентован от Тесла през 2019 год., наречен „octvalve“. Това е нов ротационен вентил, който има осем входа и изхода, и пет позиции. Всека позиция може да изпълнява няколко функции в зависимост от работата на термopомпата.



Фиг. 16. Система за управление на топлината с охлаждане на батерията с термopомпа и осемпътен клапан

1 – терморегулиращ вентил; 2 – трипътен терморегулиращ вентил; 3 – изпарител в салона с пътници; 4 – кондензатор в салона с пътници; 5 – нисковолтови нагреватели; 6 – салона с пътници; 7 – електрически компресор; 8 – топлообменник с изпарител (чилър); 9 – топлообменник с кондензатор; 10 – електрическа водна помпа; 11 – осемпътен клапан; 12 – батерия; 13 – охладителен радиатор; 14 – електрически двигател; 15 – инвертор

Термопомпата в електромобилите Тесла се състои от електрически компресор, 3-пътен вентил, два кондензатора, от които единият е в купето на електромобила, два електрически разширителни вентила, топлообменник, изпарител в салона с пътници. Това се различава от стандартната схема, като има два кондензатора в паралел, а също така изпарител и охладител също в паралел. За да поддържа това оформление Тесла е проектирала напълно управляем 3-пътен вентил за подаване на горещ хладилен агент под високо налягане към желания кондензатор или за прекратяване на подаването му. В тази система има голяма промяна от стандартното хладиленото оформление, използвано от много производители. При управлението на системата за контрол на топлината могат да се реализират 12 различни режима. Това допринася за перфектното управление на топлината при различни изисквания в зависимост от работните режими на електромобила.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повишените изисквания към поддържането на топлината в оптимални граници в хибридните и електрическите превозни средства изисква вграждането на компоненти различаващи се от климатичните системи на конвенционалните автомобили. В тези превозни средства климатичната система не се ограничава само до климатизация на салона с пътници, а и до повишените изисквания към запазването на оптималните температурни диапазони на елементите от задвижването на автомобила. Конструктивният анализ на системите за управление на топлината в хибридните и електрическите превозни средства показва сложността и многобройните елементи вградени в тях. Това е предпоставка за влошаване на надеждността. Тя е свързана не само с комфорта и работоспособността на превозното средство, но и със сигурността на пътниците. Надеждността на системата за управление на топлината е предпоставка за безотказната ѝ работа, а от там и до повишаване на безопасността на пътниците.

Изследванията са подпомогнати от проект

REFERENCES

- IEA. (2018) *CO2 Emissions from Fuel Combustion 2018*; IEA: Paris, France.
- Farrington, R. & Rugh, J. (2000) Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range; *National Renewable Energy Lab: Golden, CO, USA*.
- Wang, F.; Lin, Z.; Liu, L.; Wei, X.; Lin, S.; Dai, L.; Wei, Y.; Liang, C. & Liaw, B.Y. (2020) Does Polarization Increase Lead to Capacity Fade? *J. Electrochem. Soc.*, 167, 090549.
- Aris, A.M. & Shabani, B. (2017) An Experimental Study of a Lithium Ion Cell Operation at Low Temperature Conditions. *Energy Procedia*, 110, 128–135.
- Abada, S.; Petit, M.; Lecocq, A.; Marlair, G.; Sauvant-Moynot, V. & Huet, F. (2018) Combined experimental and modeling approaches of the thermal runaway of fresh and aged lithium-ion batteries. *J. Power Sources*, 399, 264–273.
- Baranski, M.; Szelag, W. & Lyskawinski, W. (2020) Analysis of the Partial Demagnetization Process of Magnets in a Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor. *Energies*, 13, 5562.
- Sathik, M.H.M.; Sundararajan, P.; Sasongko, F.; Pou, J. & Natarajan, S. (2020) Comparative Analysis of IGBT Parameters Variation Under Different Accelerated Aging Tests. *IEEE Trans. Electron Devices*, 67, 1098–1105.