

FRI-2.204-2-SITST-15

REVIEW OF ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS STRATEGIES FOR HYBRID VEHICLES¹

Prof. Velizara Pencheva, PhD

Department of Transport,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 82 888 588
E-mail: vpencheva@uni-ruse.bg

Assoc. prof. Tsvetelina Georgieva, PhD

Department of Automatics and Mechatronics,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 82 888 668
E-mail: cgeorgieva@uni-ruse.bg

Assoc. prof. Asen Asenov, PhD

Department of Transport,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 82 888 605
E-mail: asasenov@uni-ruse.bg

Eng. Sechkin Remzi–PhD Student

Department of Automatics and Mechatronics,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 82 888 676
E-mail: sremzi@uni-ruse.bg

Prof. Plamen Daskalov, PhD

Department of Automatics and Mechatronics,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 82 888 668
E-mail: daskalov@uni-ruse.bg

***Abstract:** Environmental pollution and a serious shortage of fossil fuels are a prerequisite for the development of hybrid vehicles, which is the key to solving these problems. For optimal and normal operation of hybrid vehicles it is necessary to use an appropriate strategy for energy management of the system. The paper reviews the types of energy management strategies for hybrid vehicles, comparing their advantages and disadvantages. The main methods used in each strategy are presented, as well as its areas of application. The paper also reviews the software applications used for energy management of hybrid vehicles.*

***Keywords:** Energy Management Systems, Hybrid Vehicles, Software Application*

***JEL Codes:** I23*

ВЪВЕДЕНИЕ

Хибридниите превозни средства (ХПС) могат да бъдат с различни видове енергийни източници и преобразуватели на енергия. Целта за разработване на ХПС е да се намали

¹ Докладът е представен на пленарната сесия на 13 ноември 2020 с оригинално заглавие на български език: ПРЕГЛЕД НА СТРАТЕГИИТЕ НА СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯТА ЗА ХИБРИДНИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА

разхода на гориво и емисии, като се проучат подходящите стратегии за управление на енергията (СУЕ). Сложната конфигурация на хибридни енергийни системи с много източници създават предизвикателства пред производителността на СУЕ. В съществуващите прегледи на литературата се отчитат редица класификации за стратегията за управление на енергийната система на транспортните средства.

Класификация на системите за енергиен мениджмънт

Стратегиите на СУЕ за всички видове хибридни превозни средства могат да се обособят в две основни групи: онлайн и офлайн СУЕ. За реализиране на по-гъвкава стратегия на СУЕ би било добре да се използва комбинация от двата вида стратегии. Онлайн СУЕ се разделят на следните подвидове: СУЕ базирани на оптимизация, предсказващи СУЕ и СУЕ базирани на обучение. Офлайн СУЕ биват два основни вида: базирани на глобална оптимизация и базирани на правила.

Онлайн системи за управление на енергиен мениджмънт

Класификацията на тези системи е представена на фиг. 1.



Фиг.1. Онлайн системи за енергиен мениджмънт

Системите за енергиен мениджмънт базирани на оптимизации могат да постигнат най-добрата производителност без предварителна информация за цикъла на управление на автомобила и са лесни, и удобни за прилагане в реално време. Оптимизационните СУЕ се фокусират главно върху оптимизирането на параметрите онлайн, което води до по-добра икономия на гориво и приспособимост на автомобила.

Еквивалентната стратегия за минимизиране на потреблението (ECMS) е базирана на идеята, че енергията се разпределя чрез минимизиране на моментния еквивалентен разход на гориво чрез преобразуване на разхода на електроенергия в еквивалентен разход на гориво. Стандартният ECMS обикновено приема постоянен оптимален еквивалентен фактор, получен от итеративен метод, но не може да се адаптира към променливите условия на управление на автомобила. По този начин се предлагат други форми на ECMS, като адаптивна ECMS [Onori, S. & Serrao, L., 2011], [Zeng, Y., 2018], телеметрична ECMS [Geng, B., 2011], предсказваща ECMS [Han, J., 2017], базирана на размита логика ECMS [Tian, X., 2019], подобрена ECMS чрез невронна мрежа [Xie, S., 2018] и ECMS базиран на стил на управление на автомобила [Sciarretta, A., 2004].

Устойчивото управление е част от теорията на управлението, чийто подход към дизайна е ориентиран към отчитане на нестабилността при управление на автомобила. За управление на енергията за хибридно превозно средство с горивни клетки се предлага устойчиво управление, което да реши проблема с чувствителността по отношение на нестабилността на цикъла на управление на автомобила [Motapon, S.N., 2014]. Този подход

подобрява стабилността на стратегията за управление на енергията при промени в цикъла на шофиране, като същевременно минимизира потреблението на водород.

Основната цел на предсказващите СУЕ е да оптимизират преразпределянето на енергията, използвайки предсказваща информация, свързана с нестабилността и неравномерния цикъл на шофиране. Тази стратегия изисква информация за предстоящ цикъл на шофиране, която може да се предскаже с налична начална информация. Като цяло е невъзможно да се предскаже точно целия цикъл, защото факторите като поведението на водача, състоянието на пътя, динамичните условия на движение и предшестващите превозни средства влияят върху точността на прогнозирането.

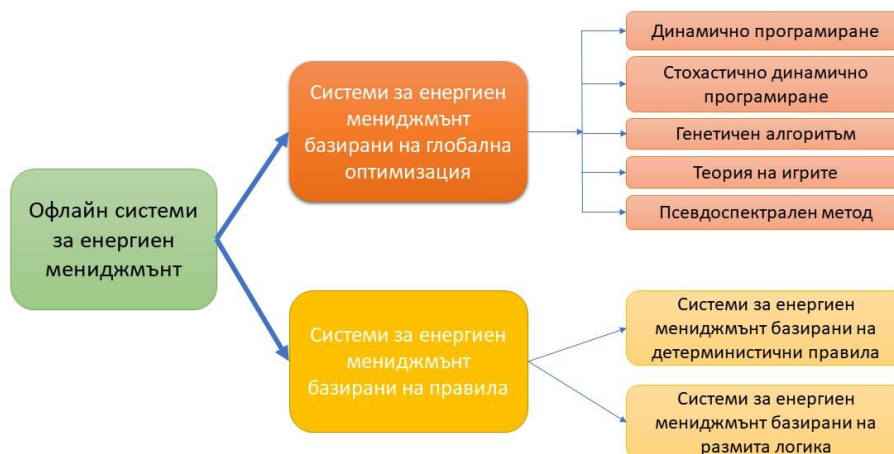
Предсказващият математичен модел за енергиен мениджмънт [Borhan, H., 2012] е базиран на математични модели, които в процес на работа на превозното средство изчисляват прогнозната стойност на изходния сигнал по зададен алгоритъм на работа. Изчислението се извършва онлайн, чрез използване или на стойности от база данни (предварително измерени и съхранени) или на стойности от моменти измервания на параметрите, от които зависи управлението на енергията. Този метод има по-добра производителност за обща консумация на енергия в сравнение с конвенционалния метод и силно зависи от производителността на алгоритъма за прогнозиране [Marx, M. & Soker, D., 2012]. Ако прогнозираната скорост би могла да съвпада добре с измерената скорост, тогава времевият хоризонт се увеличава и обратно. По този начин е важно да се намали изчислителното натоварване, за да се подобри ефективността на енергийното управление.

Стохастичният предсказващ модел за управление на енергията (SMPC) се основава на стандартните цикли на шофиране, без да се отчита нестабилността на тези цикли. По този начин той дава по-малка адаптивност към променящите се цикли на шофиране. Има подход, в който стохастичният предсказващ модел (SMPC) използва предимно прогнозната скорост от верига на Марков и оптимизира преразпределянето на енергията [Xie, S., 2017]. Стохастичният модел за предсказващо управление (SMPC) отчита нестабилността и смущенията на модела въз основа на вероятностното им описание [Mesbah, A., 2019].

Базираните на обучение СУЕ използват предварително получени данни и данни свързани с управление на автомобила в реално време, за да получат оптималното решение. Машинното обучение обикновено се използва за изготвянето на стратегии за СУЕ от този вид.

Офлайн системи за енергиен мениджмънт.

Класификацията на тези системи е представена на фиг. 2.



Фиг. 2. Офлайн стратегиите за управление на енергийния мениджмънт

Системите за енергиен мениджмънт базирани на глобална оптимизация са базирани на предварителни данни за цикъла на управление на автомобила. Те не са подходящи за пряко използване при проблеми в реално време.

Динамичното програмиране е числен метод за решаване на динамичен оптимален проблем за управление. Тази стратегия обаче не може да се използва директно в СУЕ на реално превозно средство, тъй като е невъзможно винаги да се знаят бъдещите условия на шофиране (скорост, наклон на пътя, както и динамика на движението). Стратегията за управление на енергията с динамично програмиране за паралелни хибридни електрически превозни средства [Donitz, C., 2009] се използва за проектиране на оптимална стратегия за смяна на предавките, в който се определя функцията на разходите. Тя е комбинация от разход на гориво и емисии по време на цикъл на шофиране, за да се поддържа състоянието на заряда на батерията [Lin, C.C., 2003].

Стохастичен алгоритъм за динамично програмиране (SDP) за хибридно превозно средство с разделяне на енергията се изпълнява чрез установяване на изискването за последователност на задвижване в рамките на различни цикли на задвижване въз основа на процеса на Марков, за да се получи матрица за прехвърляне на състояние на потреблението на енергията на автомобила [Moura, S.J., 2011]. Основният проблем е при максимизиране на икономията на гориво и електроенергия като целева функция в ограничена област, при условие отнасящо се до въртящия момент на двигателя, както и на зареждането и разреждането на батерията. В [Johri, R. & Filipi, Z., 2014] е представено оптимално управление на енергията за сериен хибриден електрически автомобил въз основа на SDP и отчитане на разхода на гориво и емисиите. Тук има проблеми с изчислителните възможности поради големия обем данни в пространството на състоянието.

Генетичният алгоритъм може да се прилага в СУЕ, за да се получат глобални оптимални решения, обаче изчислителното натоварване е голямо, особено за повече променливи поради многократните търсения, които насочват изследователите да избират оптимални параметри (напр. капацитет на двигателя и капацитет на батерията) за ХПС. За управлението на енергията за хибридни електрически превозни средства с горивни клетки има оптимални параметри чрез генетични алгоритми [Zhou, S., 2019]. За реализиране на глобална оптимизация на СУЕ се използва генетичен алгоритъм, при който се коригират контролните параметри за минимизиране на разхода на гориво и емисиите [Piccolo, A., 2001]. Този метод може да представи глобално оптимално решение и да осигури по-добра устойчивост, но изчислителната сложност е по-висока от останалите СУЕ. За да се подобри оптималното представяне на генетичния алгоритъм в [Xudong, L., 2007] е предложен хибриден генетичен алгоритъм за сериен хибриден електрически автомобил, с по-бърза конвергенция и по-добра адаптивност в сравнение с традиционния генетичен алгоритъм чрез използване на квадратично програмиране.

Теорията на играта се използва при многосубектни задачи за оптимизация, като се взема в предвид прогнозата и действителното поведение на индивидите в играта. През последните години са разработени СУЕ базирани на теорията на игрите, които са чувствителни към промените в параметрите на автомобила. Проектиран е контролер за паралелен хибриден електрически автомобил, използвайки теория на игрите с целите за икономия на гориво и емисии [Dextreit, C. & Kolmanovsky, I.V., 2014], [Dextreit, C., 2008]. Условията на работа на превозното средство и задвижването се разглеждат като двама играчи в игра с ограничен хоризонт. Функцията на тази игра се формира за измерване на разхода на гориво, емисиите и отклонението на състоянието на заряда на батерията от зададената стойност, както и отклонението от условията на работа на автомобила.

Псевдоспектралният метод е метод за решаване на проблеми за управление на енергията на ХПС и оптимизирано управление на енергията и траекторията на съвместното състояние [Zhou, W., 2016]. Резултатите показват, че изчислителната ефективност на псевдоспектралния метод е по-висока от тази на динамичното програмиране, докато ефективността на оптимизацията е близка до него. Предлага се и двойна обективна стратегия

за оптимизиране на зареждането за два вида литиево-йонни батерии, като се разглежда влиянието на времето за зареждане на батерията и загубата на енергия при зареждане върху управлението на енергията на ХПС [Hu, X., 2013]. Разработен е и йерархична стратегия за СУЕ с псевдоспектралния метод за хибридни електрически превозни средства, която включва планиране и на скоростта [Wu, J., 2020].

Енергийна система за мениджмънт базирана на правила може да се реализира чрез предварително дефиниране на логическите правила според характеристиките на ХПС и режима му на работа. Правилата се определят въз основа на състоянието на заряд на акумулатора, потреблението на енергията и скоростта на превозното средство чрез структура „If – then“. Чрез тези правила може да се преразпределя консумацията на енергията, както и да се поддържа степента на заряда на батерията и/или акумулатора. Този метод зависи главно от логическите правила и локалните ограничения, които са въведени от потребителя.

Енергийна система за мениджмънт базирана на детерминистични правила е лесна и достъпна за прилагане онлайн чрез функционална таблица поради своята опростеност. Правилата обикновено се изготвят въз основа на специфични цикли на шофиране. Различните условия на движение обаче го правят по-малко приспособим към различните цикли на шофиране.

Енергийната система за мениджмънт базирана на размита логика се състои от размити множества и размита логика. При този метод правилата на размитата логика обикновено се разработват в съответствие с консумираната енергия и степента на заряд на батерията. В [Hyeoun-Dong, L. & Seung-Ki, S., 1998] е представена стратегия базирана на размита логика за управление на енергията с цел минимизиране на емисиите. Предложеният размит логически контролер може да намали около 20% от емисиите в сравнение с конвенционалното превозно средство. Проектиран е размит логически контролер за паралелни хибридни електрически превозни средства [Salman, M., 2000].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Офлайн СУЕ имат за цел да сведат до минимум разхода на гориво в световен мащаб. Въпреки че не могат да бъдат директно внедрени в реално превозно средство, те осигуряват шаблон за други стратегии за управление на енергията. Онлайн СУЕ са сравнително лесни за внедряване в реално превозно средство поради по-ниска изчислителна сложност и липсата на предварителни познания за целия цикъл на шофиране, като същевременно се постига подобна производителност в сравнение с офлайн EMS. Онлайн EMS се основават на локална оптимизация и причинно-следствена връзка с потенциал да бъдат приложени в реално време. Сред тези стратегии системата базирана на оптимизация може да сведе до минимум моментния разход на гориво, без предварително знание за целия цикъл на шофиране и да постигне само локални оптимални резултати. Предвиждането на цикъла на шофиране е важно при предсказващите системи за управление на енергиен мениджмънт.

Основното предизвикателство на СУЕ е, че обикновено се разработват в рамките на специфични цикли на шофиране, което води до невъзможност за постигане на оптимални резултати в реалния цикъл. Глобалната оптимизация, с която в момента могат да се постигнат оптимални резултати, е почти неприложима за превозни средства в реално време поради изчислителната си сложност.

БЛАГОДАРНОСТ

Този доклад е подкрепен от Министерството на образованието и науката в България по Националната изследователска програма Е+ „Нисковъглеродна енергия за транспорта и бита”, по договор за безвъзмездна помощ D01-14 / 2018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Onori, S.; Serrao, L. (2011) *On adaptive-ecms strategies for hybrid electric vehicles. In Proceedings of the International Scientific Conference on Hybrid and Electric Vehicles, Malmaison, France.*
2. Zeng, Y.; Cai, Y.; Kou, G.; Gao, W.; Qin, D. *Energy management for plug-in hybrid electric vehicle based on adaptive simplified-ecms. Sustainability* 2018.
3. Geng, B.; Mills, J.K.; Sun, D. (2011) *Energy management control of microturbine-powered plug-in hybrid electric vehicles using the telemetry equivalent consumption minimization strategy. IEEE Trans. Veh. Technol.*
4. Han, J.; Kum, D.; Park, Y. (2017) *Synthesis of predictive equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles based on closed-form solution of optimal equivalence factor. IEEE Trans. Veh. Technol.*
5. Tian, X.; He, R.; Sun, X.; Cai, Y.; Xu, Y. (2019) *An anfis-based ecms for energy optimization of parallel hybrid electric bus. IEEE Trans. Veh. Technol.*
6. Xie, S.; Hu, X.; Qi, S.; Lang, K. (2018) *An artificial neural network-enhanced energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. Energy.*
7. Sciarretta, A.; Back, M.; Guzzella, L. (2004) *Optimal control of parallel hybrid electric vehicles. IEEE Trans. Control Syst. Technol.*
8. Motapon, S.N.; Dessaint, L.A.; Al-Haddad, K. (2014) *A robust h2-consumption-minimization-based energy management strategy for a fuel cell hybrid emergency power system of more electric aircraft. IEEE Trans. Ind. Electron.*
9. Borhan, H.; Vahidi, A.; Phillips, A.M.; Kuang, M.L.; Kolmanovsky, I.V.; Di Cairano, S. (2012) *Mpc-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle. IEEE Trans. Control Syst. Technol.*
10. Marx, M.; Soker, D. (2012) *Optimization of the powerflow control of a hybrid electric powertrain including load profile prediction. In Proceedings of the 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Seoul, Korea.*
11. Xie, S.; He, H.; Peng, J. (2017) *An energy management strategy based on stochastic model predictive control for plug-in hybrid electric buses. Appl. Energy* 2017
12. Mesbah, A.; Kolmanovsky, I.V.; Di Cairano, S. (2019) *Stochastic model predictive control. In Handbook of Model Predictive Control; Berlin/Heidelberg, Germany,*
13. Di Cairano, S.; Bernardini, D.; Bemporad, A.; Kolmanovsky, I.V. *Stochastic mpc with learning for driver-predictive vehicle control and its application to hev energy management. IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2014.
14. Donitz, C.; Vasile, I.; Onder, C.; Guzzella, L. (2009) *Dynamic programming for hybrid pneumatic vehicles. In Proceedings of the 2009 American Control Conference, St. Louis, MO, USA.*
15. Lin, C.C.; Peng, H.; Grizzle, J.W.; Kang, J.M. (2003) *Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. IEEE Trans. Control Syst. Technol.*
16. Moura, S.J.; Fathy, H.K.; Callaway, D.S.; Stein, J.L. (2011) *A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles. IEEE Trans. Control Syst. Technol.*
17. Johri, R.; Filipi, Z. (2014) *Optimal energy management of a series hybrid vehicle with combined fuel economy and low-emission objectives. Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* 2014.

18. Zhou, S.; Wen, Z.; Zhi, X.; Jin, J.; Zhou, S. (2019) *Genetic Algorithm-Based Parameter Optimization of Energy Management Strategy and Its Analysis for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles*. SAE Technical Paper: New York, NY, USA
19. Piccolo, A.; Ippolito, L.; Galdi, V.Z.; Vaccaro, A. (2001) *Optimisation of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms*. In Proceedings of the 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, New York, NY, USA.
20. Xudong, L.; Yanping, W.; Jianmin, D. (2007) *Optimal sizing of a series hybrid electric vehicle using a hybrid genetic algorithm*. In Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China.
21. Dextreit, C.; Kolmanovsky, I.V. (2014) *Game theory controller for hybrid electric vehicles*. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2014
22. Dextreit, C.; Assadian, F.; Kolmanovsky, I.; Mahtani, J.; Burnham, K. (2008) *Hybrid Electric Vehicle Energy Management Using Game Theory*. SAE Technical Paper: New York, NY, USA.
23. Hu, X.; Li, S.; Peng, H.; Sun, F. (2013) *Charging time and loss optimization for linmc and lifepo 4 batteries based on equivalent circuit models*. J. Power Sources 2013
24. Zhou, W.; Zhang, C.; Li, J.; Fathy, H.K. (2016) *A pseudospectral strategy for optimal power management in series hybrid electric powertrains*. IEEE Trans. Veh. Technol. 2016
25. Wu, J.; Zou, Y.; Zhang, X.; Du, G.; Du, G.; Zou, R. (2020) *A hierarchical energy management for hybrid electric tracked vehicle considering velocity planning with pseudospectral method*. IEEE Trans. Transp. Electrification. 2020
26. Salman, M.; Schouten, N.J.; Kheir, N.A. (2000) *Control strategies for parallel hybrid vehicles*. In Proceedings of the 2000 American Control Conference, Chicago, IL, USA
27. Hyeoun-Dong, L.; Seung-Ki, S. (1998) *Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle*. IEEE Trans. Ind. Electron. 1998