

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Морозько О. А., Петренко Ю. Н.

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов»,  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь  
E-mail: o.morozko@mail.ru, ypetrenko@bntu.by

Гибридный электромобиль (ГЭМ) представляет собой комплексную систему, при проектировании которой необходимо принимать во внимание различные и комплекующие между собой параметры. В работе рассмотрены многокритериальный и глобальный методы нахождения оптимального соотношения этих параметров.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с истощением мировых запасов нефти, повышением стоимости сгораемого топлива и ужесточением требований к окружающей среде, в настоящее время все большее внимание уделяется экономии топлива. В результате ведущие автопроизводители начали предлагать гибридные электромобили и подзаряжаемые ГЭМ (ПГЭМ). Однако, данные автомобили дороже и сложнее с точки зрения, как аппаратных средств, так и управления и не смотря на все преимущества (экологичность, экономичность и пр.), они не пользуются большим спросом на рынке из-за меньшей способности удовлетворять все требования пользователей. В данной работе рассмотрены методы нахождения оптимальных параметров ГЭМ, которые помогают при проектировании автомобилей, максимально удовлетворяющих требованиям их покупателей. [1,2]

## I. КРИТЕРИИ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Удовлетворенность пользователя основана на перечне таких критериев как безопасность, ежедневные денежные затраты, надежность, эффективность и т.д. Некоторые критерии, такие как эффективность, легко поддаются вычислению, в то время как другие, такие как комфорт, могут быть оценены только при помощи нечеткого описания. На данном этапе будем рассматривать только вычисляемые критерии:

*максимальная скорость*

$$\eta P_{propulsion}(\omega) = P_{resistance}(\nu) = c_0\nu + c_1\nu^2 + c_2\nu^3$$

где  $\omega$  – скорость двигателя,  $\nu$  – скорость автомобиля,  $\eta$  – КПД трансмиссии,  $c_0, c_1, c_2$  – коэффициенты сопротивления основным движущим силам.

*ускорение*

$$\Delta t_{acc} = m_{eff} \int dV / F_{net}(V)$$

где  $m_{eff}$  – эффективная масса автомобиля,  $F_{net}$  – результирующая сила между движущими силами и силами сопротивления.

Принцип расчета остальных критериев удовлетворенности пользователя (способность преодолевать уклон, безопасность, стоимость) можно найти в [3,4].

Следует отметить, что *совокупный критерий эффективности* может быть оценен, используя линейную комбинацию взвешенных значений параметров, выбранных для конкретного типа автомобиля:

$$S = V_{max}/140 + 12/t_{acc} + p_{max}/6 + 1200/m + 20000/C$$

где  $V_{max}$  – оценочная максимальная скорость ГЭМ,  $t_{acc}$  – оценочное время ускорения от 0 до 100 км/ч,  $p_{max}$  – оценочный преодолеваемый подъем,  $m$  – масса ГЭМ,  $C$  – совокупные затраты.

## II. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Многокритериальная оптимизация (англ. Multi-objective optimization) – это процесс одновременной оптимизации двух или более конфликтующих целевых функций в заданной области определения. Задача многокритериальной оптимизации формулируется следующим образом:

$$\min \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\}$$

$$x \in S$$

$$\text{где } f_i : R^n \rightarrow R$$

$k$  ( $k > 2$ ) – количество целевых функций.

Векторы решений:

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  относятся к непустой области определения  $S$ .

Задача многокритериальной оптимизации состоит в поиске вектора целевых переменных, удовлетворяющего наложенным ограничениям и оптимизирующего векторную функцию, элементы которой соответствуют целевым функциям. Эти функции образуют математическое описание критерия удовлетворительности и, как правило, взаимно конфликтуют. Отсюда, «оптимизировать» означает найти такое решение, при котором значение целевых функций были бы приемлемыми для постановщика задачи. [4]

*Оптимизация по Парето.*

Вектор решения  $x \in S$  называется оптимальным по Парето, если не существует  $x' \in S$ , такого, что  $f_i(x) < f_i(x')$  для всех  $i = 1, \dots, k$  и  $f_i(x) < f_i(x')$  для хотя бы одного  $i$ . Множество оптимальных по Парето решений можно обозначить как  $P(S)$ . Целевой вектор является оптимальным по Парето, если соответствующий ему вектор из области определения также оптимален по Парето. Множество оптимальных по Парето целевых векторов можно обозначить как  $P(Z)$ .

Диапазон значений оптимальных по Парето решений в области допустимых значений дает полезную информацию об исследуемой задаче, если целевые функции ограничены областью определения. Нижние границы оптимального по Парето множества представлены в «идеальном целевом векторе»  $z \in R^k$ . Его компоненты  $z_i$  получены путем минимизации каждой целевой функции в пределах области определения. Множество оптимальных по Парето решений также называют оптимальным Парето-фронтом (англ. Pareto Optimal Front - POF).

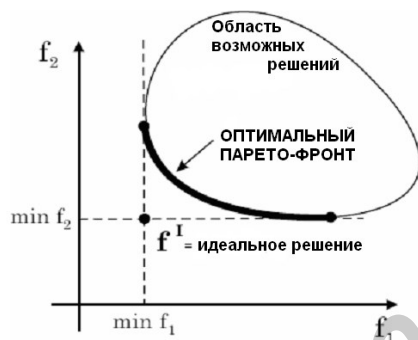


Рис. 1 – Оптимальный Парето-фронт

Целью оптимизации ГЭМ является увеличение УУП при одновременном уменьшении расхода топлива (загрязнений окружающей среды) на основе заданного цикла вождения. Математически проблема многокритериальной оценки ГЭМ будет выражаться следующим образом: *Минимизировать*

$$F(X) = (f_1(x) = E; f_2(x) = 1/S)$$

*Относительно*

$$X = (P_{engine}, P_{motor}, N_{bat})$$

где например  $t_{acc} < 12$  сек,  $V_{max} > 140$  км/ч,  $p_{max} > 0,06$ ,  $m < 1200$  кг,  $C < 20000$  у.е.,  $20 < P_{engine} < 65$ ,  $20 < P_{motor} < 60$ ,  $20 < N_{bat} < 80$ .

Оптимизация изначально ограничена тремя переменными, две из них определяют мощности ДВС и ЭД. Третья определяет число модулей аккумуляторной батареи. Дальнейшее решение многоцелевых функций осуществляется при помощи многоцелевых генетических алгоритмов, как описано в [4].

### III. ГЛОБАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Необходимым условием вычисления оптимума при помощи данного метода является зна-

ние полного цикла движения изначально. Эта информация может быть получена при помощи GPS навигации. Алгоритм глобальной оптимизации основан на принципе оптимальности Беллмана, который вычисляет минимальный расход топлива используя обратный отсчет, от конца цикла  $X(T)$  до начала  $X(0)$  (см. Рис.2). В каждое время  $t$ , и для каждого возможного состояния  $X(t)$ , алгоритм ищет такое состояние  $X(t+1)$  в момент времени  $t+1$ , которое оптимизирует путь из  $X(t)$  до  $X(T)$ , и выбирает этот оптимальный путь. Для ГЭМ и ПГЭМ каждое состояние представляет собой уровень заряда батареи, в то время как номер передачи и распределение момента между ЭД и ДВС являются командами для оптимизации. Управление затем вычисляется на основании включенной передачи и шаблона распределения энергии.[5]

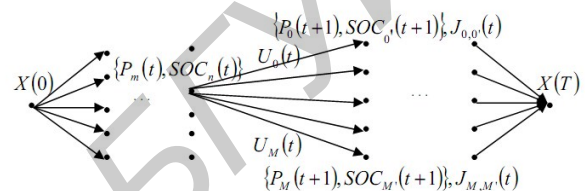


Рис. 2 – Алгоритм глобальной оптимизации по принципу Беллмана

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен литературный обзор современных методов оптимизации параметров ГЭМ. Оптимизация параметров осуществляется на основании описанных критериев удовлетворенности пользователей. Описаны многокритериальный и глобальные методы оптимизации применительно ГЭМ.

1. Nemry, F. Plug-in Hybrid and Bat.-Elec. Vehicles: State of the research and dvlpmnt and comparative analysis of energy and cost efficiency / F. Nemry, G. Leduc, A. Muñoz // Institute for Prospective Technological Studies, Luxembourg. - 2009.
2. Гулия Н.В., Давыдов В.В., Лаврентьев А.И. Радиальное повышение эффективности силовой установки гибридного автомобиля. ЗАО «Комбарко», г. Москва. - 2010.
3. Kim, M.-J. Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles / H. Peng, M.-J. Kim // Journal of Power Sources. - Vol 165. - March 2007. - P.P. 583-593.
4. Nzisabira J., Duysinx P. Eco-efficiency optimization of Hybrid Electric Vehicle based on response surface method and genetic algorithm / J. Nzisabira, P. Duysinx, Y. Louvigny // Proceedings of EET-2008 European Ele-Drive Conference. - Geneva, Switzerland, March 2008.
5. Pagerit S., Karbowski D. PHEV Control Strategy Optimization Using MATLAB Distributed Computing: From Pattern to Tuning / S. Pagerit, D. Karbowski, S. Bittner, A. Rousseau, Ph. Sharer // MathWorks Automotive Conference Proceedings. - Stuttgart, Germany, June 2008. Mode of access: <http://www.mathworks.com>. - Date of access: 23.09.2013.