

УДК 629.33.03-83

Логачев Вячеслав Николаевич, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, electro@madi.ru

Лайко Елена Михайловна, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, electro@madi.ru

Сидоров Кирилл Михайлович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, k.sidorov@bk.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

Аннотация. Ограниченность углеводородного топлива, а также проблемы загрязнения воздушной среды, являются основными факторами, стимулирующими развитие транспортных средств с альтернативными источниками энергии. Электромобили с комбинированными энергетическими установками способны обеспечить выполнение перспективных требований по экологической безопасности и энергетической эффективности. Однако комбинированная энергоустановка, в сравнении с силовым агрегатом автомобиля традиционной конструкции, является более сложной системой как по составу оборудования, так и по алгоритмам работы. Определение характеристик основных компонентов энергоустановки, эффективных режимов и алгоритмов функционирования последних является задачей многокритериальной оптимизации. В настоящей статье рассмотрена возможность комплексной оценки принятия технических решений при проектировании и сравнении сложных транспортных средств на основе модели расстояния векторного критерия, учитывающего значительное количество частных показателей. Предложены коэффициенты нормирования и важности отдельных взаимозависимых частных критериев, определяемых на основе информации, содержащейся в самой совокупности выбранных частных критериев.

Ключевые слова: электромобиль, комбинированная энергетическая установка, эффективность, оптимизация, математическое моделирование, показатель качества, критерий эффективности, скаляризация.

Logachev Vyacheslav N., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, electro@madi.ru

Layko Elena M., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, electro@madi.ru

Sidorov Kirill M., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, k.sidorov@bk.ru

COMPLEX ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF AN HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Abstract. The limited hydrocarbon fuel, as well as the problems of air pollution, are the main factors stimulating the development of vehicles with alternative energy sources. Hybrid electric vehicles are able to meet future requirements for environmental safety and energy efficiency. However, the hybrid power plant, in comparison with the power plant of a conventional vehicle, is a more complex system, both in terms of equipment composition and in operation algorithms. Characterization of the main components of the power plant, effective modes and algorithms for the operation of the latter is the task of multi-criteria optimization. This article discusses the possibility of an integrated assessment of the adoption of technical decisions in the design and comparison of complex vehicles based on the vector criterion distance model, which takes into account a significant number of particular indicators. The coefficients of valuation and the importance of individual interdependent particular criteria, determined on the basis of the information contained in the set of selected particular criteria, are proposed.

Key words: hybrid electric vehicle, hybrid power plant, efficiency, optimization, mathematical modeling, quality indicator, efficiency criterion, scalarization.

Введение

Проблемы оздоровления атмосферы больших городов, связанные со значительным ростом автомобильного парка, привели к интенсивному развитию транспортных средств, использующих альтернативные источники энергии, – электромобилям (ЭМ) и электромобилям с комбинированными энергоустановками (ЭМ с КЭУ).

При создании и оптимизации ЭМ с КЭУ, как и любого другого сложного технического устройства, возникает многовариантная задача выбора структуры, параметров отдельных элементов, режимов их работы, стратегии управления и др.

Всесторонняя оценка подразумевает использование достаточно большого количества частных показателей качества (ЧПК). При этом используемые показатели имеют различные единицы измерения, пределы изменения, являются явно или неявно взаимозависимыми [1].

Совокупность ЧПК, учитывающая предъявляемые к ЭМ с КЭУ требования и используемая при оценке его эффективности, должна включать эксплуатационные, экономические, энергетические, а также экологические показатели.

Таким образом, для комплексной оценки такого сложного объекта, как ЭМ с КЭУ, необходимо осуществить преобразование многомерного вектора состояния качества к скалярной величине – комплексному показателю качества (КПК), искомому в виде явно заданной функции от значений ЧПК и принимаемой за обобщенный критерий эффективности (ОКЭ) [2–4].

Модели скаляризации

Скаляризация векторного критерия может осуществляться различными методами [5]. Один из наиболее известных – экспертный метод [6]. Это такой метод оценивания качества вариантов, который связан с непосредственным участием опытных специалистов (экспертов) в процессе присвоения оценок сравниваемым вариантам. При оценивании качества объектов широко используются следующие экспертные методики: бальное оценивание, ранжирование, разнесение по категориям (кластерам), парные сравнения [1].

Эти методы позволяют использовать взаимозависимые ЧПК, которые обладают различной важностью, различные шкалы измерения объектов и целевое назначение.

Однако экспертные методы имеют целый ряд недостатков:

– высокая трудоемкость;

- ограниченность количества оцениваемых объектов (10...15 единиц);
- необходимость создания экспертной комиссии при каждой процедуре оценивания объектов;
- субъективизм.

Большое распространение получила линейная модель скаляризации, имеющая вид:

$$Y_i = \sum_{j=1}^n a_j \cdot z_{ji}, j = 1, n; \quad (1)$$

где a_j ($j = 1, n$) – весовые коэффициенты, определяющие важность ЧПК, z_{ji} ($j = 1, n$) – нормированные значения ЧПК.

Упрощенной модификацией (1) является аддитивная модель, где ОКЭ объектов представляется в виде простой суммы ЧПК, т.е.

$$Y_j = \sum_{i=1}^n x_{ji}, j = 1, n. \quad (2)$$

Очевидно, что такая модель будет адекватной при оценке эффективности только в том случае, когда все ЧПК (x_{ji}) будут иметь одинаковую важность и одну размерность.

Известна также мультипликативная модель скаляризации:

$$Y_j = \prod_{i=1}^n (x_{ji})^{a_i}, \quad (3)$$

где a_i – коэффициенты важности ЧПК.

Модели (1) и (2), наряду с простотой вычисления в качестве преимущества, обладают и серьезными недостатками, в том числе: выбор весовых коэффициентов субъективен; использование возможно только при независимых ЧПК; возможность взаимной компенсации значений одних ЧПК за счет других. Это может привести к тому, что внутреннее перераспределение балльных оценок в итоговый результат будет искажать картину реальных свойств объектов, поскольку вклад отдельных ЧПК

в конечный результат может иметь прямо противоположный характер при неизменной суммарной оценке.

Существуют модели скаляризации векторного критерия, применимые в случае зависимых ЧПК. К ним относятся модели, основанные на факторном анализе и многомерном шкалировании [7].

Однако применение факторного анализа ограничивается достаточно жесткими требованиями к исходным данным (ЧПК должны быть количественными и распределяться в соответствии с многомерным нормальным законом). К существенным недостаткам многомерного шкалирования можно отнести отсутствие гарантии существования генерального фактора или адекватной латентной оси и искажение результатов оценивания объектов при наличии ограничений на значения ЧПК [8].

Методология комплексной оценки эффективности ЭМ с КЭУ

Все методы оценивания качества сложных объектов сводятся к определению соответствия объекта его целевому назначению, т.е. близостью к некоторому эталону. Но естественной мерой близости является расстояние.

В зависимости от коррелированности ЧПК n -мерное пространство состояния качества вариантов может быть евклидовым (ортогональным) или косоугольным (при независимых ЧПК и взаимозависимых соответственно).

В первом случае геометрической интерпретацией состояния критерия качества (Y_j) является вектор в ортогональной системе координат, выходящий из начала координат в точку с координатами $(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn})$.

Для комплексной оценки качества необходимо в пространстве ЧПК задать эталонный объект $Y_0 (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ и выбрать соответствующую метрику, т.е. в данном случае евклидово расстояние:

$$d(y_j, y_0) = \left(\sum_{i=1}^n (x_{ji} - x_{0i})^2 \right)^{1/2}, \quad j = 1, n, \quad (4)$$

где x_{ji} – значение i -го ЧПК для j -го объекта; x_{0i} – значение i -го ЧПК для эталонного объекта.

Значения $d(y_j, y_0)$, определяющие меру близости оцениваемого объекта к эталонному, интерпретируются как значения КПК.

В качестве эталонного объекта целесообразно использовать идеальный вариант ЭМ с КЭУ, характеризующийся наилучшими значениями всех ЧПК одновременно. Это позволяет исключить изменения оценок вариантов ЭМ с КЭУ при изменении ЧПК эталонного (наилучшего на данный момент) образца.

С целью упрощения вычисления КПК частные показатели подвергаются специальным преобразованиям: унификации и нормированию [9].

Унификация обеспечивает приведение ЧПК к единому типу – положительным числам, меньшим значением которых соответствует лучший вариант ЭМ. При такой унификации идеальный вариант ЭМ в пространстве унифицированных ЧПК всегда будет находиться в начале координат, т.е. его частные показатели $x_{0iy} = 0$.

Нормирование является обязательным преобразованием и предполагает получение одинаковых масштабов измерения унифицированных ЧПК. При отсутствии нормирования различные ЧПК будут давать различные «вклады» в расстояние до идеального варианта ЭМ.

$$x_{in} = x_{iy} / \beta_i, \quad (5)$$

где β_i , x_{iy} , x_{in} – коэффициенты нормирования, унифицированные и нормированные значения каждого i -го ЧПК соответственно.

Величины коэффициентов нормирования каждого ЧПК определяются из условий одинаковости приращения используемой меры

близости при равенстве относительных приращений нормированных показателей.

$$\beta_i = [m^2(x_{iy}) + \sigma^2(x_{iy})]^{1/2}, \quad (6)$$

где $m(x_{iy})$, $\sigma(x_{iy})$ – математическое ожидание и дисперсия i -го ЧПК.

Поскольку частные показатели ЭМ являются зависимыми, то пространство множества сравниваемых вариантов является косоугольным. Поэтому для измерения расстояния d_j в этом пространстве целесообразно использовать метрику Махаланобиса [10]:

$$d_j = [(x_j - x_0)^T \cdot R^{-1} \cdot (x_j - x_0)]^{1/2}, \quad (7)$$

где $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj})$ – многомерный вектор j -го варианта, $x_0 = (x_{10}, x_{20}, x_{30}, \dots, x_{n0})$ – вектор идеального варианта, R^{-1} – обратная корреляционная матрица ЧПК.

Учет важности ЧПК осуществляется путем введения весовых коэффициентов α_i ($i = 1, 2, \dots, n$), отражающих их относительную важность. При этом предполагается, что коэффициенты α_i связаны с важностью ЧПК прямой зависимостью, т.е. чем больше значение α_i , тем выше важность соответствующего ЧПК.

Значения коэффициентов важности определяются на основе информации, содержащейся в значениях самих ЧПК для выборки оцениваемых вариантов ЭМ. Метод основан на определении по экспериментальным данным относительных вкладов в метрику ЧПК, отнормированных к одному масштабу и диапазону измерения.

Вычисление коэффициентов важности производится по выражению:

$$\beta_i = \frac{y_{0i}^2}{[m^2(y_i) + \sigma^2(y_i)] \sum_{k=1}^n \frac{y_{0k}^2}{m^2(y_k) + \sigma^2(y_k)}}, \quad (8)$$

где y_{0i} – унифицированное требуемое значение i -го ЧПК.

С учетом весовых коэффициентов ЧПК вычисления ОКЭ по (7) принимают вид:

$$d_j = [\vec{y}_{jn} \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B \cdot (\vec{y}_{jn})^T]^{1/2}, \quad (9)$$

где \vec{y}_{jn} – вектор-строка отнормированных значений ЧПК для j -го варианта ЭМ с КЭУ; B – матрица весовых коэффициентов; R^{-1} – ковариационная матрица значений ЧПК.

Использование ОКЭ как комплексного показателя качества для сравнения различных вариантов ЭМ с КЭУ предполагает наличие конечной совокупности ЧПК.

При исследовании ЭМ с КЭУ на базе автомобиля грузоподъемностью 850 кг были использованы эксплуатационные показатели – величина пробега, транспортная работа, производительность; экономические – затраты на топливо и АБ, включая расходы на электроэнергию; энергетические – расход топлива, электроэнергии и условного топлива, а также экологические – обобщенный показатель приведенных массовых выбросов токсичных веществ.

Городские эксплуатационные условия движения имитировались заданием различных ездовых циклов, включая циклы НАМИ-1 и НАМИ-2. Варьируемыми параметрами, определяющими режимы работы электропривода и ДВС, являлись время подключения ДВС и график движения на фазе разгона.

Расчеты ОКЭ показали, что вариант ЭМ с КЭУ по последовательной схеме со стратегией управления – нулевым балансом энергии АБ в цикле движения – является наихудшим из всех вариантов ЭМ. При заданных суточных пробегах $L_{сут} = 60$ км и $L_{сут} = 230$ км эффективность ЭМ с КЭУ по параллельной схеме уступает «чистому» ЭМ в первом случае и автомобилю с ДВС во втором.

Заключение

Сопоставление по ОКЭ различных транспортных средств с автономными энергетическими установками позволяет не только сравнивать различные варианты ЭМ с КЭУ и оптимизировать режимы работы его элементов, но и проводить структурную и параметрическую оптимизацию на ранних этапах проектирования с учетом всей совокупности известных основных эксплуатационных, экономических, технических и экологических показателей.

Список литературы

1. Гребенников, А.Г. Формирование функции полезности при свёртке критериев векторной оптимизации проектных параметров пассажирского самолёта на этапе предварительного проектирования / А.Г. Гребенников, Г.Б. Варшавьяк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 35. – С. 91–98.
2. Ногин, В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2002. – 144 с.
3. Сафронов, В.В. Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования / В.В. Сафронов. – Саратов: Научная книга, 2009. – 329 с.
4. Лотов, А.В. Многокритериальные задачи принятия решений / А.В. Лотов, И.И. Пospelова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
5. Руа, Б. Проблемы и методы принятия в задачах со многими целевыми функциями / Б. Руа // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1977. – С. 5–20.
6. Экспертные оценки. Методы и применение: (обзор) / Д.С. Шмерлинг, С.К. Дубовский, Т.Д. Аржанова, А.А. Френкел // Статистические методы анализа экспертных оценок. – М.: Наука, 1977. – С. 299–382.

7. Воронцов, К.В. Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования: курс лекций / К.В. Воронцов. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 18 с.
8. Петров, Э.Г. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах / Э.Г. Петров, М.В. Новожилов, И.В. Гребенник. – Донецк: ОЛБИ-Пресс, 2003. – 380 с.
9. Борисов, В.Н. Проблемы векторной оптимизации / В.Н. Борисов // Исследование операций. – М.: Наука, 1972. – С. 72–91.
10. De Maesschalck, R. The Mahalanobis distance / R. De Maesschalck, D. Jouan-Rimbaud, D.L. Massart // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. – 2000. – Vol. 50, issue 1. – P. 1–18.

References

1. Grebennikov A.G., Varshav'yak G.B. *Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii*, 2007, no. 35, pp. 91–98.
2. Nogin V.D. *Prinyatie reshenij v mnogokriterial'noj srede: kolichestvennyj podhod* (Making decisions in a multi-criteria environment: a quantitative approach), Moscow, Fizmatlit, 2002, 144 p.
3. Safronov V.V. *Osnovy sistemnogo analiza: metody mnogovektornoj optimizacii i mnogovektornogo ranzhirovaniya* (Basics of system analysis: methods of multi-vector optimization and multi-vector ranking), Saratov, Nauchnaya kniga, 2009, 329 p.
4. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenij* (Multi-criteria decision making tasks), Moscow, MAKS Press, 2008, 197 p.
5. Rua B. *Voprosy analiza i procedury prinyatiya reshenij*, Moscow, 1977, pp. 5–20.
6. Shmerling D.S., Dubovskij S.K., Arzhanova T.D., Frenkel A.A. *Statisticheskie metody analiza ehkspertnyh ocenok*, 1977, pp. 299–382.

7. Voroncov K.V. *Algoritmy klasterizacii i mnogomernogo shkalirovaniya* (Algorithms for clustering and multidimensional scaling), Moscow, Izd-vo MGU, 2007, 18 p.

8. Petrov E.G. Novozhilov M.V., Grebennik I.V. *Metody i sredstva prinyatiya reshenij v social'no-ehkonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemah* (Methods and means of decision making in socio-economic and technical systems), Doneck, OLBI-Press, 2003, 380 p.

9. Borisov V.N. *Issledovanie operacij*, 1972, pp. 72–91.

10. De Maesschalck, R. Jouan-Rimbaud D., Massart D.L. The Mahalanobis distance, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2000, vol. 50, issue 1, pp. 1–18.