

LỰA CHỌN ĐA TIÊU CHÍ CẤU TRÚC TRUYỀN LỰC LOẠI TRUNG TÂM VÀ PHÂN TÁN CHO Ô TÔ ĐIỆN CÁ NHÂN CỠ LỚN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH THỨ BẬC AHP

MULTI-CRITERIA SELECTION OF CENTRALIZED AND DISTRIBUTED ELECTRIC POWERTRAIN CONFIGURATIONS FOR LARGE BATTERY-ELECTRIC VEHICLES USING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)

Nguyễn Hùng Mạnh^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2026.165>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu lựa chọn cấu trúc truyền lực cho ô tô điện cá nhân cỡ lớn (xe 5 chỗ) thông qua phương pháp phân tích thứ bậc (AHP) dựa trên phân tích chuyên gia. Bài báo đề xuất 11 tiêu chí thuộc 4 nhóm: Công nghệ và hiệu suất (T); Kinh tế và sản xuất (E); Vận hành và bảo trì (O) và Bền vững (S) được thiết lập để so sánh bốn cấu hình truyền động: Trung tâm (FWD-C, AWD-C); phân tán (FWD-D, AWD-D). Với hệ số nhất quán $CR = 0,039$, kết quả AHP chỉ ra nhóm tiêu chí vận hành và bảo trì (O) có trọng số ưu tiên cao nhất (52,1%). Dựa trên cơ sở này, cấu trúc FWD-C được xác định là lựa chọn tối ưu (điểm tổng hợp 0,334) nhờ tối đa hóa độ tin cậy vận hành. Ngược lại, cấu trúc phân tán AWD-D xếp vị trí thấp nhất (0,165) do hạn chế về khối lượng không treo và độ phức tạp bảo trì. Đặc biệt, phân tích độ nhạy khẳng định tính vững chắc của cấu trúc FWD-C. Cấu trúc AWD-C chỉ giành lợi thế khi trọng số công nghệ vượt quá 74,7% (mức thực tế 29,7%). Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở định lượng giúp nhà các nhà nghiên cứu, nhà sản xuất cân bằng giữa hiệu quả kỹ thuật và kinh tế trong việc lựa chọn cấu hình truyền lực phù hợp cho xe điện.

Từ khóa: Ô tô điện; cấu trúc truyền lực ô tô điện; phương pháp AHP; cấu trúc truyền lực trung tâm; cấu trúc truyền lực phân tán.

ABSTRACT

This study investigates the selection of powertrain architectures for large 5-seater passenger electric vehicles using an Expert-based Analytic Hierarchy Process (AHP). A comprehensive framework comprising 11 criteria across four dimensions: Technology & Performance (T), Economics & Manufacturing (E), Operation & Maintenance (O), and Sustainability (S) was established to evaluate four configurations: Centralized (FWD-C, AWD-C) and Distributed (FWD-D, AWD-D). With a consistency ratio of $CR = 0.039$, AHP results indicate that the Operation & Maintenance dimension (O) holds the highest priority weight (52.1%). Consequently, the FWD-C architecture is identified as the optimal choice (global score 0.334) due to its maximization of operational reliability. Conversely, the distributed AWD-D configuration ranked lowest (0.165) owing to limitations regarding unsprung mass and maintenance complexity. Notably, sensitivity analysis confirms the robustness of the FWD-C selection; the AWD-C alternative only gains an advantage if the Technology weight exceeds 74.7% (compared to the baseline 29.7%). These findings provide a quantitative basis for researchers and manufacturers to balance technical performance with economic feasibility in selecting appropriate EV powertrain configurations.

Keywords: Electric Vehicles (EV); EV Powertrain Configuration; Analytic Hierarchy Process (AHP); Centralized Drive Configuration; Distributed Drive Configuration.

¹Khoa Cơ khí - Ô tô và Xây dựng, Trường Đại học Điện Lực

*Email: manhnh@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/01/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Cam kết Net Zero toàn cầu và các quy định khắt khe về khí thải đang thúc đẩy quá trình điện khí hóa giao thông vận tải diễn ra với tốc độ chưa từng có [1]. Trong đó, loại ô tô điện cá nhân cỡ lớn (xe 5 chỗ hạng C/D) đóng vai trò then chốt trong chiến lược phổ cập phương tiện điện. Tuy nhiên, khác với các dòng xe hiệu suất cao hay xe đô thị cỡ nhỏ, nhu cầu về loại xe cá nhân cỡ lớn này (xe gia đình) đặt ra một bài toán tối ưu đa mục tiêu phức tạp: yêu cầu sự cân bằng giữa chi phí sở hữu, độ tin cậy vận hành và các tiêu chuẩn ngày càng cao về tính bền vững [2, 3]. Hiện nay, các nghiên cứu sâu về ô tô điện đang phát triển mạnh mẽ theo các hướng chuyên biệt: tối ưu hóa hóa học pin và hệ thống quản lý năng lượng (BMS) để gia tăng quãng đường di chuyển [4-6]; phát triển các thuật toán điều khiển véc-tơ mô-men xoắn để nâng cao tính năng động lực học [7, 8]; hay tích hợp trí tuệ nhân tạo hướng tới xe tự lái [9,10]. Tuy nhiên việc lựa chọn cấu trúc truyền lực có quyết định trực tiếp đến không gian, hiệu suất và chi phí của xe hiện chưa được quan tâm thỏa đáng ở cấp độ phân tích hệ thống. Một trong những quyết định kỹ thuật chiến lược của nhà sản xuất là lựa chọn giữa cấu hình truyền lực loại trung tâm (tập trung) và phân tán cho xe điện. Cấu hình truyền lực trung tâm thường sử dụng một (với dẫn động 1 cầu chủ động) hoặc hai mô tơ điện (với dẫn động 2 cầu chủ động) kết hợp với các bộ phận truyền cơ khí như hộp số, vi sai và bán trục. Ngược lại, cấu hình phân tán sử dụng mô tơ điện độc lập cho từng bánh xe, loại bỏ hoàn toàn các bộ truyền cơ khí phức tạp. Việc lựa chọn giữa các cấu hình này với các phương án cấu trúc bố trí 2 bánh xe chủ động cầu trước (FWD-Front Wheel Drive) hay tất cả các bánh xe chủ động (AWD- All Wheel Drive) là một bài toán phân tích, lựa chọn đa tiêu chí.

Trong nghiên cứu này đề xuất ứng dụng phương pháp phân tích thứ bậc AHP (Analytic Hierarchy Process) dựa trên phân tích chuyên gia (Expert-based Analytic Hierarchy Process) nhằm định lượng và lựa chọn cấu hình truyền động tối ưu cho loại xe điện cá nhân cỡ lớn (xe gia đình). Tính mới của nghiên cứu nằm ở việc thiết lập một khung đánh giá toàn diện dựa trên đề xuất 4 nhóm tiêu chí: công nghệ và hiệu suất (T), Kinh tế và sản xuất (E), Vận hành và bảo trì (O) và tính bền vững (S). Kết quả nghiên cứu không chỉ cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn giải pháp kỹ thuật cho cấu trúc truyền lực kiểu trung tâm, phân tán với cấu hình 2 bánh xe hay 4 bánh xe chủ động mà còn định hướng chiến lược phát triển sản phẩm cân bằng giữa lợi ích kỹ thuật và kinh tế của nhà sản xuất.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Với mục tiêu lựa chọn cấu hình truyền lực trung tâm hay phân tán phù hợp cho xe điện cá nhân cỡ lớn, trong nghiên cứu này đề xuất 4 cấu trúc: FWD- truyền động cầu trước, trong đó: FWD-C: trung tâm cầu trước; FWD-D: Phân tán độc lập 2 bánh trước; AWD: truyền động 4 bánh xe chủ động, trong đó: AWD-C: truyền động trung tâm mỗi cầu; AWD-D: truyền động phân tán độc lập mỗi bánh xe. Ý nghĩa của 4 phương án cấu trúc được thể hiện trên bảng 1.

Bảng 1. Các phương án cấu trúc truyền lực nghiên cứu

Phương án	Nội dung và ký hiệu	Ý nghĩa
Các bánh xe chủ động (FWD)	<i>Trung tâm cho 2 bánh trước (FWD-C)</i>	Sử dụng 1 mô tơ điện trung tâm cùng bộ truyền cơ khí: hộp số, bộ truyền lực chính- vi sai và bán trục;
	<i>Phân tán cho 2 bánh trước (FWD-D)</i>	Sử dụng 2 mô tơ điện phân tán tại mỗi bánh xe, không sử dụng hộp số và bộ truyền lực chính- vi sai và bán trục;
Tất cả các bánh xe chủ động (AWD)	<i>Trung tâm cho 2 bánh xe trên 1 trục (AWD-C)</i>	Sử dụng 2 mô tơ điện trung tâm cùng 2 bộ truyền cơ khí: hộp số, bộ truyền lực chính - vi sai và bán trục cho 2 trục;
	<i>Phân tán cho mỗi bánh xe trên 1 trục (AWD-D)</i>	Sử dụng 4 mô tơ điện phân tán cho 4 bánh xe, hoàn toàn không sử dụng các bộ truyền cơ khí.

Bảng 2. Các tiêu chí mức 1 và 2 để xuất nghiên cứu

Tiêu chí mức 1 (ký hiệu)	Tiêu chí mức 2 (Ký hiệu)	Ý nghĩa
Công nghệ và hiệu suất [12-18] (T)	Hiệu suất truyền động (T1)	Mức tiêu thụ năng lượng Wh/km (theo chu trình đô thị WLTC)
	Tính năng động lực học (T2)	Điều khiển lực kéo/phanh chủ động nâng cao ổn định chuyển động
	Khối lượng không treo (T3)	Tăng khối lượng không treo, ảnh hưởng tới tính êm dịu chuyển động
	Hiệu quả bố trí không gian (T4)	Mở rộng không gian bố trí nhờ việc bố trí hệ truyền lực
Kinh tế và sản xuất [19, 20] (E)	Chi phí sản xuất tương đối (E1)	Chi phí đánh giá dựa trên số lượng các thành phần kết cấu của hệ truyền lực
	Độ phức tạp trong sản xuất và lắp ráp (E2)	Độ phức tạp trong dây chuyền sản xuất
	Khả năng nội địa hoá (E3)	Mức độ nội địa hoá giúp giảm giá thành sản phẩm

Vận hành và bảo trì [21] (O)	Chi phí năng lượng và bảo trì (O1)	Chi phí năng lượng và chi phí cho dịch vụ về bảo dưỡng và sửa chữa
	Độ tin cậy và khả năng thích ứng vận hành (O2)	Khả năng hoạt động ít lỗi, sự cố
Tính bền vững [22, 23] (S)	Tác động môi trường (S1)	Phát thải trong quá trình sản xuất
	Vòng đời và khả năng tái chế (S2)	Khả năng tái chế, thu hồi nguyên vật liệu

Bài báo này sử dụng phương pháp phân tích thứ bậc AHP dựa trên phân tích chuyên gia. Phương pháp này có ưu thế nổi bật nhờ khả năng lượng hóa mức độ ưu tiên của các tiêu chí thông qua so sánh cặp, đảm bảo tính nhất quán và logic khoa học, giúp đưa ra quyết định tối ưu. Phương pháp AHP sử dụng ma trận so sánh cặp tiêu chí với thang đo đánh giá mức độ quan trọng Saaty (Sử dụng thang đo với điểm số từ 1 đến 9 tương ứng với mức độ quan trọng tăng dần), tính trọng số qua chuẩn hóa véc tơ riêng, và kiểm tra tính nhất quán ($CR < 0,1$) [10, 11]. Trên cơ sở tham khảo kinh nghiệm nghiên cứu và phân tích của các chuyên gia trong lĩnh vực công nghệ và sản xuất ô tô, nghiên cứu này đề xuất 4 nhóm tiêu chí mức 1, và tương ứng 11 tiêu chí mức 2 được thể hiện văn tắt trong bảng 2.

2.1. Trọng số của các nhóm tiêu chí và thành phần của từng nhóm

Bảng 3. Ma trận so sánh từng cặp của 4 nhóm tiêu chí

Nhóm tiêu chí	Công nghệ và hiệu suất (T)	Kinh tế và sản xuất (E)	Vận hành và bảo trì (O)	Tính bền vững (S)
Công nghệ và hiệu suất (T)	1	5	$\frac{1}{2}$	3
Kinh tế và sản xuất (E)	1/5	1	1/7	1/3
Vận hành và bảo trì (O)	2	7	1	5
Tính bền vững (S)	1/3	3	1/5	1
Tổng giá trị	3,53	16	1,84	9,33

Bảng 4. Ma trận chuẩn hoá và trọng số 4 nhóm tiêu chí

Nhóm tiêu chí	(T)	(E)	(O)	(S)	Trọng số (%)
(T)	0,283	0,313	0,271	0,321	0,297 (29,7%)
(E)	0,057	0,063	0,077	0,036	0,058 (5,8%)
(O)	0,566	0,438	0,543	0,536	0,521 (52,1%)
(S)	0,094	0,188	0,109	0,107	0,124 (12,4%)

Việc xác định trọng số của các nhóm tiêu chí mức 1 và các tiêu chí mức 2 trong phương pháp AHP đóng vai trò quan trọng nhằm đánh giá so sánh 4 phương án cấu trúc (FWD-C, FWD-D, AWD-C, AWD-D). Trọng số phản ánh mức độ ưu tiên của từng nhóm và tiêu chí, giúp lượng hóa tầm quan trọng tương đối dựa trên phân tích chuyên gia, yêu cầu thực tiễn ứng dụng trên ô tô điện, như hiệu suất kỹ thuật hay chi phí sản xuất. Xác định ma trận so sánh cặp nhóm tiêu chí và trọng số của chúng khi sử dụng thang đo Saaty như thể hiện trên bảng 3. Xác định ma trận chuẩn hoá và trọng số của 4 tiêu chí mức 1 được xác định thông qua giá trị trung bình của mỗi hàng ngang bảng 4.

Theo lý thuyết phương pháp AHP, kiểm tra tính nhất quán trong xây dựng ma trận với hệ số nhất quán CR (Consistency Ratio) nhận được $CR = 0,039 < 0,1$. Điều này khẳng định ma trận thiết lập ở bảng 2 có logic, phù hợp, giá trị trọng số đã xác định là phù hợp.

Với mỗi tiêu chí mức 1, tương tự thiết lập các ma trận so sánh mức độ quan trọng (sử dụng thang đánh giá mức độ quan trọng Saaty và phân tích chuyên gia) của các tiêu chí mức 2 tương ứng để từ đó xác định được trọng số cục bộ của từng tiêu chí mức 2. Từ trọng số của các tiêu chí mức 1 và tiêu chí cục bộ mức 2, xác định được trọng số toàn thể (toàn cục) như thể hiện trên bảng 5.

Bảng 5. Ma trận trọng số cục bộ và toàn cục của các tiêu chí

Trọng số 4 tiêu chí mức 1	Tiêu chí mức 2	Trọng số các tiêu chí mức 2 (cục bộ)	Trọng số toàn thể (toàn cục)
T (0,297)	T1	0,15	0,045
	T2	0,35	0,104
	T3	0,20	0,059
	T4	0,30	0,089
E (0,058)	E1	0,40	0,023
	E2	0,20	0,012
	E3	0,40	0,023
O (0,521)	O1	0,30	0,156
	O2	0,70	0,365
S (0,124)	S1	0,60	0,074
	S2	0,40	0,050

2.2. Đánh giá so sánh tổng hợp các phương án đề xuất

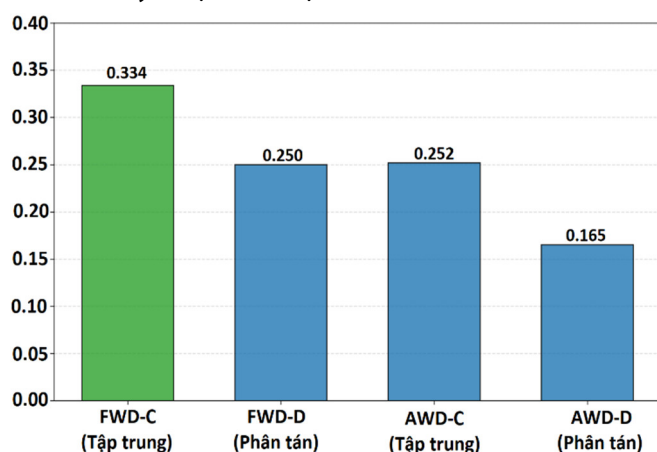
Sau khi xác định được trọng số toàn cục của 11 tiêu chí mức 2, với từng tiêu chí này, thiết lập ma trận so sánh điểm số 4 phương án lựa chọn cấu trúc truyền lực để từ đó xác định được trọng số của chúng. Tổng hợp kết quả xác định điểm số của 4 phương án lựa chọn bố trí hệ

truyền lực nghiên cứu tương ứng với trọng số toàn cục của 11 tiêu chí mức 2 được đưa ra trong bảng 6. Mặt khác điểm tổng hợp của từng cấu trúc truyền lực đề xuất được xác định là tổng của tích số của trọng số toàn cục với điểm số của 1 cấu trúc. Kết quả điểm tổng hợp được đưa ra ở hàng cuối của bảng 6.

Bảng 6. Tổng hợp điểm số của 4 phương án cấu trúc hệ truyền lực đề xuất

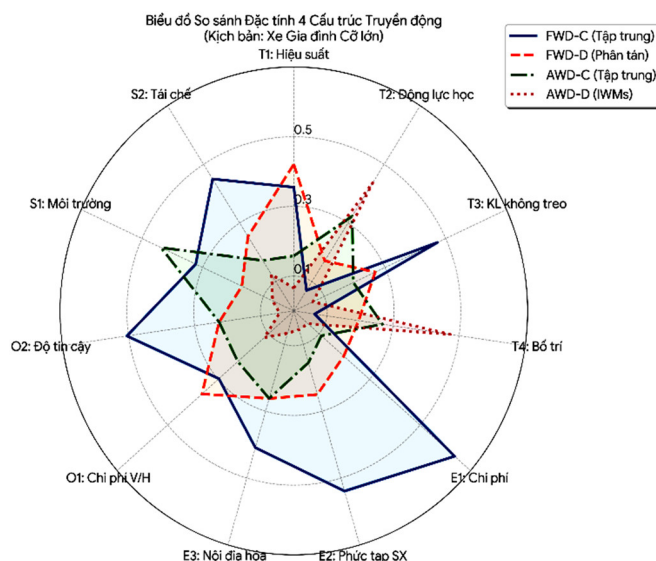
Tiêu chí mức 2	Trọng số toàn cục	Trọng số của các cấu trúc truyền lực đề xuất			
		FWD-C	FWD-D	AWD-C	AWD-D
T1	0,045	0,355	0,421	0,158	0,066
T2	0,104	0,070	0,171	0,323	0,437
T3	0,059	0,473	0,268	0,196	0,063
T4	0,089	0,063	0,196	0,268	0,473
E1	0,023	0,637	0,198	0,109	0,056
E2	0,012	0,539	0,250	0,155	0,056
E3	0,023	0,409	0,262	0,262	0,067
O1	0,156	0,297	0,364	0,222	0,117
O2	0,365	0,505	0,226	0,226	0,043
S1	0,074	0,323	0,171	0,437	0,070
S2	0,050	0,450	0,254	0,172	0,124
Điểm số phương án		0,334	0,250	0,252	0,165

Kết quả điểm số phương án cho thấy với ô tô điện gia đình cỡ lớn, điểm số của cấu trúc truyền lực tập trung cho cầu trước (FWD-C) có điểm số cao nhất, tiếp theo là cấu trúc truyền lực tập trung với 4 bánh chủ động (AWD-C) và dạng phân tán ở các bánh xe trục trước (FWD-D). Biểu đồ hình 1 biểu diễn kết quả điểm số đánh giá so sánh 4 loại cấu trúc truyền lực ô tô điện.



Hình 1. Biểu đồ so sánh điểm đánh giá của 4 cấu trúc truyền lực ô tô điện

Biểu diễn trực quan các chỉ tiêu trên với 4 phương án cơ cấu truyền lực đề xuất thể hiện trên biểu đồ radar hình 2.



Hình 2. Biểu đồ radar các 11 tiêu chí của đánh giá của 4 cấu trúc truyền lực ô tô điện

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ ĐÁNH GIÁ

3.1. Phân tích kết quả đánh giá các cấu trúc truyền lực đề xuất

Kết quả phân tích từ ma trận quyết định AHP và được chỉ ra trên biểu đồ cột (hình 1) hoặc biểu đồ radar (hình 2) đã cho thấy sự phân hoá rõ rệt về mức độ phù hợp giữa các cấu trúc truyền lực đối với ô tô điện cá nhân cỡ lớn.

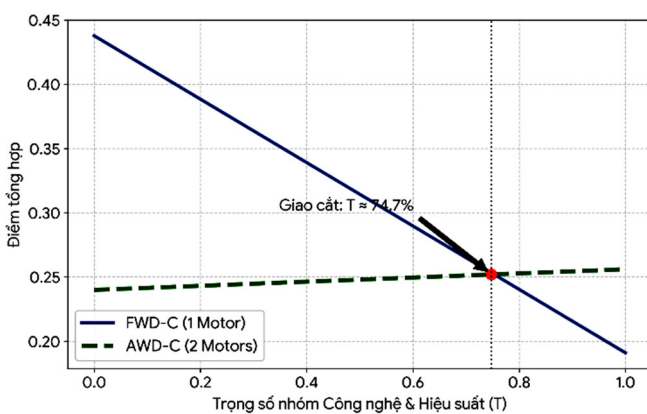
Cấu trúc FWD-C (Tập trung - Cầu trước) có điểm đánh giá tổng hợp lớn nhất 0,334. Cấu trúc này có ưu điểm nổi bật không phải từ chỉ tiêu hiệu năng vận hành (tính năng động lực học) mà là sự tối ưu hóa tổng thể. Với trọng số nhóm chỉ tiêu về vận hành & bảo trì (O) chiếm 52,1%, cấu trúc FWD-C đáp ứng tốt với cấu trúc đơn giản (1 mô tơ điện, 1 bộ vi sai) giúp tối đa hóa độ tin cậy vận hành (O2) và chi phí bảo trì giảm thiểu. Điều này đáp ứng chính xác nhu cầu chính của loại xe cá nhân cỡ lớn đòi hỏi hoạt động ổn định, và chi phí vận hành hợp lý.

Khi có sự cân nhắc đánh đổi giữa chỉ tiêu về hiệu năng và độ tin cậy vận hành, trên biểu đồ radar thể hiện rõ sự giảm thấp của các cấu trúc phân tán. Mặc dù cấu trúc AWD-D (4 mô tơ điện độc lập) có ưu điểm nổi trội về tính năng động lực học (T2) và bố trí không gian (T4) (như thể hiện trên biểu đồ radar), nhưng có điểm đánh giá tổng cộng thấp nhất (0,165). Điều này được giải thích bởi các yếu tố rào cản lớn về kỹ thuật liên quan tới gia tăng khối lượng không treo (T3), sự phức tạp trong điều khiển/bảo trì (O2). Với đối tượng là xe gia đình cỡ lớn, lợi ích nổi bật đem lại từ khả năng kiểm soát mô-men xoắn của cấu trúc này chưa đủ để vượt qua các yếu tố liên quan tới rủi ro về độ bền và chi phí vòng đời sản phẩm.

Cấu trúc AWD-C (Tập trung - 2 cầu) đóng vai trò là giải pháp trung gian (0,252). Đây là cấu trúc cân bằng, duy trì được độ tin cậy cao trong khi vẫn cung cấp khả năng vận hành vượt trội hơn FWD. Tuy nhiên, chi phí (E1) và mức tiêu thụ năng lượng (T1) cao hơn nên vẫn đứng sau FWD-C trong bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu này.

3.2. Phân tích độ nhạy của phương án cấu trúc đề xuất

Từ biểu đồ nhận thấy, cấu trúc AWD-C có điểm số khá cao, trong nghiên cứu này xem xét độ nhạy trực tiếp giữa việc lựa chọn 2 phương án cấu trúc: FWD-C và AWD-C. Xây dựng đồ thị biểu diễn điểm số của 2 cấu trúc với mục tiêu hướng tới (trọng số) là về chỉ tiêu công nghệ và hiệu suất (T). Biểu diễn đồ thị như thể hiện trên hình 3.



Hình 3. So sánh trực tiếp độ nhạy phương án FWD-C và AWD-C

Từ đồ thị cho thấy, cấu trúc AWD-C có lợi thế hơn chỉ khi trọng số nhóm công nghệ và hiệu suất (T) vượt quá 74,7%. Như vậy, trong việc lựa chọn cấu hình truyền lực, các chỉ tiêu về kinh tế và độ tin cậy vẫn chiếm tỷ trọng đáng kể trên 25%, cấu trúc truyền lực FWD-C vẫn là lựa chọn tối ưu. Cấu trúc AWD-C có thể được lựa chọn một cách hợp lý khi có sự phân hoá mạnh trong chỉ tiêu về công nghệ và hiệu suất (T). Từ dữ liệu bảng 6 có thể xác định được trọng số của cấu trúc FWD-C và AWD-C tương ứng với trọng số cục bộ của các thành phần chỉ tiêu công nghệ và hiệu suất (T). Qua đó có thể xác định được mức chênh lệch tuyệt đối về chỉ tiêu công nghệ của 2 cấu trúc này: $T_{FWD-C} - T_{AWD-C} = 0,256 - 0,191 = 0,065$ (6,5%). Điều này có nghĩa: nếu lựa chọn cấu trúc AWD-C, nhà sản xuất phải tính toán ưu tiên phần lớn lợi ích về kinh tế để đổi lấy 6,5% lợi ích gia tăng về mặt công nghệ và hiệu suất.

4. KẾT LUẬN

Bài báo sử dụng phương pháp phân tích thứ bậc (AHP) dựa trên đánh giá chuyên gia để định lượng hóa mức độ ưu tiên của 11 tiêu chí và đánh giá so sánh bốn cấu hình truyền lực điện (FWD-C, FWD-D, AWD-C, AWD-D) cho ô tô điện cá nhân cỡ lớn.

Những kết luận chính bao gồm:

- Cấu trúc truyền lực tập trung cầu trước (FWD-C) được xác định là lựa chọn tối ưu, đạt điểm đánh giá tổng hợp cao nhất là 0,334. Kết quả này đạt được bởi việc tối ưu hóa tổng thể các chỉ tiêu, đặc biệt là khai thác được sự đơn giản của cấu trúc (1 mô tơ điện) để tối đa hóa độ tin cậy vận hành (O2). Điều này phù hợp với việc nhóm tiêu chí vận hành và bảo trì (O) chiếm trọng số cao (52,1%) trong ma trận đánh giá;

- Cấu trúc tập trung 2 cầu (AWD-C) đóng vai trò là giải pháp trung gian (0,252), trong khi cấu trúc phân tán độc lập 4 bánh (AWD-D) có điểm đánh giá tổng cộng thấp nhất (0,165). AWD-D có ưu điểm về tính năng động lực học (T2), nhưng bị giới hạn bởi các yếu tố kỹ thuật như tăng khối lượng không treo (T3), phức tạp trong điều khiển/bảo trì (O2) đối với dòng xe gia đình cỡ lớn;

- Phân tích độ nhạy khẳng định việc lựa chọn cấu trúc FWD-C. Cấu trúc AWD-C chỉ trở nên ưu thế hơn FWD-C nếu trọng số của nhóm tiêu chí Công nghệ và Hiệu suất (T) vượt quá 74,7% (so với trọng số thực tế là 29,7%). Điều này cho thấy việc lựa chọn AWD-C đồng nghĩa với việc nhà sản xuất phải đánh đổi phần lớn lợi ích về kinh tế để đổi lấy chỉ 6,5% lợi ích gia tăng về mặt công nghệ và hiệu suất.

Kết quả của nghiên cứu này có thể cung cấp một cơ sở lý luận định lượng nhằm hỗ trợ các nhà sản xuất lựa chọn tối ưu về cấu hình hệ truyền lực ô tô điện gia đình cỡ lớn, cân bằng một cách khách quan giữa hiệu suất kỹ thuật, độ tin cậy và chi phí theo yêu cầu thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Raja Rajendra Timilsina, Jingchao Zhang, Dil B Rahut, Kaewupsorn Patradool, Tetsushi Sonobe, "Global drive toward net-zero emissions and sustainability via electric vehicles: an integrative critical review," *Energy, Ecology and Environment*, 10, 125-144, 2025.
- [2]. Pedro Antonio de Albuquerque Felizola Romeral, Eduardo Zancul, "Total Cost of Ownership of Electric Vehicles: A Synthesis of Critical Factors," *The Journal of Engineering*, 2025:e70113, 2025. <https://doi.org/10.1049/tje2.70113>.
- [3]. Maxwell Woody, Shawn A. Adderly, Rushabh Bohra, Gregory A. Keoleian, "Electric and gasoline vehicle total cost of ownership across US cities," *Journal of Industrial Ecology*, 28, 2, 194-215, 2024. <https://doi.org/10.1111/jiec.13463>.
- [4]. Abdelrahman O. Ali, Osama Abdelrehim, Mahmoud M. Saafan, Mohamed R. Elmarghany, Ahmed M. Hamed, "Comprehensive review of

battery management systems for electric vehicles: Thermal management, charging strategies, and emerging technologies," *Journal of Power Sources*, 658, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238269>.

[5]. Anith Khairunnisa Ghazali, Nor Azlina Ab. Aziz, Mohd Khair Hassan, "Advanced Algorithms in Battery Management Systems for Electric Vehicles: A Comprehensive Review," *Symmetry*, 17(3), 321, 2025. <https://doi.org/10.3390/sym17030321>.

[6]. Xing Y., Ma E.W.M., Tsui K.L., Pecht M., "Battery management systems in electric and hybrid vehicles," *Energies*, 4, 1840-1857, 2011. DOI:10.3390/en4111840.

[7]. Michele Asperti, Michele Vignati, Edoardo Sabbioni, "On Torque Vectoring Control: Review and Comparison of State-of-the-Art Approaches," *Machines*, 12(3), 160, 2024. <https://doi.org/10.3390/machines12030160>.

[8]. Qiao Kang, Dele Meng, Yuyao Jiang, Chunlai Zhao, Hongqing Chu, Bingzhao Gao, "Torque Vectoring Control of Distributed Drive Electric Vehicles Using Fast Iterative Model Predictive Control," *IFAC PapersOnLine*, 58-29, 106-111, 2025.

[9]. Jingyuan Zhao, Wenyi Zhao, Bo Deng, Zhenghong Wang, Feng Zhang, Wenxiang Zheng, Wanke Cao, Jinrui Nan, Yubo Lian, Andrew F. Burke, "Autonomous driving system: A comprehensive survey," *Expert Systems with Applications*, 242, 122836, 2024.

[10]. Thomas L. Saaty, "How to make a decision: The analytic hierarchy process," *European Journal of Operational Research*, 48, 1, 9-26, 1990.

[11]. Sangeeta Pant,†Anuj Kumar, Mangey Ram, Yury Klochkov, Hitesh Kumar Sharma, "Consistency Indices in Analytic Hierarchy Process: A Review," *Mathematics*, 10(8), 1206, 2022. <https://doi.org/10.3390/math10081206>.

[12]. Cong Xu, Ravi Sankar, "A Comprehensive Review of Autonomous Driving Algorithms: Tackling Adverse Weather Conditions, Unpredictable Traffic Violations, Blind Spot Monitoring, and Emergency Maneuvers," *Algorithms*, 17(11), 526, 2024. <https://doi.org/10.3390/a17110526>.

[13]. Ricardo ref. ED19179, *Research on Environmental Sustainability and Energy Efficiency of Electric Vehicles*. ED19179/Final Report/Issue 2.

[14]. Bhaskar Pandey, Devendra Vashist, "Drive Cycle-Based Estimation of Energy Consumption for Electric Two-Wheeler," *Energy Storage*, 2024. <https://doi.org/10.1002/est2.70030>.

[15]. Ilyès Miri, Abbas Fotouhi, Nathan Ewin, "Electric vehicle energy consumption modelling and estimation - A case study," *International Journal of Energy Research*, 2024. <https://doi.org/10.1002/er.5700>.

[16]. Shuiku Liu, Haichuan Zhang, Shu Wang, Xuan Zhao, "Hierarchical Torque Vectoring Control Strategy of Distributed Driving Electric Vehicles Considering Stability and Economy," *Sensors*, 25(13), 3933, 2025. <https://doi.org/10.3390/s25133933>.

[17]. Liqiang Jin, Yajing Yu, Yue Fu, "Study on the ride comfort of vehicles driven by in-wheel motors," *Advances in Mechanical Engineering*, 8(3), 1-9, 2016. doi:10.1177/1687814016633622.

[18]. Kritika Deepak, Mohamed Amine Frikha, Yassine Benômar, Mohamed El Baghdadi, Omar Hegazy, "In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends," *Energies*, 16(7), 3121, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16073121>.

[19]. <https://www.schaeffler-sustainability-report.com/2022-en/environment/green-products.html> [Accessed December 10, 2025]

[20]. Muaaz Abdul Hadi, Markus Brillinger, Martin Weinzerl, "Parametric Evaluation and Cost Analysis in an e-Axle Assembly Layout," in *5th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems*. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67241-6_4.

[21]. Yukun Tao, Yukun Tao, Xuan Wang, Liang Zhang, Xiaoyi Bao, Hongtao Xue, Huiyu Yue, Huayuan Feng, Dongpo Yang, "Fault Diagnosis of In-Wheel Motors Used in Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Directions," *Machines*, 13(8), 711, 2025. <https://doi.org/10.3390/machines13080711>.

[22]. Zushu Li, Ahmed Samir Hamidi, Zhiming Yan, Anwar Sattar, Sumit Hazra, Juliette Soulard, Caroline Guest, Syed Hadi Ahmed, Friya Tailor, "A circular economy approach for recycling Electric Motors in the end-of-life Vehicles: A literature review," *Resources, Conservation and Recycling*, 205, 107582, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107582>.

[23]. Michael Samsu Koroma, Daniele Costa, Stefano Puricelli, Maarten Messagie, "Life Cycle Assessment of a novel functionally integrated e-axle compared with powertrains for electric and conventional passenger cars," *Science of The Total Environment*, 904, 15, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166860>.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Hung Manh

Faculty of Mechanical Engineering - Automotive and Construction, Electric Power University, Vietnam