

УДК 621.313.84

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ДВУХРОТОРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Ю.В. Зубков, А.Н. Галочкин, Н.А. Тарутин¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: zub577@mail.ru, galoc11111@gmail.com, nikitarutin@mail.ru

Аннотация. Гибридная силовая установка транспортного средства, как правило, содержит двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и тяговый электрический двигатель. Силовой агрегат включает в себя одну или несколько электрических машин, соединенных с ДВС и/или колесами. Наиболее развитые возможности использования преимуществ ДВС и электрической машины имеют подключаемые гибриды. Одной из схем организации архитектуры привода гибридного ТС является схема разделения мощности, которая позволяет объединить функции тягового электрического двигателя и редуктора в одном устройстве, называемом электромеханическим вариатором (ЭМВ) и состоящим из электрической машины и дифференциального редуктора. Электрическая часть ЭМВ представляет собой электрическую машину двойного питания с промежуточным ротором. Создание комбинированного силового агрегата требует разработки интегрального подхода к проектированию ДВС, ЭМВ и его электрической части – машины двойного питания. Первичный дизайн электрической машины заключается в определении ее главных размеров, к которым применительно к ЭМВ относятся диаметр расточки статора, диаметр внутреннего ротора, активная длина сердечников статора и роторов (среднего и внутреннего). Задача определения главных размеров ЭМВ разделена на два этапа. На первом исходя из требуемого момента находится необходимый объем постоянных магнитов при их поверхностной компоновке на среднем роторе. Второй этап предполагает непосредственно определение конфигурации электрической части вариатора с учетом сложения электромагнитных моментов внешней и внутренней электрических машин посредством дифференциального редуктора. Получены аналитические выражения для определения объема постоянных магнитов, коэффициента разделения момента между двумя электрическими машинами, длины активной части вариатора. Разработан и апробирован алгоритм определения объема ПМ и основных размеров ЭМВ, который может быть использован в дальнейшем в оптимизационных расчетах.



© Автор(ы), 2025

¹ Юрий Валентинович Зубков, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий.

Александр Николаевич Галочкин, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Никита Алексеевич Тарутин, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: *электромеханический вариатор, двухроторная электрическая машина, главные размеры.*

Введение

Использование автомобилей с гибридной силовой установкой, совмещающей двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и электрический двигатель, становится все более распространенным благодаря таким преимуществам, как меньший экологический ущерб, гибкость процесса преобразования первичной энергии и передачи крутящего момента на колеса автомобиля, возможность выключения ДВС в периоды остановки или движения в городском цикле, применение ДВС меньшей мощности, работающего в наиболее эффективном режиме [1]. Силовой агрегат гибридного автомобиля включают в себя одну или несколько электрических машин, соединенных с ДВС и/или колесами [2, 3].

Классификация современных транспортных средств (ТС), которая основана на соотношении размеров ДВС и электрической машины (ЭМ), показана на рис. 1. В соответствии с ней наиболее развитые возможности использования преимуществ ДВС и ЭМ имеют подключаемые гибриды.

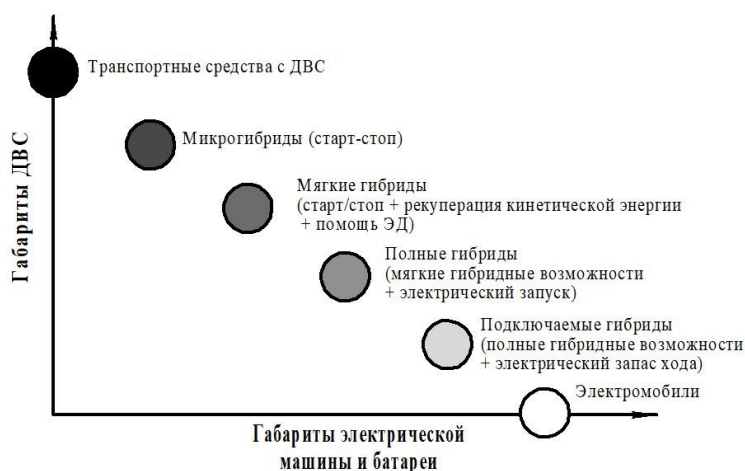


Рис. 1. Спектр транспортных технологий

В автомобилях только с ДВС крутящий момент, приводящий в движение транспортное средство, создается двигателем или механическими тормозами, и существует однозначная связь между крутящим моментом на колесах и моментом, развиваемым двигателем (положительным) или тормозами (отрицательным). Подключаемые гибридные электромобили – это транспортные средства, использующие перезаряжаемые от внешнего источника питания батареи. Они обладают характеристиками как полных гибридных электромобилей, имеющих электродвигатель и ДВС, так и полностью электрических транспортных средств, имеющих канал для подключения к электросети.

Архитектуру силовых агрегатов гибридных ТС разделяют следующим образом [4]:

– последовательная, когда ДВС приводит в действие генератор, вырабатывающий электроэнергию, которая может быть суммирована с электроэнергией, поступающей от аккумуляторов, а затем передана через электрическую шину на электродвигатель, приводящий в движение колеса;

– параллельная, при которой суммирование мощности является механическим, а не электрическим. ДВС и ЭМ (одна или несколько) соединены с помощью зубчатой передачи, цепи или ремня таким образом, что их крутящий момент суммируется и затем передается на колеса;

– разделение мощности. ДВС и две электрические машины подключены к устройству разделения мощности (например, планетарная передача) таким образом, что мощность от ДВС и ЭМ может быть объединена как через механический, так и через электрический канал. Такая архитектура позволяет реализовать преимущества последовательной и параллельной схем.

Во всех случаях организации силового привода скорость ДВС и ЭМ механически связана через трансмиссию со скоростью ТС. Это предполагает наличие сухого сцепления, гидродинамического преобразователя крутящего момента или механического вариатора, установленных между силовым приводом и трансмиссией для изменения передаточного отношения трансмиссии. Достоинства и недостатки указанных механических и автоматических преобразователей крутящего момента хорошо известны и не являются предметом исследования данной статьи. Следует только заметить, что коробка передач любого типа является одним из проблемных узлов ТС. Схема разделения мощности в гибридном автомобиле позволяет объединить функции тягового электрического двигателя и редуктора в одном устройстве, которое называется электромеханическим вариатором [5–8].

Электромеханический вариатор (ЭМВ) состоит из электрической машины и дифференциального редуктора. Тяговая электрическая часть ЭМВ представляет собой машину двойного питания (МДП) [9] с промежуточным ротором, поперечное сечение которой показано на рис. 2.

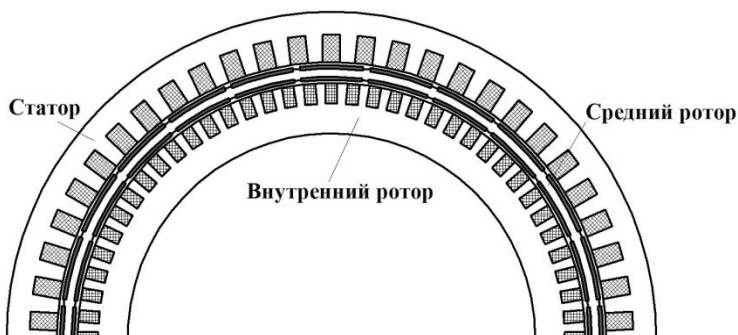


Рис. 2. Конструкция электрической части ЭМВ

Электромеханический вариатор имеет несколько режимов работы:

– принудительное вращение входного вала для запуска ДВС (режим стартера);

– при движении ТС на низкой скорости требуется меньше энергии, чем вырабатывает ДВС при максимальной топливной эффективности. Часть невостребованной энергии может запасаться в батареях для последующего использования при резких ускорениях либо движения на электрической тяге. Электромеханический преобразователь вариатора работает при этом в режиме генератора;

– при движении ТС на высокой скорости потоки мощности от ДВС и ЭМВ, работающего в режиме тягового электрического двигателя, суммируются и

передаются посредством встроенного в ЭМВ дифференциального редуктора на колеса ТС;

– движение на электрической тяге. Здесь внешняя ЭМ работает в режиме электрического двигателя, передавая крутящий момент на колеса ТС, ДВС заглушен.

Постановка задачи

Создание комбинированного силового агрегата для привода ТС требует разработки интегрального подхода к проектированию ДВС, ЭМВ и его электрической части – машины двойного питания. Из всех режимов перемещения автомобиля наиболее энергозатратным является движение на высокой скорости, поэтому при проектировании электромеханического преобразователя необходимо базироваться на данных о моменте и скорости для этого режима эксплуатации с учетом габаритных и весовых ограничений на силовой привод конкретного ТС.

Первичный дизайн любой электрической машины заключается в определении ее главных размеров, к которым применительно к ЭМВ относятся диаметр рашотки статора, диаметр внутреннего ротора, активная длина сердечников статора и роторов (среднего и внутреннего). Кроме этого, для ЭМВ большое значение имеют габариты среднего ротора, обеспечивающего магнитоэлектрическое возбуждение обоих электромеханических преобразователей (внешнего и внутреннего). Поэтому задача определения главных размеров ЭМВ разделена на два этапа. На первом исходя из требуемой мощности находится необходимый объем постоянных магнитов при принятой их конфигурации на среднем роторе. Второй этап предполагает непосредственно определение геометрии активной части вариатора. Эти два этапа взаимосвязаны и реализуются за несколько итерационных циклов, так как компоновка и размещение ПМ в среднем роторе предполагают знание его внешнего и внутреннего диаметров.

Расчет объема постоянных магнитов

ЭМ с возбуждением от ПМ разделяются по способам размещения магнитов в сердечнике индуктора, который в нашем случае является средним ротором. В типовых приложениях наибольшее применение нашли конструкции индуктора с расположением ПМ на внешней или внутренней поверхностях индуктора (SPM) и с размещением ПМ в теле индуктора (IPM) [10–12]. Варианты расположения ПМ в индукторе ЭМВ показаны на рис. 3.

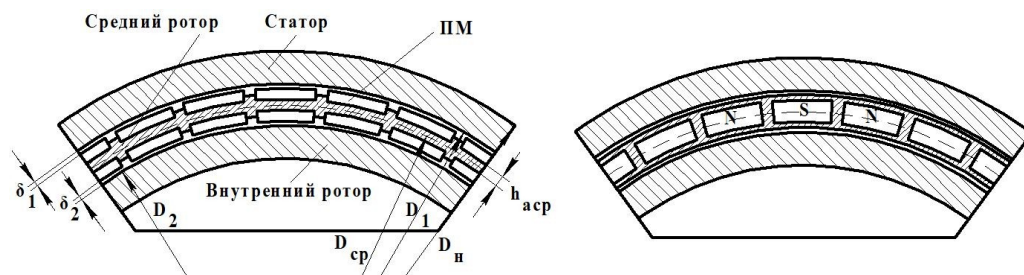


Рис. 3. SPM и IPM варианты исполнения индуктора

Ввиду малой толщины среднего ротора размещение ПМ внутри сердечника проблематично из-за высокого рассеяния магнитного потока, уменьшить которое

с помощью мостиков насыщения, не ослабляя механическую прочность ротора, не представляется возможным. Поэтому при расчетах за базовую была принята SPM-конструкция. Для определения энергетических параметров индуктора было проведено численное моделирование магнитного поля. Полагалось, что неодимовые ПМ *N38UH*, принятые в качестве источников поля, обладают остаточной индукцией $B_r = 1,15$ Тл и коэрцитивной силой $H_c = 750 \frac{\text{kA}}{\text{м}}$ при температуре 100°C

[13]. Сердечники статора и внутреннего ротора – беспазовые. Зазоры в первой ЭМ (статор – средний ротор) и во второй (средний ротор – внутренний ротор) одинаковы и равны 1 мм. Число пар полюсов $p = 12$.

В ходе моделирования были найдены: распределение магнитного поля в зазорах, коэффициенты поля – расчетные коэффициенты полюсного перекрытия $\alpha_{\delta 1}$, $\alpha_{\delta 2}$ и коэффициенты формы поля k_{B1} , k_{B2} , коэффициент рассеяния k_{σ} . Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1

Энергетические параметры индуктора

Модель	Максимальная индукция в зазоре, Тл		Расчетный коэффициент полюсного перекрытия		Коэффициент формы поля		Коэффициент рассеяния	
	$B_{\delta m1}$	$B_{\delta m2}$	$\alpha_{\delta 1}$	$\alpha_{\delta 2}$	k_{B1}	k_{B2}	$k_{\sigma 1}$	$k_{\sigma 2}$
SPM	0,569	0,544	0,877	0,881	1,005	1,000	1,049	1,065

Толщина среднего ротора (индуктора) складывается из высоты двух ПМ и спинки:

$$h_{cp.p} = h_{nm1} + h_{nm2} + h_{ap}. \quad (1)$$

Высота спинки среднего ротора выбирается из условия обеспечения механической прочности обода, определение которой является предметом отдельного исследования. Высота внутреннего и внешнего магнитов является функцией материала ПМ, величины электромагнитного момента, скорости вращения ротора и рабочей температуры. Магнитный поток во внешнем δ_1 и внутреннем δ_2 зазорах создается суммарным действием магнитов ПМ1 и ПМ2. Эти магниты могут не только иметь разную высоту, но и выполняться из разных материалов. Сумма высот магнитов $h_{nm} = h_{nm1} + h_{nm2}$ может быть найдена из выражения

$$h_{nm} = \frac{V_{nm}}{b_{nm} \cdot l_{\delta} \cdot 2p}, \quad (2)$$

где V_{nm} – объем всех ПМ; b_{nm} – средняя ширина ПМ; l_{δ} – длина зазора (активная длина сердечников); p – число пар полюсов.

Зная средний диаметр, можно определить ширину ПМ:

$$b_{nm} = \frac{\pi D_{cp}}{2p} \alpha_k, \quad (3)$$

где α_k – конструктивный коэффициент полюсного перекрытия (принят 0,9).

Средний диаметр ротора на начальном этапе полагаем равным

$$D_{cp} = D_1 - h_{cp.p}.$$

Толщина среднего ротора на начальном этапе может быть принята равной 1 см.

Длина зазора задается исходя из соотношения

$$l_{\delta} = \lambda D,$$

где $\lambda = 0,8 \dots 1,2$ – относительная длина [14].

Объем магнитов одного полюса пропорционален величине электромагнитного момента ЭМВ и обратно пропорционален квадрату числа пар полюсов:

$$V_{nm} = \frac{\pi \cdot C_V M_{\Delta}}{p^2 B_r H_c}, \quad (4)$$

где C_V – объемный коэффициент постоянного магнита.

Величина этого коэффициента определяется выражением [15]

$$C_V = \frac{2k_p k_f k_{ad} (1 + k_{E0})}{\pi^2 \xi}, \quad (5)$$

где k_f – коэффициент формы поля возбуждения; k_{ad} – коэффициент формы поля продольной реакции якоря; k_{E0} – коэффициент ЭДС в режиме перевозбуждения; k_p – коэффициент перегрузочной способности; ξ – коэффициент использования ПМ, являющийся функцией ЭДС холостого хода и тока короткого замыкания в режиме генератора.

Анализ диапазона изменения коэффициента C_V на основе эмпирических данных синхронных электрических машин с магнитоэлектрическим возбуждением соизмеримой с ЭМВ мощностью показал, что его величина при использовании высококоэрцитивных ПМ марок *NdFeB* находится в пределах $1,67 \dots 1,99$.

В соответствии с предложенной методикой были рассчитаны размеры ПМ для ЭМВ, развивающего электромагнитный момент 150 Нм при частоте вращения среднего ротора 3200 об/мин. Суммарная толщина магнитов полюса составила 1,6 мм. Далее для валидации аналитической методики была решена магнитостатическая задача расчета магнитного поля ЭМВ средствами Ansys Maxwell. Распределение индукции в зазорах ЭМВ в пределах одного полюсного деления показано на рис. 4.

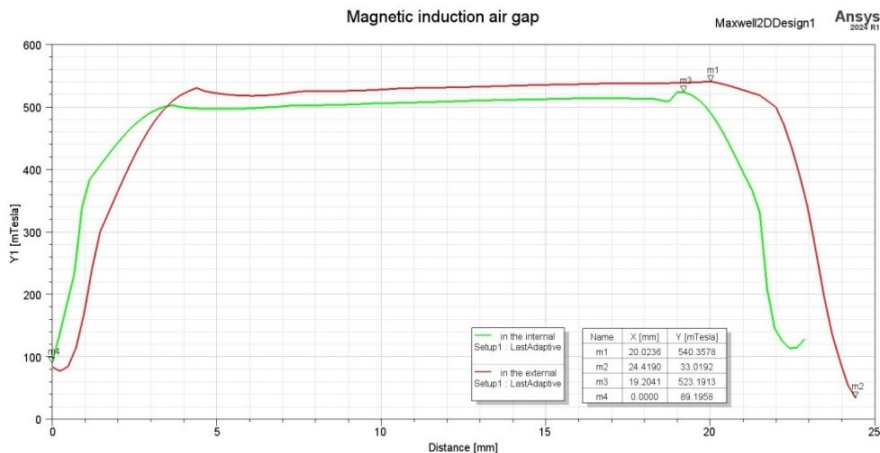


Рис. 4. Распределение индукции в зазоре внешней и внутренней ЭМ

Максимальная индукция на оси полюса в зазоре внешней и внутренней ЭМ составила 0,540 и 0,523 Тл соответственно.

Определение главных размеров

К главным размерам синхронных электрических машин относят диаметр расточки статора, длину зазора (активной части), величину зазора между индуктором и якорем. Для ЭМВ необходимо определить D_1 – диаметр расточки статора; D_2 – наружный диаметр внутреннего ротора; l_δ – длину зазора (этот параметр одинаков в обеих ЭМ). Величина зазора на начальном этапе может быть принята равной для внешней и внутренней машин.

Электромагнитный момент ЭМВ создается совместным действием моментов внешней и внутренней электрических машин и является результатом их суммирования с помощью дифференциального редуктора:

$$M_\Sigma = M_1 + M_2.$$

Электромагнитные моменты внешней и внутренней машин:

$$\begin{aligned} M_1 &= 0,5\pi\alpha_{\delta 1}k_{B1}k_{o\delta 1}A_1B_{\delta 1}D_1^2l_\delta; \\ M_2 &= 0,5\pi\alpha_{\delta 2}k_{B2}k_{o\delta 2}A_2B_{\delta 2}D_2^2l_\delta, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_{o\delta 1} \approx k_{o\delta 2}$ – обмоточные коэффициенты обмоток якоря первой и второй ЭМ; A_1, A_2 – линейные токовые нагрузки якорей; $B_{\delta 1}, B_{\delta 2}$ – магнитные индукции в зазоре внешней и внутренней машин.

Обозначим через χ_1 и χ_2 произведения коэффициентов $\alpha_{\delta 1}k_{B1}k_{o\delta 1}$ и $\alpha_{\delta 2}k_{B2}k_{o\delta 2}$ соответственно.

Тогда отношение

$$k_m = \frac{\chi_1 A_1 B_{\delta 1} D_1^2}{\chi_2 A_2 B_{\delta 2} D_2^2} \quad (7)$$

есть коэффициент разделения момента между двумя электрическими машинами в ЭМВ.

Параметры χ_1 и χ_2 при равенстве обмоточных коэффициентов якорных обмоток обеих машин показывают степень влияния формы магнитного поля в зазорах на распределение суммарного электромагнитного момента между ними. Результаты моделирования, приведенные в табл. 1, показывают, что произведения коэффициентов полюсного перекрытия и формы ЭДС двух ЭМ практически одинаковы. Это указывает на идентичность качества распределения поля в зазорах обеих машин и на примерное равенство параметров χ_1 и χ_2 . В этом случае выражение (7) упрощается и с учетом отношения индукций $B_{\delta 1}$ и $B_{\delta 2}$ сводится к виду

$$k_m = 1,05 \frac{A_1 D_1^2}{A_2 D_2^2}. \quad (8)$$

Допустимые линейные токовые нагрузки первой и второй машин ограничиваются величиной теплового фактора $T = A \cdot j$ и при одинаковых плотностях токов $j_1 = j_2$ зависят от условий теплоотвода с нагретых активных элементов машин. Для внешней машины эти условия лучше, так как тепло от источников тепловыделения (потерь мощности) передается на корпус и отводится в окружающую

среду. С учетом этого можно положить $A_1 \approx 1,25 A_2$. Тогда коэффициент разделения момента

$$k_m = 1,3 \frac{D_1^2}{D_2^2}, \quad (9)$$

а длина воздушного зазора ЭМВ может быть определена по выражению

$$l_\delta = \frac{M_\Sigma}{\pi \alpha_{\delta 1} k_{B1} k_{\delta \delta} A_1 B_{\delta 1} (0,5 D_1^2 + 0,385 (D_1 - 2 h_{cp.p})^2)}. \quad (10)$$

После расчета главных размеров ЭМВ уточняется длина зазора в процедуре определения объема ПМ и габариты самих ПМ. Алгоритм аналитического определения главных размеров ЭМВ и требуемого объема ПМ для создания в зазорах электрических машин ЭМВ магнитного поля необходимой интенсивности показан на рис. 5.

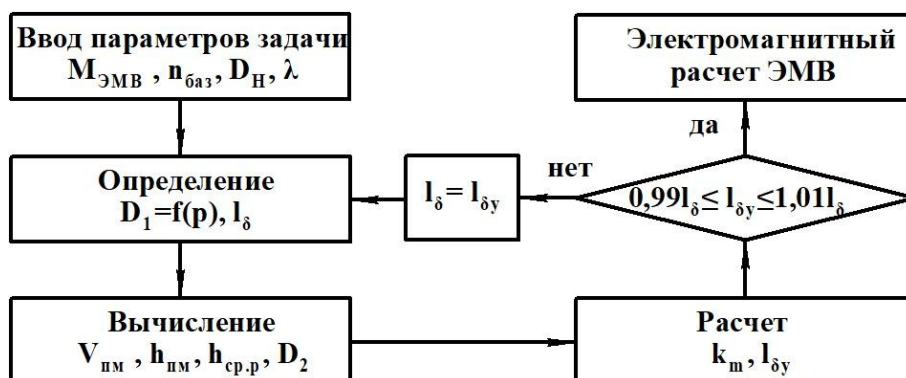


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения объема ПМ и основных размеров ЭМВ

В соответствии с предложенным алгоритмом был рассчитан вариант электро-механического вариатора с двумя роторами, основные параметры которого приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры электро-механического вариатора

Параметр	Внешняя ЭМ	Внутренняя ЭМ
Число полюсов	24	
Диаметр якоря, мм	186	173
Немагнитный зазор, мм	1	
Длина сердечника, мм	245	
Масса ПМ, кг	1,45	

Рассмотренный алгоритм определения объема ПМ и основных размеров двух-роторной электрической машины, базирующийся на аналитической модели, позволяет получить исходные данные для эскизного проекта ЭМВ, а в дальнейшем стать основой для его параметрической оптимизации.

Заключение

1. Предложенный алгоритм эскизного проектирования двухроторного электромеханического вариатора позволяет находить его основные размеры и требуемый объем постоянных магнитов среднего ротора с учетом особенностей магнитного и механического совмещения двух электрических машин в одном преобразователе.

2. Решение магнитостатической задачи позволило вычислить коэффициенты бокового рассеяния в среднем роторе с *SPM* и *IPM* конфигурацией радиально намагниченных постоянных магнитов. Расположение ПМ на поверхности индуктора обеспечивает малое рассеяние основного магнитного потока $k_g \approx 1,06$ в отличие от IPM индуктора, где в лучшем случае при использовании мостиков насыщения удается достичь $k_g \approx 1,54$.

3. Получено выражение для определения величины коэффициента разделения моментов между внешней и внутренней электрическими машинами вариатора. В примере расчета при выбранной конфигурации индуктора его значение составило 1,27, так как внешняя машина, находясь в лучших условиях охлаждения, может брать на себя большую нагрузку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Onori S., Serrao L., Rizzoni G.* Hybrid Electric Vehicles. Energy Management Strategies. London, Heidelberg, New York, Dordrecht: Springer, 2016. 112 p.
2. *Jose C.P., Meikandasivam S.* A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore, 2017. Pp. 211–229.
3. *Анучин А.С., Алямкин Д.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Остриков В.Н.* Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта // Электротехника. 2015. № 1. С. 5–9.
4. *Бахмутов С.В., Карунин А.Л., Круташов А.В., Ломакин В.В.* Конструктивные схемы автомобилей с словыми гибридными установками. М.: МГТУ «МАМИ», 2007. 71 с. EDN: RASMUR
5. *Liu J., Quan L., Zhu X., Ding Q., Chen Yu.* Modeling and simulation of a new two-rotor doubly salient permanent magnet machine // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073741
6. *Ding Q., Quan L., Zhu X., Liu J., Chen Yu.* Development of a New Two-rotor Doubly Salient Permanent Magnet Motor for Hybrid Electric Vehicles // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073744
7. *Kamil K., Kamil J., Wang Q.* Optimization of Flux Switching Permanent Magnet Motor to enhance the traction of an Electric Vehicle // 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet, Tunisia, 2021. DOI: 10.1109/IREC52758.2021.9624760
8. *Eriksson S., Sadarangani C.* A four-quadrant HEV drive system // Proceedings of IEEE 56th Vehicular Technology Conference. Vancouver, BC, Canada, 2002. DOI: 10.1109/VETECF.2002.1040468
9. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.
10. *Зубков Ю.В., Верещагин В.Е.* Проектирование активной зоны якоря тягового двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. № 4 (30). С. 102–114. DOI: 10.14498/tech.2022.4.7. EDN: HCFZOU
11. *Зубков Ю.В., Кауров С.Ю., Верещагин В.Е.* Исследование работы интегрированного стартер-генератора при запуске двигателя внутреннего сгорания // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. № 3 (67). С. 125–138. DOI: 10.14498/tech.2020.3.8 EDN: ROQDKG
12. *Zubkov Yu.V., Vereshagin V.E.* Designing of High Speed Permanent Magnet Electric Machines with Rotor Strength Verification // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. Pp. 414–418. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9569447

13. Arnold Magnetics Technologies. 2017. URL: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Arnold_DS-RECOMA35E_FINAL6-1.pdf (accessed: 10.11.2024).
14. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. [и др.]. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов. Под ред. И.П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.
15. Осин И.Л., Колесников В.П., Юферов Ф.М. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1976. 232 с.

Статья поступила в редакцию 19.07.2025

CALCULATION OF THE TWO-ROTOR BASIC DIMENSIONS ELECTRIC MACHINE WITH MAGNETOELECTRIC EXCITATION

Yu.V. Zubkov, A.N. Galochkin, N.A. Tarutin¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zub577@mail.ru, galoc11111@gmail.com, nikitarutin@mail.ru

Abstract. A hybrid vehicle powertrain typically includes an internal combustion engine (ICE) and an electric traction motor. The powertrain includes one or more electric machines connected to the ICE and/or wheels. The most developed possibilities for using the advantages of an internal combustion engine and an electric machine are plug-in hybrids. One of the schemes for organizing the architecture of a hybrid vehicle drive is a power-sharing scheme, which allows combining the functions of a traction electric motor and a gearbox in a single device called an electromechanical variator (EMV) and consisting of an electric machine and a differential gearbox. The electrical part of the EMV is a double-fed electric machine with an intermediate rotor. The combined power unit requires creation the development of an integrated approach to the design of the internal combustion engine, the EMV and its electrical part – the dual-power machine. The primary design of an electric machine consists of determining its main dimensions, which, in relation to the EMV, include the stator bore diameter, the inner rotor diameter, the stator cores and rotors (middle and inner) active length. The task of EMV determining the main dimensions is divided into two stages. At the first, based on the required moment, the required volume of permanent magnets is found with their surface arrangement on the middle rotor. The second stage involves directly determining the variator electrical part configuration, taking into account the addition of the external and internal electrical machines electromagnetic moments by means of a differential reducer. Analytical expressions for determining the permanent magnets volume, the torque division coefficient between two electric machines, and the length of the variator active part are obtained. An algorithm for determining the PM volume and the EMV main dimensions has been developed and tested, which can be used in future optimization calculations.

Keywords: electromechanical variator, two-rotor electric machine, main dimensions.

REFERENCES

1. Onori S., Serrao L., Rizzoni G. Hybrid Electric Vehicles. Energy Management Strategies. London, Heidelberg, New York, Dordrecht: Springer, 2016. 112 p.
2. Jose C.P., Meikandasivam S. A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles // Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. Singapore, 2017. Pp. 211–229.



© The Author(s), 2025

¹ Yury V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Head Dept. of Industrial Power Supply.
Alexander N. Galochkin, Postgraduate Student Dept. of Industrial Power Supply.
Nikita A. Tarutin, Postgraduate Student Dept. of Industrial Power Supply.

3. *Anuchin A.S., Alyamkin D.I., Kozachenko V.F., Lashkevich M.M., Ostrikov V.N.* Napravleniya razvitiya i optimizacii sistem elektroprivodov gorodskogo gibridnogo i elektricheskogo transporta [Development and optimization directions for electric drive systems of urban hybrid and electric transport] // *Elektrotehnika*. 2015. No. 1. Pp. 5–9. (In Russian)
4. *Bahmutov S.V., Karunin A.L., Krutashov A.V., Lomakin V.V.* Konstruktivnye skhemy avtomobilej s silovymi gibridnymi ustanovkami [Structural layouts of vehicles with power hybrid units]. M.: MGTU «MAMI», 2007. 71 p. (In Russian)
5. *Liu J., Quan L., Zhu X., Ding Q., Chen Yu.* Modeling and simulation of a new two-rotor doubly salient permanent magnet machine // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073741
6. *Ding Q., Quan L., Zhu X., Liu J., Chen Yu.* Development of a New Two-rotor Doubly Salient Permanent Magnet Motor for Hybrid Electric Vehicles // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China, 2011. DOI: 10.1109/ICEMS.2011.6073744
7. *Kamil K., Kamil J., Wang Q.* Optimization of Flux Switching Permanent Magnet Motor to enhance the traction of an Electric Vehicle // 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC). Hammamet, Tunisia, 2021. DOI: 10.1109/IREC52758.2021.9624760
8. *Eriksson S., Sadarangani C.* A four-quadrant HEV drive system // Proceedings of IEEE 56th Vehicular Technology Conference. Vancouver, BC, Canada, 2002. DOI: 10.1109/VETECF.2002.1040468
9. *Ivanov-Smolenskij A.V.* Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. M.: Energiya, 1980. 928 p. (In Russian)
10. *Zubkov Yu.V., Vereshchagin V.E.* Proektirovanie aktivnoj zony yakorya tyagovogo dvigatelya [Design of the traction motor armature active zone] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2022. No. 4 (30). Pp. 102–114. DOI: 10.14498/tech.2022.4.7. (In Russian)
11. *Zubkov Yu.V., Kaurov S.Yu., Vereshchagin V.E.* Issledovanie raboty integrirovannogo starter-generatora pri zapuske dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Study of the integrated starter-generator operation during internal combustion engine starting] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 3 (67). Pp. 125–138. DOI: 10.14498/tech.2020.3.8. (In Russian)
12. *Zubkov Yu.V., Vereshagin V.E.* Designing of High Speed Permanent Magnet Electric Machines with Rotor Strength Verification // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. Pp. 414–418. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9569447
13. Arnold Magnetics Technologies. 2017. URL: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Arnold_DS-RECOMA35E_FINAL6-1.pdf (accessed: 10.11.2024).
14. *Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klovov B.K. [i dr.]* Proektirovanie elektricheskikh mashin [Electrical machines: textbook for universities]: ucheb. posobie dlya vuzov. Pod red. I.P. Kopylova. M.: Energiya, 1980. 496 p. (In Russian)
15. *Osin I.L., Kolesnikov V.P., Yuferov F.M.* Sinhronnye mikrodvigateli s postoyannymi magnitami [Synchronous micromotors with permanent magnets]. M.: Energiya, 1976. 232 p.

Original article submitted 19.07.2025