

- определение разброса (доверительного интервала) для коэффициентов звукопоглощения и других независимых переменных;
- определение частных производных расчётной функции по каждой независимой переменной;
- получение функциональной зависимости разброса результата от разброса входных факторов (аргументов);
- расчёт численной оценки разброса (доверительного интервала) результата определения шумности ТТС.

Литература

1. Иванов. Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.
2. Григорьев Е.А., Победин А.В. Статистическая оценка шума и вибраций тракторов// Механизация и электрификация социалистич. сельского хоз-ва. – 1974. – № 8. – С. 36 – 37.
3. Крузе А.О., Крузе О.О. Статистическая оценка шума автомобилей / Автомобильные перевозки, организация и безопасность дорожного движения. – М.: МАДИ, 1981. – С. 28 – 34.
4. Победин А.В., Косов О.Д., Долотов А.А., Домолазов Ф.С. Некоторые статистические характеристики шумности коробки передач автомобиля ГАЗ-3110// Автомобильная промышленность. – 2010. – № 9. – С. 13 – 15.
5. Победин А.В., Косов О.Д., Орешкин В.Н. и др. Статистическая оценка шумности автомобиля ВАЗ-21102// Колёсные и гусеничные машины: межвузовский сборник научных трудов. – М.: МАМИ, 2004. – Вып. 1.
6. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1966.
7. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1959.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969.
9. ГОСТ 27408-87 (СТ СЭВ 5711-86). Шум. Методы статистической обработки результатов определения и контроля уровня шума, излучаемого машинами. ИПК Издательство стандартов, Москва.
10. Победин А.В., Косов О.Д., Долотов А.А., Долгов К.О. The Modelling of Noise Emission by the Gearbox of Vehicles GAZ 3110, 31105// Journal of KONES. Powertrain and Transport. – 2011. – Vol. 18, No. 1. – С. 453 – 456.
11. Победин А.В. Проектирование виброшумоизоляции тракторной кабины. – Волгоград: ВолгГТУ, 1994. – 92 с.
12. СНиП 23-03-2003 Защита от шума. Госстрой России. – Москва, 2004.
13. Степанов И.С., Евграфов А.Н., Карунин А.Л. и др. Основы эргономики и дизайна автомобилей и тракторов / Под общ. ред. В.М. Шарипова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 256 с.

Определение параметров основных компонентов энергетической установки транспортного средства

к.т.н. доц. Сидоров К.М., д.т.н. проф. Сидоров Б.Н.
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
8 (499) 155-03-79, k.sidorov@bk.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы определения и расчета характеристик основных компонентов энергетических установок автотранспортных средств, представлены принципы выбора рациональных характеристик двигателя внутреннего сгорания и компонентов системы тягового электрооборудования в составе КЭУ, приведены выражения для расчетной оценки указанных параметров.

Ключевые слова: автотранспортное средство, электромобиль, комбиниро-

Разработка, внедрение и эксплуатация транспортных средств с комбинированными энергетическими установками (КЭУ), отличающимися высокими показателями топливной экономичности и экологической безопасности, является перспективным направлением развития современного автотранспортного комплекса.

Комбинированная (гибридная) энергетическая установка транспортного средства представляет собой сложный технический объект, в котором организуется совместная работа целого комплекса отдельных устройств. При этом каждое звено такой системы нацелено на решение общей задачи – повышение топливной экономичности и экологической безопасности автотранспортного средства (АТС). Сочетание в составе силовой установки АТС двигателя внутреннего сгорания (ДВС), электрической машины, а также буферного накопителя энергии позволяет избежать неблагоприятных в отношении энергетической и экологической эффективности режимов работы как ДВС, так и электрической машины, реализуя высокий КПД всей системы. Необходимым условием достижения данной цели является выбор рациональных характеристик основных компонентов КЭУ. Данный вопрос рассматривается в настоящей статье, в которой приведена общая методика определения и расчета параметров силовой установки.

При разработке электромобилей (ЭМ) и АТС с КЭУ существенными факторами, влияющими на параметры силовой установки и ее структуру, являются предъявляемые требования к эксплуатационным характеристикам разрабатываемого транспортного средства, среди которых можно выделить следующие основные показатели:

- назначение;
- топливная экономичность;
- экологические показатели;
- грузоподъемность;
- скоростные и тягово-динамические характеристики;
- реализация контрольного цикла движения;
- пробег в режиме электромобиля;
- показатели надежности и безопасности;
- экономические показатели, в том числе стоимость реализации и экономический эффект при эксплуатации.

Среди перечисленных показателей отдельно следует выделить назначение АТС по условиям эксплуатации и требования к скоростным и тягово-динамическим характеристикам транспортного средства. К последним факторам относится характер режима движения АТС – преимущественное использование в условиях городского или загородного движения. Информация о данных показателях является отправной точкой при формировании первоначального решения по структуре энергетической установки транспортного средства, составу и типу используемого оборудования.

С учетом выше сказанного можно обозначить базовую методику расчета и определения параметров основных компонентов энергетической установки транспортного средства, в том числе АТС с КЭУ и ЭМ:

1. Формирование исходных данных, в том числе по требуемым эксплуатационным характеристикам и базовому АТС.
2. Проведение тягово-энергетического расчета базового транспортного средства с оценкой топливных, энергетических и экологических показателей.
3. Определение рациональной структурной схемы энергетической установки, состава системы тягово-энергетического оборудования (СТЭО), типа и требуемых характеристик ДВС.
4. Определение алгоритма работы ДВС и СТЭО в составе КЭУ.
5. Тягово-энергетический расчет АТС с КЭУ или ЭМ по заданному алгоритму работы компонентов силовой установки.

6. Расчет топливной экономичности и экологических показателей АТС с КЭУ, энергетических показателей ЭМ.
7. Определение энергетической и топливной эффективности работы энергетической установки на различных участках контрольного цикла.
8. Определение рациональных (оптимизированных) законов управления работой компонентов силовой установки.
9. Уточнение, определение и расчет параметров силовой установки, в том числе:
 - двигателя внутреннего сгорания;
 - батареи накопителей электрической энергии (БНЭ);
 - тягового электродвигателя-генератора (ТЭД);
 - электрогенератора-двигателя (ЭГД);
 - силового преобразовательного оборудования.
10. Оценка грузоподъемности АТС с КЭУ и ЭМ. Анализ топливной экономичности и энергетической эффективности по критерию выполнения одинаковой транспортной работы.
11. Оценка экономических показателей АТС с КЭУ и ЭМ.

Этапы базовой методики расчета АТС с КЭУ и ЭМ могут быть реализованы при помощи математического моделирования, предлагаемых в [1] моделей и критериев оценки эффективности выбранного технического решения.

В основу рационального выбора характеристик силовых агрегатов КЭУ могут быть положены следующие принципы:

1. Мощности ДВС, ЭГД и ТЭД в составе КЭУ последовательного типа должны быть эквивалентны и обеспечивать:

- со стороны ТЭД необходимые значения крутящего момента и частоты вращения вала КЭУ для реализации контрольного цикла движения АТС, а также максимальной скорости и ускорения;
- со стороны ДВС и ЭГД реализацию максимальной мощности, необходимой для работы ТЭД в предельных режимах (максимальная скорость и ускорение).

2. В случае конвертации традиционного АТС в автомобиль с КЭУ параллельного или смешанного типа суммарная мощность ДВС и тягового электродвигателя гибридной силовой установки должны быть эквивалентны мощности штатного двигателя внутреннего сгорания базового АТС. Суммарный крутящий момент ДВС и ТЭД на валу КЭУ должен быть не меньше максимального момента штатного ДВС. В основе данных требований лежит принцип сохранения тягово-динамических характеристик базового АТС после конвертации. Аналогичными принципами можно руководствоваться и при конвертации в электромобиль.

Во всех случаях совместная работа ДВС и ТЭД на вал КЭУ должна обеспечивать требуемые максимальные ускорение и скорость АТС.

3. Характеристики ЭГД в составе КЭУ смешанной структуры должны обеспечивать пуск ДВС, в том числе при значениях частоты вращения, превышающих частоту вращения холостого хода ДВС.

Выбор максимальной мощности ДВС, ТЭД и ЭГД может осуществляться посредством тягово-энергетического расчета транспортного средства с полной массой, при этом могут быть рекомендованы следующие соотношения мощностей:

- для последовательной структуры КЭУ:

$$P_{\text{ТЭД}} \geq \frac{P_K}{\eta_T}; \quad (1)$$

$$P_{\text{ЭГД}} \geq \frac{P_{\text{ТЭД}}}{\eta_{\text{ЭГ}}}; \quad (2)$$

$$N_{\text{ДВС}} \geq \frac{P_{\text{ЭГД}}}{\eta_{\text{ЭГД}} \cdot \eta_M}; \quad (3)$$

где: $P_{\text{ТЭД}}$ – максимальная мощность на валу ТЭД; P_K – максимальная требуемая мощность на

ведущих колесах АТС; η_T – КПД механической трансмиссии; $P_{ЭГД}$ – максимальная мощность электрогенератора-двигателя; $\eta_{ЭТ}$ – КПД электрической трансмиссии, включающий КПД ТЭД, преобразователя напряжения (ПН) электродвигателя, БНЭ при разряде и заряде, ПН электрогенератора; $N_{ДВС}$ – максимальная мощность ДВС; $\eta_{ЭГД}$ – КПД электрогенератора-двигателя; η_M – КПД механической передачи между ДВС и ЭГД;

- для параллельной и смешанной структур КЭУ:

$$P_{ТЭД} + N_{ДВС} \geq \frac{P_K}{\eta_{УМС}}, \quad (4)$$

кроме того, для смешанной структуры КЭУ в качестве оценки характеристик ЭГД могут быть приняты следующие соотношения:

$$P_{ЭГД} \sim \frac{N_{ДВС.опт}}{\eta_{ред.}}; \quad (5)$$

$$M_{ЭГД} > \frac{M_{сопр.}}{\eta_M}; \quad (6)$$

где: $P_{ЭГД}$ – длительная мощность ЭГД при частоте вращения, соответствующей $n_{ДВС.опт}$ (с учетом передаточного числа между ДВС и ЭГД); $n_{ДВС.опт}$ – частота вращения вала ДВС в режиме минимального удельного расхода топлива; $N_{ДВС.опт}$ – мощность на валу ДВС в режиме минимального удельного расхода топлива; $\eta_{ред.}$ – КПД механической связи ДВС и ЭГД (редуктор, муфта); $\eta_{УМС}$ – КПД механической трансмиссии АТС и устройства механического сопряжения агрегатов КЭУ; $M_{сопр.}$ – момент сопротивления прокручиванию вала ДВС.

Выражение (5) может быть принято в случае реализации стационарного режима работы установки ДВС-ЭГД, в том числе для подключаемых автомобилей с КЭУ (электромобилей с увеличенным пробегом типа «Plug-In»).

Определение характеристик БНЭ может выполняться согласно нескольким условиям:

- по условию реализации режима движения за счет только электрической тяги;
- с учетом перегрузочной способности батареи по току.

Требуемый запас энергии БНЭ, необходимый для обеспечения движения АТС с КЭУ в контрольном цикле в режиме электромобиля, определяется в соответствии с выражением

$$W_{Б.треб.} = W_{уд.} \cdot L_{треб.}, \text{ Вт} \cdot \text{ч}; \quad (7)$$

где: $L_{треб.}$ – требуемый пробег АТС в режиме электромобиля, км;

$W_{уд.}$ – удельный расход энергии БНЭ в контрольном цикле, Вт·ч/км;

$$W_{уд.} = W_B / L_{ц}; \quad (8)$$

где: W_B – расход электрической энергии БНЭ в цикле, Вт·ч;

$L_{ц}$ – пробег в контрольном цикле, км.

При известном значении удельной энергии БНЭ может быть рассчитана её масса, кг:

$$m_{бнэ} = W_{Б.треб.} / e_{уд.}; \quad (9)$$

где: $e_{уд.}$ – удельная энергия БНЭ, Вт·ч/кг.

Номинальная емкость БНЭ при известном значении номинального напряжения батареи $U_{бн}$:

$$C_{бн} = W_{Б.треб.} / U_{бн}; \quad (10)$$

Минимальная (требуемая) емкость БНЭ с учетом перегрузочной способности по току:

$$C_б = \frac{P_{б.макс.}}{U_{бн} \cdot k_{ПТ}}; \quad (11)$$

где: $P_{б.макс.}$ – максимальная разрядная мощность БНЭ, Вт; $U_{бн}$ – номинальное напряжение

БНЭ, В; $k_{пт}$ – коэффициент допустимой перегрузки по току разряда БНЭ. Для современных литий-ионных аккумуляторов $k_{пт} = 5...20$ [2].

Для оценки номинальной емкости БНЭ с учетом перегрузочной способности по току и оптимальной степени заряженности может быть принято следующее выражение:

$$C_{бн} = \frac{C_б}{\Delta\varepsilon_{опт}} \cdot 100; \quad (12)$$

где: $\Delta\varepsilon_{опт}$ – диапазон оптимальной степени заряженности БНЭ (%) по условию повышения срока службы аккумуляторной батареи и эффективности разрядно-зарядных режимов. Оптимальный уровень заряда БНЭ может быть принят равным 60 %. С учетом пределов степени заряженности при заряде и разряде $\pm 20\%$, диапазон оптимальной степени заряженности составит $\Delta\varepsilon_{опт} = 40\%$. Значение номинальной емкости БНЭ, рассчитанное согласно выражению (12), должно уточняться посредством экспериментальных исследований.

Необходимым условием объективной оценки энергетической эффективности АТС с КЭУ и электромобиля является анализ топливной экономичности и расхода электрической энергии тяговой батареи по критерию выполнения одинаковой транспортной работы. Другими словами, при определении фактического расхода топлива АТС с КЭУ или расхода электроэнергии тяговой аккумуляторной батареи электромобиля необходимо учитывать степень изменения грузоподъемности АТС после конвертации.

Грузоподъемность электромобиля или АТС с КЭУ является основной эксплуатационной характеристикой, представляет собой максимальную массу одновременно перевозимого груза и должна соответствовать техническим характеристикам базового транспортного средства.

Расчет грузоподъемности АТС с КЭУ или ЭМ сводится к оценке изменения массы базового транспортного средства при его конвертации. При этом исходными данными для расчета служат:

- грузоподъемность базового транспортного средства $G_б$;
- масса демонтируемого оборудования $G_{до}$;
- масса устанавливаемого оборудования $G_{уо}$.

Тогда, выражение для определения грузоподъемности АТС с КЭУ или ЭМ будет иметь вид:

$$G = G_б + G_{до} - G_{уо}. \quad (13)$$

Грузоподъемность АТС с КЭУ или ЭМ также можно представить как разность полной массы АТС $G_п$ и собственной массы $G_с$:

$$G_{кэу} = G_п - G_с. \quad (14)$$

При этом полная масса АТС с КЭУ $G_п$ не должна превышать полную массу базового транспортного средства (по условию допустимых нагрузок на оси АТС).

В качестве основного демонтируемого оборудования базового транспортного средства могут выступать:

- двигатель внутреннего сгорания и навесное оборудование;
- коробка перемены передач;
- элементы топливной системы;
- элементы механической трансмиссии;
- другое оборудование в зависимости от конфигурации АТС с КЭУ или электромобиля.

В общем случае устанавливаемым оборудованием, существенно влияющим на грузоподъемность электромобиля или АТС с КЭУ, являются:

- тяговый электродвигатель-генератор;
- электрогенератор-двигатель;
- батарея накопителей электрической энергии;

- оборудование для преобразования электрической энергии и устройства управления;
- оборудование для преобразования механической энергии (промежуточные редукторы, устройства сопряжения узлов силовой установки);

После определения грузоподъемности полученные результаты расхода топлива АТС с КЭУ или электроэнергии тяговой батареи электромобиля должны быть проанализированы с точки зрения выполнения одинаковой транспортной работы и скорректированы. При этом транспортную работу АТС можно определить по следующему выражению:

$$A = G \cdot L, \quad (15)$$

где: G – грузоподъемность АТС с КЭУ, т;

L – пробег при совершении транспортной работы, км.

Приведенная базовая методика определения и расчета параметров основных компонентов комбинированной энергетической установки транспортного средства может быть использована для предварительной оценки характеристик АТС с КЭУ и электромобилей на стадии расчетных исследований, а также способствовать рациональному выбору параметров силовых агрегатов при конвертации.

При разработке АТС с КЭУ и ЭМ существенными факторами, влияющими на характеристики силовой установки и ее структуру, являются предъявляемые требования к эксплуатационным характеристикам нового АТС, в том числе преимущественные условия движения. В случае конвертации транспортного средства традиционно конструкции в электромобиль или автомобиль с КЭУ должен быть положен принцип сохранения тягово-динамических характеристик и функций штатных бортовых систем базового АТС.

При определении характеристик аккумуляторной батареи в составе КЭУ рекомендуемым является расчет по нескольким условиям, дополняющим друг друга:

- по условию реализации режима движения за счет только электрической тяги;
- с учетом перегрузочной способности по току.

Необходимым условием объективной оценки топливной эффективности АТС с КЭУ и энергетической эффективности электромобиля является анализ топливной экономичности по критерию выполнения одинаковой транспортной работы, таким образом, при определении фактического расхода топлива АТС с КЭУ, а также расхода электрической энергии тяговой батареи электромобиля, необходимо учитывать степень изменения грузоподъемности АТС после конвертации.

Статья подготовлена в рамках выполнения прикладных научных исследований (RFMEFI57714X0156), проводимых в ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» и финансируемых Министерством образования и науки РФ.

Литература

1. Сидоров К.М. Энергетическая и топливная эффективность автомобилей с гибридной силовой установкой: Дис... канд. техн. наук. – М., 2010.
2. Сурин Е.И., Голубчик Т.В. Энергетическая эффективность электромобилей и гибридных автомобилей // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2006. – № 6. – С. 3–5.
3. Повышение энергетической эффективности тягового электропривода транспортных средств с независимыми индивидуальными двигателями / Т.В. Голубчик, В.Е. Ютт, К.Т. Нгуен, Д.Б. Лазарев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1; URL: www.science-education.ru/115-11965 (дата обращения: 27.03.2015).
4. Superior Lithium Polymer Battery (SLPB). [Electronic resource]: Kokam. – Electronic text data. – Jungwang-dong, 2015. – URL: http://www.kokam.com/new/kokam_en/sub01/sub01_01.html. (дата обращения: 23.03.2015).