

Хрипач Николай Анатольевич

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»
г. Москва

Татарников Алексей Павлович

ведущий инженер
НТЦ «Силовые агрегаты»
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»
г. Москва

Неверов Всеволод Анатольевич

инженер
НТЦ «Силовые агрегаты»
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»
г. Москва

DOI 10.21661/R-473313

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ НАДДУВА ДЛЯ ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация: в работе рассмотрен вопрос применения на транспорте комбинированных систем наддува двигателей внутреннего сгорания в составе гибридной силовой установки. Приведены последние достижения в данной области, выявлены наиболее значимые направления. Определены перспективы применения систем комбинированного наддува в составе гибридных силовых установок.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, комбинированная система наддува, наддув, гибридная силовая установка.

Введение

Гибридные силовые установки (ГСУ) для транспорта являются компромиссным решением между двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и электроустановками. Совмещая в себе их достоинства, они снижают влияние недостатков.

Однако наличие в составе ГСУ традиционных двигателей вынуждает совершенствовать их конструкцию. В докладе рассмотрен аспект применения комбинированных систем наддува (КСН) в составе гибридной силовой установки.

Виды комбинированных систем наддува

В зависимости от конструкции КСН можно разделить на следующие виды:

- сочетающие турбокомпрессоры (ТК) и механические нагнетатели;
- использующие дополнительные аккумуляторные устройства;
- использующие электрические машины.

Примером первой категории является используемая в современных двигателях концерном Volkswagen система TSI. Она может быть представлена в двух исполнениях – либо одноступенчатый наддув турбокомпрессором, либо двухступенчатый наддув турбокомпрессором и механическим нагнетателем.

Предложенная компанией Volvo Group и являющаяся представителем второй категории система PowerPulse была разработана в целях снижения эффекта «турбо-ямы» [5]. Суть данной системы состоит в накоплении заряда сжатого воздуха в отдельном баллоне. При необходимости резкого ускорения открывается клапан баллона и дополнительное количество воздуха вместе с основным потоком отработавших газов поступает на колесо турбины. Таким образом, вал турбокомпрессора «раскручивается» быстрее, давление во впускном коллекторе повышается, время разгона двигателя на низких частотах вращения уменьшается. Запас сжатого воздуха в баллоне восстанавливается электрическим компрессором.

Наиболее перспективной считается третья категория – применение электромашин в составе комбинированной системы наддува. Новейшей разработкой компании BorgWarner Turbo Systems GmbH является система eBooster®, представляющую собой электрический компрессор, расположенный до или после турбокомпрессора [1]. В отличие от систем, где электродвигатель непосредственно вращает ТК, данная система использует электрический компрессор при необходимости резкого повышения давления, например при старте автомобиля,

а при наборе частоты вращения турбокомпрессор обеспечивает давление наддува без помощи электрокомпрессора.

«Гибридная турبوустановка», разработанная японской компанией МНН [6] представляет собой соединенные последовательно компрессор, высокоскоростную электромашину (электродвигатель и генератор) и турбину. При работе на высоких скоростях двигателя, избыточная энергия, вырабатываемая турбиной, преобразуется генератором в электрическую энергию и заряжает батарею.

Еще одним из предложенных способов повышения давления наддува [7] является применение электрокомпрессора совместно с турбокомпрессором, которое позволяет отделить компрессор от горячей турбины, что позитивно сказывается на работе системы и уменьшает температуру наддувочного воздуха. Также компания разработала полностью электрический компрессор, работающий от электрической сети транспортного средства. Это позволяет использовать его в качестве вспомогательного, «разгоняющего» основной в режимах нехватки мощности на низких оборотах [3].

Стоит отметить, что рынок гибридных автомобилей, несмотря на относительно малую величину, в абсолютных числах может достигать объема более 500 тыс. единиц в год, что говорит о высоком потенциале применения перспективных КСН.

Перспективы применения КСН

Основное преимущество использования ГСУ – это снижение расхода топлива за счет работы двигателя в оптимальном диапазоне и рекуперации кинетической энергии. Одновременно с этим решается проблема повышения экологичности отработавших газов. Однако нормы выбросов ужесточаются с каждым годом, вынуждая разрабатывать новые технические решения.

Использование ДВС определенной мощности в составе транспортного средства обусловлено требованиями к его максимальной скорости и динамике. Однако, при использовании ДВС в составе ГСУ, к нему появляются дополнительные требования по расходу топлива и экологическим показателям, а также габаритным размерам.

Как показали исследования, описанные ранее, КСН позволяют получить гибридным силовым установкам следующие преимущества над ГСУ с традиционным ДВС:

- увеличение мощности ГСУ;
- снижение расхода топлива;
- повышение экологических показателей;
- рекуперация энергии отработавших газов в электрическую.

При работе двигателя с наддувом увеличивается его литровая мощность. По сравнению с базовым двигателем можно повысить его мощность на 20–50%. Так, современные образцы достигли показателя 150 л.с. на 1 литр рабочего объема. Таким образом, при условии сохранения максимальной мощности ГСУ можно значительно уменьшить габариты ДВС.

Повышение топливной экономичности двигателя возможно за счет: более совершенного сгорания (использование горения обедненных смесей), повышения степени повышения давления (увеличение плотности топливовоздушной смеси), более качественной очистки и наполнения цилиндра. Применение КСН позволяет повысить экономичность на 5–20%. В результате уменьшается расход топлива – главное преимущество ГСУ. Вместе с тем, улучшение процессов газообмена и сгорания может снизить уровень выбросов углеводородов СН в составе отработавших газов.

Использование КСН с электрической машиной позволяет произвести дополнительную рекуперацию энергии отработавших газов при избыточных нагрузках и переходных режимах за счет работы в режиме электрогенератора. Вместе с быстрым разгоном ТК до рабочих частот (время разгона меньше на 30%) эти свойства являются главными преимуществами КСН над традиционными системами наддува. Так как современные ГСУ уже имеют в своем составе высоковольтные батареи, контроллеры и проводку, установка турбокомпрессора с электрической машиной значительно упрощается.

На данный момент существует несколько технических решений, применяемых в ГСУ или находящихся на этапе разработки. Следует рассмотреть их и сравнить с перспективами применения комбинированных систем наддува.

Наиболее распространенное решение – применение двигателя, работающего по циклу Аткинсона. Это позволяет получить хорошие экологические показатели и высокую экономичность (КПД двигателя выше на 10% по сравнению с традиционным). Благодаря тому, что ДВС в составе гибридного автомобиля работает в области высоких нагрузок, такой недостаток цикла, как склонность к неустойчивой работе при малых оборотах, нивелируется. Недостатком двигателя в сравнении с более распространенным двигателем, работающему по циклу Отто, является снижение удельной мощности. Таким образом, двигателям, работающим по циклу Аткинсона присущи большие габариты. Решением этой проблемы является применение наддува, в частности, КСН. В данном случае двигатель будет работать по циклу Миллера.

Ряд компаний (GM, Mercedes-Benz, Volkswagen, Hyundai, Mazda и другие) ведут разработку HCCI-двигателя (Homogenous Charge Compression Ignition – воспламенение однородной смеси от сжатия) [2]. Использовать его в составе ГСУ предполагает компания Honda. Преимущества использования заключаются в более высоком КПД (выше на 30% текущего уровня за счет высоких степеней сжатия), высокая экономичность и экологичность (за счет однородной топливной смеси и более низких пиковых температур качественное сгорание и низкий выброс NO_x). Недостатки по сравнению с КСН – сложность организации холодного пуска, повышенный износ двигателя, сложность контролирования самовоспламенения, малый эффективный диапазон мощности, высокий уровень выбросов окиси углерода и углеводородов, большие габариты, сложность технического обслуживания (из-за наличия сложной электронной аппаратуры) и низкая освоенность технологии.

Конкурентом ГСУ может стать разрабатываемый компанией Achates Power двухтактный двигатель со встречным движением поршней [4]. Преимущества использования – высокий КПД за счет применения двухтактной схемы и

уменьшения потерь тепла, расход топлива, сравнимый, по заявлениям, с гибридными автомобилями (на 30–50% меньше, чем у обычного ДВС), низкий уровень выбросов NO_x и CO₂ (на 15–20% ниже актуальных стандартов), меньшие габариты при той же производительности, меньшая на 10% стоимость производства. Несмотря на более простую конструкцию (отсутствие головки блока цилиндров и др.), недостатком данного двигателя по сравнению с ГСУ с КСН может являться сложность обслуживания из-за низкой распространенности и новизны конструкции.

Таким образом, можно составить сравнительную таблицу, которая будет учитывать наиболее важные факторы – экологические показатели, расход топлива, габариты, возможность рекуперации энергии отработавших газов (ОГ), стоимость внедрения и производства, простоту технического обслуживания (ТО) и ремонта. В качестве базы сравнения выбран бензиновый двигатель внутреннего сгорания без наддува. При этом, если показатели рассматриваемого решения лучше, ставится знак «+», если хуже, знак «-», если соответствуют, то «0». Также двигатели сравнены между собой.

Таблица 1

Сравнение технических решений для ГСУ

Тип силовой установки	ДВС по циклу Аткинсона	НССИ-двигатель	Двигатель со встречным движением поршней	ДВС по циклу Аткинсона с КСН
Экологические показатели	+	+++	++	+
Расход топлива	+	++	+++	+
Габариты	0	0	+	+
Рекуперация энергии ОГ	0	0	0	+
Ресурс	0	--	-	-
Цена внедрения/производства	-/0	-/-	-/+	-/-
ТО, ремонт	0	-	--	-

Как видно из сравнения, наибольший выигрыш по экологическим и экономическим показателям дают НССИ-двигатель и двухтактный ДВС со встречным движением поршней. Однако стоимость их внедрения и сложность обслуживания значительно превосходят существующие решения. Таким образом, ДВС,

работающий по циклу Аткинсона, но с установленной КСН является компромиссным решением для ГСУ.

Выводы

Рассмотренные выше исследования позволяют сказать о заинтересованности разработчиков и производителей турбокомпрессоров в постоянном улучшении их характеристик. При использовании комбинированных систем наддува в составе гибридных силовых установок появляется возможность улучшения показателей транспортного средства – снижение габаритов ДВС при той же мощности, снижение расхода топлива, уменьшение уровня выбросов, дополнительная рекуперация отработавших газов с преобразованием в электрическую энергию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения №14.577.21.0213 от «29» сентября 2016 года о предоставлении субсидии, уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок – RFMEFI57716X0213.

Список литературы

1. eBooster – BorgWarner Turbo Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.turbos.bwauto.com/products/eBooster.aspx>
2. Here's how Mazda's HCCI engine works [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.motorauthority.com/news/1112106_heres-how-mazdas-hcci-engine-works
3. Next-Generation Turbocharger Enhanced with Electric Power [Текст] // IHI Engineering Review. – Vol. 49. – №1. – 2016.
4. Our Formula – Achates Power [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://achatespower.com/our-formula/opposed-piston>
5. Pulsating technology – Volvo Cars [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.volvocars.com/au/about/australia/i-roll-enewsletter/2017/february/pulsating-technology>
6. Seiichi I. Development of the «hybrid turbo», an electrically assisted turbocharger» [Текст] // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – Vol. 43. – №3.

7. Yamashita Y. Development of Electric Supercharger to Facilitate the Downsizing of Automobile Engines [Текст] // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – Vol. 47. – №4. – December 2010.