

Стратегия создания энергоэффективного и экологичного тягового привода

Современные технические средства позволяют сгладить противоречия между повышением эффективности энергопотребления и снижением выброса вредных веществ двигателями, применяемыми для железнодорожной тяги. С этой целью совершенствуют конструкцию дизелей, оптимизируя процесс сжигания топлива, обрабатывают выхлопные газы с целью снижения вредных выбросов, более избирательно подходят к виду топлива, внедряют гибридные схемы приводов.

Основные требования к дизельному приводу

Функциональные возможности и эффективность работы современных приводов всех типов можно повысить путем тщательного согласования взаимодействия электрических и механических компонентов. Это относится как к системам привода промышленного оборудования, так и к тяговым приводам транспортных средств. Желаемых характеристик привода достигают, применяя инновационные концепции двигателей, внедряя компактные устройства силовой электроники, оптимизированные механические компоненты, современные датчики и измерительные средства.

В ближайшие годы продолжится рост объемов перевозок. По оценкам Европейского агентства охраны окружающей среды, выбросы углекислого газа на транспорте в одном только Европейском союзе в период с 1990 по 2008 г. возросли на 24%. Вместе с тем поставлена цель к 2020 г. снизить объем этих выбросов. Таким образом, вредное воздействие транспорта на окружающую среду следует уменьшать, но в

то же время гарантированно обеспечивать мобильность населения и возможность перемещения грузов.

По расходу топлива дизель является самым экономичным двигателем, и поэтому именно для него нужно разрабатывать меры по снижению выбросов CO₂. При создании новых тяговых дизелей наряду с требованиями по снижению вредных выбросов необходимо учитывать ценовое давление и важность экономии энергоресурсов. К дизельным двигателям для железнодорожного подвижного состава предъявляют следующие требования:

- простота и прочность конструкции;
- длительный срок службы, надежность и высокая эксплуатационная готовность;
- максимальная мощность при минимальном расходе топлива;
- номинальная мощность при низкой частоте вращения;
- работоспособность даже при низком качестве топлива и масла;
- обеспечение разных способов отбора мощности для вспомогательного оборудования;
- гибкая конструкция с модульными элементами;

- длительные интервалы технического обслуживания и простота текущего содержания;

- низкие расходы жизненного цикла;

- обеспечение требуемых характеристик в режиме холодного пуска;

- низкий уровень шума и вибраций.

Продуманное сочетание высокоэффективного сжигания топлива и оптимальной очистки отработавших газов при любых условиях эксплуатации — обязательное условие, которое должно соблюдаться при разработке современного дизеля. В дальнейшем на процесс создания дизелей все большее влияние будут оказывать ужесточающиеся требования экологического законодательства.

Наряду с совершенствованием дизелей большую роль будет также играть гибридизация железнодорожного тягового привода.

В настоящее время применяют две стратегии, способствующие соблюдению требуемых предельных норм по выбросу вредных веществ. В соответствии с первой из них сам двигатель оптимизируют на минимальный выброс частиц сажи, а с помощью системы внешней очистки снижают содержание окислов азота (NO_x) в отработавших газах. Этот вариант является оптимальным в отношении расхода топлива. Вторая стратегия сводится к минимизации окислов азота и последующему снижению выбросов частиц сажи с помощью внешнего фильтра (DPF). Поскольку по мере ужесточения требований к выбросам этих мер становится недостаточно, приходится использовать комбинированные системы.

На дизели, которыми оснащается новый или модернизируемый подвижной состав, распространяется действие все более строгих законодательных норм в отношении вредных выбросов (ступени ЕС IIIA с 2005 по 2009 г. и ЕС IIIB с 2011 по 2012 г.). Чтобы выполнить

требования ступени ЕС IIIA, необходимо оптимизировать работу двигателя, в частности процесс наддува, действие системы впрыска (формирование характеристики впрыска). Для соблюдения норм ступени ЕС IIIB требуется установить сажевый фильтр DPF, обеспечить дополнительную рециркуляцию отработавших газов, применить новые способы сжигания топлива (например, цикл Миллера), установить окислительные катализаторы (DOC) или систему селективного каталитического преобразования (SCR).

Законодательные нормы ступени ЕС IIIB предусматривают снижение выброса частиц сажи до 0,025 г/(кВт·ч), что на 90% ниже, чем предусмотрено ступенью ЕС IIIA. Чтобы соответствовать этим требованиям, дизельные двигатели для железнодорожного подвижного состава должны быть оборудованы фильтрами DPF. Снижение выбросов NO_x до 4 г/(кВт·ч) в соответствии с требованиями ступени ЕС IIIB может быть обеспечено без дополнительной внешней очистки отработавших газов. На дизель-поездах наряду с установкой фильтров DPF, вероятно, потребуется применить системы внешней очистки от окислов азота.

Гибридизация привода и утилизация отводимого тепла также способствуют повышению эффективности использования энергии и обеспечению экологической чистоты подвижного состава.

Меры по оптимизации рабочего процесса двигателя

Эффективное сжигание дизельного топлива без выделения большого количества вредных веществ является важным условием для соблюдения законодательно установленных экологических требований. Сжигание топлива включает в себя целый ряд отдельных, тесно связанных друг с другом процессов, таких, как подготовка жидкого дизельного

топлива в камере сгорания, смешивание его с воздухом, воспламенение и последующее сгорание.

При проектировании дизелей большой мощности для использования на железнодорожном подвижном составе до сих пор в первую очередь стремились оптимизировать расход топлива. Это объясняется невысокими существующими требованиями законодательства в отношении вредных выбросов, а также использованием в качестве топлива более дешевых фракций перегонки нефти.

На автомобильном транспорте уже давно применяют эффективные системы, обеспечивающие комплексную оптимизацию работы двигателя по расходу топлива, выбросам вредных веществ и снижению уровня шума. Для дизелей большой мощности, устанавливаемых на железнодорожном подвижном составе, такие системы до сих пор не использовались.

Важнейшими механизмами регулирования процесса горения и выброса вредных веществ являются:

- система впрыска Common-Rail, позволяющая формировать его характеристику путем многократных впрысков;
- гибкая система регулирования фаз газораспределения;
- турбонаддув;
- оптимизация камеры сгорания;
- рециркуляция отработавших газов (AGR).

Исследования в области формирования характеристики впрыска на одноцилиндровом опытном двигателе показали, что, смещая момент впрыска в сторону «запаздывания», можно заметно снизить выбросы NO_x. Возрастающее при этом количество сажи можно уменьшить с помощью дополнительного впрыска топлива, при котором усиливается окисление сажи в камере сгорания. Этот эффект почти не влияет на расход топлива.

Рециркуляция отработавших газов в сочетании с повышенным

давлением впрыска и более высоким коэффициентом избытка воздуха в цилиндре может также способствовать сглаживанию противоречий между требованиями по снижению выбросов NO_x и частиц сажи или выбросов NO_x и расхода топлива. Соответствующие исследования проводились на опытном одноцилиндровом двигателе MTU 382 с камерой сгорания Omega.

Повышая давление впрыска p_{Rail} и объем рециркуляции отработавших газов V_{Ab} , т. е. их процентное содержание в воздухе для сжигания топлива, удалось снизить выбросы окислов азота при одновременном снижении выброса частиц сажи. Последующее смещение начала впрыска привело к минимальному выбросу частиц сажи при низком уровне выбросов NO_x. Рассмотренные меры по оптимизации позволили также снизить удельный расход топлива.

С турбонаддувом тесно связан процесс охлаждения наддувочного воздуха, в результате которого при постоянном давлении наддува увеличивается масса воздуха в цилиндре. В то же время снижается средняя температура в камере сгорания, что приводит к уменьшению выброса окислов азота. В этом отношении были исследованы возможности охлаждения наддувочного воздуха. При постоянных параметрах процесса сжигания топлива (геометрия камеры сгорания, впрыск, наддув, рециркуляция отработавших газов) существенно понижали температуру наддувочного воздуха. Установлено, что его интенсивное охлаждение является эффективным средством одновременного снижения выбросов NO_x и частиц сажи. В сочетании с рассмотренными методами снижения вредных выбросов, такими, как установка более позднего впрыска, повышение давления впрыска, повышение давления наддува и рециркуляция отработавших газов, охлаждение наддувочного воздуха

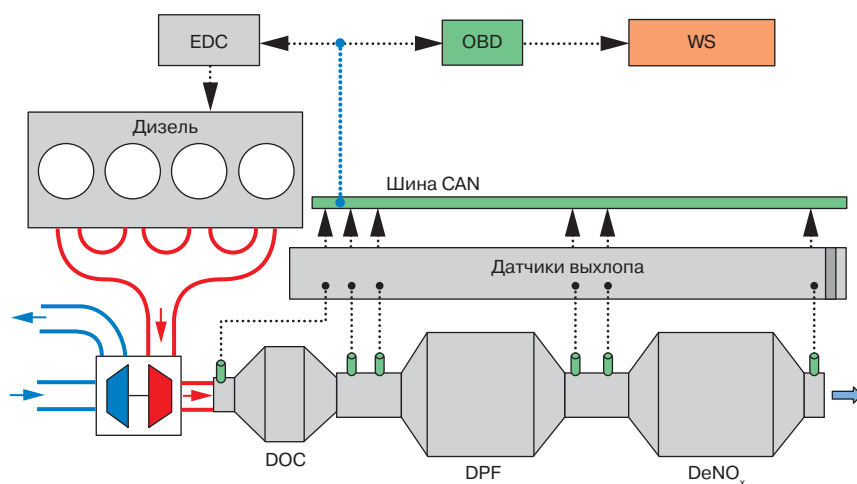


Рис. 1. Комбинированная система внешней очистки

может обеспечить очень низкие выбросы NO_x и частиц сажи.

Однако в настоящее время возможности представленных технологий оказались исчерпанными, и потребовались новые меры для снижения вредных выбросов, например внешняя очистка.

Концепции внешней очистки выхлопа

Для снижения выброса окислов азота, как уже говорилось, используют селективные каталитические системы SCR (Selective Catalytic Reduction); в последние годы был достигнут значительный прогресс в отношении их адаптации к железнодорожному подвижному составу. С помощью управляемых систем SCR с разомкнутым контуром в настоящее время удается без блокирующего катализатора снизить выбросы NO_x на 80%, а при наличии в этих системах замкнутого контура — более чем на 90%. Основным недостатком систем SCR — необходимость иметь на борту емкость с восстанавливающим средством, в качестве которого в настоящее время наиболее широко применяют 32,5%-ный водный раствор мочевины (торговое наименование AdBlue).

Для улавливания частиц сажи потребовались специальные фильтрующие системы. Фильтры DPF

представляют собой в настоящее время самое эффективное средство внешней очистки. Основной проблемой при их использовании является не столько достижение высокой степени отделения твердых частиц, сколько обеспечение надежного восстановления, т. е. очистки самих фильтров на всех рабочих режимах. С этой целью в идеальном случае все накопившиеся на фильтре частицы должны быть преобразованы исключительно в двуокись углерода и воду, для чего может быть использована двуокись азота (NO_2) либо кислород. Процесс восстановления с помощью NO_2 происходит в диапазоне температур от 250 до 450 °С, но протекает значительно медленнее и с меньшим тепловым эффектом, чем в случае использования с этой целью кислорода, когда температура составляет примерно 600 °С. Применяя каталитические покрытия или восстановительные добавки, удается значительно снизить температуру, необходимую для процесса восстановления с помощью кислорода.

Системы внешней очистки должны быть оптимальным образом адаптированы к соответствующей области применения. Наиболее совершенные системы в состоянии эффективно выполнить все установленные требования по снижению выбросов вредных веществ. В

будущем потребуются комбинированные системы внешней очистки (рис. 1).

Такие системы, помимо компонентов для снижения выбросов частиц сажи и окислов азота, дополнительно имеют в своем составе окислительный катализатор (DOC), в котором вредные составляющие — окись углерода и несгоревшие углеводороды — окисляются до CO_2 и воды. Если восстановление фильтра DPF происходит с помощью NO_2 , то дополнительно окислительный катализатор устанавливает оптимальное соотношение между количеством NO_2 и частиц сажи. Окись азота NO , содержание которой в смеси окислов NO_x может достигать 95%, окисляется до двуокиси NO_2 . Часть комбинированной системы внешней очистки отработавших газов, условно обозначаемая DeNO_x , может включать в себя наряду с системой SCR накопительный катализатор NO_x .

Для регулирования и контроля системы необходим ряд датчиков, часть из которых в настоящее время еще находится в стадии разработки (например, датчик сажи). С помощью этих датчиков осуществляется связь системы внешней очистки с системой управления двигателем (EDC) и обеспечивается бортовая диагностика (On-Bord-Diagnose — OBD) с выходным предупредительным сигналом WS.

Виды топлива и гибридные приводы

Большое влияние на расход топлива и токсичность выхлопных газов дизеля, а также на эффективность рассмотренных мер по оптимизации рабочих режимов двигателей и систем внешней очистки оказывает качество применяемого топлива. Еще несколько лет назад дизельное топливо производилось почти исключительно из нефти. По требованию изготовителей дизелей осуществлялось поэтапное

снижение содержания серы в топливе. В настоящее время принимаются меры по изменению качества топлива в связи с законодательным требованием о добавлении к нему биотоплива. Ведутся исследования, направленные на создание синтетического топлива, для которого в качестве исходных веществ используют прежде всего биомассу и природный газ. Объектом изучения являются также известные свойства водно-топливных эмульсий, способствующих снижению вредных выбросов. Исследования направлены в первую очередь на повышение устойчивости эмульсий.

Технический прогресс предполагает разработку инновационных концепций, позволяющих последовательно снижать вредное воздействие двигателей внутреннего сгорания на окружающую среду. Гибридный привод относится к таким инновациям. Известные в настоящее время гибридные приводы, применяемые на пассажирском и грузовом автомобильном транспорте, демонстрируют многообещающие результаты, в частности, по экономии топлива, которая достигает 30%. Гибридный привод способствует и ограничению выбросов углекислого газа. В дальнейшем значение этой технологии будет возрастать, и целесообразно было бы использовать ее на железнодорожном транспорте.

В качестве особо эффективных в этом отношении предлагаются следующие решения:

- комбинация дизельного и электрического привода в сочетании с накопителями энергии;
- использование энергии торможения с помощью гидростатического или пневматического накопителя;
- использование тепла отработавших газов в паровом контуре.

В состав классической электрогибридной системы обычно входят двигатель внутреннего сгорания,

такие традиционные элементы привода, как редукторы, оси и гидравлическая система, не менее одной электрической машины (двигатель-генератор), силовая электроника и накопитель энергии, например литиевый аккумулятор или блок так называемых суперконденсаторов. В режиме двигателя электрическая машина отбирает мощность из накопителя энергии и отдает ее на ходовую часть. В режиме генератора она получает энергию от ходовой части и снова заряжает накопитель. С помощью этой системы удается перекрывать пики потребления мощности, при этом двигатели внутреннего сгорания могут иметь меньшие размеры и работают в оптимальном режиме. В результате достигается значительное повышение КПД привода.

Привод Eco Pack компании Voith (рис. 2) — пример реализации гибридной технологии на железнодорожном подвижном составе. От рассмотренной, так называемой классической гибридной технологии она отличается способом накопления энергии. Речь идет о гибридной системе, которая состоит из следующих основных частей: гидростатического привода, гидропневматического (поршневого) накопителя энергии торможения и электромеханической системы управления.

При торможении, выполняемом с помощью гидростатического привода, осуществляется рекуперация части кинетической энергии подвижного состава, которая

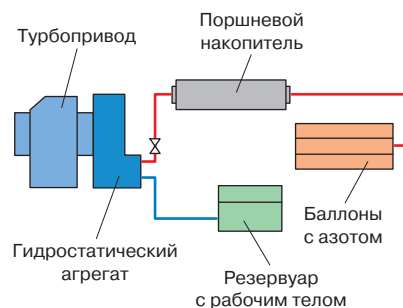


Рис. 2. Гидростатическая система рекуперации энергии торможения HydroBrid привода Eco Pack

затем используется для привода вспомогательного оборудования и/или поступает в поршневой накопитель. Накопленная энергия также может потребляться вспомогательными гидростатическими приводами, например для запуска дизеля. Кроме того, она может создавать дополнительную тягу при разгоне подвижного состава в так называемом бустерном режиме или в случае прибытия и отправления со станции при выключенном дизеле. В последнем случае снижаются уровень шума и количество вредных выбросов, что особенно важно в условиях станции, и уменьшается расход топлива. По результатам моделирования, проведенного для оценки потенциальных возможностей этой гибридной системы, можно ожидать снижения расхода топлива примерно на 15 000 л и выбросов CO₂ на 39,5 т в год в расчете на единицу подвижного состава (пробег 150 000 км). Износ тормозов при этом уменьшается примерно на 25%.

Возможны и другие гибридные компоненты. Так, дополнительно может быть реализована функция автоматического пуска и остановки дизельного двигателя, для чего применяется специальная аккумуляторная батарея с высокой удельной мощностью. В зависимости от исполнения она может быть использована в качестве накопителя рекуперированной энергии торможения.

Разработана также система для утилизации тепловых потерь, отводимых от тягового привода в бустерном режиме и от привода вспомогательных машин; система преобразует тепловые потери в полезную энергию по принципу паровой машины.

По материалам исследовательского института Fahrzeugtechnik, HTW Dresden (www.htw-dresden.de) и Европейского агентства по охране окружающей среды (www.eea.europa.eu); Eisenbahningenieur, 2010, № 3, S. 33–37.