

УДК 629.113

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ И ОТЛАДКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (HiL-СИСТЕМ)

И. Е. Кравченко / Е. С. Евдониин
ООО «Роберт Бош»

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все без исключения мировые автопроизводители находятся под нарастающим давлением технических и законодательных требований к выпускаемой продукции. Конкуренция в части предоставления в распоряжение водителя автомобиля новых функций, стоимость которых, в свою очередь, должна соответствовать классу автомобиля, также требует передовых идей и реализации экономически эффективных решений в области разработок. Оптимальной гибкостью с точки зрения оптимизации сроков проекта, стоимости и качества разработок обладает сфера электрики и электроники автомобиля. В процессе разработки нового продукта одной из наиболее значимых задач является проверка работоспособности новых решений как на этапе оценки функционала, так и в процессе окончательной валидации и (или) интеграции разрабатываемых решений. Типичный и самый очевидный путь — это проведение натурных испытаний. Это особенно актуально в части финальных проверок, таких как, например, сертификация или приёмочные испытания автомобиля. Однако как быть, если

для проверок и отладки автомобиль (или прототип) в данный момент недоступен либо требуется слишком большое количество прототипов, чтобы покрыть все возможные комплектации и наборы опций? Как проводить оценку нового функционала систем безопасности, таких, например, как стабилизация курсовой устойчивости автомобиля (ESP) или подушки безопасности, без необходимости подвергать риску серьёзного повреждения или даже уничтожения дорогостоящие прототипы? Как учесть опыт тестирования предыдущих проектов? Как оценить работоспособность нескольких связанных между собой автомобильных систем? Ответы на эти и многие другие вопросы можно найти с помощью использования в процессе тестирования и отладки электронных систем и компонентов с применением систем тестирования с замкнутой обратной связью, так называемых HiL (Hardware-in-the-Loop), то есть систем тестирования и отладки с обратной связью.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ HiL-ТЕСТЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Первое знакомство

Основное предназначение HiL-систем состоит в оптимизации и упрощении процесса тестирования электронных блоков управления (ECU), обеспечивающих при этом адекватные реакции управляемой системы с учётом влияния факторов окружающей среды. Для автомобильных контроллеров это означает, что действия водителя, реакции автомобиля и условия окружающей среды моделируются и передаются в виде управляющих сигналов таким образом, как если бы контроллер был установлен на реальном автомобиле. Благодаря высокой гибкости и выполнению расчётов в режиме реального вре-

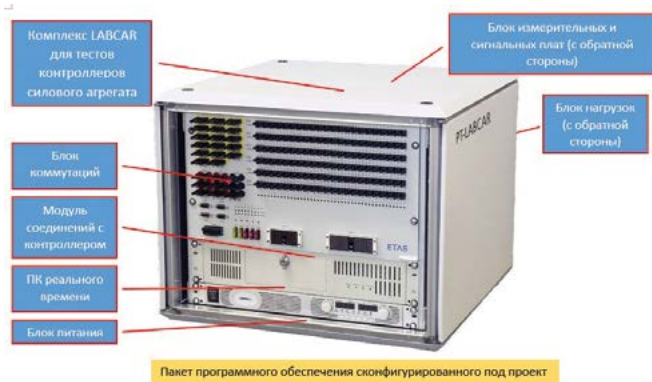


Рисунок 1. Состав компонентов системы PT-LABCAR

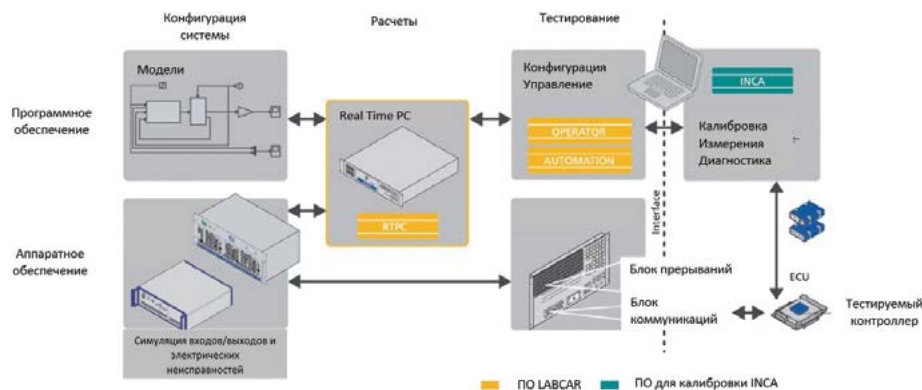


Рисунок 2. Связь между компонентами системы PT-LABCAR

мени, система обеспечивает тестирование устройств в соответствии с высокими современными требованиями и имеет высокий потенциал к модификации с учётом перспективных задач, решаемых в автомобильной отрасли. Основными преимуществами такого тестирования являются повторяемость (воспроизводимость) тестов с самым широким набором условий для проверок алгоритмов функций, а также возможность проведения испытания систем, непосредственно влияющих на безопасность автомобиля и обеспечивающих её. Повторное или многократное использование математических моделей для различных проектов, а также наборов тестов позволяет существенно снизить суммарные затраты и повысить эффективность на стадии разработки и отладки электронных систем и компонентов.

Ниже приведён обзор системы PT-LABCAR фирмы ETAS для разработки программного обеспечения и тестов контроллеров силового агрегата.

Высокая эффективность PT-LABCAR базируется на взаимодействии нескольких компонентов (см. рис. 2) системы. Симуляция входных сигналов, выходов блока управления, а также внешняя система измерений реализуются с помощью набора сменных карт. Набор карт может варьироваться в зависимости от проекта (например, для дизельного или бензинового мотора).

Такая конфигурация позволяет легко адаптировать систему к требованиям заказчика. Блок коммутации со специальными разъёмами позволяет обеспечить различные варианты соединений до 300 выводов контроллера, включая возможность присоединения реальных компонентов управляемой системы вместо моделируемых параметров или (при необходимости) параллельно для обеспечения большой гибкости в процессе отладки и доводки ПО.

Основой системы PT-LABCAR является машина расчётов в режиме реального времени (Real-Time PC, RTPC) которая управляется ПО на базе операционной системы (ОС) класса UNIX и производит расчёты согласно интегрированным матема-

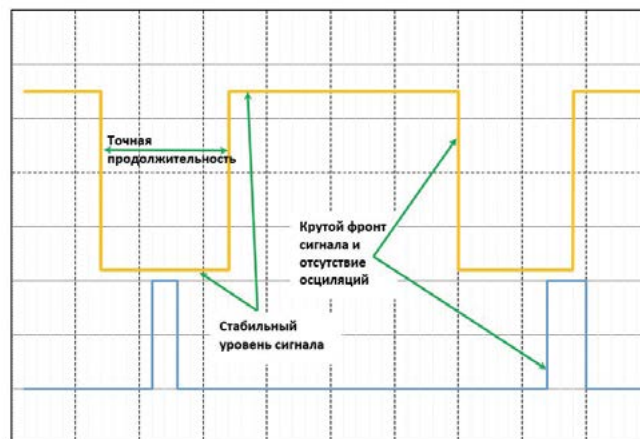


Рисунок 3. Критерии качества сигналов

тическим моделям. ПО LABCAR-Operator (работает под управлением ОС Windows) предназначено для конфигурирования систем, а также управления проектом. Специальное ПО для автоматизации эксперимента позволяет создавать, сохранять и выполнять последовательные тесты для ЭБУ.

Производительность в режиме реального времени

Основным условием получения реалистичных результатов тестирования для функций, критичных к фактору времени, является высокая производительность обработки сигналов, включающая короткое время расчёта параметров модели в режиме реального времени, в сочетании с низкой латентностью связей между моделью и аппаратной частью HiL-системы на уровне физических сигналов. Для обеспечения необходимой производительности используется высокая вычислительная производительность в сочетании с интеллектуальным алгоритмом управления данными в режиме реального времени.

Управление данными в режиме реального времени

Передача данных между моделью и специальными картами, осуществляющими генерацию сигналов

(например, угловой синхронизации), производится только в момент изменения расчётного сигнала, тем самым она оптимизирует поток данных между моделью и исполнительным устройством.

Другой пример — карта широтно-импульсной модуляции. Специальная интегральная схема (ПЛИС) в составе платы обеспечивает предварительную интеллектуальную обработку сигнала, что сокращает объём передаваемых данных. Разделение функций расчёта и обработки сигналов между RTPC и ПЛИС сокращает латентность сигнала.

Эффективность коммуникаций по шинам CAN также увеличена за счёт параллельных коммуникаций CAN-карты через PC-/PCI-шину (в составе RTPC) и VME-шину. В результате применения вышеуказанных решений измерения, проведённые с помощью RT-LABCAR на контроллере восьмицилиндрового двигателя, показали цикловое время менее 500 микросекунд.

Вычислительные возможности

Для получения максимальной производительности вычислений в RTPC используются высокопроизводительные процессоры, например Intel® Core i7 3770 4 × 3,4 GHz. Интеллектуальное распределение вычислительной нагрузки между ядрами процессора повышает скорость вычислений моделей реального времени. Кроме того, использование карт памяти с высокими скоростями доступа позволяет оптимизировать работу многоядерных процессоров и обеспечить высокую скорость и низкие задержки при вычислениях.

Все полупроводниковые элементы, включая высокопроизводительные процессоры, генерируют большое количество тепла в процессе своей работы и, соответственно, требуют специальных мер для поддержания адекватного теплового баланса. Типичным решением проблемы тепловыделения является снижение тактовой частоты процессора, предотвращающее перегрев. С учётом необходимости наиболее полного использования вычислительной мощности RTPC ETAS использует специализированный промышленный корпус, позволяющий обеспечить необходимый температурный баланс при максимальной производительности процессора RTPC.

Качество сигналов в режиме реального времени

Для получения точных и воспроизводимых результатов тестирования необходимо обеспечить генерацию электрических сигналов в полном соответствии с заданными характеристиками (рис. 3), что также напрямую зависит от производительности системы. RT-LABCAR гарантирует соответствующий уровень точности, в том числе и для высокоскоростных

сигналов. Под точностью, кроме непосредственно величины сигнала, понимаются также продолжительность и правильность формы генерированного электрического сигнала в режиме реального времени.

Симуляция неисправностей в режиме реального времени

Симуляция электрических неисправностей (например, короткого замыкания) в процессе отладки ПО на HiL-системах играет очень важную роль. Переключения в режиме реального времени обеспечиваются электронными переключателями (MOSFET-транзисторами). Модуль симуляции отказов ETAS ES4440 предназначен для конфигурирования различных типов неисправностей проводки, таких как замыкания на положительный или отрицательный вывод источника питания с регулируемым временем замыкания (имитация плохого контакта), замыкания через нагрузку, всевозможные обрывы цепей и т. п. В сочетании с комплексом RT-LABCAR испытания реакции ЭБУ на возникающие неисправности электрических соединений могут быть реализованы в режиме реального времени. Помощью ПО для автоматизации LABCAR-Automation возможно программирование некоего алгоритма или последовательности электрических отказов.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ HiL-ТЕСТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТОК

В настоящее время невозможно представить разработку современного ПО без тестирования на HiL-системах. Фирма BOSCH успешно внедряет и использует системы типа LABCAR для тестирования и доводки ПО блоков управления в процессе разработки электронных систем и компонентов. Важным ключом к успеху является введение стандартизации, что позволяет разработчикам гибко адаптировать системы тестирования к различным условиям применения. Учитывая широкий спектр интеллектуальных систем, продуктов и услуг, предоставляемых фирмой BOSCH, это является особенно важным аспектом. Для повышения эффективности сотрудничества BOSCH также рекомендует своим клиентам и партнёрам использовать такие системы в общих проектах.

В качестве партнёра в области разработок компания ETAS предлагает индивидуальные решения для тестирования электронных систем с помощью специализированных комплексов LABCAR. Пользователи получают дополнительную выгоду от широкой поддержки, начиная с предварительного ис-

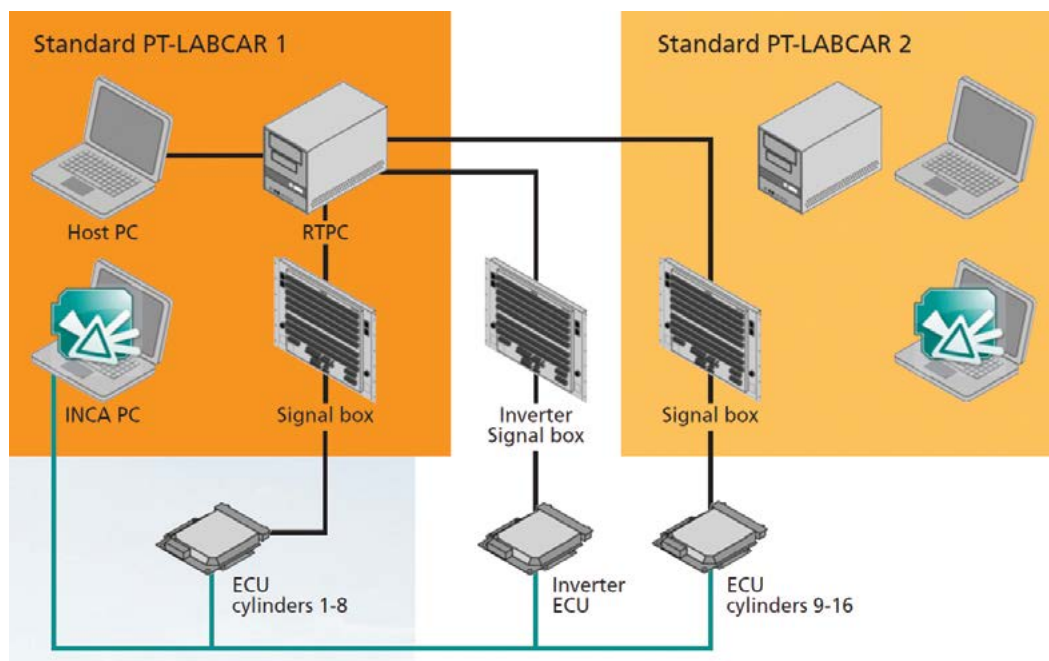


Рисунок 4. Модульная структура HiL-систем LABCAR

следования проекта и заканчивая производством готовой продукции. Первоначально HiL-системы использовались в основном в «ручных» тестах программного обеспечения. На сегодняшний день каждый выход новой версии ПО для блоков управления BOSCH проходит комплекс автоматизированных тестов на HiL-системах LABCAR ETAS.

Повышение эффективности за счёт гибкости применения систем

Каждый заказчик ЭБУ BOSCH получает полноценную систему, состоящую из собственно контроллера, программного обеспечения и набора калибровок, полностью соответствующих требованиям спецификации. HiL-системы LABCAR с соответствующим набором карт и универсальным блоком коммутаций применяются в качестве стандартного инструмента в процессе разработки. Для работы со специфическим проектом требуется лишь адаптация жгута проводов между ЭБУ и системой LABCAR, а также корректировка математической модели с учётом требований проекта. Подобная адаптация может быть сделана за достаточно короткое время. Богатая база готовых проектов позволяет повторно использовать как полученные ранее настройки математической модели, так и цепочки автоматических тестов.

В прошлом аппаратная часть HiL-систем для тестирования ЭБУ двигателей с более чем восьмью цилиндрами конфигурировалась исключительно в соответствии со спецификой проекта и входными данными заказчика. По окончании проекта такая система требовала достаточно затратной модернизации для повторного использования в следующем

проекте. Во избежание неэффективных затрат была разработана и внедрена концепция модульной системы LABCAR от ETAS. Теперь для подобных тестов может быть использована комбинация двух или более стандартных систем LABCAR, объединённых в единый домен (рис. 4).

Все модели обрабатываются RTPC первой системы. Управление также осуществляется только через компьютер — оператор первой системы. Любая модификация требует всего нескольких быстрых корректировок параметров математической модели. Таким образом, эти системы могут быть использованы либо как две отдельные системы для испытаний ЭБУ двигателей с числом цилиндров до восьми, либо в каскадной конфигурации для тестов нескольких ЭБУ с управлением до шестнадцати цилиндров.

Подобное расширение стандартной системы может быть также использовано для тестирования ЭБУ инверторов в комбинированных энергетических установках. Для этого HiL-система LABCAR дополняется стандартным адаптером и специфическим набором плат для тестирования ЭБУ инвертора. В этом случае расчёт математических моделей, конфигурация и управление также осуществляются через первую систему. При этом работа ведётся с отдельными математическими моделями для двигателя внутреннего сгорания и инвертора. Вычисления параметров каждой математической модели могут быть разделены между ядрами процессора RTPC, а управление и выполнение автоматических тестов обеспечиваются централизованно с хост-компьютера.

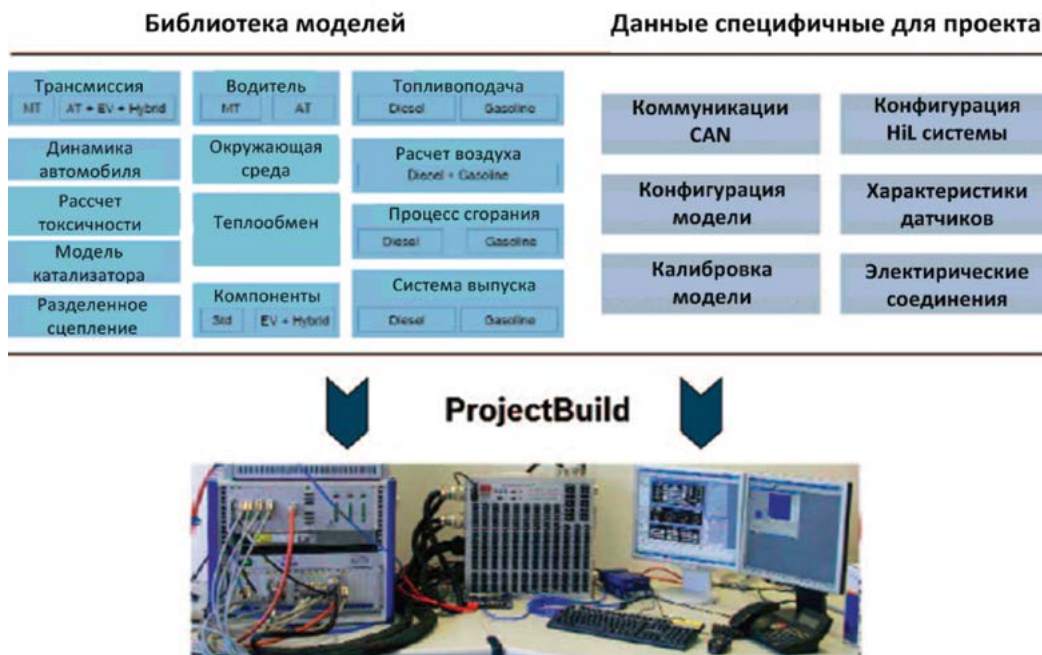


Рисунок 5. Генерация модели по требованиям проекта

HiL-центр BOSCH

Для обеспечения конкурентоспособности своих продуктов BOSCH стремится реализовывать различные инновационные решения с большим разнообразием вариантов. В свою очередь, реализация продукта должна иметь конкурентоспособную цену и высокое качество. Из вышеизложенного ясно, что использование стандартных систем LABCAR ETAS для тестирования и отладки электронных компонентов стало стандартной частью процесса разработки ПО. В связи с расширением возможностей и повышением точности моделирования в последние несколько лет HiL-системы LABCAR получили применение в том числе и в процессах калибровки, тем самым ещё больше сокращая количество дорогостоящих натурных испытаний на автомобиле. Для наиболее эффективного использования таких систем было принято решение о создании HiL-центра BOSCH, в цели которого входит консолидация знаний и опыта разработчиков алгоритмов бензиновых и дизельных систем, а также в сфере калибровки этих алгоритмов. Здесь тестируется ПО, находящееся в стадии разработки, а также ПО, подлежащее модификации в фазе серийного производства.

Эти процессы требуют разработки и параметризации имитационных моделей для каждого транспортного средства и его вариантов (включая контроль систем кузова, силового агрегата, трансмиссии и т. д.). На момент написания этой статьи количество созданных компонентов моделей превышает сто единиц. Для обеспечения эффективной поддержки по конкурентоспособной цене для растущего числа

и вариантов проектов была разработана программа Project Build (рис. 5).

Программа помогает эффективно генерировать проекты для систем LABCAR. В библиотеке моделей сохраняются все разрабатываемые компоненты моделей, включая историю использования в проектах. Это позволяет легко отслеживать модификации и проводить сравнения разных моделей или проектов. Одним из основных файлов проекта является спецификация электрических соединений ЭБК с системой LABCAR через блок коммутаций вплоть до измерительных и симулирующих входы/выходы карт. Программа Project Build генерирует все эти соединения автоматически и интегрирует их в специализированную оболочку для управления тестами.

Подобный подход обеспечивает автоматическое отслеживание и проверку любых изменений как в программном обеспечении, так и в электрических соединениях. В случае необходимости базовые проектные данные всегда доступны. Также возможно повторное использование настроек автоматических тестов.

Использование систем LABCAR для калибровки

На базе указанных выше компонентов математических моделей создаётся комплексная математическая модель виртуального автомобиля, дополняющаяся экспериментальными данными, такими как, например, сырой выброс токсичных элементов, эффективность нейтрализатора и т. п. Такая адаптация проекта к реальному транспортному средству или варианту его исполнения обеспечивается через тонкую настройку параметров математической мо-

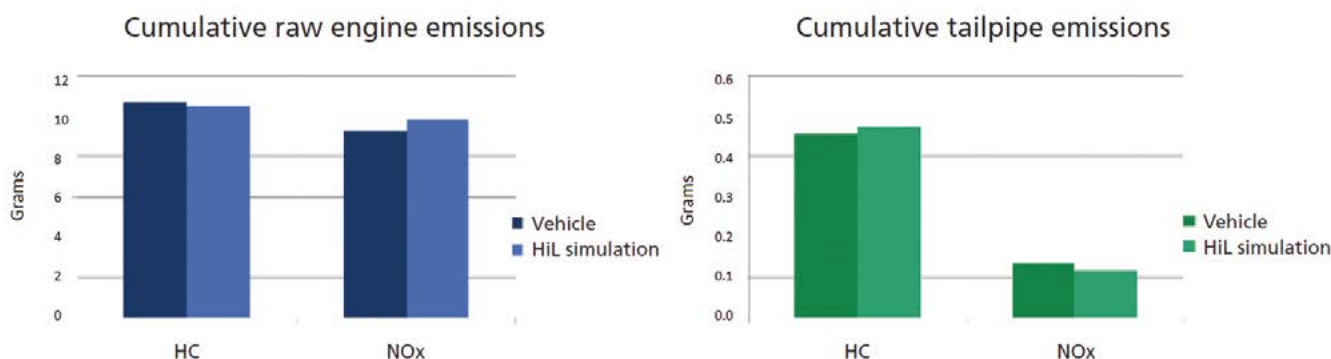


Рисунок 6. Сравнение результатов испытаний реального автомобиля и моделирования на HiL-системе



	Physical vehicle 		Virtual vehicle 		Difference
	Ø	Std. dev.	Ø	Std. dev.	
Catalyst diagnostics	860.5 s	1.2 s	862.8 s	0.6 s	2.4 s/0.3 %
Lambda probe dynamics diagnostics	272.3 s	65.8 s	316.5 s	27.1 s	-44.2 s/16.2 %
Lambda probe offset diagnostics	895.1 s	-	966.2 s	0.3 s	71.2 s/8.0 %

Рисунок 7. Время установки флага диагностики в течение ездового цикла

дели. Целью является достижение наибольшего соответствия между HiL-системой и реальностью.

Все модели калибровки и их история хранятся в соответствующей базе данных. Полученный виртуальный испытательный автомобиль используется для проверки калибровочных данных, что позволяет предварительно настроить большое количество взаимно пересекающихся функций так, как это было бы сделано на реальном образце. Само собой, подобная детальность моделей также является полезным инструментом и для разработчиков ПО.

На рис. 6 показано сравнение расчётных значений выбросов токсичных элементов до и после каталитического нейтрализатора, полученных на комплексе LABCAR, с реальными результатами тестов на автомобиле. Такие результаты демонстрируют широкие возможности применения HiL-систем для калибровки.

Например, применение модуля симуляции ошибок ETAS ES4440 позволяет калибровать с помощью HiL-систем диагностические функции. Особенно важен тот факт, что, имея функциональную модель тестового автомобиля, можно настраивать параметры не только драйверной, но и функциональной диагностики. Для такой калибровки обычно требуется большое количество циклических измерений

токсичности выхлопных газов. Здесь, как правило, важно определить граничные условия, приоритеты функций и количественную оценку токсичности выхлопных газов в результате неисправностей системы и (или) активных диагностических вмешательств. При испытаниях с помощью HiL-систем взаимные функциональные связи и наихудшие сценарии определяются на более ранней стадии проекта. И, как результат, можно существенно сократить объём натурных испытаний или даже вовсе от них отказаться. В ряде стран ЕС государственные органы уже начали принимать результаты испытаний, полученных на HiL-системах, для сертификации транспортных средств, когда речь идёт о модификациях уже сертифицированного базового автомобиля.

На рис. 7 показаны различия между симулированным на HiL-системе режимом ездового цикла NEDC и показателями, полученными в результате реального тестирования. Время, приведённое в таблице, показывает, когда тот или иной режим диагностики может быть активен.

Экспериментально было установлено, что результаты виртуального тестирования достаточно точно соответствуют (в пределах разброса) результатам испытаний реального автомобиля. Для диагностики изменения характеристики лямбда-зонда экспери-



Рисунок 8. LABCAR российского представительства группы компаний BOSCH в лаборатории НАМИ

ментальные данные по разбросу вовсе не были доступны для реального автомобиля. Для выяснения причины столь существенных различий был проанализирован ряд влияющих факторов. Было установлено, что изменение скорости движения транспортного средства (в пределах допускаемых стандартом отклонений ± 2 км/ч) может вызвать вариабельность результата более чем на 100 секунд. В отличие от физического испытания транспортного средства, ценность HiL-тестирования заключается в надёжности исследования такого рода, что является ещё одним примером эффективности HiL-тестирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За многие годы практики инженеры BOSCH наработали богатую базу экспертных знаний в области тестирования электроники, а также неоднократно доказали экономическую эффективность применения комплексов LABCAR. Кроме всего прочего, BOSCH применяет HiL-системы также для выполнения тестов на надёжность компонентов третьих фирм, используемых в системах BOSCH. Это позволяет клиентам сократить свои затраты на тестирование и быть уверенными в качестве продукции BOSCH. Самой важной задачей разработки BOSCH считает

обеспечение максимального соответствия продукта запросу клиента, добиваясь результатов с максимально возможной степенью эффективности. Это является стимулом совершенствования современного процесса разработки и калибровки ПО ЭБУ, ключевыми факторами которого являются повышение точности виртуального моделирования и стандартизация использования HiL-тестирования.

В марте 2015 года российское представительство группы компаний BOSCH передало в НАМИ полноценный LABCAR для бесплатного демонстрационного использования с целью получения инженерами НАМИ практического опыта взаимодействия с HiL-системами в рамках работы над проектом ЕМП (рис. 8). В дальнейшем планируется развивать совместную деятельность, используя математические модели реального проекта по разработке и калибровке пилотного двигателя V8 для ЕМП.

Статья составлена по материалам компании ETAS.