

# Перекрестный привод Haldex

Ир. Эдо Дрент

Технический специалист по динамике транспортных средств Haldex Traction AB, Швеция

### Историческая справка

С 1998 года Haldex Traction производит интеллектуальные системы полного привода. В том же году самоблокирующаяся муфта Haldex первого поколения появилась на VW Golf 4MOTION, а год спустя она была представлена на Volvo S60 AWD. Haldex LSC первого поколения был основан на уникальном запатентованном дифференциальном насосе, который создавал гидравлический поток, пропорциональный разнице скоростей в муфте. С помощью линейного дросселя, активируемого шаговым двигателем, можно было изменять «жесткость» и контролировать передачу крутящего момента. Систему Haldex можно рассматривать как демпфер вращения с переменными характеристиками. Позже, в 2002 году, было представлено Haldex Generation II. Во втором поколении Haldex LSC по-прежнему используется уникальный дифференциальный гидравлический насос, но линейный дроссельный клапан заменен на пропорциональный дроссельный клапан с электромагнитным управлением. Кроме того, введен и активно используется датчик давления для регулирования давления (крутящего момента) в замкнутом контуре, что привело к улучшению производительности, особенно в отношении сцепления шин с дорогой. Однако механический интеллект<sup>1</sup> по-прежнему доступен для устранения помех, выходящих за пределы полосы пропускания, в значительной степени определяемой связью CAN, например. контроль скольжения и  $\mu$ -прыжок. Кроме того, он обеспечивает высокую устойчивость к низкому качеству сигнала и потере сигнала CAN. В случае поломки CAN-шины запасным вариантом является определенное заданное значение жесткости, которое является компромиссом между тягой и маневренностью. LSC без этого дифференциального насоса должен отключиться и оставить вас в кустах, потому что здесь нет такого компрометирующего упреждающего крутящего момента. Слишком высоко, и трансмиссия покажет проблемы с усталостью, слишком низко, и ламели сгорят.



Figure 1 The Haldex AWD generations

Поколение III, представленное на рынке с 2004 года, представляет собой дальнейшее развитие второго поколения Haldex. Добавив обратный клапан, уже имеющийся питательный насос (небольшой насос для активации системы) может, хотя и ограниченно, создать упреждающий крутящий момент над муфтой. Это решение называется предварительной зарядкой PreX™. В более поздних версиях этого поколения мощность упреждающего крутящего момента была увеличена за счет более крупного подающего насоса.

Позднее в этом году (2007 г.) будет представлен Haldex Generation IV. Разработки, обусловленные затратами, отдали предпочтение упреждающим методам тяжелых решений PreX в Generation. 1 См. ссылку [2]

III на муфту Haldex без дифференциального насоса. Кроме того, пропорциональный дроссельный клапан заменен на пропорциональный редуцирующий клапан. Чтобы обеспечить быстрый отклик муфты, гидроаккумулятор заполняется питающим насосом. Редуцирующий клапан регулирует перепад давления между аккумулятором и поршнем, который создает осевую силу на пакет сцепления.

Вскоре после появления Haldex поколения IV в 2008 году на глобальной платформе происходит внедрение перекрестного привода XWD™. Хотя XWD существовал вместе с предыдущими поколениями в качестве прототипов, впервые он появится на рынке вместе с четвертым поколением Haldex LSC. XWD — это, по сути, дифференциал повышенного трения с электронным управлением, который разделяет силовой агрегат и электронику с системой AWD. Умный дизайн также позволяет продавать XWD в качестве опции на той же платформе.

### Аппаратное обеспечение

#### Конфигурация приводной линии

Чтобы лучше понять, где расположены Haldex LSC и eLSD, на рисунке ниже схематично показана трансмиссия автомобиля.

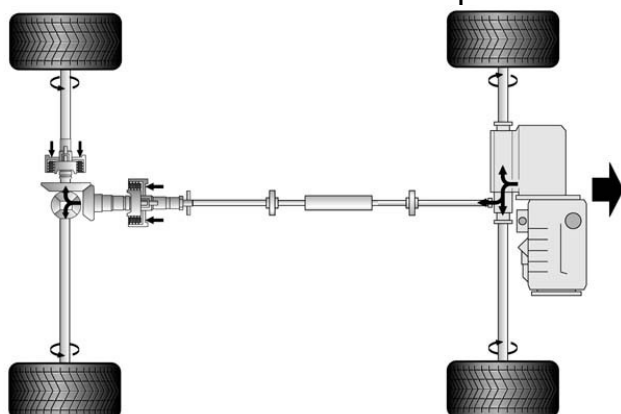


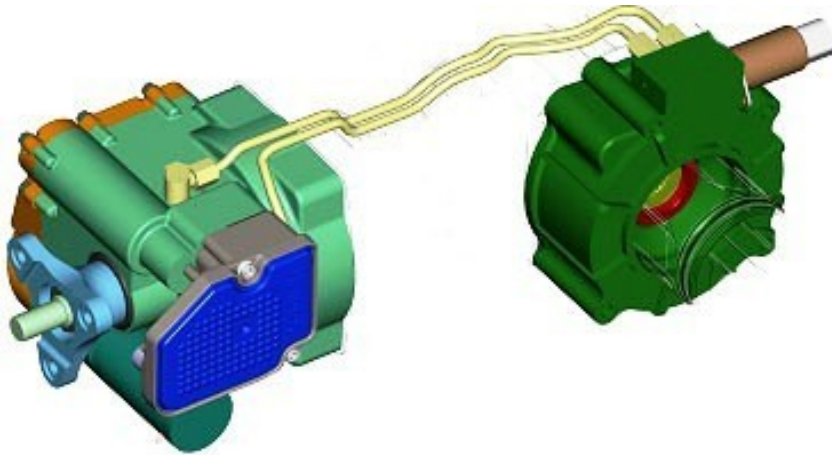
Figure 2 Drive line layout

Представленный XWD будет построен на переднеприводной платформе. От коробки отбора мощности карданный вал через Haldex LSC соединен с задним дифференциалом. eLSD расположен между коронным колесом заднего дифференциала и одной из задних полуосей.

#### XWD-дизайн

На рис. 3 показано оборудование XWD, а также общий блок питания и ЭБУ. Силовой агрегат установлен в LSC и соединен с eLSD двумя гидравлическими линиями: со стороны высокого давления и со стороны бака. На eLSD редуцирующий клапан, соединенный с ЭБУ с помощью проводов, установлен рядом с гидравлическим пакетом сцепления.

Аппаратное обеспечение является модульным и поэтому может продаваться как опция в рамках той же платформы. Затем пакет eLSD необходимо заменить крышкой без гидравлики и клапана на корпусе дифференциала.



### Особенности XWD

Рисунок 3. Аппаратное обеспечение XWD: LSC (слева) и LSD (справа).

#### Совместимость с ABS/ESC

Сегодня продукт жизнеспособен только тогда, когда он полностью совместим с антиблокировочной системой тормозов, ABS и системами электронного контроля устойчивости (ESC). Разумеется, Haldex LSC совместим с ABS; Само наличие ABS на большом парке автомобилей фактически сделало LSC с электронным управлением жизнеспособным для массового производства, и Haldex стала пионером в этой области в середине девяностых. Несмотря на это, LSD совместим с ABS/ESC, а наличие сенсорного блока ESC повысит производительность и функциональность eLSD. И эта презентация тому подтверждение.

#### Общий ECU и блок питания

Конструкция XWD разделяет две относительно дорогие части всей системы; силовой агрегат и ЭБУ. Поскольку эти две системы являются общими, затраты на eLSD относительно невелики.

#### Эффективное улучшение тяги

Поскольку диагональное вращение можно предотвратить с помощью двух пакетов сцепления, расположенных, как показано выше, тяга значительно улучшается за счет энергоэффективности по сравнению с системами на основе тормозов. Кроме того, система работает без нарушения комфорта, как это показывают некоторые тормозные системы. Поскольку LSD ограничивает разницу скоростей колес на задней оси, блокирующий момент рассеивает энергию за счет относительной разницы скоростей. Поскольку LSD передает крутящий момент между одной (1) полуосью и ведущим колесом, фактически

разница в скорости вращения колес составляет половину относительной. Эта относительная разница скоростей колес намного ниже, чем абсолютная скорость колес, которая рассеивает энергию торможения с помощью электронной системы блокировки дифференциала (EDS). Кроме того, контроллер проскальзывания на задней оси автоматически обеспечивает превосходные тяговые характеристики, возможно, без вмешательства тормозов EDS. В зависимости от проектных требований OEM-производителя допустимый крутящий момент на задней оси может быть ограничен, а вмешательство EDS может еще больше увеличить тягу, хотя и с меньшей энергоэффективностью.

#### Управление повышением производительности

Управляемость полноприводных автомобилей на покрытиях с высоким  $\mu$  нередко ограничивается нагрузкой на криволинейные внутренние колеса. Ускорение при высоких поперечных перегрузках нередко приводит к внутренней пробуксовке колес, что ограничивает продольное ускорение. Ограничивая (относительное) проскальзывание заднего внутреннего колеса, общая тяговая способность увеличивается, а мощность подруливающего механизма снижается. Для адекватного управления необходим блок датчиков ESC.

#### Улучшения безопасности

Ниже более подробно будет обсуждаться повышение безопасности, которое можно получить с помощью XWD.

### Прозрачный для водителя

Поскольку алгоритмы управления в ЭБУ полностью автоматически контролируют все функции тяги и управляемости, система полностью прозрачна для водителя. Программное обеспечение управления XWD использует только доступные сигналы ABS/ESC и управления двигателем.

### Экономически эффективным

Поскольку затраты на XWD состоят в основном из дополнительного пакета сцепления и гидравлического клапана, соотношение затрат и выгод является выдающимся. Конечно, когда общий блок питания и ЭБУ вносят существенный вклад в общую стоимость системы. Там, где стоимость умеренная, дополнительные функции или преимущества значительны: отличная тяга, повышенная управляемость и дополнительная динамическая безопасность вождения.

### Демпфирование отклонения от курса Yaw Damping, Velocity = 20 m/s

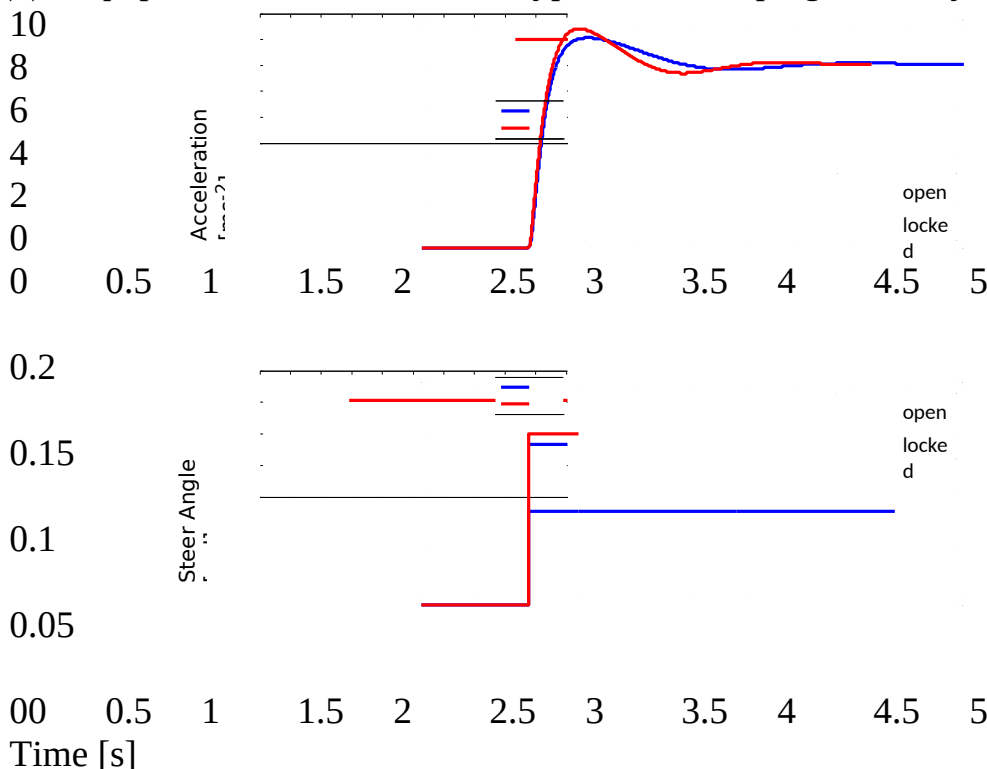


Figure 4 Step responses of vehicle with and without locked LSD

### Что такое демпфирование рыскания

Термин «демпфирование рыскания» широко используется в публикациях; однако его техническое содержание может существенно отличаться и не всегда может быть использовано корректно в строго



физическом смысле. Слово «затухание» используется для обозначения сигналов, колебательное поведение которых уменьшается с течением времени, когда так называемый коэффициент затухания больше нуля. Таким образом, это мера переходного поведения системы.

Наземные транспортные средства, находящиеся под рулевым управлением, демонстрируют уменьшение демпфирования рыскания (и собственной частоты рыскания, если уж на то пошло) с увеличением скорости движения транспортного средства (см. ссылку [1]). Наземные транспортные средства с чрезмерным рулевым управлением могут иметь возрастающее демпфирование отклонения от курса с увеличением скорости, но они достигают нестабильной скорости, так называемой критической скорости, что не является нормальным случаем для серийных транспортных средств.

Заблокированный ЛСД в заднем мосту может создавать только подруливающие моменты. Это означает, что единственный способ повлиять на рыскание автомобиля – это создать недостаточную поворачиваемость. Из литературы мы знаем, что увеличение недостаточной поворачиваемости требует большего усилия поворота при той же кривизне, а также уменьшает демпфирование, что является противоположным эффектом, который мы ищем. Для иллюстрации этого утверждения проведено моделирование на простой модели транспортного средства с нелинейными шинами. Один автомобиль работает с открытым задним дифференциалом, другой — с заблокированным. Результаты моделирования ясно показывают, что для получения того же установившегося поперечного ускорения, которое является мерой увеличения недостаточной поворачиваемости, требуется больший угол поворота. Кроме того, превышение скорости рыскания больше как мера уменьшения демпфирования рыскания. На рисунке 4 показана скорость рыскания, умноженная на скорость транспортного средства, что эквивалентно установившемуся боковому ускорению. Приведенное выше обсуждение показывает, что для увеличения демпфирования рыскания необходимо более интеллектуальное управление, чем просто закрытие eLSD. Если демпфирование рыскания рассматривается как противодействие скорости рыскания

изменение (другими словами: ускорение рыскания), запуск eLSD в нужное время с нужной величиной может привести к желаемым характеристикам. Таким образом, управление демпфированием рыскания представляет собой элемент управления, который активирует eLSD только при переходных маневрах, таких как маневр предотвращения аварии.

## Требования к контролю

Настройка шасси считается основным источником таких характеристик управляемости, как недостаточная поворачиваемость. На эти характеристики может влиять продольное и поперечное распределение крутящего момента. В этом документе мы концентрируемся на eLSD-части продукта XWD. Блокирующий момент в eLSD создает момент отклонения от курса рулевого управления на задней оси. Это означает, что блокирующий момент, присутствующий во время устойчивого прохождения поворотов, ухудшит управляемость из-за увеличения недостаточной поворачиваемости (см. главу выше). Таким образом, блокирующий момент для демпфирования рыскания на задней оси может применяться только при переходных маневрах.

Алгоритмы управления должны быть устойчивы к изменениям свойств поверхностного трения и свойств шин. Таким образом, использование методов наблюдения опускается. В прототипах автомобилей использование этой технологии может показать замечательные результаты, но использование самых современных технологий для производства на многих тысячах людей может привести к скомпрометированным результатам.

Демпфирование отклонения от курса, скорость = 20 м/с<sup>10</sup>

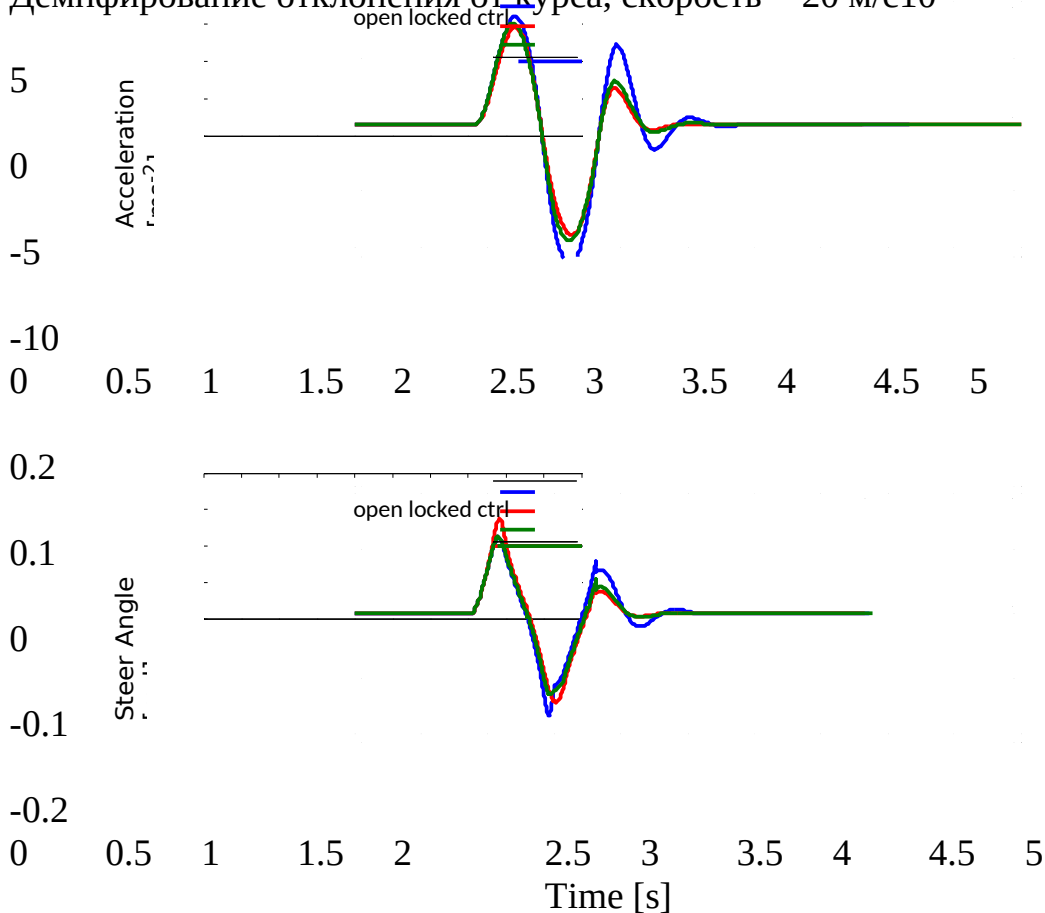


Рисунок 5. Сравнение открытого, заблокированного или управляемого eLSD на заднем мосту при однократной синусоидальной смене полосы движения.

### Результаты симуляции

Прежде чем реализовать алгоритмы управления на прототипе автомобиля, проводятся испытания в среде моделирования.

Преимуществом моделирования является контроль над параметрами окружающей среды и быстрая итерация параметров и алгоритмов управления.

Представленные результаты моделирования основаны на единственной синусоидальной смене полосы движения и маневре предотвращения аварии. Скорость рыскания масштабируется (умножается) на скорость транспортного средства, чтобы представить сигнал как боковое ускорение. Этот сигнал также позволяет лучше понять, насколько автомобиль близок к пределу своих возможностей.

### Одинократная синусоидальная смена полосы движения

Сначала мы сравниваем результаты для открытого, заблокированного и управляемого eLSD при одной синусоидальной смене полосы движения. Этот маневр представляет собой синусоидальный контур с замкнутым контуром сигнала поперечного ускорения, что приводит к идентичным траекториям движения. На рисунке 5 показаны результаты по скорости рыскания (в зависимости от скорости автомобиля и поперечного ускорения) и угла поворота. Хорошо видно, что и заблокированный, и управляемый eLSD быстрее возвращаются на прямую, чем открытый дифференциал в заднем мосту. Можно даже сделать вывод, что закрытый eLSD работает лучше. Однако более пристальный взгляд на усилие рулевого управления показывает существенные различия.

Первый пик угла поворота показывает значительное приращение для заблокированного eLSD, например, увеличивается при повороте.

Хотя размах углов поворота для открытой и заблокированной системы аналогичен, управляемый eLSD демонстрирует значительное улучшение по сравнению с открытой системой. На рисунке 6 показано более полное сравнение сигналов открытого и управляемого eLSD. Следующие пути идентичны (верхний левый угол). Причину небольших пиков угла поворота на пиках около 1,45 с и 1,8 с можно найти в неминимальных фазовых характеристиках угла увода (правый верхний угол). Но активное демпфирование рыскания, AYD, уменьшает величину этого неминимального фазового поведения при той же скорости транспортного средства.

Активное демпфирование рыскания, скорость = 20 м/с 0.1

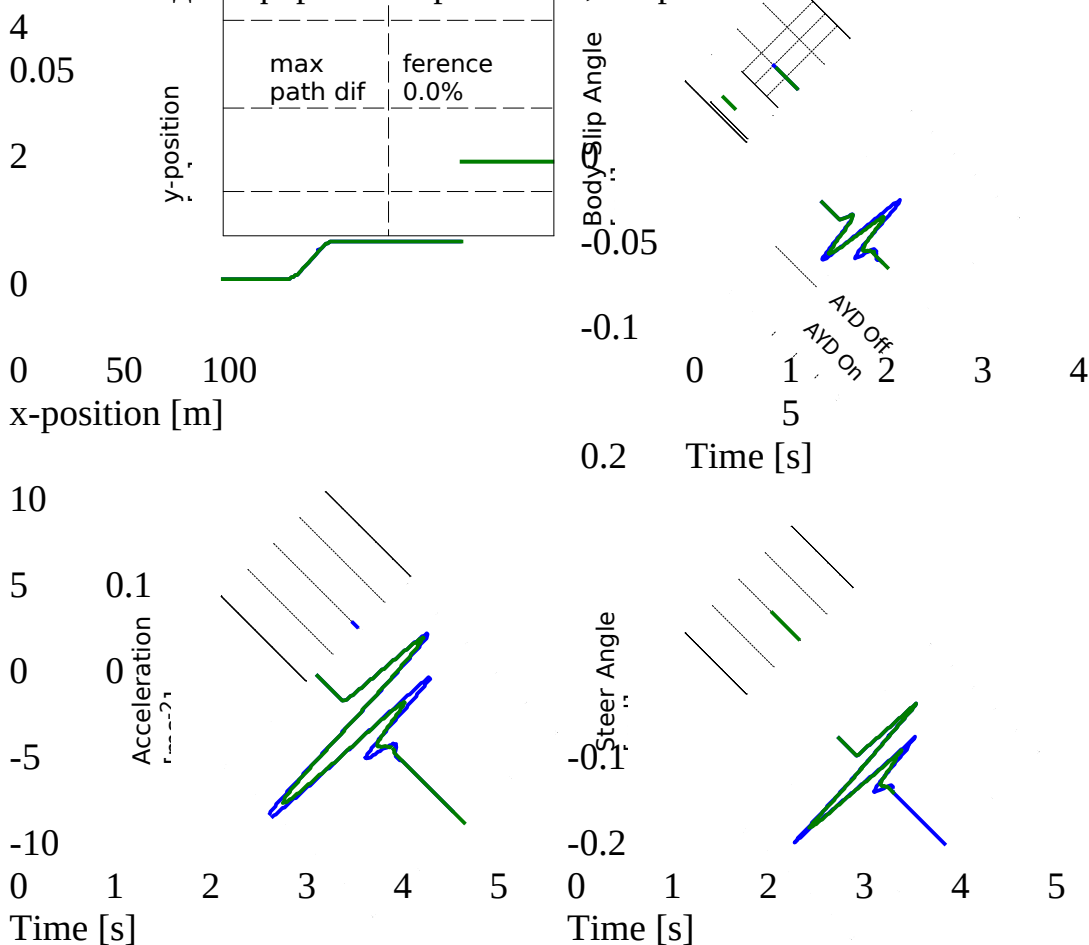


Рисунок 6. Сравнение открытого и управляемого eLSD в заднем мосту при однократной синусоидальной смене полосы движения.

### Предотвращение несчастных случаев

Входные данные рулевого управления для модели для двух случаев с активным демпфированием рыскания или без него таковы, что путь следования (почти) идентичен. Имейте в виду, что алгоритмы демпфирования рыскания влияют на переходный процесс и, таким образом, могут влиять на траекторию следования, если входной сигнал рулевого управления с разомкнутым контуром идентичен в обоих случаях (по этому вопросу обратитесь к рисунку 4).

Результаты на рисунке 7 ясно показывают преимущества алгоритма демпфирования рыскания при маневре предотвращения аварии. Скорость рыскания, представленная как боковое ускорение, для управляемой системы явно меньше. Несмотря на это, угол скольжения корпуса при переходном маневре меньше. Особенно это касается размаха значений. Усилие рулевого управления с демпфированием рыскания улучшилось. Сама величина угла поворота существенно не отличается; первоначальные они одинаковы, а второй незримо меньше,

но выносливость для управляемой системы больше. У водителя время больше, почти 0,2с.

Active Yaw Damping, Velocity = 20

m/s 4

2

0

0 50 100

x-position [m]

10

5

0

-5

-10

Time [s]

Acceleration

0.1

0

-0.1

-0.2

-0.3

-0.4

-0.5

-0.6

-0.7

-0.8

-0.9

-1.0

-1.1

-1.2

-1.3

-1.4

-1.5

-1.6

-1.7

-1.8

-1.9

-2.0

-2.1

-2.2

-2.3

-2.4

-2.5

-2.6

-2.7

-2.8

-2.9

-3.0

-3.1

-3.2

-3.3

-3.4

-3.5

-3.6

-3.7

-3.8

-3.9

-4.0

-4.1

-4.2

-4.3

-4.4

-4.5

-4.6

-4.7

-4.8

-4.9

-5.0

-5.1

-5.2

-5.3

-5.4

-5.5

-5.6

-5.7

-5.8

-5.9

-6.0

-6.1

-6.2

-6.3

-6.4

-6.5

-6.6

-6.7

-6.8

-6.9

-7.0

-7.1

-7.2

-7.3

-7.4

-7.5

-7.6

-7.7

-7.8

-7.9

-8.0

-8.1

-8.2

-8.3

-8.4

-8.5

-8.6

-8.7

-8.8

-8.9

-9.0

-9.1

-9.2

-9.3

-9.4

-9.5

-9.6

-9.7

-9.8

-9.9

-10.0

-10.1

-10.2

-10.3

-10.4

-10.5

-10.6

-10.7

-10.8

-10.9

-11.0

-11.1

-11.2

-11.3

-11.4

-11.5

-11.6

-11.7

-11.8

-11.9

-12.0

-12.1

-12.2

-12.3

-12.4

-12.5

-12.6

-12.7

-12.8

-12.9

-13.0

-13.1

-13.2

-13.3

-13.4

-13.5

-13.6

-13.7

-13.8

-13.9

-14.0

-14.1

-14.2

-14.3

-14.4

-14.5

-14.6

-14.7

-14.8

-14.9

-15.0

-15.1

-15.2

-15.3

-15.4

-15.5

-15.6

-15.7

-15.8

-15.9

-16.0

-16.1

-16.2

-16.3

-16.4

-16.5

-16.6

-16.7

-16.8

-16.9

-17.0

-17.1

-17.2

-17.3

-17.4

-17.5

-17.6

-17.7

-17.8

-17.9

-18.0

-18.1

-18.2

-18.3

-18.4

-18.5

-18.6

-18.7

-18.8

-18.9

-19.0

-19.1

-19.2

-19.3

-19.4

-19.5

-19.6

-19.7

-19.8

-19.9

-20.0

-20.1

-20.2

-20.3

-20.4

-20.5

-20.6

-20.7

-20.8

-20.9

-21.0

-21.1

-21.2

-21.3

-21.4

-21.5

-21.6

-21.7

-21.8

-21.9

-22.0

-22.1

-22.2

-22.3

-22.4

-22.5

-22.6

-22.7

-22.8

-22.9

-23.0

-23.1

-23.2

-23.3

-23.4

-23.5

-23.6

-23.7

-23.8

-23.9

-24.0

-24.1

-24.2

-24.3

-24.4

-24.5

-24.6

-24.7

-24.8

-24.9

-25.0

-25.1

-25.2

-25.3

-25.4

-25.5

-25.6

-25.7

-25.8

-25.9

-26.0

-26.1

-26.2

-26.3

-26.4

-26.5

-26.6

-26.7

-26.8

-26.9

-27.0

-27.1

-27.2

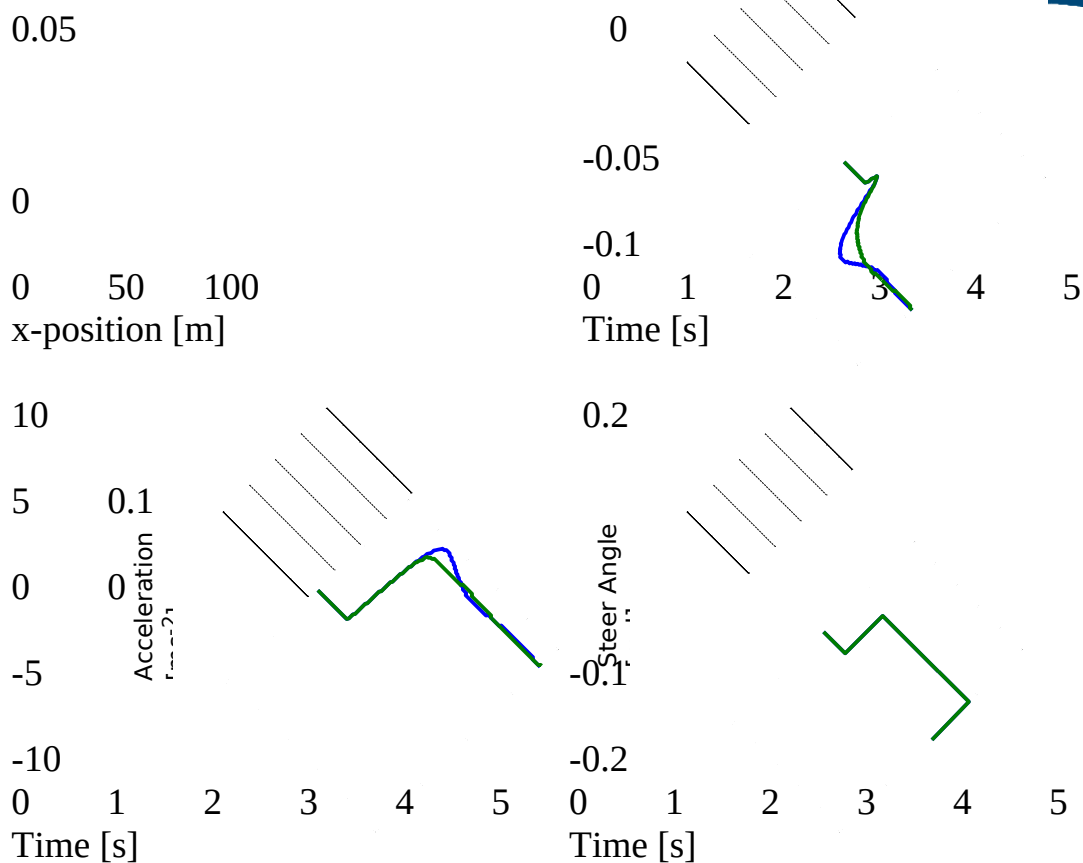
-27.3

-27.4

-27.5

-27.6

-2



Результаты теста  
Тестовый автомобиль

Рисунок 8. Переходная характеристика с открытым и управляемым eLSD

Испытания проводятся на автомобиле Volvo XC90 AWD 2,5T. Стандартный Haldex LSC был заменен на XWD на базе 4-го поколения. Крутящий момент eLSD составляет 2,4 кНм, что соответствует моменту пробуксовки одного заднего колеса.

#### Низко-мк

На испытательной площадке Haldex в Арьеплоге, Швеция, на поверхности с низким  $\mu$  выполняется множество маневров уклонения с целью проверки надежности и работы алгоритмов демпфирования рыскания. Маневры выполняются как с активными алгоритмами демпфирования рыскания, так и без них. Временной ряд для угла маховика и скорости рыскания, масштабированный с учетом фактической скорости автомобиля, представлен на рисунках 9 и 10. На этих диаграммах мы ясно видим преимущество масштабирования скорости рыскания с фактической скоростью автомобиля. Без этого временные ряды очень трудно сравнивать, поскольку амплитудная реакция скорости рыскания снижается со скоростью, несмотря на то, что

усиление рыскания может увеличиваться со скоростью автомобиля в этом диапазоне скоростей. В реальных тестах скорость демонстрирует (часто непреднамеренные) изменения от одного теста к другому и, таким образом, будет влиять на результаты больше, чем в случае масштабированного сигнала.

И все же проблема; как сделать выводы из этих временных рядов?

Предпринимается попытка создать

Диаграмма рассеяния результатов всех отдельных тестов представлена на рисунке 11. Основные расчеты заключаются в следующем. Сценарий Matlab автоматически находит первый и третий пик угла поворота маховика и бокового ускорения (скорости рыскания). Третий пик, который представляет собой возврат прямо, нормируется первым пиком, уровнем входа в маневр уклонения анализируемых трасс. Среднее значение этих нормализованных чисел при отключенной системе демпфирования рыскания будет точкой отсчета. Эта контрольная точка представлена на рисунке в виде перекрестия, например, среднее значение красных треугольников. Синие кружки представляют результаты с включенной системой демпфирования рыскания. Среднее значение в этом случае обозначено на той же диаграмме синим крестиком.



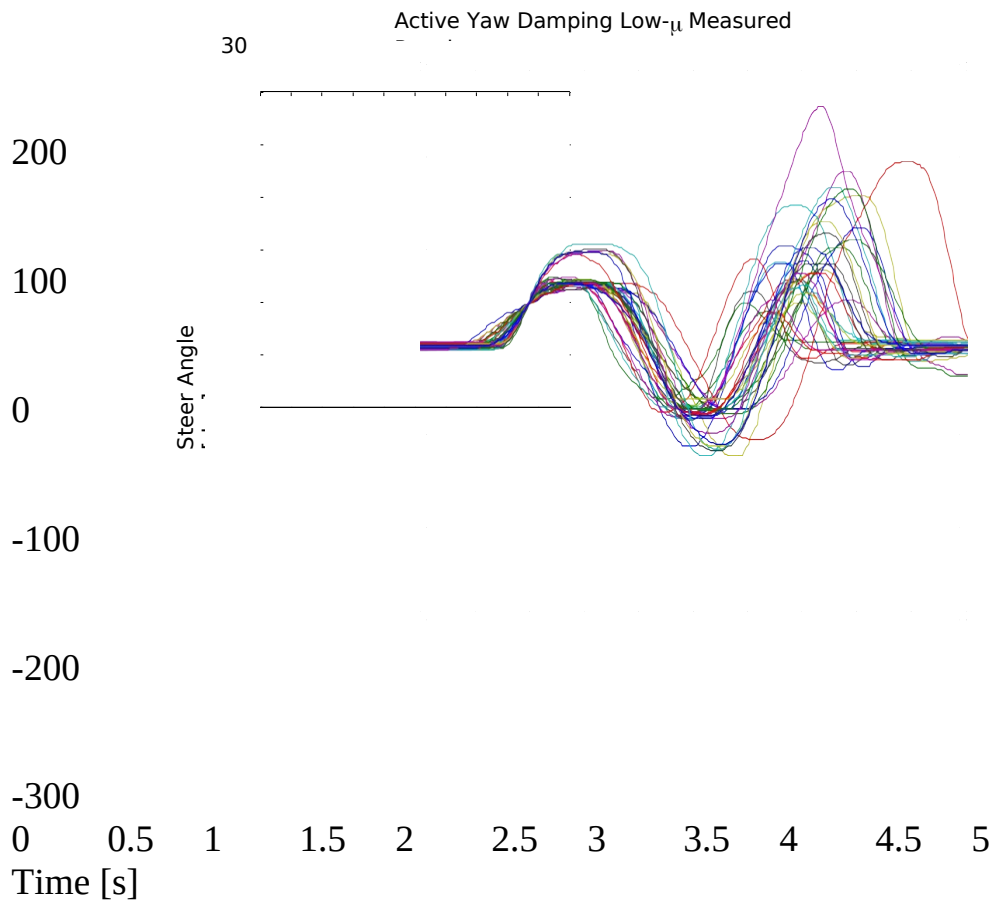
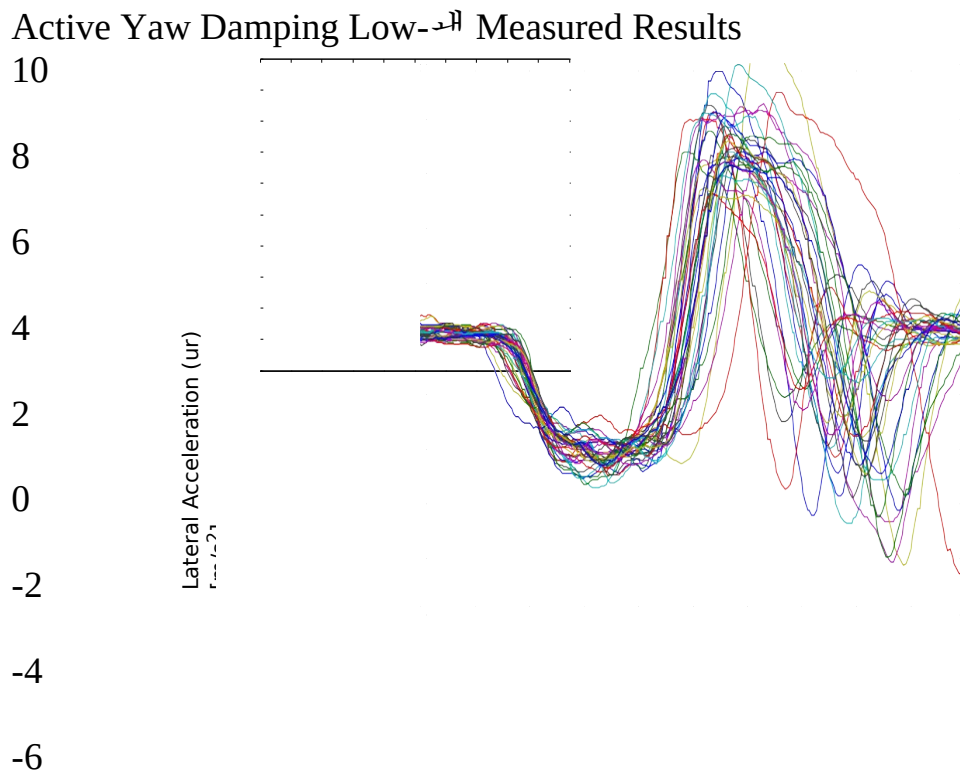


Figure 9 Time series for hand wheel angle



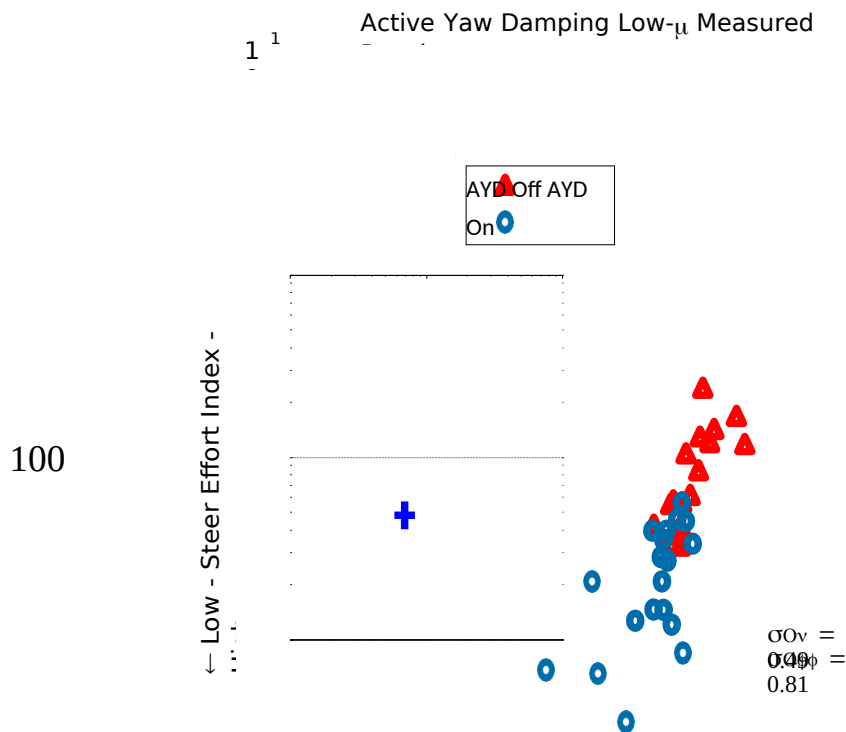
-8

-100 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5

Time [s]

Figure 10 Time series for yaw rate at low- $\mu$ 

Результатом является значительное улучшение устойчивости и усилия на рулевом управлении, поскольку обратная амплитуда рыскания меньше, а соответствующие поправки маховика тоже меньше. Цель алгоритмов — переместить результат в левый нижний угол, что и происходит. Обратите внимание на масштаб журнала, это измеримое улучшение.



10-1

10-1 100 101

Stable - Stability Index - Instable

Figure 11 Scatter plot for low- $\mu$  results

Высокий микро

На испытательном стенде Haldex в Люнгбюхеде, Швеция, проводятся испытания с высоким значением  $\mu$ . Подобные маневры выполняются, как и в Арьеплоге. Данные снова анализируются таким же образом и представляются на диаграмме рассеяния (см. Рисунок 12). Улучшение при высоких  $\mu$  оказывается еще большим.

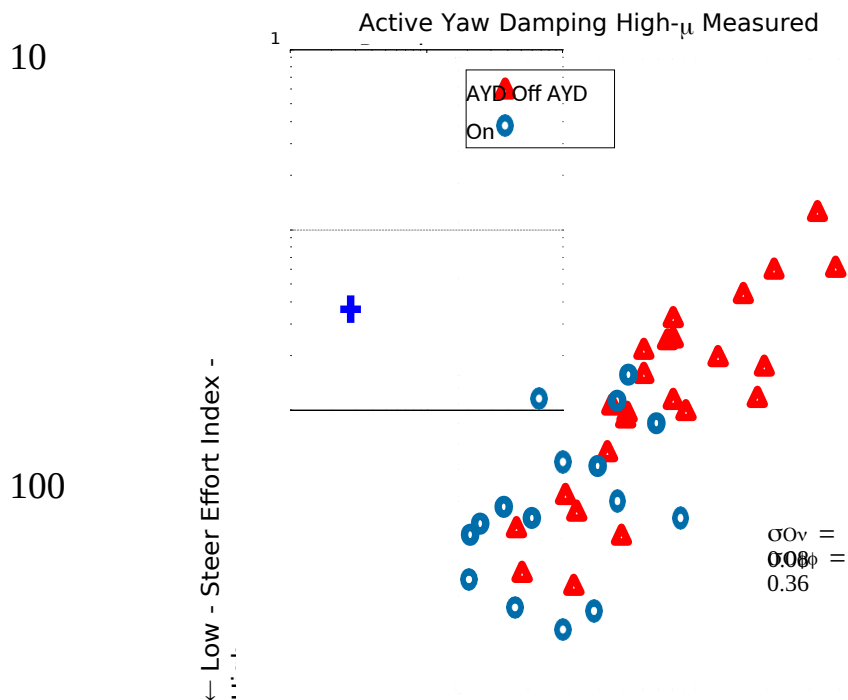
Зачем нужен этот анализ точечной диаграммы? Что ж, результаты с высоким  $\mu$  ясно показывают преимущество используемого метода. Одно измерение для каждого условия с включенной или выключенной системой может доказать, что система работает отлично, или доказать ее полный отказ. Существует результат с выключенной системой, который намного лучше, чем худший результат с включенной системой: полный отказ. С другой стороны, лучшая производительность при включенной системе невероятно лучше, чем худшая производительность при выключенной системе: выдающаяся производительность. Путем систематического анализа имеющихся данных измерений можно

Active Yaw Damping Low- $\mu$  Measured

<sup>1 1</sup>  
представить более реалистичное значение улучшения характеристик транспортного средства за счет алгоритмов демпфирования рыскания.

### Выводы

Эта презентация доказала преимущества безопасности XWD. Кратко упомянуты преимущества, связанные с тягой и управляемостью. В целом мы можем заключить, что Haldex XWD обеспечивает повышенную безопасность, увеличенный диапазон производительности и повышенную тяговую способность при разумной цене. Система XWD имеет хорошее соотношение затрат и выгод.



10-1

10-1 100 101

Stable - Stability Index - Instable

Figure 12 Scatter plot for high- $\mu$  results

### Рекомендации

1. Ханс Б. Пачейка, «Динамика шин и транспортных средств», ISBN 0-7506-5141-5.
2. Эдо Ф. Дрент, «AWD для усовершенствованного управления динамикой автомобиля», презентация Vehicle Dynamics Expo 2004, Штутгарт, Германия.

### Сокращения

Антиблокировочная тормозная система ABS

Полный привод AWD

Электронный блок управления ЭБУ

Электронная блокировка дифференциала EDS (Elektronische Differentialsperre) Электронный контроллер курсовой устойчивости ESC

Передний привод с передним приводом

Муфта повышенного трения LSC

Active Yaw Damping High- $\mu$  Measured  
Дифференциал <sup>1</sup>повышенного трения LSD  
ОЕМ-производитель оригинального оборудования  
PreX Предварительная оплата; Упреждающая система Haldex RWD  
Задний привод  
XWD перекрестный привод; комбинация электронного управления LSC  
и LSD AYD Active Yaw Damping