

Анализ на системите за странично наклоняване в превозните средства

Николай Павлов^{a)}, Диана Дацова^{b)}

*Факултет по транспорта, Технически университет - София, бул. „Кл. Охридски“ 8,
София 1756, България*

^{a)} npavlov@tu-sofia.bg

^{b)} ddacova@tu-sofia.bg

Резюме. Страничното наклоняване на транспортните средства позволява по-високи скорости при движение в завой, което води до намаляване на времето за пътуване. От друга страна, при наклоняването към центъра на завоя, намалява страничното ускорение, действащо върху пътниците. Това води до подобряване на комфорта при пътуване. Най-често срещаното приложение на превозните средства с наклоняема каросерия днес е в железопътния транспорт, но са създадени и пътни превозни средства, които следват същата стратегия. От тях по-разпространени са триколесните превозни средства, но нарастват тенденциите за използване на принципите на странично наклоняване и в четириколесните превозни средства с малка широчина, а също и в конвенционални автомобили. При автономните автомобили нарастват изискванията за комфорт и в тази връзка въпросът за използване на системи за наклоняване, които да компенсират до някаква степен страничните ускорения е особено актуален. В този доклад са разгледани системите, използвани за странично наклоняване в наземните релсови и пътни превозни средства.

ВЪВЕДЕНИЕ

При движение в завой, транспортните средства и пътниците в тях са подложени на действието на центробежната сила. Наклоняването на превозното средство към центъра на завоя води до намаляване на хоризонталната компонента на центробежната сила, действаща върху пътниците, превозното средство и пътя, като запазва комфорта при пътуване и позволява движение с по-висока скорост. При железопътни транспортни средства се намалява напречното натоварване между колелата и външната релса, както и нейното износване и износването на ребордите, а също и сигурността срещу дерайлиране [1].

Съществуват пасивни или активни системи за наклоняване на превозните средства. Когато наклоняването се извършва без внасяне на енергия отвън, а за сметка на центробежната сила при движение в завой (крива), системите за наклоняване се наричат пасивни. Активните системи извършват наклоняването принудително чрез внасяне на енергия отвън [1, 2].

Пасивните и активните системи за наклоняване отдавна се използват в железопътните транспортни средства, предназначени за високоскоростен пътнически транспорт. Последните години се забелязва тенденция за използване на системи за наклоняване при движение в завой и при пътните безрелсови превозни средства – три- и четириколесни автомобили с малка широчина. Такива системи се използват и при някои конвенционални автомобили, като надграждане на функциите на активното им окачване.

При навлизане на автономните автомобили, водачът няма нужда да следи пътната обстановка постоянно и при продължителни пътувания може да бъде зает с различни дейности. При възникване на конфликт във възприятията на различните сетивни системи се увеличава вероятността от поява на неприятни усещания и поява на симптоми на болестта на пътуване. Използването на системи за странично наклоняване компенсира странични ускорения и води до подобряване на комфорта.

Целта на този доклад е да се анализират системите за странично наклоняване в наземните превозни средства – релсови и безрелсови, техните предимства и недостатъци и необходимостта от използването и усъвършенстването им.

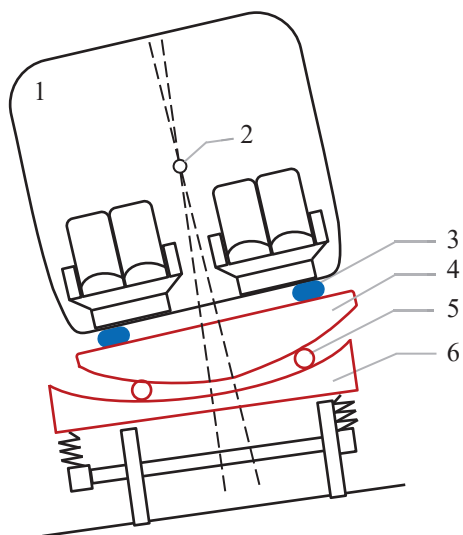
СИСТЕМИ ЗА НАКЛОНЯВАНЕ В ЖЕЛЕЗОПЪТНИЯ ТРАНСПОРТ

Наклоняването в сухопътни превозни средства за първи път се прилага в железопътните транспортни средства. Концепцията за наклоняемите влакове е разглеждана още от края на 30-те години на миналия век. През 1938 година Pullman построява първият наклонящ се вагон в експлоатация [3]. Кошът на тези вагони е поставен на високи пружинни опори, монтирани върху рамата на талигата така че масовият център на вагона е разположен под опорните точки. В резултат при движение в крива горната част на коша се наклонява навътре към центъра на завоя. Изпитанията на този вагон са показали добри резултати, но относителната сложност на конструкцията на талигите и окачването не са позволили широкото му разпространение [4].

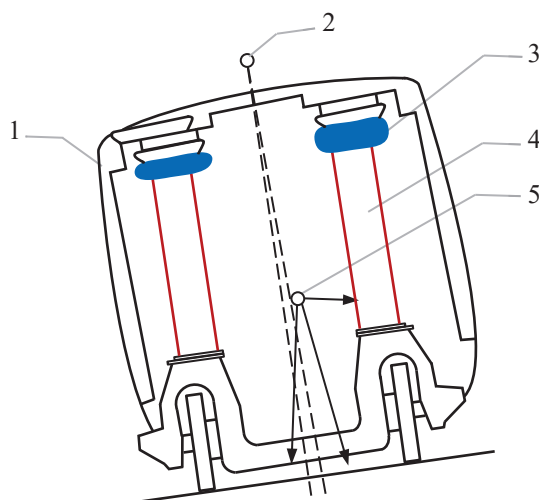
С развитието на технологиите пасивните системи (наричани още системи с естествено наклоняване) се усъвършенстват и навлизат в експлоатация в редица железопътни линии по света, а на по-късен етап се разработват и внедряват и активни системи за наклоняване.

Пасивни системи за наклоняване на коша

Първият серийно произвеждан влак с пасивна система за наклоняване на коша на вагоните е японският електрически мотрисен влак серия 381, пуснат в експлоатация през 1973 г. В тези влакове системата за наклоняване на коша се състои от надресорна греда на талигата (6) с монтирани върху нея опорни ролки (5), по които може да се премества долната греда (4), която има профил, наподобяващ кръгов сегмент (Фиг. 1). При преминаване на влака през крива, под въздействието на центробежната сила кошът се завърта около центъра на ротация (2), тъй като масовия център на вагона се намира по-ниско.



ФИГУРА 1. Конструкция на махална система за наклоняване: 1 – кош на вагона; 2 – център на ротация на коша; 3 – пневматични ресори; 4 – греда; 5 – ролки; 6 – надресорна греда на талигата [адаптирана от 5].



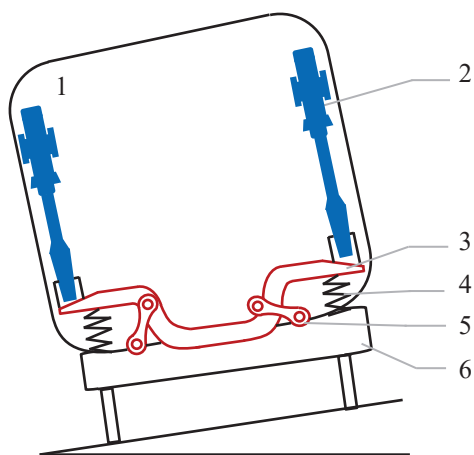
ФИГУРА 2. Конструкция на системата Talgo Pendular: 1 – кош на вагона; 2 – център на ротация на коша; 3 – пневматични ресори; 4 – колони (опорни); 5 – масов център на вагона [адаптирана от <https://www.trains.com/tm/train-basics/ask-trains/talgo-speed-comparison/>].

От 1980 г. е в експлоатация испанският наклоняем влак Talgo Pendular (от исп. péndulo – махало) (Фиг. 2). Пасивният наклон на коша (1) се осъществява като пневматичните еластични елементи (3), на които е окачен се намират в горната част на вагона и равнината на окачването е разположена по-високо от масовия център на коша на вагона (5). При преминаване през крива в масовия център на коша действа центробежната сила и го наклонява на някакъв ъгъл, зависещ от страничното ускорение. Тази система осигурява оптимален ъгъл на наклона на коша до $3,5^\circ$ в зависимост от скоростта на движение и плана на пътя. Влаковете Talgo могат да развият скорост с около 20% по-висока от тази на конвенционалните влакове, при странично ускорение в равнината на пътя $1,6 \text{ m/s}^2$.

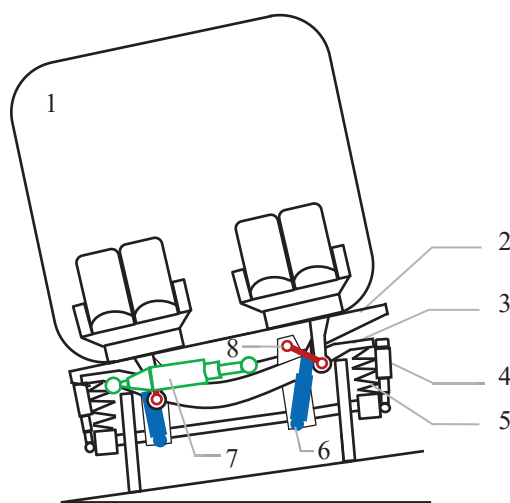
Пасивните системи позволяват максимални наклонявания до $4\text{-}5^\circ$ и преминаване на кривите с до около 20% по-високи скорости [2]. Недостатък на тези системи е забавяне на наклоняването на коша при влизане на вагона в крива [4].

Активни системи за наклоняване на коша

След дълъг период на развитие и независими разработки на прототипи на активни системи за наклоняване от много световни компании, включващ прототипи както на системи за наклоняване на коша, така и системи за наклоняване на седалките през 1969 г. Fiat разработва първия работещ прототип на системата Pendolino, която развива и от 1988 г. е въведена в редовна експлоатация при високоскоростните влакове ETR 450 (Фиг. 3). В конструкцията се използва U-образна надресорна греда на талигата (3) (с червен цвят) са монтирани винтови пружини на централната степен на окачването (4), а коша на вагона е окачен към нея на наклонени подвески (5). Вертикални хидравлични цилиндри (2) са монтирани на надресорната греда, а горния им край е монтиран към горния край на коша на вагона (1). При разтягане на хидроцилиндъра от едната страна и свиване на този от другата коша се завърта спрямо надлъжната си ос. Недостатък на тази система е, че заема голямо пространство в коша на вагона. В следващите поколения на влаковете Pendolino хидроцилиндриите са монтирани под пода на вагона (Фиг. 4). Ресорното окачване е изпълнено чрез цилиндрични пружини Flexicoil (5), поддържащи надресорната греда (3). Към тази греда на 4 подвески (8) е окачена напречната греда на коша (2), който може да се наклонява в двете страни с помощта на хидравличните цилиндри (6). На талигите са монтирани пневматични цилиндри (7), чиито бутални пръти са съединени с надресорната греда и могат да преместват коша спрямо талигата в хоризонтално направление. Чрез електронно управляващ блок се осигурява центрирането на коша на вагона спрямо талигата от пневматичните цилиндри (7) и наклона на горната част на коша навътре към центъра на кривата с помощта на хидравличните цилиндри (6). Големината на ъгъла на наклона и хоризонталното преместване се задава от централен процесор, който на база на сигналите от акселерометри, жирокопи и тахометри (намиращи се на няколко от талигите на влака), изчислява скоростта на движение и непогасеното ускорение. Процесори, разположени във вагоните управляват наклона на всеки един вагон, което се осъществява при следните условия: 1) определяне мястото на прехода от прав участък в крива и отново в права и определяне радиуса на кривата; 2) скорост на движение над 70 km/h; 3) недостатъчно надвишение на външната релса; 4) некомпенсирано (непогасено) напречно ускорение над допустимото [4, 6, 7].



ФИГУРА 3. Конструкция на системата Pendolino, ETR 450: 1 – кош на вагона; 2 – хидравлични цилиндри; 3 – надресорна греда на талигата; 4 – пружини на централната степен на окачване; 5 – наклонени подвески; 6 – рама на талигата [адаптирана от 4, 6].



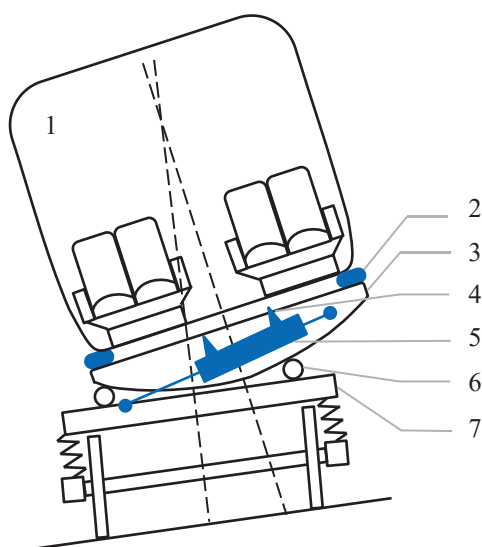
ФИГУРА 4. Конструкция на системата Pendolino, ETR 460 (Fiat Ferrovie): 1 – кош на вагона 2 – напречна греда на коша; 3 – надресорна греда; 4 – вертикален хидравличен амортизатор на централната степен на окачването; 5 – цилиндрични пружини; 6 – хидравлични цилиндри; 7 – пневматичен цилиндър; 8 – наклонени подвески [адаптирана от 4, 7].

Активната система за наклоняване на коша на вагоните, разработена от фирма Adtranze част от концерн Bombardier и използвана във влаковете X2000 е близка по конструкция до системата Pendolino. При тези влакове локомотива не се наклонява. Механизмите за наклоняване на коша на вагоните се управляват с помощта на сензори за напречно ускорение, монтирани на първата талига. Като се вземат предвид и данните за скоростта на движение, с помощта на компютър се изчислява ъгъла, на който е

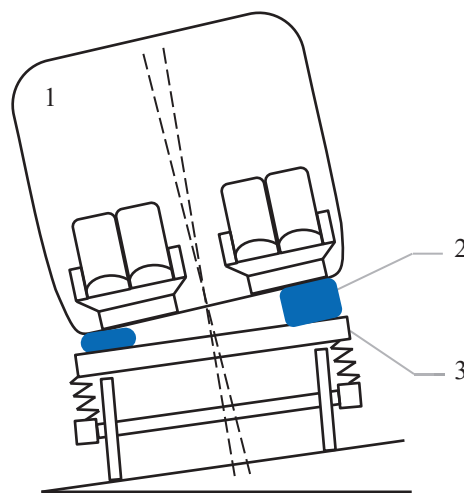
необходимо да се наклони коша на всеки вагон. Най-големият ъгъл на наклон е до $6,5^\circ$, а максималната скорост на наклоняване $4^{\circ}/s$ [4].

Система, показана на Фиг. 5 е разработена в Япония и се състои от пневматичен цилиндър, използван като задвижващ елемент за осъществяване на наклоняване. Кошът на вагона (1) лежи върху пневматични еластични елементи (въздушни възглавници) (2), а те от своя страна са върху наклонящата се гредата (3). Гредата е монтирана на ролки (6), които позволяват на коша да се завърта в желаната позиция на наклоняване. Системата използва един и същ източник на енергия с пневматичната спираща система. Предимствата на тази система са нейната компактност, лесна поддръжка и ниска себестойност. Недостатък на тази система, както и на системата от Фиг. 1, е това че наклонящата гредата лежи върху ролки, при което има по-високо ниво на предаваните вибрации от талигата към коша на вагона в сравнение с други системи за наклоняване, което влошава комфорта на пътниците [7].

В по-новите разработки на японските влакове Shinkansen от серии 700, N700, E5, E6 се използват системи, при които пневматичните еластични елементи на централната степен на окачването извършват наклоняването на коша на вагона. При тези системи (Фиг. 6) максималното възможно наклоняване е до 1° [8, 9]. Въпреки малкия наклон, на линиите Tokaido Shinkansen (с минимален радиус на кривите 2 500 m) и Sanyo Shinkansen (с минимален радиус 4 000 m), се постига 10-15% повишаване на максималната скорост на преминаване в кривите [4, 8, 10].



ФИГУРА 5. Активна система за наклоняване с пневматичен цилиндър: 1 – кош на вагона; 2 – пневматични еластични елементи; 3 – наклоняща гредата; 4 – състен въздух; 5 – въздушен цилиндър, контролиращ наклоняването на коша; 6 – ролка; 7 – рама на талигата [адаптирана от 7].



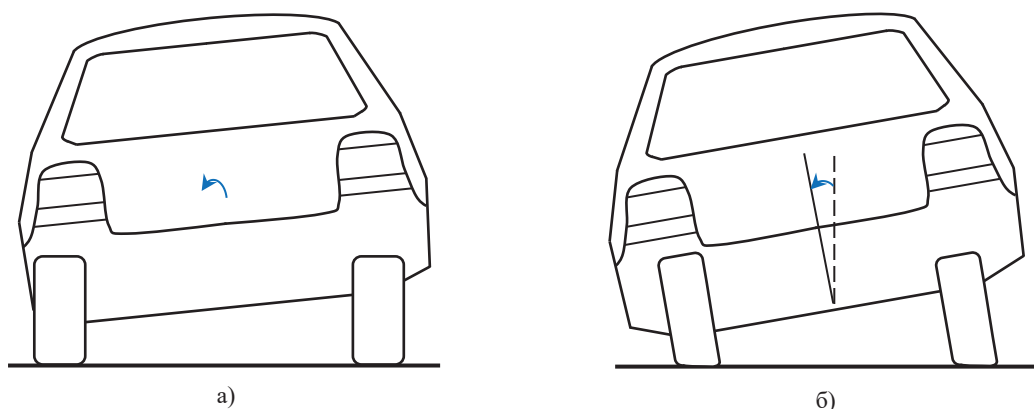
ФИГУРА 6. Активна система за наклоняване, посредством изменение на налягането в пневматичните еластични елементи на централното ресорно окачване: 1 – кош на вагона 2 – пневматични еластични елементи; 3 – рама на талигата [адаптирана от https://web-japan.org/trends/09_sci-tech/sci101209.html].

СИСТЕМИ ЗА НАКЛОНЯВАНЕ ПРИ ПЪТНИТЕ ТРАНСПОРТНИ СРЕДСТВА

При пътните превозни средства идеята за използване на принципа на наклоняване се заражда през 60-те години на миналия век. При леките автомобили тогава се предлагат някои разработки на активни окачвания, които да намалят или елиминират ъгъла на крен (наклон към външната страна на завоя) при криволинейно движение. Тъй като леките автомобили имат относително нисък масов център спрямо тяхната ширина и при движение в завой при тях критичната скорост на плъзгане е по-ниска от критичната скорост на преобръщане, разработките в това направление не добиват популярност. През 60-те години се появяват няколко вида превозни средства с малка ширина, които имат възможност за наклоняване на голям ъгъл към центъра на завоя и по този начин пътниците и водача изпитват по-ниски странични ускорения и се подобрява устойчивостта срещу преобръщане. От средата на 70-те години на миналия век интересът към този тип превозни средства изчезва, докато през 1990 година авторите на [11] изтъкват ползите, които малките тесни превозни средства могат да предложат за облекчаване на

задръстванията по пътищата и проблемите с паркирането на автомобилите [12]. Съществуват две конструктивни решения за малки тесни превозни средства – триколесни и четириколесни.

Триколесните превозни средства или триколките имат по-добра статична устойчивост от двуколесните (мотоциклети и мотопеди), но по-лоша динамична устойчивост при движение в завой. Това се дължи на факта, че те обикновено са с по-гясна колея (следа) и имат относително висок масов център. За подобряване на устойчивостта, триколесните превозни средства могат да бъдат снабдени със система, която да наклонява превозното средство [13, 14]. При някои системи се наклонява само корпусът на каросерията докато шасито все още действа като фиксирана основа като тези в конвенционалните автомобили, а при други се наклонява не само пътническата кабина, но и шасито и колелата (Фиг. 7) [13]. Наклоняването може да се извършва от водача както при мотоциклетите или автоматично [15]. По този начин е възможно да се конструират превозни средства, които съчетават типичните предимства на мотоциклети (добро управление в условия на тежък трафик, ниска заетост на пътя, лекота на паркиране) с тези на автомобилите (лекота на шофиране, активна и пасивна безопасност, защита на пътниците и водача от атмосферните влияния, проблем с липса на равновесие при чести спирания и др.) [16].



ФИГУРА 7. Принципи на наклоняване на пътно транспортно средство:

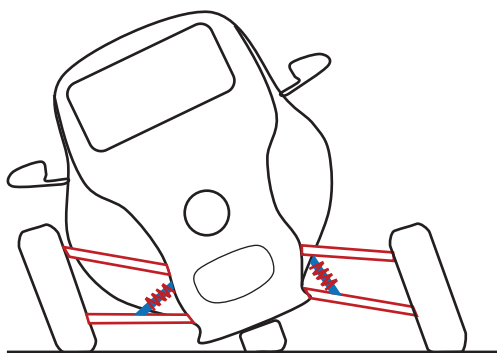
а) наклоняване само на каросерията; б) наклоняване на цялата конструкция [адаптирана от 13].

И тук, както при железопътните транспортни средства, системите за наклоняване могат да бъдат с пасивно или активно наклоняване. През 70-те години на миналия век General Motors представят триколесно превозно средство, наречено *Lean Machine*, с ненаклоняваща се задна част където е разположен двигателя и модула, върху който се осъществява завъртане на каросерията. Това не е автоматично наклоняващо се превозно средство и водачът контролира ъгъла на наклон. Недостатък на *Lean Machine* е фактът, че значителна част от теглото на превозното средство не се наклонява, също така и ръчното управление от водача на задвижващия механизъм за наклоняване, което изисква той да има придобити умения [12, 17].

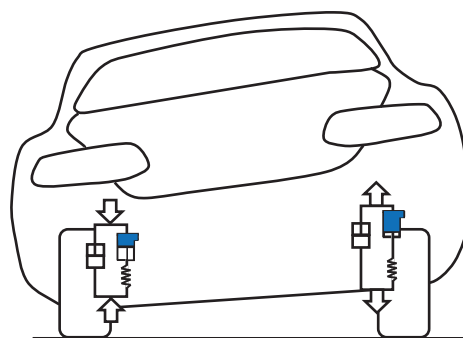
През 1994 г. в Нидерландия е разработена *Dynamic Vehicle Control (DVC)* система, която се използва в триколесното превозно средство *Carver One* (произвеждан до 2009 г.). Предното колело и каросерията се наклоняват, контролирани от активна хидравлична система. Силовото предаване е поставено между двете задни колела като не се наклонява и следователно има подобни динамични изисквания като тези на конвенционален автомобил. Това означава, че задната ненаклоняема част трябва да е сравнително широка с нисък масов център, така че да не се преобръща [18]. Системата автоматично регулира ъгъла на наклон на каросерията спрямо скоростта и ускорението на автомобила и позволява наклоняване още в началото на влизане в завоя. Хидравличният механизъм позволява наклоняване на каросерията до 45°, като осигурява устойчивост срещу преобръщане на превозното средство при движение в завой [<http://www.carver-technology.nl/technology.html>]. Максималната скорост на наклоняване е 82°/s, което е важна характеристика, особено в ситуация на последователна смяна на завоите или на лентите за движение (шкан, змейка). Функцията за наклоняване работи в целия диапазон от 10–180 km/h, като последната скорост е максималната скорост на триколесното превозно средство [19].

През 1997 г. Mercedes-Benz представят концептуално триколесно пътно превозно средство *F300 Life Jet* (Фиг. 8), което е с активна система за контрол на наклона (*Active Tilt Control*), също използваща хидравличен задвижващ механизъм. Активната система изчислява ъгъла на наклон в зависимост от скоростта на автомобила, страничното ускорение, ъгъла на завиване и отклонението, така че по всяко време ъгълът на каросерията да съответства на действителната ситуация на движение. Изпълнителният механизъм представлява хидравличен цилиндър, монтиран на предната ос. Той въздейства върху една от

двете пружинни опори, премествайки я навън, така че колелото и каросерията да заемат ъгъла на наклон, установен от компютъра, чиято максимална стойност е 30° . Пневматичните гуми на F300 Life Jet са специално разработени и позволяват голям страничен наклон на колелата и ъгли на странично увличане [<https://group-media.mercedes-benz.com/>].



ФИГУРА 8. Система за активно наклоняване на F300 Life Jet [адаптирана от <https://group-media.mercedes-benz.com/>].



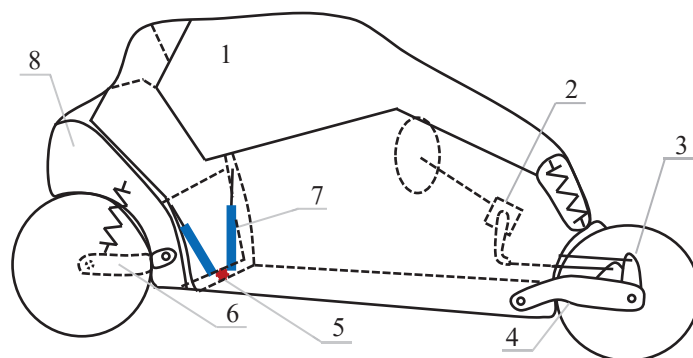
ФИГУРА 9. Система Active Body Control за активно наклоняване на лек автомобил Mercedes S-Class Coupé [адаптирана от <https://group-media.mercedes-benz.com/>].

Система за наклоняване само на каросерията е използвана и при проекта Clever (2006), разработен в университета в Бат, Англия. Clever (Compact Low Emission Vehicle for Urban Transport Vehicle) е триколесно превозно средство, което разполага с място за водач и един пътник зад него, наклоняща се каросерия и двуколесен заден модул на двигателя (Фиг. 10). Превозното средство е оборудвано със система за директно управление на наклона (Direct Tilt Control System), при която два хидравлични цилиндъра завъртат каросерията върху ненаклонящия се заден модул. Наклоняването на каросерията е до 45° наляво или надясно, променяйки масовия ѝ център, като я предпазва от преобръщане [20]. Според [21] тази система осигурява задоволителна устойчива работа, но ограничена устойчивост при преходни процеси. Изискванията за високи скорости на наклоняване, свързани с бързи завъртания на кормилното колело, биха довели до прилагане на големи наклонящи моменти към ненаклонящия се заден модул на двигателя. Това може да доведе до повдигане на вътрешното колело и преобръщане на автомобила. За да се подобри устойчивостта при преходни условия, прототипът Clever от 2012 г. е оборудван с активна кормилна система, което позволява използването на комбинирана стратегия за директно управление на наклона (Steering Direct Tilt Control).

През 2008 г., производителят Lumeneo представя Smera – ултра компактен четириколесен електромобил (произвеждан до 2013 г.). Концептуалното превозно средство е двуместен наклоняем автомобил с ъгъл на наклон в завой до 20° . Системата за директно управление на наклона определя оптималния ъгъл в зависимост от динамичните параметри на автомобила, радиусите на завоя, избрания режим на шофиране и пътните условия. Чрез постоянен ток серводвигател, управляван автоматично едновременно се наклоняват каросерията и 4-те колела [http://www.lumeneo.fr/smera_technical_specifications_eng.php].

Land Glider (2009) е четириколесен наклоняем електромобил, концепция на Nissan. Активната система за контрол на хода на окачването наклонява двуместното превозно средство до 17° в завой [22].

Системата за наклоняване в завой на Mercedes, приложена в модела S-Class Coupé (2014) е първата за автомобили серийно производство. Четириколесният автомобил, оборудван с активно окачване (Active Body Control), чрез хидравлични цилиндри или „бутала“, монтирани на опорите на окачването, регулират силите във всяка опора поотделно (Фиг. 9). В зависимост от завоя, основната точка на всяка опора се премества, позволявайки на автомобила да се наклони към центъра на завоя на ъгъл до $2,5^\circ$, като наклона се регулира автоматично и непрекъснато в зависимост от информацията от сензори. Видеокамера, монтирана на предното стъкло, следи профила на пътя и регистрира предстоящия завой на разстояние 15 m и чрез информация за страничното ускорение, скоростта и ъгъла на завиване, осигуряват наклоняване на автомобила към центъра на завоя [<https://group-media.mercedes-benz.com/>].



ФИГУРА 10. Схематично представяне на основните компоненти на Clever: 1 – наклонява се каросерия; 2 – редуктор на кормилното управление; 3 – централен кормилен механизъм на главината; 4 – предно люлесещо се рамо; 5 – цилиндричен шарнир; 6 – задно раменно окачване; 7 – хидравличен цилиндър; 8 – заден ненаклоняващ се модул [адаптирана от 23].

През последните години, активните системи за наклоняване представляват интерес и за производителите на мотоциклети, които разработват три- или четириколесни варианти. Превозните средства, предлагани от швейцарския производител Quadro (Qooder SA), са оборудвани с хидравлична система на наклоняване (Hydraulic Tilting System). Тя позволява всички колела да се наклоняват едновременно до 45° в завои, като по този начин се гарантира плавно и устойчиво движение, дори и при неблагоприятни пътни условия [<https://www.qooder.com/>].

Напоследък е актуален въпросът относно необходимостта от системи за наклоняване при навлизане на автомобилите с автономно управление. Докато при конвенционалния автомобил, водачът има нужда от обратна връзка, проявяваща се освен във визуални и слухови възприятия, също така и в тактилни усещания и възприятия за надлъжните и страничните ускорения, получавани предимно от вестибуларния апарат, то при автономните автомобили няма нужда от такава обратна връзка. Нещо повече – водачът, който е изключен от процеса на управление на автомобила за продължително време може да се земе с други дейности като например четене на книга, работа с компютър и др. и по този начин големите стойности на ускорението биха намалили нивото на комфорт. Това налага необходимостта от използване на система за странично наклоняване, която би могла поне да компенсира умерени странични ускорения от 1 до 2 m/s^2 , което изисква ъгъл на наклоняване от 6 до 12° и може да бъде постигнато чрез наклоняване на каросерията или на седалките или и двете. За да се компенсира надлъжното ускорение в специфичния диапазон, характерен за ускоряване и спиране на автомобила е необходим повече от два пъти по-голям ход на изпълнителните механизми на системата за наклоняване, спрямо максималния ход на окачването на съвременните автомобили. Това означава, че компенсиране на надлъжните ускорения не може да се осъществи без да се използва наклоняване на седалките около напречната им ос (самостоятелно или в комбинация с надлъжно наклоняване на каросерията). Не така стои въпросът с ъгловите ускорения около вертикалната ос при влизане и излизане от завои. Дори и с визуално отделяне, ъгловото ускорение, което се възприема чрез вестибуларния апарат, може да предизвика дискомфорт. Това е така, защото за разлика от надлъжните и напречните ускорения, то не може да бъде компенсирано, тъй като каросерията на автомобила трябва да следва траекторията на движението му. Освен това, страничното или надлъжното наклоняване са съпроводени с ъгови скорости и ускорения, съответно около надлъжната и напречната ос, които до някаква степен също влошават комфорта и при проектиране на такива системи трябва да се контролират стойностите и на тези величини [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада са разгледани системите за странично наклоняване в наземните превозни средства – релсови и безрелсови. Разгледани са принципите на наклоняване – пасивни и активни, техните предимства и недостатъци. Обоснована е необходимостта от използване на системи за странично наклоняване при пътните превозни средства с малка ширина – три- и четириколесни, както и навлизането на такива системи в конструкциите на конвенционалните пълноразмерни леки автомобили. Във връзка с нарастващите изисквания за комфорт е разгледана и необходимостта от използване на системи за странично наклоняване при автономните автомобили. Дискутирани са възможностите за използване на различни конструктивни решения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Доклада е резултат от работата по договор № 202ПД0022-04, научен проект, финансиран от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2020 „В помощ на докторанти“ на тема: „Проектиране, изработване и изследване на автомобилна детска седалка, наклоняща се в завой“.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. Ружиков, Ц. Пенчев и Е. Димитров, *Теория и конструиране на железопътна техника* (ВТУ „Т. Каблешков“, София, 2011), стр. 396.
2. О. Кръстев и К. Велков, *Тягов релсов състав* (Технически университет - София, 2014), стр. 215.
3. R. Persson, R. M. Goodall and K. Sasaki, “Carbody Tilting - technologies and benefits”, in *Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* **47**, Issue 8: State of the Art Papers of the 21st IAVSD Symposium, pp. 949–981 (2009).
4. И. П. Киселев (ред.), *Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс*. Том 2 (ФГБОУ „УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте“, Москва, 2014), стр. 371.
5. S. Koizumi, “Advance in railway vehicle technology and future prospects mainly in relation to bogie”, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report* **105**, pp. 11–18 (2013).
6. E. Alessandro, “Le Pendolino et le réseau ferré suisse”, *Ingénieurs et Architectes Suisses* **3**, pp. 18–24 (1990).
7. A. O. Darlton, M. Marinov, “Suitability of tilting technology to the Tyne and Wear Metro system”, *Urban Rail Transit* **1**, pp. 47–68 (2015).
8. M. Ueno, S. Usui, H. Tanaka, A. Watanabe, “Technological overview of the next generation Shinkansen high-speed train Series N700”, Central Japan Railway Company, Tokyo, (2008).
9. Y. Nakakura and K. Hayakawa, “The body inclining system of the series N700 Shinkansen”, in *Proceedings of International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009 (STECH'09)*, Niigata, Japan, 2009.
10. Sirong Yi, “Calculation method for minimum curve radius of high-speed railways”, in *Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment. Theory and Practice* (Elsevier, 2018).
11. W. L. Garrison, M. E. Pitstick, “Lean vehicles: Strategies for introduction emphasizing adjustments to parking and road facilities”, *SAE Technical Paper* 901485, p. 19 (1990).
12. R. Hibbard, D. Karnopp, “Twenty first century transportation system solutions - a new type of small, relatively tall and narrow active tilting commuter vehicle”, in *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* **25**(5), pp. 321–347 (1996).
13. Ch. Tang, A. Khajepour, *Narrow Tilting Vehicles. Mechanism, Dynamics, and Control* (Morgan & Claypool, 2019), p. 75.
14. J. J. Antony, K. Jayabal, “Rollover dynamics of a narrow tilting three-wheeled vehicle”, *MATEC Web of Conferences* **51**, 01002 (2016).
15. D. Dacova, N. Pavlov, “Lateral tilting in road vehicles - a review”, *International Scientific Journal “Trans Motauto World”* **5**(4), pp. 119–120 (2020).
16. G. Genta, L. Morello, *The Automotive Chassis. Volume 2: System Design*, 2nd ed. (Springer, 2020), p. 980.
17. S. Kidane et al., “Development and experimental evaluation of a tilt stability control system for narrow commuter vehicles”, in *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **18**(6), pp. 1266–1279 (2010).
18. F. Will, J. N. Davidson, P. Couchman and D. Bednall, “Tomorrow’s car – for today’s people: can tilting three wheeled vehicles be a solution for the problems of today and the future?”, *SAE International Journal of Engines*, pp. 1–14 (2011).
19. C. R. van den Brink, H. M. Kroonen, P. van den Brink, A. van den Brink, “Slender comfort vehicles: offering the best of both worlds”, *Auto Technology* **1**, pp. 56–59 (2004).
20. W. Knight, “CLEVER three-wheeler takes corners at full tilt”, (2006) available on: <https://www.newscientist.com/article/dn9053-clever-three-wheeler-takes-corners-at-full-tilt/>
21. J. W. Robertson, “Active Control of Narrow Tilting Vehicle Dynamics”, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, p. 183 (2014).
22. M. Gauthier, “Nissan Land Glider Concept Highlighted for Tokyo Motor Show”, (2009) available on: <https://www.motor1.com/news/18029/nissan-land-glider-concept-highlighted-for-tokyo-motor-show/>
23. J. Berote, J. Darling and A. Plummer, “Lateral dynamics simulations of a three-wheeled tilting vehicle”, in *Proc. IMechE Part D: Journal of Automobile Engineering* **229**(3), pp. 342–356 (2015).
24. H. Winner, W. Wachenfeld, “Effects of autonomous driving on the vehicle concept”, in *Autonomous Driving. Technical, Legal and Social Aspects* (Springer, 2016), edited by M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, H. Winner, pp. 255–275.

Analysis of Lateral Tilting Systems in Vehicles

Nikolay Pavlov^{a)}, Diana Dacova^{b)}

Faculty of Transport, Technical University of Sofia, 8 Kl. Ohridski Blvd, 1756 Sofia, Bulgaria

^{a)} Corresponding author: npavlov@tu-sofia.bg

^{b)} ddacova@tu-sofia.bg

Abstract. The lateral tilting of vehicles allows higher speeds when cornering, which reduces travel time. On the other hand, when tilting towards the center of the turn it reduces the lateral acceleration acting on the passengers. It results in improved travel comfort. The most common application of tilt body vehicles today is in rail transport, but road vehicles have also been created that follow the same strategy. Of these, three-wheeled vehicles are more common, but there is a growing tendency to use side-tilt principles in narrow-width four-wheeled vehicles as well as conventional cars. With autonomous cars, comfort requirements are increasing, and in this regard, the question of using tilting systems to compensate to some extent for lateral accelerations is particularly relevant. This report examines the systems used for lateral tilting in surface rail and road vehicles.