

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА СИСТЕМИ ЗА НАКЛОНЯВАНЕ НА КОША НА ПЖПС. ОЦЕНКА НА ВЪЗМОЖНОСТТА ЗА ВГРАЖДАНЕТО ИМ В МЕТРОВЛАКОВЕ.

Николай Додев

nikolaydodev@gmail.com

**ВТУ “Тодор Каблешков”, докторант
София 1574, ул. „Гео Милев” №158,
БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: системи за наклоняване на коша, акселерометри, сензори, вписване в криви, комфорт на пътниците

Резюме: Докладът засяга съществуващите системи за наклоняване на коша на подвижния железопътен състав (ПЖПС). Основен акцент в доклада е сравнителният анализ на тези системи, техните конструктивни особености, начини за управлението им, подходите за реализация, ефективност, възможността за приложението им в метровлакове и други. На база на разгледаните системи са направени съответните изводи и оценки на възможността подобни системи да се вградят в метровлаковете, намиращи се в експлоатация в България.

Непогасеното напречно ускорение по отношение на пътя представлява измерител на пълното хоризонтално натоварване, което се предава от ходовата част на ПЖПС върху железния път, а също така това ускорение характеризира комфорта на пътниците [1].

Комфортът при движението на ПЖПС в криви с относително висока скорост е един от основните параметри, засягащ пътниците. Този параметър непрекъснато бива подобряван през годините, като се използват различни видове механични, хидравлични и пневматични устройства. Като в допълнение е нужно да се обърне внимание и на усещането за вибрации у пътниците в определен честотен диапазон [2].

Последните разработки в областта на активното окачване позволяват вграждането на системи, които подобряват комфорта, използвайки сензори, електронни блокове за управление и задвижвания. Такива са съвременните системи за наклоняване на коша на возилото.

Системите за наклоняване на коша се възползват от факта, че скоростта при движение на возилото в криви по принцип е ограничена от изискванията за комфорт на пътниците, а не от напречните сили, натоварващи железния път или от риска за преобръщане, въпреки че тези ограничения не бива да се пренебрегват. Наклоняването на коша на возилото при движението му в криви намалява напречното ускорение, на което са подложени пътниците, което позволява увеличаване на скоростта и дава възможност да се използват различни експлоатационни предимства. Принципиите на работа и основните зависимости, свързани с наклоняването на коша, са относително прости и ще бъдат описани по начин, който набляга върху експлоатационните предимства.

1. Изходни сведения, концепция и зависимости

При проектирането на системите за наклоняване на коша първоначално трябва да се решат два проблема. Първият е какъв максимален ъгъл на наклон на коша по отношение на пътя да се постигне, решение, което зависи от механичната конструкция на возилото, особено като се вземат предвид и проблемите, свързани с вписването на возилото в габаритна рамка. Вторият проблем е какъв „недостиг на надвишение“ трябва да изпитват пътниците при движение на возилото в крива с постоянен радиус (θ_{active}), което е то първостепенна важност за комфорта. Имайки решенията на тези два проблема и стойността на „недостига на надвишение“ при пасивните системи (без наклоняване на коша) ($\theta_{passive}$), е възможно да съставим уравнението (1), характеризиращо увеличаването на скоростта при използване на системи за наклоняване на коша [2]. Трябва да се отбележи, че въпреки че радиусът на кривата и ускорението в следствие от гравитацията се появяват в основните зависимости за напречното ускорение, те изчезват при уравненията, отчитащи увеличаването на скоростта в процентно или пропорционално отношение.

$$(1) \Delta V_{\%} = \frac{V_{active} - V_{passive}}{V_{passive}} = \left\{ \frac{\sin(\theta_{cant} + \theta_{tilt} + \theta_{active})}{\sin(\theta_{cant} + \theta_{passive})} - 1 \right\} \times 100\%$$

където:

V_{active} – скорост на движение в крива на возила със система за наклоняване на коша;

$V_{passive}$ – скорост на движение в крива на возила без система за наклоняване на коша;

θ_{cant} – ъгъл на напречния наклон на железния път в кривата.

Въпреки че по принцип „недостига на надвишение“ може напълно да се компенсира чрез наклоняване на коша, т.е. да стане $\theta_{active} = 0$, на практика това не е разумно нито от експлоатационна гледна точка, нито от гледна точка на комфорта. Тогава е възможно да се въведе „коефициента на компенсация на недостига на надвишение“ (K_{CD}), важен конструктивен параметър в блока за управление на наклоняването на коша [2].

$$(2) K_{CD} = 1 - \frac{\theta_{active}}{(\theta_{active} + \theta_{tilt})} \text{ или } \frac{\theta_{tilt}}{\theta_{active} + \theta_{tilt}}$$

Да вземем предвид крива с напречен наклон на релсовия път от $\theta_{cant} = 6^\circ$. При движение на влак без система за наклоняване на коша с такава скорост, че пътниците да не изпитват напречни ускорения, то тогава казваме, че е приложен „недостиг на надвишение“ от 6° . Или с други думи понятието „недостиг на надвишение“ е стойността на надвишението или напречен наклон на возилото, която е нужна да се добави, за да се елиминира центробежното ускорение, изпитвано от пътниците. Прилагайки наклоняване на коша от $\theta_{tilt} = 9^\circ$ при недостиг на надвишение от $\theta_{active} = 6^\circ$, горните уравнения дават увеличение на скоростта от 32% и коефициент на компенсация 60%. В този случай пътниците обикновено изпитват едно и също усещане/комфорт при движение в криви (въпреки че возилата без система за наклоняване на коша ще претърпят малко наклоняване навън, обикновено по-малко от 1° в следствие от деформацията на ресорите им, на практика наклоняването на коша ще даде малко намаляване на напречното ускорение). Друг пример е когато недостигът на надвишение се намали до $\theta_{active} = 4,5^\circ$, а ъгълът на наклоняване на коша е $\theta_{tilt} = 8^\circ$, тогава увеличението на скоростта е с 24%, а коефициентът на компенсация е 64%.

Теоретично, скоростта на движение в криви следователно може да се увеличи с около 30% или повече чрез използване на системи за наклоняване на коша. Въпреки това, поведението на влаковете при движението им в преходни криви и криви с постоянен радиус е от голямо значение що се отнася до комфорта. Комфортът може да бъде предварително определен като се използва методика, описана в Европейския стандарт DK CEN TC/256 WG/7. Тя е базирана на емпирично установен метод, при който процентът от пътниците, които изпитват дискомфорт при движение на возилото в криви, се определя от напречното ускорение ($\ddot{y}$), напречните тласъци ($\ddot{y}$) и скоростта с която се накланя коша ($\dot{\theta}$) [2].

Съществува и проблемът, при който пътниците изпитват симптоми на морска болест. В контраст с комфорта при преминаване през криви, който може да се приеме за индивидуален за всяка крива, морската болест има натрупващ се ефект, който се явява като следствие от множество човешки фактори, чиито точен произход все още не е напълно разбран. Още повече, ефектът се утежнява при силно криволичеши пътища с много бързи преходи между леви и десни криви. Степента до която ускоренията от кривите биват компенсирани чрез наклоняване на коша е важен фактор, но щом бъде оптимизиран, единствената друга мярка за смекчаването им е намаляване на скоростта на движение на возилото.

2. Системи за наклоняване на коша на ПЖПС, конструкции и оценка.

Както вече беше споменато, системите за наклоняване на коша на ПЖПС имат за цел да намалят стойностите на непогасеното напречно ускорение, изпитвано от пътниците при движение в криви с относително високи скорости, а от там и неговите негативни влияние върху човешкия организъм.

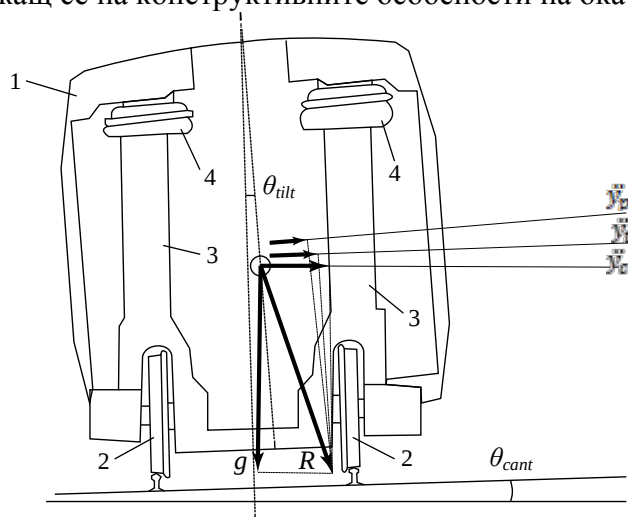
Понастоящем съществуват два типа системи за наклоняване на коша – пасивна и активна. При пасивните системи наклоняването на коша се извършва без внасяне на енергия от външен източник, т.е. кошът се накланя самоволно „навътре“ за сметка на центробежните сили. Типичен представител на този тип системи е системата TALGO PENDULAR [4], чийто конструктивни особености и качества ще бъдат разгледани по-надолу. Що се отнася до активните системи, при тях наклоняването на коша се извършва принудително, т.е. внася се енергия отвън, като най-често това става чрез използването на допълнителни задвижвания от типа на хидравлични или пневматични силови цилиндри или електрически устройства. Този тип системи са намерили приложение в специализираните влакове ETR460, талигите X2000 на шведската фирма ASEA, както и в японските влакове обслужващи скоростните участъци SHINKANSEN.

2.1 Пасивна система TALGO PENDULAR

Пасивната система за наклоняване на коша TALGO PENDULAR има характерна конструкция, при която централното ресорно окачване е издигнато на нивото на покрива на возилото (вж. Фиг. 1). Окачването е изпълнено от два пневматични ресора, които са монтирани на вертикални колони. В двата края на всеки вагон са разположени по две такива колони и по два пневматични ресора – общо 4 за возилото. Особеното тук е, че при този тип конструкция се използват отделни, независими колела, които са монтирани в долната част на колоните. При този тип системи центърът на тежестта на коша, който представлява своеобразно физическо махало, се намира под фиктивната точка на окачването на „махалото“ [1, 3]. Така под влиянието на центробежната сила той се отклонява „навън“, като подът на возилото се наклонява „навътре“ на ъгъл θ_{tilt} спрямо равнината на пътя.

Тази система се характеризира с директна зависимост на ъгъла на наклоняване на коша спрямо скоростта на движение, като предоставя 25% увеличение на последната

в криви [4]. Като допълнително експлоатационно предимство се явява и намаляването на силите на взаимодействие между колелото и релсата в следствие използването на независими колела и механизмите за завъртането им при движение в криви [4]. Също така липсата на нужда от външни енергийни източници и системи за управление допълнително улеснява експлоатацията и поддръжката ѝ. Основният недостатък на системата обаче се оказва сравнително малкият допустим ъгъл на наклон на коша ($\theta_{tilt} = 2.9^\circ \div 3.5^\circ$) [1], дължащ се на конструктивните особености на окачването.

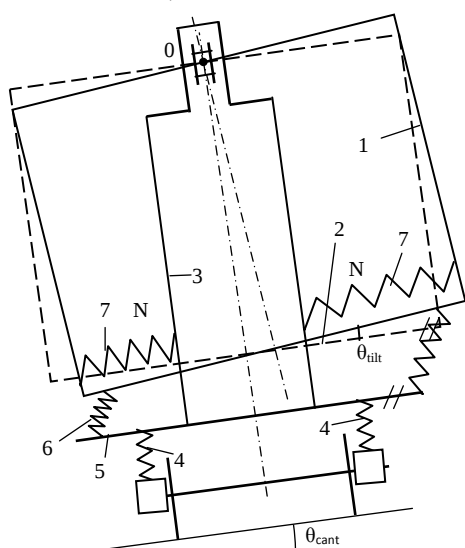


Фиг. 1 – Конструкция на системата TALGO PENDULAR

1 – кош; 2 – колела; 3 – колони (опорни); 4 – пневматични ресори; θ_{tilt} – ъгъл на наклон на коша; θ_{cant} – ъгъл на напречния наклон на пътя; $\vec{y}_c$ – пълно центробежно ускорение; $\vec{y}_x$ – напречно ускорение при движение по път с напречен наклон, но без наклоняване на коша; $\vec{y}_p$ – напречно ускорение, изпитвано от пътниците, след наклоняване на коша на ъгъл θ_{tilt} .

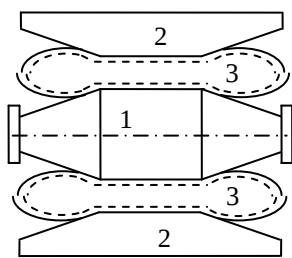
2.2 Пасивна система с ресори, разположени под масовия център на коша

При този тип системи е характерно, че централното окачване е разположено под масовия център на коша (вж. Фиг. 2) [1]. Тук ходовата част на ПЖПС е талигов тип и освен конвенционалното буксово и централно ресорно окачване, изпълнени най-често от цилиндрични винтови пружини, се използва и допълнително централно, напречно ресорно окачване, което има негативна характеристика (вж. Фиг. 3, 4) [1, 3].



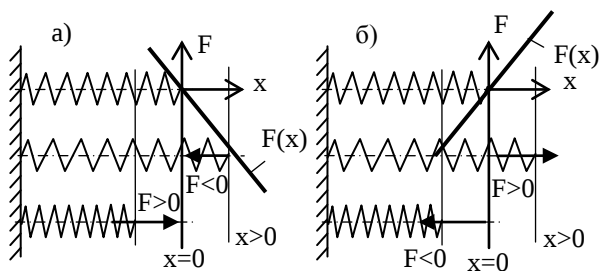
Фиг. 2 – Пасивна система с ниско разположени ресори.

1 – кош наклонено положение; 2 – кош средно положение; 3 – базова рамка; 4 – буксови ресори; 5 – рама на талигата; 6 – централни ресори; 7 – допълнителни централни ресори.



Фиг. 3 – Пневматичен ресор с негативна характеристика.

1 – вътрешно тяло; 2 – външно тяло; 3 – балон на тороидален пневматичен ресор.



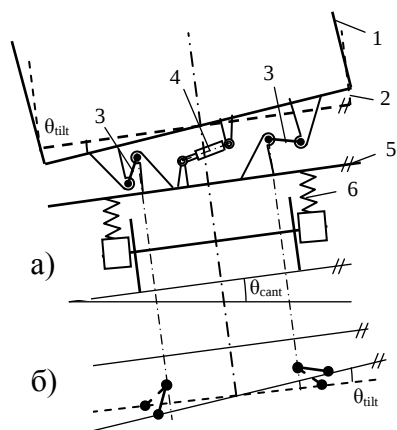
Фиг. 4 – Положителна „а)“ и негативна „б)“ характеристика.

Наклоняването на коша „навътре“ става чрез завъртането му около фиктивната ос O (вж. Фиг. 2), която се намира на нивото на покрива на возилото, подобно на системата TALGO PENDULAR. За да се постигне оптимална честота на завъртането (люлеенето) на коша от около $0,5 \text{ Hz}$ е нужно да се постигне подходяща резултантна коравина на ресорното окачване в хоризонтално направление. Защото при по-висока честота би се влошила плавността на хода от по-високите стойности на ускоренията, а при по-ниска – биха настъпили проблеми при преминаването на возилото през преходните криви. Затова в този тип система, освен конвенционалните централни ресори 6 (вж. Фиг. 2), се използват допълнителни ресори 7, които действат в напречно направление и имат негативна (обратна) характеристика [1]. При ресорите с негативна характеристика при всяко отклонение от нулевото положение (деформация) се поражда нарастваща с отклонението еластична сила $F(x)$, която се стреми да увеличи отклонението, а не да възвърне нулевото му положение, както е при ресорите с положителна характеристика. Т.е. породената сила има посока, съвпадаща с външната, смущаваща сила. Или изразено чрез зависимостите за големината на силите от ресорите, за ресори с положителна (права) характеристика имаме $F(x) = -c.x$, а за ресори с негативна (обратна) характеристика имаме $F(x) = c.x$ (където c е постоянната коравина на ресора).

Този тип модификация на пасивните системи за наклоняване на коша за сега не е намерила широко приложение поради невъзможността за реализиране на голям ъгъл на наклон на коша, а от тук и сравнително ниската ефективност.

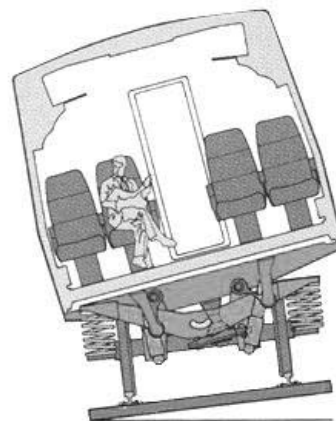
2.3 Активна система с наклоняваща се греди над централната ресорна степен (система с „неподвижни“ централни ресори).

Този тип активни системи имат характерна механична част за наклоняване на коша, която е разположена над централната ресорна степен. Най-разпространеният вариант на конструкцията се състои от наклоняваща се греди, която е неподвижно свързана с пода (рамата) на возилото, вертикални подвески, които свързват наклоняваща се греди с рамата (гредата) на талигата и задвижване, чрез което кошът принудително се наклонява „навътре“ след влагане на енергия отвън. При тази конструкция е характерно, че подвеските при средно положение на коша заемат симетрично разположение със сравнително голям напречен наклон навън – около 30° – 40° спрямо вертикалната ос (вж. Фиг. 5) [1].



Фиг. 5 – Схема с механична част над централното ресорно окачване „а)“; кинематика на подвеските „б)“.

1 – кош наклонено положение; 2 – кош средно положение; 3 – наклонени подвески; 4 – хидроцилиндър; 5 – рама (гредата) на талигата; 6 – буксови и централни ресори.



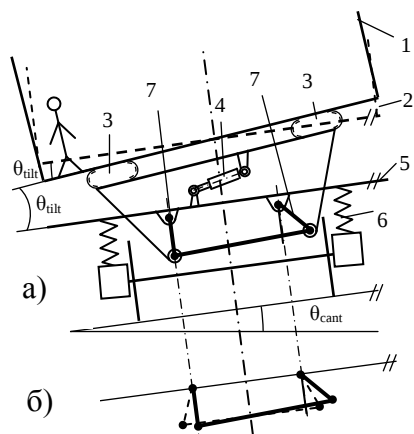
Фиг. 6 – Конструктивна схема на системата с механика над централната степен.

Когато наклоняващата се гредата се намира над централната ресорна степен, повишените напречни сили от движението в криви трябва да се поемат от централното ресорно окачване, натоварвано в напречно направление, което се явява като основен недостатък на конструкцията. Това допълнително би усложнило конструкцията на централното окачване, за да може то да поема такъв тип натоварвания. Обаче, тъй като по-коравото напречно ресорно окачване не е подходящо за високите скорости на движение на влаковете с наклоняващ се кош, на практика трябва да се увеличи хода на централното окачване в напречно направление и да се използва някакъв вид активен метод за центриране на коша, за да се избегне достигането на критичните граници на пътуването. Функцията на устройството за активен контрол на наклоняването на коша тук се изпълнява от хидроцилиндър (вж. Фиг. 5), който е разположен напречно. Управлението на задвижването се осъществява от електронна система, която непрекъснато следи положението на коша, скоростта на движение на влака, характеристиките на пътя (движение в прави или криви), както и стойностите на напречните ускорения на коша. Методите за управление ще бъдат разгледани по-долу.

Подобен тип системи предоставят голям ъгъл на наклон на коша – от порядъка на $\theta_{tilt} = 6^\circ \div 8^\circ$ и повече – в сравнение с пасивните системи ($\theta_{tilt} = 2.9^\circ \div 3.5^\circ$ при TALGO PENDULAR). Това дава възможност за подобряване на комфорта, като в същото време предоставя възможност за по-голямо увеличение на скоростта на движение в криви. Освен конструктивния недостатък, споменат по-горе, системите от този вид са по-скъпи за производство и поддръжка при експлоатация.

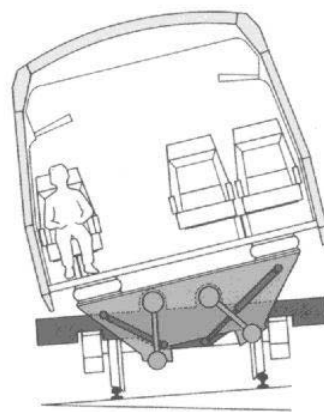
2.4 Активна система с наклоняваща се гредата под централната ресорна степен (система с „подвижни“ централни ресори).

Тази система има конструкция, подобна на тази при системата с наклоняваща се гредата над централната ресорна степен. Основната разлика тук е, че централните ресори са разположени над тази гредата, т.е. между гредата и рамата (пода) на коша (вж. Фиг. 7, 8) [1]. Трябва да се отбележи, че при този тип системи централните ресори са пневматични. По този начин се избягва проблемът с поемането на напречните сили от централната степен, който се явява основен недостатък на системата, описана в предишната точка.



Фиг. 7 – Схема с механична част под централното ресорно окачване „а“; кинематика на подвеските „б“.

1 – кош наклонено положение; 2 – кош средно положение; 3 – централни пневматични ресори; 4 – хидроцилиндр; 5 – рама (греда) на талигата; 6 – буксови ресори.



Фиг. 8 – Конструктивна схема на системата с механика под централната степен. Талига X2000.

Системата, която се използва при влаковете с талиги X2000, предоставя максимален наклон на коша $\theta_{tilt} = 6.5^\circ$, като компенсира до 75% от стойността на центробежната сила при движение в криви. Скоростта, над която системата се включва в действие, е 70 км/ч, като по този начин се избягва ненужното наклоняване на коша, а центробежната сила при скорости под 70 км/ч се балансира по естествен начин чрез напречния наклон на железния път. Случаите на морска болест се рядко срещани при тази система, тъй като пътниците усещат останалите 25% от пълната центробежна сила. Като недостатък обаче се явява фактът, че първият вагон (секция) след локомотива се наклонява по-бързо от колкото следващите, което се дължи на методиката за засичане навлизането в крива [5]. Тези методики ще бъдат разгледани по-долу. Като допълнително предимство може да се спомене, че всяка секция на този тип влакове е оборудвана с талиги, чието буксово водене предава хоризонталните усилия към рамата на талигата чрез еластични връзки. Така колоосите заемат радиално разположение в криви, което за тази конструкция дава 40% увеличение на скоростта, без това да натоварва допълнително железния път [5].

3. Методики за управление на активните системи за наклоняване на коша

Ще разгледаме някои от основните възможни принципи за управление на активните системи за постигане на ефективно наклоняване на коша. След това ще обърнем внимание на работата на някои контролери и ще ги оценим.

Най-интуитивния подход за управление на подобна система е чрез използването на акселерометри, поставени върху коша на возилото, които да измерват напречните ускорения, които системата трябва да погасява. На Фиг. 9а е показан „нулиращ“ тип контролер, при който сигналът от акселерометъра се използва за управлението на задвижване, чрез работата на което кошът се наклонява в съответната посока и по този начин напречното ускорение се свежда до нула. Това се нарича „класически метод на негативна обратна връзка“ [2]. Вграждането на коефициента K_{CD} може да се постигне чрез модифициране на базовия „нулиращ“ контролер така, че да осигурява частично наклоняване на коша, като предварително се зададе размер на ъгъла на наклон (вж. Фиг. 9а – пунктирна линия). Тази схема обаче предоставя някои трудности поради особеностите на окачването на возилото: режимите напречно изместване на коша спрямо талигата и напречното люлеене на коша притежават голяма взаимозависимост в

динамично отношение, и ако въздействието на системата има достатъчно нисък ефект и не може да преодолее съпротивителните сили на напречното ресорно окачване, то тогава системата ще има доста забавен ефект върху наклоняването на коша при движение на возилото в криви.

Фиг. 9б показва следващото решение: динамичният проблем може да се избегне, като акселерометърът се постави на ненаклоняваща се част, например върху талигата. Тогава ще може да се определи каква стойност на наклона на коша е нужна, за да се намали напречното ускорение, и може да се умножи по коефициента K_{CD} , който определя каква част от напречното ускорение ще се компенсира; $K_{CD} = 1$ дава 100% компенсация, което обаче не е благоприятно от гледна точка на чувството за морска болест у пътниците. Обикновено се използва компенсация от 60 – 70%. Този „команден сигнал за наклоняване на коша“ след това осигурява входни данни за обратната връзка, която използва измерените стойности на ъгъла на наклон на коша.



Фиг. 9 – Методи за управление на наклоняването на коша: а) класически метод с „нулиращ“ контролер; б) метод с обратна връзка и зададен коефициент K_{CD} .

За съжаление обаче съществува проблемът, че акселерометърът, монтиран върху талигата, не измерва само напречните ускорения от движението на возилото в крива, но и ускоренията, които възникват от неравностите на железния път. Когато акселерометърът е поставен върху коша на возилото, напречните ускорения, които той измерва, са до известна степен редуцирани от ресорното окачване, но ако той е монтиран върху талигата измерваните ускорения ще са със значително по-голяма стойност. Следователно е нужно използването на нискочестотен филтър (LPF) за редуциране на сигналите, причинени от неравности на железния път. В противен случай ще има ненужно наклоняване на коша при движение на возилото по прави участъци, което ще влоши комфорта като цяло. При постигането на достатъчно филтриране на сигнала обаче се появява друг проблем – получава се голямо закъснение на ефекта от наклоняването, т.е. при преминаването на возилото през преходната крива и в началото на кривата с постоянен радиус за кратко се усеща пълното напречно ускорение, което след кратко бива редуцирано до приемливи граници от наклоняването на коша.

На Фиг. 10 е показана схема на следващата стъпка в развитието на контролерите. Сигналът от предното возило се използва за създаване на предварение във времето. Това предварение е така изчислено на базата на дължината на возилата, че закъснението причинено от нискочестотния филтър се компенсира. Тази схема е най-разпространена в Европа. Понякога дори се използват жирокопи, измерващи

напречното люлеене и/или завъртането в план за подобряване на реакциите на системата. Обикновено от първото возило се генерира един управляващ сигнал, който бива предаван на останалите возила в състава по цифров начин и с нужното закъснение.

Сигналят от акселерометъра по принцип се използва за отчитане на реалния „недостиг на наклон“ на железния път, като отново трудностите тук са свързани с изолирането на ефекта от неравностите на пътя. В това отношение съществуват разработки, при които контролерите са заредени с данни за профила на трасето. При тях не се използват акселерометри, монтирани върху талигите, а сигналите се генерират от контролера на база на предварително заредените данни за профила на пътя. И двата параметъра – позиция на возилото по протежение на трасето и данните за профила на пътя – трябва да бъдат известни с голяма точност, за да бъде ефективен този подход. Поради тази причина вероятността тази система да получи широко приложение е малка.



Фиг. 10 – Метод за управление на наклоняването на коша с предвாரение на управляващия сигнал.

При японските влакове с наклоняем кош често се използват бализи, разположени по железния път преди началото на кривите, за да се стартира предварително наклоняването на коша. Тази техника спомага за подобряването на относително бавната реакция на пневматичните задвижвания на системата за наклоняване.

4. Оценка на ефективността на контролерите за управление на системите

Ясно е, че случващото се в кривите с постоянен радиус е от значение, но реакцията на системата за наклоняване на коша в динамично отношение при движение на возилото в преходните криви също не бива да се оставя на по-заден план. Идеалната стратегия за управление на системата включва постепенно увеличаване на ъгъла на наклон на коша, перфектно отнесен към текущото напречно ускорение и повишаването на напречния наклон на пътя [2]. Тъй като първостепенното предназначение на тези системи е увеличаване скоростта на движение на влаковете в криви без намаляване комфорта на пътниците, от инженерна гледна точка се явяват два проблема: колко добра ще бъде стабилността на този тип влакове при движението им по прави участъци, и какво ще е поведението на влака в преходните криви?

При системите базирани на акселерометри се налага, на практика, да се сравняват два показателя – ако наклоняването става бързо с цел подобро преминаване през преходните криви, на практика, комфорта при движение по прави участъци трябва да се понижи. Качествено, добрият контролер на системата за

наклоняване на коша по принцип реагира на детерминистичните входни сигнали и възможно най-много игнорира сигналите, породени от неравностите на пътя. С цел да се направи обективна оценка на стратегиите за контрол, е необходимо да се дефинират подходящи критерии и условия.

Стабилността на влака в прави участъци може да се оцени като се използва критерия за понижаване на комфорта в напречно направление, като той не трябва да се понижава с повече от определената му стойност за влакове без система за наклоняване на коша - 7.5% [2]. Трябва обаче да се отбележи, че сравнението на стойностите на този критерий за двата вида влакове трябва да се извършва при повишени скорости на движение. Разбира се, сравнението на този критерий при понижени скорости на движение също е от значение, но постигането на задоволителен комфорт при повишени скорости изисква подобро ресорно окачване или по-качествен път, т.е. това не зависи от контролера на системата.

Реакцията на системите за наклоняване на коша трябва да се раздели на два аспекта. Първо, фундаменталната реакция на системата, определена чрез факторите за комфорт на пътниците, трябва да е толкова добра, колкото при возило без подобна система, движещо се с ниски скорости, в противен случай комфортът на пътниците неизбежно ще бъде понижен, без значение колко ефективна е системата. Следователно е възможно да се представи идеята за „идеално наклоняване на коша“ при което наклоняващото въздействие стриктно следва предварително зададената компенсация, която е дефинирана на базата на фундаменталните параметри на системата – експлоатационната скорост (повишение), максималния възможен наклон на коша и коефициента на компенсация. Тази комбинация от параметри може да бъде оптимизирана, като се използва подхода за детерминистични входни сигнали, за да се определи основен режим на движение, а това ще даде „идеалните“ стойности на коефициента, отчитащ степента на комфорт на пътниците (един за правостоящи пътници и един за седящи) [2].



Фиг. 11 – „Идеална“ реакция на пасивна система в преходни криви.

Фиг. 12 – „Идеална“ реакция на активна система в преходни криви.

Нека вземем предвид „идеалната“ реакция в преходните криви за влакове без и със системи за наклоняване на коша, показани на Фиг. 11 и 12 [2], при които времето за преминаване през участъка е 3.2 секунди за пасивните возила, а напречният наклон на пътя и недостигът на надвишение са 6° . (Реакцията на пасивните возила включва и „пасивното наклоняване на коша навън“ от 1° , но тази стойности зависи от конструкцията на возилото). Фиг. 12 показва съответните графики на ускоренията,

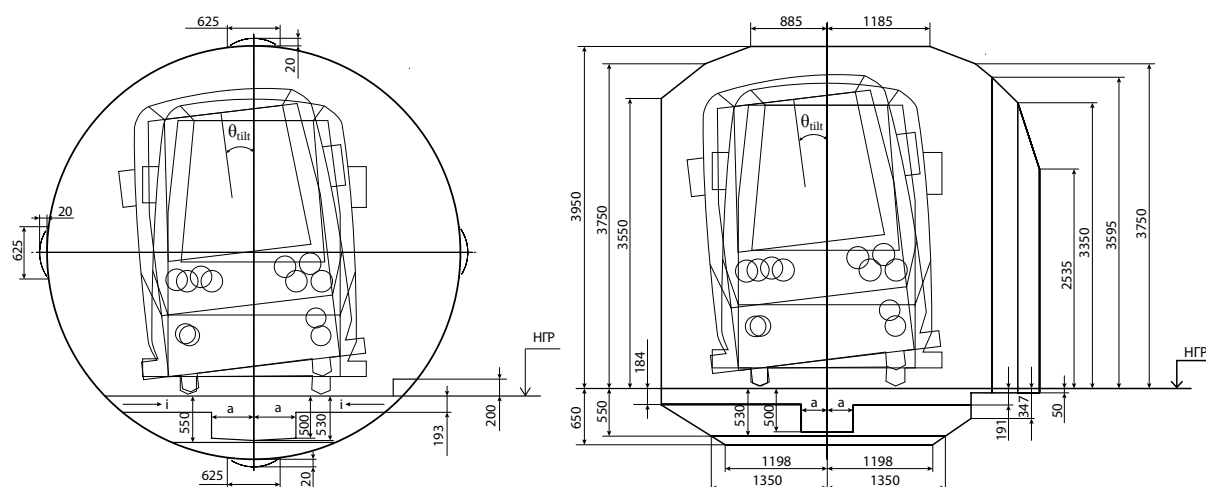
тласъците и скорост на наклоняване за определено състояние на наклонен кош, т.е. 30% повишаване на скоростта и компенсация от 60%. Разбира се подобни диаграми могат да бъдат построени за различни условия.

Другото съображение е, че е необходимо количествено определяне на допълнителните динамични влияния, които са причинени от динамиката на ресорното окачване/контролера при движение през преходните криви, които могат да се представят като отклонения от „идеалния“ случай. Тези отклонения са свързани с напречните ускорения и скоростта на наклоняване на коша, макар че първото вероятно е от първостепенна важност. Поведението на системата в това отношение ще зависи от детайлната характеристика на контролера, както и от филтъра при командната система и параметрите на настройката в зоната на обратната връзка на ъгъла на наклоняване. Ясно е, че тези отклонения трябва да бъдат сведени до минимум, но до момента няма информация за тяхната приемлива стойност, макар че стойностите получени от нормалното пасивно ресорно окачване могат да се използват като ориентировъчни.

5. Оценка на възможността за вграждане на системи за наклоняване на коша в метровлакове

Вграждането на подобни системи в метровлаковете би допринесло за повишаване на скоростта на движение в криви, но съществуват някои фактори, които трябва да се вземат под внимание.

На първо място трябва да се прецени дали подобна система би била достатъчно рентабилна що се отнася до профила на трасетата, по които се движи метровлакът. Т.е. трябва да се направи оценка на трасето по отношение на броя на кривите за общата дължина на трасето, техният радиус, средната дължина на кривите и дължината на междугарията в участъка. Ясно е, че при междугария с относително малка дължина не могат да бъдат развивани скорости, които да налагат използването на система за наклоняване на коша. Както беше споменато по-горе за една от системите, скоростта над която тя се активира е 70км/ч. Друг съществен фактор е вписването на возилото в габаритна рамка при наклоняване на коша. На Фиг. 13 са дадени два типа строителни габарита на тунели за метрополитен и положението на метровлак серия 81-740.2/741.2 „Русич“ в нормално и наклонено положение. Критичният момент при вписването в габарита при наклоняване на коша в крива е оставянето на разстояние (клиренс) между габаритната рамка и тази част на возилото, която се намира „най-навътре“ в кривата, за да се осигури безопасното движение на влака. За случая, даден на Фиг. 13, това е горната ъглова част на метровлака.



Фиг. 13 – Положение на метровлак 81-740.2/741.2 „Русич“ в габаритни рамки за тунели с кръгло (ляво) и правоъгълно (дясно) сечение.

Друг фактор е конструктивното оформление на ресорното окачване на метровлака. Понастоящем в Метрополитен ЕАД в експлоатация се намират два типа мотриси – серии 81-717.4/714.4 и 81-740.2/741.2 „Русич“. И двете серии метровлакове имат двустепенно ресорно окачване. Като при първият тип влакове и двете степени са изпълнени с цилиндрични винтови пружини. Централната степен е изпълнена с централна греда, окачена на вертикални подвески, а буксовото водене е шпинтонно. Като цяло конструкцията на метровлаковете серия 81-717.4/714.4 не позволява вграждане на системи за наклоняване на коша, тъй като това би било нерентабилно и твърде скъпо за изпълнение що се отнася до реконструкцията им. При мотрисите от серия 81-740.2/741.2 „Русич“ централната степен е изпълнена от пневматични ресори с автоматично регулиране на височината на возилото в зависимост от вертикалното натоварване. Разположението на пневматичните ресори е между централната греда (рамата) на талигата и рамата (пода) на коша, което прави възможно вграждането на система за наклоняване на коша, която да увеличава/намалява налягането в пневматичните ресори. За намаляване на разхода на въздух, системата може да бъде изградена така, че да прехвърля въздух от единия пневматичен ресор в другия. Конструкцията на пневматичните ресори обаче предоставя ограничение на ъгъла на наклон на коша. И тук трябва да се вземе под внимание безопасността при преминаване през криви, т.е. вписването в габаритната рамка. Що се отнася до системите за управление на наклоняването, подходящ вариант би бил използването на акселерометри, сензори за завъртане на талигата спрямо коша и сензори за скорост, чрез които системата да отчита режима на движение на влака и необходимостта от наклоняване на коша.

6. Заключение

Въпреки че концепцията за наклоняване на коша изглежда проста, тя изисква значителни грижи от практическа гледна точка. Развитието на подобни системи продължава и до днес, като се използват най-различни конструктивни решения, някои от които са взаимствани от други области на техниката. Контролерите все още търпят развитие и биват настройвани специално за специфичните характеристики на трасетата, по които се движат влаковете. Вероятно най-съвременните разработки ще бъдат подобрявани в следващите години.

Използването на системи за наклоняване на коша в метровлакове е свързано с решаването на редица проблеми, някои от които изискват дори променяне на приетите норми и стандарти. От разгледаното до тук може да се направи изводът, че подобни системи биха имали бъдеще само ако бъдат заложили в самото начало на конструирането на трасетата и подвижния състав за даден метрополитен.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.] Т. Ружеков, Ц. Пенчев, Е. Димитров - Теория и конструиране на железопътна техника, Издателство на ВТУ „Т. Каблешков“, София, 2011
- [2.] Simon Iwnicki – Handbook of Railway Vehicle Dynamics – © 2006 by Taylor & Francis Group, LLC
- [3.] Ц. Пенчев, Д. Ахмаджова – Максимално допустими скорости в криви на железопътни возила от гледна точка на съвременните изисквания за комфорт – V-та научна конференция „Смолян - 2003“ организирана от техническия колеж – Смолян, 2003.
- [4.] The Talgo Pendular Coaches – www.talgo.com – Catalogue
- [5.] X2000 High-Speed Tilting Train - <http://www.lococarriage.org.uk/x2000.htm>