

СЪВРЕМЕННИ ТЕНДЕНЦИИ В ИЗПИТВАНЕТО НА ЕЛЕМЕНТИ ОТ РЕСОРНОТО ОКАЧВАНЕ НА ПОДВИЖЕН ЖЕЛЕЗОПЪТЕН СЪСТАВ

Николай Додев
nikolaydodev@gmail.com

**ВТУ „Тодор Каблешков“, Катедра Транспортна Техника
София, 1574, ул. „Гео Милев“ 158
БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: *ресорно окачване, сензори, изпитване, работоспособност.*

Резюме: *Докладът описва съвременните тенденции и решения в сферата на изпитанията на еластични елементи (пружини) и демпфериращи устройства от ресорната система на железопътни возила за пътнически превози. Основен акцент в доклада е обобщен анализ на методики за изпитване, конструкции на изпитателни стендове и устройства, както и резултати, получени при изпитания на реални образци. На база на разгледаните системи и резултатите, получени при изпитанията, са направени съответните изводи и оценки.*

Съвременните изисквания за комфорт и безопасност на пътниците при движението на ПЖПС с относително висока скорост налагат упражняването на строг контрол върху елементите на ресорната система на пътническите возила. Това несъмнено е свързано с периодично извършване на стендови изпитания на елементите, с цел снемане на техните работни характеристики, оценка на тяхната работоспособност, правилното им аранжиране в ресорната система след ремонти и обслужване и поддържане на архив с резултати от изпитванията.

Последните разработки в областта на електронните устройства, сензориката [1] и софтуерното управление позволяват вграждането на системи, които бързо, лесно и с достатъчна точност да симулират натоварване на ресорните елементи в целия им работен диапазон и по този начин да снемат работните им характеристики, от които може да бъде дадена коректна оценка на тяхната работоспособност.

1. Общи сведения

Цилиндричните винтови пружини, използвани в подвижния железопътен състав (ПЖПС), имат проста конструкция и почти не се нуждаят от поддръжка. Но условията, при които работи ресорната система на ПЖПС, включваща фактори като лошо състояние на железния път, грешки при асемблирането и др., могат да доведат до деградация в еластичните свойства и пластични деформации на пружините. Това от своя страна може да доведе до значителни износвания на ходовата част на возилото и железния път, както и до случаи на дерайлиране [2].

Изложените съображения относно условията на работа с пълна сила се отнасят и за демпфериращите устройства от ресорната системата на возилата. Те до голяма степен определят както комфорта на пътниците, така и тяхната безопасност. Възможните деградации в техните характеристики могат да се дължат на редица причини, обосновани от неправилно асемблиране, механични повреди в конструкцията на самия демпфер, както и промяна на качествата на работния флуид.

2. Стенд за изпитване на цилиндрични винтови пружини от ресорното окачване на метровакове, подложени на осево натоварване

С цел проверка на еластичните свойства на пружините, работещи в ресорната система на метроваковете, намиращи се в експлоатация в „Метрополитен“ ЕАД – София, колектив от ВТУ „Тодор Каблешков“ – София е проектирал, построил и въвел в експлоатация стенд за изпитване на цилиндрични винтови пружини. Стендът предоставя възможност за изпитване на 4 типа пружини, използвани в ресорната система на всички доставки метровакове, които се намират в експлоатация.

Конструкцията на стенда е относителна проста и се състои от следните главни системи и устройства.

2.1. Механична система

Състои се от фундамент, върху който е монтирана изпитателна клетка, осигуряваща безопасност при натоварване на пружините, опорни плочи и ограничители, осигуряващи правилното поставяне на пружините в стенда и направляващи устройства за натоварващата плоча.

2.2. Хидравлична система

Състои се от хидравлична станция, която захранва хидравличен цилиндър, натоварващ пружините, хидравлични връзки и предпазни вентили.

2.3. Измервателна система

Системата се състои от един сензор за преместване на фирмата MEGAUTO и един сензор за сила на НВМ. Сензорът за преместване е изпълнен на потенциометричен принцип и е оборудван с електронен блок, който предоставя изходен сигнал постоянен ток от 4 до 20mA. Сензорът измерва преместването на горната опорна плоча на стенда, чрез която се упражнява натоварването. Сензорът за сила е изпълнен на принципа на пълен тензометричен мост. Оборудван е с преобразувател на напрежение в ток. По този начин се елиминират вредните влияния на външна интерференция от електромагнитни полета, радио вълни и др., ако изходният сигнал беше ел. напрежение.

2.4. Регистрираща апаратура

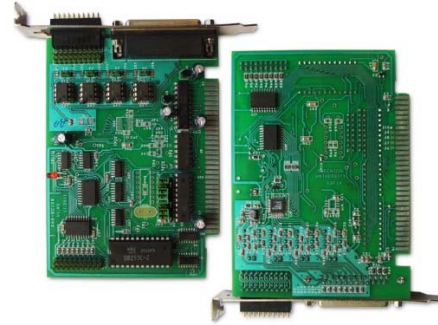
Изходните сигнали от сензорите за преместване и сила постъпват в преобразуватели на ток в напрежение, което е нужно, за да бъдат обработени от аналогово-цифров преобразувател (АЦП), инсталиран в персонален компютър. Аналогово-цифровият преобразувател е разработка на колектив от учени от ВТУ „Тодор Каблешков“ и ТУ – София. АЦП използва чип AD7938 на фирмата ANALOG DEVICES, който има осем входни канала и канален секвенсер [3]. Чипът AD7938 също така има точно 2.5V референтно напрежение, но може да се изолира с цел използване на външно референтно напрежение.

2.5. Софтуер за управление

Софтуерът е разработка на колектив от ВТУ „Тодор Каблешков“ специално за нуждите на стенда. Изходният код е написан на Borland Pascal и работи под FREE MS-DOS операционна система.



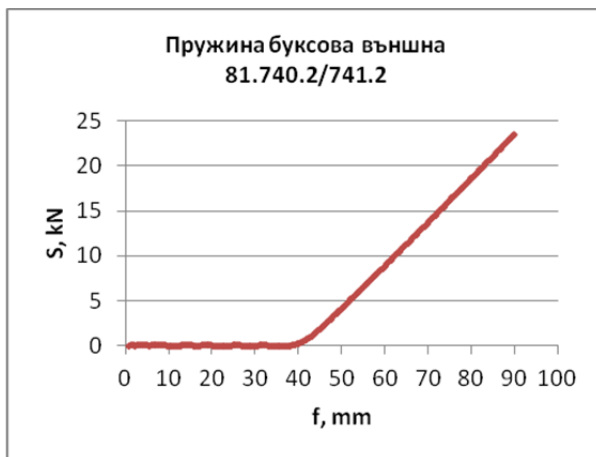
Фиг. 1 - Общ изглед на стенд за ЦВП



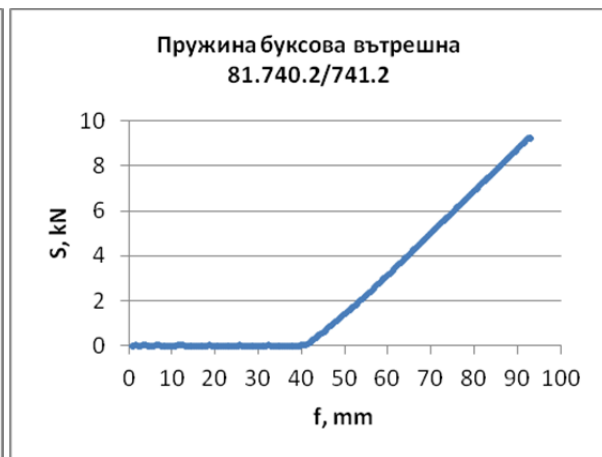
Фиг. 2 - Аналогово-цифров преобразувател

2.6. Резултати

Резултати от реално проведено изпитание са показани на Фиг. 3 и 4.



Фиг. 3 - X-ка на буксова пружина външна



Фиг. 4 - X-ка на буксова пружина вътрешна

От Фиг. 3 и 4 се вижда, че реалното натоварване на пружините започва при отчетено от сензора преместване приблизително 40мм. Това отчетено преместване представлява разстоянието от горно изходно положение на натоварваща плоча на стенда до опорната повърхност на пружината. Имайки предвид конструктивно зададеното разстояние от горно положение на плочата до долната опорна повърхнина на стенда, лесно се определя свободната височина на изпитваните пружини.

Стойностите от чертожните документи за коефициента на еластичност, номиналното натоварване, височината в свободно състояние и под номинален товар на пружините са предварително зададени в софтуера за управление. За успешно провеждане на изпитанията пружините трябва да се натоварят до достигане на номиналното натоварване. На база на сметата характеристика се определя и деформацията на пружината при номинално натоварване, техният текущ коефициент на еластичност и, както бе споменато, тяхната текуща свободна височина. При попадане на тези характеристики в диапазона на зададените в софтуера, пружината се приема за работоспособна и годна за експлоатация.

Данните от изпитанията се разпечатват във вид на протокол и се записват в архив с цел бъдещи справки и/или софтуерна обработка за оптимално разположение в ходовата част на съставите.

3. Стенд за изпитване на телескопични хидравлични демпфери от ресорното окачване на метровакове [4]

С цел проверка на работните характеристики на хидравличните демпфери, работещи в ресорната система на метроваковете, намиращи се в експлоатация в

„Метрополитен“ ЕАД – София, колектив от ВТУ „Тодор Каблешков“ – София е проектирал, построил и въвел в експлоатация стенд за изпитване на телескопични хидравлични демпфери. Стендът предоставя възможност за изпитване на всички типове хидравлични демпфери, използвани в ресорната система на всички доставки метровлакове, които се намират в експлоатация.

Конструкцията на стенда се състои от следните главни системи и устройства.

3.1. Механична система

Състои се от фундамент (Фиг. 5 [4]), върху който е монтирана долната стоманена плоча (1). От плочата се издигат две вертикални колони (2), а върху тях е заварена главната хоризонтална греда (3), която поема натоварването от съпротивителната сила на изпитвания демпфер (4). Демпферът се монтира на стенда чрез захватни устройства (7).

За постигането на хармоничен закон на движение на буталото на демпфера е използван коляно-мотовилков механизъм (5). Основният лагер на механизма е монтиран върху долната стоманена плоча. Дължината на коляното на механизма е 20мм, а на мотовилката – 300мм.

Коляно-мотовилковият механизъм получава въртящ момент от червячен редуктор, монтиран на долната плоча. Редукторът има предавателно отношение $I = 7$ и увеличава въртящия момент, който получава от 3-фазен асинхронен електродвигател, който също е монтиран на долната плоча.

3.2. Задвижваща система

Състои се от честотен инвертор ELECTROINVENT ELDI/V – DF, който захранва 3-фазния асинхронен електродвигател BN 132 M A 4 BA.

3.3. Измервателна система

За да се измери съпротивителната сила на демпфера се използва сензор за сила Фиг. 5, поз. 6, който е монтиран между главната хоризонтална греда и горното монтажно устройство. Сензорът е разработка на научен колектив от ВТУ „Тодор Каблешков“ и е изпълнен на тензометричен принцип. Максималната сила, която може да поеме сензорът, е 100kN. Текущото преместване на буталото на демпфера се измерва индиректно от потенциометричен сензор MEGAUTO LSRB-130-K-2442.

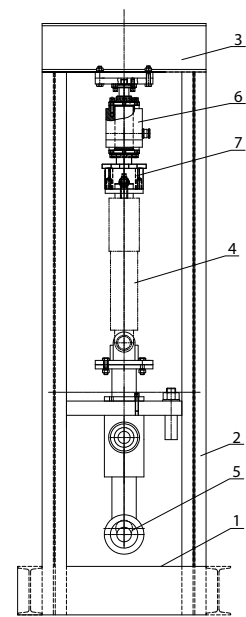
Изходният сигнал на сензорите за сила и преместване представлява постоянен ток. Сигналите биват преобразувани в постоянно напрежение и усилены от усилватели, преди да постъпят в аналогово-цифровия преобразувател, който е част от регистриращата апаратура.

3.4. Регистрираща апаратура

Състои се от два комерсиални усилвателя и един аналогово-цифров преобразувател. Усилвателите преобразуват изходните сигнали от сензорите от ток в напрежение, след което е ги усилюва, за да могат да бъдат регистрирани от АЦП [4] (вж. т. 2.4.).

3.5. Софтуер за управление

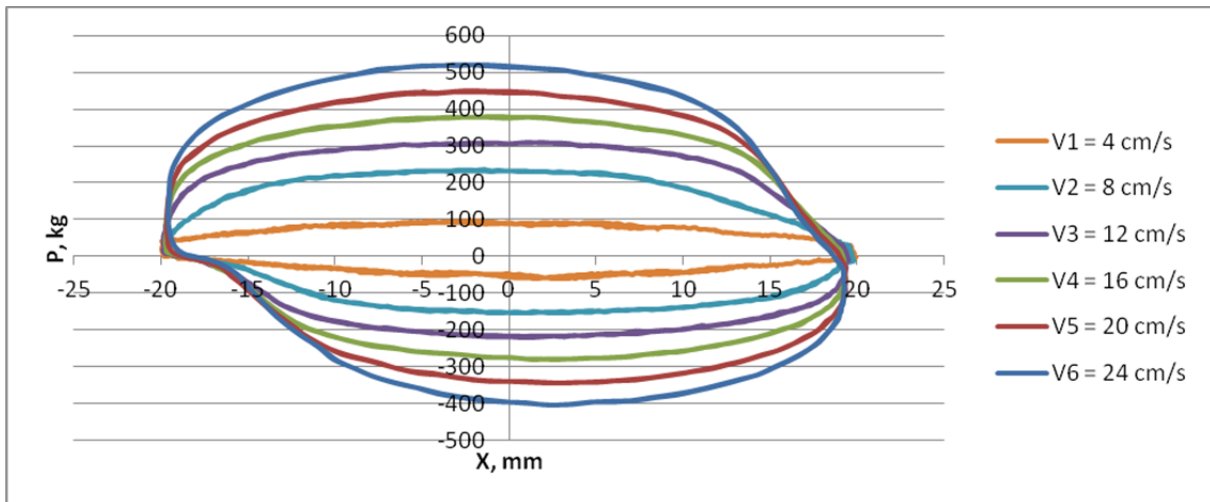
Софтуерът е разработка на колектив от ВТУ „Тодор Каблешков“ специално за нуждите на стенда. Изходният код е написан на Borland Pascal и работи под FREE MS-DOS операционна система.



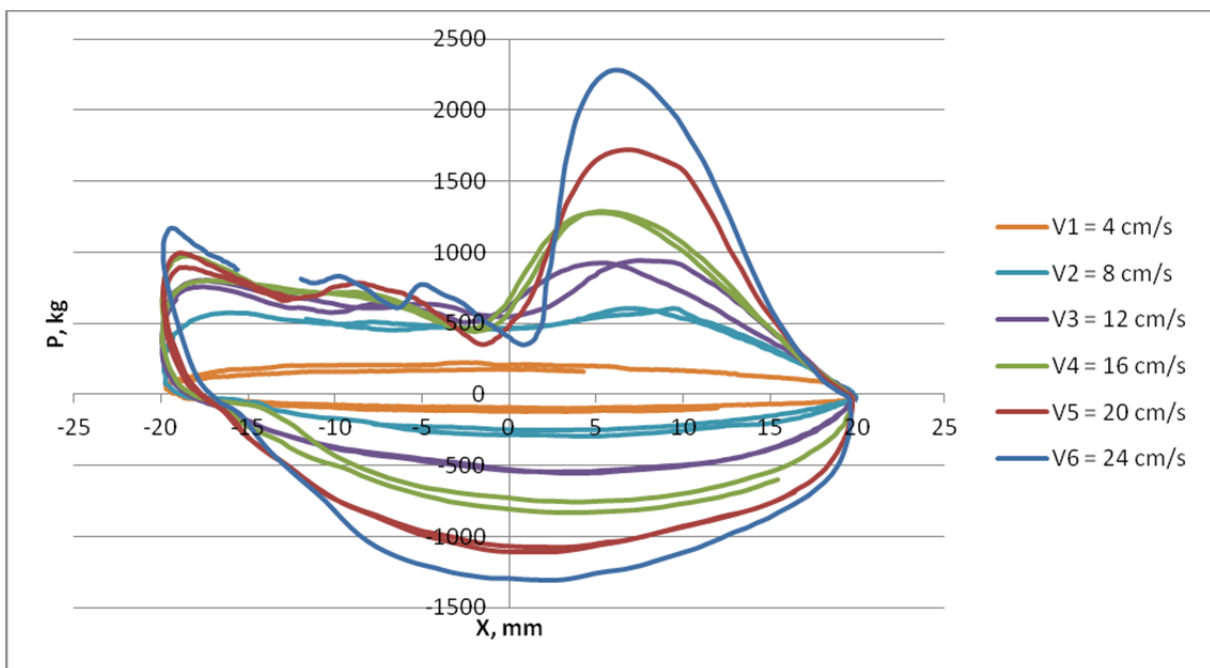
Фиг. 5 [4] - Конструкция на стенд за демпфери

3.6. Резултати

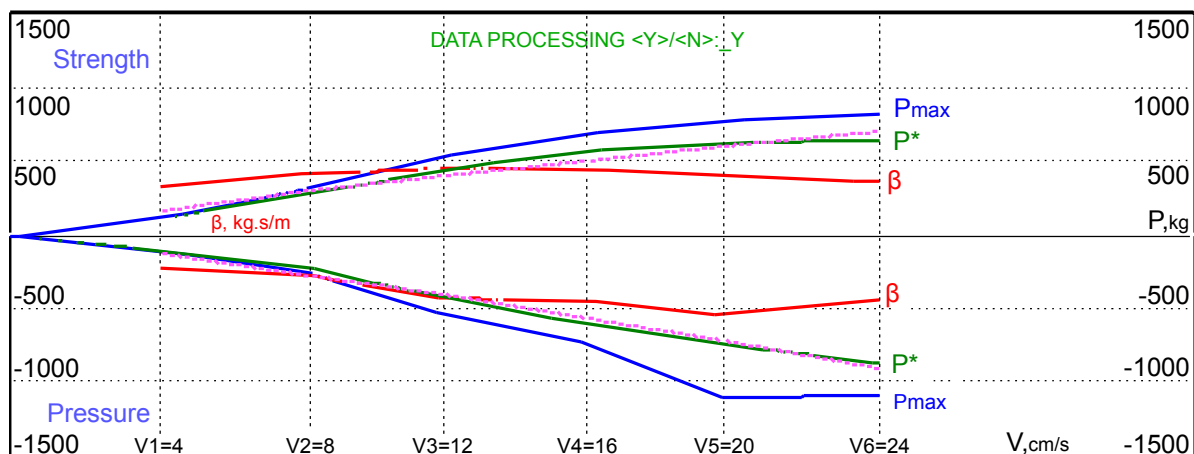
На Фиг. 6 и 7 са дадени х-ки на демпфери, построени от реално измерени стойности на съпротивителната сила и преместването на буталото на демпферите с помощта на стенда.



Фиг. 6 - X-ка на нов хидравличен демпфер



Фиг. 7 - X-ка на неизправен хидравличен демпфер



Фиг. 8 - Зависимост на коеф. на демпфиране β и съпротивителната сила P от скоростта на буталото V .

Характеристиките от горните Фиг. 6 и 7 се състоят от по шест графики за всяка от скоростите, при които са изпитани демпферите. На база на тях управляващият софтуер изчислява коефициента на демпфиране β за конкретния изпитван демпфер и неговите максимални стойности на съпротивителната сила P при опън и натиск. Представянето на зависимостта на коефициента β и силата P от скоростта на буталото V от софтуера е дадена на Фиг. 8 [4]. Последната актуализация на софтуера включва и гранично поле за определяне на годността на демпфера, което е на база паспортните данни, с които се доставят новите демпфери (не е показано на фигурите).

От Фиг. 6 се вижда, че изправните хидравлични демпфери, използвани в ресорната система на последните доставки метровлакове имат елипсовидна характеристика. Също така се забелязва и известно изкривяване на х-ката непосредствено след преминаване на мъртвите точки от буталото. Това изкривяване ясно се изразява при високите скорости на натоварване и се дължи на деформацията на гумените пакети, които участват в монтажните устройства на демпфера. Или по-просто казано, гумените пакети се деформират поради ниската им коравина, докато се постигне „твърдо“ предаване на силата от стенда към демпфера. След което започва реалното натоварване на демпфера и той вече работи в синхрон с кинематиката на стенда.

Фиг. 7 показва х-ка на демпфер, който в натисков режим на натоварване развива твърде голяма съпротивителна сила, причиняваща преместване на буталото граничещо с нула. Т.е. демпферът може да се приеме за твърд прът. Възможните причини за това са няколко: повреден или неправилно регулиран хидравличен клапан от страна „натиск“, механична повреда в уплътнението на буталото, причиняващо неговото затруднено движение при свиване на демпфера, замърсяване на дроселни отвори.

Данните от изпитанията се разпечатват във вид на протокол и се записват в архив с цел бъдещи справки. Данните могат да бъдат използвани и за софтуерна обработка за оптималното аранжиране на демпферите в ходовата част на съставите.

Общ изглед на стенда е показан на Фиг. 9 [4].

4. Стенд за изпитване на цилиндрични винтови пружини, подложени на комбинирано натоварване – идеен проект [5]

Предназначението на стенда е изпитване и изследване на поведението на ЦВП едновременно натоварени както по тяхната ос, така и напречно на нея. Подобно



Фиг. 9 [4] - Общ изглед на стенд за демпфери

натоварване на пружините е характерно за т.нар. „Flexicoil“ (гъвкава спирала) ресорни окачвания, намиращи все по-широко приложение в ПЖПС.

4.1. Механична система

Конструкцията на стенда (Фиг. 10) [5] включва фундамент от стоманени профили (1), хоризонтални направляващи (2), долна опора (3), вертикални направляващи (4), горна опора (5), сензор за осево (6) и напречно (13) преместване, главна хоризонтална греда (7), хидроцилиндър за осево (8) и напречно (12) натоварване, сензор за осева (9) и напречна (11) сила и вертикални колони (10).

Хоризонталните и вертикалните направляващи представляват линейни лагерни комплекти *SKF Quadro Linear Bearing Units*, имащи ниски стойности на съпротивление при движение.

4.2. Задвижваща система

Състои се от хидравлична станция с два независими хидравлична кръга и два хидроцилиндъра. Хидравличната станция се управлява чрез CAN връзка от управляващия софтуер. Хидравличните цилиндри са на фирмата ENERPAC, модел RC-1510 за осево натоварване с максимална сила 142kN и модел RC-55 за напречно натоварване с максимална сила 45kN. Максималното работна налягане за двата хидроцилиндъра е 70MPa.

4.3. Измервателна система

За измерване на осевата пружинна сила се използва сензор за сила HBM U3-100kN, който е изпълнен на тензометричен принцип с пълна мостова схема. За измерването на напречната пружинна сила се използва сензор за сила HBM U3-50kN с еквивалентна конструкция.

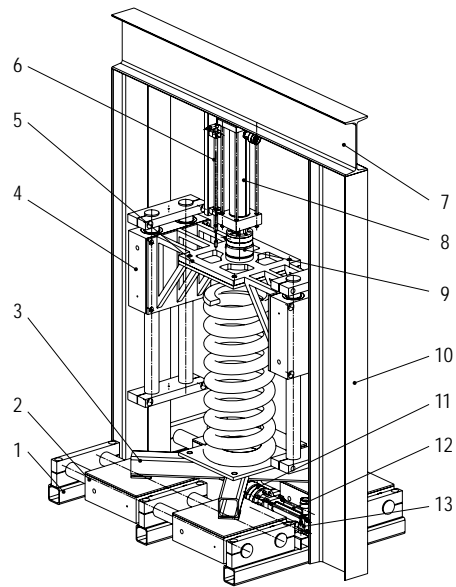
За измерване на деформацията на пружината се използват два сензора за преместване – един за деформацията по оста и един за деформацията напречно на оста. И двата сензора от серията HBM WA-L, като този за измерване на деформацията по оста е WA300MM-L, а този за измерване на деформацията напречно на оста е WA200MM-L. И двата сензора са изпълнени на индуктивен принцип с пълн индуктивен мост.

4.4. Регистрираща апаратура

Основните елементи, с които се регистрират и обработват сигналите от сензорите са универсален усилвател HBM QuantumX MX440A и IBM персонален компютър, към който е свързан усилвателят чрез LAN мрежа. Усилвателят е оборудван с 4 канала с възможност за индивидуално конфигуриране. Поддържа свързване тип пълн мост и полу-мост. Има 24-битов аналогово-цифров преобразувател на всеки канал за синхронизирано паралелно измерване. Както и нискочестотен филтър и TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) поддръжка.

4.5. Управляващ софтуер

Софтуерът е написан в средата на MATLAB, като се използва програмния интерфейс на HBM QuantumX за връзка с универсалния усилвател. Тъй като



Фиг. 10 [5] - Механика на стенд за Flexicoil пружини



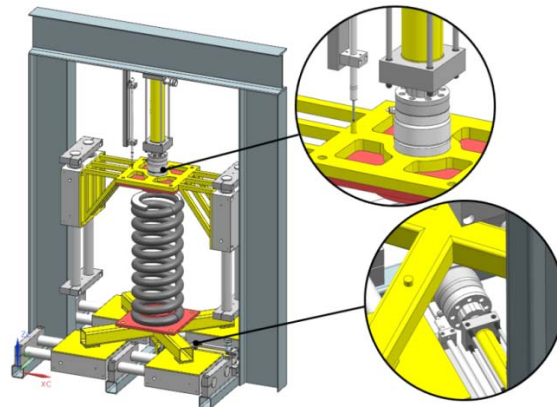
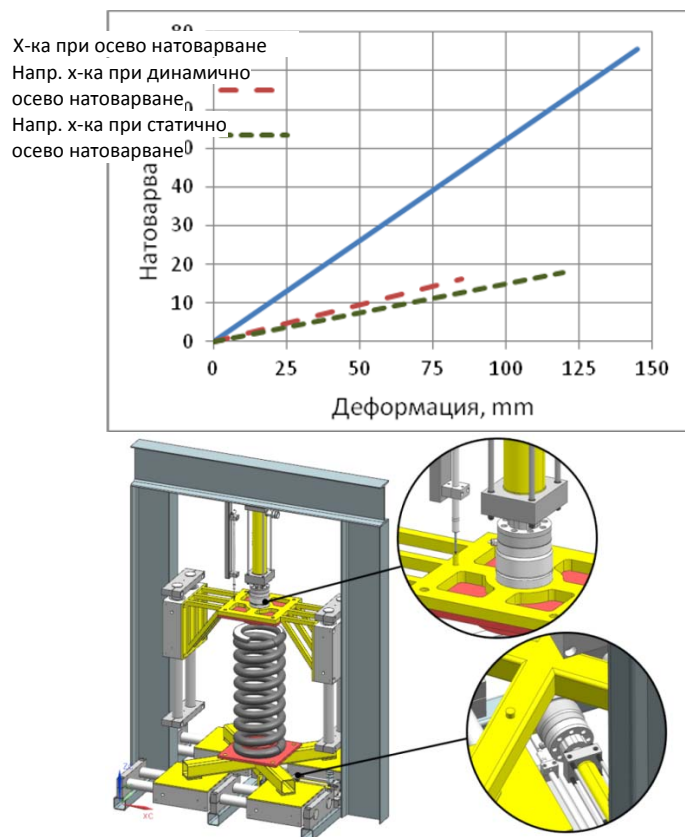
Фиг. 11 - HBM QuantumX MX440A

конкретният модел усилвател не поддържа CAN интерфейс, за управлението на хирдостанцията се използва PCI-to-CAN модул на фирмата PEAK System. Управлението на модула се постига чрез основния програмен интерфейс PCAN API.

4.6. Очаквани резултати

От теорията и литературните източници [6] е известно, че съществува зависимост на x -ката на пружината при напречно натоварване по отношение на нейното текущо осево натоварване, респективно деформация. Но тази зависимост се изменя с промяната на геометричните параметри на пружините (брой навивки, среден диаметър и диаметър на профила). Именно това изменение ще бъде изследвано с помощта на стенда, като се осъществят редица експериментални измервания и се извърши статистическа обработка на резултатите от тях. Примерни характеристики са дадени на Фиг. 12.

Общ изглед на стенда е даден на Фиг. 13 [5].



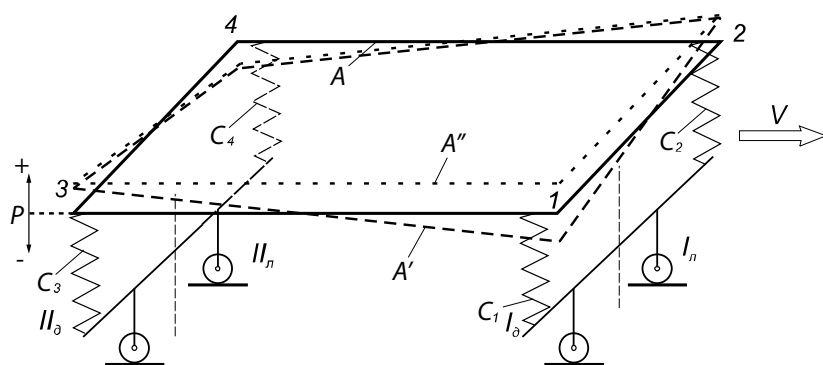
Фиг. 12 - Примерни x -ки на Flexicoil пружина Фиг. 13 [5] - Общ изглед на стенд за Flexicoil пружини

5. Аранжиране на еластичните ресорни елементи в ресорното окачване на ПЖПС

Правилното аранжиране на пружините в ресорното окачване, след като са снети техните характеристики, респективно коефициенти на еластичност (коравини), е от изключително значение за безопасността на движение на возилото. Известни са редица случаи на дерайлиране при ниски скорости на движение в следствие от неравномерно разпределено вертикално натоварване на колелата, което е известно като кососиметрично вертикално натоварване [7]. При него по-голямата част от вертикалният товар на возилото се поема от колелата, които са разположени диагонално едно спрямо друго по отношение на возилото (галигата). Останалите колела остават частично натоварени, като при квазистатичен режим на движение по

железния път едно от тях е възможно да остане напълно разтоварено, което води до предпоставка за неговото дерайлиране при минимални направляващи усилия. Еластичните елементи от ресорната система на колелата, поемащи по-голямата част от товара, в този случай имат най-високи коравини спрямо останалите елементи във возилото.

За избягването на подобно разтоварване на едно от колелата, ресорните елементи трябва да имат коефициенти на еластичност, които са в границите на допустимото отклонение и да бъдат подредени в ресорната система по такъв начин, че вертикалният товар да се разпределя максимално равномерно върху всички колела.



Фиг. 14 - Разпределение на вертикалния товар в/у колелата

На Фиг. 14 са дадени различни случаи на разпределение на натоварването P върху колелата. С плътна линия A е показан случай на идеално разпределен товар между колелата 1, 2, 3 и 4. Когато на лице е кососиметрично натоварване, разпределението

съответства на линия A' . Вижда се, че колелата 2 и 3, имащи ресорни елементи с коравини C_2 и C_3 , поемат по-голям товар, от колелата 1 и 4, имащи ресорни елементи с коравини C_1 и C_4 . Този случай съответства на следните неравенства (1) на коравините:

$$C_2 > C_1; C_2 > C_4; C_3 > C_1; C_3 > C_4 \quad (1)$$

Първият вариант за разпределяне на товара е ресорните елементи да се разпределят по нарастваща коравина ($C_1 > C_2 > C_3 > C_4$) по колелата в следния ред: $C_1 \rightarrow 1$; $C_2 \rightarrow 2$; $C_3 \rightarrow 3$; $C_4 \rightarrow 4$. Но в този случай ще се получи неравномерно разпределение на общия товар между леви и десни колела, както и постоянно разтоварване на колело 4 (Фиг. 14 – линия A''), което също е неблагоприятно за возилото.

Вторият вариант за разпределение на товара е ресорните елементи да се разпределят по нарастваща коравина ($C_1 > C_2 > C_3 > C_4$) по колелата в следния ред: $C_1 \rightarrow 1$; $C_2 \rightarrow 2$; $C_3 \rightarrow 4$; $C_4 \rightarrow 3$. В този случай ще се получи равномерно разпределение на товара между леви и десни колела, неравномерно разпределение между I-ва и II-ра колоос, но няма нито едно самостоятелно разтоварено колело. Съществува и вариант, при който елементите се разпределят по колелата в реда $C_1 \rightarrow 3$; $C_2 \rightarrow 4$; $C_3 \rightarrow 2$; $C_4 \rightarrow 1$, при който имаме подобен резултат, но с тази разлика, че разпределението на товара между I-ва и II-ра колоос ще бъде обратно. И отново няма да имаме нито едно самостоятелно разтоварено колело.

Съществува разработен софтуер, който е внедрен в стендове за изпитване на елементи от ресорната система на ЖП возила, намиращи се в локомотивно депо „София“, в локомотивно депо „Септември“ и др. Софтуерът позволява бързо и лесно да се определят местата на изпитаните елементи в ресорната система на возилата, като спазва логиката на аранжирането, описана по-горе.

6. Заключение

Въпреки че методите за снемане на характеристиките на ресорните елементи изглеждат прости, тяхното реално приложение изисква съчетаване на сложни устройства от различни области на техниката. Развитието в областта на стендовите

изпитвания продължава и до днес, като се използват най-различни конструктивни решения. Софтуерното управление вече е задължителен елемент от процеса, както и допълнителната софтуерна обработка на резултатите за решаването на конструктивни задачи и проблеми, причинили редица инциденти. Също така поддържането на електронни архиви с резултати от изпитанията дава възможност бързо и лесно организиране на ремонтни дейности, което от своя страна води до намаляване на времето за престой на ЖП возилата в ремонтите депа.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] John G. Webster, “The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook”, 1999 by CRC Press LLC
- [2] Simon Iwnicki, “Handbook of Railway Vehicle Dynamics”, 2006 by Taylor & Francis Group, LLC
- [3] Analog Devices, DATASHEET AD7938 ADC
- [4] N. Dodev, N. Nenov, E. Dimitrov, P. Karabashki, “Electronic Measurement and Registration System of Hydraulic Dampers Test Stand”, ISSE 2013 Proceedings, 2013
- [5] N. Dodev, N. Nenov, E. Dimitrov, V. Pavlov, “Electronic Measurement System of Flexi-coil Suspension Springs Test Stand”, ISSE 2014 Proceedings, 2014
- [6] Д. Атнаджова, „Към въпроса за определяне на силови характеристики на винтови пружини при напречно огъване“, Сборник доклади ТЕМРТ `96, 1996 – (D. Atmadzhova, „Kam vaprosa za opredelyane na silovi harakteristiki na vintovi pruzhini pri naprechno ogavane“, Sbornik dokladi TEMRT `96, 1996)
- [7] Т. Ружеков, Ц. Пенчев, Е. Димитров, „Теория и конструиране на железопътна техника“, Издателство на ВТУ „Тодор Каблешков“ София, 2011.

MODERN TRENDS IN TESTING TECHNIQUES OF ROLLING STOCK SUSPENSION ELEMENTS

Nikolay Dodev
nikolaydodev@gmail.com

***Todor Kableshkov University of Transport, Department of Transport Equipment,
158, Geo Milev Str., 1574, Sofia
BULGARIA***

Key words: suspension, sensors, testing, working condition.

Abstract: The presented paper is dedicated to the modern trends and solutions in the field of testing and evaluation of the elastic elements (springs) and damping devices of the rolling stock suspension system. The main focus of the paper is summary analysis of the testing techniques, constructions of testing benches and devices, and test results of actual samples. On the basis of the considered systems and the test results obtained in the tests appropriate conclusions and assessments are made.

The requirements for comfort and safety of passengers demand strict control on the elastic elements of the suspension of high speed rolling stock. This is undoubtedly related to conducting a regular bench testing of the elastic elements in order to obtain their characteristics, evaluate their working condition, their proper arrangement in the suspension after repairs and servicing and maintaining records of test results.

The latest developments in the field of electronic devices, sensors [1] and software control allow integration of systems that simulate loading of the suspension elements in their full working range with enough accuracy, fast and easy, and in this way to obtain their characteristics from which a conclusion about the working condition could be made.