

# АЛГОРИТЪМ ЗА ОБРАБОТКА НА СИГНАЛИ ОТ АКСЕЛЕРОМЕТЪР, ИЗМЕРВАЩ ДИНАМИКАТА НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО ВОЗИЛО-ПЪТ

## ALGORITHM FOR SIGNAL PROCESSING FROM AN ACCELEROMETER MEASURING DYNAMICS OF INTERACTION VEHICLE-RAILWAY TRACK

### АЛГОРИТМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ОТ АКСЕЛЕРОМЕТРА, ИЗМЕРЯЮЩЕГО ДИНАМИКУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА - ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

гл.ас инж. Йончев Е. Ив.<sup>1</sup>, доц.д-р инж. Милетиев Р. Г.<sup>2</sup>,  
проф. д-р инж. Арнаудов Р. Ив.<sup>3</sup>

Висше Транспортно Училище „Тодор Каблешков”<sup>1</sup>, Технически Университет – София<sup>2,3</sup>

**Резюме:** Използване стойността на ускорението за целите на диагностиката на определени детайли и възли широко се използва. При оценяване състоянието на системата возило-път в различните стандарти са зададени като гранични стойности ефективната и пикова стойности на ускорението. Получаваните сигнали от акселерометри монтирани на транспортни средства са с широк честотен диапазон, постоянна съставка и нежелан дрейф. Обикновено в повечето случаи полезният честотен спектър е в интервала 0-5Hz, а постоянната съставка и нежеланият дрейф трябва да бъдат отстранени. Всичко това налага да се извърши предварителна обработка на сигнала, след което да бъдат определени ефективната и пикова стойности на ускорението.

**КЛЮЧОВИ ДУМИ:** MEMS, ИНЕРЦИАЛЕН СЕНЗОР, АКСЕЛЕРОМЕТЪР, ФИЛТЪР

## 1. Въведение

Реакцията на отделно возило на неизправностите на пътя не винаги е пропорционално на амплитудата им. Най често тя е определена от характеристиките на окачването. Големи динамични сили се получават когато промяната в дължината на синусоидални неравностите в пътя се комбинира със скоростта на влака в резултат, на което се получава резонансен режим във возилото. Но те може да бъдат получени и от пространствени комбинации на неизправности в пътя от различен вид. За оценяване динамиката на возилата, пътя и тяхното взаимодействие има приети гранични стойности на ускоренията, измерени на определени места, и обработвани по определени алгоритми [1], [2]. Цел на настоящата статия е да покаже необходимата обработка на сигналите от акселерометър преди да бъдат изчислени ефективната и пикова стойност на ускоренията, дефинирани в различните стандарти. Тези стойности се използват като прагови в различни системи за контрол на возилата и пътя [3], [4], [5].

## 2. Предпоставки и начини за разрешаване на проблема

### 2.1. Честотни съставки в сигнал от акселерометър

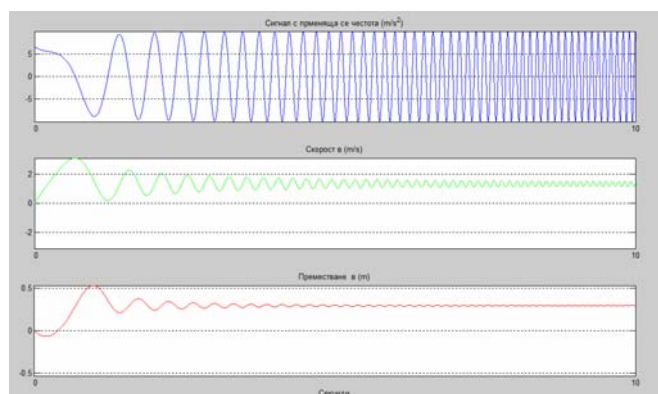
При преминаване на возило през наставите на релсите се получават високочестотни вибрации. Тези компоненти в сигнала от акселерометъра получени от «плаващи» настави, удари и нелинейни елементи в окачването са по малко важни от резонансните явления при движението на возилото, но те са с преобладаващи амплитуди при определянето на ефективните и пиковите стойности на сигнала, затова трябва да бъдат взети мерки за тяхното отстраняване. Ако използваме преобразуването на Фурие може да получим големината на отделните честотни съставки на сигнала. От основните му свойства [6] следва, че диференцирането във времевата област е еквивалентно на умножение с кръговата честота

$\omega = 2\pi f$  в честотната област,  $\frac{d}{dt}x(t) \leftrightarrow (j2\pi f)X(f)$

и за втората производна съответно

$\frac{d^2}{dt^2}x(t) \leftrightarrow (j2\pi f)^2 X(f)$ , където  $x(t)$  е

преместването във времевата област, а  $X(f)$  е големината на съответната съставка в честотната област. Като се вземе предвид, че ускорението е втора производна на преместването, се получава, че големината на ускорението е пропорционално на амплитудата на преместването за съответната честотна съставка умножена с нейната честота повдигната на квадрат. Това е демонстрирано на Фигура 1 със симулиран сигнал с постоянна амплитуда и с линейно изменяща се честота, разгледан в определен период от време. За да се покаже преместването предизвикало съответното ускорение и скоростта е извършено цифрово интегриране на ускорението[7].



Фиг.1 Графика на ускорение с постоянна амплитуда и променлива честота, съответстващата скорост, и преместване

### 3. Решение на проучения проблем;

При интегрирането е от съществено значение да се премахне постоянната съставка и дрейфа в сигнала от акселерометъра. За целта в настоящата статия е използван високочестотен рекурсивен филтър от втори ред с предавателна характеристика:

$$(1) \quad Y_n = C_1(X_n - X_{n-1}) + C_2 Y_{n-1}$$

където константите  $C_1$  и  $C_2$  се изчисляват с изразите [8]

$$(2) \quad C_1 = \frac{1}{1 + \tan(\pi F_c T)},$$

$$C_2 = \frac{1 - \tan(\pi F_c T)}{1 + \tan(\pi F_c T)}$$

В изразите  $F_c$  е честотата на среза,  $T$  е периода на дискретизация.

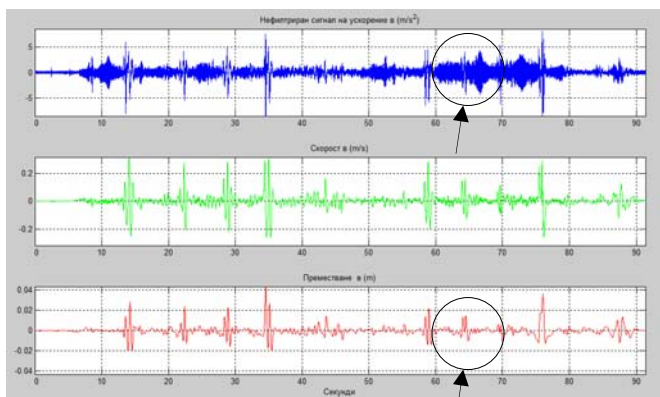
Високочестотният филтър е реализиран в MATLAB с функцията **filter** [9], чиято обща формула има вида:

$$(3) \quad Y_n = b_1 X_n + b_2 X_{n-1} + b_3 X_{n-2} + \dots - a_2 Y_{n-1} - a_3 Y_{n-2} - \dots$$

Чрез промяна на константите  $b_1, b_2, \dots, b_n$  и  $a_1, a_2, \dots, a_n$  може да се конструира произволен филтър – високочестотен, нискочестотен, лентов и пр. от различен ред. Задавайки във формула (3)  $b_1=C_1, b_2=-C_1$  и  $a_2=-C_2$  се изпълнява желаната формула (1) на рекурсивния високочестотен филтър. За честота на среза е приета 0.4Hz.

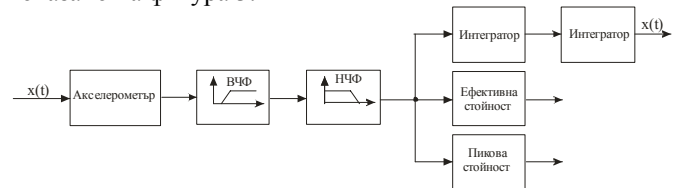
### 4. Резултати и дискусия;

Сигнал получен от акселерометър монтиран на превозно средство е представен на фигура 2. Акселерометърът е тип LIS3LV02DQ, производство на фирма ST. Честотата на дискретизация на сигнала в акселерометъра е 640Hz, а работният му обхват е  $\pm 6g$ . В заграденият с окръжност участък са показани две еднакви амплитуди на сигнала от акселерометъра. Посредством интегриране на нефилтрираният сигнал са намерени съответстващата скорост и преместване. От получените резултати се забелязва, че на втората амплитуда на ускорението, съответства много малко преместване и скорост. Това е показано на третата графика на фигура 2.



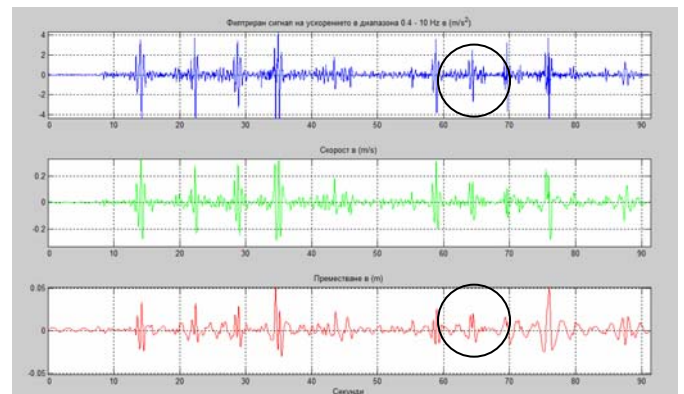
Фиг.2 Графика на сигнал от акселерометър и съответстващите скорост и преместване

От формата на нефилтрираният сигнал се вижда, че вертикално ускорение съответстващо на голямо преместване може да бъде маскирано от високочестотни съставки в сигнала, на които съответстват малки премествания. Ако сме приели да оценяваме големината на преместването само по амплитудата на полученото ускорение, без предварителната обработка на сигнала, това би довело до грешка. Поради това се въвежда изискването за ограничаване на честотната лента на сигнала, с цел да се премахнат честотните съставки съответстващи на малки премествания. В транспортните средства повечето от динамичните събития са с честота в интервала  $0 \div 5$  Hz. В настоящата статия честотата на среза на нискочестотния филтър е приета да бъде 10 Hz. Алгоритъма може да се онагледя графично, както е показано на фигура 3.



Фиг.3 Графика на алгоритъма за обработка на сигнала

На фигура 4 е показан резултата от прилагане на горният алгоритъм. Вече има пряка зависимост между амплитуда на ускорението, амплитуда на скоростта и амплитуда на преместването.

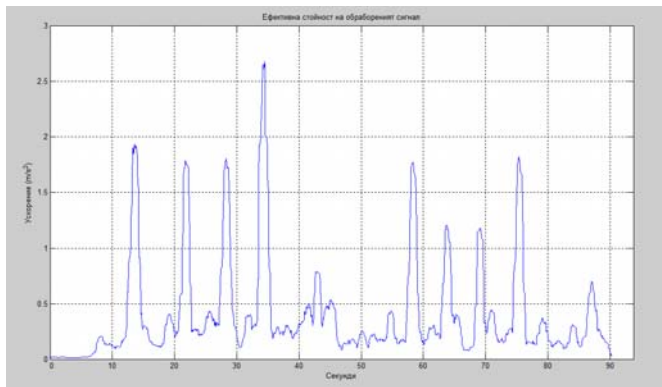


Фиг.4 Графика на филтриран сигнал от акселерометър и съответстващите скорост, и преместване

След като е получен филтрираният сигнал може да се определи неговата ефективна и пикова стойност и съответно съпоставят със зададените в стандартите стойности. Ефективната стойност е положителна и отразява големината на периодичните промени в

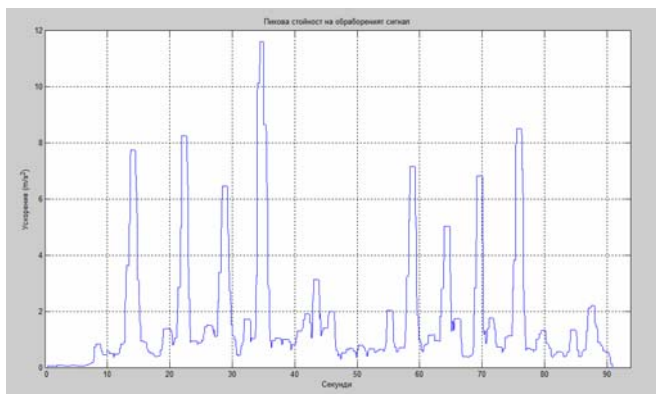
сигнала. Тя се определя с израза:  $X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)}$ ,

където  $N$  са броя на отчетите. В някои от стандартите се задава и продължителността на прозореца, който се използва за изчислението й. Например в [1] е приет прозорец с продължителност от 4 секунди. На фигура 5 е показана получената ефективна стойност на филтрираният сигнал. Продължителността на прозореца в този случай е 1 секунда.



Фиг.5 Графика на ефективната стойност на филтрираният сигнал

Пиковите стойности са положителни и отразяват големината на екстремните стойности на сигнала. Изчислява се като алгебрична разлика между максималната и минималната стойности на сигнала в прозорец с определена продължителност. В [1] има изискване продължителността на пика да не е по-малка от 50ms и продължителността на прозореца да е 1 секунда. На фигура 6 е показана получената пикова стойност на филтрираният сигнал. Продължителността на прозореца е 1секунда.



Фиг.6 Графика на пиковата стойност на обработен сигнал

## 5. Заключение;

Разгледаният алгоритъм за предварителна обработка на сигнали от акселерометър позволява да се елиминират неинформативните компоненти от него и да се премахне дрейфа на нулата. От така полученият сигнал вече може да се определят ефективната и пиковата стойност и те да бъдат използвани за сравнение с праговете зададени в съответните стандарти. В някои европейски стандарти се дефинират гранични стойности на ускоренията и честотните ленти, в които те се измерват, в зависимост от това къде ще бъдат приложени. И в този случай алгоритъма е приложим, като е необходимо само промяна параметрите на съответните филтри.

## Благодарност

Тази статия беше подготвена с финансовата подкрепа на Националният фонд „Научни изследвания“ с договор No.ДТК02/2-2009.

## 6. Литература

1. John J Mardente, Passenger safety vehicle track interaction task force, Report to the 34th Meeting of the Railroad Safety Advisory Committee (RSAC), February 20, 2008
2. International union of railways, UIC 518: Test and approval of railway vehicles from the points of view of dynamic behaviour, safety, track fatigue, and ride quality. Leaflet, Paris, France, 1995.
3. H. Tsunashima, T. Kojima, Y. Marumo, A. Matsumoto and T. Mizuma, Condition monitoring of railway track and driver using in-service vehicle
4. Tom Tsai, Developed Wheel and Axle Assembly Monitoring System to Improve Passenger Train Safety accelerometers, US Department of Transportation Federal Railroad Administration, RR00-02, March 2000
5. Patrick Ackroyd, Steven Angelo, Boris Nejikovskiy, Jeffrey Stevens, Remote ride quality monitoring of acela train set performance, 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference, Washington, DC, April 23-25, 2002
6. Опенхайм Алън, Уилски Алън, Ъънг Ян, Сигнали и системи, Техника, София, 1993г.
7. John H. Mathews, Kurtis D. Fink, Numerical Methods Using MATLAB, Third Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458
8. Христов Ивайло И., Двупосочен високочестотен рекурсивен филтър за подтискане на дрейфа на изоелектричната линия, Електроника и Електротехника, Е+Е, 1-2/2004, стр. 43-50
9. The MathWorks, Inc. , Signal Processing Toolbox™ 6 User's Guide, Copyright 1988–2010