

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

маг. инж. Даниел Здравков Иванов

**„ИЗСЛЕДВАНЕ СПИРАЧНИ КАЧЕСТВА НА
АВТОМОБИЛ С ДВИГАТЕЛИ С ВЪТРЕШНО
ГОРЕНЕ“**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “доктор”**

Варна
2025г.

Дисертационният труд съдържа 172 страници, включително 96 фигури, 19 таблици, 120 формули, оформени в 5 глави, изводи, заключение, научно-приложни приноси и списък на използваната литература от 116 заглавия, от които 11 на кирилица и 105 на латиница.

Номерацията на фигурите представени в автореферата е номерацията от дисертационния труд.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на Г. от Ч. в на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №/..... Г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се в Докторантски център, стая 318 НУК.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Актуалност на проблема

Съществен елемент на пътната безопасност представляват изследванията и анализа на процеса спиране на автомобила. По отношение на пътната безопасност от изключително значение са неговите параметри в режим на екстремни спирания. В тази връзка повишаването на ефективността на спирачните системи представлява основна насока за развитие по отношение предотвратяване на пътнотранспортни произшествия и минимизиране на щетите от тях. Тенденциите за подобряване поведението на автомобила в критични ситуации, препоръките на регионални и международни регулации изискват автомобилите да бъдат оборудвани с автоматизирани системи за подпомагане на водача, осигуряващи ранно предупреждение и независимо въздействие върху спирачната система с цел съкращаване времето за реакция на водача. Изходна база за развитието на тези системи представляват данните получени при експериментални изследвания за действителните параметри и фази на процеса спиране. Наличието на актуална информация за работата на съвременните спирачни системи е необходимо условие за оптимизацията на управлението на системите, осигуряващи безопасност на движението и транспортните технологии.

Цел и задачи на дисертацията

Настоящият дисертационен труд има за цел да изследва процеса на екстремно спиране на автомобил и да се определят параметрите на отделните фази, както и да се изследва влиянието на колебателните процеси в спирачната система върху параметрите на отрицателното ускорение на автомобила.

Реализирането на поставената цел изисква решаването на следните основни задачи:

1. Да се създаде експериментална установка за прецизни високочестотни измервания на процесите при екстремни спирания на автомобил, позволяваща прецизиране на граничните условия на съответните фази на спиране.

2. Да се разработи методика за структуриране на данните от експерименталните изследвания и за предварителна обработка на резултатите от измерванията и да се оптимизират параметрите на процеса на изглаждане.

3. Да се разработи метод за определяне на действителните фази на процеса спиране по характеристиките на експериментално получени данни за отрицателното ускорение на автомобила.

4. Да се регистрира характера на изменение на спирачното закъснение при различни начални скорости в момента на задействане на спирачната система и включена система за управление на спирачния момент.

5. Да се изследват началните условия, границите и продължителността на фазите на спиране, както и характеристиките на надлъжното ускорение на автомобила.

6. От експерименталните изследвания да се определят параметрите на действителните фази на екстремно спиране на автомобил при пътни изпитания в реални условия на движение.

7. Да се изследват колебателните процеси за отделните фази при спиране и се определят амплитудите на основните хармоници в характеристиките на отрицателното ускорение.

Обект и предмет на изследване

Обекта на експерименталното изследване е процесът на спиране на автомобили с двигатели с вътрешно горене и хибридна схема на задвижване. Анализирани са развитието на отрицателните ускорения по време на екстремни спирания и са анализирани параметрите на отделните фази, както и спектърът на хармоничните съставляващи характеризиращи колебателните процеси по време на спирането.

Методи на изследване

Използвани са специализирани измервателни уреди за регистриране и е разработена експериментална установка за синхронно високочестотна регистрация на данни при изследване на динамични процеси.

При обработката на получените експериментални резултати и анализирането им са използвани математични методики, включващи разработени компютърни програми за предварителна и последващи обработки на експерименталните данни. Разработена е методика за определяне на границите на отделните подпериоди чрез производни от висок порядък и анализ на отстоянията на пресечните точки на регресионните линии. Разработени са методики за спектрален анализ на колебателните процеси.

Място на изследване

Теоретичните и експерименталните изследвания необходими при разработването на дисертацията са проведени в катедра „Транспортна техника и технологии“.

Практическа ползност и приложимост

Извършените изследвания създават данни за поведението на автомобила в процеса на спиране. Получената информация за развитието на отрицателното ускорение се използва за усъвършенстване на спирачните системи на автомобилите

и развитие на автоматизирани системи за подпомагане на водача и повишаването на пътната безопасност.

Апробация на изследването

Основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

- 58-ма НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ на Русенски университет „Ангел Кънчев“ 2019, ISSN 2603-4123 – 1 публикация;
- 59-та НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ на Русенски университет „Ангел Кънчев“ 2020, ISSN 2603-4123 – 1 публикация;
- 60-та НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ на Русенски университет „Ангел Кънчев“ 2020, ISSN 2603-4123 – 1 публикация;
- 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering, EE and AE 2022, Ruse, ISBN 978-166540709-0, - 1 публикация;

Публикации по дисертационния труд

Написани са общо четири доклада, публикувани в четири научни сборника от научно-технически конференции с международно участие. Един доклад е самостоятелен, а останалите са в съавторство.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Въведение

Основните изисквания на които трябва да отговарят съвременните автомобили са по отношение на тяхната екологична и пътна безопасност. Екологичната безопасност касае всички въпроси свързани с производството и експлоатацията на автомобилната техника, добива и логистиката на експлоатационните материали както и устойчивостта на технологиите за рециклиране. Пътната безопасност представлява изключително широк кръг от мероприятия включващи условия и състояния на пътната инфраструктура, техническото състояние на превозните средства, квалификацията и уменията на водачите, системите за устойчивост и контроли много други. Съществен елемент на пътната безопасност представляват изследванията и анализа на процеса спиране на автомобила. По отношение на пътната безопасност от изключително значение са неговите параметри в режим на екстремни спирания. В тази връзка повишаването на ефективността на спирачните системи представлява основна насока за развитие по отношение предотвратяване на пътнотранспортни произшествия и минимизиране на щетите. За подобряване поведението на автомобила в критични ситуации, регионални и международни регулации изискват автомобилите да бъдат оборудвани със системи за подпомагане на водача, осигуряващи ранно предупреждение и независимо въздействие върху спирачната система с цел съкращаване времето за реакция на водача. Всички тези

дейности по развитието на автомобилната техника осигуряват подобряване на параметрите на процеса спиране.

Многообразието от факторите, които определят този процес е изключително голямо, като те могат да бъдат обособени в различни групи, като субективни фактори, метеорологична обстановка, характеристики на еластичните колела и гумите, конструкция на спирачната система и експлоатационно състояние на елементите формиращи спирачния момент.

Ефектът от мероприятията по усъвършенстване на спирачните системи и техните елементи се усъществява в лабораторни, стендови изпитвания и при пътни изпитвания. Работата на елементите от спирачната система се изпитват основно при стендови изпитвания, където могат да бъдат реализирани екстремни условия на работа. Комплексната работа на цялата спирачната система, включително и системите за управление, устойчивост и безопасност се изпитват при пътни изпитвания, където може да бъде направена комплексна оценка на съвместната работа на системите и общото влияние на всички останали фактори въздействащи върху процеса на екстремно спиране на автомобила.

ГЛАВА I. ДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ В РАБОТАТА НА СПИРАЧНАТА СИСТЕМА ПРИ СПИРАНИЯ НА АВТОМОБИЛА

1.1 Спиране на автомобила:

Една от основните характеристики при движение на автомобила в урбанизирана среда е безопасността на движение и осигуряване на безопасни условия за намаляване на скоростта и екстремни спирания. Екстремното спиране е процес, при който водачът предприема спиране чрез задействане на спирачната уредба с максимално въздействие на спирачния педал.

Процесът на спиране представлява движение на превозното средство при наличие на отрицателно ускорение, т.е. движение на превозно средство, при което неговата скорост намалява.

Абсолютната стойност на отрицателната проекция на ускорението на масовия център на автомобила върху единичния вектор на директрисата на скоростта представлява абсолютната стойност на производната на скоростта по времето или

$$J = |a_t| = \left| \frac{dV}{dt} \right| \quad (1.1)$$

Тук $|a_t|$ е абсолютната стойност на проекцията на ускорението на масовия център на автомобила, V – надлъжна скорост.

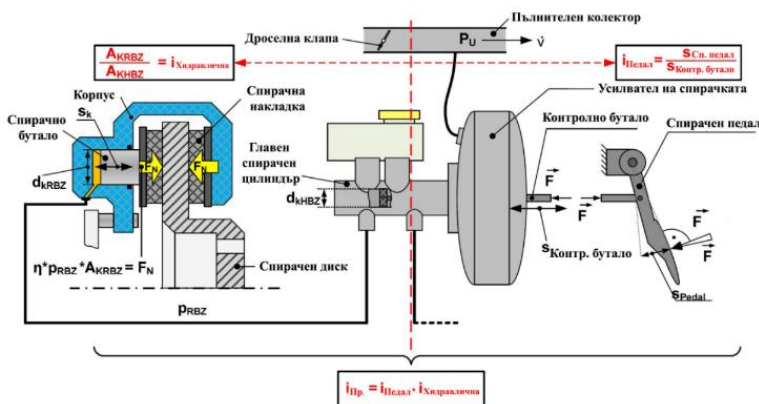
При известно завъртане на автомобила при спирането му различните точки от него имат различно ускорение. Спирачното ускорение в случая представлява

абсолютната стойност на тангенциалното ускорение на масовия център на автомобила.

Прието е да се счита, че в този случай автомобила достига максимално по абсолютна стойност отрицателно ускорение или максимално спирачно закъснение.

1.2 Спирачна система с дискови спирачни механизми.

Спирачната система е основен структурен компонент в системите за пътна безопасност на автомобила. Основна нейна задача е да „намали“ или „поддържа“ скоростта на автомобила, преобразувайки кинетичната енергия в топлинна енергия. Дисковите спирачни механизми са се наложили като спирачки на колелата в автомобилната конструкция както на предната, така и на задната ос. Основните функционални елементи са спирачният диск, спирачните накладки и спирачния цилиндър на колелото.



Фиг.1.5 Принципна схема на спирачна система на автомобил [18].

На фиг. 1.5 е показана схема на конвенционална хидравлична спирачна система. Основните компоненти на спирачната система на превозното средство включват педалния механизъм със спирачния педал, усилвателя на спирачките (ВКВ), главния спирачен цилиндър (НБЗ), хидравличен модул с ABS и ESP модулатор (не е показан на схемата) и спирачен механизъм на колелото. При задействане, педалът на спирачката преобразува силата на крака в сила на задействане на буталото за управление на усилвателя ВКВ. Следва пневматично нарастване на силата върху управляващото бутало на главния спирачен цилиндър.

При конструкция с плаващ сателит след задействане на вътрешното бутало първоначално се премества вътрешната накладка до възникване на контакт между накладката и триещата се повърхност на диска. Едва тогава се извършва аксиално преместване на външната, заедно с корпуса, към външната триеща се повърхност на диска. Най-разпространена е конструкцията с плаващ спирачен сателит. Фиксираните апарати се използват главно в сегмента на премиум и спортните

автомобили с по-сложни конструкции на шасито и по-високи изисквания към спирачките [32].

1.3 Остатъчен спирачен момент

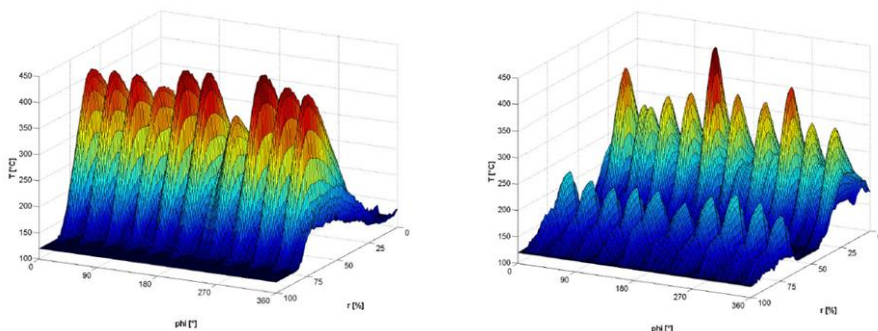
По време на фазата на спиране кинетичната енергия на автомобила се преобразува в топлинна енергия. Във фазата след спиране, накладките трябва да бъдат напълно отделени от диска, за да се предотврати развитието на сили на триене след спиране и моменти от тях (RBM) и по този начин на локално износване на диска. На практика това изискване означава спирачните накладки да бъдат отдалечени на достатъчно голямо разстояние от диска, което от своя страна противоречи на изискването за минимални хлабини в спирачната система за намаляне времето за реакция на механизма при аварийни спирания. До каква степен и с каква интензивност възниква фрикционен контакт между диска и накладката във фазата след спиране зависи от отклонението на ротацията на диска от геометричната равнина на въртене. Две решаващи, характерни променливи за това са:

1. аксиалното биене на спирачния диск;
2. резултантното разстояние между накладката и диска.

Аксиалното биене на спирачния диск има статични и динамични компоненти.

1.4 Колебания в характеристиката на спирачния момент

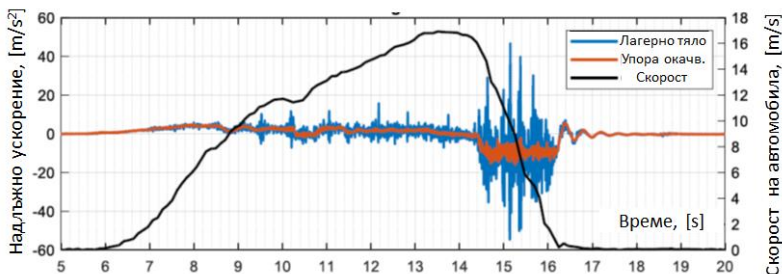
Изпитанията на спирачните дискове на SUV (Sport Utility Vehicle) автомобили показват, че разпределението на температурите е неравномерно и в радиално направление. Резултатите при изследвания в стендови условия са получени при скорост 160 km/h, спирачен момент 310 Nm и приблизително 30 секунди след началото на спирането. Началната температура на спирачния диск е 100°C. В края на процеса температурните колебания във външната и вътрешната страна на спирачния диск достигат до около 300°C.



фиг.1.22 Разпределение на температурата от външната (а) и вътрешната (б) страна на спирачния диск [18].

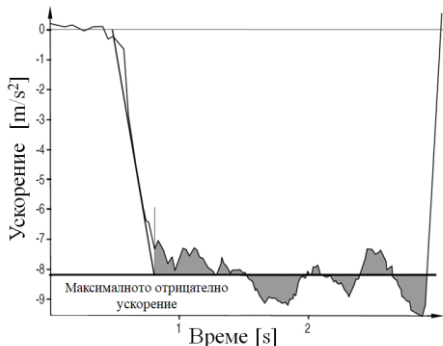
1.5 Колебателни процеси в характеристиките при спиране на автомобила

На графиките са показани моментните стойности на надлъжното ускорение в точките на измерване. Анализът на графиката показва разлики в характера на изменение на ускорението без и с включено управление на антиблокиращата система. При екстремните спирания, след момента на задействане на спирачната система, се отчитат значителни високочестотни отклонения в моментните стойности на ускорението във всички фази на процеса, фиг.1.30.



Фиг.1.30 Екстремно спиране от скорост $v_a = 60 \text{ km/h}$

Посочената на фиг.1.2 в дисертационния труд графичната зависимост на спирачното закъснение във времето представлява идеализирана характеристика и се използва за целите на реконструкцията на движението и теоретични изследвания на процеса спиране. Допущането, че спирачното закъснение по време на задействане на спирачната уредба е нула, след това то нараства линейно за времето на нарастване на спирачното закъснение, има постоянна стойност по време на движението с максимално спирачно закъснение, не се потвърждава при експерименталните изследвания. Графиката на ускорението на автомобила образува криволинеен трапец с абсисната ос.



Фиг.1.32 Средна стойност на максималното отрицателно ускорение

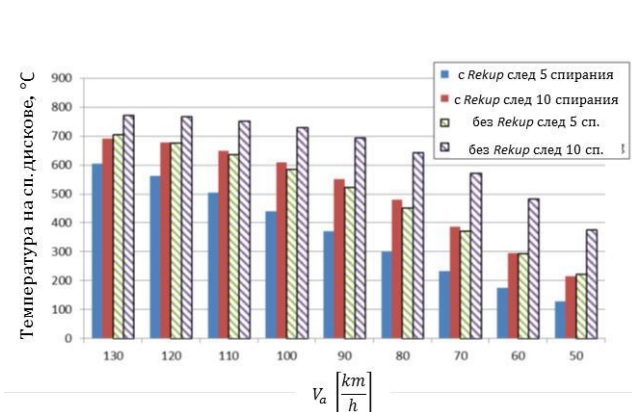
Поради наличието на редица колебателни процеси в спирачната система,

породени от конструктивни, технологични и термодинамични фактори, нарастването на отрицателното ускорение до максимална стойност на коефициента на сцепление не се изменя по строго линеен закон. Системата за управление на приплъзването на автомобила контролира поведението на коефициента на сцепление μ_b и го поддържа в оптимални граници. При този процес се получават пулсации в налягането на хидравличната течност, които предизвикват променливи спирачни сили и колебания в стойностите на отрицателното ускорение на автомобила.

1.6 Рекуперативен спирачен момент при автомобили с хибридно и електрическо задвижване.

Наличието на акумулатор в задвижващите системи на хибридните автомобили дава възможност за възстановяване на част от кинетичната енергия на автомобила по време на процеса на спиране (рекуперация). Наличието на възможност за рекуперация създава добри условия за намаляне износването на спирачните дискове и спирачните накладки.

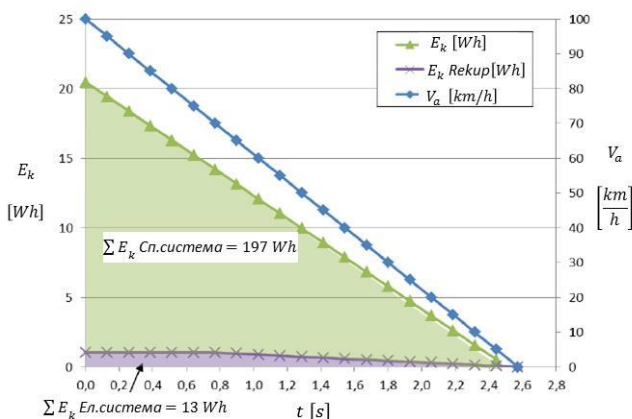
На фиг.1.34 е дадено разпределението на кинетичната енергия на автомобила между спирачната система и електрическата част от задвижването при работа в генераторен режим, по време на пълно спиране с отрицателно ускорение около $1,1g$ от скорост 100 km/h . Направените изследвания в [101] показват, че около 6.2% от общата кинетична енергия могат да бъдат преобразувани от електрическото задвижване. Останалата част от кинетичната енергия се абсорбира от спирачната система.



Фиг.1.33 Температура на спирачните дискове при спирания от различни начални скорости [101].

Допълнителният спирачен момент от рекуперацията създава добри условия за постигане на по-големи отрицателни ускорения през всички периоди от процесите

на екстремно спиране и разтоварва термично работата на спирачните апарати на основната спирачна система.



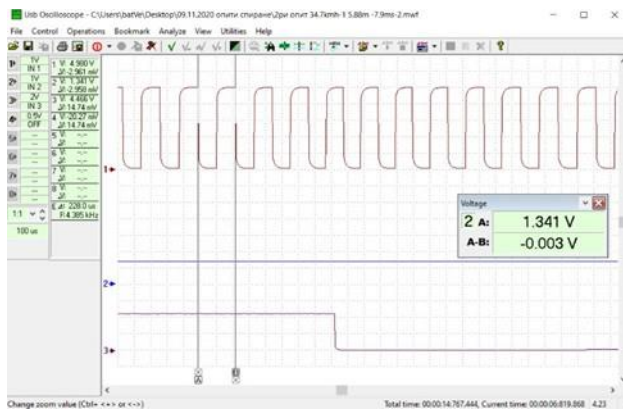
Фиг.1.34 Разпределение на кинетичната енергия между спирачната система и електрическата част от задвижването [101].

ГЛАВА II. СИТЕМА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

2.1 Сензор на преместване

Основните предимства на този вид сензори, поради което те се използват широко при провеждането на прецизни експериментални изследвания са, че при движение те запазват постоянен кинематичен радиус, защото не са натоварени с въртящ и спирачен момент и преплъзването спрямо пътя е в минимални граници и не се отразява върху точността на измерване. Специално за целите на експеримента е предвидена допълнителна възможност за регистрация на първични сигнали. Изходния сигнал от сензора е във вид на правоъгълни импулси на напрежение в реално време, чийто период отразява времето за една елементарна стъпка от преместването на автомобила. Един импулс регистрира преместването с дължина 2 mm (2.10-3 m). Броят на импулсите за един пълен период от завъртането е равен на 1080.

Сензорът осъществява контакт с пътя посредством еластично колело и пневматична гума. Тази технология за регистрация за преместване на автомобила осигурява висока точност при различни пътни условия, дори и обслужени като екстремни температури, сняг, дъжд, мокра писта с воден слой.



Фиг. 2.2 Правоъгълни импулси генерирани от сензора за преместване

Препоръчва се петото колело да работи аксиално, монтирано странично на задните колела на автомобила. Схема на закрепване на петото колело чрез фиксиращ възел за изследваните автомобили е показана на фиг.2.4. Работата на сензора за преместване е свързана с необходимост от мониторинг на състоянието. Експлоатационните фактори, които могат да доведат до влошаване на точността на измерването се отнасят до налягането на въздуха в еластичната гума и състоянието на протектора. Необходимо е налягането да бъде проверявано преди и след провеждането на експеримента и да се поддържа съгласно техническите характеристики. Износването на протектора може да бъде компенсирано единствено чрез повторно калибриране.



Фиг.2.4 Закрепване посредством фиксиращ възел

Параметрите осигуряващи точност на резултатите от калибрирането на сензорите за преместване съгласно цитирания стандарт са дадени в таблица 2.2.

Таблица 2.2

	Параметър	Номинална стойност	Актуална стойност	Размерност
1	Скорост	<10	4	km/h
2	Налягане	5±1	5,1	bar
3	Дълбочина на протектора	-0,5*	1,4	Mm
4	Сила на притискане	100±40	91	N
5	Монтажна височина	30-70	42	cm

2.2 Обект на изследване

Основните параметри на процесите на спиране на автомобила са получени при експериментални изследвания на два автомобила от еднакъв клас и с подобни технически характеристики. За оценка влиянието на задвижващата система на автомобила върху параметрите на процеса спиране и развитието на отрицателното ускорение, двата автомобила са с различна схема на задвижване.

Автомобил Toyota Avensis II 1.8 е оборудван с класическа схема на задвижване с двигател с вътрешно горене, сух триещ съединител и механична предавателна кутия. Спирачната система на автомобила отговоря на стандартните изисквания и е конфигурирана с пневматичен усилвател на спирачните сили.

Автомобил Toyota Corolla Cross 1.8 е с хибридно задвижване тип FHEV (Пълен хибрид) и автоматична предавателна кутия. В състава на спирачната система е включен хидравличен усилвател на спирачните сили.

ГЛАВА III Методики за обработка на експерименталните данни и метод за определяне на фазите на процеса спиране

3.1 Модифициране на масивите за положението на съединителя, спирачния педал и педала за горивоподаване.

Данните от сигналите на сензорите за положението на съединителя и спирачния педал се разглеждат в затворени интервали. Във всеки подинтервал се регистрират събитията, за включване и изключване, чрез времеви репер, с цел идентификация положението на съответните педали. При липса на събитие в произволен подинтервал, на идентификаторът се присвоява нулева стойност. По този начин във векторите на сигналите, от съответния сензор, се получават нулеви стойности.

$$M_p = \begin{cases} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{last}(M_p) \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } M_{p_i} \neq 0 \\ M_{p_k} \leftarrow M_{p_i} \text{ if } M_{p_i} \neq 0 \end{array} \right. \end{cases} \quad (3.3)$$

където M е масив с данни на сигналите на p -тия сензор.

Приложен за положението на педала на съединителя и спирачния педал се получават вектори с различни дължини, определени от режимите на движение на автомобила преди задействане на спирачната система. В тези случаи програмните цикли имат вида:

$$\begin{aligned} M_{Kplein} &= \begin{cases} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{last}(M_{Kplein}) \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } M_{Kplein_i} \neq 0 \\ M_{Kplein_k} \leftarrow M_{Kplein_i} \text{ if } M_{Kplein_i} \neq 0 \end{array} \right. \end{cases} \\ M_{Kplaus} &= \begin{cases} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{last}(M_{Kplaus}) \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } M_{Kplaus_i} \neq 0 \\ M_{Kplaus_k} \leftarrow M_{Kplaus_i} \text{ if } M_{Kplaus_i} \neq 0 \end{array} \right. \end{cases} \\ M_{Brems} &= \begin{cases} k \leftarrow -1 \\ \text{for } i \in 0 \dots \text{last}(M_{Brems}) \\ \quad \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + 1 \text{ if } M_{Kplein_i} \neq 0 \\ M_{Brems_k} \leftarrow M_{Brems_i} \text{ if } M_{Brems_i} \neq 0 \end{array} \right. \end{cases} \end{aligned} \quad (3.4)$$

За коректната работа на процедурата за обработка на сигналите за положението на съединителя е необходимо да се анализират началните условия на процеса. Възможни са следните случаи:

1. Векторите M_{Kplein} и M_{Kplaus} са с произволни, но еднакви дължини. Началото на процеса е при изключен съединител, т.е. високо ниво на сигнала. В този случай на вектора K_{pl} се присвояват стойности от процедурата, описани в първата част на програмния цикъл (3.4). Въвежда се показателят τ , който заема стойности $\tau \leftarrow 1$ при $M_{Kplein_0} > M_{Kplaus_0}$ и $\tau \leftarrow 0$ при всички останали случаи. При отсъствие на този показател в процедурата и граница на цикъла равна на $\text{last}(M_{Kplaus})$, последното изключване не се регистрира.

2. Началото на процеса е при включен съединител, т.е. ниско ниво на сигнала. Дължината на вектора $M_{Kplein} < M_{Kplaus}$. В този случай на вектора K_{pl} се присвояват стойности от процедурата, описани във втората част на програмния цикъл.

3.2 Методика за идентификация на извадките и границите на периодите в числовите вектори.

Сигналите от сензорите, получени при измерванията, се регистрират синхронно в реално време и в масивите с данни се записват стойности с точност, еднаква с тази на честотата на дискретизация. Двете граници на периода на физическа реакция на водача и долната граница на периода за реакция на спирачната система, се регистрират от сигналите на сензорите. Точността и броя на значещите цифри след десетичната точка е еднаква с тази на зададената честота на семплиране.

Диапазоните на областите, в които се намират границите на останалите периоди, с изключение на момента на окончателно спиране на автомобила, се определят чрез изследване на функцията на ускорението чрез производни от по-висок порядък. Получените при това изследване стойности, се намират в непрекъснати времеви интервали, поради което в масивите с данни не се открива математическо съвпадение на границите на извадката при тяхната идентификация. Необходимо е да се извършат приближения от вида

$$\text{floor}\left(\frac{t_{ia}}{\Delta\alpha_i}\right) \quad \text{и} \quad \text{floor}\left(\frac{t_{ie}}{\Delta\alpha_i}\right) \quad (3.9)$$

където $\text{floor}\left(\frac{t_i}{\Delta\alpha_i}\right)$ е функция, определяща индикатора на съответната граница, при което са в сила равенствата

$$v_{x \text{ floor}\left(\frac{t_{ia}}{\Delta\alpha_i}\right)} = t_{ia} \quad \text{и} \quad v_{x \text{ floor}\left(\frac{t_{ie}}{\Delta\alpha_i}\right)} = t_{ie} \quad (3.10)$$

Ако при тази операция броя на математичните съвпадения е повече от единица, то за идентификационна стойност на границата на извадката от масива с данни се взема медианната стойност на числовата редица. В средата на системата за обработка на данни MathCAD тези оператори имат вида:

$$\text{match}\left(\text{round}(t_{ia}, 3), \text{round}(M^{(1)}, 3)\right) = \begin{pmatrix} 31610 \\ 31611 \\ 31612 \\ 31613 \\ 31614 \\ 31615 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

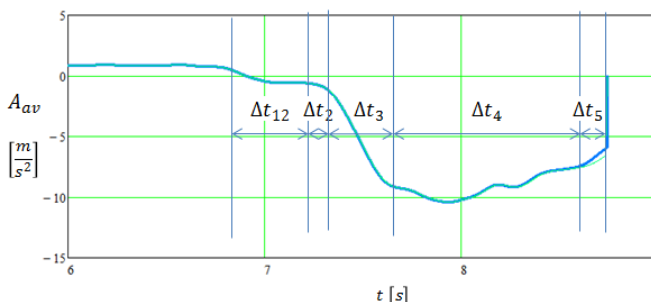
$$t_{ia} = \text{floor}\left(\text{median}\left(\text{match}(\text{round}(t_i, 3), \text{round}(v_x, 3))\right)\right)$$

3.3 Метод за определяне на фазите на процеса спиране.

Основните фази на процеса, при екстремно спиране на автомобил, се състоят от времената, необходими за реакция на водача, реакция на спирачната система за формиране на спирачния момент, време за нарастване на спирачното закъснение до максимална за периода стойност и движение с максимални стойности на спирачното закъснение до окончателно спиране на автомобила.

Изследванията на поведението на автомобила при екстремни спирания показват значителни отклонения от теоретичния модел. Съществено влияние върху него оказват началните условия, външни фактори свързани с контакта на гумите с пътя, както и управлението на системата за устойчивост на автомобила и регулиране на приплъзването на колелата.

Процесът на изменение на ускорението е свързан с плавни преходи между отделните периоди. При наличие на преходи от подобен характер, определянето на времевите граници изисква внимателен анализ, тъй като тяхната идентификация влияе върху интегралните стойности на преместването и ускорението на автомобила през отделните периоди. На Фиг.3.2 е показана експериментално определената крива на изменение на ускорението на автомобил при екстремно спиране.



Фиг.3.2 Изменение на ускорението на автомобил при екстремно спиране.

Същността на метода за експериментално определяне на фазите на процеса спиране се състои в изследване на структурирани и изгладени експериментални данни за функцията на преместването на автомобила чрез производни от висок порядък.

Границите на периода Δt_{12} , време за физическа реакция на водача, се регистрират от показанията на сензори, монтирани за целите на експеримента върху педала за газта и спирачния педал на автомобила. Регистрацията на моментите на задействане на сензорите, при задействане и отпускане на педалите, се извършва от аналогоцифров преобразувател с честота на семплиране 500 kHz, което осигурява регистрация на показанията през $2 \mu\text{s}$ и точност $\pm 0.000002 \text{ s}$. Продължителността на периода Δt_{12} се определя от двете граници, долна и горна, представляващи съответно момента на отпускане на педала за газта и задействане на педала на спирачната система.

Моментата на включване на сензора на спирачния педал определя долната граница на периода за реакция на спирачната система Δt_2 .

В областта на горната граница на този период процесите на подготовка на спирачната система за нарастване на спирачния момент са приключили и следва плавен преход в посока нарастване на спирачното закъснение. Определянето на момента на прехода се извършва чрез изледване на функцията на ускорението в затворения интервал $\varepsilon = [t_b; t_b + \Delta]$. Производните на функцията се определят чрез числено диференциране на стойностите за преместването на автомобила.

$$A_{avi} = \left(d^2 S / dt^2 \right) = \frac{M_i^{[2]} - M_{i-1}^{[2]}}{M_i^{[0]} - M_{i-1}^{[0]}} \quad (3.12)$$

където: $M^{[1]}$ и $M^{[2]}$ - вектори със стойности съответно на преместването и скоростта на автомобила;

$M^{[0]}$ – вектор с времевите репери за положението на автомобила при преместване $\delta S_{avi} = 0.002 \text{ m}$.

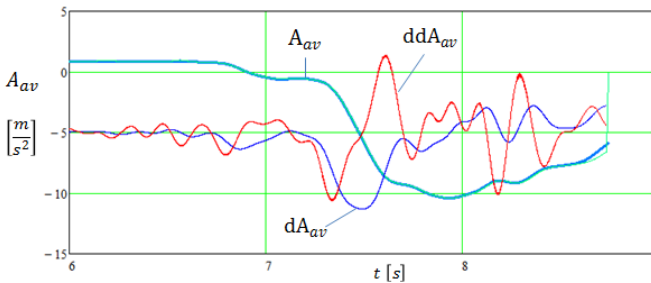
Производните от трети и четвърти порядък, съответно първи и втори порядък на ускорението се определят от изразите:

$$dA_{avi} = \left(d^3 S / dt^3 \right) = \left(dA_{av} / dt \right) = \frac{M_i^{[3]} - M_{i-1}^{[3]}}{M_i^{[0]} - M_{i-1}^{[0]}} \quad (3.13)$$

и

$$ddA_{avi} = \left(d^4 S / dt^4 \right) = \left(d^2 A_{av} / dt^2 \right) = \frac{M_i^{[4]} - M_{i-1}^{[4]}}{M_i^{[0]} - M_{i-1}^{[0]}} \quad (3.14)$$

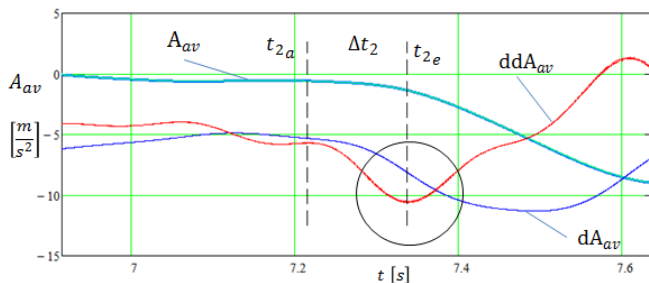
където: $M^{[3]}$ и $M^{[4]}$ - вектори със стойности на ускорението A_{av} и скоростта на изменение на ускорението dA_{av} на автомобила. На Фиг.3.4 са показани графиките на ускорението и неговите производни dA_{av} и ddA_{av} .



Фиг.3.4 Графика на първа и втора производна на ускорението на автомобила.

В затвореният интервал $\varepsilon_2 = [t_b; t_b + \Delta]$ се търси екстремум на функцията $ddA_{av}(t)$, представляващ локален отрицателен максимум в изменението на

скоростта на нарастване $dA_{av}(t)$ на ускорението на автомобила. Координатите на този максимум по време определят положението на горната граница t_{2e} .

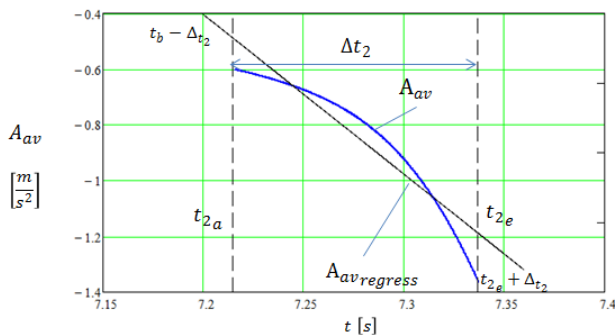


Фиг.3.5 Положение на локален екстремум на функцията $ddA_{av}(t)$ за границата t_{2e}

Отрицателното ускорение през периода на реакция на спирачната система се изменя по нелинеен закон. Неговата средна стойност се определя от интеграла

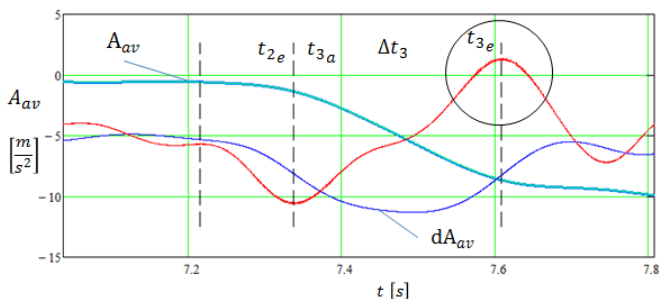
$$A_{t_2m} = \frac{1}{(t_{2e} - t_b)} \int_{t_b}^{t_{2e}} A_{av}(t) dt \quad (3.15)$$

Подобен характер на изменение показва и скоростта на изменение на ускорението $dA_{av}(t)$. Тенденцията в промяната на $A_{av}(t)$ се определя с регресионна линия от първи ред от стойностите на ускорението в затворения интервал $\varepsilon_{t_2} = [t_b; t_{2e}]$. На графиката на Фиг.3.6 са показани стойности на регресионната линия с граници $[t_b - \Delta t_2; t_{2e} + \Delta t_2]$.



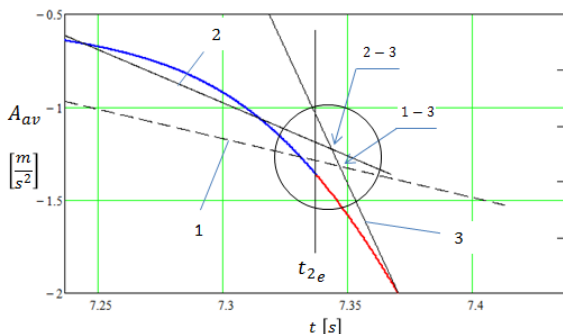
Фиг.3.6 Регресионна линия на периода Δt_2 .

Получената стойност t_{2e} е горна граница на периода Δt_2 и долна за периода на нарастване на спирачното закъснение до максимални стойности Δt_3 . Чрез изследване на втората производна на ускорението се търси положителен максимум в следващия затворен интервал $\varepsilon_3 = [t_{2e}; t_{2e} + \Delta]$. Положението на този максимум определя момента в който тенденцията за нарастване на отрицателното ускорение на автомобила променя характера си. Определената стойност представлява горна граница на интервала Δt_3 .



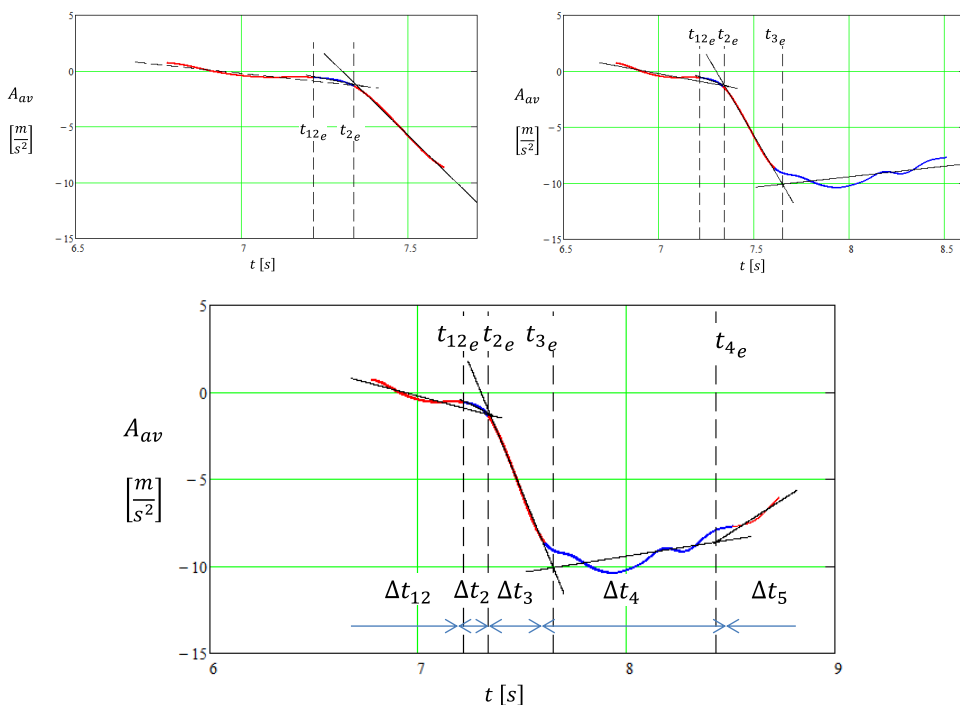
Фиг.3.7 Положение на локален екстремум на функцията $ddA_{av}(t)$ за границата t_{3e}

Определя се регресионната линия от първи ред на стойностите на ускорението в затворения интервал $\varepsilon_3 = [t_{2e}; t_{3e}]$ за периода Δt_3 на нарастване на отрицателното ускорение. Пресечната точка на регресионната линия 2, за стойностите на ускорението в интервала Δt_2 с линията 3, за стойности в интервала Δt_3 , точка 2-3 на Фиг.3.8, определя горната граница на периода Δt_2 . В случая, показан на графиката, разликата между стойностите получени от производните на ускорението $ddA_{av}(t)$ и пресечната точка 2-3 на регресионните линии за границата t_{2e} е от порядъка на 0.007s.



Фиг.3.8 Горната граница t_{2e} за периода Δt_2

Регресионната линия 1 е за стойностите на периода Δt_2 . Нейната посока се определя от режима на движение на автомобила в началото на процеса спиране. При движение в ускорителен режим и положителни стойности на ускорението преди спирането, както и в периода, наклона на линия 1 е по-голям и пресечната точка 1-3 се отдалечава от стойността на локалния минимум на функцията $ddA_{av}(t)$. В останалите случаи, при равномерно движение с постоянна скорост и нулеви или отрицателни стойности на ускорението през целия период, наклонът е по-малък, пресечната точка на линии 1 и 3 се приближава към минимума на $ddA_{av}(t)$, като продължителността на периода Δt_2 намаля.



Фиг.3.12 Пресечни точки на регресионните линии за отделните периоди.

Регресионната линия 4 е за стойностите на ускорението в периода Δt_4 . Тя се определя от стойностите в затворения интервал $\varepsilon_4 = [t_{3e}; t_{4e}]$. През този период спирачния момент се контролира и формира от системата за управление на спирачната система, с цел осигуряване на максимални стойности на коефициента на сцепление μ_B , при непрекъсната максимална сила, упражнявана върху спирачния педал. Краят на периода е момента t_{4e} , след който скоростта на изменение на ускорението на автомобила $dA_{av}(t)$ започва монотонно да нараства.

Дисперсията и стандартното отклонение за регресионните линии на извадката, от генералната съвкупност на данните след тяхното нормализиране, се определят с формулите:

$$Disp_{t_j} = \frac{\sum_{i=0}^{last(VX_{t_j})} (|VY_{t_{ji}} - mean(VY_{t_j})|)^2}{last(VX_{t_j}) - 1} \quad (3.16)$$

и

$$\sigma_{t_j} = \sqrt{Disp_{t_j}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{last(VX_{t_j})} (|VY_{t_{ji}} - mean(VY_{t_j})|)^2}{last(VX_{t_j}) - 1}} \quad (3.17)$$

където: VY_{t_j} - вектор с данните за ускорението на j-тия период от процеса на спиране;

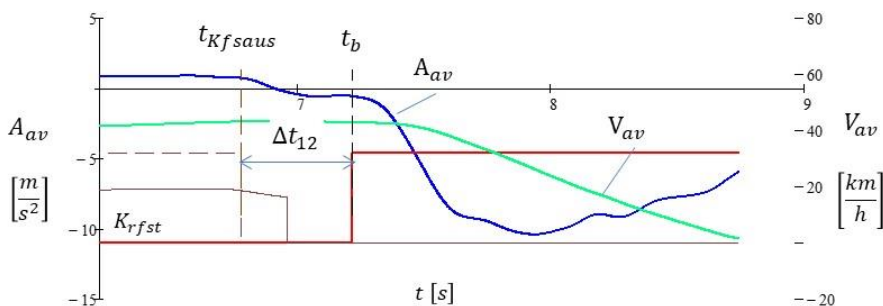
$mean(VX_{t_j})$ - средна стойност на извадката за j-тия период;

$last(VX_{t_j}) - 1$ - продължителност на периода за данни от извадка.

Глава IV ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ФАЗИТЕ НА ПРОЦЕСА СПИРАНЕ ПО ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА СПИРАЧНОТО ЗАКЪСНЕНИЕ НА АВТОМОБИЛА

4.1. Време за физическа реакция

Графиката на спирачното закъснение и скоростта на автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid при спиране от скорост, в момента на задействане на спирачния педал, около 50 km/h, е показана на фиг.4.1.



Фиг.4.1 Време за физическа реакция на водача. Автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid

На същата фигура са показани и положенията на педала за газта и спирачния педал, както и работата на двигателя с вътрешно горене. Честотата на въртене на колянвия вал на двигателя се регистрира чрез електрическите импулси, подавани към инжекторите на системата за горивоподаване на двигателя.

В началото на периода, в момента t_{12a} автомобила се движи със скорост $V_{t_{12a}} = 52.1 \text{ km/h}$ и е регистрирана положителна стойност на ускорението $A_{t_{12a}} = 0.8 \text{ m/s}^2$.

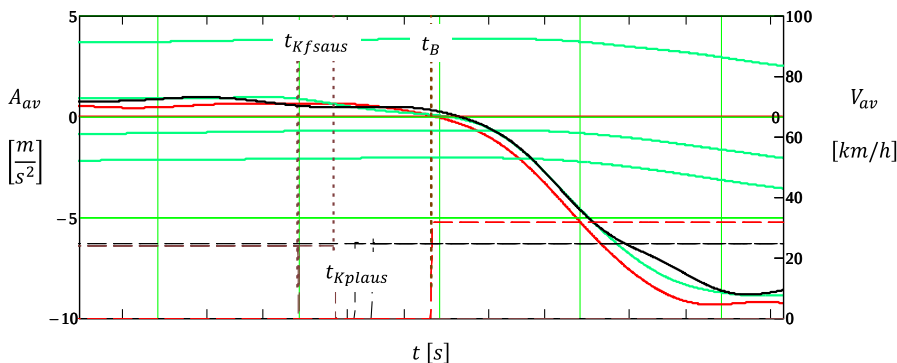
За определеното време на физическа реакция на водача $t_{12} = 0.402 \text{ s}$ изминатото разстояние от автомобила, по данни на сензора за преместване, е $S_{t_{12}} = 5.858 \text{ m}$. Стойности на параметрите на периода, при спиране от скорост, в момента на задействане на спирачния педал са показани в таблиците на фиг.4.2.

При четирите изследвани режима на движение, автомобила се движи с положително ускорение в момента на отпускане на педала за горивоподаването. Формираният период t_{12p} е със средна продължителност 0.173 [s] , която е сравнително устойчива и показва малки отклонения за различните режими. Средното ускорение на автомобила през t_{12p} по дефиниция има положителни стойности, разположени в сравнително малък динамичен диапазон от $A_{t_{12p.m}} = 0.419$ до $A_{t_{12p.m}} = 0.589 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Средната относителната продължителност на периода е 28.8% . Конкретните стойности на параметрите са показани в Таблица 4.1.

Таблица 4.1.

$V_{t_{12a}} \text{ [km/h]}$	$t_{12p} \text{ [s]}$	$t_{12p} \text{ [%]}$	$A_{t_{12p.m}} \text{ [m/s}^2\text{]}$
42.8	0,129	29,3	0,419
52.3	0,221	54,9	0,508
59.5	0,175	22,9	0,589
69.3	0,168	8	0,433
Средна стойност	0,173	28,78	0,487

На Фиг.4.4 с пунктирани линии са показани графиките, при автомобил Toyota Avensis, на сигналите от сензорите и моментите на изключване на педала за горивоподаване t_{Kfsaus} , изключване на съединителя t_{Kplaus} и задействане на спирачната система t_B за скорости 50, 60 и 90 km/h. За всички изследвани режими при различни скорости на движение е регистрираното изключване на съединителя е през периода.



Фиг.4.4 Ускорение, скорост и моменти t_{Kfsaus} , t_{Kplaus} , и t_B .
Автомобил Toyota Avensis T25

При изключен съединител, повишените механични загуби на двигателя с вътрешно горене, работещ в режим на принудителен празен ход при напълно затворена дроселова клапа, не оказват влияние върху скоростта на автомобила. Движението се осъществява основно под действие на външни съпротивителни сили и механичните загуби в трансмисията.

При тези условия през целият период Δt_{12} автомобила се движи с положителни стойности на ускорението, с тенденция към намаляване, породена от действието основно на външните съпротивителни сили. Неговата средна стойност при скорост $V_{t_{12}a} = 52.5 \text{ km/h}$ за съответните граници на периода е

$$A_{t_{12}m} = \frac{1}{t_B - t_{Kfsaus}} \int_{t_{Kfsaus}}^{t_B} A_a(\alpha) d\alpha = 0.467 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (4.9)$$

Следствие на тази положителна стойност е регистрирано незначително повишение на скоростта в края на периода

4.2 Период на реакция на спирачната система

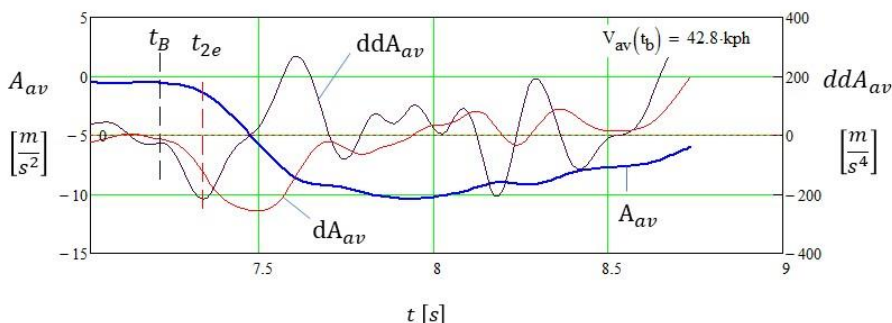
Периодът на реакция на спирачната система включва времето за преодоляване на хлабините в лостовата система на спирачния педал, за преместване на спирачните накладките до спирачните дискове в спирачния механизъм, както и времето за процесите, необходими за формиране на спирачните сили и съответно спирачния момент.

Началото на периода Δt_2 се отчита в момента на задействане на спирачния педал, регистриран от монтирания върху педала, специално разработен на целите на експеримента сензор.

Точността, с която се регистрира момента на въздействие върху педала се определя и от честотата на регистриране на данните. При ниска честота, ъгълът на

нарастващия фронт на електрическия импулс от сензора е значителен. Максималната възможна грешка е равна на един период на семплиране. За минимизиране на грешката при регистриране на данните от сензорите, монтирани върху педала за горивоподаване, спрания педал и педала на съединителя, е избрана изключително висока честота, в случая 500kHz. Периодът на синхронно семплиране на процесите в реално време е равен на 2 μ s.

Краят на периода е момента, определящ началото на устойчиво нарастване на отрицателното ускорение на автомобила. На графиката на Фиг.4.6 с вертикални пунктирани линии са показани границите на периода, определен чрез разработената методика в Глава 3.



Фиг.4.6 Границите на периода Δt_2 . Автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid.

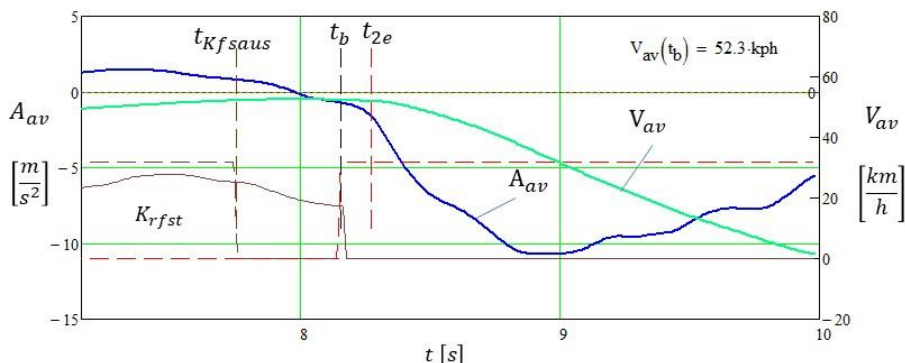
Горната граница на периода се характеризира с плавен преход в характеристиката на изменение на ускорението. Този характер на изменение е обусловен от инерционните свойства на системите на автомобила и величината на неговата пълна маса. Определянето на инфлексната точка се извършва чрез производни на функцията от по-висок порядък. В областта на края на периода се отчита първи локален екстремум, ясно изразен минимум, на втората производна на ускорението след момента на задействане на спирачния педал за изследвания случай, при скорост в началото на периода $V_{t_{12a}} = 52.3$ km/h.

На Фиг.4.6 са показани графиките на ускорението на автомобила и неговите първа и втора производни.

Скоростта на автомобила остава практически непроменена. За краткото време $\Delta t_2 = 0.117$ s, при движение с отрицателно ускорение, тя се изменя с около $\Delta V_{t_2} = -0.4$ km/h, което представлява намаление на скоростта с 0.7%.

Продължителността на периода е $\Delta t_2 = 0.117$ s. Изследваният автомобил притежава автоматизираната система за подпомагане на водача при екстремни спирания. Малката стойност на периода за реакция на спирачната система показва нейната ефективна работа и завършен процес на формиране на хидравличното

налягане в спирачната система, с цел максимално намаляне продължителността на този период.



Фиг.4.7 Граници на периода време за реакция на спирачната система.
Автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid

През целия период автомобила се движи с отрицателно ускорение, като в началото то е равно на $A_{t_{2a}} = -0.7 \text{ m/s}^2$, а последващите му стойности се определят основно от действието на съпротивителните сили при движение на автомобила по хоризонтална отсечка и механичните загуби на двигателя при изключено горивоподаване. В края на периода ускорението има стойност $A_{t_{2e}} = -1.6 \text{ m/s}^2$, а неговата средна стойност за целия период е $A_{t_{2m}} = -1.012 \text{ m/s}^2$.

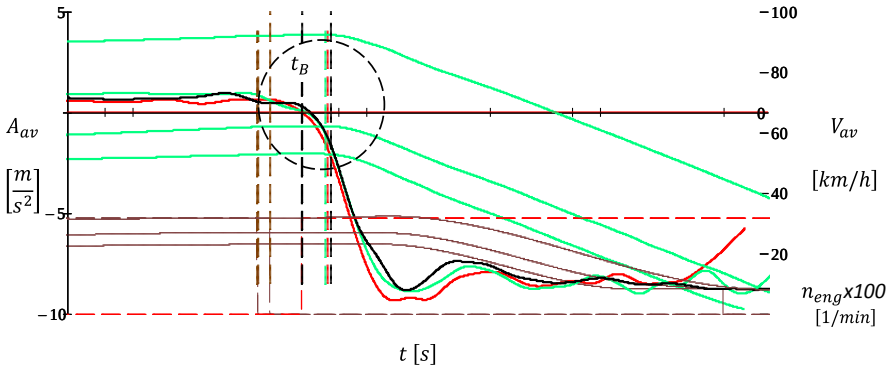
$$A_{t_{2m}} = \frac{1}{t_{brva} - t_B} \int_{t_B}^{t_{brva}} A_a(\alpha) d\alpha = -1.012 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (4.10)$$

При скорост $V_{t_{2a}} = 52.9 \text{ km/h}$ спирачната система на автомобил Toyota Avensis реагира за време

$$\Delta t_{250} = t_{Brva} - t_B = 0.108 \text{ s.} \quad (4.11)$$

Тази продължителност на периода, както и останалите стойности, измеренни при режими $V_{t_{2a}} = 61.9 \text{ km/h}$ и $V_{t_{2a}} = 92.2 \text{ km/h}$ за същия период, са изключително малки и показват, че спирачната система е оптимизирана по отношение на времената за преместване на спирачните накладките до спирачните дискове, нарастване на хидравличното налягане, нарастване на спирачните сили и спирачния момент до максималните си стойности.

Скоростта на автомобила в края на периода остава практически непроменена. Ускорението приема отрицателна стойност и в края то е $A_{t_{Brva}} = -1.608 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Неговата средна стойност при движение през този период е $A_{t_{2m}} = -0.627 \text{ [m/s}^2\text{]}$.



Фиг.4.10 Линии на ускорението за процеса спиране през периода за реакция на спирачната система. Автомобил Toyota Avensis T25

Регистрираните стойности определени при различните режими се получават в тесен динамичен диапазон. Дисперсията и стандартното отклонение на резултатите са изключително малки.

$$Disp_{\Delta t_2} = \frac{\sum_{i=0}^{last(\Delta t_2)} (|\Delta t_{2i} - mean(\Delta t_2)|)^2}{last(\Delta t_2) - 1} = 0.000797667 \quad (4.12)$$

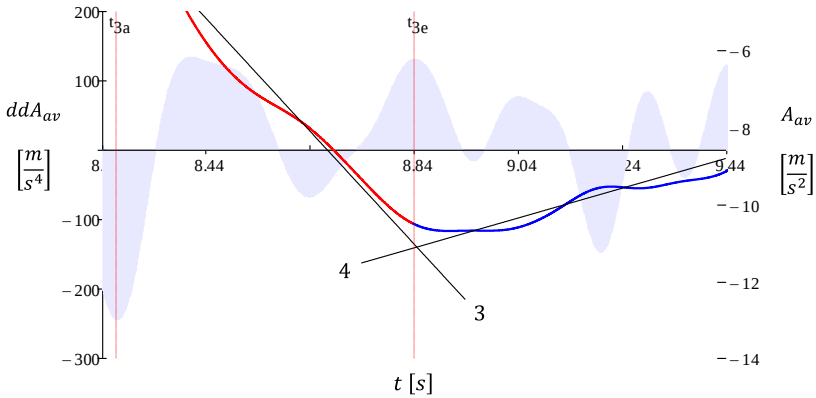
$$\sigma_{\Delta t_2} = \sqrt{Disp_{\Delta t_2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{last(\Delta t_2)} (|\Delta t_{2i} - mean(\Delta t_2)|)^2}{last(\Delta t_2) - 1}} = 0.028243 \quad (4.13)$$

4.3 Период на нарастване на спирачното закъснение.

През периода от време, означаван с Δt_3 , спирачната система е задействана и следва процес на нарастване на спирачните сили и спирачния момент. Стойността на отрицателното ускорение през този период нараства поради повишаване на силите на триене в спирачните апарати и формиране на стойности на спирачния момент, близки до максималните. Процесът има подчертано преходен характер и протича в зоната на устойчиво нарастване на коефициента на сцепление μ_B .

Границите на периода са моментите t_{3a} и t_{3e} . Горната граница на периода t_{3e} , се определя като момент на регистрирания първи положителен максимум на втората производна на ускорението на автомобила, след момента на задействане на спирачната система, получен в областта на пресечната точка на регресионните линии за третия и четвъртия период от процеса спиране на автомобила.

Началото на периода е момента $t_{t_{3a}}$, равен на момента за край на периода за реакция на спирачната система t_{Brva} . Горната граница, момента t_{3e} е определен по разработената методика, фиг.4.13.



Фиг.4.13 Период за нарастване на спирачното закъснение.
Автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid

Общата продължителност на периода е

$$\Delta t_{350} = t_{3e} - t_{3a} = 0.572 \text{ s.} \quad (4.14)$$

Скоростта на автомобила намаля, от стойност $V_{t_{3a}} = 51.9 \text{ km/h}$ в началото до $V_{t_{3e}} = 37.7 \text{ km/h}$ в края на периода, без значими колебания в характера на кривата, което представлява намаление с 27.3% от началната за периода и 27.1% от скоростта V_{t_B} в момента на задействане на спирачната система t_B .

Кинетичната енергия на автомобила в края на периода намаля. Разликата относно началната за периода е

$$E_{k_{t_3}} = E_{k_{t_{3e}}} - E_{k_{t_{3a}}} = 82.4 \text{ kJ} \quad (4.15)$$

Основната част от тази енергия се превръща в топлина, следствие на интензивното триене между спирачните накладките и спирачните дискове. Изменението на температурата в контактните повърхнини създава предпоставки за променлив характер на коефициента на триене между накладките и диска и за нелинейна характеристика на нарастване на спирачната сила. По данни на [14], приблизително 90% от топлината, генерирана при преобразуването на кинетичната енергия в топлина в процеса на спиране се абсорбира от диска.

Средната интегрална стойност на ускорението за периода е

$$A_{t_3m} = \frac{1}{t_{3e} - t_{3a}} \int_{t_{3a}}^{t_{3e}} A_a(\alpha) d\alpha = -6.854 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (4.18)$$

Колебанията в характеристиката на нарастване на отрицателното ускорение са повлияни от посочените по-горе експлоатационни фактори. Средната стойност на скоростта на изменение през периода е $dA_{3m} = -15.8 \text{ m/s}^3$.

Резултатите за скоростта на изменение са посочени в Таблица 4.2.

Таблица 4.2

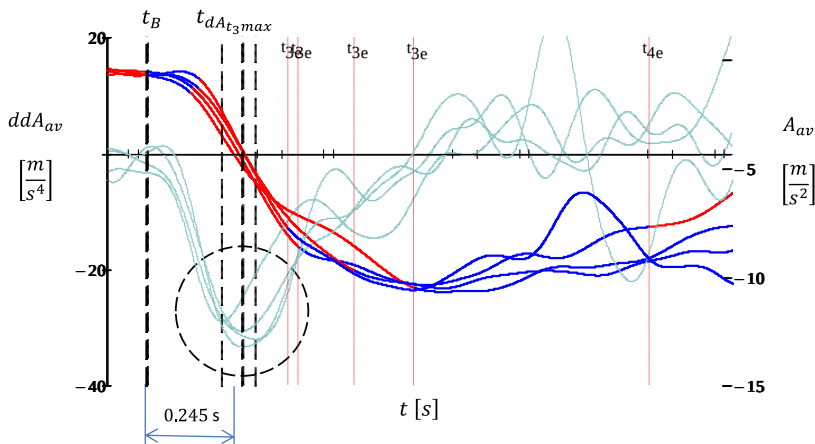
	Размерност	Δt_3			
		$V_{t_3a} = 42.8$ km/h	$V_{t_3a} = 52.3$ km/h	$V_{t_3a} = 59.5$ km/h	$V_{t_3a} = 69.3$ km/h
dA_{t_3m}	[m/s ³]	-27.139	-15.818	-21.131	-28.826
$dA_{t_3max_1}$	[m/s ³]	-31.993	-28.794	-30.55	-33.327
$\Delta t_{dA_{t_3max_1}}$	[s]	0.157	0.076	0.105	0.108
$dA_{t_3max_2}$	[m/s ³]	-	-14.44	-	-
$\Delta t_{dA_{t_3max_2}}$	[s]	-	0.464	-	-
$\Delta t_{dA_{t_3max}}$	[s]	0.279	0.194	0.245	0.244

В горната таблица интервалите от време $\Delta t_{dA_{t_3max_1}}$ и $\Delta t_{dA_{t_3max_2}}$ са отчетени от момента начало на периода t_{3a} . Интервалът $\Delta t_{dA_{t_3max}}$ е отчетен относно момента на задействане на спирачната система t_B . За изследваните режими, при различни начални скорости на автомобила, максималната стойност на скоростта на нарастване на отрицателното ускорение $dA_{t_3max_1}$, се достига след време 0.245 s след момента на задействане на спирачната система t_B . На фиг.4.15 са показани положенията на максимумите в скоростта на нарастване на отрицателните ускорения.

Дисперсията на данните и стандартното отклонение на извадката имат стойности

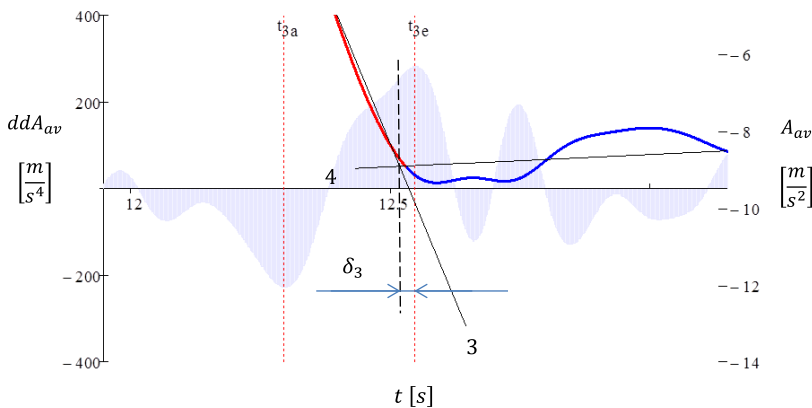
$$D_{\Delta t_{dA_{t_3max}}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left(\Delta t_{dA_{t_3max_i}} - \overline{\Delta t_{dA_{t_3max}}} \right)^2 = 0.001 \text{ s} \quad (4.19)$$

$$\sigma_{\Delta t_{dA_{t_3max}}} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left(\Delta t_{dA_{t_3max_i}} - \overline{\Delta t_{dA_{t_3max}}} \right)^2} = 0.030 \text{ s} \quad (4.20)$$



Фиг.4.15 Положение на максималните стойности на изменение на отрицателните ускорения. Автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid

За всички изследвани режими за автомобил Toyota Avensis T25 отстоянията на δ_3 са показани на фиг.4.18, а стойностите са дадени в Таблица 4.3. На фиг.4.17 е показано положението на t_{3e} , за режима $V_{t_B} = 52.9$.



Фиг.4.17 Горна граница на периода за нарастване на спирачното закъснение. Автомобил Toyota Avensis T25

Таблица 4.3.

	Размерност	Δt_3			
		$V_{t_B} = 41.9$ km/h	$V_{t_B} = 52.9$ km/h	$V_{t_B} = 62$ km/h	$V_{t_B} = 92.2$ km/h
δ_3	[s]	0.031	0.03	-0.0004	0.064

Положителните стойности на δ_3 , определени от формула (4.21) означават, че пресечната точка на регресионните линии $b_{t_3}(t)$ и $b_{t_4}(t)$ предхожда по време положението на максимума на функцията d^2A/dt^2 .

4.4 Движение с максимални стойности на отрицателното ускорение.

Колеланията в стойността на спирачния момент $M_B(t)$ са предизвикани от модулиране на хидравличното налягане, определено от работата на антиблокиращата система, колебания в стойността на коефициента на сцепление $\mu(\lambda_B(t))$ породени от температурни въздействия и промяната в натоварването на колелата, предизвикано от контакта на гумите с пътя [112]. По време на спирането върху повърхността на спирачните дискове се образуват зони с повишена температура. Горещите зони се появяват последователно или в противоположните вътрешната и външната повърхност на спирачния диск. Границите на периода са моментите t_{4a} и t_{4e} , при което $t_{4a} = t_{3e}$.

Горната граница на периода t_{4e} се определя като момент, в който се регистрира положителен максимум на втората производна на ускорението на автомобила d^2A/dt^2 , получен в областта на пресечната точка на регресионните линии за четвъртия и петия период, $b_{t_4}(t)$ и $b_{t_5}(t)$ от процеса на спиране на автомобила.

Преместването на автомобила през периода, посочено в таблиците на фиг.4.22, отнесено към общия изминат път, също е значително

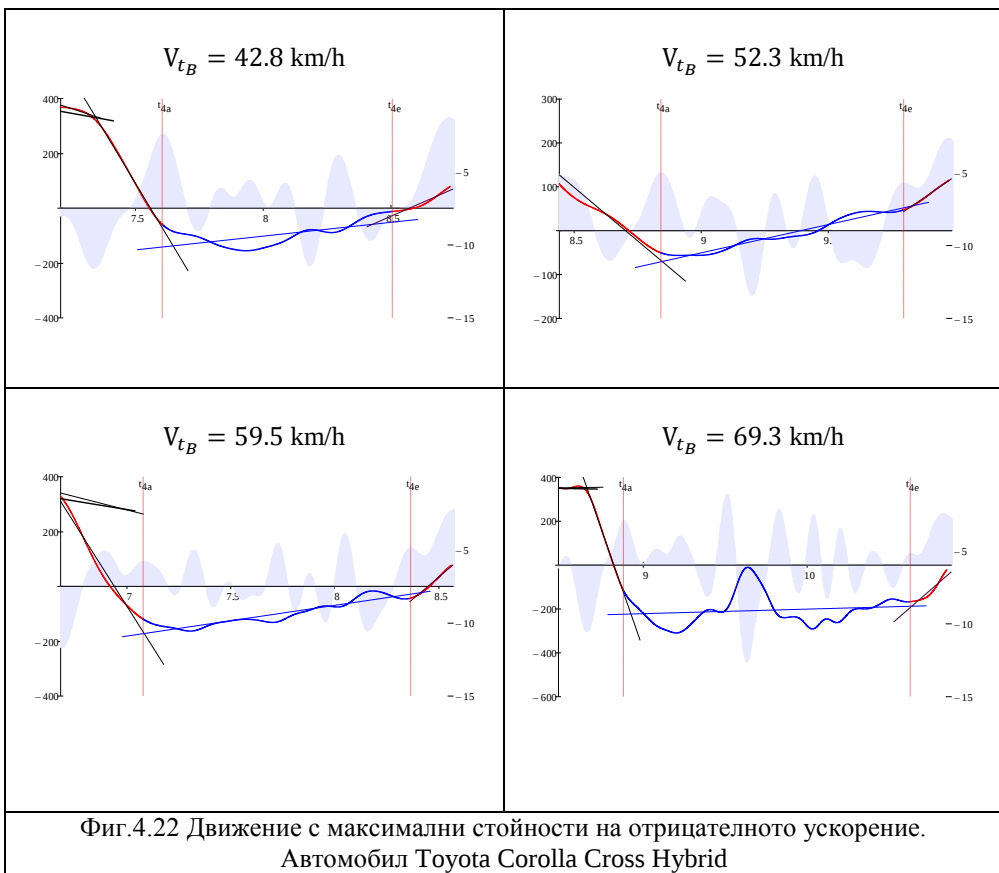
$$\delta S_{t_4} = \frac{S(t_{4e}) - S(t_{4a})}{S(t_{stop}) - S(t_B)} = \begin{matrix} 53.5\% \\ 37.2\% \\ 53.0\% \\ 71.1\% \end{matrix} \quad (4.27)$$

и има средна стойност, за изследваните режими $\overline{\delta S_{t_4}} = 53.7\%$.

По-голямата продължителност на движение с максимални стойности на отрицателното ускорение води до по-голям спад в скоростта на автомобила. Намалението на скоростта относно началната, в момента на задействане на спирачната система t_B за различните изследвани режими е :

$$\delta V_{t_4} = \frac{V(t_{4a}) - V(t_{4e})}{V(t_B)} = \begin{matrix} 70.6\% \\ 61.2\% \\ 73.1\% \\ 82.5\% \end{matrix} \quad (4.29)$$

Средната стойност на намаляне на скоростта през периода е $\overline{\delta V_{t_4}} = 71.84\%$.



Фиг.4.22 Движение с максимални стойности на отрицателното ускорение.
Автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid

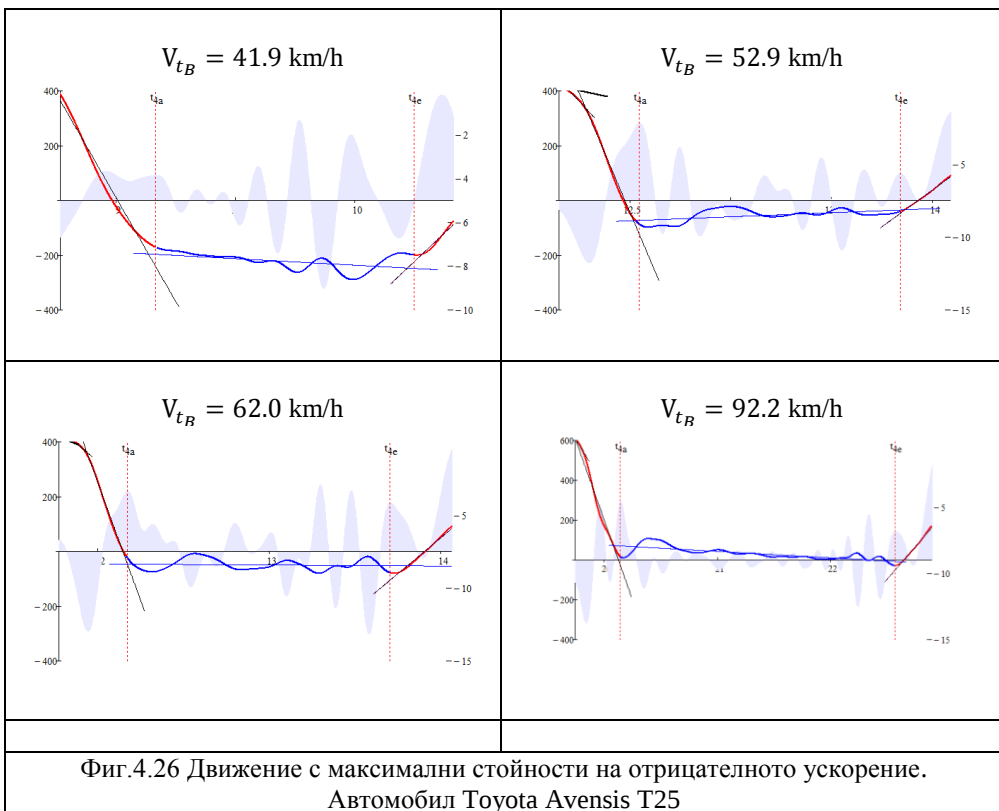
Отрицателните стойности на δ_4 , определени от формула (4.26) означават, че пресечната точка на регресионните линии $b_{t_4}(t)$ и $b_{t_5}(t)$ изостава по време от положението на максимума на функцията $d^2A/dt^2(t)$.

За всички изследвани режими за автомобил Toyota Cross hybrid отстоянията δ_4 са показани на фиг.4.22, а стойностите са дадени в Таблица 4.5.

Таблица 4.5.

	Размерност	Δt_4			
		$V_{tB} = 42.8$ km/h	$V_{tB} = 52.3$ km/h	$V_{tB} = 59.5$ km/h	$V_{tB} = 69.3$ km/h
δ_4	[s]	0.077	-0.033	-0.05	-0.011

Двете граници на периода определят времевата област от процеса на спиране на автомобила, в която той се движи с променливи стойности на отрицателното ускорение.



Фиг.4.26 Движение с максимални стойности на отрицателното ускорение.
Автомобил Toyota Avensis T25

Стойностите на преместването на автомобиля Toyota Avensis T25 през периода S_{t_4} са показани в таблиците на фиг.4.26. Относителният дял на преместването през периода от общия изминат път е

$$\delta S_{t_4} = \frac{S(t_{4e}) - S(t_{4a})}{S(t_{stop}) - S(t_B)} = \begin{matrix} 52.5\% \\ 64.4\% \\ 70.4\% \\ 74.8\% \end{matrix} \quad (4.41)$$

и има средна стойност, за изследваните режими $\overline{\delta S_{t_4}} = 65.5 \%$.

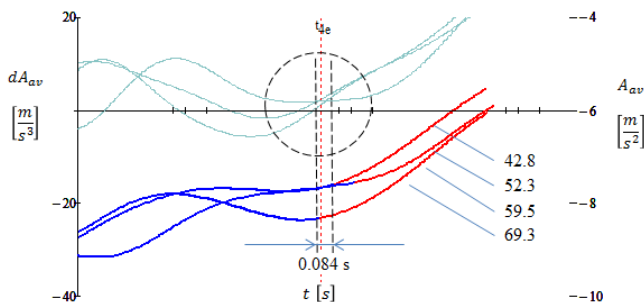
Преместването на автомобиля през периода Δt_4 има преобладаващ дял в общия спирачен път. С нарастване на началната скорост V_{tB} неговата стойност нараства и за скорости над $V_{tB} = 62.0 \text{ km/h}$ изминатото разстояние представлява повече от 70. % от общия спирачен път на автомобиля.

4.5 Период на намаляне на отрицателното ускорение и движение до окончателно спиране на автомобиля.

Процесът на спиране на автомобила завършва с период, характеризиращ се с монотонно намаляне на отрицателното ускорение. При теоретичните изследвания на спирането на автомобила или изследвания за целите на автотехническата експертиза, този период обикновено се обединява с периода Δt_4 като завишава неговата продължителност и отменя горната му граница t_{4e} в момента на окончателно спиране t_{stop} . На фиг.4.28 са показани графиките на ускорението на автомобила в края на спирането. Вижда се, че моментите $t_{5a} = t_{4e}$ са разположени в тесен динамичен диапазон и отчетливо определят началото на тенденцията на монотонно нарастване както на скоростта на изменение на ускорението, така и стойностите на самото ускорение.

Скоростта на изменение на ускорението формира своеобразен възел в областта на момента t_{4e} , от който до момента на спиране t_{stop} , тази скорост има подобни значения за всички изследвани режими.

Продължителността на периода е в границите $\Delta t_{5min} = 0.168$ s до $\Delta t_{5max} = 0.252$ s, като се отчита тенденция на нарастване с нарастване на началната за процеса скорост в момента на задействане на спирачната система. Средната за Δt_5 продължителност и стандартното отклонение е $\overline{\Delta t_5} = 0.204$ s.



Фиг.4.28 Долна граница t_{5a} на периода Δt_5 .
Автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid

Средната стойност на преместването през периода е $\overline{S_{t_5}} = 0.195$ m. Неговите абсолютни стойности са показани в таблиците на фиг.4.29 а относителните, относно целия спирачен път в интервала $t_{stop} - t_B$, са съответно

$$\delta S_{t_5} \% = \frac{S_{t_5} - S_{t_5m}}{S_{t_5m}} = \begin{matrix} 1.3 \% \\ 1.0 \% \\ 1.1 \% \\ 1.2 \% \end{matrix} \quad (4.58)$$

Относно момента t_{stop} моментите $t_{5a} = t_{4e}$ за автомобила Toyota Avensis T25 са разположени в динамичен диапазон $\delta t_{4e} = 0.161$ s. Средната скорост на автомобила в началото на периода, момента t_{5a} , е $V_{t_5} = 8.7$ km/h и е по-висока с окло 2.1 km/h от тази за автомобил Toyota Corolla Cross Hybrid $V_{t_5} = 6.6$ km/h.

Стойностите, показани в таблиците на фиг.4.31 са в диапазона $S_{t_{5min}} = 0.136$ m до $S_{t_{5max}} = 0.509$ m. Средната стойност на преместването през периода е $\overline{S_{t_5}} = 0.352$ m. Относителното преместване, относно целия спирачен път в интервала $t_{stop} - t_B$, е съответно

$$\delta S_{t_5} \% = \frac{S_{t_5} - S_{t_{5m}}}{S_{t_{5m}}} = \begin{matrix} 1.1 \% \\ 1.8 \% \\ 2.3 \% \\ 1.1 \% \end{matrix} \quad (4.63)$$

Стойностите на средното за периода ускорение на автомобила са в интервала $A_{5min} = -8.109 \text{ m/s}^2$ до $A_{5max} = -6.943 \text{ m/s}^2$. Средно за всички режими ускорението е $\overline{A_{5m}} = -7.4 \text{ m/s}^2$, а стандартното отклонение е

$$\sigma_{A_{5m}} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (A_{5mi} - \overline{A_{5m}})^2} = 0.449 \text{ m/s}^2 \quad (4.64)$$

Глава V ХАРМОНИЧЕН АНАЛИЗ НА ФАЗИТЕ НА ПРОЦЕСА СПИРАНЕ

5.1 Методика за честотен анализ на ускорението на автомобила

Чрез методите на честотния анализ на сигналите, се обработват данните за ускорението на автомобила. Те дават възможност да се опишат динамичните свойства на процеса спиране посредством връзките между входящите и изходящи величини. Методите за честотен анализ на сигналите позволяват да се изследва поведението на ускорението на автомобила в отделни честотни зони. Полученият резултат показва характера на изменение и наличие или липса на колебателни процеси. Основа на честотния анализ са преобразуванията на Фурие (Jean Baptiste Joseph Fourier). Те дават възможност величините $x(t)$ и $y(t)$ да бъдат представени в спектрален вид $X(t)$ и $Y(t)$. Трансформацията в честотната област се описва с уравнението:

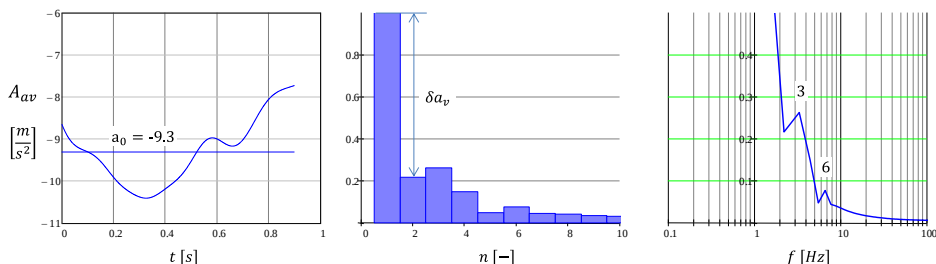
$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (5.1)$$

Реалната функция $x(t)$ се трансформира в комплексна $X(t)$. Представянето ѝ в числов вид се нарича дискретни преобразования на Фурие (DTF), при което с X_k се означава крайния честотен спектър на дискретната величина:

$$X_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j \frac{2\pi \cdot n \cdot k}{N}} \quad k = 0, 1 \dots N-1 \quad (5.2)$$

5.2 Хармоничен анализ и честотни спектри на периодите

Периода Δt_4 е период на движение с максимални за процеса стойности на отрицателното ускорение на автомобила. В контактните зони на триене между спирачните накладки и спирачните дискове се отделя значително количество топлина и се създават условия за температурни деформации на елементите на спирачните апарати.



Фиг.5.6 Движение с максимални стойности на отрицателно ускорение

$$V_{avt_b} = 42.8 \text{ km/h.}$$

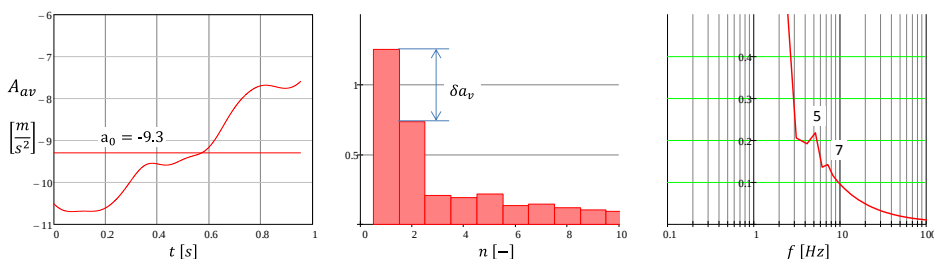
На фиг.5.6 са показани ускорението, математичното разпределение и честотния спектър на хармониците при спиране на автомобила от скорост $V_{avt_b} = 42.8 \text{ km/h}$. Характеристиката на ускорението има ясно изразен максимум, последван от тенденция към намаляне с колебания както при нарастване, така и към намаляне на отрицателните стойности. Определената средна стойност на ускорението за периода е $a_0 = -9.3 \text{ m/s}^2$. Периодът на процеса е $T_{t_4} = 0.899 \text{ s}$. Честотният анализ в този диапазон показва наличие на трептения с произход действието на два хармоника с математичен номер $v_{t_4} = 3$ и $v_{t_4} = 6$. Амплитудите на хармониците са съответно $Amp_3 = 0.263 \text{ m/s}^2$ и $Amp_6 = 0.077 \text{ m/s}^2$ при честоти съответно $f_{t_{4_3}} = 3.3 \text{ Hz}$ и $f_{t_{4_6}} = 6.7 \text{ Hz}$. Тези амплитуди деформират характера на честотната крива, получавана в отсъствие на колебателни процеси. Останалите стойности на параметрите от спектралния анализ в честотния диапазон до около 11 Hz са показани в Таблица 5.2.

Таблица 5.2

$f_{t_4} [\text{Hz}]$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Amp_{t_4} [\text{m/s}^2]$	1.1	2.2	3.3	4.4	5.6	6.7	7.8	8.9	10.0	11.1
$f_{t_4} [\text{Hz}]$	1.009	0.217	0.263	0.150	0.047	0.077	0.044	0.040	0.036	0.031

Наличието на трептения в характеристиката на ускорението на автомобила се регистрира при всички изследвани случаи. С увеличаване на началната, за процеса спиране, скорост $V_{avt_b} = 52.3 \text{ km/h}$, положението на хармониците по честотната ос

се измества към по-високи стойности. Общия период на колебателния процес остава почти непроменен, като разликата между периодите T_{t_4} при спиране с начална скорост $V_{av_{t_b}} = 42.8 \text{ km/h}$ и $V_{av_{t_b}} = 52.3 \text{ km/h}$ е в рамките на 0.057 s . Отчетената средна стойност на ускорението за периода остава непроменена, $a_0 = -9.3 \text{ m/s}^2$.



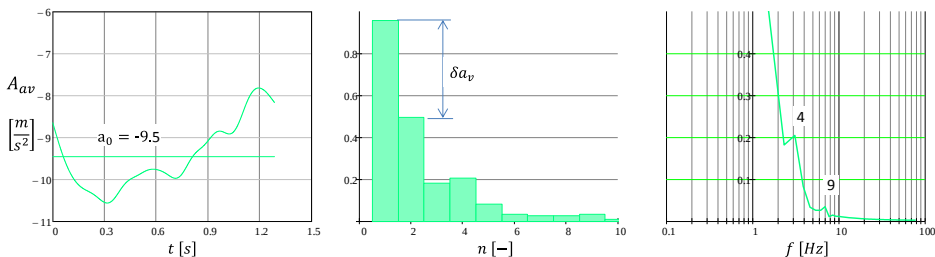
Фиг.5.7 Движение с максимални стойности на отрицателно ускорение
 $V_{av_{t_b}} = 52.3 \text{ km/h}$.

Регистрират се отново два хармоника с математичен номер $v_{t_{45}} = 5$ и $v_{t_{47}} = 7$, пораждащи трептения в графиката на ускорението. Амплитудите им са съответно $Amp_5 = 0.218 \text{ m/s}^2$ и $Amp_7 = 0.143 \text{ m/s}^2$ при честоти съответно $f_{t_{45}} = 5.2 \text{ Hz}$ и $f_{t_{47}} = 7.3 \text{ Hz}$. С нарастване на началната скорост намаля разликата между първите два съседни хармоника. При спиране от скорост $V_{av_{t_b}} = 42.8 \text{ km/h}$ разликата е $Amp_1 - Amp_2 = 0.793 \text{ m/s}^2$, а при $V_{av_{t_b}} = 52.3 \text{ km/h}$ тази стойност е $Amp_1 - Amp_2 = 0.516 \text{ m/s}^2$. Нарастването на честотата и амплитудите на хармониците, пораждащи трептения на надъжното ускорение, е свързано с нарастване на началната, за процеса спиране, скорост на движение на автомобила и честотата на общия колебателен процес за разглеждания период Δt_4 . Нисшите хармоници с номера $v_{t_{41}} = 1$ и $v_{t_{42}} = 2$ характеризират работата на системата против приплъзване и устойчивост ABS. При по-високите скорости на движение условията против приплъзване на ходовите колела се влошават и управляващата система увеличава честотата на задействане на управляващите електромагнитни вентили, регулиращи налягането в хидравличната система. Резултатите от извършения хармоничен анализ са показани в таблица 5.3.

Таблица 5.3

v_{t_4}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{t_4} [\text{Hz}]$	1.0	2.1	3.1	4.2	5.2	6.3	7.3	8.4	9.4	10.5
$Amp_{t_4} [\text{m/s}^2]$	1.250	0.734	0.206	0.192	0.218	0.136	0.143	0.117	0.103	0.093

При спиране с начална скорост около 60 km/h, при експеримента отчетена $V_{av_{t_b}} = 59.5$ km/h, характера на изменение на кривата на ускорението не се променя. Продължава тенденцията за нарастване честотата на хармониците, предизвикващи трептения. Графиките на фиг.5.8 показват наличие на ясно изразен колебателен процес. При тази начална скорост хармониците, пораждащи трептения са с номера $v_{t_{4_4}} = 4$ и $v_{t_{4_9}} = 9$. Техните амплитуди, както и останалите значими до 10 порядък, са показани в таблица 5.4. Амплитудите им са съответно $Amp_4 = 0.205$ m/s² и $Amp_9 = 0.035$ m/s² при честоти съответно $f_{t_{4_4}} = 3.1$ Hz и $f_{t_{4_9}} = 7.0$ Hz. Останалите хармоници, с порядък $v_{t_4} > 10$, са с незначителни амплитуди за всички изследвани режими на спиране и не създават трептения в характеристиката на ускорението на автомобила. Продължителността на периода при $V_{av_{t_b}} = 59.5$ km/h е $\Delta t_4 = 1.288$ s. В сравнение със спирането при скорост $V_{av_{t_b}} = 52.3$ km/h периодът Δt_4 при скорост $V_{av_{t_b}} = 59.5$ km/h е нараснал с 0.332 s. За това време автомобила изминава допълнително $\delta S_{t_4} = 5.393$ m, в сравнение с изминатия спиращен път за същия период при движение с $V_{av_{t_b}} = 52.3$ km/h. Средната стойност на ускорението през периода като цяло се запазва и с леко повишение възлиза на $a_0 = -9.5$ m/s².



Фиг.5.8 Движение с максимални стойности на отрицателно ускорение

$$V_{av_{t_b}} = 59.5 \text{ km/h.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съвкупността от колебателните процеси в спиращната система поражда колебания в характеристиката на надлъжното отрицателно ускорение на автомобила. Еднозначното и прецизно определяне на границите на периодите изисква внимателен анализ и обоснована технология за математична предварителна обработка на получените експериментални данни. Тези процедури са задължителни и представляват необходимо условие за коректната работа на разработената

методика за определяне на фазите на процеса спиране, основана на изследване производните на преместването на автомобила от по-висок порядък.

През първият етап на процедурата са структурирани базата данни и формирани масивите с елементарните периоди. Вторият етап включва допълнително изглаждане на експерименталните данни с цел анализ на производните от по-висок порядък.

Разработен е метод за експериментално определяне фазите на процеса спиране състоящ се в изследване на структурирани и изгладени експериментални данни, за функцията на преместване на автомобила, чрез производни от по-висок порядък. Регистрираните екстремуми на втората производна на ускорението в областта на пресечните точки на регресионните линии определят границите на съответните периоди. Резултатите от направения изследване в Глава 4 показват, че отстоянията на регистрираните екстремуми от пресечните точки на регресионните линии са в интервал $0.006 \div 0.007$ s, което характеризира разработения метод като устойчив за определяне границите на периодите при екстремно спиране на автомобила.

Извършено е експериментално изследване на автомобили от еднакъв клас, но с различен усилвател в спирачните сили. Резултатите от изследването са показани и анализирани в Глава 4. Анализът на процесите във времето показва, че движението на автомобила с максимални стойности на отрицателното ускорение не заема повече от 70.1% от времето за ефективно спиране, фиг.6.1. За процесите за реакция на спирачната система и необходимото време за нарастване на спирачния момент до максималните си стойности са необходими около 18.9% до 26.3% от общото време.

Параметрите на спиране през отделните фази показват известни различия по отношение продължителност на периодите, гранични условия за всеки от тях, средна стойност на ускорението на автомобила. В резултат на комплексното действие на тези фактори, автомобила с хидравличен усилвател на спирачните сили и показва по-добра ефективност и в сравнение с другия автомобил, при еднаква скорост в момента на задействане на спирачната система, отчетените стойности за общото преместване са по-малки.

Разработената експериментална установка позволи да бъдат изследвани периодите при екстремно спиране, някои от които са с малка продължителност и подчертана динамика на процеса. При извършения спектрален анализ са определени честотите и амплитудите на основните хармонични съставляващи на ускорението, действащи през отделните периоди. Проложените методи за обработка на данни и разработената методика за определяне параметрите на фазите, както и извършения анализ на получените резултати, дават основание да се счита, че поставената основна цел на дисертационния труд е изпълнена.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработен е метод за определяне фазите на периодите на процеса на екстремно спиране по данни от експериментални изследвания чрез производни от висок порядък и регресионни линии. Верифицирането на метода при проведените експериментални изследвания показва устойчиви резултати и незначителни отклонения в положението на границите на отделни период по отношение на пресечните точки на регресионните линии.

2. Разработена е методика за предварително изглаждане дължините на елементарните периоди на преместванията и коригиране на апаратни прекъсвания чрез доверителни интервали. Тя дава възможност за отстраняване на неточности при определяне на елементарните периоди породени от дискретния характер на регистрацията на данните. Процедурата е задължителна при последващите пресмятания за определяне производните на преместването.

3. Усъвършенствана е методика за изглаждане на експериментални данни за процеси с променлива динамика на измерваната величина. Предложеният подход позволява във вектора на изгладените данни да не се допускат прекъсвания и осигурява непрекъснатост на функцията в общия динамичен диапазон.

4. Определени са границите и продължителността на фазите при екстремни спирания за автомобили от среден. Установено е сравнително еднаква продължителност на периодите за реакция на спирачната система, нарастване на отрицателното ускорение и заключителния период на спиране на автомобила. Периодът на движение на автомобила с максимални стойности на отрицателно ускорение се влияе от началните за процеса спиране условия.

5. Изследвани са колебателните процеси през отделните периоди на спиране и са определени амплитудите и честотните спектри на значещите хармоници. Установено е, че при единични спирания и ниска температура на спирачните дискове, високи амплитуди на нисши хармоници се регистрират единствено в периода на движение с максимални отрицателни ускорения. За останалите периоди при направеното изследване, не е установено наличие на трептения в характеристиката на ускорението на автомобила.

6. Разработена е система за прецизни измервания и високочестотна регистрация на данните за преместването на автомобила. Системата позволява чрез специално разработен сензор и връзка с външни за системата сигнали от управлението на автомобила, в реално време да се регистрират синхронно експериментални данни.

Списък на публикациите по дисертационния труд

1. Ivanov, Z., Dimitrov, R., Stoyanov S., Ivanov, D., “Analysis braking deceleration of light vehicles”, Technical and scientific conferenre – Transport. PROCEEDINGS OF UNIVERSITY OF RUSE - 2019, volume 58, book 4.
2. Dimitrov, R., Ivanov, D., “Analysis methods for determination of braking deceleration”, Technical and scientific conferenre – Transport. PROCEEDINGS OF UNIVERSITY OF RUSE - 2020, volume 58, book 4.
3. Ivanov, D., “Study of light radiation characteristics of vehicles”, Technical and scientific conferenre – Transport. PROCEEDINGS OF UNIVERSITY OF RUSE - 2021, volume 60, book 4.
4. Ivanov, Z., Sitnik, L., Dimitrov, R., Wrobel, R., Mihaylov, R., Skobiej, K., Ivanov, D., Andrych-Zalewska, M., “Investigation of braking deceleration in vechicle”, 8th International conference on energy efficiency and agricultural engineering, EE and AE 2022, Ruse.

Резюме:

Дисертационният труд изследва процеса на екстремно спиране на автомобил и определя параметрите на отделните фази, както влиянието на колебателните процеси в спирачната система върху параметрите на отрицателното ускорение на автомобила. Чрез създадена за целите на изследването експериментална установка за прецизни високочестотни измервания на процесите при екстремни спирания на автомобил, са изследвани граничните условия на съответните фази на спиране. Разработена е методика за структуриране на данните от експерименталните изследвания и за предварителна обработка на резултатите. Разработен е метод за определяне на действителните фази на процеса спиране по характеристиките на експериментално получени данни за отрицателното ускорение на автомобила. Изследвани са началните условия, границите и продължителността на фазите на спиране, както и характеристиките на надлъжното ускорение на автомобила. Определени са честотните спектри и амплитудите на основните хармоници характеризиращи колебателните процеси по време на движението на автомобила с максимални отрицателни ускорения.

Summary:

The dissertation researches the process of extreme braking of a car and determines the parameters of the individual phases, as well as the influence of oscillatory processes in the braking system on the parameters of the negative acceleration of the car. Using an experimental setup created for the purposes of the research for precise high-frequency measurements of the processes during extreme braking of a car, the boundary conditions of the corresponding braking phases have been studied. A methodology has been developed for structuring the data from the experimental studies and for pre-processing the results. A method has been developed for determining the actual phases of the braking process based on the characteristics of experimentally obtained data on the negative acceleration of the car. The initial conditions, boundaries and duration of the braking phases, as well as the characteristics of the longitudinal acceleration of the car, have been studied. The frequency spectra and amplitudes of the main harmonics characterizing the oscillatory processes during the movement of the car with maximum negative accelerations have been determined.

Благодарности

Издавам благодарности на своя научен ръководител доц. д-р инж. Радостин Димитров за неговите съвети, напътствия и компетентно ръководство, както и на всички колеги, с чиято помощ, компетентност и професионализъм бяха извършени експерименталните изследвания. Благодаря на всички колеги, които ме подкрепиха и ми помогнаха със своя опит и съвети да реализирам този дисертационен труд.