

МОДЕЛИРАНЕ РЕСОРНО ОКАЧВАНЕ НА ПОДВИЖЕН ЖЕЛЕЗОПЪТЕН СЪСТАВ С АВТОМАТИЗИРАНА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Добринка Атмаджова

atmadzhova@abv.bg

*Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”,
катедра “Транспортна техника”, Ул. “Гео Милев” 158, София 1574,
БЪЛГАРИЯ*

Резюме: В статията се изследва възможността за приложение на автоматизирана система за управление в системата на ресорно окачване на подвижен железопътен състав, основана на принципа на размитата логика (РЛ). Приложението на РЛ в управлението позволява използването само на експертни знания за поведение на системата. Във връзка с това в статията са разгледани опростени математични модели (и реализация в програмния пакет Simulink на продукта MATLAB) на железопътен вагон с двустепенно ресорно окачване. Разгледаната и реализираната в MATLAB структура на РЛ може да бъде използвана в много области на техниката, където се изисква управление на вибрационните системи.

Ключови думи: подвижен железопътен състав, ресорна система, моделиране на ресорна система с управление.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на съвременните технически средства в силна степен зависи от автоматизацията на управление [7]. Голяма част от транспортните средства имат конструкция с пасивна система на ресорно окачване т.е. неуправляема система. Най-остро този въпрос стои пред окачването на возилата за пътническият транспорт, в частност пред пътническите вагони. Пасивното ресорно окачване колкото и оптимално да бъде, първо то не е способно да се справи с всички възможни въздействия на подвижната единица от страна на пътя, и във второ при проектирането му върху него се наслаждат редица експлоатационни и конструктивни ограничения. От това следва, че само преход на качествено ново ниво в конструкцията на окачването дава възможност за подобряване плавността на хода, а следователно и повишаване

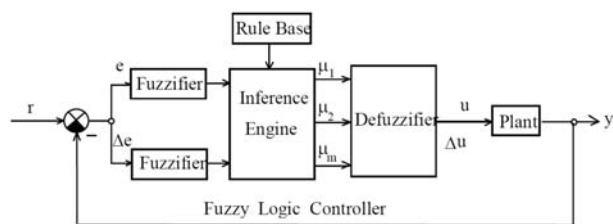
качеството на обслужване и удължаване срока на работа на елементите от транспортното средство.

Прилаганите математически модели за моделиране на голяма част реални технически системи, или се явяват идеализирани, или отсъстват. В създаването в настоящия етап математически модели на подвижния железопътен състав (ПЖПС) като правило возилото се разглежда като динамична трептелива система с ограничено число степени на свобода, извеждайки при това само определени видове трептения и смущения [14]. Същото може да се каже и за управлението на сложни динамични системи [7]. Целта, която си поставя настоящата статия е използването в ресорното окачване на ПЖПС управление, основано на размитата логика (РЛ). Размитата логика е форма на многовариационна логика, произлизаща от

теорията на размитите множества с цел да отрази това, което е относително, а не точно. В сравнение с множествата от двоичната логика, размитата логика борави с променливи, които могат да бъдат със стойности между **0** и **1** и не е ограничена единствено до истинни стойности (истина = **1** и лъжа = **0**) така както в класическата логика. Терминът *размита логика* води началото си от работата и теорията, развита от Лофти Заде. През 1965 г. той предлага теорията на размитите множества [8, 9] и по-късно установява размитата логика на базата на тази теория. РЛ вече е намерила добро приложение в много области където е необходимо управление на сложни динамични системи, докато традиционните методи или не дават необходимите резултати или въобще са неприложими. Ето защо изучаването на размитото управление и неговата съпоставка с конвенционалното управление и типовите непрекъснати закони за регулиране са от съществено значение за съвременната теория на управление. В литературата [11, 12, 13] са описани главно три типа структури на размито логическо управление. Основната структура е управление, при което управляващото въздействие **u** се извежда въз основа на логическата релация между системната грешка **e** и моментното ѝ изменение Δe . Това управление е от т.н. позиционен тип. Втората структура е размито пропорционално - интегрално (ПИ) управление, която структура е еквивалентна на първата с тази разлика, че изходната величина е моментното изменение на управляващото въздействие Δu , а входните величини са както при размитото пропорционално - производно управление (ПП). Това управление според характера на изходната си величина е от т.н. скоростен тип. Третата структура е на размито пропорционално - интегрално - производно – (ПИП) (proportional integral derivative) управление [17]. То има две разновидности. Първият вид генерира управляващо въздействие **u**, базирано на комбинация от три входни величини - системната грешка **e**, моментното ѝ изменение Δe и акумулативната сума на грешката Σe . При втория вид изходната величина е моментното изменение на управляващото въздействие Δu въз основа на комбинация от други три величини - системната грешка **e**, моментното ѝ изменение Δe и ускорението на изменението

на грешката $\Delta^2 e$. Затрудненията и при двата вида са, че при логическата релация те изискват три входни величини, които значително разширяват таблицата с логическите правила в реализацията им и правят проектирането им по-сложно, особено в случаите, когато броят на размитите множества на входно-изходните величини е по-голям. Ето защо, такъв тип размито ПИП управление с използване на механизма на извеждане на Мамдани [13] по рядко се използва в практиката. В този случай подходящ е механизмът на извеждане на Сугено [16].

На фиг. 1 е показана структурната схема на система за размито управление, в която към обекта на управление е включен традиционен размит регулатор със своите основни три блока - блок за размиване, блок с логически правила и механизъм за извеждане (логически блок), и блок за деразмиване. Конвенционалният размит регулатор обикновено работи с входните сигнали на системната грешка **e** и моментното ѝ изменение Δe , така че има два блока за размиване на входа си [11].



Фиг. 1. Структура на система за размито управление

Логическата таблица се състои от набор от предварително съставени логически правила от типа "if -then", които описват стратегията на управлението и са получени въз основа на експертни знания. При конвенционалния регулатор, който работи с входните величини на грешката **e** и нейното моментно изменение Δe , стойността на изходната величина **u** при размитото ПП управление или Δu при размитото ПИ управление се определя чрез логически правила от типа:

$$(1) \quad R^n : \text{if } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i \text{ then } u \text{ is } C_i$$

където **e**, Δe и **u** в случая са лингвистични променливи на съответните входно-изходни величини. Техните универсални множества се получават от диапазоните на изменение на съответните величини - [-E, E], [-ΔE, ΔE], [-U, U]. Параметрите A_i , B_i и C_i са размити

множества на съответните величини, равномерно разпределени в тези диапазони.

Размитият механизъм за извеждане в логическия блок прилага т.н. размита импликация и определя решението за размитото управляващо въздействие. От познатите в практиката методи за размита импликация [15], за целите на управлението най-подходяща е известната максимално-минимална композиция на Мамдани [13]:

$$(2) \quad \mu_i = \max \{ \min [\mu_{Aj}, \mu_{Bk}] \},$$

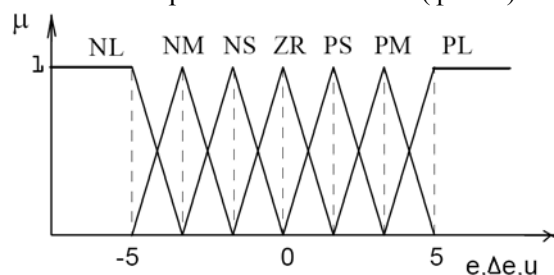
където μ_{Aj} и μ_{Bk} са степените на принадлежност, получени при операциите пресичане и обединение от размитите множества на входните величини.

Блокът за деразмиване реализира прехода от размити към реални стойности. От известните в практиката методи [11, 12], за целите на управлението най-разпространен е методът на центъра на тежестта или методът на средната претеглена стойност,

$$(3) \quad u_0 = \frac{\sum_{i=1}^m u_i \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^m \mu(u_i)}$$

където u_i са центровете на активираните размити множества, а $\mu(u_i)$ са степените на принадлежност в тези множества.

В алгоритъма на блока за размиване са моделирани функциите на принадлежност на отделните размити множества, чрез които се изчисляват степените на принадлежност на реалните стойности на входната величина към съответните размити множества (фиг. 2).



Фиг. 2. Функции на принадлежност на размитите множества на входно-изходните величини

При избора на формата на функциите на принадлежност за предпочитане е триъгълната форма със симетрично разположени взаимно пресичащи се равнобедрени триъгълници. Това е така, защото от една страна описанието на размитите множества и изчисленията на степените на принадлежност с такива

функции е най-икономично, а от друга страна тези функции засилват интегралните свойства на регулатора. Така например, установено е [12], че триъгълните функции на принадлежност със степен на принадлежност в пресечената им точка $\mu=0.5$, способстват за най-малко пререгулиране в системата за управление. От своя страна стесняването на централните размити множества подобрява точността (намалява статичната грешка) в системата. Разширяването (отварянето) на периферните множества, засилва бързодействието в системата.

Логиката на съставяне на таблицата с правилата произтича от използването на метода на хлъзгането при реализацията на размитото управление [12]. За целта се използват знанията за поведението на системата във фазовата равнина, дефинирана от грешката e и нейната производна Δe . Формирането на управляващото въздействие се осъществява посредством разделянето на фазовата равнина на две части чрез т.н. линия на превключване. Правилата трябва да бъдат така подбрани, че системата да се стреми да поддържа стойностите на грешката и производната на линията на превключване. Управляващото въздействие u се определя в зависимост от линията на превключване:

- управлението u трябва да бъде отрицателно над линията на превключване, равно на нула върху нея и положително под нея;

- управлението u трябва да нараства със съответен знак при отдалечаване от линията на превключване в двете посоки;

- граничните стойности на грешката и производната трябва да бъдат покрити от максималните стойности на управлението u в краищата на таблицата.

С развитието на програмируеми контролери и техните процесорни възможности все повече се засилва възможността за вграждането на съвременни размити алгоритми за управление.

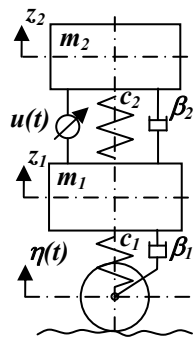
Контролер, основан на принципите на РЛ, позволява управлението на обекти да се основава само на така наречените базови правила, формулирани от експертите, т.е. за размит контролер (РК) отпада необходимостта от създаването на точен математичен модел на обекта на управление.

Задачите, които си поставя настоящата статия са:

- използване на РК в системата на ресорното окачване на пътнически вагон;
- създаване на математичен модел за тестване работата на РК.

2. МОДЕЛ НА ВЕРТИКАЛНИ ТРЕПТЕНИЯ НА ПЪТНИЧЕСКИ ВАГОН

За изследване влиянието на основни параметри на транспортното средство върху вертикалните трептения, като правило се използва опростен модел с две степени на свобода, в които две маси са свързани с еластични и дисипативни връзки (фиг.3) [10]. С такъв модел се описват вертикалните трептения на релсови транспортни средства с двустепенно ресорно окачване: магистрални локомотиви и пътнически вагони [3].



Фиг.3. Опростен модел за изследване вертикалните трептения на пътнически вагон с въведен силов елемент, предназначен за управление.

В статията е разгледан опростен модел на пътнически вагон за изследване вертикалните трептения, като между обресорните части на талигата и коша на вагона е въведен силов елемент, предназначен за управление. Конструктивно даденият елемент може да представлява например хидравличен привод. Движението на динамичната система се разглежда при наличие на смущения от страна на пътя. Вертикалните трептения се описват със следните диференциални уравнения:

$$(4) \quad \begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 + \beta_1 \dot{z}_1 + \beta_2 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1 z_1 + \\ + c_2 (z_1 - z_2) = \beta_1 \dot{\eta} + c_1 \eta + u \\ m_2 \ddot{z}_2 + \beta_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + c_2 (z_2 - z_1) = -u \end{aligned}$$

където: m_1 - половината маса на необресорените части на талигата; m_2 - една четвърт от масата на коша на вагона; c_1, β_1 - съответно коравина и коефициент на демпфериране в буксовото ресорно окачване; c_2, β_2 - съответно коравина и коефициент на демпфериране в централното ресорно окачване; $\eta(t)$ - смущение от страна на пътя; $u(t)$ - управляващо въздействие; $z_i, \dot{z}_i, \ddot{z}_i$ ($i = 1, 2$) -

обобщени координати и техните производни по време (1- талига; 2-кош)

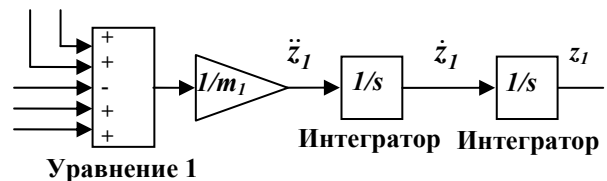
Преобразуваме уравненията на движение към вид удобен за моделиране:

$$(5) \quad \begin{aligned} \ddot{z}_1 &= \frac{1}{m_1} [-\beta_1 \dot{z}_1 - \beta_2 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - c_1 z_1 - \\ &\quad - c_2 (z_1 - z_2) + \beta_1 \dot{\eta} + c_1 \eta + u] \\ \ddot{z}_2 &= \frac{1}{m_2} [-\beta_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - c_2 (z_2 - z_1) - u] \end{aligned}$$

Като средство за моделиране на разглежданата динамична система ще използваме пакета Simulink на програмата MATLAB [1, 2, 4, 5]. Ще използваме следните основни елементи: диференциатор, интегратор, усилител и суматор.

Процесът на построяване на модела в системата Simulink изглежда по следния начин.

Нека лявата част на първото уравнение от системата (5) е изходът на симулатора, а елементите от дясната страна на това уравнение са на входа на суматора. Изхода на суматора ще включим към усилителя с коефициент $1/m_1$, който изход от своя страна ще съединим с интегратора. На изхода на интегратора ще получим скоростта на преместване на обресорените части на талигата. Съединявайки неговия изход с други интегратори ще получим преместването на обресорените части на талигата. Получената част от модела е представена на фиг.4. За дострояването на модела за първото уравнение съединяваме входа на суматора с елементи, представляващи слагаемите в уравнението. След което по същата аналогия построяваме модела на второто уравнение и съединяваме общите елементи.

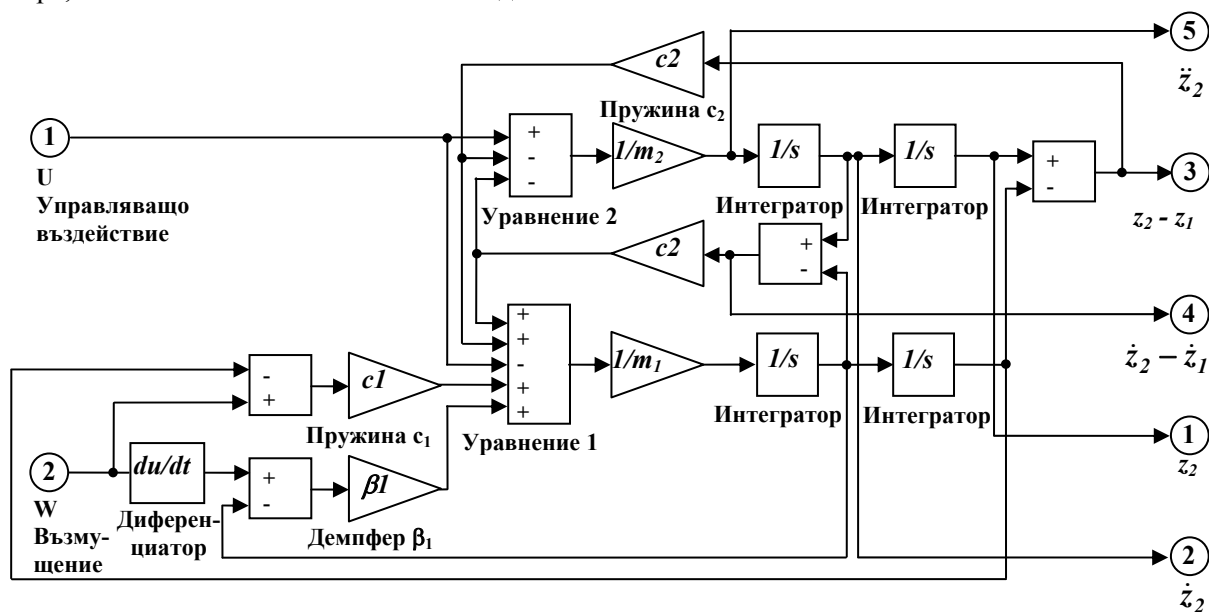


фиг.4. Част от модела в системата Simulink на първото уравнение от система (5).

На фиг.5 е представен моделът на динамичната система на окачване на вагоните в системата Simulink на програмата MATLAB. Моделът е структуриран като подсистема, която има два входа (смущаващо въздействие W и управляващо въздействие U) и пет

изхода (вертикална координата на коша, разстояние между кош и талига, вертикална скорост на коша, вертикално ускорение на коша, разлика между вертикалните скорости на коша и талигите). Както бе споменато по-горе, използваният в статията модел на

вертикални трептения ще бъде използван само за тестване работата на контролера, затова в получената подсистема включваме в модел на активно окачване управляем РК.



Фиг.5. Модел на динамическата система на ресорно окачване на железопътен вагон в системата Simulink.

На фиг. 6. е представен пълния модел на системата с РК, в който е добавена още една подсистема, описваща вертикалните трептения на вагона, но не управлявана от контролер (за сравняване характеристиките на пасивно и активно окачване).

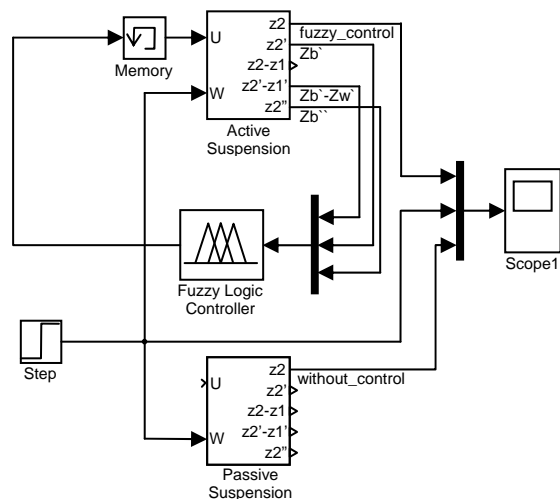
присъства блока Fuzzy Logic Controller, който представлява РК [18].

3. МОДЕЛ НА РК

За моделиране на контролера основан на РЛ в разработката се използва разширението Fuzzy Logic Toolbox на програмата MATLAB. Този пакет позволява да се създават системи с РЛ изводи и нечетна класификация в рамките на средата MATLAB с възможност за тяхната интеграция в Simulink. Базови понятия на Fuzzy Logic Toolbox се явява FIS – структура – система на нечетния извод (Fuzzy Inference System). FIS – структура съдържа всички необходими данни за реализация на функционалното отражение “входове-изходи” на основата на развития логически извод.

Моделирането на РК в системата MATLAB и пакета Fuzzy Logic Toolbox се заключава в задаването на следните основни характеристики:

- входни променливи;
- изходна променлива (управляващо въздействие);
- “терми” на входни и изходни променливи;



Фиг.6 Модел на система с контролер, работещи на основата на развита логика.

В даденият модел в качеството на източник на смущаващо въздействие се използва единичен скок (може да бъде приет за удар в релсата). В представеният модел

- функции на принадлежност на термите;
- базови правила;
- алгоритъм на размития логически извод;
- процедура на преобразуване на размитото множество в разрито число (процедура на деификация).

Да определим приведените по-горе характеристика за контролер на активното окачване на талига за пътнически вагон.

РК използван в активно окачване се състои от три входа: ускорение на коша, скорост на коша, разликата в скоростите на коша и талигата. Изход на РК се явява управляващото въздействие. Всеки вход и изход се описва с набор от терми в следния вид: положително голямо, положително средно, положително малко, нулево, отрицателно малко и т.н. В таблица 1 е даден списък на термите за всеки вход и изход.

Таблица 1. Променливи и тяхните терми

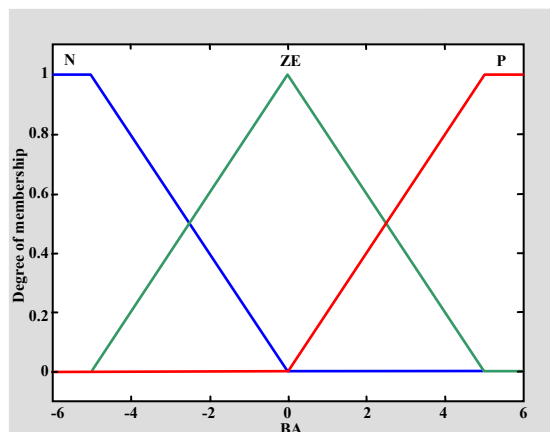
Променливи	Терми	Усл. ozn.
Вертикално ускорение на коша (BA)	Положително Нулево Отрицателно	P ZE N
Вертикално скорост на коша (BV)	Отрицателна средна Отрицателна малка Нулева Положителна малка Положителна средна	NM NS ZE PS PM
Разлика на скоростите между коша и талигите на вагона (BDV)	Отрицателна средна Отрицателна малка Нулева Положителна малка Положителна средна	NM NS ZE PS PM
Управляващо въздействие (Force)	Отрицателно мн. голямо Отрицателно голямо Отрицателно средно Отрицателно малко Нулево Положително малко Положително средно Положително голямо Положително мн. голямо	NVB NB NM NS ZE PS PM PB PVB

За всички вътрешни терми, както входни променливи, така и изходни променливи ще поставим триъгълни функции на принадлежност. За крайните терми определяме линейни функции на принадлежност с постоянни граници равни на единица. Количествените характеристики на функциите на принадлежност ще определим в

зависимост от диапазона на изменение на параметъра, за който се строят функциите за принадлежност на неговите терми. Диапазоните на изменение на параметрите могат да бъдат получени или от експериментални данни или в резултат на моделизация. В настоящата разработка диапазоните на входните променливи са получени в резултат на моделиране вертикалните трептения на пътнически вагон с пасивно ресорно окачване.

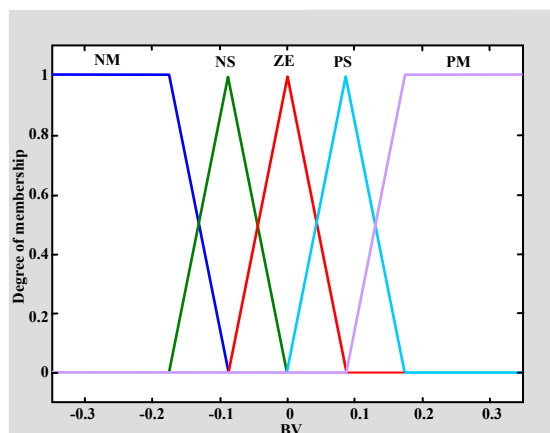
За вертикалното ускорение на коша диапазона на изменение е приет $[-6, +6] \text{ m/s}^2$.

Изхождайки от това, че дадена входна променлива има три терми, получаваме следните функции на принадлежност, представени на фиг.7.



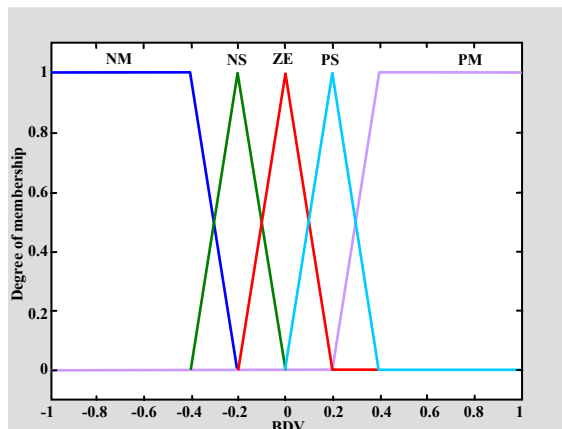
Фиг.7 Функция на принадлежност на променливата BA (вертикално ускорение на коша).

За вертикалната скорост на коша е приет диапазон на изменение $[-0,35, +0,35] \text{ m/s}$. В резултат на разделяне диапазона на пет терми се получават функциите на принадлежност, представени на фиг.8.



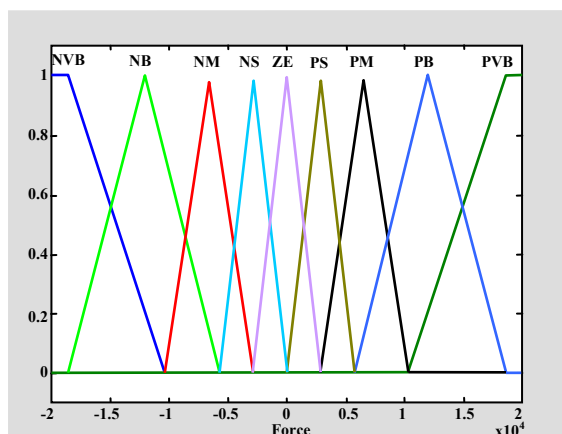
Фиг.8 Функция на принадлежност на променливата BV (скорост на коша във вертикална равнина).

Функцията на принадлежност на разликата между скоростта на коша (фиг.9) и талигата на вагона в много случаи са аналогични функции на принадлежност на скоростта на коша. Диапазона на изменението на този параметър $[-1, +1]$ m/s. Диапазона на изменение на управляващото въздействие зависи от характеристиката на коша, но той трябва да бъде такъв, че управляващото въздействие действително да може да управлява системата.



Фиг.9 Функция на принадлежност на променливата BDV (разлика в скоростите на коша и талигите на вагона).

В разработката диапазона на управляващото въздействие е приет в границите $[-20, +20]$ kN. Функциите на принадлежността на управляващото въздействие е представена на фиг.10.



Фиг.10 Функция на принадлежност на променливата Force (управляващо въздействие).

Базата правила на РК се състои от правила от вида:

IF (BDV=A) AND (BV=B) AND (BA=C) THEN FORCE=D

Тук **A**, **B**, **C**, **D** – съответни терми на лингвистични променливи. Всички правила на РК са показани на таблица 2.

BDV – разлика между скоростта на коша и талигите на вагона;

BV – вертикална скорост на коша;

BA – вертикално ускорение на коша.

Таблица 2. Правила на развития контролер

Разлика между скоростите на коша и талигата във вертикална равнина	Скорост на коша във вертикална равнина	Ускорение на коша във вертикална равнина	Управяващо въздействие
PM	PM	ZE	ZE
PS	PM	ZE	NS
ZE	PM	ZE	NM
NS	PM	ZE	PM
NM	PM	ZE	NB
PM	PS	ZE	ZE
PS	PS	ZE	NS
ZE	PS	ZE	NM
NS	PS	ZE	PM
NM	PS	ZE	NB
PM	ZE	ZE	PS
PS	ZE	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE
NS	ZE	ZE	ZE
NM	ZE	ZE	NS
PM	NS	ZE	PM
PS	NS	ZE	PM
ZE	NS	ZE	PS
NS	NS	ZE	PS
NM	NS	ZE	ZE
PM	NM	ZE	PB
PS	NM	ZE	PM
ZE	NM	ZE	PM
NS	NM	ZE	PS
NM	NM	ZE	ZE
PM	PM	N or P	NS
PS	PM	N or P	NM
ZE	PM	N or P	NB
NS	PM	N or P	NB
NM	PM	N or P	NVB
PM	PS	N or P	NS
PS	PS	N or P	NM
ZE	PS	N or P	NM
NS	PS	N or P	NB
NM	PS	N or P	NB
PM	ZE	N or P	PM
PS	ZE	N or P	PS
ZE	ZE	N or P	ZE
NS	ZE	N or P	NS
NM	ZE	N or P	NM
PM	NS	N or P	PB
PS	NS	N or P	PB
ZE	NS	N or P	PM

NS	NS	N or P	PM
NM	NS	N or P	PS
PM	NM	N or P	PVB
PS	NM	N or P	PB
ZE	NM	N or P	PB
NS	NM	N or P	PM
NM	NM	N or P	PS

Алгоритъма на РЛИ (размита логически извод) в дадения контролер е реализиран във вид на алгоритъм на Мамдан, който може да бъде описан по следния начин:

1. Фазификация (привеждане към размитост). На този етап се намират степени на истинност на предположение на всяко правило.
2. Размит извод. На този етап се намира нивото на "отсичане" за предположение на всяко от правилата (с използване на операцията минимум). След което се намират отсечените функции на принадлежност.
3. Композиция. На дадения етап с използване на операцията максимум се осъществява обединение на намерените отсечени функции, което довежда до получаването на размито подмножество за променливия изход.
4. Дефазификация. На този етап, изхождайки от полученото на предишния етап размито подмножество за изходната променлива се получава точно число. В РК описан в статията се използва центроиден метод за привеждане към точност.

4. ПАРАМЕТРИ И РЕЗУЛТАТИ ОТ МОДЕЛИРАНЕТО

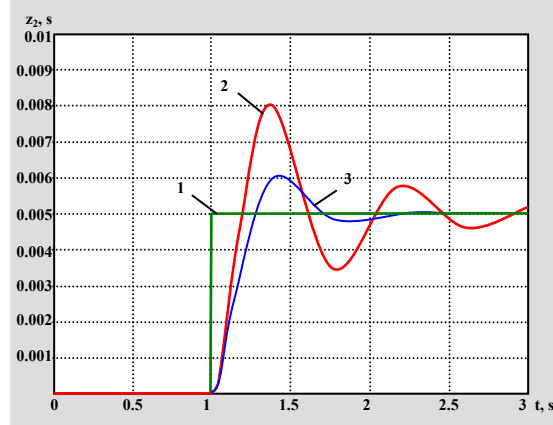
Параметрите на модела на вертикалните трептения, по които се провежда тестването на РК са представени в таблица 3.

Таблица 3. Параметри на моделиране

Параметър	Означение	Стойност
1/2 от масата на обресо-рената част на талигата	m_1	2000 kg
1/4 от масата на вагона	m_2	11500 kg
Коравина на централното ресорно окачване на 1/2 талига	c_2	810 kN/m
Коравина на буксовото ресорно окачване на 1/2 талига	c_1	2800 kN/m
Демпфериране в централното ресорно окачване.	β_2	58000 Ns/m
Демпфериране в	β_1	18000 Ns/m

буксовото ресорно окачване.		
Максимално управляващо усилие	F	20 kN

Резултатите от моделирането в случая с използване на смущаващо въздействие във вид на единичен скок са представени на фиг.11.



Фиг.11 Трептение на коша на вагона във вертикална равнина при активно и пасивно ресорно окачване: 1- външно въздействие; 2- пасивна ресорна система; 3- активна ресорна система.

На фигурата са показани смущаващото въздействие и реакцията на активното ресорно окачване (управляемия РК) за сравнение е показана и реакцията на пасивно ресорно окачване. Както се вижда от фигурата амплитудата на трептенията на активното ресорно окачване е три пъти по-малка, а времето на затихване на трептенията е около 2,5 пъти по-малко от това, при пасивното ресорно окачване.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управлението с използването на апарата РЛ е един от най-ефективните методи за управление на сложни динамични системи, за които е сложно или невъзможно построяване на адекватен математичен модел. В статията е описан модел на РК за управление на вертикални трептения на транспортна средство – пътнически вагон. Резултатите от моделирането показват адекватност на приложение на принципите на РЛ за управление на трептения и на построеният модел на РК. В статията са показани възможностите на MATLAB и Simulink за моделиране на динамични системи, управляеми с РК, което дава възможност за реализация на разглежданите принципи и в други области.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления: с примерами на языке MATLAB.— СПб.: Наука, 1999
- [2] Гулятьев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: Питер, 2000
- [3] Динамика вагона: Учебник для вузов ж.д. транспорта / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов / Под ред. С. В. Вершинского.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Транспорт, 1991
- [4] Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. — СПб.: Питер, 2001
- [5] Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник.— СПб.: Питер, 2001.
- [6] Караджов Т., Ж. Димитров Вагоны. Техника, София, 1988
- [7] Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник для вузов: в 3 т. Т. 3. Методы современной теории автоматического управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, А. И. Баркин, Е. М. Воронов и др. / Под ред. Н. Д. Егупова.— М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000
- [8] Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверин и др. / Под ред. Д. А. Поспелова.— М.: Наука, 1986
- [9] Прикладные нечеткие системы / К. Асаи, М. Сугено и др. / Под ред. Т. Тэрано.— М.: Мир, 1993
- [10] Селинов В. И. Проектирование подвешивания: Учеб. пособие.— Брянск: БГТУ, 1999
- [11] C.J. Harris, C.G. Moore and M.Brown. Intelligent control - Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets. World Scientific, London, 1994.
- [12] Driankov, D., H. Hellendron and M. Reinfrank. An introduction to Fuzzy Control. Heidelberg, Springer Verlag, 1993.
- [13] Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proceedings IEEE, 121, N0.12, 1974.
- [14] Gavrilovic Br., R. Vukadinovic, N. Kartalovic. Simulate of torsional momentum at the operative shaft of the locomotive series ZS 444 Scientific – expert conference on railway RAILCON'08, Nis, Srbija, 2008
- [15] George K. I. Mann, Bao-Gang Hu, and Raymond G. Gosine,. Analysis of Direct Action Fuzzy PID Controller Structures. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—part B: Cybernetics, vol. 29, no. 3, June 1999.
- [16] Petrov M., I. Ganchev, A. Taneva. Fuzzy PID Control of Nonlinear Plants. Proceedings of the IEEE International Symposium on "Intelligent Systems", Varna, Bulgaria, 10 -13 September, 2002, IEEE Catalog Number 02EX499, ISBN 0-7803-7601-3, Vol. 1, 2002
- [17] Petrov M., I. Ganchev, A. Taneva. Fuzzy PID Controller design in MATLAB environment. International conference "AUTOMATICS AND INFORMATICS'07", Sofia, Bulgaria, 3-6 October 2007
- [18] Cai B., Konik D. Intelligent Vehicle Active Suspension Control Using Fuzzy Logic // IFAC World Congress.— Sydney — V. 2, 1993

MODELING OF ROLLING STOCK SPRING SUSPENSION WITH AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM

Dobrinka Atmadzhova, Assoc. Prof., PhD

*Todor Kableshkov Higher School of Transport, Department of Transport Equipment
Geo Milev str.158, Sofia 1574,
BULGARIA*

Key words: rolling-stock, suspension systems, modeling of suspension systems with control.

Abstract: The paper presents the result of research on the possibility to apply an automated control system for rolling stock suspension systems based on the principle of Fuzzy Logic (FL) The FL application in controlling allows using only expert knowledge of the system behavior. In this connection the article examines simplified mathematical models of a railway car with primary and secondary suspension systems. The FL controller examined and implemented in the MATLAB structure can be used in many areas of technology where it is required to control oscillatory systems.