

# КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТЕН МОДЕЛ НА АМОРТИЗАТОР ЗА КОЛЕСНИК

## FINITE ELEMENT MODEL OF STRUT FOR LANDING GEARS

### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ АМОРТИЗАТОРА ШАССИ САМОЛЕТА

доц. д-р Илиев В.

Факултет по Транспорта, Технически университет - София

**Abstract:** In this paper nonlinear finite element of landing gear strut is presented. Element is derived by modelling bending and torsional stiffness and mass properties of main parts as beams and final matrices are evaluated by static condensation. Damping and elastic properties in longitudinal direction are evaluated by using of nonlinear equations of oleo-gas shock-absorbers. Derived element is intended for use in corotational framework and multibody analysis.

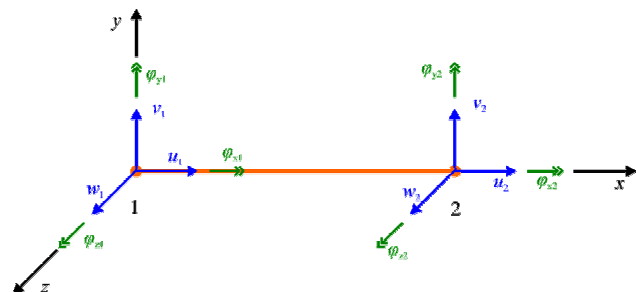
**KEYWORDS:** NONLINEAR FINITE ELEMENTS,

### 1. Увод

Амортизаторът е основен елемент на колесника в летателните апарати. Той е предназначен да поема вертикалната компонента на кинетичната енергия и да я разсейва при кацане на летателния апарат (основно). Освен това той често се използва и като основна стойка на колесника, като предава към летателния апарат и значителна част от усилията, възникващи при спиране или движение по пистата. От тук следва, че точното моделиране на амортизатора е предпоставка за качествено моделиране на важни етапи от полета на летателните апарати и оценка на експлоатационните свойства на амортизатора и свързаните с него елементи.

При моделиране на взаимодействието между отделните елементи на летателните апарати при движение по земята, при излитане и кацане подходящи методи за изследване са както класическите методи за анализ динамиката на многомасови конструкции (например с плаваща координатна система, floating frame, в [6]), така и методи за нелинеен крайно-елементен анализ, като метода на подвижната координатна система (МПКС, corotational method) [4,5]. Предлаганият краен елемент е предназначен основно за МПКС, но може да се използва и в методи с плаваща координатна система. Предимствата на МПКС са няколко, но основното е, че отделните тела се третират като крайни елементи, без разделяне на еластично и твърдо тяло, както и факта, че използва само линейни локални матрици. Това значително опростява моделирането на отделните части на летателните апарати, като позволява да се моделират нелинейните процеси, които протичат в него.

Основната цел на настоящата работа е да се моделира амортизаторът като краен елемент тип „пространствена греда“ с два възела и 12 степени на свобода – по три премествания и три завъртания във всеки възел (фиг. 1).

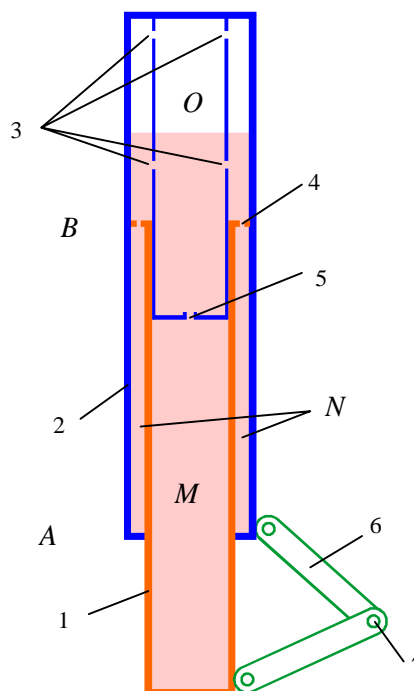


фиг. 1. Тримерен модел на греда.

### 2. Принцип на работа на амортизатора

На фиг. 2 е показана една от разпространените принципни схеми на амортизатор. Той се състои от две основни части - вътрешен цилиндър 1 и външен цилиндър 2. Те образуват камерите  $M$ ,  $N$  и  $O$ , които са свързани с отворите 3 и дроселите 4

и 5. Долната част на камерите е запълнена с течност, а в горната част на камера  $O$  се намира газ под налягане.



фиг. 2. Принципна схема на течно-газов амортизатор.

1-вътрешен цилиндър; 2-външен цилиндър; 3-отвори; 4, 5-дросели; 6-двузвенеен механизъм; 7-шарнир

При придвижване на долния цилиндър спрямо горния течността преминава от една камера в друга през дроселите, които оказват значително съпротивление на движението ѝ. Това съпротивление осигурява разсейването на енергия при движение във всяка посока на долния спрямо горния цилиндър и това осигурява демпфирането в амортизатора. При навлизането на долния във горния цилиндър газът се свива, а при излизането се разширява почти без загуби. Това осигурява голямата еластичност на амортизатора по оста на цилиндрите. Отворите 3 не оказват съпротивление на придвижването на течността и газа.

### 3. Крайно-елементен модел

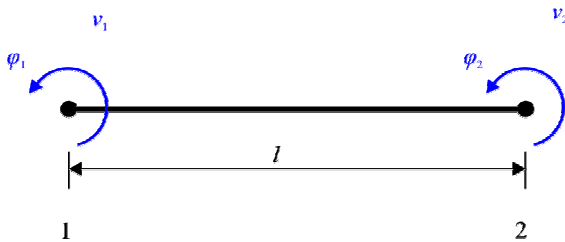
При моделирането на амортизатора съществуват няколко проблема. Първият е, че амортизаторът представлява всъщност механизъм. Отделните основни части променят взаимното си разположение и местата, в които контактуват, т.е. променя се топологията на конструкцията. Това внася нелинейност в конструкцията, като ще се отрази на матриците на коравина и маса.

Другият проблем е, че еластичността в осова направление зависи от свиваемостта на газ, който не се подлежи на моделиране с крайни елементи. Същото се отнася и за демпфирането при протичане на течността. Затова демпфирането и еластичността в осова направление ще бъдат изведени от уравненията, описващи тези явления. Тъй като уравненията зависят от положението на отделните елементи и от техните скорости, то матриците на коравина и демпфиране в осова посока се получават нелинейни.

Работата на амортизатора може да се представи като се моделират отделните особености с различни крайни елементи. Целта е той да се представи като двувъзлов краен елемент, подобен на краен елемент греда, със съответните матрици на коравина, демпфиране и маса.

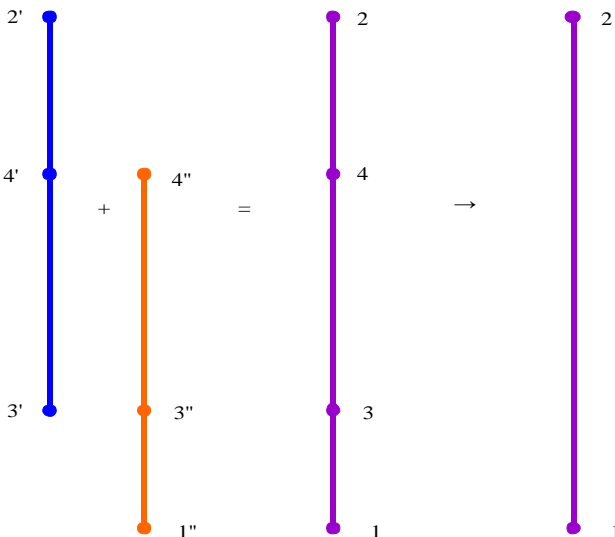
### 3.1. Огъване

Огъването на амортизатора се моделира с класически елементи от тип греда в равнината с 4 степени на свобода - две премествания и две завъртания (фиг. 3).



фиг. 3. Класически краен елемент тип греда.

Вътрешният и външният цилиндър се моделират с по два елемента (фиг. 4) - по един за общата част (3'4' и 3''4'') и по един за частите, които не съвпадат (2'4' и 1''3''). Всеки от цилиндрите има различна площ и инерционен момент на сечението. Във точките 3 и 4 напречните премествания на двата цилиндъра са еднакви, но може да се приеме, че завъртанията на сеченията не са равни. Като се вземе това в предвид може да се получи асемблираната матрица, която има 20 степени на свобода - по 4 във възлите 1 и 2 и по 6 във възлите 3 и 4.



фиг. 4. Модел за съвместяване на вътрешния и външния цилиндър.

Степените на свобода във възлите 3 и 4 са вътрешни и не са необходими при общите изчисления. Затова те могат да се изключат по метода на статичната кондензация [2,3]. Така крайната матрица има 4 степени на свобода. Тази процедура се прилага за матриците на масата и на коравината в две взаимно

перпендикулярни равнини. Трябва да се подчертае, че получените по този начин матрици се отнасят за текущото взаимно положение на двата цилиндъра и представляват тангенциални матрици.

Ако долният цилиндър има дължина  $l_1$ , горният -  $l_2$  и целият амортизатор  $L$ , то дължината на общата част 3-4 е

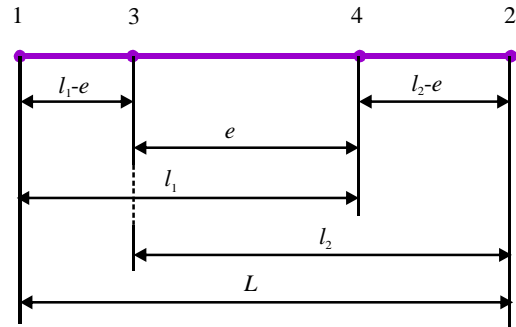
$$(1) \quad e = l_1 + l_2 - L,$$

на частта 1-3

$$(2) \quad l_1 - e,$$

а на частта 4-2

$$(3) \quad l_2 - e.$$



фиг. 5. Размери на съвместния модел на двата цилиндъра.

Дължината на целия амортизатор  $L$  е променлива и има максимална стойност

$$(4) \quad L_{\max} \leq l_1 + l_2.$$

Матрицата на коравина за един елемент има вида [2,3]:

$$(5) \quad \mathbf{K}_{el} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ сим. & & 12 & -6l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix},$$

а матрицата на масите [2,3]:

$$(6) \quad \mathbf{M}_{elm} = \frac{\rho Al}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ сим. & & 156 & -22l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix},$$

$$(7) \quad \mathbf{M}_{elI} = \frac{\rho I}{30l} \begin{bmatrix} 36 & 3l & -36 & 3l \\ & 4l^2 & -3l & -l^2 \\ сим. & & 36 & -3l \\ & & & 4l^2 \end{bmatrix},$$

$$(8) \quad \mathbf{M}_{el} = \mathbf{M}_{elm} + \mathbf{M}_{elI}$$

където  $l$  е дължината на елемента,  $A$  - лице на сечението,  $I$  - инерционен момент на сечението,  $E$  - модул на Юнг на материала,  $\rho$  - плътност на материала.

### 3.2. Опън-натиск

При моделирането на опън-натиск трябва да се вземе предвид свиваемостта на газа и демпфирането на течността. Еластичното деформиране на цилиндрите в аксиална посока може да се пренебрегне.

Тъй като аксиалната сила зависи нелинейно от преместването и скоростта, то са необходими тангенциалните матрици на коравина и демпфиране.

При свиването на амортизатора, газът се сгъстява и аксиалната сила е [1]

$$(9) \quad P_k = A_s p_0 \left( \frac{V_0}{V_0 + A_s u} \right)^n$$

където  $u = L - L_{\max} \leq 0$  е преместването на долния цилиндър спрямо горния,  $V_0$  - начален обем (при  $u=0$ ) на газа,  $p_0$  - начално налягане на газа,  $A_s$  - площ на напречното сечение на долния цилиндър,  $n$  - показател на политропния процес. Тангенциалната матрица на коравина се получава от производната на силата по преместването:

$$(10) \quad k = \frac{dP_k}{du} = \frac{A_s^2 p_0 \left( \frac{V_0}{V_0 + A_s u} \right)^n}{V_0 + A_s u} n,$$

а самата матрица на коравина е

$$(11) \quad \mathbf{K}_{el} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}.$$

При преминаване на течността през дросел възниква демпфираща сила с големина [1]

$$(12) \quad P_c = \frac{\rho_f}{2} \frac{A_s^3}{\mu^2 A_r} \dot{u}^2 \operatorname{sgn} \dot{u},$$

където  $\rho_f$  е плътността на флуида,  $A_r$  - площ на отвора на дросела,  $\mu$  - коефициент на свиване на струята, зависещ от формата на отвора, вискозитетата на течността и др. Означавайки

$$(13) \quad c = \frac{dP_c}{d\dot{u}} = \rho \frac{A_s^3}{\mu^2 A_r} \dot{u} \operatorname{sign} \dot{u}$$

за тангенциалната матрица на демфиране се получава

$$(14) \quad \mathbf{C}_{el} = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}.$$

При повечето амортизатори са предвидени клапани, които затварят някои от дроселите 4 (фиг. 2) при движение в една посока и ги отварят при движение в обратна посока. Поради това коефициентът  $\mu$  е различен при движение в едната и другата посока, т.е. той зависи от  $\operatorname{sign} \dot{u}$ .

При някои конструкции на амортизатор сечението на дросела 5 се променя при различни положения на долния спрямо горния цилиндър с помощта на регулиращ прът, т.е. с промяна на преместването  $u$ . Това води до зависимост на коефициента  $\mu$  и на демпфиращата сила  $P_c$  от преместването  $u$  и налага коригиране и на коефициента  $k$ , тъй като той по определение е производна на пълната сила в амортизатора по преместването  $u$ :

$$(15) \quad k = \frac{dP_k}{du} + \frac{dP_c}{du}.$$

Матрицата на масите може да се получи аналогично на матриците при огъване, като се използва стандартна матрица на масите за прът

$$(16) \quad \mathbf{M}_{el} = \frac{\rho A l}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}.$$

### 3.3. Усукване

На усукване е подложен само горният цилиндър, затова матрицата на коравина за усукване има вида

$$(17) \quad \mathbf{K} = \frac{G I_2}{l_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix},$$

където  $G$  е модулът на усукване, а  $I_2$  е геометричната константа при усукване.

Матрицата на масите трябва да отчита не само инерцията в горния цилиндър, но и инерцията на долния цилиндър, която е приведена към възел 1

$$(18) \quad \mathbf{M} = \frac{\rho l c_2 l_2}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho l c_1 l_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Тук  $I_{C1}$  и  $I_{C2}$  са полярните инерционни моменти на долния и горния цилиндър.

Връзката между двата цилиндъра се осъществява чрез двузвения механизъм 6 (фиг. 2). При някои конструкции в шарнира 7 се поставя демпфер, който подтиска малки трептения (завъртания) на долния цилиндър спрямо горния цилиндър, известни като *шуми*. Тези демпфиращи свойства могат да се отчетат с помощта на демпфираща матрица, аналогична на показаната в уравнение (14), като параметърът  $c$  има вида:

$$(19) \quad c = R \cdot c'.$$

Тук  $c'$  е коефициентът на демфиране на линейния демпфер, който се определя по формула, аналогична на (13).  $R$  е разстоянието от оста на цилиндрите до шарнира 7, което се променя при взаимното преместване на двата цилиндъра. Това означава, че демпфиращата сила по посока на усукването зависи и от тяхното взаимно преместване.

## 4. Заключение

След асемблиране на горните матрици, се получават матриците на коравина, маса и демпфиране с размер 12x12. Всички те са нелинейни и зависят от взаимното преместване на долния и горния цилиндър, следователно те са тангенциални матрици.

При съставяне на масовите матрици не са отчетени масовите свойства на течността и газа. Това може да се направи чрез подходяща корекция на матриците, но това е въпрос на допълнителни изследвания.

## 5. Благодарности

Това изследване е извършено с финансовата подкрепа на Фонд "Научни изследвания" по договор ВУ-ГН-122/2005.

## 6. Литература

1. Одинокоев Ю., Расчёт самолёта на прочность, Машиностроение, Москва, 1973.
2. Bathe, K. J., Finite Element Procedures, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
3. Cook R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, New York, 1989.
4. Crisfield M., Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Vol. 1: Essentials, J. Wiley & Sons, New York, 1991, 1997.
5. Crisfield M., Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Vol. 2: Advanced Topics, J. Wiley & Sons, New York, 1997.
6. Shabana A., Dynamics of Multibody Systems, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2005.