

## **ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА ТЕХНОЛОГИЯТА ЗА РЕГУЛИРАНЕ НА РЕСОРНАТА СИСТЕМА**

**Ненчо Ненов**

*rector@vtu.bg*

*Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”, София 1574, ул. “Гео  
Милев” № 158, България*

***Ключови думи:** Ресорна система, разлика в натоварването на колелата, регулиране, технология и система за регулиране.*

***Резюме:** В статията се разглеждат проблеми, свързани с методология за изследване на разпределението на силата на тежестта на локомотива между отделните му ходови колела. Целта е да се минимизират разликите в статичното натоварване на колелата до минимума, определен от разположението на масовите центрове на коша и талигите, което се означава като състояние на най-добро регулиране на ресорната система. Представена е също и технологията за регулиране на ресорната система чрез специално разработените електронно-измервателна апаратура и компютърни програми.*

Различията в статичното натоварване на ходовите колела на локомотивите предизвикват съществени промени в процеса, протичащ в контактните точки на колелата и релсите-стойност на тангенциалните сили, плъзгане, мощност на тангенциалните сили, зони на контакта. В резултат на това, износването на повърхността на търкаляне на някои колела протича с повишена интензивност. Негативното развитие на процеса се засилва във времето в резултат и на измененията на условията за взаимодействие на контактуващите тела в резултат на неравномерното износване на повърхността на търкаляне на някои от колелата. Като последица се явява и повишена реакция на системата на смущение и намаляване на ограничението на теглителната сила по сцепление.

При локомотиви с нелинейни профили на повърхността на търкаляне на колелата, синтезирани на основата на съображения за намалена интензивност на износване и ниво на енергия, предавана на механичната система на локомотива, неравномерното статично натоварване на колелата предизвиква отбелязаните отрицателни последици да бъдат по-значими.

На основата на извършените изследвания е установено, че различията на статичното натоварване на колелата на локомотива довеждат и до други неблагоприятни явления:

- несиметричност на преместването на колооста в аксиална (напречна) посока и възможност за продължителен контакт на реборда на някои колела с релсите;

- намаляване на направляващата способност на колооста и увеличаване на износването на ребордите при движение в крив участък от пътя;

- намаляване на надеждността на отделни елементи от ходовата част и предавателните механизми.

За да бъдат минимални разликите в натоварванията на отделните колела и колооси в процеса на движение на локомотива, е необходимо в статично положение на локомотива, разположен на прав, строго хоризонтиран участък, с еднаква коравина в точките на контакт на колелата и релсите, разликите да бъдат също минимални.

Отбелязаното е причина в изследването да се разработват въпроси, свързани с методология за изследване на разпределението на силата на тежестта на локомотива между отделните му ходови колела и установяване на необходимите корекции в системата на ресорното окачване, с оглед доближаване на разликите в статичното натоварване на колелата до минимума, определен от разположението на масовите центрове на коша и талигите, или както е целесъобразно да бъде означено като - до състояние при най-добро регулиране на ресорната система.

В тази област могат да бъдат формулирани следните направления:

1. Установяване на съотношения, посредством които да се определят следните разлики при положение на най-добро регулиране: между колелата на отделните колооси, между всяка колоос и средното за локомотива натоварване на колоос, между сумарното натоварване на всички леви и всички десни колела, както и разположението на масовия център на локомотива. Тези данни са необходими за определяне на целта, която се преследва при извършване на регулирането на ресорната система и за определяне на масовия център, което от своя страна дава информация за правилна компановка на обзавеждането на локомотива.

2. Разработване на модел, алгоритъм и компютърна програма за определяне на статичното натоварване на ходовите колела на локомотива при зададени параметри на елементи от ресорната система.

3. Разработване на метод за определяне на вероятността отбелязаните разлики да попадат в предварително определени области при известни закони за разпределение на параметри на елементи от ресорната система.

4. Разработване на метод за определяне на необходимите операции по системата на ресорното окачване, с оглед да се получи състоянието при най-добро регулиране при известни натоварвания на колелата на локомотива и параметри на елементите на ресорната система.

Получените основни резултати, по отбелязаните четири направления са съдържанието на предлаганата разработка.

Статичното натоварване на колелата на локомотива се определя от следните равенства, свързващи натоварването на колелата  $R_{ji}$ , при конкретно състояние на ходовата част, силата на тежестта на локомотива  $G$ , разположението на масовия му център  $O$  и група геометрични параметри:

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{2n} R_{ji} = G;$$

$$(1) \sum_{j=1}^2 R_{ji} = G \frac{L_2 + x_0}{L_1 + L_2};$$

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1,3,\dots,2n-1} R_{ji} = G \frac{b_0 + y_0}{2b_0};$$

където

$j=1,2$  - номер на талигата;

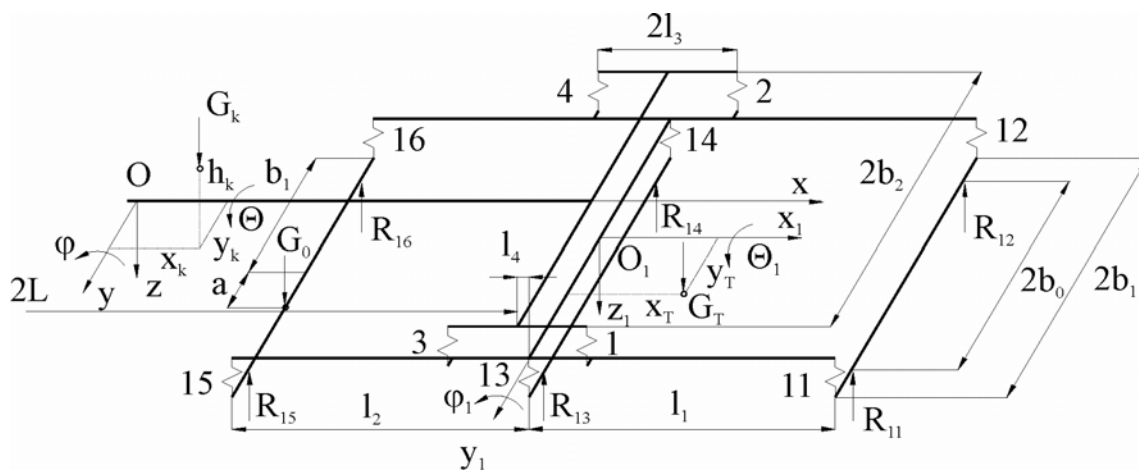
$i=1,2,\dots,2n$  - номер на колелото;

$n$  - брой на колосите на талигата;

$L_1, L_2$  - разстояние до равнината  $YZ$  съответно на приложената точка на сумата от реакциите  $R_{1i}$  на първа талига и сумата от реакциите  $R_{2i}$  на втора талига;

$x_0, y_0$  - координати на проекцията на масовия център на локомотива  $O$  върху хоризонталната равнина;

$2b_0$  - разстояние между кръговете на търкаляне на колосите.



фиг.1

Равенствата (1) показват, че сумата от натоварването на всички колела от лявата страна на локомотива  $G_L$ , а следователно и от дясната страна  $G_D$ , както и на първата талига  $G_1$ , респективно - на втората талига  $G_2$ , зависят от силата на тежестта на локомотива и геометричните параметри:  $L_1, L_2, b_0, x_0$  и  $y_0$  - т.е.:

$$(2) \quad G_{\text{Л}} = \frac{b_0 + y_0}{2b_0} G = k_{\text{Л}} G; \quad G_{\text{Д}} = \frac{b_0 - y_0}{2b_0} G = k_{\text{Д}} G;$$

$$G_1 = \frac{L_2 + x_0}{L_1 + L_2} G = k_1 G; \quad G_2 = \frac{L_2 - x_0}{L_1 + L_2} G = k_2 G;$$

където  $k_{\text{Л}}$ ,  $k_{\text{Д}}$ ,  $k_1$  и  $k_2$  са относителните натоварвания на колелата, съответно от лявата и дясната страна на локомотива и първата и втората талиги.

Относителните натоварвания се определят от отбелязаните геометрични параметри, като стойностите им зависят от ъглите  $\theta$ ,  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , сключени съответно между плоскостите на главната рама и рамите на талигите и оста  $Y$  (от тези ъгли зависи координатата  $y_0$ ), от ъглите  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  сключени съответно между главната рама и рамите на талигите с оста  $X$  ( $x_0$  е функция на отбелязаните ъгли), както и от разстоянията  $L_1$  и  $L_2$ . Тези разстояния ( $L_1$  и  $L_2$ ) са с постоянна стойност само при локомотиви с две странични опори на коша за всяка талига. В този случай те съвпадат с разстоянията между страничните опори и вертикалната напречна равнина  $YZ$ .

Натоварването на колелата от лявата страна на първата талига  $G_{1\text{Л}}$  и от дясната ѝ страна  $G_{1\text{Д}}$ , както и съответните натоварвания на втората талига  $G_{2\text{Л}}$  и  $G_{2\text{Д}}$ , за дадено положение на разглежданата механична система също са линейни функции на силата на тежестта:

$$(3) \quad G_{1\text{Л}} = k_{1\text{Л}} G; \quad G_{1\text{Д}} = k_{1\text{Д}} G; \quad G_{2\text{Л}} = k_{2\text{Л}} G; \quad G_{2\text{Д}} = k_{2\text{Д}} G;$$

При съпоставяне на равенствата (2) и (3) се получава, че:

$$(4) \quad k_{\text{Л}} = k_{1\text{Л}} + k_{2\text{Л}}; \quad k_1 = k_{1\text{Л}} + k_{1\text{Д}};$$

$$k_{\text{Д}} = k_{1\text{Д}} + k_{2\text{Д}}; \quad k_2 = k_{2\text{Л}} + k_{2\text{Д}};$$

Равенствата (4) естествено няма да се изменят, ако левите страни на тези от първата колонка се умножат с  $(k_1 + k_2)$  и тези от втората колонка с  $(k_{\text{Л}} + k_{\text{Д}})$ , тъй като тези суми са равни на единица:

$$(5) \quad k_1 k_{\text{Л}} + k_2 k_{\text{Л}} = k_{1\text{Л}} + k_{2\text{Л}}; \quad k_1 k_{\text{Л}} + k_1 k_{\text{Д}} = k_{1\text{Л}} + k_{1\text{Д}};$$

$$k_1 k_{\text{Д}} + k_2 k_{\text{Д}} = k_{1\text{Д}} + k_{2\text{Д}}; \quad k_2 k_{\text{Л}} + k_2 k_{\text{Д}} = k_{2\text{Л}} + k_{2\text{Д}}.$$

Очевидно, решението на системата (5) е:

$$(6) \quad k_{1\text{Л}} = k_1 k_{\text{Л}} + k'; \quad k_{1\text{Д}} = k_1 k_{\text{Д}} - k';$$

$$k_{2\text{Л}} = k_2 k_{\text{Л}} - k'; \quad k_{2\text{Д}} = k_2 k_{\text{Д}} + k';$$

където  $k'$  е неопределен коефициент.

Равенствата (3) при съобразяване с равенствата (6) добиват вида:

$$(7) \quad \begin{aligned} G_{1Л} &= (k_1 k_{Л} + k') \cdot G; & G_{1Д} &= (k_1 k_{Д} - k') \cdot G; \\ G_{2Л} &= (k_2 k_{Л} - k') \cdot G; & G_{2Д} &= (k_2 k_{Д} + k') \cdot G. \end{aligned}$$

Състоянието, при което разликите в натоварванията на отделните колела ще бъдат минимални (обозначено вече по-горе като състояние на най-добро регулиране на ресорната система) се получава при  $k'=0$  (посоченото ясно личи от (7)) и при равенство на натоварване на колелата на талигите, съответно за лявата и дясната им страни:

$$(8) \quad \begin{aligned} R'_{11} &= R'_{13} = \dots = R'_{1(2n-1)} = k_1 \cdot k_{Л} \cdot \frac{G}{n}; \\ R'_{12} &= R'_{14} = \dots = R'_{1(2n)} = k_1 \cdot k_{Д} \cdot \frac{G}{n}; \\ R'_{21} &= R'_{23} = \dots = R'_{2(2n-1)} = k_2 \cdot k_{Л} \cdot \frac{G}{n}; \\ R'_{22} &= R'_{24} = \dots = R'_{2(2n)} = k_2 \cdot k_{Д} \cdot \frac{G}{n}. \end{aligned}$$

Разликите в натоварванията на колелата от дадена колоос  $\alpha_{Oji}$ , както и разликите между сумарните натоварвания на колелата от лявата и дясната страна на локомотива  $\alpha_{ЛД}$ , дадени в относителни единици, се определят съответно от изразите:

$$(9) \quad \alpha_{Oji} = 2 \cdot \frac{R_{ji} - R_{j(i+1)}}{R_{ji} + R_{j(i+1)}};$$

От (9) се вижда, че  $\alpha_{ЛД}$  зависи от разликата на  $k_{Л}$  и  $k_{Д}$ , т.е. функция е на координатата  $y_O$  на масовия център  $O$ . При най-добро регулиране-изпълняване на условието, определено от равенствата (8),  $\alpha_{Oji} = \alpha_{ЛД}$ . В този случай колоосните натоварвания са еднакви в рамките на талигата, поради което при талиги с 4 странични опори на коша, като необходимо условие за най-добро регулиране е:

$$(10) \quad L_1 = \frac{\sum_{i=1}^{2n} R_{1i} I_{1i}}{\sum_{i=1}^{2n} R_{1i}} = \frac{\sum_{i=1}^{2n} I_{1i}}{2n}; \quad L_2 = \frac{\sum_{i=1}^{2n} R_{2i} I_{2i}}{\sum_{i=1}^{2n} R_{2i}} = \frac{\sum_{i=1}^{2n} I_{2i}}{2n}.$$

$L_1$  и  $L_2$  трябва да съответствуват на разстоянията на мнимите опори на коша на двете талиги, до вертикалната напречна равнина  $YZ$  (мнима опора - център на окръжност, която минава през центровете на страничните опори).

В равенства (10)  $I_{ji}$  с  $e$  означено разстоянието от оста на колелото  $j$  до равнината  $YZ$ .

В общия случай  $\alpha_{Oji} > \alpha_{лд}$ , поради преразпределение на вертикалното натоварване между отделните колела, в резултат на отклонение на параметри на ресорната система и елементи от ходовата част. Трябва да се има предвид, че осъществяването на равенството  $\alpha_{Oji} = \alpha_{лд}$  е само теоретически възможно. Независимо от този безспорен факт, регулирането трябва да се разглежда именно като комплекс от операции, които имат за цел осъществяването на въпросното равенство. Само при такава постановка регулирането се превръща от дълга процедура интуитивно определяни операции, целящи задоволяването на определен норматив за  $\alpha_{Oji}$  (при някои локомотиви задачата в такава постановка не може да бъде решена по принцип, тъй като даже при най-добро регулиране  $\alpha_{Oji}$  се оказва с по-висока стойност от нормативната  $\alpha'_{O}$ ) в алгоритъм, който винаги води до решаването на задачата -реализирането на  $\alpha_{Oji}$  със стойност, достатъчно близка до  $\alpha_{лд}$ .

Натоварването на колелата  $R_{ji}$  ( $j=1,2$ - номер на талигата,  $i=1,2,\dots,6$  - пореден номер на колелото в рамките на талигата) се определя от натоварването на шийките на колоосите  $P_{ji}$  ( $i$  - съответства на номера на колелото, до което е разположена съответната шийка), теглото на необресорените маси  $G_O$  за една колоос и разположението на масовия им център, определен от разстоянието между него и геометричния център на колоостта  $a_v$  ( $v=1,2,\dots,6$  - номер на колооста). Натоварването на шийките на колоосите  $P_{ji}$ , при линейни или линеализирани, в зоната на статичното натоварване, силови характеристики на ресорите, е линейна функция на девет обобщени координати  $q_p$  ( $p=1,2,\dots,9$  - номер на обобщената координата):  $P_{ji}=P_{ji}(q_1, q_2, \dots, q_9)$ . Обобщените координати  $q_p$  се определят от система от девет алгебрични уравнения, получени на основата на теоремата за минимум на потенциалната енергия. Отбелязаната система, записана във векторно-матрична форма има вида:

$$(11) \vec{Q} = c \cdot \vec{q},$$

където:  $Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_9]^T$  - транспонирана матрица-ред, съставена от свободните членове на системата уравнения;

$c$ - симетрична матрица от 9-ти ред, съставена от коефициентите  $c_{pn}$  на отбелязаната система от уравнения ( $p=1,2,\dots,9$ ,  $n=1,2,\dots,9$  -номер на уравнението, в което участва дадения коефициент и номер на обобщената координата, пред която стои коефициентът);

$q = [q_1, q_2, \dots, q_9]^T$  - девет-мерен вектор, компонентите на който са обобщените координати  $q_p$ .

Стойностите на коефициентите  $c_{pn}$  и членовете на матрицата  $Q$  се определят от математичен модел, съответстващ на схемата, по която е реализирана ходовата част на локомотива.

Членовете на матрицата  $c$ , както личи от приведените изрази, са функции на аргументите  $X_i$  - параметри на елементи от ходовата част на локомотив. Отбелязаните параметри са случайни величини със стойности, изменящи се в определен интервал.

Разликите в натоварването на отделни колела на дадена колоос се представят от коефициентите  $\alpha_{jr}$  ( $j=1,2$ - номер на талигата,  $r=1,2,3$ - пореден номер на колоостта в рамките на талигата), представляващи отношението на разликата в натоварването на колелата на колоостта  $\Delta R_{ji} = R_{ji} - R_{j(i+1)}$  и средното натоварване на колелата за колоостта-  $R_n = \frac{R_{ji} + R_{j(i+1)}}{2}$ :

$$(12) \alpha_{jr} = 2 \cdot \frac{R_{ji} - R_{j(i+1)}}{R_{ji} + R_{j(i+1)}}.$$

Разликите в натоварването на отделните колооси също е подходящо да бъдат представени, аналогично както и разликите между отделните колела, с коефициенти  $\beta_s$  ( $s=1,2,\dots,2n$  -поредни номера на колоосите), чиито стойности се изчисляват от отношението на разликата в натоварването на колооста  $s$   $R_s$  и средното натоварване на колоосите  $R_n^*$ :

$$(13) \beta_s = \frac{R_s - R_n^*}{R_n^*}.$$

Влиянието на параметрите на ходовата част на локомотива, върху разпределението на статичното натоварване между ходовите му колела може да бъде установено посредством анализ на получени стойности за вероятността  $P$ ,  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$  да се намират в даден интервал, определени от приети гранични стойности  $\alpha_0$  и  $\beta_0$ :

$$(14) P_\alpha \{ \alpha_{jr} \in (-\alpha_0, \alpha_0) \}; P_\beta \{ \beta_{st} \in (-\beta_0, \beta_0) \}$$

От значение за практиката е и определянето на интервала на изменение на коефициентите  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$  при зададена стойност на вероятността  $P$ .

Проведено проучване, както и допълнителни съображения от физически характер, независимо от недостига на информация, главно за силови характеристики на ресори и законите за разпределение на техните параметри, дават основание да бъдат формулирани следните приемания, при които да бъдат определени търсените вероятности  $P_\alpha$  и  $P_\beta$ , както и интервала на изменение на

стойностите на коефициентите  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$  при зададена стойност на отбелязаните вероятности:

1. Функциите  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$  принадлежат към класа функции на няколко случайни аргумента, означавани като “почти линейни”.
2. Случайните аргументи на функциите  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$  са независими.
3. Законът за разпределение на функциите  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$  е нормален.

В съответствие с точка 1 и точка 2 от отбелязаните приемания за функциите  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$ , техните дисперсии са определени от равенствата:

$$(15) \quad \sigma_{\alpha_{jr}}^2 = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{\partial \alpha_{jr}}{\partial k_i} \right) \cdot \sigma_{k_i}^2 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\partial \alpha_{jr}}{\partial k_{ji}} \right)^2 \cdot \sigma_{k_{ji}}^2$$

$$\sigma_{\beta_s}^2 = \sum_{i=1}^8 \left( \frac{\partial \beta_s}{\partial k_i} \right) \cdot \sigma_{k_i}^2 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\partial \beta_s}{\partial k_{ji}} \right)^2 \cdot \sigma_{k_{ji}}^2$$

Търсените стойности на вероятностите  $P_\alpha$  и  $P_\beta$ , имайки предвид точка 3 от приеманията, се изчисляват от изразите:

$$(16) \quad P_\alpha \{ \alpha_{jr} \in (-\alpha_0, \alpha_0) \} = 2 \cdot \phi(x_\alpha); \quad P_\beta \{ \beta_s \in (-\beta_0, \beta_0) \} = 2 \cdot \phi(x_\beta),$$

където:  $\phi(x)$ - функция на Лаплас :

$$(17) \quad \phi(x_\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{x_\alpha} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot dt, \quad \phi(x_\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{x_\beta} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot dt,$$

$$(18) \quad x_\alpha = \frac{\alpha_0}{\sigma_{\alpha_{jr}}}; \quad x_\beta = \frac{\beta_0}{\sigma_{\beta_s}}.$$

За оценка на максималните стойности на коефициентите  $\alpha_{jr}$  и  $\beta_s$ , могат да послужат равенствата:

$$(19) \quad \alpha_{jr_{\max}} = 3 \cdot \sigma_{\alpha_{jr}}; \quad \beta_{s_{\max}} = 3 \cdot \sigma_{\beta_s}.$$



Определянето на корекциите, които трябва да бъдат осъществени в системата на ресорното окачване, извършвано на основата на изчислени или измерени натоварвания на колелата, може да се извърши посредством сравняване на силите, които действуват на ресорите в конкретната ситуация и тези които биха действували при състояние на най-добро регулиране на ресорната система. На тази основа се определят необходимите корекции в системата на ресорното окачване. Ако се разполага с реалните характеристики на ресорите, след осъществяване на предвидените операции се получава практически разликите в натоварванията на колелата и колоосите да бъдат минималните. При неизвестни характеристики на ресорите се работи с номиналните им стойности. В този случай различията със състоянието на най-добро регулиране може да бъдат по-значими и в някои случаи да се окаже необходимо и провеждането на допълнителни корекции в системата на ресорното окачване.

Разработените въпроси, които са разгледани в принципен план, както и някои други, отнасящи се до разглеждания проблем (отстраняване на грешките, причинени от силите на триене в ресорната система, особености при определяне на местата за монтаж на гумено-метални ресори от типа на **MEGI** и др.), се прилагат в системата на **БДЖ** от около 20 години. На тяхна основа е изградена технологията за регулиране на ресорната система на локомотивите и в частност:

- определяне на местата за монтаж на ресорите в съответствие с техните силови характеристики;

- прогноза за разпределението на натоварването между отделните колела при изпълнение на съответната схема за разположение на ресорите по съответните възли;

- определяне на вероятността при зададени допускови полета на елементите от ресорната система, разликите в натоварванията на отделните колела и колооси да се намират в полето на допустимите;

- определяне на необходимите операции за регулиране на ресорната система, при изчислени или измерени натоварвания на отделните колела.

Технологията за регулиране на ресорната система е осигурена със специално за целта разработена електронно-измервателна апаратура и необходимите компютърни програми. Всичко това създава условия не само за постигането на възможния максимален ефект от регулирането на ресорната система, но и възможност самата операция по регулирането да се извърши за много къс интервал от време, който по същество се определя от качествата на съоръженията, инструментите и приспособленията, които се използват за регулирането.

## ЛИТЕРАТУРА:

- [1.] Ружеков Т., Е. Димитров, Някои изследвания върху отклонението на статичното натоварване на ходовите колела на локомотив от средното натоварване и влиянието му върху направляващата способност на колооста и стойността на критерия за износване на колелата на локомотива, Научна сесия на ВМЕИ, 1979.
- [2.] РУЖЕКОВ Т., Е. ДИМИТРОВ, Н. НЕНОВ, Стенд для регулирования рессорного подвешивания электровозов, Железные дороги мира, 1996, №2, с. 48-49.

## THEORETICAL FUNDAMENTALS OF SPRING SYSTEM REGULATION TECHNOLOGY

**Nencho Nenov**

*rector@vtu.bg*

***Todor Kableshkov Higher School of Transport, 158 Geo Milev Street, Sofia 1574,  
Bulgaria***

***Keywords:*** *Spring system, differences in wheel loading, regulation, technology and system of regulation.*

***Abstract:*** *The paper presents the problems connected with the methodology of the study on the locomotive weight force distribution onto its wheels. The aim is to decrease the static load of wheel to the minimum determined by the arrangement of the mass centers of the body and bogies, which has been marked as a condition of the best spring system regulation. The technology of the spring system regulation by an electronic measuring device and software developed especially for the purpose is described as well.*