

ИЗБОР НА ЗАЩИТА ПРОТИВ БОКСУВАНЕ ЗА ТРАМВАЙНИ МОТРИСИ

Любомир Българанов, Тодор Йонов

lbalg@tu-sofia.bg, tjon@tu-sofi.bg

*Технически университет-София, Електротехнически факултет, Катедра
„Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”,
София 1000, бул. Климент Охридски №8,
България*

***Ключови думи:** трамвайна моториса, защита, боксуване, сцепление, развитие и прекратяване на боксуване, ефективност.*

***Резюме:** В електрическия градски транспорт на София се използват основно български трамвайни моториси със шест или осем оси. Само първите и последните две оси са тягови т.е. всяка трамвайна моториса има четири постоянно токови тягови двигателя с мощност 40 kW. Трамвайните моториси са с директна схема на резисторно управление. Моторисите имат девет пускови позиции при последователно свързване на тяговите двигатели и пет позиции при последователно-паралелно свързване.*

Проведените изследвания и дългогодишната експлоатация показват, че българските трамвайни моториси имат голяма склонност към боксуване при последователно съединение на двигателите и развиване на максимална теглителна сила.

Прекратяване на режимите на боксуване зависи само от квалификацията на водача, който трябва да върне контролера на по-ниска позиция или да подаде пясък под боксуващите колела. Практиката обаче показва, че тези два метода за възстановяване на сцеплението са ниско ефективни и боксуването нараства силно. Поради тази причина нараства износването на колелата и релсите и повредите по тяговите двигатели

В настоящата работа са обобщени резултатите от направеното сравнение на ефективността на две защиты против боксуване, които могат да се приложат при използваната директна схема на управление на трамвайните моториси, а именно – шунтиране на котвата на двигателя свързан с боксуващата колоос и захранване на възбудителната му намотка от външен източник.

1. Въведение

В българските трамвайни моториси се използва неавтоматична, директна схема за управление. Прекратяването на възникнал режим на боксуване зависи единствено от

уменията на водача, който трябва да върне силовия контролер на по ниска позиция или да подаде пясък под боксуващите колела. Експлоатацията на трамвайните мотриси показва, че и двата начина са малко ефективни. На честите режими на боксуване (особено при лоши климатични условия) се дължи силното износване на бандажите и релсите, повишеният разход на енергия и големият брой повреди по тяговите двигатели.

В настоящата работа са обобщени резултатите от направеното сравнение на две защиты против боксуване, които могат да се приложат при използваната директна схема на управление на трамвайните мотриси, а именно – шунтиране на котвата на двигателя свързан с боксуващата колоос или захранване на възбудителната му намотка от външен източник.

2. Състояние на проблема

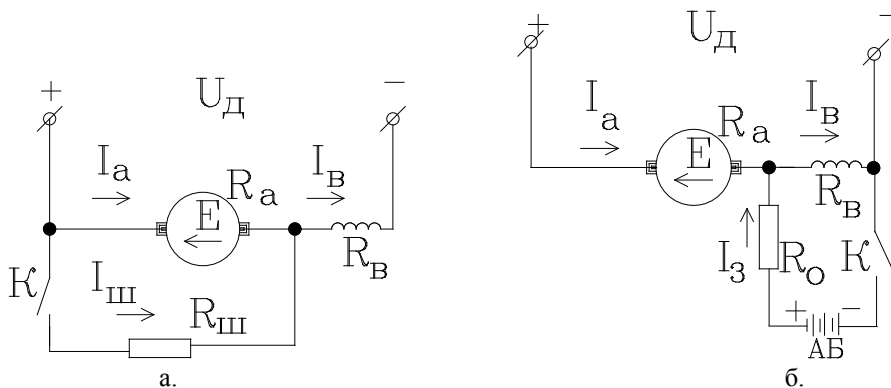
Резултатите от по-рано проведени изследвания върху склонността на трамвайните мотриси към боксуване [1], [2], [3] показват, че те имат голяма склонност към боксуване при последователно съединение на двигателите и развиване на максимална теглителна сила (до VI пускова позиция). От изложеното следва, че за осигуряване на нормален режим на работа на мотрисите е необходимо прилагането на ефективна защита против боксуване.

Най сигурният начин за прекратяване на възникнал режим на боксуване е намаляването на теглителната сила на боксуващия двигател, така че $F_d = c_1 \cdot \Phi \cdot I \leq F_\psi = m_k \cdot g \cdot \Psi$. При използваната в трамвайните мотриси директна схема за резисторно-контакторно управление, могат да се приложат следните защиты против боксуване: шунтиране на котвата; шунтиране на възбудителната намотка, въвеждане на резистор последователно във веригата на боксуващия двигател и захранване на възбудителната намотка на боксуващия двигател от външен източник.

Проведените в по-ранен етап изследвания върху ефективността на някои от посочените защиты [1] показват, че първите две са неефективни в областта на ниските скорости на движение, където най-често възникват режими на боксуване. Така например, защитата с шунтиране на котвата е ефективна при скорости по-големи от 2 m/s, а тази с шунтиране на възбудителната намотка – при скорости по-големи от 2,5 m/s. Защитата с въвеждане на резистор във веригата на боксуващия двигател има недостатъка, че намалява тока (респективно теглителната сила) и на нормално работещите двигатели т.е. губи се теглителна сила.

3. Анализ на процесите при развитие и прекратяване на режими на боксуване

На фиг.1 са показани принципни схеми на защиты против боксуване. На фиг.1а - шунтиране на котвата на боксуващия двигател с активен шунт, а на фиг.1б - захранване на възбудителната намотка от акумулаторна батерия.



фиг.1 Принципни схеми на защиты против боксуване

За да се извърши анализ на процесите при развитие и прекратяване на режими на боксуване е необходимо да се познават следните характеристики: механичната $v_6(F_6)$ или електромеханичната $v_6(I_6)$ характеристика на боксуващия двигател; характеристиката на сцепление при развитие $v(I_\Psi)$ и прекратяване $v(I'_\Psi)$ на процеса на боксуване; механичната (или електромеханична) характеристика на двигателя свързан с боксуващата колоос след заработване на защитата $v_6(I'_6)$, [2, 3, 4, 5].

Електромеханичната характеристика на двигателя свързан с боксуващата колоос $v_6(I_6)$, при постояннотокови електрически транспортни средства [ЕТС], не съвпада с електромеханичната характеристика на хормално работещите двигатели и се изчислява от зависимостта [3, 4, 2]

$$(1) \quad v_6 = v + (n - 1) \cdot (v - v_{TC}),$$

където v е текущата стойност на скоростта, която се отчита от механичната характеристика на двигателя за избрани стойности на теглителната сила;
 n - броят на последователно свързаните двигатели;
 v_{TC} - скоростта на транспортното средство.

Характеристиката на сцепление при развитие и прекратяване на боксуването е известна от специализираната литература [6], [7].

Характеристиката на двигателя свързан с боксуващата колоос след включване на защитата се определя на база на фиг.1. Електрическото равновесие на схемата от фиг.3.1а. в установен режим на работа, след включване на защитата (контактът К затворен), се описва от следната система уравнения

$$(2) \quad \begin{cases} U_d = E + I_6 \cdot R_a + I_b \cdot R_b = c_1 \cdot \Phi \cdot v_6 + I_a \cdot R_a + I_b \cdot R_b \\ I_{ш} + I_6 = I_b \\ I_6 \cdot R_a + c_1 \cdot \Phi \cdot v_6 = I_{ш} \cdot R_{ш} \end{cases}$$

След решаване на системата спрямо скоростта на боксуване и пренебрегвайки всички членове съдържащи $R_{ш}$ се получава

$$(3) \quad v_6 = v_0 + \Delta v = \frac{U_d - I_6 \cdot \Sigma r}{c_1 \cdot \Phi} = \frac{U_d - I_6 \cdot \Sigma r}{U_n - I_6 \cdot \Sigma r} \cdot v(I_6),$$

където v_0 е скоростта на ЕТС, при която възниква боксуване;
 Δv - скоростта на приплъзване на боксуващата колоос;
 R_a - съпротивлението на котвената намотка на двигателя;
 R_b - съпротивлението на възбудителната намотка на двигателя;
 U_0 - напрежението на двигателя при възникване на режима на боксуване;
 Σr - общото съпротивление във веригата на двигателя;
 v - текущата скорост на двигателя, която е функция на тока на боксуващия двигател I_6 .

На фиг.1б е показана принципна схема на изпълнително звено на защита против боксуване, която осигурява захранване на възбудителната намотка на двигателя свързан с боксуващата колоос от външен източник (например, акумулаторна батерия). Това води до постоянство на възбудителния ток и магнитния поток на боксуващия двигател и рязко намаляване на котвения му ток т.е. на теглителната му сила [5].

Електрическото равновесие на схемата, след затваряне на контакта К, се описва от следната система уравнения

$$(4) \quad \begin{cases} U_{\delta} = c_1 \cdot \Phi \cdot v_{\delta} + R_a + R_s \\ U_3 = I_3 \cdot R_0 + I_s \cdot R_s \\ I_{\delta} + I_3 = I_s \end{cases} .$$

След решаване на (4) спрямо скоростта на боксуване, се получава

$$(5) \quad v_{\delta} = v_0 + \Delta v = \frac{U_{\delta} - I_{\delta} \cdot \Sigma r}{c_1 \cdot \Phi} - \frac{R_s}{R_0 + R_s} \cdot \frac{U_3 - I_{\delta} \cdot R_s}{c_1 \cdot \Phi} .$$

С цел опростяване на (5) може да се пренебрегне вторият член от дясната страна. Грешката е в границите на 2 -3%. Тогава електромеханичната характеристика на боксуващия двигател след включване на защитата се определя от зависимост, която има вида

$$(6) \quad v_{\delta} = v_0 + \Delta v = \frac{U_{\delta} - I_{\delta} \cdot \Sigma r}{c_1 \cdot \Phi} = \frac{U_{\delta} - I_{\delta} \cdot \Sigma r}{U_n - I_{\delta} \cdot \Sigma r} \cdot v(I_{\delta}) .$$

Стойностите на скоростта на двигателя свързан с боксуващата колоос съответстват на ток

$$(7) \quad I'_{\delta} = I_{\delta} - I_3 = I_{\delta} - \frac{U_3 - R_s \cdot I_{\delta}}{R_0} = I_{\delta} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_0}\right) - \frac{U_3}{R_0} .$$

Или в общ вид (3.7) моаже да се представи така

$$(8) \quad I'_{\delta} = a \cdot I_{\delta} - b ,$$

където I'_{δ} е токът на двигателя свързан с боксуващата колоос;

$$a = 1 + \frac{R_s}{R_0}; \quad b = \frac{U_3}{R_0} .$$

Следователно, токът I'_{δ} зависи непосредствено от параметрите на веригата за допълнително захранване на възбудителната намотка U_3 и R_0 . Големината на напрежението на допълнителния източник U_3 се определя, като се изходи от разликата в токовете

$$(9) \quad \Delta I = I_{\delta 0} - (a \cdot I_{\delta 0} - b) = I_{\delta 0} \left(-\frac{R_s}{R_0}\right) + \frac{U_3}{R_0} ,$$

където $I_{\delta 0}$ е токът при възникване на боксуването.

Разликата ΔI трябва да е по-голяма или равна на $\Delta I' = I_0 - I'_0$. Където $I_0 = I_{\delta 0}$, а I'_0 е токът, който съответства на сила на сцепление F'_{ψ} при $\Delta v = 0$ (преди възникване на боксуване).

$$(10) \quad \frac{U_3}{R_0} - \frac{R_s}{R_0} \cdot I_{\delta 0} \geq \Delta I'$$

От (10) следва, че

$$(11) \quad U_3 \geq [\Delta I' + I_0 (a - 1)] \cdot R_0 .$$

На фиг.2 са показани изчислените електромеханични характеристики за V-та пускова позиция $R_{п5}=0,7\Omega$.

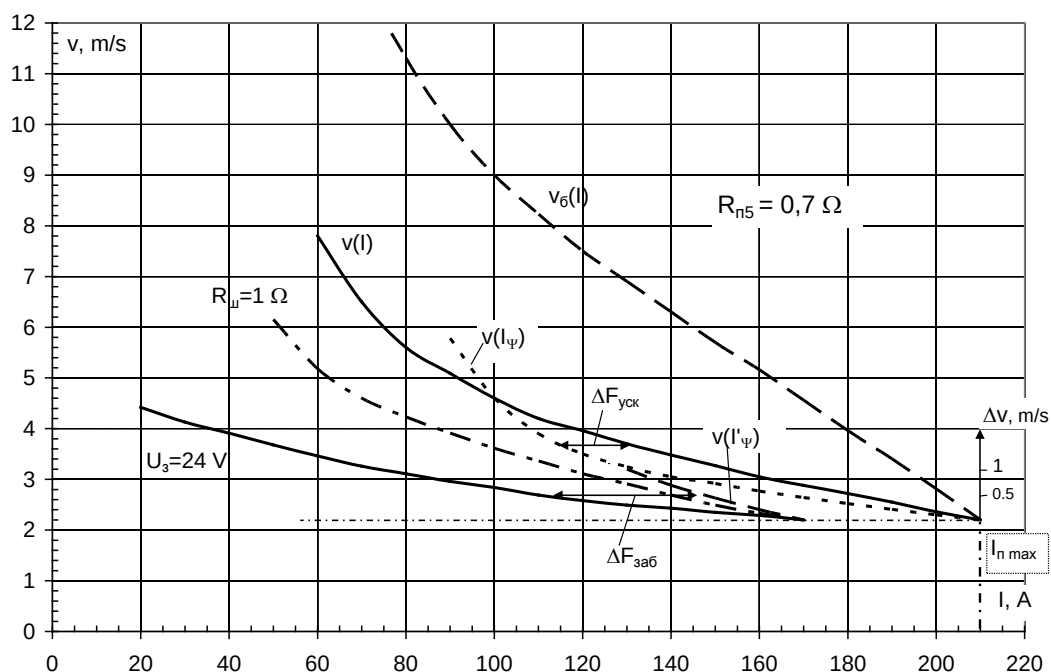
Развитието на процеса на боксуване във времето може да се получи, ако се интегрира уравнението на движение на боксуващата колоос

$$(12) \quad \Delta F_{\delta} - F_{\psi} = m_e \cdot \frac{d(\Delta v)}{dt} ,$$

където m_e е еквивалентна маса на колоостта и свързаните с нея въртящи се части;
 F_6 - теглителна сила на двигателя свързан с боксуващата колоос;
 F_ψ - силата на сцепление при развитие на боксуването;
 Δv - скоростта на приплъзване на боксуващата колоос.

Ускоряващата сила ΔF_y при определена скорост на приплъзване Δv се получава като разлика в абсцисите на механичната характеристика на боксуващия двигател и характеристиката на сцепление $\Delta v(F_\psi)$. Зависимостта $\Delta v(t)$ се получава след интегриране на уравнение (12).

При включване на защитата и преминаване на понижена характеристика възниква закъснителна сила ΔF_z . Започва процес на прекратяване на боксуването. Зависимостта $\Delta v(t)$ в този случай се получава, след графо-аналитичното интегриране на уравнението



фиг.2 Електромеханични характеристики при развитие и прекратяване на боксуването

$$(13) \quad \Delta F_z = F'_\psi - F'_6 = m_e \cdot \frac{d(\Delta v)}{dt},$$

където F'_ψ е силата на сцепление при прекратяване на боксуването;
 F'_6 - теглителната сила на двигателя свързан с боксуващата колоос.

Характеристиките $\Delta v(t)$ при развитие и прекратяване на боксуването, както и $\Delta v(F_y)$ и $\Delta v(F_z)$ са показани на фиг.3, за пета пускова позиция.

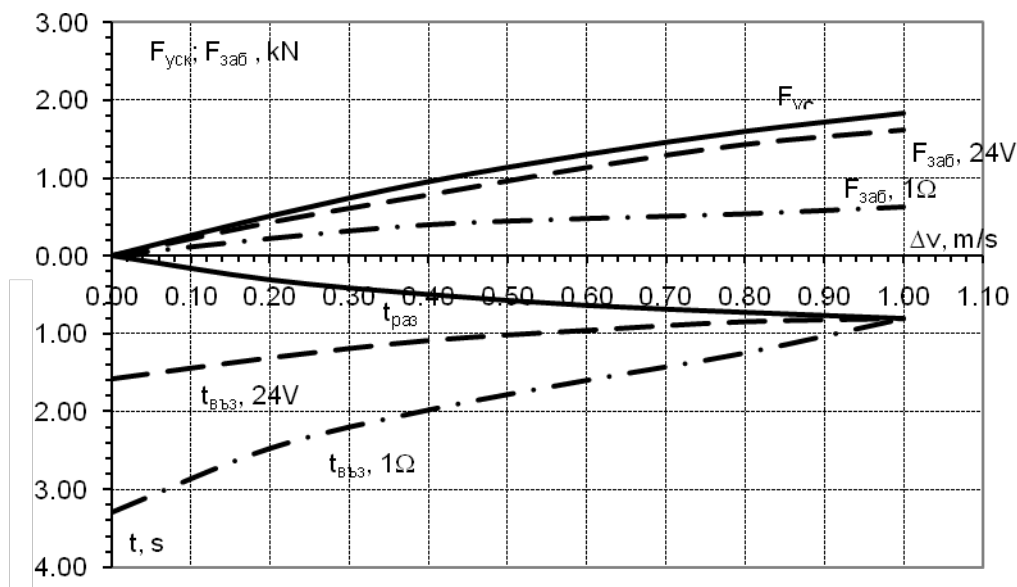
4. Сравнение на защитите против боксуване

При сравнение на разглежданите защиты – шунтиране на котвата и захранване на възбудителната намотка на двигателя от външен източник се изхожда от следните показатели за оценка на ефективността им,[2]:

а. Продължителност на боксуването

$$(14) \quad T_6 = t_{\text{раз}} + t_{\text{въз}} + t_3 + t_4 ,$$

където $t_{\text{раз}}$ е времето от възникване на боксуването до достигане на скорост на приплъзване, при която се подава сигнал за заработване на защитата;
 $t_{\text{въз}}$ - времето за работа на понижена теглителна характеристика (защитата е включена);
 t_3 - времето за протичане на електромеханическия преходен процес, при преминаване от характеристиката на боксуване към понижена теглителна характеристика, прието е 1s;
 t_4 - времето от ликвидиране на приплъзването до достигане на началната теглителна сила, прието е 1s.



фиг.3 Ускоряващата и забавяща сили във функция на скоростта на приплъзване и скоростта на приплъзване във функция на времето

б. Коэффициент на снижение на теглителната сила

$$(15) \quad K_f = \frac{F_T - F_T'}{F_T} ,$$

където F_T е теглителната сила на мотрисата преди включване на защитата;
 F_T' - Теглителната сила на мотрисата след включване на защитата.

в. Снижение на скоростта на мотрисата за времето от възникване на боксуването до неговото прекратяване

$$(16) \quad \Delta v_{\Pi} = - \frac{g \cdot n \cdot F_{\psi \max} \cdot T_0 \cdot b}{G} ,$$

където n е броят на тяговите двигатели;
 $F_{\psi \max}$ - максималната сила на сцепление;
 T_0 - продължителността на боксуване;
 G - силата на тежестта на мотрисата, средно напълнена;
 b - коефициентът зависещ от бързодействието на защитата;
 g - земното ускорение.

г. Загуби на енергия при едно пробоксуване [6]

Средната мощност която се изразходва за преодоляване на триенето от приплъзване на колелата върху релсите в i -ия интервал от време е

$$(17) \quad \Delta P_{Ti} = F_i \cdot \Delta(v_i) \cdot (1 - \rho_i \cdot \Delta v_i),$$

където $\Delta(v_i)$ е изменението на скоростта на приплъзване в i -ия интервал;
 F_i - теглителната сила която развива колоостта в началото на i -ия интервал;
 Δv_i - скоростта на приплъзване в началото на i -ия интервал;
 ρ_i - относителната твърдост на характеристиката на сцепление в началото на i -ия интервал.

Силата, която се изразходва за изменение на скоростта на приплъзване в границите на всеки интервал се определя от зависимостта

$$(18) \quad F_i = \frac{m_e}{2 \cdot u_{i-1} \cdot \Delta t_i} (u_i^2 - u_{i-1}^2),$$

където m_e е еквивалентната маса на тягова колоос при пълна мотриса;
 u_i - периферната скорост на боксуващата колоос в края на i -ия интервал;
 u_{i-1} - периферната скорост на боксуващата колоос в края на $(i-1)$ -ия интервал;
 Δt_i - избраният интервал от време, който отговаря на определено ускорение.

Загубата на енергия за триене за всеки интервал I се определя от следната зависимост

$$(19) \quad \Delta A_i = \Delta P_{Ti} \cdot t_i.$$

В Таблицы 1 и 2 са обобщени изчислените критерии за оценка на ефективността на сравняваните защити против боксуване, за две пускови позиции - 3-та и 5-та.

Таблица 1 Критерии за оценка на ефективността на защити против боксуване, позиция V, $R_{n5}=0,7\Omega$

Тип защита	$t_{раз}, s$	$t_{въз}, s$	T_0, s	k_f	$\Delta v_{п}, km/h$	$\Delta A_{раз}, Ws$	$\Delta A_{въз}, Ws$	$\Sigma \Delta A, Ws$
$R_{ш}=1\Omega$	0,81	3,29	6,1	0,105	0,022	56,51	218,5	275
$U_3=24V$	0,81	1,58	4,39	0,159	0,014	56,51	60,15	116,66

Таблица 2 Критерии за оценка на ефективността на защити против боксуване, позиция III, $R_{n3}=1,6\Omega$

Тип защита	$t_{раз}, s$	$t_{въз}, s$	T_0, s	k_f	$\Delta v_{п}, km/h$	$\Delta A_{раз}, Ws$	$\Delta A_{въз}, Ws$	$\Sigma \Delta A, Ws$
$R_{ш}=1\Omega$	1,09	6,05	9,14	0,099	0,044	56,81	280	336,8
$U_3=24V$	1,09	2,11	5,2	0,0125	0,025	56,81	133,98	190,8

5.Изводи

От обобщените в Таблицы 1 и 2 критерии за ефективността на защитите, могат да се направят следните изводи:

а. Продължителността на боксуването T_0 при защитата със захранване на възбудителната намотка от външен източник е значително по-малка, например за III-та пускова позиция тя е 5,2s, а при шунтиране на котвата – 9,14s.

б. Сnižението на скоростта на мотрисата при възникване и прекратяване на режим на боксуване е по-малко при защитата със захранване на възбудителната намотка $\Delta v_n = 0,014 \text{ km/h}$ за III^{-та} пускова позиция и $0,025 \text{ km/h}$ за V^{-та} позиция.

в. При шунтиране на котвената намотка на боксуващия двигател с активен пунт, коефициентът на сnižение на теглителната сила k_f е по малък и за двете пускови позиции, за III^{-та} – 0,099, а за V^{-та} – 0,105, т.е. загубата на теглителна сила при тази защита е по-малка.

г. При защитата с шунтиране на котвата, загубите на енергия за триене при едно пробоксуване (развитие и прекратяване) са по-големи повече от два пъти в сравнение с тези при защитата с захранване на възбудителната намотка от външен източник.

д. Защитата с захранване на възбудителната намотка от външен източник е значително по-ефективна. Внедряването и в трамвайните мотриси е технически лесно и би довело до значително намаляване на износването на колелата и релсите, на разхода на енергия и на повредите по тяговите двигатели.

Литература

[1] Л. Б. Българанов, Ефективност на някои защиты против боксуване за трамваен ЕПС, Научна сесия на ВМЕИ – София, 1979, С.

[2] Д. К. Минов, Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей, Транспорт, 1965, М.

[3] L. Balgaranov, Protection against sleping for tram rolling stock type Sofia, IX International scientific conference, 14.09.1993, Zilina, Slovak Republic, Zbornik 2/1, p.15-21, 1993, Z.

[4] Л. Българанов, Противобоксуваща устойчивост на трамвайни мотриси тип „София” и необходимост от прилагане на защита против боксуване, научна сесия на ВМЕИ-София, 19-20.04.1979, С.

[5] Л. Българанов, Проектиране на електрическата част на електрически мотрисни средства, ТУ-София, 242 стр., 1997, С.

[6] Л. Българанов, Метод за определяне на разхода на енергия при възникване и прекратяване на режими на боксуване, Годишник на ТУ-София, том 51, 2000-2001, с.293-298, 2001, С.

[7] Н. Н. Меншутин, Зависимост между силой сцепления и скоростью скольжения колесной пары локомотива, ВНИИЖТ, №7, 1960, М.

[8] Захарченко Д. Д. и др., Автоматизация систем управления электрическим подвижным составом, МПС, 1963, М.