

ВИЗНАЧЕННЯ НИЗЬКООМНИХ ОПОР КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ, ОБ'ЄДНАНИХ ГРУПОВИМ ЗАЗЕМЛЕННЯМ

Представив д.т.н., професор Гетьман Г.К.

Вступ

Несучі конструкції контактної мережі, до яких належать опори, є відповідальними резервованими елементами системи електропостачання електричних залізниць. Надійність опор контактної мережі визначає безперервність і безпеку руху потягів. Тому питанням міцності залізобетонним опорним конструкціям приділялася особлива увага завжди як на стадії розробки і проектування, так і на стадії виготовлення і експлуатації.

На Укрзалізниці в 2009 році експлуатується 26% опор з терміном служби більше 40 років. В порівнянні з 2007 роком кількість їх збільшилася на 10%. У 2008 році замінено усього 3,0% від усіх опор, які знаходяться в експлуатації більше 40 років. Якби не проводилася електрифікація нових ділянок, відсоток опор з терміном експлуатації більше 40 років був би ще значно вищий. План по заміні опор контактної мережі в цілому по господарствах виконаний на 143,9%. Але, не дивлячись на це, з такими темпами заміна тільки опор, які вже експлуатуються більше усередненого терміну, знадобиться майже 37 років. За такий термін практично усі опори необхідно буде замінити. Це не реально як для залізниці так і для виробників опор контактної мережі. Вихід з цієї проблеми один використовувати повний ресурс опори а за допомогою діагностики виводити з роботи тільки конкретну несправну опору.

У 2008 році план по діагностиці виконаний на 115,7%. При цьому було виявлено 73 дефектних опори які були замінені в першу чергу. [1]

На електрифікованих ділянках залізниць одною з важливіших проблем є електрокорозія залізобетонних опор контактної мережі. Злам і падіння опори від дії електрокорозії майже неминуче спричиняють за собою обрив дротів контактної мережі, порушення електропостачання і режиму руху потягів.

Проведена робота по оцінці стану підземної частини опор, фундаментів і анкерів, які мають тріщини, або опір менше 100 Ом, що складають 3% від загальної кількості опор.

Питання удосконалення і розробки нових методів діагностики більш точних і ефективних менш працеємних не викликає сумніву в актуальності[2]. Особливо знаходження низькоомних опор об'єднаних груповим заземленням.

Основна частина

Для нового методу основною задачею є якісне знаходження несправної низькоомної опори або декілька опор без від'єднання їх від троса групового заземлення. Метод базується на аналізі електричних параметрів кола при різкій зміні перехідного опору «трос-земля» у місці приєднання опори до троса групового заземлення(ТГЗ). Для чого використовують стороннє джерело живлення змінного струму підвищеної частоти.

Метод базується на зміні індуктивного та ємнісного опорів, а разом з цим і повного опору опору в колі зі стороннім джерелом живлення[3]. При приєднанні стороннього джерела живлення (рис.1) до троса групового заземлення виникає електричне коло з активними та реактивними опорами де кожна залізобетонна опора представляє собою ємність та активний опір з'єднані паралельно, а провід ТГЗ індуктивний та активний опір з'єднані послідовно, тому можливо представити опори з груповим заземленням у вигляді наступної електричної схеми заміщення.

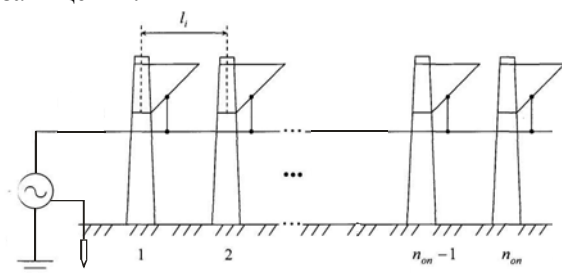


Рис.1. Підключення генератора змінного струму у коло з груповим заземленням

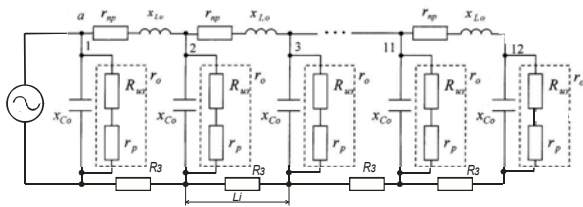


Рис.2. Схема заміщення опор контактної мережі з груповим заземленням.

Із схеми (рис.2) видно, що при зміні одного опору буде також змінюватись повний опір всього кола. Знаючи параметри схеми при нормальних умовах роботи (відсутність «вікон», інтенсивність руху, нормальна робота тягових підстанцій) можна розрахувати порушення експлуатації залізобетонних опор[4].

Залежно від значення частоти f джерела U_c такий ланцюг проявляє себе по-різному. При низьких частотах (до 1 кГц) індуктивний опір ТГЗ дуже малий: $x_L \rightarrow 0$, опір ємкості трос-земля - великий: $x_C \rightarrow \infty$; умови роботи ланцюга близькі до струморозподілення від джерела постійно струму, включеного вказаним способом. Для нього подовжній індуктивний опір ТГЗ практично близько до нуля. Тому опори R_0 усіх опор виявляються сполучені паралельно а зміна загального опору при ушкодженні ізоляції бетону в одній з опор, позначається лише на зменшенні їх сумарного опору. Виявити адресу конкретної опори в секції контролю з ушкодженням не представляється можливим.

При збільшенні частоти f , зростає індуктивний опір x_L і зменшується опір місткості x_C . У діапазоні частот $f = 10 \dots 20$ кГц подовжній опір троса x_L на довжині l_i прольоту контактної мережі (i - число прольотів) складає 6...12 Ом і їм не можна нехтувати в загальному струморозподіленні. Даний ланцюг набуває властивість довгої лінії. В той же час опір ємкості X_C на довжині прольоту l_i , ще досить велике 100 ... 50 кОм; воно не чинить істотного впливу на струморозподілення в ланцюзі. Тому в цьому діапазоні частоти електричне коло має індуктивний характер.

При різкому зменшенні R_0 в одній з опор внаслідок ушкодження ізоляції бетону $R_{iz} \rightarrow 0$, результуючий опір може бути виявлений лише з розрахунку струморозподілення усього електричного кола. При цьому істотний вплив на загальний опір чинить його подовжня складова X_L . Величина її залежить від віддаленості пошкодженої опори від джерела U_c тобто від довжини ТГЗ.

Схема заміщення опор контактної мережі з груповим заземленням складається з наступних параметрів:

R_{iz} – опір між закладною деталлю та арматурою опори;

R_p – опір розтікання;

R_3 – опір землі;

r_{np} – активний опір провoda троса групового заземлення, як правило використовують трос ПБСМ-70;

X_L – індуктивний опір троса групового заземлення;

X_C – ємкісний опір справної опори.

Електричну схему заміщення можна привести до одного контуру методом згортання кожного контуру послідовно. Приведемо цю схему до еквівалентної з одним контуром рис. 3.

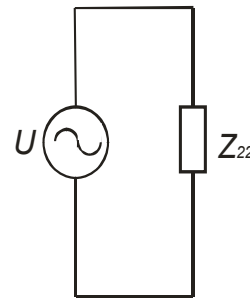


Рис. 3. Еквівалентна приведена схема.

Розрахуємо індуктивний та ємкісний опори для стороннього джерела живлення при частоті 10 кГц.

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Як правило ТГЗ виконують тросом марки ПБСМ-70, його індуктивність складає:

$$L = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ мГн/м}$$

$$X_L = 2 \cdot 3.14 \cdot 10000 \cdot 1.4 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 4.396 \text{ Ом}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Для довжини прольоту 50м, висоті 5м та тросу ПБСМ-70 ємкість складатиме:

$$C = 295 \text{ пкФ}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} =$$

$$\frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 10^4 \cdot 10^{-10} \cdot 2.95} = 53.98 \text{ кОм}$$

Якщо опора пошкоджена, то ємкісний опір зростає.

X_{cn} – ємкісний опір несправної опори дорівнює $X_{cn} = 2 \cdot X_C = 108 \text{ кОм}$.

Розрахуємо еквівалентний опір для дільниці яка має 11 опор об'єднаних тросом групового заземлення. Довжина прольоту між опорами дорівнює 50 м, тому весь проліт дорівнює 550 м, марка троса ПБСМ-70.

Активний опір кожної опори складається:

$$R_0 = R_{iz} + R_p$$

R_{iz} – опір ізоляції бетону, тобто опір між закладним болтом та арматурою.

Для кожної опори дорівнює 10 кОм,

R_p – опір розтікання підземної частини опори. Він дорівнює 30-150 Ом.

За приклад візьмемо 100 Ом.

Розрахунки виконаємо для декількох частот 10 кГц; 50 кГц; 100 кГц та виберемо оптимальну.

Напруга, що подається у систему дорівнює 30В.

Спочатку виконаємо експериментальні розрахунки з низькоомною опорою №11, це означає що опір $R_{iz} = 0$, знайдемо опір опори

$$R_0 = R_{iz} + R_p = 0 + 100 = 100 \text{ Ом}$$

Активний опір опори №11 з'єднаний паралельно з її ємкісним опором, знайдемо еквівалентний опір:

$$Z_{11} = \frac{R_p \cdot X_{CII}}{R_p + X_{CII}} = \frac{100 \cdot 108j}{100 + 108j} = 100 - 0.093j$$

Опір Z_1 з'єднаний послідовно з тросом групового заземлення на ділянці 50 м, тобто до опори №10:

$$Z_{211} = X_l + Z_{11} + R_c$$

$$Z_{211} = 4.396j + 100 - 0.093j + 6000 = 6.1 \cdot 10^3 + 4.303j$$

Еквівалентний опір двох опор №11 та №10 буде дорівнювати:

$$Z_{311} = \frac{Z_{211} \cdot R_0 \cdot X_C}{Z_{211} \cdot X_C + Z_{211} \cdot R_0 + X_C \cdot R_0}$$

Далі розрахунки ведуться аналогічно попереднім для трьох опор №11, №10 та №9.

Аналогічні розрахунки ведуться для інших опор які можуть бути низькоомними а також для систем з двома або трьома несправними опорами. Результати зведемо до табл. 1.

Таблиця 1

Значення еквівалентного опору в залежності від знаходження низькоомної опори.

Еквівалентний опір для низькоомної опори №, кОм	Довжина до джерела живлення, м										
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Z1	6,099	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,3	11,43	12,07	15,86
Z2	9,788	6,099	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,3	11,43	12,07	15,86

Z3	10,93	9,788	6,099	11,27	11,27	11,27	11,27	11,3	11,43	12,07	15,86
Z4	11,19	10,93	9,788	6,099	11,27	11,27	11,27	11,3	11,43	12,07	15,86
Z5	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099	11,27	11,27	11,3	11,43	12,07	15,86
Z6	11,26	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099	11,27	11,3	11,43	12,07	15,86
Z7	11,26	11,26	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099	11,3	11,43	12,07	15,86
Z8	11,27	11,26	11,26	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099	11,43	12,07	15,86
Z9	11,27	11,27	11,26	11,26	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099	12,07	15,86
Z10	11,27	11,27	11,27	11,26	11,26	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099	15,86
Z11	11,27	11,27	11,27	11,27	11,26	11,26	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099
Z1 та 11	6,099	11,27	11,27	11,27	11,26	11,26	11,25	11,19	10,93	9,788	6,099
Z3 та 7	8,717	8,728	6,099	8,639	8,717	8,728	6,099	8,626	8,592	8,471	9,232
Z3, 5 та 7	9,232	8,471	8,592	8,626	6,099	8,728	6,099	8,728	6,099	8,728	8,717

З аналізу результатів зведених в таблицю можливо зробити висновок чим ближче пошкоджена опора до джерела живлення, тим менший еквівалентний опір. Це свідчить про те, що струм в цій опорі буде більший.

Розрахуємо струми в контурах електричної схеми заміщення. Знаючи еквівалентний опір системи та привівши цю систему до одного контуру можемо знайти струми в кожній гілці розгорнувши систему до її початкового стану. Для чого скористаємось значенням напруги на генераторі, що приєднаний до троса групового заземлення. Струм у еквівалентному контурі буде дорівнювати

$$I_{11} = \frac{U}{Z_{22_{11}}}$$

Знайдемо його

$$I_{11} = \frac{30}{1.125 \cdot 10^4 - 658.696j - 2.659 \cdot 10^{-3} + 1.557 \cdot 10^{-4}j}$$

Знаючи, що на кожному послідовному елементі присутнє падіння напруги розрахуємо інші струми

$$I_{2,11} = \frac{U - I_{1,11} \cdot (Xl + R_C)}{Z_{20,11}} = \frac{30 - (2.659 \cdot 10^{-3} + 1.557 \cdot 10^{-4} j) \cdot (4.396 j + 6000)}{1.125 \cdot 10^4 - 658.689 j} = 1.125 \cdot 10^{-3} - 1.091 \cdot 10^{-5} j$$

$$I_{3,11} = \frac{U - (I_{1,11} + I_{2,11}) \cdot (Xl + R_C)}{Z_{18,11}},$$

$$I_{3,11} = 5.85 \cdot 10^{-4} - 4.452 \cdot 10^{-5} j$$

розрахуємо струми для кожної з опор які знаходяться у груповому заземленні та які можуть бути несправними. Результати розрахунків занесемо до табл. 2.

За результатами таблиці побудуємо графіки струмів для кожної з пошкоджених опор в залежності від довжини її знаходження.

Струм розподілення в електричному колі ТГЗ в залежності від знаходження пошкодженої опори при частоті джерела живлення 10кГц.

Також виконаємо аналогічні розрахунки якщо у електричне коло з ТГЗ включити стороннє джерело живлення з частотою 50 кГц та 100 кГц. Результати занесемо до таблиць.

Таблиця 2

Значення струму в контурах в залежності від знаходження пошкодженої опори

I5	I4	I3	I2	I1	Струм в контурах, мкА															
					Довжина до джерела живлення, м															
2666	2680	2745	3065	4919	0															
1256	1279	1387	1906	43.28	50															
599.2	645.9	862.4	16.77	20.31	100															
302.7	401.7	7.588	7.873	9.535	150															
188.3	3.535	3.562	3.696	4.476	200															
1.656	1.659	1.672	1.735	2.101	250															
0.7772	0.7785	0.7844	0.8139	0.9857	300															
0.3642	0.3648	0.3676	0.3814	0.4619	350															
0.1696	0.1699	0.1712	0.1776	0.2151	400															
0.07665	0.07677	0.07736	0.08027	0.09721	450															
0.02952	0.02957	0.0298	0.03091	0.03744	500															

I3, 5 та	I3 та 7	I1 та I1	I11	I10	I9	I8	I7	I6
3442	3442	4919	2663	2663	2663	2663	2663	2664
1330	1330	43.28	1250	1250	1250	1250	125	1251
679.1	679.1	20.31	586.7	586.7	586.7	586.8	587.2	589.3
7.694	7.774	9.535	275.4	275.4	275.4	275.6	276.6	281.2
3.93	2.964	4.476	129.3	129.3	129.4	129.8	132	142
0.045	1.145	2.101	60.68	60.73	60.94	61.94	66.66	88.34
0.02274	0.5849	0.9869	28.5	28.6	29.08	31.29	41.46	0.7769
0.00026	0.00671	0.4649	13.43	13.65	14.69	19.46	0.3638	0.364
0.0001	0.00258	0.2218	6.406	6.894	9.135	0.1688	0.1694	0.1695
0.00004	0.001	0.112	3.236	4.288	0.07505	0.07629	0.07656	0.07661
0.00001	0.0004	0.06968	2.012	0.02686	0.02891	0.02938	0.02949	0.02951

Таблиця 3

Значення струму в контурах в залежності від знаходження пошкодженої опори при частоті джерела живлення змінного струму 50 кГц

I5	I4	I3	I2	I1	Струм в контурах, мкА															
					Довжина до джерела живлення, м															
2983	2978	2981	3171	4919	0															
1306	1308	1372	1866	48,48	50															
573,8	602,1	807,5	18,4	21,25	100															
264,1	354,3	7,96	8,064	9,316	150															
155,4	3,492	3,489	5,535	4,084	200															
1,532	1,531	1,529	1,549	1,79	250															
0,6718	0,6712	0,6706	0,6793	0,7848	300															
0,2947	0,2945	0,2942	0,298	0,3443	350															
0,1293	0,1292	0,1291	0,1308	0,1511	400															
0,0559	0,05586	0,0558	0,05653	0,06531	450															
0,02108	0,02107	0,02105	0,02132	0,02463	500															

13, 5 та 7	13 та 7	11 та 11	111	110	19	18	17	16
2981	2981	4919	2986	2986	2986	2986	2986	2986
1372	1372	48,48	1309	1309	1309	1309	1309	1308
807,6	807,5	21,25	573,7	573,7	573,7	573,7	573,4	572,7
8,448	7,938	9,316	251,5	251,5	251,5	251,3	251,1	251,6
4,972	3,487	4,083	110,2	110,2	110,2	110	110,3	115,8
0,052	1,605	1,79	48,32	48,29	48,24	48,34	50,76	68,15
0,031	0,9446	0,7842	21,17	21,15	21,19	22,25	29,87	0,672
0,0003	0,00933	0,3434	9,269	9,289	9,754	13,09	0,2949	0,2948
0,00013	0,0041	0,1508	4,072	4,276	5,74	0,1295	0,1294	0,1293
0,00006	0,00177	0,06943	1,874	2,516	0,05589	0,05601	0,05595	0,05592
0,00002	0,00067	0,04085	1,103	0,02007	0,02108	0,02112	0,0211	0,02109

Таблиця 4.

Значення струму в контурах в залежності від знаходження пошкодженої опори при частоті джерела живлення змінного струму 100 кГц

I5	I4	I3	I2	I1	Струм в контурах, мкА	Довжина до джерела живлення, м													
						0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500			
3477	3473	3442	3437	4919	0														
1333	1324	1330	1756	56,37	50														
508,2	511,6	679,1	20,12	21,63	100														
196,3	261,3	7,783	7,72	8,299	150														
100,3	2,995	2,986	2,962	3,184	200														
1,149	1,149	1,146	1,136	1,222	250														
0,4409	0,4408	0,4396	0,436	0,4687	300														
0,1692	0,1692	0,1687	0,1673	0,1799	350														
0,06512	0,0651	0,06491	0,06439	0,06921	400														
0,02518	0,02518	0,0251	0,0249	0,02677	450														
0,00089	0,00894	0,00891	0,00884	0,0095	500														

13, 5 та 7	13 та 7	11 та 11	111	110	19	18	17	16
3442	3442	4919	3477	3477	3477	3477	3477	3477
1330	1330	56,37	1334	1334	1334	1334	1334	1334
679,1	679,1	21,63	511,8	511,8	511,8	511,8	511,8	511,3
7,694	7,774	8,299	196,4	196,4	196,4	196,4	196,2	195
3,93	2,964	3,184	75,34	75,34	75,34	75,27	74,81	75,33
0,04453	1,145	1,222	28,91	28,91	28,88	28,7	28,9	38,47
0,02274	0,5849	0,4687	11,09	11,08	11,01	11,09	14,76	0,4409
0,00026	0,00671	0,1796	4,251	4,225	4,254	5,663	0,1692	0,1692
0,0001	0,00258	0,0685	1,621	1,632	2,173	0,0652	0,06511	0,06511
0,00004	0,001	0,02646	0,6262	0,8337	0,02536	0,02521	0,02518	0,02518
0,00001	0,000354	0,01352	0,3198	0,0089	0,009	0,00895	0,00894	0,00894

За результатами таблиць побудуємо графіки струмів для кожної з пошкоджених опор в залежності від місця її знаходження та частоти рис. 4 – 5.

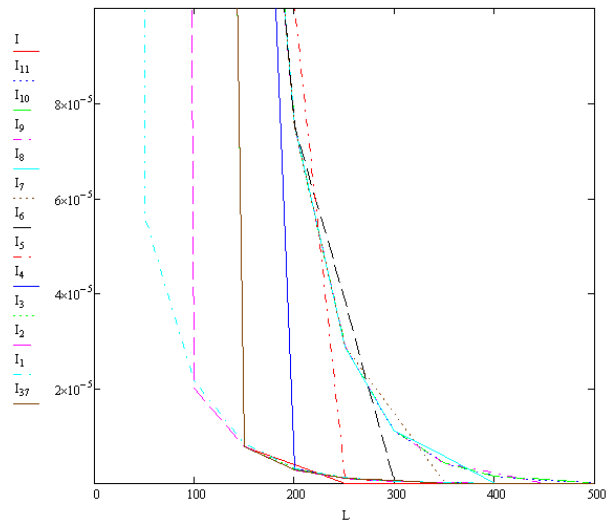


Рис. 4. Розподіл струмів у електричному колі ТГЗ в залежності від знаходження пошкодженої опори при частоті джерела живлення 100кГц.

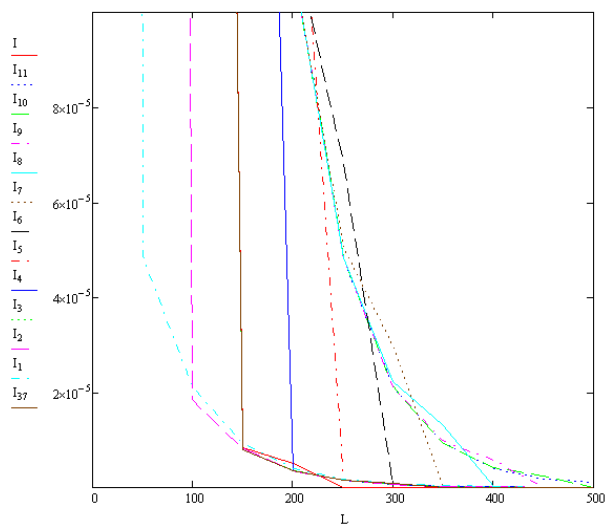


Рис. 5. Струмозподілення в електричному колі ТГЗ в залежності від знаходження пошкодженої опори при частоті джерела живлення 50 кГц

Висновок

Виконані розрахунки електричної схеми заміщення опор контактної мережі з'єднаних тросом групового заземлення. Знайдені струми в контурах цієї схеми дають змогу визначити пошкоджену опору за графіками.

В роботі проведено дослідження та розробка нового методу знаходження низькоомних опор контактної мережі об'єднаних груповим заземленням без їх від'єднання від групового заземлення.

З аналізу розрахунків наведених вище можна прийти до таких висновків:

- струми у кожному контурі змінюються по гіперболічному закону;

- якщо в груповому заземленні присутня пошкоджена опора, то по ній протікає струм, а в наступній опорі струм буде практично дорівнювати 0;

- порівнявши графіки струмів розрахункові з отриманими при вимірюванні (які виводяться на монітор комп'ютера, приєднаного до генератора), можна визначити опору або декілька опор низькоомних, тобто пошкоджену якщо більше одної то пошкоджених.

Запропонований метод базується на аналізі електричних параметрів кола при різкій зміні перехідного опору «трос-земля» у місці приєднання опори до троса групового заземлення (ТГЗ). Для чого використовують стороннє джерело живлення змінного струму підвищеної частоти. І таким чином зменшується час на знаходження низькоомної опори.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2008 році [Текст] / Мінтрансв'язку України. – К., 2009. – 182 с.
2. Горский А. В. Ремонт только по результатам диагностики [Текст] / А. В. Горский, А. А. Воробьев, Б. М. Куанышев // Локомотив. – 1998. – №12. – С. 37-39.
3. Подольский В. И. Железобетонные опоры контактной сети: конструкция, эксплуатация, диагностика : научно-техн. узд. / [Текст] В. И. Подольский. – М.: Интекс, 2007. – 152 с.
4. Кондратьев П. А. Компьютерный анализ состояния железобетонных опор [Текст] / П. А. Кондратьев, Ю. В. Богданов, С. Г. Галочкин // Локомотив. – 2002. – № 6 – С. 43 – 44.