

## **Дослідження процесів пуску та роботи в неномінальних режимах електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму**

Тиск в гальмівній магістралі, температура навколишнього середовища та в першу чергу технічний стан самого компресора певним чином впливають на значення початкового моменту опору  $M_{\text{оп.поч}}$ , що в свою чергу впливає на значення струму який протікає по колу якоря електродвигуна як під час його пуску, так і подальшої роботи.

Пуск електродвигуна в роботі розглядається таким, що складається з двох етапів [1, 2]. Перший етап – час від моменту подачі напруги на електродвигун до моменту рушання його валу. Другий етап – тривалість часу, за який кутова швидкість валу електродвигуна збільшується від нуля до сталого значення.

В реальних умовах експлуатації можливі випадки роботи електродвигунів компресорів протягом часу  $t_k$  (час, за який тиск у напірній магістралі підвищується з 0 атм до максимального значення 8,2 атм) зі сталим значенням підвищеного моменту опору  $M_{\text{оп.ст}}$ , що може бути викликано цілим рядом причин. Під підвищеним значенням моменту опору будемо вважати такий момент, який після закінчення процесу пуску буде перевищувати значення номінального моменту електродвигуна компресора, тобто  $M_{\text{оп.ст}} > M_{\text{ном}}$ . Збільшення початкового моменту опору  $M_{\text{оп.поч}}$ , що призводить до збільшення тривалості першого етапу пуску, зумовлене збільшенням моменту опору механізму компресора по різним причинам.

Даний факт (підвищений момент опору) необхідно врахувати також при дослідженні процесу нагрівання ізоляції обмотки якоря.

Розглянемо можливий режим роботи електродвигуна (ЕД) компресора, коли пуск відбувається при порожній напірній магістралі, а подальша робота ЕД триває доти, доки тиск не підвищиться до 8,2 атм при умові, що після закінчення пуску момент опору на валу електродвигуна буде більше номінального.

Експериментально встановлено, що тривалість пуску та роботи ЕД компресора по підвищенню тиску з 0 до 8,2 атм, складає 395 – 405 с при напрузі у контактній мережі  $U_m = 3000$  В та температурі навколишнього середовища  $+20$  °С.

Як показали дослідження [3], кутова частота  $\omega$  при напрузі в контактній мережі  $U_m = 4000$  В збільшується на 21 % у порівнянні з  $\omega_{\text{ном}}$ . Таким чином час  $t_k$  при  $U_m = 4000$  В буде на 21 % меншим від часу 405 с і складе

335 с. При  $U_M = 2400$  В,  $\omega$  знижується на 20,8 % у порівнянні з  $\omega_{\text{ном}}$ . Відповідно час, за який тиск у напірній магістралі при  $U_M = 2400$  В підвищується з 0 до 8,2 атм, збільшується на 20,8 % у порівнянні з випадком, коли  $U_M = 3000$  В і складає 490 с.

За допомогою створеної автором математичної моделі [4, 5] та відповідної програми для ЕОМ, змодельовано пуск ЕД компресора при порожній напірній магістралі і його роботу протягом часу  $t_k$  при  $U_M = 2400$  В,  $U_M = 3000$  В та  $U_M = 4000$  В.

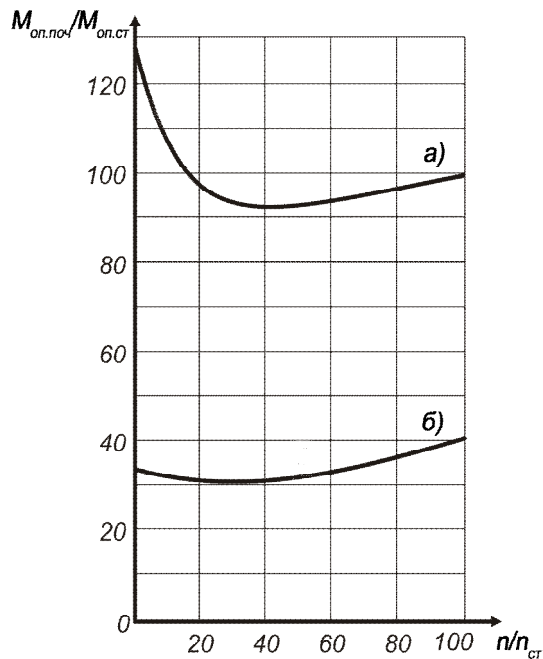


Рис. 1.– Механічні характеристики поршневого компресора при пуску під навантаженням (протитиском) – а), та при пуску без навантаження – б)

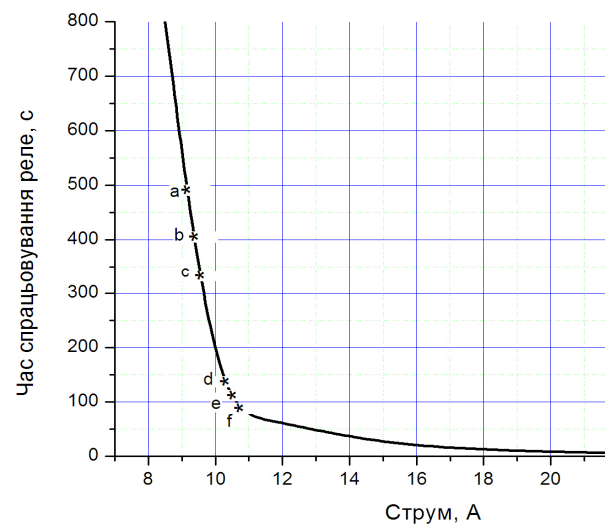


Рис. 2 – Дослідна залежність  $t = f(I)$  теплових реле ТРВ-8,5

Початковий момент опору під час пуску компресора з порожньою магістраллю згідно рис. 1 (крива б)) складає  $M_{\text{оп.пocх}} = M_{\text{оп.ст}} \cdot 0,34$ . Приймаємо, що після закінчення пуску  $M_{\text{оп.ст}} = M_{\text{ном}} = 58$  Нм, а відповідно  $M_{\text{оп.пocх}} = 58 \cdot 0,34 = 19,7$  Нм.

Залежності струму  $I_{\text{я}}(t)$  на першому та другому етапах пуску та кутової швидкості  $\omega(t)$ , отримані з допомогою ЕОМ для  $U_M = 3000$  В приведені на рис. 3 а), б) та рис. 4 відповідно.

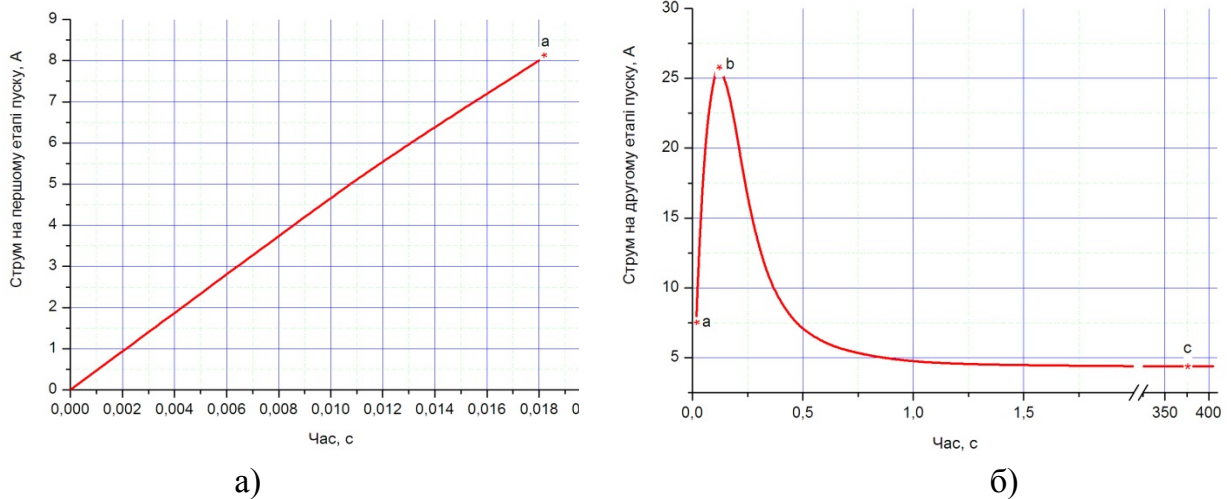


Рис. 3 –  $I_{я}(t)$  під час пуску при порожній магістралі і подальшій роботі протягом  $t_k = 405$  с при  $U_M = 3000$  В та  $M_{оп.ст} = M_{ном}$  після закінчення пуску

Згідно з рис. 4 стало значення кутової швидкості вала ЕД компресора під час його роботи складає  $103,9 \text{ с}^{-1}$ . Визначимо на скільки відсотків в порівнянні з номінальним значенням ( $\omega_{ном} = 106,8 \text{ с}^{-1}$ ) знизилась кутова швидкість ЕД компресора:  $\frac{106,8 - 103,9}{106,8} \cdot 100 \% = 2,7 \%$ . Тобто  $t_k$  в порівнянні з 405 с збільшився на 2,7 % і складає 415 с. Аналогічно визначається час  $t_k$  для всіх інших випадків, коли  $\omega$  буде відрізнятись від  $\omega_{ном}$ .

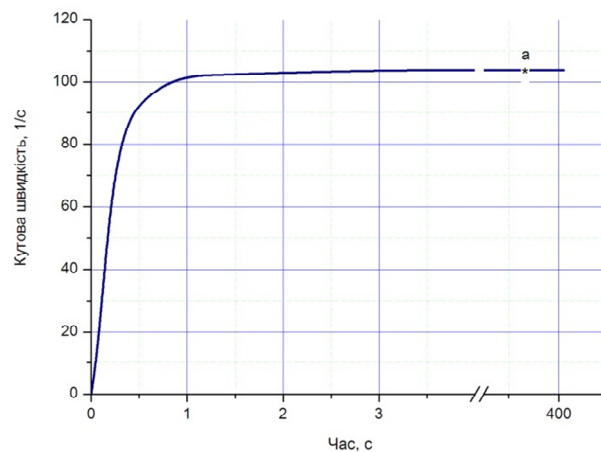


Рис. 4 –  $\omega(t)$  під час пуску при порожній магістралі і подальшій роботі протягом  $t_k = 405$  с при  $U_M = 3000$  В та  $M_{оп.ст} = M_{ном}$  після закінчення пуску

Аналогічно проведено дослідження пуску і роботи ЕД компресора протягом часу  $t_k$  при  $U_M = 2400$  В та  $U_M = 4000$  В відповідно. Отримані результати занесемо до табл. 1.

За допомогою залежності рис. 2 визначимо значення струмів, при протіканні яких протягом часу  $t_k$  відбудеться спрацювання теплового реле ТРВ-8,5. Результати занесемо в табл. 1.

Таблиця 1

## Результати дослідження роботи електродвигуна компресора в першому режимі

Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	21	18	14
Діюче значення струму на протязі $t_k$ , А	3,48	4,39	6,55
$M_{оп.пoch}$ , Нм	19,7	19,7	19,7
$M_{оп.ст}$ , Нм	58	58	58
Стале значення $\omega$ , $c^{-1}$	88,7	103,9	130,6
$t_k$ , с	474	415	332
Струм спрацьовування теплового реле через час $t_{\xi}$ , А	9,18 – точка “а” на рис. 2	9,3 – точка “b” на рис. 2	9,5 – точка “с” на рис. 2

Проведено дослідження впливу тривалості першого етапу пуску на еквівалентний струм, що протікає по колу якоря як під час пуску, так і подальшої його роботи. При дослідженні приймаємо збільшення тривалості першого етапу пуску на 10, 20, та 30 % у порівнянні з відповідними даними з табл. 1. Як показує практика, наведені збільшення тривалості першого етапу пуску, відповідають реальним умовам експлуатації рухомого складу.

Збільшення тривалості першого етапу пуску викликане збільшенням початкового моменту опору  $M_{оп.пoch}$ , який в свою чергу може залежати від  $M_{оп.ст}$ . Встановити залежність між  $M_{оп.ст}$  та  $M_{оп.пoch}$  при пуску ЕД компресора з порожньою напірною магістраллю можливо завдяки залежності б), що приведена на рис. 1. згідно з якою  $M_{оп.пoch} = 0,34M_{оп.ст}$ .

При проведенні вказаних досліджень приймаємо, що співвідношення  $M_{оп.пoch} = 0,34M_{оп.ст}$  буде справедливим для випадків, коли тривалість першого етапу пуску буде збільшуватись на 10, 20, 30 %. Результати досліджень представлено у вигляді табл. 2.

Таким чином, при збільшенні тривалості першого етапу пуску до 30 % при напрузі в контактній мережі  $U_m = 2400$  В отримали збільшення еквівалентного струму від 3,48 А до 5,01 А, при  $U_m = 3000$  В еквівалентний струм збільшився від 4,39 А до 6,76 А, а при  $U_m = 4000$  В еквівалентний струм збільшився від 6,55 А до 9,26 А.

При зміні тривалості першого етапу пуску змінюється також значення усталеної кутової швидкості, що в свою чергу призводить до зміни продуктивності компресора, тобто змінюється час роботи компресора  $t_k$  і відповідно змінюється час впливу еквівалентного струму на ізоляцію обмотки якоря.

За допомогою залежності рис. 2 визначимо значення струмів, при протіканні яких протягом часу  $t_k$  відбудеться спрацьовування теплового реле ТРВ-8,5 [6]. Результати занесемо до табл. 2. Для зручності проведення аналізу отриманих результатів на базі табл. 1 та 2 побудуємо залежності еквівалентного струму за час  $t_k$  від напруги  $U_m$  при різних значеннях тривалості першого етапу пуску і представимо на рис. 5.

Таблиця 2

Результати дослідження роботи електродвигуна при збільшенні тривалості першого етапу пуску від 10 до 30 % у порівнянні з вихідними даними з табл. 1.

<b>Тривалість першого етапу пуску збільшено на 10 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1</b>			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	23,1	19,8	15,4
Діюче значення струму на протязі $t_k$ , А	4,04	5,6	7,81
$M_{оп.пoch}$ , Нм	26	28	27
$M_{оп.ст}$ , Нм	76	82	79
Стале значення $\omega$ , $c^{-1}$	84,4	98,4	124
$t_k$ , с	495	436	349
Струм спрацьовування теплового реле через час $t_k$ , А	9,1	9,28	9,5
<b>Тривалість першого етапу пуску збільшено на 20 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1</b>			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	25,2	21,6	16,8
Діюче значення струму на протязі $t_k$ , А	4,41	6,36	8,61
$M_{оп.пoch}$ , Нм	32	36	32
$M_{оп.ст}$ , Нм	94	106	94
Стале значення $\omega$ , $c^{-1}$	80	94	120
$t_k$ , с	506	453	361
Струм спрацьовування теплового реле через час $t_k$ , А	9,09	9,24	9,47
<b>Тривалість першого етапу пуску збільшено на 30 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1</b>			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	27,3	23,4	18,2
Діюче значення струму на протязі $t_k$ , А	5,01	6,76	9,26
$M_{оп.пoch}$ , Нм	39	40	37
$M_{оп.ст}$ , Нм	115	118	109
Стале значення $\omega$ , $c^{-1}$	77,5	92	116
$t_k$ , с	514	461	375
Струм спрацьовування теплового реле через час $t_k$ , А	9,08	9,17	9,4

Визначимо за даними табл. 1 та 2 для кожного значення  $U_m$  величину мінімального еквівалентного струму  $I_{екв.спр}$ , при протіканні якого через теплове реле ТРВ-8,5 відбудеться його спрацьовування через час  $t_k$ . Так для  $U_m = 2400$  В  $I_{екв.спр} = 9,08$  А, для  $U_m = 3000$  В  $I_{екв.спр} = 9,17$ , а для  $U_m = 4000$  В  $I_{екв.спр} = 9,4$  А. За вказаними трьома точками в одній системі координат на рис. 5 побудуємо залежність  $I_{екв.спр}$  від напруги  $U_m$ .

Як видно з рис. 5, при збільшенні тривалості першого етапу пуску від 10 до 30 %, внаслідок збільшення по тим чи іншим причинам початкового моменту опору  $M_{оп.пoch}$  та моменту опору  $M_{оп.ст}$ , що діє на ЕД після закінчення пуску, по колу якоря протікають такі струми, що не викликають спрацьовування теплового реле ТРВ-8,5. Тобто ЕД компресора буде відключений від живлячої мережі через час  $t_k$  не за допомогою теплового реле, а за допомогою реле тиску, але ізоляція електродвигуна може бути перегріта.

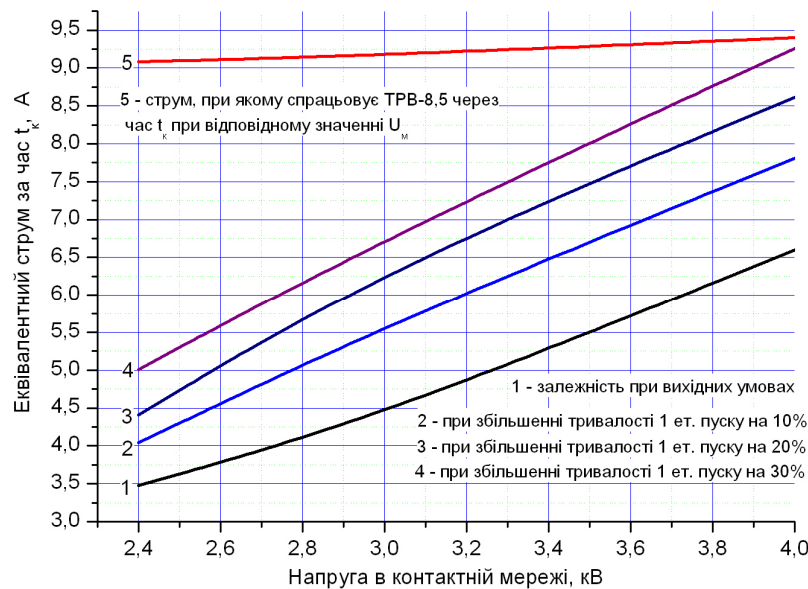


Рис. 5 – Залежності  $I_{\text{екв}}$  за час  $t_k$  від напруги  $U_M$  при різних значеннях тривалості першого етапу пуску при роботі ЕД компресора у першому режимі

З допомогою теплової моделі [7] та відповідної програми для ЕОМ для еквівалентних струмів, з врахуванням визначеного діапазону для кожного значення  $U_M$  ( $3,48 \text{ А} < I_{\text{екв}} < 9,08 \text{ А}$  – при  $U_M = 2400 \text{ В}$ ,  $4,39 \text{ А} < I_{\text{екв}} < 9,17 \text{ А}$  – при  $U_M = 3000 \text{ В}$  та  $6,55 \text{ А} < I_{\text{екв}} < 9,4 \text{ А}$  – при  $U_M = 4000 \text{ В}$ ) визначено перевищення температури ізоляції обмотки якоря  $\tau_t$  (при певних значеннях тривалості першого етапу пуску) за відповідний час  $t_k$ . Отримані результати досліджень зведені в табл. 3.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що під час роботи ЕД компресора при вихідних умовах (без збільшення тривалості першого етапу пуску) з  $U_M = 2400 \text{ В}$  та  $U_M = 3000 \text{ В}$  ізоляція обмотки якоря не нагрівається до небезпечних значень температури. Допустимий перегрів для ізоляції класу В обмотки якоря електродвигуна ДК-409 складає  $120 \text{ }^\circ\text{С}$ . Але вже при збільшенні тривалості першого етапу пуску на 10 % при  $U_M = 4000 \text{ В}$  можемо спостерігати вкрай небезпечний перегрів ізоляції обмотки якоря  $\tau_t = 173 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Збільшення тривалості першого етапу пуску на 20 % при  $U_M = 2400 \text{ В}$  не призводить до небезпечного нагрівання ізоляції. А при  $U_M = 3000 \text{ В}$  значення перегріву ізоляції наближається до максимально допустимого значення і складає  $117 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Збільшення тривалості першого етапу пуску на 30 % при  $U_M = 2400 \text{ В}$  також не призводить до небезпечного нагрівання ізоляції. А вже при  $U_M = 3000 \text{ В}$  перегрів ізоляції складає  $\tau_t = 133 \text{ }^\circ\text{С}$ , що на  $13 \text{ }^\circ\text{С}$  більше максимально допустимого значення.

Проведені дослідження показали, що в реальних умовах експлуатації рухомого складу існують такі режими роботи, при яких по колу якоря

Таблиця 3

Результати досліджень нагрівання ізоляції обмотки якоря при збільшенні тривалості першого етапу пуску від 10 до 30% у порівнянні з вихідними умовами

<b>Тривалість першого етапу пуску збільшено на 10 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1</b>			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	23,1	19,8	15,4
Діюче значення $I_{\text{екв}}$ за час $t_k$ , А	4,04	5,6	7,81
$M_{\text{оп.пoch}}$ , Нм	26	28	27
$M_{\text{оп.ст}}$ , Нм	76	82	79
$t_k$ , с	490	436	349
Значення $\tau_t$ , °С за час $t_k$	48	89	173
<b>Тривалість першого етапу пуску збільшено на 20 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1</b>			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	25,2	21,6	16,8
Діюче значення $I_{\text{екв}}$ за час $t_k$ , А	4,41	6,36	8,61
$M_{\text{оп.пoch}}$ , Нм	32	36	32
$M_{\text{оп.ст}}$ , Нм	94	106	94
$t_k$ , с	506	453	361
Значення $\tau_t$ , °С за час $t_k$	58	117	196
<b>Тривалість першого етапу пуску збільшено на 30 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1</b>			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	27,3	23,4	18,2
Діюче значення $I_{\text{екв}}$ за час $t_k$ , А	5,01	6,76	9,26
$M_{\text{оп.пoch}}$ , Нм	39	40	37
$M_{\text{оп.ст}}$ , Нм	115	118	109
$t_k$ , с	514	461	375
Значення $\tau_t$ , °С за час $t_k$	75	133	230

протягом всього робочого циклу протікають такі струми, що не викликають спрацьовування теплового реле ТРВ-8,5, але при цьому нагрівають ізоляцію до небезпечних температур, що підтверджується статистикою виходу з ладу електродвигунів компресорів (до 50 % електродвигунів, що знаходяться в експлуатації). Тому для підвищення надійності рухомого складу гостро стоїть питання про заміну системи захисту електродвигуна компресора на більш досконалу, яка не буде мати вищевказаних недоліків, а також доцільна заміна ізоляції класу В [8] на більш високий клас.

### Список літератури

1. Гладырь А. И. Трогание и пуск как фазы единого процесса / А. И. Гладырь // Научн. труды КГПУ. Вып. 1 /2001(10) – С. 24-29.
2. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
3. Краснов Р. В. Підвищення надійності електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму: дис. кандидата техн. наук: 05.22.09 / Р. В. Краснов. – Дніпропетровськ: 2012. – 220 с.
4. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М. З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.

5. Моделювання процесу пуску електропривода поршневого компресора (ЕК-7Б) з двигуном ДК-406 (ДК-409) електропоїзда ЕР-2 з урахуванням вихрових струмів / Р. В. Краснов та ін. // Збірник статей Харківської національної академії міського господарства. – 2011. – Вип. 97. – С. 251 – 256.
6. Цукало П. В. Электрпоезда ЭР2 и ЭР2<sup>Р</sup> / П. В. Цукало, Н. Г. Ерошкин. – М.: «Транспорт», 1986. – 359 с.
7. Краснов Р.В. Дослідження перегріву електродвигуна (ДК-409) компресора (ЭК-7Б) електропоїзду постійного струму (ЭР-1, ЭР-2) за допомогою теплової схеми заміщення / Р.В. Краснов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту №36. – 2011. – С. 79 – 83.
8. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ – 0063: Затв. і введено в дію наказом Міністерства транспорту України від 27.02.2003 р. № 53Ц / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2003. – 281 с.