

## ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОМПРЕСОРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Далека В. Х.<sup>1,3</sup>, Будниченко В. Б.<sup>2</sup>, Дзюбенко О. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова

<sup>2</sup>Національний транспортний університет

<sup>3</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** В статті представлено результати дослідження та пропозиції з підвищення енергоефективності електроприводів компресорів рухомого складу електричного транспорту на основі вимірювання робочих параметрів електродвигуна та компресора. На прикладі дослідження тягового електропривода компресора тролейбуса наведено: середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна компресора до сталого значення, середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна до номінального, середня тривалість перехідного при включенні приводного двигуна, середній час роботи компресора при русі тролейбуса, фактичну потужність двигуна компресора при його включенні, середню кількість електроенергії, що споживається пневматичною системою в плинні робочої зміни рухомого складу на маршруті. Показано доцільність вирішення питань ресурсозбереження при виборі допоміжних електроприводів рухомого складу електричного транспорту.

**Ключові слова:** електричний транспорт, компресор, електропривод, енергоефективність, контактна мережа, потужність.

### Вступ

Вирішення основної проблеми ресурсозбереження в Україні потребує підвищення енергоефективності усіх споживачів електричної енергії. Особливо це відноситься до електроприводів, якими споживається понад 60 % електроенергії, що виробляється у світі. Оскільки електричний транспорт потребує досить значних витрат електроенергії, то питання її раціонального використання є досить актуальними [1-3].

На транспортних засобах електричного транспорту основним є тяговий електропривод, що забезпечує рух та споживає абсолютну більшість електроенергії. Але є ряд допоміжних електроприводів. Зокрема це електроприводи компресорів пневматичних систем, насосів гідравлічних систем, дверних механізмів, склоочисників, тощо.

### Аналіз публікацій

Енергоефективності тягових електроприводів завжди приділялась та приділяється значна увага, особливо тяговим електродвигунам та системам їх керування [2-5, 7]. Проведена ретельна оцінка переваг енергозберігаючих двигунів порівняно зі стандартними двигунами з точки зору економії електроенергії [3, 6].

Але питанням енергоефективності допоміжних електроприводів приділяється ще не достатня увага. В основному питання надійності та енергоефективності, наприклад, електроприводів компресорів вирішуються вибором типу електродвигуна (постійного чи змінного струму) та вибором типу компресорів [3, 7, 8, 10]. Є також важливими питання приводів компресорів у гібридних автомобілях у яких гальмівні системи потребують стисненого повітря [9]. В публікаціях останніх років відсутні в повній мірі результати досліджень режимів роботи електроприводів компресорних установок електричного транспорту.

### Мета та постановка задачі

Метою статті є експериментальні дослідження режимів роботи електроприводів компресорів рухомого складу міського електротранспорту для оцінки їх енергоефективності.

Завданням для досягнення мети потрібно було визначити: середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна компресора до сталого значення, середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна до номінального, середню тривалість перехідного процесу при включенні приводного двигуна, середній час

роботи компресора при русі тролейбуса, фактичну потужність двигуна компресора при його включенні, середню кількість електроенергії, що споживається для забезпечення функціонування пневматичної системи за відповідний час.

### Експериментальні дослідження енергетичних характеристик приводів компресорів

Особливістю приводів компресорів на рухомому складі електротранспорту є те, що на відміну від інших видів транспортних засобів, зокрема з двигунами внутрішнього згоряння, використовуються електричні двигуни з обмеженням пускових струмів, а також циклічний характер його роботи.

Як правило включення приводного двигуна компресора завжди супроводжується короткочасним перевантаженням електродвигуна незважаючи на те, що на виході компресора в момент його включень завжди тиск повітря дорівнює нулю. Для зниження значення пускового струму, наприклад у тролейбусах та вагонах метрополітену, послідовно з двигуном привода компресора встановлюється допоміжний резистор. Використання окремого електроприводу призводить до додаткових витрат електроенергії, що

залежать, в основному, від потужності електродвигуна та часу його роботи.

Для проведення експериментальних досліджень використовувався USB Autoscope I – Цифровий USB Осцилограф (див.рис.1), що підключений до ПК та датчиків струму та напруги типу ПИИТ-2.



Рис. 1. Autoscope I – Цифровий USB Осцилограф

У процесі виконання досліджень було виконано реєстрування пускового струму двигуна компресора та напруги в контактній мережі, осцилограми яких наведені на рис. 2-4. На осцилограмах прийняті наступні позначення:

«npr» – напруга контактної мережі (Y-напруга, В; X-час, с)

«tok» – споживаний струм двигуном компресора (Y - струм, А; X- час, с)

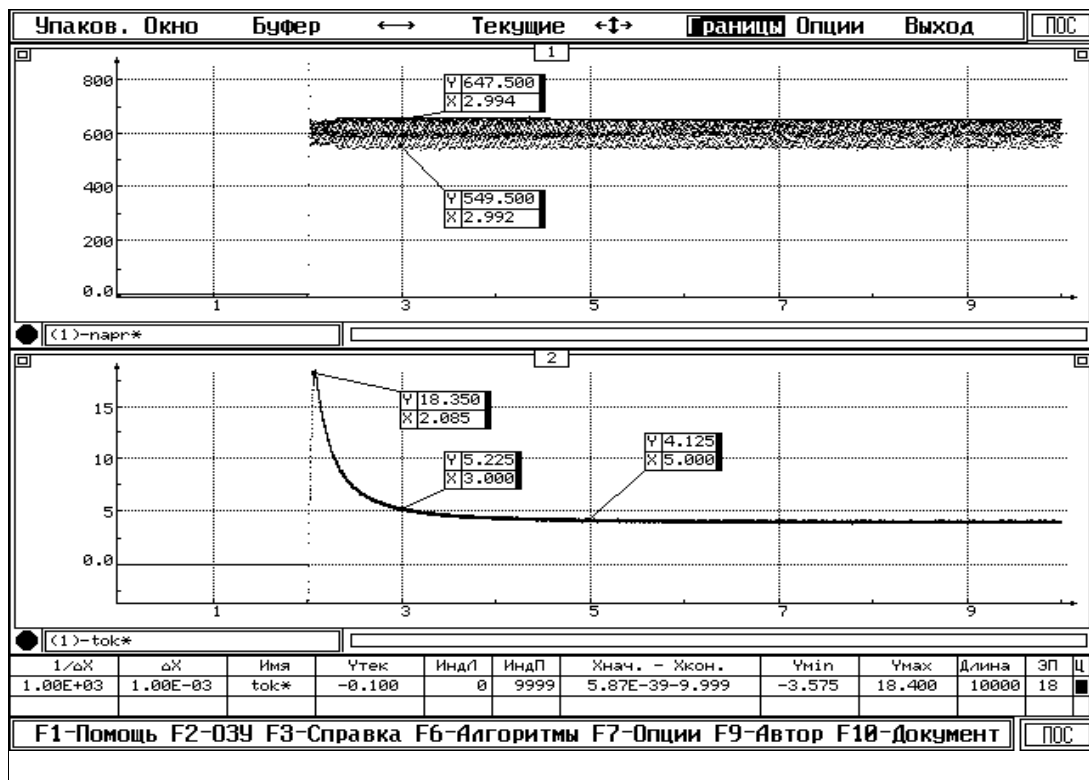


Рис. 2. Осцилограма файлу «Компр1»

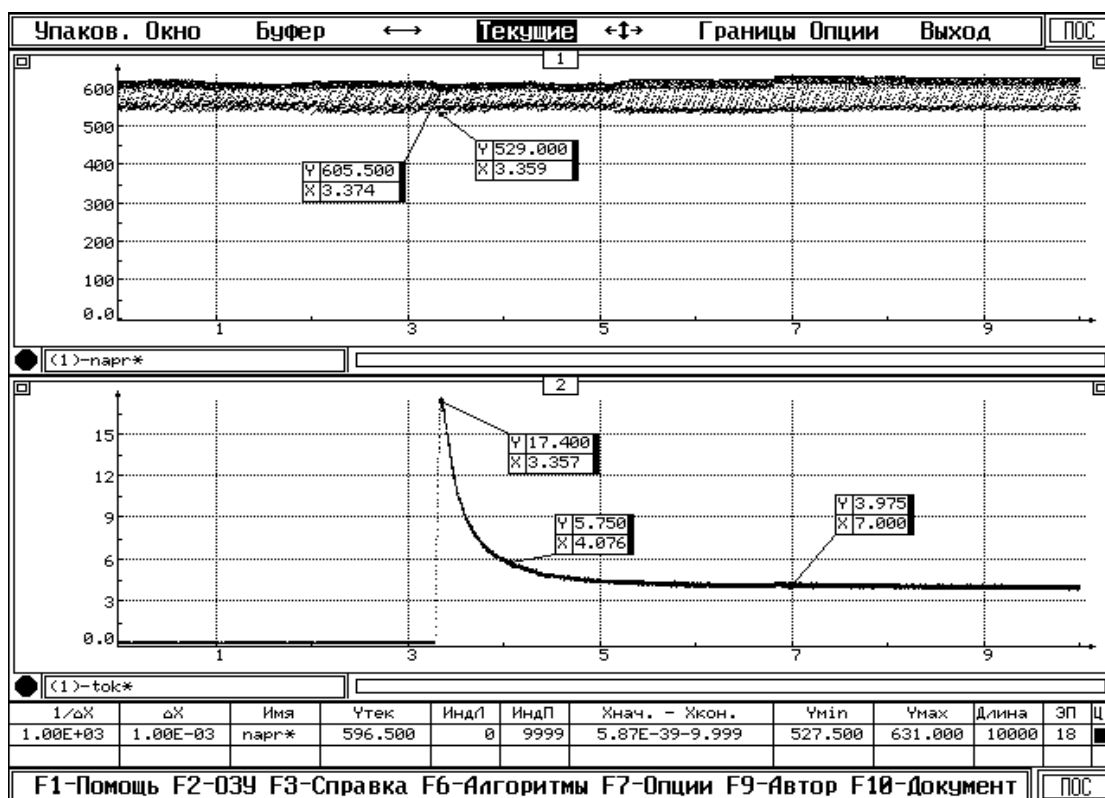


Рис. 3. Осцилограмма файла «Компр2»

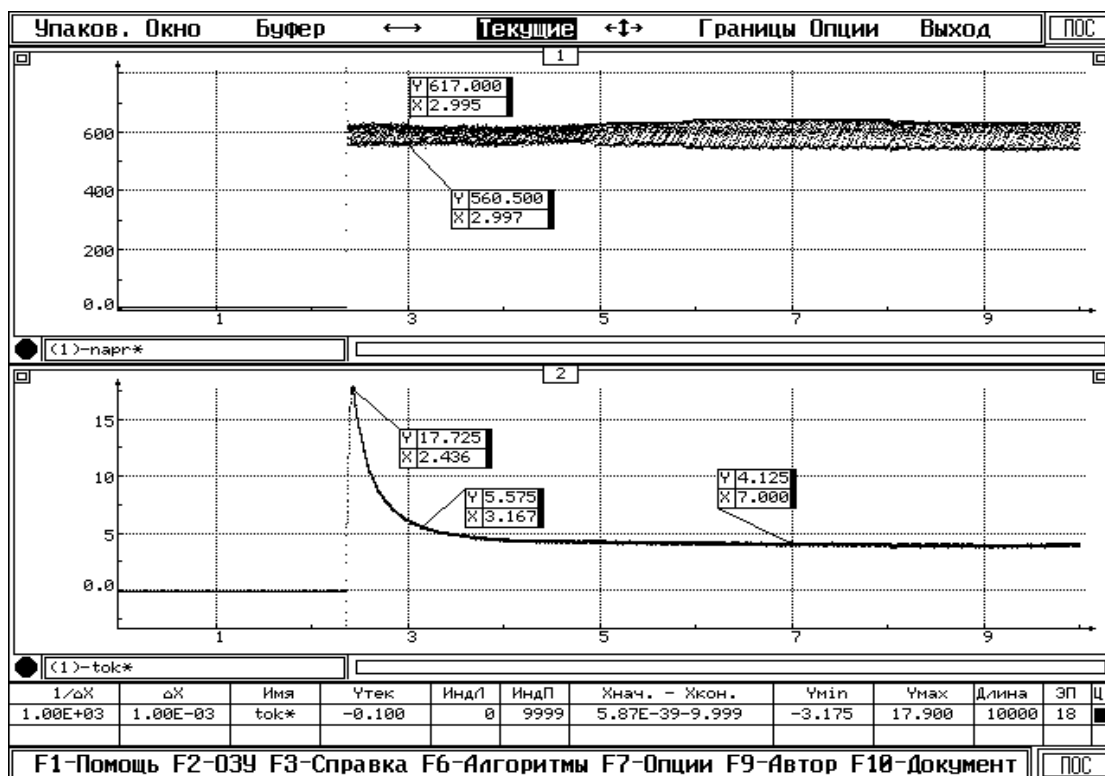


Рис. 4. Осцилограмма файла «Компр3»

Також визначено параметри перехідних процесів, що представлено в таблиці 1.

Таким чином, середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна компресора до сталого значення становить 4,12.

Середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна до номінального (6 А) дорівнює 2,97.

Середня тривалість перехідного процесу дорівнює 0,75 с.

Таблиця 1. Параметри перехідного процесу

Ім'я файлу	Максимальний кидок струму, А	Стале значення струму, А	Тривалість перехідного процесу, с	Відношення максимального струму до струму в усталеному режимі	Середнє значення напруги в контактній мережі, В
Компр1	18,35	5,0	0,82	3,67	598
Компр2	17,406	3,975	0,72	4,38	567
Компр3	17,775	4,125	0,731	4,31	589

Час роботи компресора незважаючи на стабільний діапазон тиску, обумовлений роботою автоматичного регулятора тиску в пневматичній системі (в межах 6,5 - 8 атм) залежить від багатьох факторів серед яких основними є:

- напруга контактної мережі;
- витрата повітря на забезпечення роботи пневматичної підвіски кузова, системи гальмування, пневмоприводів дверей.

За осцилограмами (рис. 4 - 7) зміни струму двигуна компресора при роботі тролейбуса в лінії протягом чотирьох періодів

(0-900 с; 900 – 1800 с; 1800 – 2700 с; 2700 – 3600 с) визначено:

- час роботи компресора при кожному його включенні;

- середню напругу в контактній мережі за час роботи компресора;

- потужність двигуна компресора.

Експериментальні дослідження здійснювалися на тролейбусі по маршруті № 7А на ділянці від метро Святошин до вул Чорнобильської м.Києва. Ділянка має рівнинний профіль, дорожнє покриття відповідає чинним нормативним документам. Рух на ділянці здійснювалося з відкриттям всіх дверей на зупинках і гальмуванні педаллю службового гальма.

Результати розрахунків наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Параметри роботи компресора при русі тролейбуса.

Порядковий номер включення компресора	Початок роботи компресора, с	Кінець роботи компресора, с	Тривалість роботи компресора, с	Середній струм двигуна компресора, А	Середня напруга в контактній мережі, В	Потужність двигуна компресора, Вт
1	270,937	309,75	<b>38,813</b>	3,85	594	<b>2286,90</b>
2	461,313	497,875	<b>36,562</b>	3,86	582	<b>2246,52</b>
3	660,962	694,234	<b>33,272</b>	3,89	682	<b>2652,98</b>
4	788,563	820,0	<b>31,437</b>	3,87	610	<b>2360,70</b>
5	999,562	1033,75	<b>34,188</b>	3,86	642	<b>2478,12</b>
6	1180,685	1212,125	<b>31,440</b>	3,87	646	<b>2500,02</b>
7	1302,812	1331,937	<b>29,125</b>	3,88	650	<b>2522,00</b>
8	1510,137	1542,25	<b>32,113</b>	3,87	652	<b>2523,24</b>
9	1650,375	1679,813	<b>29,438</b>	3,84	645	<b>2476,80</b>
10	2050,0	2088,375	<b>38,375</b>	3,59	616	<b>2211,44</b>
11	2217,75	2254,063	<b>36,313</b>	3,74	632	<b>2363,68</b>
12	2402	2431,313	<b>29,313</b>	3,81	634	<b>2415,54</b>
13	2552,563	2585,062	<b>32,499</b>	3,8	632	<b>2401,60</b>
14	2684,375	2713,25	<b>28,875</b>	3,8	649	<b>2466,20</b>
15	2883,187	2914,875	<b>31,688</b>	3,74	670	<b>2505,80</b>
16	3113,624	3150	<b>36,376</b>	3,71	592	<b>2196,32</b>
17	3367,937	3403,374	<b>35,437</b>	3,67	596	<b>2187,32</b>
Середнє значення			<b>33,251</b>			<b>2399,72</b>

Як видно з наведених даних (див. табл. 2) середній час роботи компресора становить 33,25 с. Фактична потужність двигуна компресора становить 2,4 кВт

Для визначення коефіцієнту  $k_i$  повторного ввімкнення (ПВ) компресора увесь час

реєстрації роботи компресора було розділено на 4 інтервали в кожному з яких розраховувались параметри ПВ за формулою:

$$k_i = \frac{\sum_{i=n}^{i=m} t_i}{t_k - t_n},$$

де  $k_i$  – коефіцієнт повторного включення компресора;

$t_i$  – тривалість роботи компресора при  $i$ -тім включенні;

$t_k$  – час початку інтервалу часу реєстрації;

$t_n$  – час кінця інтервалу часу реєстрації;

$n$  – номер першого включення компресора після відправлення з кінцевої зупинки;

$m$  – номер останнього включення компресору перед прибуттям на іншу кінцеву зупинку.

Результати розрахунку наведено в таблиці 3.

Таблиця 3. Визначення коефіцієнту повторного включення

Номер інтервалу реєстрації	Тривалість інтервалу реєстрації, с	Кількість включень компресора	Загальна тривалість роботи компресора, с	Коефіцієнт ПВ компресора, %
1	900	5	174,272	19,36
2	900	5	122,116	13,57
3	900	5	152,625	16,96
4	900	5	110,564	12,28
Середнє значення				15,54
Стандартне відхилення				3,2

На підставі виконаних розрахунків можна сказати, що коефіцієнт ПВ компресора в середньому буде становити 15,5 %, з відхиленням до 9,6 %.

Час роботи компресора визначається за осцилограмами представленими на рис. 5 – 8. Позначення на цих осцилограмах такі ж як для рис. 2 – 4.

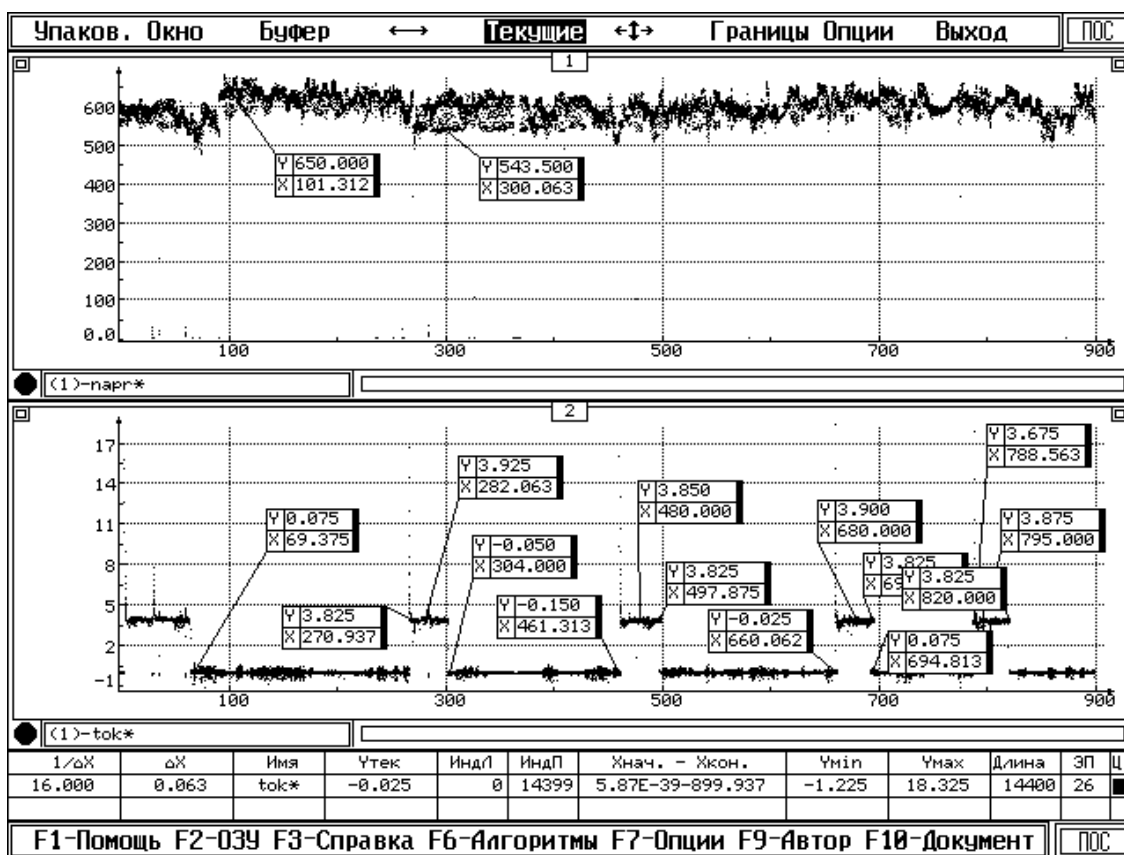


Рис. 5. Файл «компр4». Інтервал запису 0-900 с.

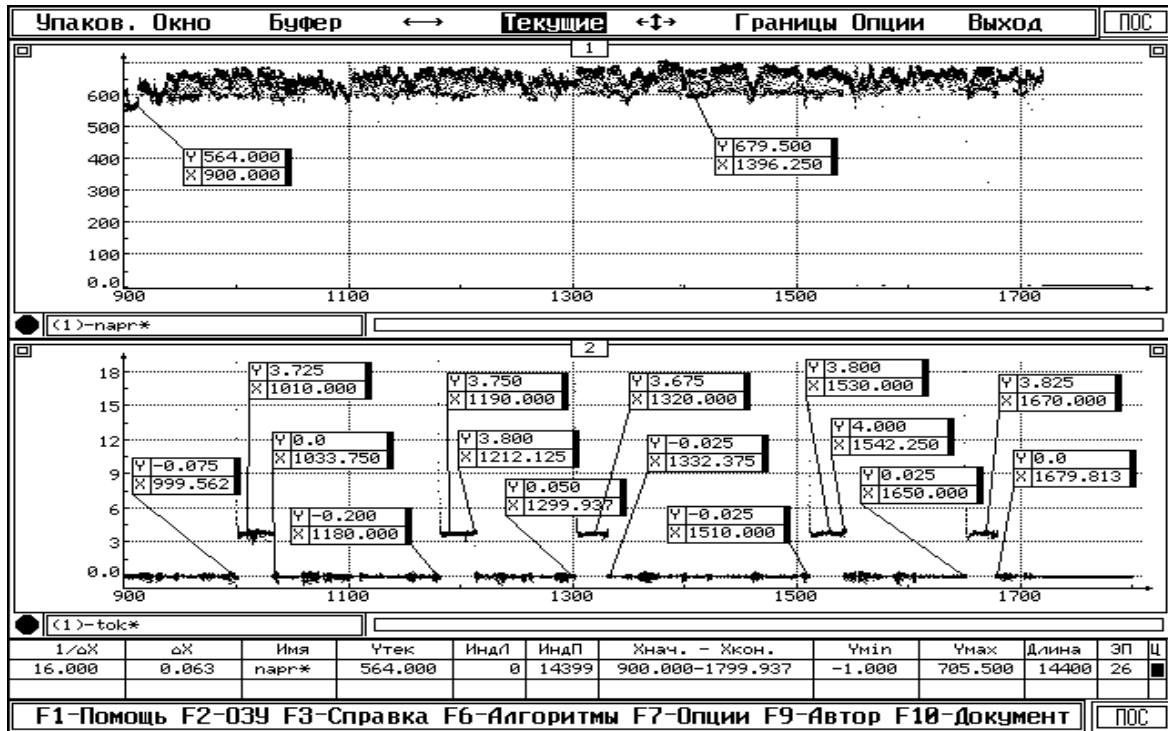


Рис. 6. Файл «компр4». Интервал запису 900-1800 с.

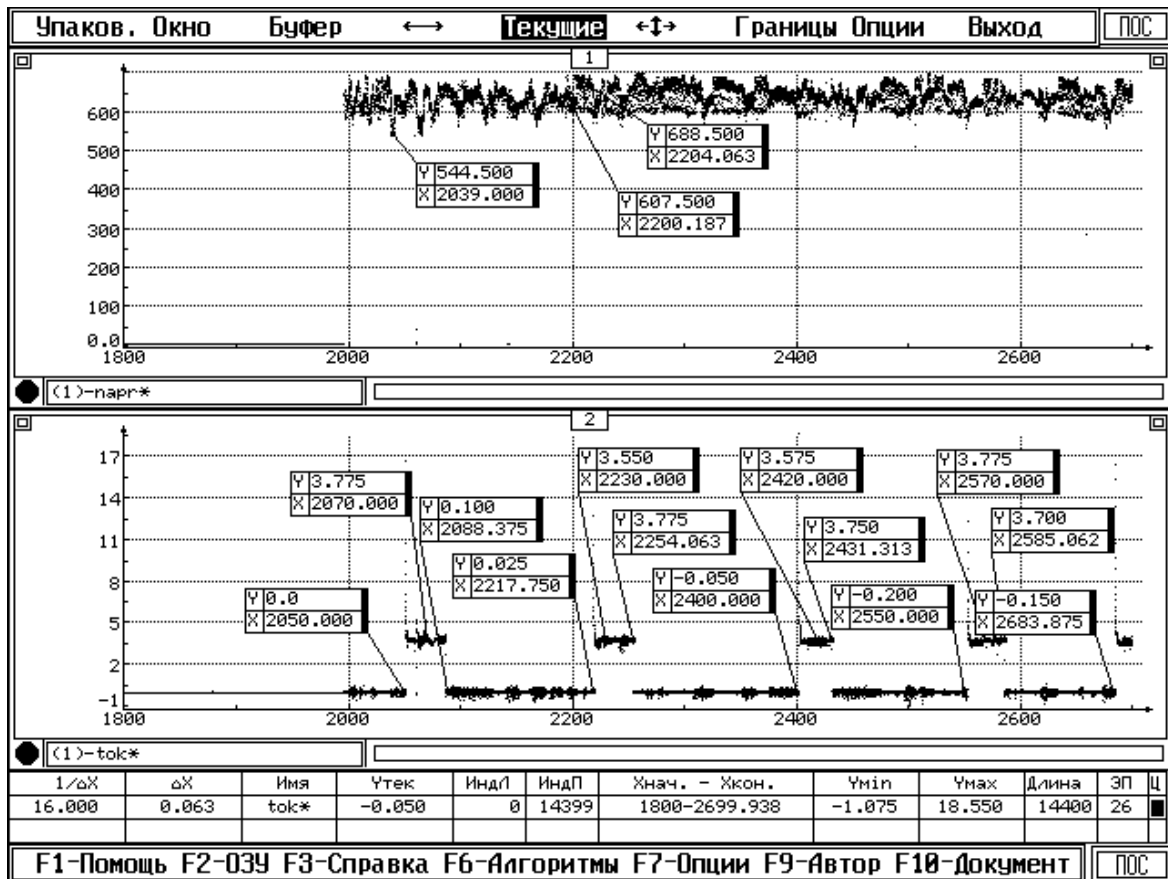


Рис. 7. Файл «компр4». Интервал запису 1800-2700 с

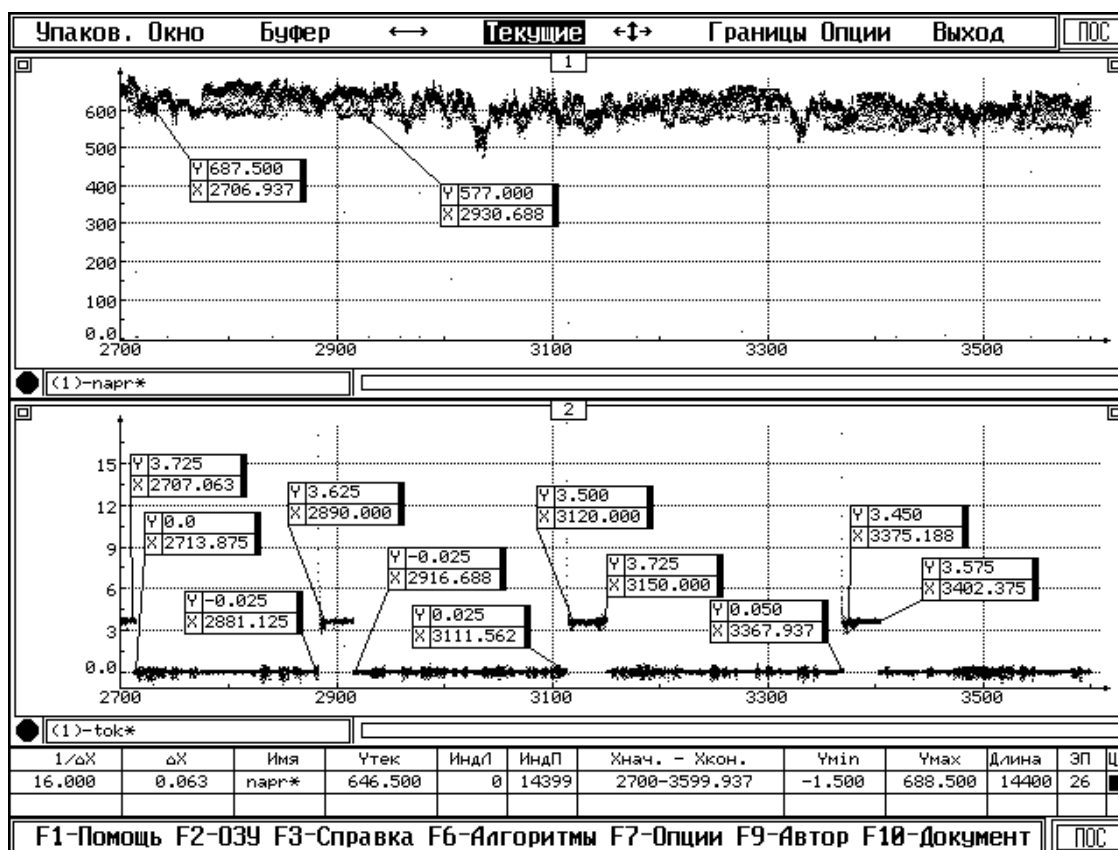


Рис. 8. Файл «компр4». Интервал запису 2700-3600 с

На підставі отриманих даних про споживану потужність, коефіцієнт ПВ електродвигуна компресора можна розрахувати кількість електричної енергії, що споживається електроприводом для забезпечення функціонування пневматичної системи тролейбуса за одну робочу зміну тривалістю 8 год. за формулою:

$$E = P_c \cdot k_{ic} \cdot 8,$$

де:  $E$  – кількість електроенергії, що спожита пневматичною системою;

$P_c$  – середня фактична потужність двигуна компресора, що знайдена за результатами розрахунків параметрів розподілу фактичної потужності;

$k_{ic}$  – середнє значення коефіцієнта повторного включення компресора.

Підставляючи фактичні дані за результатами випробувань одержимо:

$$E = 2,4 \cdot 0,156 \cdot 8 = 2,9 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Таким чином, для забезпечення функціонування пневматичних систем односекційних тролейбусів з пневматичною підвіскою, наприклад К 12.04, Т601 потрібно мати електропривод компресора

потужністю близько 3 кВт, при цьому споживання електроенергії протягом робочої зміни (8 год.) буде майже 3 кВт·год.

### Висновки

За результатами обробки даних експериментальних досліджень встановлено:

- середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна компресора до сталого значення становить 4,12;

- середнє відношення максимального значення пускового струму двигуна до номінального (6 А) дорівнює 2,97;

- середня тривалість перехідного процесу при включенні приводного двигуна дорівнює 0,75 с;

- фактична споживана потужність двигуна компресора становить 2,4 кВт;

- коефіцієнт повторного ввімкнення компресора в середньому буде становити 15,5 %;

- середня кількість електроенергії, що споживається електроприводом компресора пневматичної системи за зміну не буде перевищувати 2,9 кВт·год.

Застосований на тролейбусі типу К 12.04 електрокомпресор ЕКВЛ 03/ 8-13 має надлишкову потужність і продуктивність.

За наявності незначного завантаження компресора його ресурс роботи на троллейбусі та напрацювання на відмову повинні бути збільшені не менше ніж у 1,5 рази.

Для вирішення питання щодо оптимізації потужності компресора для зменшення витрат енергії треба розглядати з урахуванням обмежень щодо часу наповнення пневмосистеми, що визначені чинними нормативами, зокрема Правилами ЕЭК ООН № 13.

Для подальшого підвищення рівня енергоефективності допоміжних електроприводів рухомого складу електричного транспорту пропонується продовжити дослідження роботи електричних двигунів їх систем керування, компресорів, тощо, а також впроваджувати електронні системи контролю та керування, що зменшують втрати електроенергії особливо при пусках.

#### Література

1. Ковалко М.П., Денисюк С.П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. Київ, 1998. 506 с.
2. Будниченко В.Б. Критерии оценки потерь электроэнергии в конструкции подвижного состава. *Коммунальное хоз-во городов*. Київ, 2003. №23. С. 193-197.
3. Мамалыга В.М. Практически важные задачи сбережения энергии, потребляемой машинами и механизмами с электроприводом, и принцип достаточности. *Энергетика и электрификация*. 2000. №5. С. 40-44.
4. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б. Електромеханічні системи автоматичного керування та електропривод. Київ, 2005. 678 с.
5. Кривовяз В., Васильев П., Маевский В. Тяговый электропривод постоянного тока модернизированного трамвайного вагона «Татра-3Е». *Силовая электроника*. 2007. № 3. С. 36-38.
6. Zebardast A., Mokhtari H. Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving. *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. (Nanjing, 6-9 April 2008). Nanjing, 2008. P. 1–7.
7. Далека В. Х. Наукові основи ресурсозбереження при експлуатації міського електричного транспорту : автореф. дис. на здобуття д-ра техн. наук : 05.13.22. Київ, 2005. 40 с.
8. Далека В. Х., Будниченко В. Б., Карпушин Е. І., Коваленко В. І. Технічна експлуатація міського електричного транспорту. Харків, 2014. 236 с.
9. Бажинов О. В., Смирнов О. П., Серіков С. А., Гнатов А. В., Колесніков А. В. Гібридні автомобілі. Харків, 2008. 327 с.
10. Яцун М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і апаратів. Львів, 2010. 228 с.

#### Reference

1. Kovalko M. P., Denysiuk S.P. (1998) Energozberezhennya - priorytetnyj napryamok derzhavnoyi polityky` Ukrainy`. [Energy saving is a priority of Ukraine's state policy]. Kyiv. 506. [in Ukrainian].
2. Budnychenko V. B. (2003) Kriterii otsenki poter elektroenergii v konstruktsii podvizhnogo sostava. [Criteria for assessing energy losses in the design of rolling stock]. *Kommunalnoe hozyaystvo gorodov*. Kyiv. 23. 193-197. [in Russian].
3. Mamalyiga V. M. (2000) Prakticheski vazhnyie zadachi sberezeniya energii, potrebyaemoy mashinami i mehanizmami s elektroprivodom, i printsip dostatochnosti. [Practically important tasks of saving the energy consumed by machines and mechanisms with electric drive, and the principle of sufficiency]. *Energetika i elektrifikatsiya*. 5. 40-44. [in Russian].
4. Popovych M. H., Lozynskiy O. Yu., Klepikov V. B. (2005) Elektromexanichni sy`stemy` avtomaty`chnogo keruvannya ta elektropry`vod. [Electromechanical automatic control systems and electric drive]. Kyiv. 678. [in Ukrainian].
5. Kryvoviaz V., Vasylev P., Maevskiy V. (2007) Tyagovyy elektroprivod postoyannogo toka modernizirovannogo tramvaynogo vagona «Tatra-3E». [DC traction electric drive of the modernized Tatra-3E tram car]. *Silovaya elektronika*. 3. 36-38. [in Russian].
6. Zebardast A., Mokhtari H. (2008) Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving. *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. (Nanjing, 6-9 April 2008). Nanjing. 1–7.
7. Daleka V. Kh. (2005) Naukovi osnovy` resursozberezhennya pry` ekspluatatsiyi mis`kogo elektry`chnogo transportu. [Scientific bases of resource saving at operation of city electric transport]: avtoref. dy`s. na zdobuttya d-ra techn. na-uk : 05.13.22. Kyiv. 40. [in Ukrainian].
8. Daleka V. Kh., Budnychenko V. B., Karpushyn E. I., Kovalenko V. I. (2014) Texnichna ekspluatatsiya mis`kogo elektry`chnogo transportu. [Technical operation of urban electric transport]. Kharkiv. 236. [in Ukrainian].
9. Bazhynov O. V., Smyrnov O. P., Sierikov S. A., Hnatov A. V., Koliesnikov A. V. (2008) Gibridni avtomobili. [Hybrid cars]. Kharkiv. 327. [in Ukrainian].
10. Yatsun M. A. (2010) Ekspluatatsiya ta diagnostuvannya elektry`chny`x mashyn i



aparativ. [Operation and diagnostics of electrical machines and devices]. Lviv. 228. [in Ukrainian].

**Далека Василь Хомич**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. каф. електричного транспорту, тел. +38 0662518877, dalekavf@ukr.net,

**Будниченко Валерій Борисович**<sup>2</sup>, к.т.н., доц. член. кор. ТАУ, тел. +38 0667907727, budnjb@i.ua,

**Дзюбенко Олександр Андрійович**<sup>3</sup>, к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667684116, dzyubenko.alan@gmail.com

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

61002, Україна, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

<sup>2</sup>Національний транспортний університет, 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1.

<sup>3</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

#### Оценка энергетических показателей электропривода компрессора электрического транспорта

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования и предложения по повышению энергоэффективности электроприводов компрессоров подвижного состава электрического транспорта на основе измерения рабочих параметров электродвигателя и компрессора. Показана целесообразность решения вопросов ресурсосбережения при выборе вспомогательных электроприводов подвижного состава электрического транспорта.

**Ключевые слова:** электрический транспорт, компрессор, электропривод, энергоэффективность, контактная сеть, мощность.

**Далека Василий Фомич**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. каф. электрического транспорта, тел. +38 0662518877, dalekavf@ukr.net,

**Будниченко Валерий Борисович**<sup>2</sup>, к.т.н., доц. член. кор. ТАУ, тел. +38 0667907727, budnjb@i.ua,

**Дзюбенко Александр Андреевич**<sup>3</sup>, к.т.н., доц. каф. автомобильной электроники, тел. +38 0667684116, dzyubenko.alan@gmail.com

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. М. Бекетова

61002, Украина, г. Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17.

<sup>2</sup>Национальный транспортный университет, 01010, Украина, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленка, 1.

<sup>3</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

#### Evaluating energy indicators of electric vehicle compressor electric drive

**Abstract. Problem.** Solving the problem of resource conservation in Ukraine requires increasing the energy efficiency of all electricity consumers. This is especially true for electric drives, which consume more than 60% of electricity produced in the world. Since electric transport requires significant consumption of electricity, the issues of its rational use are quite relevant. **Goal.** Research of operation modes of city electric transport compressors electric drives and estimation of their energy efficiency is the aim of the work. **Methods** of experimental research of energy characteristics of the electric drive of the trolleybus compressor are used. **Results.** The article presents the results of the study and proposals for improving the energy efficiency of electric drives of electric vehicle compressors based on the measurement of operating parameters of the electric motor and compressor. The study of the trolleybus compressor traction drive shows the following: the average ratio of the maximum value of the compressor motor starting current to a constant value; the average ratio of the maximum value of the engine starting current to the nominal; the average duration of the transient - the power of the compressor engine at the start, the average amount of the electric power consumed by pneumatic system during a working change of a rolling stock on the route. **Originality.** The results of experiments proving the irrational use of electric drives of trolleybus rolling stock are obtained, and the ways of solving the problem are indicated. **Practical value.** The expediency of solving resource saving issues when choosing auxiliary electric drives of electric transport rolling stock is shown.

**Key words:** electric transport, compressor, electric drive, energy efficiency, catenary, power.

**Daleka Vasyl**<sup>1</sup>, Professor, Dr. Sc., Prof. Department of Electric Transport, tel. +38 0662518877, e-mail: dalekavf@ukr.net,

**Budnichenko Valery**<sup>2</sup>, Ph.D., Assoc. Prof., Member. cor. TAU, tel. +38 0667907727, e-mail: budnjb@i.ua,

**Dzyubenko Oleksandr**<sup>3</sup>, Ph.D., Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667684116, e-mail: dzyubenko.alan@gmail.com

<sup>1</sup>O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002.

<sup>2</sup>National Transport University. Street M. Omelyanovich-Pavlenko, 1, Kyiv, Ukraine, 01010

<sup>3</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002.