

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра Електротехніка та електромеханіка

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

А. М. Муха /А. М. Муха/

« 18 » 12 20 20 р.

### ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електромеханічні системи автоматизації та електропривод**

Тема **Енергетичні показники тягового електроприводу трамваїв в стохастичних режимах рекуперації**

Theme **Energy indicators of traction electric drive of trams in stochastic recovery modes**

Керівник дипломної роботи

проф. М. О. Костін М. О. Костін

Нормоконтролер

доц. О. О. Карзова О. О. Карзова

Студент групи ЕП1921

С. А. Баскаков С. А. Баскаков

Student

Baskakov Serhii

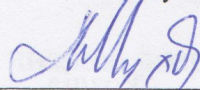
Дніпро – 2020



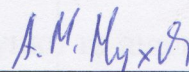
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Факультет Управління енергетичними процесами  
кафедра Електротехніка та електромеханіка  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри



(підпис)



(ПІБ)

« 18 » 12 2020 р.

### ЗАВДАННЯ

до дипломної магістерської роботи на здобуття ОКР магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студента групи ЕП1921

(номер групи)

Баскакова Сергія Анатолійовича

(ПІБ)

1. Тема дипломної роботи «Енергетичні показники тягового електроприводу трамваїв в стохастичних режимах рекуперації»

затверджена наказом по університету № 849 від « 12 » листопада 2020 р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи 04 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до дипломної роботи

- 1) технічні дані та схема силових кіл трамваїв Т-3;
- 2) технічні дані тягових двигунів трамваїв Т-3;
- 3) результати часового моніторингу рекуперованих напруги та струму при роботі трамваїв у м. Дніпро.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

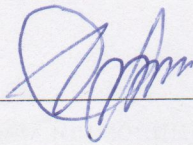

- 1) статистичні розрахунки напруги на струмоприймачі та рекуперативного струму трамваїв;
- 2) аналіз імовірнісних характеристик напруги і струму;
- 3) методи і чисельні розрахунки потужностей та енергетичних показників трамваїв;
- 4) теоретичні передумови визначення коефіцієнта корисної дії;
- 5) чисельна оцінка впливу стохастичної зміни напруги і струму на енергетичні показники трамваїв.

5. Перелік графічних робіт (з переліком обов'язкових креслень)



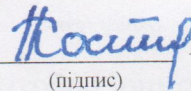
- 1) фото, технічні дані та «силова» схема трамвая Т-3 та його тягового двигуна;
- 2) часові залежності напруги і рекуперативного струму трамваїв.
- 3) імовірнісні характеристики  $U(t)$ ,  $I(t)$ ;
- 4) аналітичні вирази потужностей і енергетичних показників;
- 5) часові залежності і гістограми коефіцієнтів потужностей.

6.

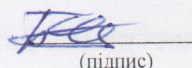
Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
			

Дата видачі завдання: «25» вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

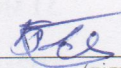
 Костін М. О.  
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

 Баскаков С. А.  
(підпис) (ПІБ)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу дипломної роботи	Термін виконання	Примітка
1	Вступ. Постановка задачі.	28.09.20	
2	Статистичні розрахунки $U(t)$ , $I(t)$ .	15.10.20	
3	Аналіз характеру зміни імовірнісних характеристик $U(t)$ , $I(t)$ .	31.10.20	
4	Розрахунки потужностей та енергетичних показників трамваїв.	12.11.20	
5	Адаптація методу, чисельна оцінка та аналіз енергетичних показників.	25.11.20	
6	Повна готовність роботи.	04.12.20	

Студент-дипломник  (підпис)

Керівник роботи  (підпис)

## РЕФЕРАТ

Дипломна магістерська робота на тему: «Енергетичні показники тягового електроприводу трамваїв в стохастичних режимах рекуперації» містить: 39 сторінок основного тексту, 4 таблиці, 13 рисунків, 36 літературних джерел, 1 додаток.

Мета роботи – розробка методів визначення, числові розрахунки та аналіз енергетичних характеристик і показників трамваїв в режимах рекуперації з урахуванням випадкового (стохастичного) характеру зміни рекуперованих напруги і струму.

В розділі 1 приведено схему силових кіл, технічні дані та сутність енергетичних показників трамваїв типу Т-3, що працюють в місті Дніпро.

У розділі 2 викладено способи моніторингу напруг і струмів, виконано їх статистичний аналіз, а також здійснено числові розрахунки імовірнісних характеристик рекуперованих напруги і струму.

У розділі 3 подано теоретичні основи та методи визначення коефіцієнта потужностей, коефіцієнта реактивної потужності та коефіцієнта корисної дії трамваїв типу Т-3 в різних режимах їх рекуперативного гальмування.

У розділі 4 представлена охорона праці та безпеки життєдіяльності у надзвичайних ситуаціях при роботі з електродвигунами.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** РЕКУПЕРАЦІЯ, ТРАМВАЙ, КОЕФІЦІЄНТИ ПОТУЖНОСТІ, НАПРУГА, СТРУМ, СТОХАСТИЧНИЙ ПРОЦЕС, ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ, ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОТУЖНОСТІ.

					0024.ДМР 20.02.ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		



## ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 Технічні характеристики та енергетичні показники електроприводу рекуперуючого трамваю	8
1.1 Схема силових кіл і технічні дані трамваїв типу Т-3	8
1.2 Тягові електродвигуни	11
1.3 Енергетичні характеристики та показники ЕРС	12
1.4 Сучасний стан розв'язуваної задачі	15
РОЗДІЛ 2 Характер зміни та імовірнісно-статистичний аналіз рекуперованих напруги та струму	18
2.1 Реєстрація та способи статистичної обробки стохастичних процесів рекуперованих напруги і струму	18
2.2 Імовірнісні характеристики рекуперованої напруги трамваїв типу Т-3	18
2.3 Імовірнісні характеристики рекуперованого струму трамваїв типу Т-3	21
РОЗДІЛ 3 Теоретичні передумови і методи визначення енергетичних характеристик і показників трамваїв в режимах їх рекуперації	25
3.1 Методи і чисельне визначення повної і реактивної потужностей	25
3.2 Енергетичні показники – коефіцієнти потужностей трамваю	29
3.3 Теоретичні передумови і чисельна оцінка коефіцієнта корисної дії трамваю	35
3.4 Заключний аналіз	38
РОЗДІЛ 4 Охорона праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	40
4.1 Правила безпеки під час обслуговування електродвигунів	40
4.2 Дія працівників у надзвичайних ситуаціях	42

					Енергетичні показники тягового електроприводу трамваїв в стохастичних режимах рекуперації			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Баскаков С. А.	<i>[Підпис]</i>					
Перевір.		Костін М. О.	<i>[Підпис]</i>	15.12			5	83
Н. Контр.		Карзова О. О.	<i>[Підпис]</i>	18.12				
Консультант								
Затверд.		Муха А. М.	<i>[Підпис]</i>	18.12	ДНУЗТ ім. ак. Лазаряна група ЕП1921			



## РОЗДІЛ 1

### ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РЕКУПЕРУЮЧИХ ТРАМВАЇВ

#### 1.1 Схема силових кіл і технічні дані трамваїв типу Т-3

На рис. 1.1 зображено чотиривісний трамвайний вагон [3].

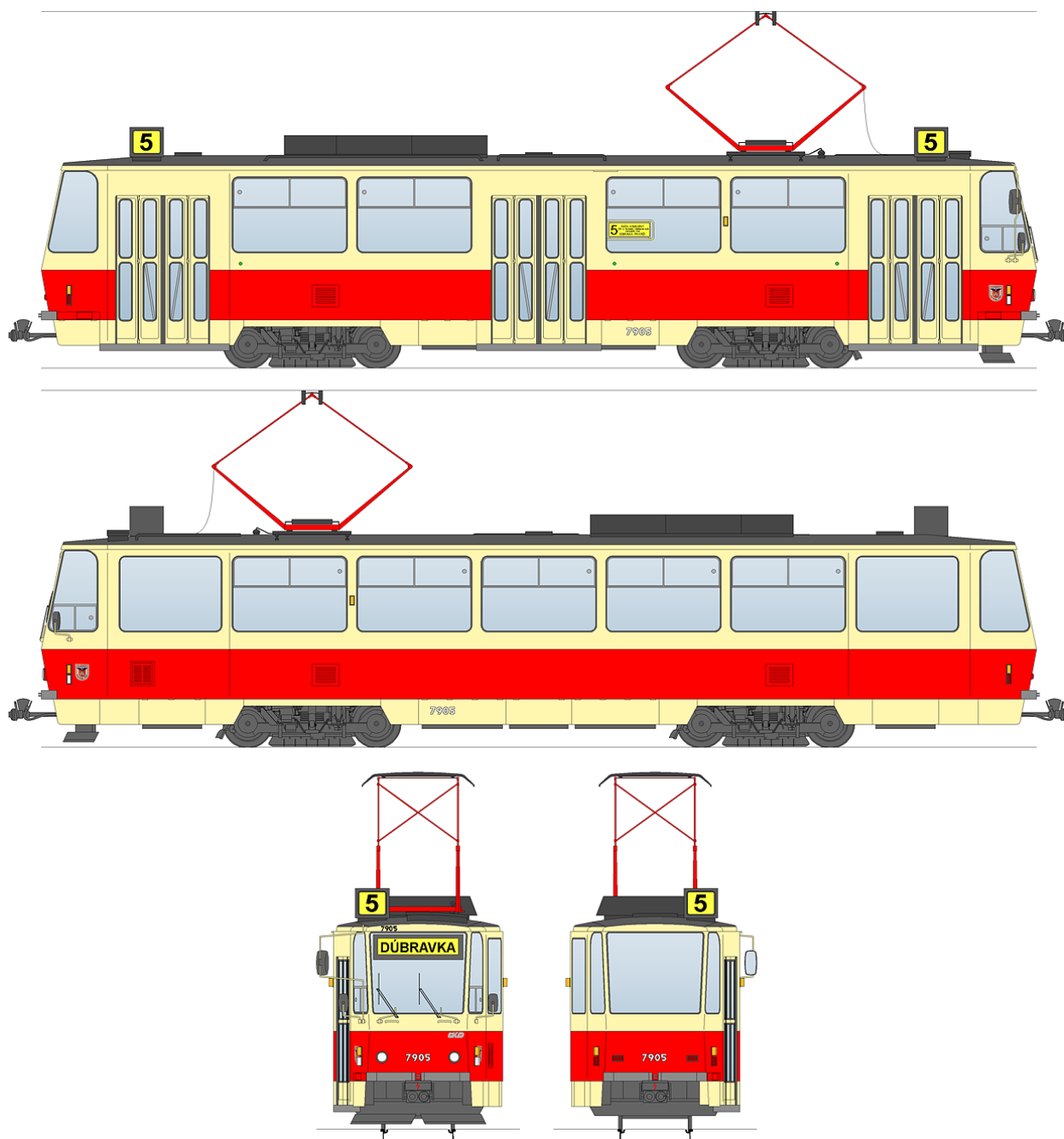


Рис. 1.1. Чотиривісний трамвайний вагон Т-3

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		8

На рис. 1.2 зображено схему силових електротягових кіл трамвая типу Т-3 [3].

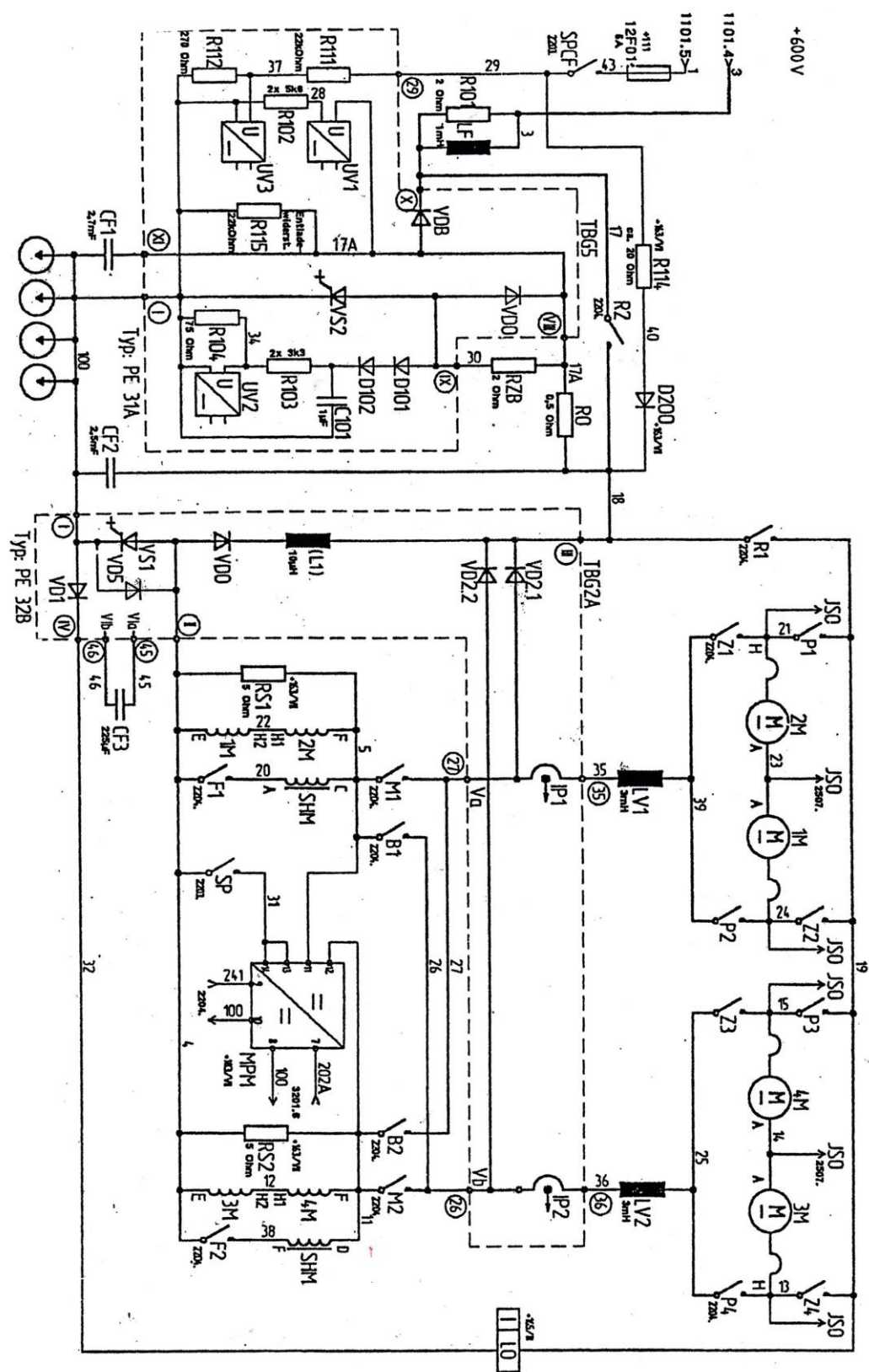


Рис. 1.2. Схема силових електротягових кіл трамвая типу Т-3

Таблиця 1– Технічні дані трамваїв типу Т-3 [3]

Показники	Характеристика вагону типу Т-3
Довжина вагонів за зчіпкою, мм	15104
Довжина кузова, мм	14000
Ширина кузова, мм	2500
Висота даху вагона над головою рейки, мм	3060
Висота від підлоги до стелі в проході, мм	2400
Ширина проходу між сидіннями, мм	1040
Ширина дверного отвору, мм	1300
База візка, мм	1900
База кузова, мм	6400
Діаметр колеса по колу катання, мм	700
Кількість тягових двигунів, шт.	4
Тип тягового двигуна,	ТЕ-022
Тривала потужність тягового двигуна, кВт	40
Загальне передатне число редуктора: з гіпоїдною передачею	1:7,43
з рівнинною передачею	1:7,36
з гірською передачею	1:9,36
Конструкційна швидкість вагону: при передаточному відношенні 1:7,36 і 1:7,43, км/год	72
при передаточному відношенні 1:9,36, км/год	57
Найбільше прискорення порожнього вагону, м/с <sup>2</sup>	1,8
Найбільше уповільнення порожнього вагону при службовому гальмуванні, м/с <sup>2</sup>	1,8
Середнє уповільнення порожнього вагону при екстреному гальмуванні, м/с <sup>2</sup>	2,3
Маса порожнього вагону, т	17



## 1.2 Тягові електродвигуни.

На рисунку 1.3 зображено креслення тягового електродвигуна типу ТЕ-022 [3].

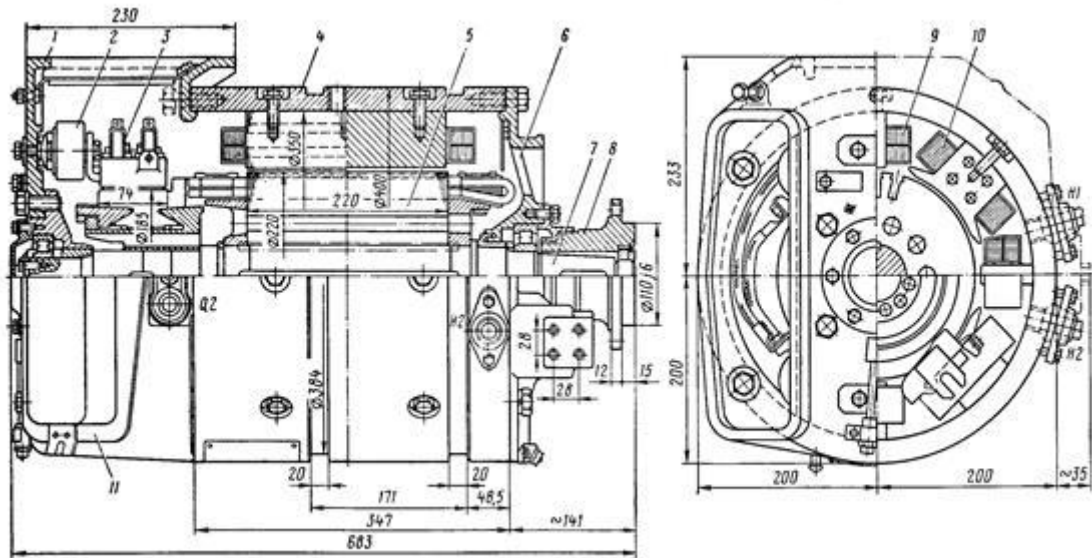


Рис. 1.3. Фото зовнішнього вигляду тягового електродвигуна типу ТЕ-022

Перетворення електричної енергії постійного струму в механічну роботу, необхідну для руху на вагонах Т-3, виконується чотирма тяговими двигунами ТЕ-022 з послідовним збудженням. Ці ж двигуни використовують для перетворення механічної енергії в електричну в режимі реостатного і рекуперативного гальмування.

Двигуни ТЕ-022 вагону Т-3 виконані з примусовою вентиляцією, що здійснюється вентиляторами двигун-генератора. Двигуни мають низьку підвіску (на відстані 110 мм від рівня рейки). Тому їх ізоляція може частіше піддаватись всьляким пошкодженням через потрапляння всередину остову води, снігу, пилу та інших частинок. Під час експлуатації найчастіше пошкоджується ізоляція обмоток додаткових полюсів і лобових частин обмоток якоря.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		11

Повітря, що всмоктується вентиляторами двигун-генератора, містить сніг, краплі дощу, пил, що також призводить до передчасного виходу з ладу ізоляції обмоток і викликає пошкодження колектора та щіткового механізму.

Таблиця 2– Технічні дані тягового двигуна TE-022 [3]

Годинний режим: потужність	45 кВт
Годинний режим: струм	150 А
Годинний режим: коефіцієнт корисної дії	91%
Годинний режим: частота обертів	1750 об/хв
Найбільша частота обертів	4200 об/хв
Номинальна напруга	300 В
Опір обмоток при $t=20^{\circ}\text{C}$ : якоря	0,0545 Ом
Опір обмоток при $t=20^{\circ}\text{C}$ : головних полюсів	0,026 Ом
Опір обмоток при $t=20^{\circ}\text{C}$ : додаткових полюсів	0,0245 Ом
Загальний опір двигуна	0,1050 Ом
Клас ізоляції обмоток	В
Електрична міцність ізоляції обмоток	600 В
Опір ізоляції обмоток по відношенню до корпусу для нагрітих обмоток не менш	0,64 МОм
Витрата охолоджуючого повітря	7,5 м <sup>3</sup> /хв
Маса двигуна	320 кг

### 1.3 Енергетичні характеристики та показники ЕРС

Існуюча на сьогоднішній день і яку найчастіше застосовують, в тому числі і в електричних колах систем тяги, традиційна класична система критеріїв ефективності електроенергетичних процесів включає в себе наступні показники якості енергопроцесів [4, 5]: коефіцієнт зсуву фаз основної гармоніки струму відносно основної гармоніки напруги ( $\cos \varphi_{(1)}$ ); коефіцієнт несиметрії навантаження по фазах ( $K_{\text{НС}}$ ); Коефіцієнт нерівномірності споживання електроенергії ( $K_{\text{НР}}$ ). Ці коефіцієнти, як

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		



енергетичні показники, базуються на співвідношеннях відповідних потужностей (енергетичних характеристиках): активній  $P$ , реактивній  $Q_{(1)}$ , спотворення  $D$ , несиметрії  $H_C$ , нерівномірності  $H_P$  та повній  $S$  [4]. Зазначені коефіцієнти визначаються через ці потужності, як складові повної потужності  $S$ , таким чином [4, 5]:

$$\cos \varphi_{(1)} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2}}, \quad (1)$$

$$\nu = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2}}{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2 + D^2}}, \quad (2)$$

$$K_{HC} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2 + D^2}}{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2 + D^2 + H_C^2}}, \quad (3)$$

$$K_{HP} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2 + D^2 + H_C^2}}{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2 + D^2 + H_C^2 + H_P^2}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2 + D^2 + H_C^2}}{S}. \quad (4)$$

Загальним показником в цій системі являється коефіцієнт потужності (пристрою, системи або просто кола)  $\lambda$ , який об'єднує всі локальні коефіцієнти (1)-(4) за виразом [4, 5]:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi_{(1)} \nu K_{HC} K_{HP}. \quad (5)$$

Слід зауважити, що коефіцієнт  $\cos \varphi_{(1)}$  не завжди являється достатньо очевидним енергетичним показником (для кіл і режимів, у яких потужності  $D = 0, H_C = 0, H_P = 0$ ) і тому в останні 5...8 років в тяговому електропостачанні, подібно промисловому, в якості звітної величини використовують коефіцієнт реактивної потужності  $\operatorname{tg} \varphi_{(1)} = \frac{Q_{(1)}}{P}$ , який є більш енергетичним показником. Дійсно, наприклад, при  $\cos \varphi_{(1)} = 0,95$  величина  $\operatorname{tg} \varphi_{(1)} = 0,33$ . Тобто, хоча  $\cos \varphi_{(1)}$  близький до 1, але споживана реактивна потужність  $Q_{(1)}$  складає майже 1/3 від активної, тобто порівняно велика.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дат		

Тобто, коректність саме вимірювання обох величин набуває основного значення і тому найбільш правильний шлях їх визначення – розрахунковий.

Викладена вище класична система енергетичних показників (критеріїв ефективності) базується на гармонійному підході і тому, по-перше, може призвести до невизначеності та ускладнень при характеристиці потоків енергії, коли вже треба оперувати з інтегралами функцій енергії. По-друге, вона володіє негативними сторонами [6], зокрема, мають місце ускладнення при необхідності диференціювання оцінок ефективності за видами відхилень стану систем напруг і струмів від нормованих значень. Це пов'язано з тим, що зазначені показники не являються незалежними з точки зору впливу на них таких енергетичних характеристик як потужності  $P, Q, D, H_p$ . Наприклад, при вмиканні ємності до нелінійного навантаження (у разі необхідності компенсації) змінюються усі показники (1)-(4), а не лише  $\cos\varphi_{(1)}$ . Далі, в системі критеріїв (1)-(5) важко ввести вагові коефіцієнти, які б врахували збитки від кожного фактора неякісності електричної енергії, оскільки ці показники локальні і вони входять в загальний показник  $\lambda$  мультиплікативно. Із цього випливає неоднозначність розв'язання проблеми оцінки ефективності процесів передачі, споживання і перетворення електроенергії. Тому в багатьох роботах систему (1)-(5) пропонується доповнювати іншими критеріями ефективності, яку б у першу чергу оцінювали коректність поняття реактивної потужності в колах несинусоїдних напруг і струмів.

Розглянуті вище показники змістовно тісно пов'язані з ПЯЕ (показники якості електроенергії) згідно ГОСТ13109-97 [31] і тому в якості критеріїв нерідко обмежуються цими ПЯЕ. Однак останні, по-перше, вони «безликі» відносні величини і не відображають економічної сторони протікання енергетичних процесів, зокрема втрат електроенергії. По-друге, вони нормалізують лише зміни напруги. І, нарешті, ПЯЕ не є обов'язковими між енергопостачальною організацією і споживачем.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		



Найбільш важливим показником ефективності енергопроцесів електропостачання і електроспоживання в СЕТ можуть служити втрати активної електроенергії в трамваї і, як результат, його коефіцієнт корисної дії.

Отже, підсумовуючи, треба зазначити таке. Основними енергетичними показниками будь-якої одиниці електричного транспорту є коефіцієнт потужності  $\lambda$ , коефіцієнт реактивної потужності  $\operatorname{tg}\varphi$  і коефіцієнт корисної дії  $\eta$  [4, 5]. В класичному розумінні стосовно до ЕРС коефіцієнт потужності, по-перше, визначає ступінь використання в ЕРС повної потужності  $S$ , підведеної до нього від контактної мережі. По-друге, величина  $\lambda$  також характеризує втрати активної потужності в силових колах ЕРС і тягової мережі. В той же час, ефективність роботи ЕРС з точки зору економічності або витрат електроенергії визначається величиною к.к.д., яка характеризує величину енергії  $\Delta W$ , втрачену у результаті недосконалого перетворювача енергії або режиму його роботи. Як відомо, в загальному випадку к.к.д. визначають як відношення виконуваної корисної роботи до затраченої активної енергії джерела.

#### 1.4 Сучасний стан розв'язуваної задачі

В останні 10-15 років суттєво збільшилась кількість наукових публікацій з аналізу існуючого стану процесу РГ та розробки різних способів отримання, аналізу якості та більш корисного використання енергії рекуперації трамваїв. Особливо це спостерігається в країнах Європи (нажаль, окрім України), що обумовлено необхідністю підвищення енергоефективності систем міського електричного транспорту шляхом розробки бортових систем накопичення, аналізу характеристик використання енергії рекуперації.

Найбільш ґрунтовні дослідження з розглядуваної проблеми виконано в Німеччині [7, 8]. Фірмою Bombardier докладно проаналізована робота системи рекуперації, що розташована на дахах 19 трамваїв міста

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дат		

Гейдельберга. Система накопичує до 3кВт год, які використовуються при пуску трамваїв. Ця ж фірма на основі швидкісного трамваю в місті Аутебург і в дослідницькому центрі міста Манггейм виконала роботи по порівняльному аналізу передачі та якості енергії рекуперації [9].

В [10] розроблено концепцію підвищення енергетичної ефективності і керованості процесу РГ трамваїв за двома критеріями: більш широке використання надлишку енергії рекуперації та зменшення втрат при її передачі .

В місті Женева (Швейцарія) з 2011 року функціонують 32 трамвайних склади моделі «Tango», на яких виконується дослідна експлуатація процесів накопичення та аналіз якості надлишкової енергії рекуперації [11].

Згідно [12], в м. Парижі на лінії швидкісного трамваю типу Alstom Citadis пройшли випробування на максимальну енергетичну ефективність процесів рекуперації системи «Steem».

Методика аналізу вибору технічних рішень по збільшенню енергетичної ефективності систем рекуперації на трамвайному ЕРС викладена в [13].

В [14] оцінено вплив параметрів системи електропостачання (напруги, опорів тощо) на характеристики енергії рекуперації в трамвайній тязі.

В проаналізованих вище публікаціях задача визначення потужностей рекуперації, у тому числі і реактивної, розв'язується лише для детермінованих напруг і струмів рекуперації. У певній мірі цей недолік виправлено в роботі [15], в якій приведено по одній реалізації випадкових процесів напруги і струму рекуперації і розраховану величину миттєвої потужності. Однак в цій роботі, по-перше, оцінка енергоспоживання виконана для трамваїв з асинхронним приводом (в Україні маємо привод постійного струму). По-друге, не визначались складові повної (а, отже, і реактивної) потужності та енергетичні коефіцієнти.

Найбільш докладно задача оцінки складових повної потужності в електричних колах з випадковими процесами напруг і струмів досліджена в

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		



роботах вітчизняних дослідників [16, 17]. Однак, запропоновані в цих роботах методи застосовані лише для режимів електричної тяги електровозів та електропоїздів.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

## РОЗДІЛ 2

### ХАРАКТЕР ЗМІНИ ТА ІМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕКУПЕРОВАНИХ НАПРУГИ І СТРУМУ

#### 2.1 Реєстрація та способи статистичної обробки стохастичних процесів рекуперованих напруги і струму.

Необхідні для розрахунку енергетичних показників реєстрограми стохастичних процесів напруги на струмоприймачі  $U(t)$  і струму  $I(t)$  були запозичені із робіт проф. М. О. Костіна та його аспірантів, які виконали докладні експериментальні дослідження процесів руху трамвайних вагонів типу ТЗД, Т4Д на діючих ділянках маршрутів №11 і №17 міста Дніпро [18, 19]. Автори використали отримані реєстрограми лише для аналізу режимів тяги, наші ж дослідження стосуються режимів рекуперації.

Для отримання необхідних статистичних сукупностей значень рекуперованих напруги і струму кожному з їх реалізацій в цій роботі квантували з часовим інтервалом  $\Delta t$ , який отримували за формулою Котельникова [20]:

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega_b}, \quad (6)$$

де  $\omega_b$  – максимальна частота спектру напруги чи струму,  
або за рекомендацією роботи [21]:

$$\Delta t = \frac{T_{\min}}{5 \dots 10}, \quad (7)$$

де  $T_{\min}$  – період відповідно високих складових  $U(t)$  чи  $I(t)$ .

При побудові графічних залежностей кореляційних функцій напруги і струму поточний зсув часу (часу затримки), за яким розраховувалися кореляційні функції процесів, вибирали в діапазоні  $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$ , де  $\tau_{\max}$  вибрали рівним  $\tau_k$  – часу кореляції кореляційних функцій.

#### 2.2 Імовірнісні характеристики рекуперованої напруги трамваїв типу Т-3

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

Шляхом квантування реєстрограм рекуперованої напруги отримали статистичну (сукупність) вибірку випадкової величини  $U$ . Потрібно виконати статистичний аналіз, тобто встановити закономірності зміни цієї випадкової величини. А як відомо [21, 22], ці закономірності характеризуються законом розподілення та числовими характеристиками випадкових величин. Отже, потрібно визначити математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт асиметрії, ексцес.

Статистична сукупність рекуперованої напруги має вигляд (В):

754 , 729, 603, 801, 858, 827, 838, 816, 637, 656, 636, 656, 639, 797, 645, 830, 830, 865, 845, 807, 801, 802, 741, 781, 829, 668, 623, 646, 635, 722, 645, 649, 638, 839, 805, 763, 667, 808, 796, 839, 810, 828, 707, 834, 821, 826, 854, 821, 816, 847, 835, 810, 670, 822, 784, 719, 720, 698.

Розділяємо увесь масив цієї сукупності на інтервали. Для цього із сукупності візуально знаходимо найбільше і найменше значення.

Найменше значення напруги:  $U_{\min} = 603$  В;

Найбільше значення напруги:  $U_{\max} = 865$  В.

За цими даними визначаємо довжину інтервалу зміни випадкової величин напруги :

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{1 + 3,2 \log(58)} = 39,44 \text{ В}$$

Визначаємо межі інтервалів зміни  $U$  і записуємо їх у табл. 3. Перший інтервал буде мати такі значення (ліву та праву):  $U_{\min} \dots U_{\min} + \Delta U$

Таблиця 3

№	Межі інтервалів $U_i - U_{i+1}$ , В	Розрахунок частот в інтервалах, $m$	Частість в інтервалі, $p_i = m_i/n$
1	603 – 642,44	7	0,12
2	642,44 – 681,88	9	0,155
3	681,88 – 721,32	4	0,069
4	721,32 – 760,76	4	0,069



Продовж. табл. 3

5	760,76 – 800,2	5	0,086
6	800,2 – 839,64	24	0,414
7	839,64 – 879,08	5	0,086

Будуємо статистичне розподілення досліджуваної випадкової величини, тобто будуємо гістограму. По вісі абсцис відкладаємо значення інтервалів, а по вісі ординат відкладаємо значення частоти.

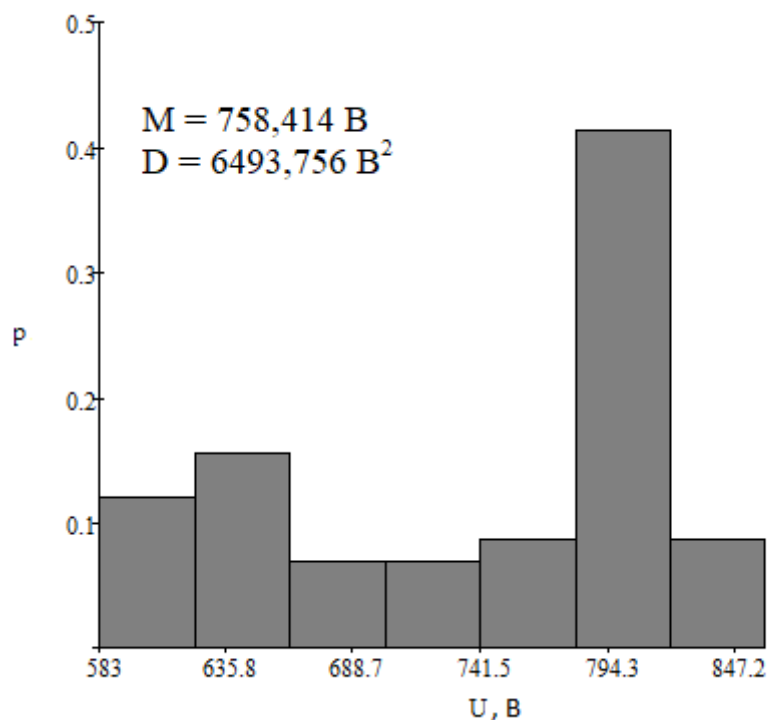


Рис. 2.1. Статистичне розподілення  $U$

Примітка: на цій гістограмі і далі під «М» і «D» розуміється відповідно математичне очікування і дисперсія відповідної випадкової величини.

Визначаємо числові характеристики заданої нормальної сукупності, тобто математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт асиметрії, ексцес.

Математичне очікування:

$$m_u = \frac{\sum_{i=1}^{58} U_i}{58} = 758,414 \text{ В.}$$

Дисперсія:

$$D_u = \frac{\sum_{i=1}^{58} (U_i - m_u)^2}{57} = 6493,756 \text{ В}^2.$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_U = \sqrt{D_u} = 80,584 \text{ В.}$$

Коефіцієнт асиметрії:

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^{58} (U_i - m_u)^3}{58 \cdot \sigma_U^3} = -0,485.$$

Ексцес:

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^{58} (U_i - m_u)^4}{58 \cdot \sigma_U^4} - 3 = -1,379.$$

### 2.3 Імовірнісні характеристики рекуперованого струму трамваїв типу Т-3

За методикою п. 2.2 була отримана статистична вибірка випадкової величини струму. Потрібно виконати статистичний аналіз, тобто встановити закономірності зміни цієї випадкової величини. Отже, потрібно визначити математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт асиметрії, ексцес.

Сукупність рекуперованого струму (А):

187, 141, 224, 203, 148, 147, 152, 169, 146, 127, 144, 167, 160, 132, 148, 151, 180, 140, 143, 162, 138, 199, 169, 143, 174, 146, 142, 175, 259, 239, 180, 146, 173, 157, 115, 224, 238, 167, 169, 159, 157, 188, 291, 135, 166, 135, 287, 150, 151, 150, 157, 168, 160, 158, 135, 227, 182, 142.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

Розділяємо увесь масив сукупності на інтервали. Для цього із сукупності візуально знаходимо найбільше і найменше значення.

Найменше значення струму:  $I_{\min} = 115 \text{ A}$ ;

найбільше значення струму:  $I_{\max} = 291 \text{ A}$ .

За цими даними визначаємо довжину інтервалу зміни випадкової величин за формулою:

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{1 + 3,2 \log(58)} = 26,494 \text{ A}.$$

Визначаємо межі інтервалів зміни  $I$  і записуємо їх у табл. 4. Перший інтервал буде мати такі значення (ліву та праву):  $I_{\min} \dots I_{\min} + \Delta I$ .

Таблиця 4.

№	Межі інтервалів $I_i - I_{i+1}$ , А	Розрахунок частот в інтервалах, $m$	Частість в інтервалі, $p_i = m_i/n$
1	115 – 141,49	9	0,155
2	141,49 – 167,99	28	0,483
3	167,99 – 194,48	11	0,19
4	194,48 – 220,98	2	0,034
5	220,98 – 247,47	5	0,086
6	247,47 – 273,964	1	0,017
7	273,964 – 300,458	2	0,034

Будуємо статистичне розподілення досліджуваної випадкової величини, тобто будуємо гістограму. По вісі абсцис відкладаємо значення інтервалів, а по вісі ординат відкладаємо значення частоті.



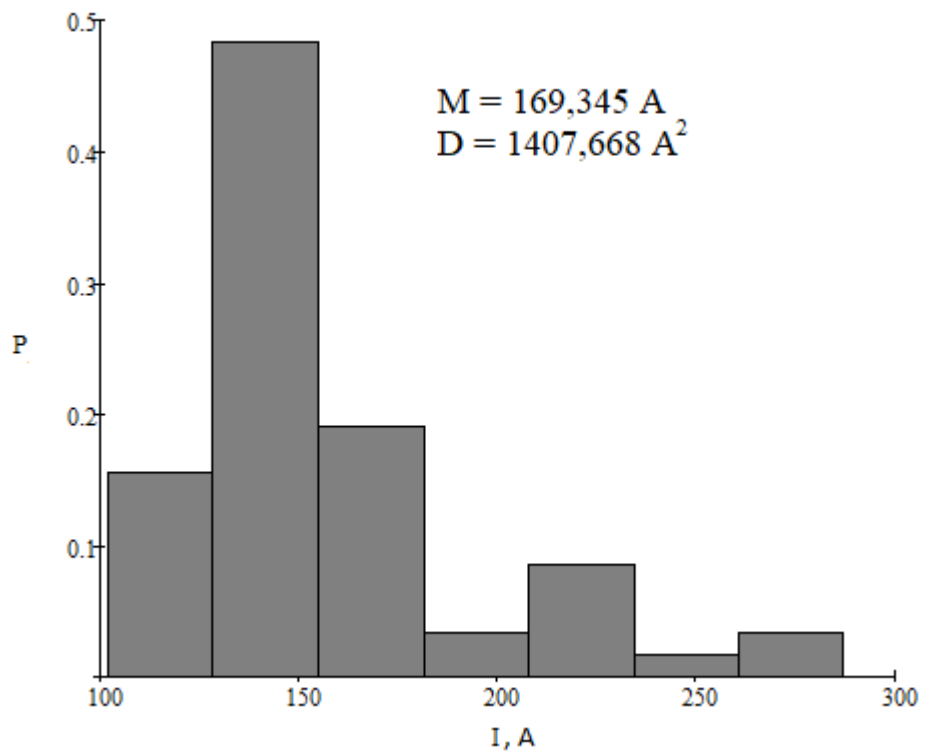


Рис. 2.2. Статистичне розподілення  $I$

Визначаємо числові характеристики заданої нормальної сукупності, тобто математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт асиметрії, ексцес.

Математичне очікування:

$$m_1 = \frac{\sum_{i=1}^{58} I_i}{58} = 169,345 \text{ A.}$$

Дисперсія:

$$D_1 = \frac{\sum_{i=1}^{58} (I_i - m_1)^2}{57} = 1407,668 \text{ A}^2.$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_1 = \sqrt{D_1} = 37,519 \text{ A.}$$

Коефіцієнт асиметрії:

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^{58} (I_i - m_1)^3}{58 \cdot \sigma_1^3} = 1,54.$$

Ексцес:

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^{58} (I_i - m_1)^4}{58 \cdot \sigma_1^4} - 3 = 2,024.$$

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

## РОЗДІЛ 3

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ І МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОКАЗНИКІВ ТРАМВАЇВ В РЕЖИМАХ ЇХ РЕКУПЕРАЦІЇ

#### 3.1 Методи і чисельне визначення повної і реактивної потужностей

В п. 1.3 цієї роботи було встановлено, що основними енергетичними показниками є: коефіцієнт корисної дії  $\eta$ , коефіцієнт потужності  $\lambda$  та коефіцієнт реактивної потужності. При цьому величину  $\eta$ , як відомо, визначають як відношення корисної (вихідної) активної потужності  $P_2$  до підведеної (вхідної) активної потужності  $P_1$  (рис. 3.1) [16].

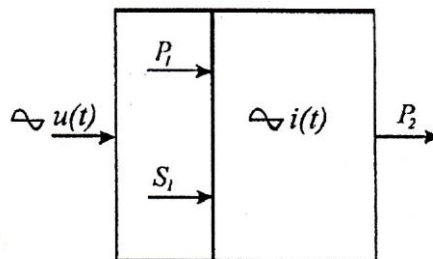


Рис. 3.1. Нелінійна динамічна електротехнічна система з випадковими функціями напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$ .

Коефіцієнт потужності, згідно ДСТУ 2843-94 і ДСТУ 3120-95 [4, 16], для електричних кіл з несинусоїдними електричними величинами визначають як відношення активної потужності  $P_1$ , що споживається в певному режимі, до її повної потужності  $S_1$

$$\lambda = \frac{P_1}{S_1}.$$

Отже, для визначення шуканих енергетичних показників потрібно спочатку отримати величини активної, реактивної і повної потужностей досліджуваної системи, у нашій задачі це трамваю. Однак зазначені величини є інтегральними характеристиками енергетичного процесу в системі з несинусоїдними, тим більш з випадковими  $u(t)$  та  $i(t)$ , і їх застосування не дозволяє достатньо точно здійснювати оптимальне енергорегулювання



системи. І в той же час в класичній теоретичній електротехніці невідомі не тільки розрахункові вирази, а навіть не обговорюються підходи до визначення зазначених вище потужностей в системах зі стохастичними енергетичними процесами. Тому для розв'язання цієї задачі скористаємося підходом, запропонованим в роботі [16], з подальшим його доопрацюванням для умов режимів рекуперації, оскільки в роботі [16] розглядався лише режим тяги електрорухомого складу.

Із основ електротехніки відомо, що найбільш повну інформацію про енергетичні процеси в колах з випадковою напругою та струмом містить миттєва потужність  $p(t)$ :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (1)$$

реалізацію якої вважають детермінованою функцією. Сімейство таких реалізацій являє собою стохастичний процес миттєвої потужності. Інтегральною характеристикою миттєвої потужності є активна потужність  $P$ , яку визначають як середнє за період  $T$  значення миттєвої потужності:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad (2)$$

а в колах з несинусоїдними електричними величинами – як сума активних потужностей усіх гармонік рядів Фур'є функцій  $u(t)$  та  $i(t)$ :

$$P = \sum_{k=0}^s U^{(K)} \cdot I^{(K)} \cdot \cos \varphi^{(K)}. \quad (3)$$

Активна потужність  $P$  безвідносно до вигляду реалізацій  $u(t)$  та  $i(t)$  і типу електричного кола служить характеристикою дисипативних процесів. Однак в розглядуваних колах стохастичних електричних величин мають місце також консервативні процеси (коли енергія не перетворюється в інші види), в результаті чого активна потужність  $P$  не досягає свого максимального значення, але збільшується потужність джерела електроенергії. Цю потужність, що необхідна для отримання заданої активної потужності і яка характеризує енергоємність системи, називають повною, і в колах несинусоїдного струму вона знаходиться за відомою формулою:

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

$$S = U \cdot I, \quad (4)$$

де  $U$  та  $I$  – діючі значення несинусоїдних величин  $u(t)$  та  $i(t)$ .

Формула (4) є універсальною, бо діючі значення напруги і струму можуть визначатись через їх миттєві значення, а не лише через гармоніки рядів Фур'є.

Для значної більшості систем і режимів їх роботи чисельно  $S > P$  і тому існує ще одна складова повної потужності, яку в загальному випадку називають неактивною складовою потужності  $S$ . Як відомо [23, 24], існує багато методів і підходів для визначення цієї складової і це питання залишається дискусійним до цього часу. Згідно з [23], найбільш перспективним підходом до визначення неактивної складової є концепція С. Фризе [25], яка направлена на збереження функціонального характеру описання енергетичних властивостей кіл при несинусоїдних і синусоїдних процесах. Цю складову  $Q_\Phi$  він визначив у вигляді

$$Q_\Phi = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (5)$$

Виходячи із аналізу отриманих виразів (2)-(5), визначення потужностей  $P, S, Q_\Phi$  в колі зі стохастичними  $u(t)$  та  $i(t)$  можливо користуючись миттєвими значеннями випадкових функцій  $u(t)$  та  $i(t)$  після їх дискретизації (за часом).

Цей метод полягає в наступному. Кожна із реалізацій тривалістю  $T$  заданих випадкових функцій напруги  $u(t)$  і відповідної їй за режимом реалізації струму  $i(t)$  або миттєвої потужності  $p(t)$  дискретизуються за інтервалом часу  $\Delta t$ , вибраному у відповідності з теоремою Котельникова [20] (рис. 3.2) і тоді активна потужність  $P$ , згідно (2), знаходиться як середнє арифметичне за інтервал часу  $[0, T]$ :

$$P = \frac{\sum_{n=1}^N u_n \cdot i_n}{N} \quad \text{або} \quad P = \frac{\sum_{n=1}^N p_n}{N}, \quad (10)$$

де  $u_n, i_n, p_n$  – « $n$ »-і значення напруги, струму або миттєвої потужності;

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

$N$  – загальна кількість точок часового квантування за термін часу  $[0, T]$ .

На рис. 3.2. зображено реалізацію часових залежностей миттєвих величин струму  $i(t)$ , напруги  $u(t)$ , потужності  $p(t)$  [16].

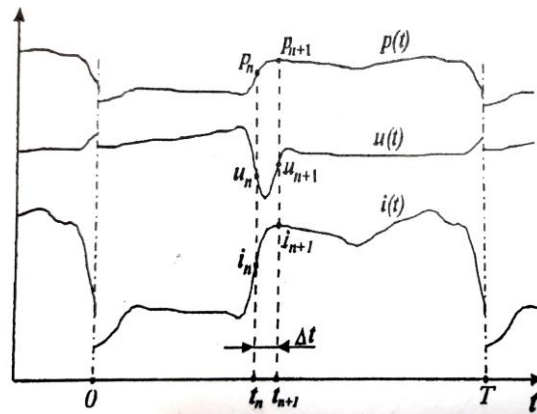


Рис. 3.2. Реалізації часових залежностей миттєвих величин струму  $i(t)$ , напруги  $u(t)$ , потужності  $p(t)$

На перший погляд активну потужність  $P$  для розглядуваних режимів можна визначити і як добуток середніх, за час споживання енергії системою, напруги  $U_{\text{cp}}$  та струму  $I_{\text{cp}}$ :

$$P_{\text{cp}} = U_{\text{cp}} \cdot I_{\text{cp}}, \quad (11)$$

$$\text{де } U_{\text{cp}} = \frac{\sum_{n=1}^N u_n}{N}, \quad I_{\text{cp}} = \frac{\sum_{n=1}^N i_n}{N}.$$

Однак значення потужності  $P$  в цьому разі будуть менш точні, бо тоді активна потужність визначається лише потужністю нульової гармоніки (якщо припустити можливість розкладання  $u(t)$  та  $i(t)$  у ряд Фур'є), оскільки  $U_{\text{cp}} = U^{(0)}$ ,  $I_{\text{cp}} = I^{(0)}$ . Знайдені за (10) значення  $P$  являють собою випадкові величини при роботі системи у певних режимах за час  $T$ .

Для визначення повної потужності  $S$  систем зі стохастичними  $u(t)$  та  $i(t)$  також застосовують (4), в якій діючі значення  $U$  та  $I$  знаходяться як середні квадратичні за  $T$  від дискретних значень (рис.3.2):

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N u_n^2}{N}}, \quad (12)$$



$$I = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N i_n^2}{N}}. \quad (13)$$

Як і  $P$ , величина  $S$ , а також реактивна потужність  $Q_\phi$ , що визначається за (5), будуть випадковими величинами, а отже потрібен їх статистичний аналіз.

### 3.2 Енергетичні показники – коефіцієнти потужностей трамваю

Оскільки потужності являються випадковими величинами, то енергетичні коефіцієнти теж є випадковими. Тому визначивши коефіцієнти за приведеними вище формулами, виконаємо статистичний аналіз одночасно і потужностей, і енергетичних коефіцієнтів. Застосовуємо для статистичного аналізу методику підрозділів 2.2 і 2.3.

Маємо статистичну вибірку випадкових величин  $P$  (активної потужності). Потрібно визначити математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, моду, медіану, коефіцієнт асиметрії, ексцес.

Активна рекуперована потужність (Вт):

122179, 89348, 121158, 145894, 114544, 104325, 112343, 123558, 89105, 79168, 88388, 94965, 89624, 94405, 83108, 104866, 137235, 104321, 106216, 115410, 96881, 144585, 111733, 94608, 126922, 83690, 75154, 100209, 143528, 149588, 103206, 81210, 94810, 115802, 78043, 150675, 143306, 118786, 122609, 118055, 111848, 139926, 181303, 95467, 122397, 97249, 218364, 107485, 107141, 109846, 116267, 123321, 93661, 112828, 92176, 137554, 116347, 85463.

За (4) отримуємо статистичну вибірку випадкових величин  $S$  (повної потужності в Вт):

140998, 102789, 135072, 162603, 126984, 121569, 127376, 137904, 93002, 83312, 91584, 109552, 102240, 105204, 95460, 125330, 149400, 121100, 120835, 130734, 110538, 159598, 125229, 111683, 144246, 97528, 88466, 113050, 164465, 172558, 116100, 94754, 110374, 131723, 92575, 170912, 158746, 134936, 134524, 133401, 127170, 155664, 205737, 112590, 136286, 111510,

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

245098, 123150, 123216, 127050, 131098, 136080, 107200, 129876, 105840, 163213, 131040, 99116.

Визначаємо коефіцієнт потужності  $\lambda$  за формулою:  $\lambda = \frac{P}{S}$ . Отримуємо

статистичну вибірку випадкових величин  $\lambda$ :

0.867, 0.896, 0.897, 0.897, 0.902, 0.858, 0.882, 0.896, 0.958, 0.95, 0.965, 0.867, 0.877, 0.897, 0.871, 0.837, 0.919, 0.861, 0.879, 0.883, 0.876, 0.906, 0.892, 0.847, 0.88, 0.858, 0.85, 0.886, 0.873, 0.867, 0.889, 0.857, 0.859, 0.879, 0.843, 0.882, 0.903, 0.88, 0.911, 0.885, 0.88, 0.899, 0.881, 0.848, 0.898, 0.872, 0.891, 0.873, 0.87, 0.865, 0.887, 0.906, 0.874, 0.869, 0.871, 0.843, 0.888, 0.862.

Визначаємо за (5) значення реактивної потужності  $Q_{\phi}$ . Отримуємо статистичну вибірку випадкових величин  $Q_{\phi}$ :

70375, 50818, 59709, 71796, 54814, 62412, 60030, 61244, 26639, 25948, 23983, 54619, 49199, 46428, 46964, 68634, 59050, 61500, 57613, 61415, 53223, 67577, 56551, 59339, 68539, 50076, 46670, 52330, 80302, 86021, 53176, 48818, 56510, 62776, 49793, 80671, 68291, 64012, 55351, 62119, 60516, 68205, 97246, 59687, 59940, 54562, 111311, 60107, 60852, 63840, 60563, 57529, 52148, 64324, 52016, 87848, 60289, 50200.

Визначаємо коефіцієнт реактивної потужності  $\operatorname{tg} \varphi$  за формулою:

$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_{\phi}}{P}$ . Отримуємо статистичну вибірку випадкових величин  $\operatorname{tg} \varphi$ :

0.576, 0.569, 0.493, 0.492, 0.479, 0.598, 0.534, 0.496, 0.299, 0.328, 0.271, 0.575, 0.549, 0.492, 0.565, 0.654, 0.43, 0.59, 0.542, 0.532, 0.549, 0.467, 0.506, 0.627, 0.54, 0.598, 0.621, 0.522, 0.559, 0.575, 0.515, 0.601, 0.596, 0.542, 0.638, 0.534, 0.477, 0.539, 0.451, 0.526, 0.541, 0.487, 0.536, 0.625, 0.49, 0.561, 0.51, 0.559, 0.568, 0.581, 0.521, 0.467, 0.557, 0.57, 0.564, 0.639, 0.518, 0.587.

Розділяємо усі масиви нормальних статистичних сукупностей на інтервали. Для цього із сукупностей візуально знаходимо найбільші і найменші значення:

$$P_{\min} = 78043 \text{ Вт}, P_{\max} = 218364 \text{ Вт},$$

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

$$Q_{\min} = 23983 \text{ вар}, \quad Q_{\max} = 111311 \text{ вар},$$

$$\lambda_{\min} = 0,837, \quad \lambda_{\max} = 0,965,$$

$$S_{\min} = 83312 \text{ ВА}, \quad S_{\max} = 245098 \text{ ВА},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\min} = 0,271, \quad \operatorname{tg} \varphi_{\max} = 0,654.$$

За цими даними визначаємо довжини інтервалів зміни випадкових величин  $(P, S, \lambda, \operatorname{tg} \varphi)$  за формулами:

$$\Delta P = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{1 + 3,2 \log(58)} = 21123 \text{ Вт},$$

$$\Delta S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{1 + 3,2 \log(58)} = 24354 \text{ ВА},$$

$$\Delta Q_{\phi} = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{1 + 3,2 \log(58)} = 13145 \text{ вар},$$

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{1 + 3,2 \log(58)} = 0,019,$$

$$\Delta \operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi_{\max} - \operatorname{tg} \varphi_{\min}}{1 + 3,2 \log(58)} = 0,058.$$

Визначаємо межі інтервалів змін  $P, S, \lambda, \operatorname{tg} \varphi, Q_{\phi}$  та будуємо статистичні розподілення досліджуваних випадкових величин, тобто будуємо гістограми. По вісі абсцис відкладаємо значення інтервалів, а по вісі ординат відкладаємо значення частоти.



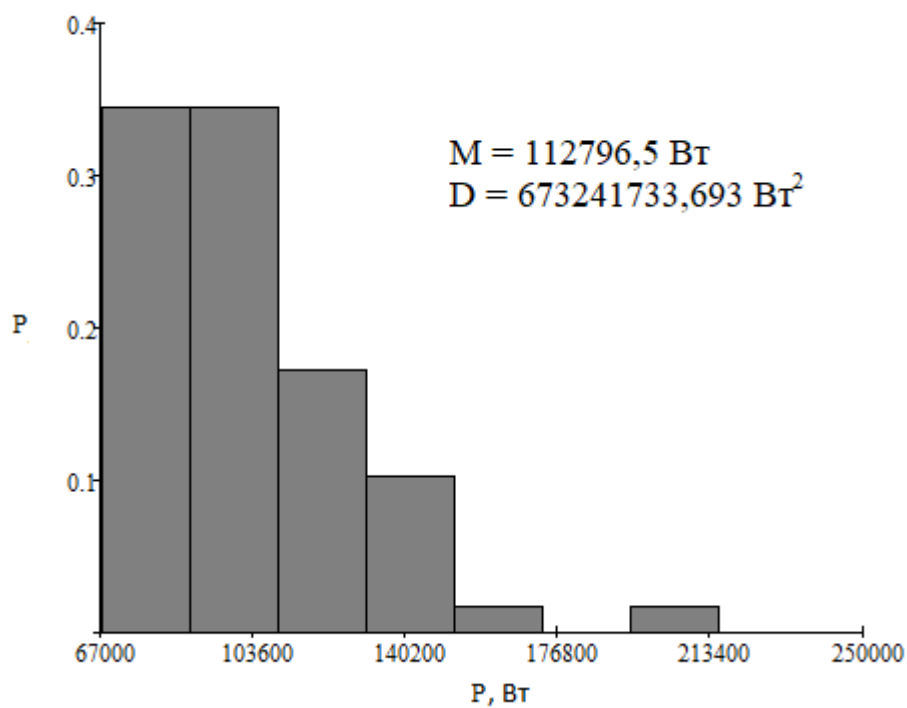


Рис. 3.3. Статистичне розподілення  $P$

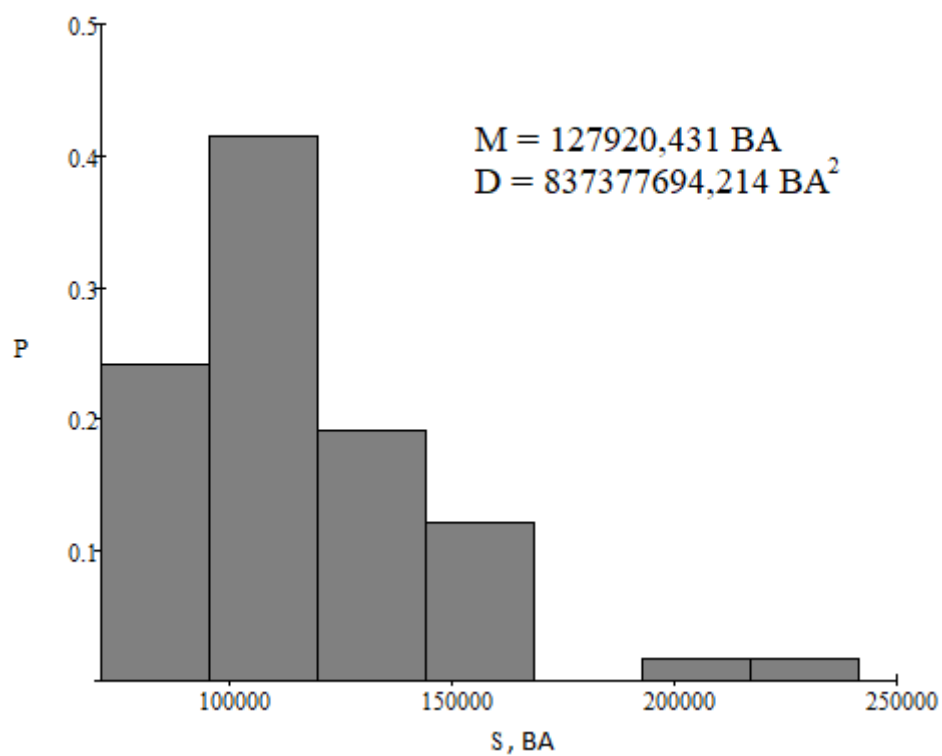


Рис. 3.4. Статистичне розподілення  $S$

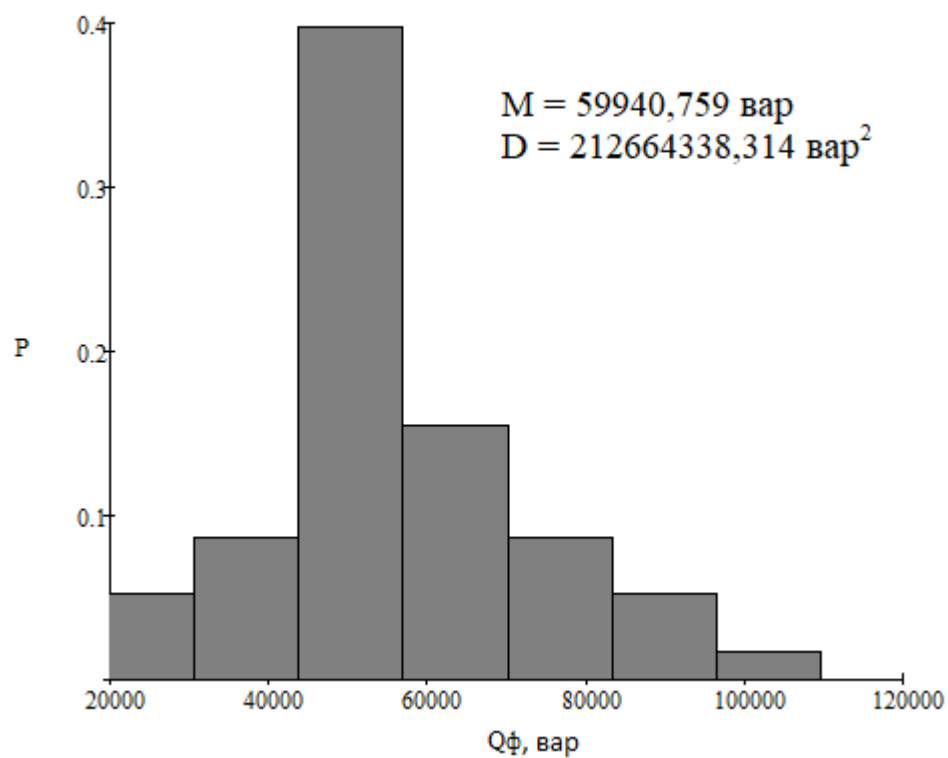


Рис. 3.5. Статистичне розподілення  $Q_\phi$

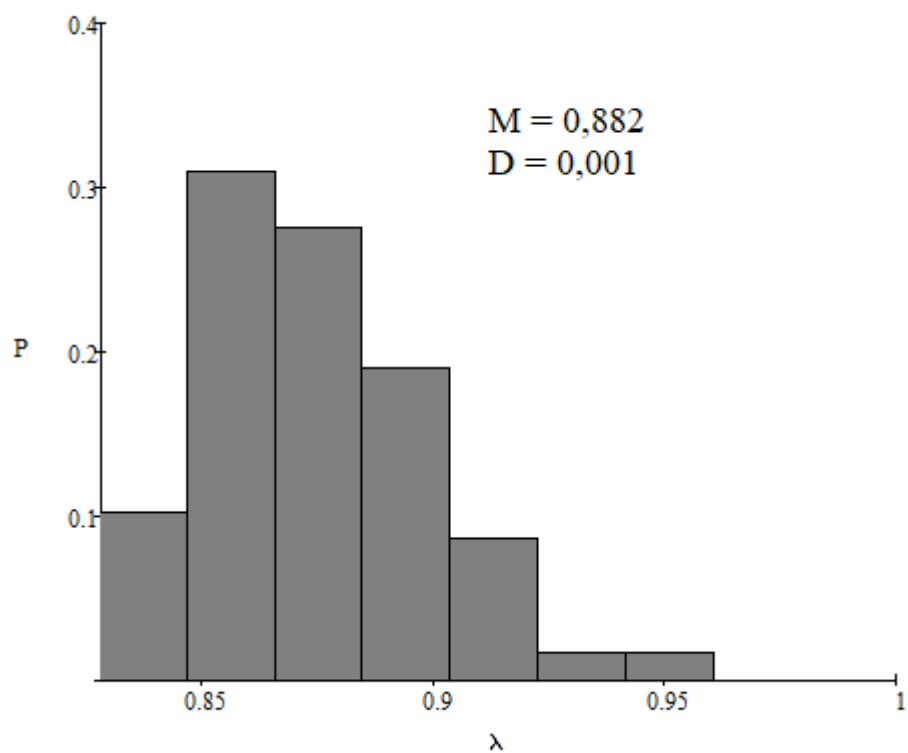


Рис. 3.6. Статистичне розподілення  $\lambda$

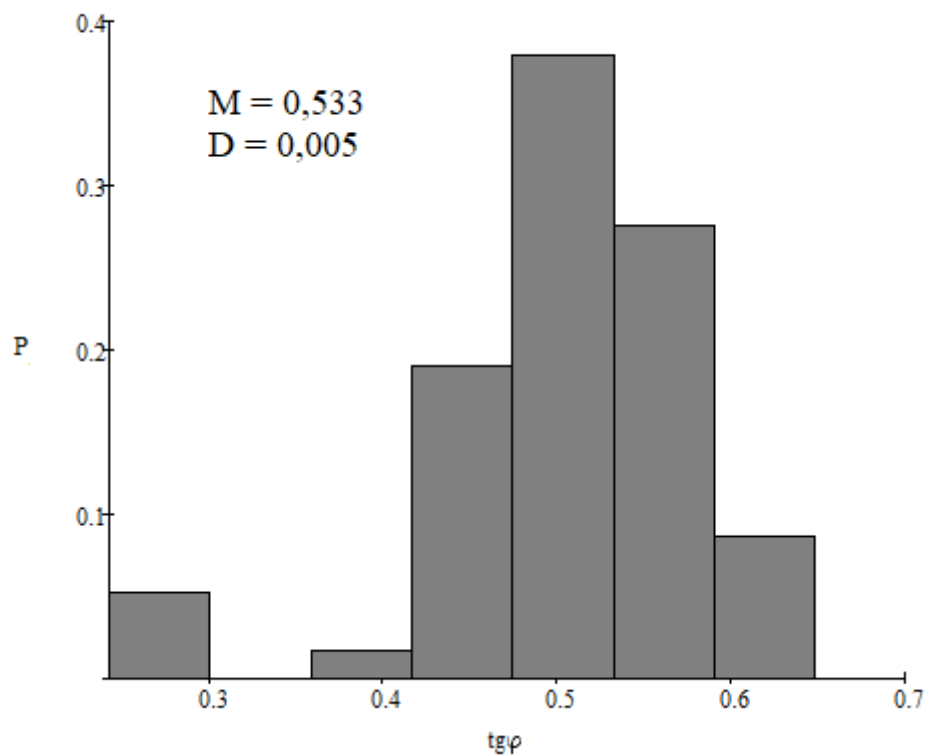


Рис. 3.7. Статистичне розподілення  $\operatorname{tg} \varphi$

Визначаємо числові характеристики заданих нормальних сукупностей, тобто математичні очікування, дисперсії, середньоквадратичні відхилення, коефіцієнти асиметрії, ексцеси.

Математичні очікування для  $P, S, \lambda, \operatorname{tg} \varphi, Q_{\phi}$ :

$$m_P = \frac{\sum_{i=1}^{58} P_i}{58} = 112796,5 \text{ Вт};$$

$$m_S = \frac{\sum_{i=1}^{58} S_i}{58} = 127920,431 \text{ ВА};$$

$$m_{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{58} \lambda_i}{58} = 0,882;$$

$$m_{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{\sum_{i=1}^{58} \operatorname{tg} \varphi_i}{58} = 0,533;$$

$$m_{Q_{\phi}} = \frac{\sum_{i=1}^{58} Q_{\phi i}}{58} = 59940,759 \text{ вар.}$$

Дисперсії для  $P, S, \lambda, \text{tg} \varphi, Q_{\phi}$ :

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^{58} (P_i - m_P)^2}{57} = 673241733,693 \text{ Вт}^2;$$

$$D_S = \frac{\sum_{i=1}^{58} (S_i - m_S)^2}{57} = 837377694,214 \text{ ВА}^2;$$

$$D_{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{58} (\lambda_i - m_{\lambda})^2}{57} = 0,001;$$

$$D_{\text{tg} \varphi} = \frac{\sum_{i=1}^{58} (\text{tg} \varphi_i - m_{\text{tg} \varphi})^2}{57} = 0,005;$$

$$D_{Q_{\phi}} = \frac{\sum_{i=1}^{58} (Q_{\phi i} - m_{Q_{\phi}})^2}{57} = 212664338,314 \text{ вар}^2.$$

### 3.3 Теоретичні передумови і чисельна оцінка коефіцієнта корисної дії трамваю

Розглянуті коефіцієнти потужностей  $\lambda$  і  $\text{tg} \varphi$  характеризують лише електроенергетичну ефективність роботи трамваю як одиниці електрорухомого складу. Іншим енергетичним показником є коефіцієнт корисної дії  $\eta$ , який характеризує електромеханічну ефективність роботи трамваю шляхом оцінки величини ступені електроенергії, що незворотно втрачається внаслідок недосконалості її перетворення в механічну енергію (в режимі тяги, або навпаки в режимі рекуперації) тяговими електродвигунами.

В загальному випадку під к.к.д. будь-якої системи чи пристрою розуміють відношення корисної потужності цієї системи до підведеної активної потужності. У конкретному випадку рекуперативного режиму трамваю (як пристрою) поняття «корисна» і «підведена» потужності мають

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

такий зміст (рис. 3.8). Корисною є потужність  $P_2$ , яка передається по тяговій мережі від рекуперуючого трамвая до тягової підстанції або до трамвая, що рухається у режимі тяги. Підведеною або затраченою у цьому випадку є потужність  $P_1$ , що генерується якорем (чи якорями) ТЕД трамвая, що рухається у режимі рекуперації. Частина потужності  $P_1$  втрачається при її передачі у власне трамваї; визначимо ці загальні втрати потужності як  $\Sigma \Delta P$ .

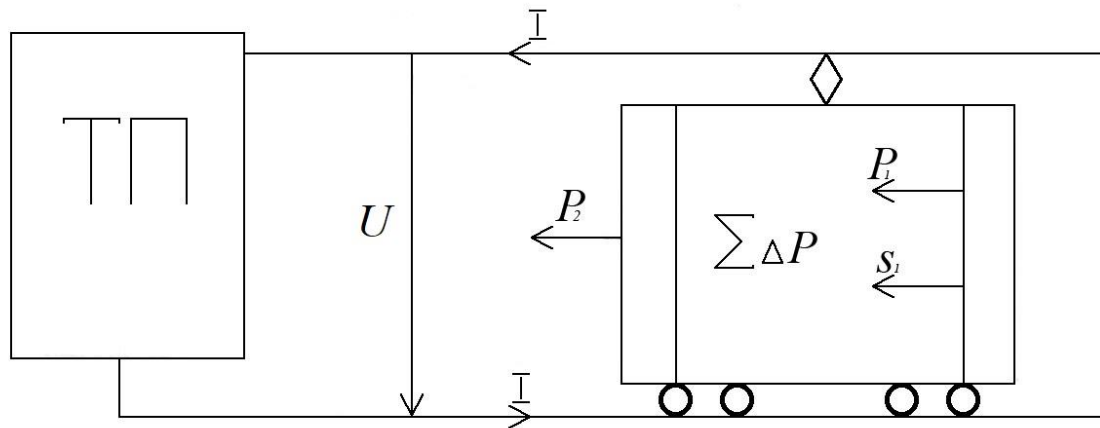


Рис. 3.8.

Отже, враховуючи вищезазначене, можна записати шуканий к.к.д. у вигляді:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta P} = \frac{1}{1 + \Sigma \Delta P / P_2}. \quad (1)$$

Сумарні втрати потужності  $\Sigma \Delta P$  в ТЕД складаються із електричних  $\Delta P_e$ , механічних  $\Delta P_{\text{мх}}$ , магнітних (в сталі)  $\Delta P_{\text{ст}}$  і додаткових  $\Delta P_{\text{дд}}$  втрат [26, 27]:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_e + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{дд}}. \quad (2)$$

Електричні втрати містять втрати в міді обмоток ТЕД  $R_{\text{дв}} \cdot I^2$  і перехідні втрати в контакті щіток (внаслідок тертя щіток об колектор)  $\Delta U_{\text{щ}} \cdot I$ :

$$\Delta P_e = R_{\text{дв}} \cdot I^2 + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I, \quad (3)$$

де  $R_{\text{дв}}$  – сумарний опір ТЕД;

$U_{\text{щ}}$  – спад напруги в щітковому контакті, який згідно ГОСТ2582-81 [32] дорівнює 2...3 В [26].



Як зазначалось, трамвайний вагон Т-3 має 4 ТЕД типу ТЕ-022, які з'єднані послідовно-паралельно, при цьому загальний опір одного двигуна дорівнює 0,105 Ом [3].

Механічні втрати – це втрати у підшипниках, вентиляційні та інші. Вони визначаються за відповідними формулами з механіки, а при електричних розрахунках їх приймають рівними 1% від номінальної потужності ТЕД [28].

Втрати в сталі (магнітні) – це втрати від явища гістерезису та від протікання вихрових струмів в магнітопроводах ТЕД. Вони визначаються або відомими із теоретичної електротехніки формулами, або з використанням графічних залежностей втрат холостого ходу  $\Delta P_{xx}$  від частоти обертів якоря  $n$  досліджуваного ТЕД і виразу [27]:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx} - \Delta P_{мх}. \quad (4)$$

Додаткові втрати  $\Delta P_{дд}$  виникають в конструкційних деталях ТЕД внаслідок викривлення форми магнітного поля в двигуні та нерівномірного розподілення струму по перерізу його провідників обмоток. Для ТЕД згідно ГОСТ 2582-81[32], величину  $\Delta P_{дд}$  приймають рівною 30% від втрат в сталі [26].

Користуючись викладеною методикою, а також результатами імовірісно-статистичного аналізу (п. 2.2, 2.3), виконаємо розрахунки к.к.д. трамваю типу Т-3 при його роботі в режимах зі стохастичними напругою та струмом. Тобто, потрібно визначити математичне очікування  $M[\eta]$  і дисперсію  $D[\eta]$  к.к.д.

Математичне очікування. Для його визначення згідно формули (1) потрібно знати математичні очікування рекуперованої потужності  $P_2$  і сумарних втрат  $\Sigma \Delta P$ . Величина  $M[P_2]$  визначається в розділі 2 і вона дорівнює 112,8 кВт, а  $M[\Sigma \Delta P]$  розрахуємо за викладеною методикою:

а) електричні втрати:

$$\Delta P_e = 0,105 \cdot 84,5^2 \cdot 4 + 3 - 84,5 \cdot 4 = 4014 \text{ Вт} = 4,01 \text{ кВт};$$

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

б) механічні втрати згідно виразу (3):

$$\Delta P_{\text{мх}} = 0,01 \cdot P_2 \cdot 2 = 0,01 \cdot 112,8 \cdot 2 = 2,26 \text{ кВт};$$

в) втрати в сталі:

для  $I_b = 0$  при  $n = 1750$  об/хв [3], згідно [27] втрати холостого ходу

$$\Delta P_{\text{хх}} = 7,8 \text{ кВт}, \text{ тоді } \Delta P_{\text{ст}} = (7,8 - 2,26) \cdot 4 = 22,2 \text{ кВт};$$

г) додаткові втрати:

$$\Delta P_{\text{дд}} = 0,3 \Delta P_{\text{ст}} = 0,3 \cdot 22,2 = 6,66 \text{ кВт}.$$

Підставивши отримані складові втрат у (2), отримуємо математичне очікування сумарних втрат:

$$M[\sum \Delta P] = 4,01 + 2,26 + 22,2 + 6,66 = 35,1 \text{ кВт}.$$

Математичне очікування к.к.д. визначаємо за формулою [21]:

$$M[\eta] = \frac{M[P_2]}{M[P_2] + M[\sum \Delta P]} = \frac{112,8}{112,8 + 35,1} = 0,763.$$

Дисперсія к.к.д. Функція  $\eta(P_2)$ , що представлена виразом (1) являє собою нелінійну залежність від випадкової величини  $P_2$ . Тому для визначення дисперсії  $D[\eta]$  застосуємо метод лінеаризації [21, 29], згідно якого можна записати, що

$$D[\eta] = \left( \frac{\partial \eta}{\partial P_2} \right)_{m_{P_2}}^2 \cdot D[P_2] = \left[ \frac{1 \cdot (P_2 + \sum \Delta P) - 1 \cdot P_2}{(P_2 + \sum \Delta P_2)} \right]_{m_{P_2}}^2 \cdot D[P_2]. \quad (5)$$

Підставивши в (5) математичне очікування потужності  $P_2$  ( $M[P] = 112,8$  кВт), втрати  $\sum \Delta P = 35,1$  кВт, та дисперсію потужності ( $D[P_2] = 673,2$  кВт<sup>2</sup>), отримуємо дисперсію к.к.д., яка дорівнює  $1,723 \cdot 10^{-3}$ , а середньоквадратичне відхилення складає:  $\sigma_\eta = 0,0415$ .

### 3.4 Заключний аналіз

Виконаємо порівняльний аналіз досліджених енергетичних коефіцієнтів ( $\eta, \lambda, \text{tg} \varphi$ ) трамваю в режимах його рекуперації зі стохастичними і постійними рекуперованими напругою і струмом.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

1. Коефіцієнт  $\eta$ . Вираз (1) свідчить про нелінійну залежність к.к.д. лише від однієї випадкової величини – рекуперованої активної потужності  $P$ . Законом розподілення цієї величини є, згідно результатів розрахунків (в п. 2), закон близький до логарифмічно-нормального, про що свідчать вигляд гістограми і значення коефіцієнтів:  $A_s = 1,4$ ;  $E_x = 3,297$ . Зазначене дозволяє зробити висновок, що і к.к.д. є випадковою величиною з таким же законом розподілення. Тоді, користуючись правилом «трьох сігм» [21], можна записати діапазон зміни к.к.д. у режимі рекуперації зі стохастичними напругами та струмом у вигляді:

$$3\sigma_\eta - M[\eta] + 3\sigma_\eta.$$

Отже, реально к.к.д. змінюється в межах: 0,64...0,89, в той час як для режимів стаціонарної рекуперації к.к.д. дорівнює 0,91.

2. Коефіцієнт  $\lambda$ . Згідно розрахункам математичного очікування коефіцієнт потужності трамваю  $m_\lambda = 0,882$ , а середнє квадратичне відхилення цього коефіцієнта складає 0,032. Отже, користуючись правилом трьох сігм визначаємо розкид цього коефіцієнта як  $3\sigma_\lambda - M[\lambda] + 3\sigma_\lambda$ , тобто чисельно цей розкид дорівнює 0,786...0,978. В той час як для режимів стаціонарної рекуперації  $\lambda = 0$ .

3. Коефіцієнт  $\operatorname{tg}\varphi$ . Згідно розрахункам математичного очікування коефіцієнт реактивної потужності трамваю  $m_{\operatorname{tg}\varphi} = 0,533$ , а середнє квадратичне відхилення цього коефіцієнта складає 0,07. Отже, користуючись правилом трьох сігм визначаємо розкид цього коефіцієнта як  $3\sigma_{\operatorname{tg}\varphi} - M[\operatorname{tg}\varphi] + 3\sigma_{\operatorname{tg}\varphi}$ , тобто чисельно цей розкид дорівнює 0,323...0,743. В той час як для режимів стаціонарної рекуперації  $\operatorname{tg}\varphi = 0$ .

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Правила безпеки під час обслуговування електродвигунів

Виводи обмоток, кабельні воронки та всі обертові частини електродвигунів (контактні кільця, шків, муфти, вентилятори) слід огорожувати. Забороняється знімати ці огороження під час роботи електродвигуна.

Вмикати та вимикати електродвигуни пусковою апаратурою з приводами ручного керування необхідно в діелектричних рукавичках.

Згідно з НПАОП 40.1-1.01-97 у разі виконання роботи на електродвигуні або механізмі, який приводиться ним у рух, що пов'язана з дотиком до струмовідних або обертових частин, з електродвигуна слід зняти напругу, а кабель, що живить його, слід заземлити. (абзац перший пункту 11.3 із змінами, внесеними згідно з наказом Комітету по нагляду за охороною праці України Міністерства праці та соціальної політики від 25.02.2000 р. № 26) [36]

Роботи, що не пов'язані з дотиком до струмовідних або обертових частин електродвигуна чи механізму, який приводиться ним у рух, можуть проводитись на працюючому електродвигуні за розпорядженням або в порядку поточної експлуатації.

У разі виконання роботи на електродвигуні заземлення можна встановлювати на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з РУ (збіркою).

У разі виконання робіт на механізмі, не пов'язаних з дотиком до частин, що обертаються, та у разі роз'єднання з'єднувальної муфти заземлювати кабельну лінію не вимагається.

У разі від'єднання кабелю від електродвигуна необхідно на жили кабелю з боку електродвигуна встановити переносне заземлення. У тому разі, коли переріз жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається в електродвигунах напругою до 1000 В заземлювати кабельну

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

лінію мідним провідником перерізом, не меншим за переріз жили кабелю, або з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення та з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативній документації нарівні з переносним заземленням.

Перед допуском працівників до роботи на електродвигунах насосів, димососів та вентиляторів, якщо можливе обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, слід закрити і зачинити на замок засувки та шибери останніх, а також вжити заходів щодо гальмування роторів електродвигунів.

На однотипних або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому проводиться робота, слід вивішувати плакати «Стій! Напруга» незалежно від того, перебувають вони в роботі чи в резерві.

Обслуговувати щітковий апарат електродвигуна, що працює, допускається одноособово оперативному працівнику або виділеному для цього навченому працівнику з групою III. В цьому разі необхідно дотримуватися таких заходів безпеки:

- працювати в головному уборі і застебнутому спецодязі, остерігаючись захвату його частинами машини, що обертаються;
- користуватися діелектричним взуттям або гумовими килимками;
- не торкатися руками одночасно до струмовідних частин двох полюсів або струмовідних і заземлених частин.

Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (6.4.6) кільця ротора допускається шліфувати на електродвигуні, що обертається, лише за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу, із застосуванням захисних окулярів [34].

Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (6.7.21) в разі раптової зупинки електроінструменту (зникнення напруги, заклинювання рухомих частин тощо), він має бути вимкнений вимикачем. Під час перенесення електроінструменту з одного робочого місця на друге, а також під час перерви в роботі та її закінченні електроінструмент обов'язково має бути відімкнений від мережі штепсельною вилкою [34].

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		



Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (6.7.22) забороняється продовження робіт електроінструментом в разі найменших ознак його несправності, або якщо особа, що працює з ним, раптом відчує хоча б слабку дію електроструму: в обидвох випадках робота має бути негайно припинена, а несправний електроінструмент зданий для перевірки і ремонту [34].

Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід проводити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені.

В процесі роботи на працівника можуть впливати наступні небезпечні і (або) шкідливі виробничі фактори:

- рухомі транспортні засоби;
- рухомі машини і механізми, рухомі частини обладнання;
- переміщувані вироби, заготовки та матеріали;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищена запиленість, загазованість повітря робочої зони;
- підвищені рівні шуму на робочому місці;
- підвищені або знижені температури, вологість і рухливість повітря робочої зони [33].

Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (1.1.7) електрообладнання, конструкції, комплектувальні деталі, вузли вітчизняного та іноземного виробництва повинні відповідати вимогам чинних в Україні нормативних документів [34].

#### **4.2 Дія працівників у надзвичайних ситуаціях.**

Інструкція з охорони праці під час виконання роботи із застосуванням електричних ручних машин та інструментів розроблена на підставі законодавства України про охорону праці, ПУЕ, ПТЕЕС, ПБЕЕС (НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.2198)) і Правила безпечної роботи з інструментом та пристроями (НПАОП 0.00-1.31-99 (ДНАОП 1.1.10-1.04.01)) [35].

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

Аварійні ситуації можуть виникати під дією несприятливих атмосферних умов (дощу, вітру, снігу та ін.), а також бути виробничого характеру в результаті:

- порушення будівельних конструкцій;
- падіння будівельних матеріалів;
- виходу з ладу енергетичних комунікацій та механізмів;
- зникнення напруги в електромережі;
- зникнення електричного зв'язку між металевими частинами корпусу та нульовим штирем штепсельної вилки;
- пошкодження штепсельного з'єднання кабелю або його захисної трубки;
- пошкодження робочої частини інструмента;
- заклинювання частин інструмента, що обертаються;
- короткого замикання в двигунах електроінструментів.

У разі виникнення аварійної ситуації необхідно негайно припинити роботу, вжити заходів щодо евакуації людей з небезпечної зони та рятування матеріальних цінностей. В разі необхідності відключити технологічне обладнання від електромережі.

Якщо обстановка не загрожує життю і здоров'ю працівників і не веде до розширення аварії, її слід зберегти такою, якою вона була на момент події.

У випадках пожежі необхідно:

- викликати пожежно-рятувальну службу за телефоном «101»;
- оповістити керівника робіт і розпочати гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння.
- Електропроводку та елек-троустановки Гасити тільки вуглекислотними та порошковими вогнегасниками після їх відключення від електромережі;
- організувати зустріч пожежних машин та інформувати пожежників про місцезнаходження гідрантів, колодязів та інших засобів пожежогасіння.

У разі нещасних випадків (забиття, падіння, електротравми), а також у випадках раптового захворювання подати потерпілому першу (долікарську)

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ док-м.	Підпис	Дат		

допомогу, повідомити керівника робіт про те, що трапилося, викликати швидку допомогу за телефоном «103».

Послідовність подання першої допомоги:

- 1) усунути дію на організм шкідливих факторів, які загрожують здоров'ю і життю потерпілого (звільнити від дії електричного струму, винести із зараженої території, загасити одяг, що горить, тощо);
- 2) визначити характер і тяжкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- 3) вжити потрібних заходів щодо рятування потерпілого в порядку терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, провести штучне дихання, зовнішній масаж серця, зупинити крово-течу, зафіксувати місце перелому, накласти пов'язку та ін.);
- 4) підтримувати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника або вжити заходів щодо транспортування потерпілого в найближчий медичний заклад.

Допомога потерпілому, подана не медичним працівником, не повинна замінювати допомогу з боку медичного персоналу і повинна подаватися лише до прибуття лікаря [35].

Конкретні дії щодо подання медичної допомоги потерпілому під час різних уражень описані в Інструкції з подання першої (долікарської) допомоги, яка вивчається під час проходження первинного і подальших інструктажів з питань охорони праці.

Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (1.1.9) під час експлуатації електроустановок необхідно дотримуватись вимог пожежної безпеки, встановлених Правилами пожежної безпеки в Україні ( з0219-95 ) [34].

Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (7.4.2) до експлуатації в пожежонебезпечних зонах допускається електрообладнання, що відповідає вимогам глави 7.4 ПВЕ з урахуванням показників пожежовибухонебезпеки матеріалів (рідин, пилу, волокон) [34]. Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (7.4.5) Електрообладнання з частинами, що іскрять під час нормальної роботи або нагріваються понад

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

небезпечні температури (тобто є імовірними джерелами займання) рекомендується встановлювати поза межами пожежонебезпечних зон [34].

Згідно НПАОП 0.00-1.21-98 (7.4.9) Електроустановки в пожежонебезпечних зонах будь-яких класів в разі необхідності повинні мати апарати, що відключають частково або повністю технологічне і сантехнічне устаткування у випадках аварій і пожеж. Обсяг відключення визначається технологами і сантехніками проектною організацією і спеціалістами служб охорони праці, з урахуванням особливостей технологічного процесу [34].

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

## ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Випадковий характер рекуперованих напруги і струму обумовлює наявність в колах електротягового приводу трамваїв реактивної потужності по Фризе, яка, перетікаючи від трамваїв до тягової підстанції призводить до суттєвого зниження основних енергетичних характеристик і показників трамваїв.
2. Традиційні методи теоретичної електротехніки не застосовні для оцінки зазначених показників в стохастичних режимах рекуперації, потрібна розробка спеціальних способів, що базуються на теорії випадкових процесів.
3. Змінні в часі і у фазах рекуперативного гальмування залежності активної, реактивної і повної потужностей, а також коефіцієнт потужності і коефіцієнт реактивної потужності являють собою стаціонарні неергодичні випадкові процеси, статистичні розподілення яких у більшості фаз рекуперації підкоряються закону Гаусса або асиметричному нормальному закону з дисперсійною функцією.
4. Математичні очікування (середні значення) основних енергетичних показників трамваїв в режимах стохастичної рекуперації складають: коефіцієнт потужності  $\lambda = 0,882$  (при 1 в режимі стаціонарної рекуперації); коефіцієнт реактивної потужності  $\operatorname{tg} \varphi = 0,533$  (при 0 в режимі стаціонарної рекуперації). Імовірнісні розкиди цих величин відповідно дорівнюють – для  $\lambda$  0,786...0,978, для  $\operatorname{tg} \varphi$  0,323...0,743.
5. Значення коефіцієнта корисної дії трамваїв в стохастичних режимах рекуперації склали 0,64...0,89, що на 16 % менше, ніж в режимах з постійними рекуперованими напругою і струмом.
6. Суттєве покращення електроенергетичної ефективності режимів рекуперації трамваїв можливе шляхом розробки на базі

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		



суперконденсаторів бортових систем компенсації реактивної потужності  
або систем регенерації рекуперованої електроенергії.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дат		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Малышко И. В. Основные направления энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины/ И. В. Малышко // Залізничний транспорт України. – 2007. - № 1. – С. 12-14.
2. Транспортна стратегія України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010 р. № 2818-VI.
3. Иванов М. Д. Трамвайные вагоны Т-3. –М: -Транспорт, 1977.-240 с.
4. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. М: Энергия, 1978.-320с.
5. Зиновьев Г. С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. Новосибирск: Изд-во Новос. унт-та, 1990. -220 с.
6. Поляков Н. Г., Кийко В. В. Об одном методе оценки эффективности электропотребления при несимметричных линейны х нагрузках. Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ -2002», 2002, ч. 7.– С. 86-89.
7. Variobahn mit Energiespeicher in Heidelberg in Betrieb. Elek. Bahnen, 2010. no.1-2 (108), pp. 93-94.
8. Klohr M. Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen – das erste Serienprojek. Elek. Bahnen. – 2012, no.8-9 (110), pp. 444-451.
9. Bombardier extends catenary-free technology. Int. Railway J., 2011, no.5 (51), pp. 28.
10. Pablo Arboleya. Energy Is On Board: Energy Storage and Other Alternatives in Modern Light Railways. IEEE Electrification Magazine, 2016, no.4, pp. 30-41.
11. Tango fur Gent mit Energiespeicher. Elek. Bahnen, 2012, no.8-9 (110), pp.508.
12. Transit new. Railway Journal, 2009, no.8 (49), pp. 10-12.
13. Adam Szeląg, Tadeusz Maciołek, Zbigniew Drażek, Marek Patoka. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej. Pojazdy Szynowe, 2011, no.3, pp. 34-40.
14. Adam Szeląg, Tadeusz Solarek. Power supply of trams in Poland – current state and perspectives of modernization. 13<sup>th</sup> International Conference Modern Electrified Transport, Poland, Warsaw, 2017, pp. 27.

					<i>0024 ЛМР 20 02 ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. Czuchra W., Prusak J, Zajac W. Ocena energochłonności tramwajów y napędem asynchronicznym. 7<sup>th</sup> International Conference “Modern Electric Transport in Integrated XXIst Century Europe”, Poland, Warsaw, 2005, pp. 160-164.

16. Костін М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними електроенергетичними процесами / М. О. Костін // Технічна електродинаміка. Темат. випуск. «ПСЕ-2006». Частина 6. – 2006. – С. 3-8.

17. Костин Н. А., Петров А. В. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги // Технічна електродинаміка. Тем. вип.. «ПСЕ-2011» 2011.-Ч.3. – С. 53-59.

18. Костін М.О., Саблін О. І., Шейкіна О. Г., Петров А. В. Миттєва реактивна потужність у системах електричного транспорту постійного струму // Гірнична електромеханіка та автоматика.- 2007. Вип.79.- С. 3-8.

19. Костин Н. А., Саблин О. И., Шейкина О. Г., Никитенко А. В. Коэффициенты мощности и реактивной мощности трамваев // Гірнична електромеханіка та автоматика.- 2013. Вип.91.- С.124-131.

20. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М: Сов. радио, 1977.-608 с.

21. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. –М: Наука, 1969.-576 с.

22. Жлуктенко В.І., Наконечний С.І. Теорія імовірностей і математична статистика. Посібник. Ч.2, Київ: КНЕУ, 2007, 368с.

28. Тягові електричні машини електрорухомого складу: Навчальний посібник/ В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. –Д.: Видавництво ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2003.-252 с.

27. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги: монография [Текст]: в 2 т./ Г. К. Гетьман – Днепропетровск: Издательство Маковецкий, 2011. Т.1.-364 с.

26. Захарченко Д. Д. и др. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электромашины и трансформаторы. –М: Транспорт, 1968.-296 с.

23. Тонкаль В. Е. и др. Баланс энергий в электрических цепях. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крилов и др.// Технічна електродинаміка. Тем. Вип. – 2004. – ч.1. – С.80-91.

25. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfaf von strom und spannung/ S. Fryze // ETZ, Germany, 1932, No 25, pp. 596-599; No 26, pp. 625-627; No 29, pp. 700-702.

29. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1962. – 659 с.

30. Электрические машины вагона Т-3 [Электрон. ресурс] / Режим доступа: [https://zinref.ru/000\\_uchebniki/05302\\_trolleybus/010\\_00\\_tramvainie\\_vagon\\_t3\\_ivanov\\_1977/029.htm](https://zinref.ru/000_uchebniki/05302_trolleybus/010_00_tramvainie_vagon_t3_ivanov_1977/029.htm)

31. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200006034>

32. ГОСТ 2582-81 Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, с Поправкой). [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200012344>

33. Інструкція по охрані праці при експлуатації и обслуговуванні електричних двигунів. [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <https://businessforecast.by/partners/646/instrukcija-po-ohrane-truda-pri-jeksplu-4/>

34. НПАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>

35. Інструкція з охорони праці під час виконання роботи із застосуванням електричних ручних машин та інструментів. [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <https://www.buh24.com.ua/instruktsiya-z-ohoroni-pratsi-pid-chas-vikonannya-roboti-iz-zastosuvannyam-elektrichnih-ruchnih-mashin-ta-instrumentiv/>

36. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [Электрон. ресурс] / Режим доступа: [https://dnaop.com/html/32419\\_11.html](https://dnaop.com/html/32419_11.html)

					0024 ЛМР 20 02 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		