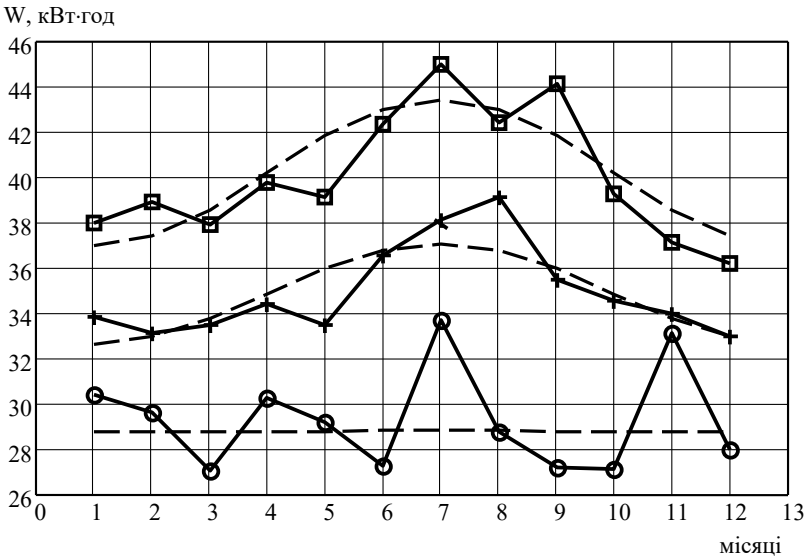
М. П. Розводюк

ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТРАМВАЯМИ



Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

М. П. Розводюк

ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТРАМВАЯМИ

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 629.433
Р64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 28.09.2017 р.).

Рецензенти:
О. П. Чорний, доктор технічних наук, професор
М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

Розводюк, М. П.

Р64 Зменшення рівня енергоспоживання трамваями : монографія / М. П. Розводюк. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 94 с.

ISBN 978-966-641-715-5

В монографії досліджено процес споживання електроенергії трамваями з точки зору її економії. Розроблено математичні моделі, що описують цей процес, та запропоновано способи економії електроенергії.

Розрахована на інженерно-технічних працівників трамвайно-тролейбусних управлінь, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів, котрі спеціалізуються в галузі електромеханіки й електротехніки та міського електротранспорту.

УДК 629.433

ISBN 978-966-641-715-5

© М. Розводюк, 2017

ЗМІСТ

Вступ……. 5

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТРАМВАЯМИ 7

1.1 Загальні підходи економії електроенергії трамваями 7

1.2 Аналіз процесу споживання трамваями на маршрутах 9

1.3 Аналіз процесу струмознімання 12

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ПІДХОДІВ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТРАМВАЯМИ 16

2.1 Розробка лічильника електроенергії постійного струму для трамвая 16

2.2 Побудова емпіричного закону розподілу споживання електроенергії трамваями за годину 20

2.3 Синтез авторегресійних математичних моделей процесу споживання електроенергії трамваями на маршрутах 25

2.4 Автоматизація процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах 29

2.4.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження 29

2.4.2 Розробка підходу до формалізації і автоматизації процесу 29

2.4.3 Практична реалізація запропонованого підходу 30

2.5 Зниження електроспоживання трамвая КТ 4СУ за рахунок модернізації обмотки якоря двигуна двигун-генератора SMD 5001 35

2.5.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження 35

2.5.2 Розв’язання поставленої задачі 36

2.6 Спосіб економії електроенергії трамваєм КТ 4СУ в холодну пору року 39

2.6.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження 39

2.6.2 Розв’язання поставленої задачі 40

2.7 Зниження електроспоживання трамвая КТ 4СУ за рахунок зміни конструкції системи опалення кабіни водія 43

2.8 Зменшення втрат електроенергії в пантографі трамвая 47
2.9 Визначення оптимального значення контактного натиску струмознімальним елементом на контактну мережу 51
2.10 Фактор технічного стану транспортного засобу на витрату електроенергії 61
2.10.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження ... 61
2.10.2 Розв'язання поставленої задачі 64
2.11 Контроль та реєстрація параметрів роботи трамвая 65
2.11.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження ... 65
2.11.2 Розв'язання поставленої задачі 66
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО СТРУМОЗНІМАННЯ ТА КОНТРОЛЮ Й РЕЄСТРАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ТРАМВАЯ 67
3.1 Розробка пристроїв для підтримання оптимального натиску пантографа на контактну мережу 67
3.3 Розробка пристрою для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая 80
Висновки… 83
Література..... 85

ВСТУП

З кожним днем як в світі, так і в нашій країні загострюється питання мінімізації витрат енергоресурсів. А тому процес електроспоживання тим чи іншим об'єктом з огляду мінімізації енерговитрат завжди цікавий як науковцям, так і працівникам, які з ним працюють.

Одним із найбільших споживачів такого виду енергоресурсів, як електрична енергія, практично кожного великого міста є міський електротранспорт, в тому числі й трамвайний парк. З іншого боку, досить гостро стоїть проблема загазованості міст. А як наслідок, використання екологічно чистих видів транспорту, серед яких трамвай займає особливе місце, стає домінуючим. Тому потрібно знаходити способи та методи розв'язання задачі щодо зменшення рівня електроспоживання трамваями на маршрутах.

То ж зменшення втрат при перетворенні енергії з електричної, що споживається з контактної мережі, в тягову, а також у допоміжних системах трамвая є актуальною проблемою.

Дослідженнями в цьому напрямку в Україні практично ніхто не займається. Більше уваги приділяють залізничному транспорту. Тому ця тематика з врахуванням постійного росту цін на електроенергію на сьогоднішній день та й в майбутньому є актуальною й перспективною.

Наукові дослідження в цьому напрямку проводяться у Вінницькому національному технічному університеті ще з 2000-го року. Зокрема встановлено, що основними чинниками, що впливають на кількість спожитої електроенергії трамваями на маршрутах, є:

– людський фактор, тобто кваліфікація самого водія (причому в деяких випадках навіть у два рази);

– технічні стани вагона та контактної мережі;

– якість перехідного контакту «контактний провід–бугель».

Крім того процес споживання електроенергії трамваями носить стохастичний характер і залежить від сезонності роботи.

Виходячи з викладеного вище, автоматизація процесу побудови математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах з можливістю спрогнозувати значення кількості електроенер-

гії, яку буде потрібно придбати в наступних місяцях, є задачею нагальною.

Об’єктом дослідження в роботі є процес передачі електроенергії з контактного проводу до пантографа трамвая та процеси її перетворення під час функціонування трамвая.

Предметом дослідження є математичні моделі процесу споживання електроенергії трамваями.

Метою дослідження є зменшення рівня електроспоживання трамваями на маршрутах.

Для досягнення цієї мети необхідно розв’язати такі задачі:

– проаналізувати особливості споживання електроенергії трамваями;

– розробити математичні моделі, придатні для опису процесу споживання електроенергії трамваями;

– запропонувати способи зменшення рівня процесу споживання електроенергії трамваями.

Робота містить три розділи.

У першому розділі проаналізовано особливості споживання електроенергії трамваями.

У другому розділі розроблено емпіричні закони розподілу споживання електроенергії трамваями, на основі чого синтезовано авторегресійні математичні моделі процесу споживання електроенергії трамваями на маршрутах. Запропоновано підходи до формалізації та автоматизації цього процесу, за результатами чого розроблено програму «ModelAvtoreg», що їх реалізує. Запропоновано способи зменшення рівня процесу споживання електроенергії трамваями.

У третьому розділі на основі запропонованих у другому розділі математичних моделей розроблено пристрої, що дозволяють забезпечити оптимальне струмознімання пантографом трамвая, та пристрій для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТРАМВАЯМИ

Споживання електроенергії трамваями будемо розглядати з точки зору її економії, що є актуальною задачею сьогодення. Тим більше, що трамваї є одним з основних споживачів електроенергії великих міст.

1.1 Загальні підходи економії електроенергії трамваями

В роботі [1] виділяють такі основані напрямки економії електроенергії в трамваях:

– використання рекуперативного гальмування вагонів;

– зменшення порожнього пробігу вагонів до загального пробігу в завантаженому русі;

– використання автоматики управління режимами пічок;

– зменшення пускових (реостатних) втрат енергії.

Першому аспекту останнім часом приділяється достатньо багато уваги, зокрема в роботах [2–5]. Однак не завжди він може бути реалізованим повною мірою.

Часто на форумах обговорюється питання використання в трамваях світлодіодних лампочок, що дасть можливість зекономити як електроенергію, так і кошти [6, 7].

За результатами досліджень, викладеними в роботі [8], стверджується, що впровадження енергозберігаючого електропривода трамвая дозволяє зекономити біля 49 % електроенергії. Крім того додаткова економія може бути отримана від впровадження енергозберігаючого обладнання на рухомому складі [9].

Таким же шляхом пішло і Вінницьке комунальне підприємство «Трамвайно-тролейбусне управління», перетворивши старий чеський трамвай КТ-4СУ «Vin Way» (рис. 1.1), в результаті чого замінено практично всі деталі та системи за винятком рами. Крім ефектного та приємного дизайну отримали й економію енергоресурсів, обумовлену використанням сучасних технологій [10].

Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд трамвая «Vin Way»

Додаткова економія – це вдало розроблений розклад руху трамваїв, що забезпечує оптимальну кількість вагонів на маршруті. Розв’язання цієї здачі наведено в роботах [11–16].

Іншим способом зменшити витрати електроенергії міським електротранспортом, в тому числі і трамваями, є розробка нових типів ефективних джерел вторинної енергії та перетворювачів енергії, тобто повторне використання спожитих ресурсів [17]. Сюди відноситься розробка ефективних накопичувачів енергії, що виділяється під час електричного гальмування вагона.

Для забезпечення економічного використання електроенергії трамваями також потрібно забезпечити надійне струмознімання з контактного проводу. Специфікою цього процесу є те, що струмознімання реалізується при великих струмах навантаження під час руху з достатньою швидкістю [18]. Ускладнюють цей процес провисання контактного проводу, що залежить від багатьох факторів, старіння самого контактного проводу, виникнення електричної дуги.

1.2 Аналіз процесу споживання трамваями на маршрутах

В роботах [19, 20] було досліджено процес споживання електроенергії трамваями на маршрутах за двома критеріями:

1) за годину;

2) на 1 км пробігу.

Встановлено, що за обома критеріями цей процес підпорядковується нормальному логарифмічному закону розподілу [19, 20]:

$$\hat{w} = 10 \lg w, \tag{1.1}$$

$$f(\hat{w}) = \frac{1}{\sigma_{\hat{w}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\hat{w} - m_{\hat{w}}}{\sigma_{\hat{w}}}\right)^2}, \tag{1.2}$$

де w – конкретні значення середнього споживання електроенергії трамваями за годину; $\hat{w}$ – центрований ряд середнього споживання електроенергії трамваями ($\hat{w}^{(г)}$ – за годину, $\hat{w}^{(п)}$ – на 1 км пробігу); $f(\hat{w})$ – густина імовірності випадкової величини споживання електроенергії трамваями; $m_{\hat{w}}$ – статистична оцінка середнього значення випадкової величини споживання електроенергії трамваями ($m_{\hat{w}^{(г)}}$ – за годину, $m_{\hat{w}^{(п)}}$ – на 1 км пробігу); $\sigma_{\hat{w}}$ – статистична оцінка середньоквадратичного відхилення випадкової величини споживання електроенергії трамваями ($\sigma_{\hat{w}^{(г)}}$ – за годину, $\sigma_{\hat{w}^{(п)}}$ – на 1 км пробігу);

Статистичні оцінки споживання електроенергії трамваями за годину мали значення:

$$\begin{cases} m_{\hat{w}^{(г)}} = 15{,}633; \\ D_{\hat{w}^{(г)}} = 0{,}194; \\ \sigma_{\hat{w}^{(г)}} = 0{,}441, \end{cases} \tag{1.3}$$

де $D_{\hat{w}^{(г)}}$ – статистична оцінка дисперсії випадкової величини споживання електроенергії трамваями на маршруті, а їхні довірчі інтервали –

$$\begin{cases} 15{,}33 \le m_{\hat{w}^{(г)}} \le 15{,}97; \\ 0{,}12 \le D_{\hat{w}^{(г)}} \le 0{,}7; \\ 0{,}34 \le \sigma_{\hat{w}^{(г)}} \le 0{,}83. \end{cases} \tag{1.4}$$

Статистичні оцінки споживання електроенергії трамваями на 1 км пробігу мали значення:

$$\begin{cases} m_{\hat{W}^{(п)}} = 4{,}201; \\ D_{\hat{W}^{(п)}} = 0{,}347; \\ \sigma_{\hat{W}^{(п)}} = 0{,}589, \end{cases} \tag{1.5}$$

де $D_{\hat{W}^{(п)}}$ – статистична оцінка дисперсії випадкової величини споживання електроенергії трамваями на 1 км пробігу, а їхні довірчі інтервали –

$$\begin{cases} 3{,}82 \le m_{\hat{W}^{(п)}} \le 4{,}58; \\ 0{,}17 \le D_{\hat{W}^{(п)}} \le 0{,}94; \\ 0{,}41 \le \sigma_{\hat{W}^{(п)}} \le 0{,}97. \end{cases} \tag{1.6}$$

Досліджено також, що витрати електроенергії в значній мірі залежать від кваліфікації водіїв трамваїв, причому вони можуть суттєво коливатися при роботі на одному і тому ж маршруті (рис. 1.2).

Тому були побудовані математичні моделі для оцінки рівня споживання електроенергії трамваями на маршрутах. За результатами досліджень встановлено [20–22], що:

1) споживання електроенергії «усередненим» трамваєм депо адекватно описується авторегресійною моделлю 6-го порядку у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{W}_t^{(Д)} = &-0{,}307\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0{,}586\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} - 0{,}866\tilde{W}_{t-3}^{(Д)} - \\ &-0{,}482\tilde{W}_{t-4}^{(Д)} - 0{,}444\tilde{W}_{t-5}^{(Д)} - 0{,}514\tilde{W}_{t-6}^{(Д)} + a_t^{(Д)} \end{aligned} \tag{1.7}$$

з дисперсією білого шуму $\sigma_a^{(Д)2} = 0{,}5$ і трендом

$$\mu_t^{(Д)} = 34{,}818 + 2{,}215 \cdot \sin\left(0{,}524 \cdot (t-1) - 1{,}571\right); \tag{1.8}$$

2) споживання електроенергії трамваєм водія «К», що споживає максимальну кількість електроенергії по депо, описується авторегресійною моделлю 4-го порядку:

$$\begin{aligned} \tilde{W}_t^{(К)} = &-0{,}277\tilde{W}_{t-1}^{(К)} - 0{,}056\tilde{W}_{t-2}^{(К)} - \\ &-0{,}381\tilde{W}_{t-3}^{(К)} - 0{,}769\tilde{W}_{t-4}^{(К)} + a_t^{(К)} \end{aligned} \tag{1.9}$$

з дисперсією білого шуму $\sigma_a^{(К)2} = 0{,}75$ і трендом

$$\mu_t^{(К)} = 40{,}139 + 3{,}24 \cdot \sin\left(0{,}524 \cdot (t-1) - 1{,}571\right); \qquad (1.10)$$

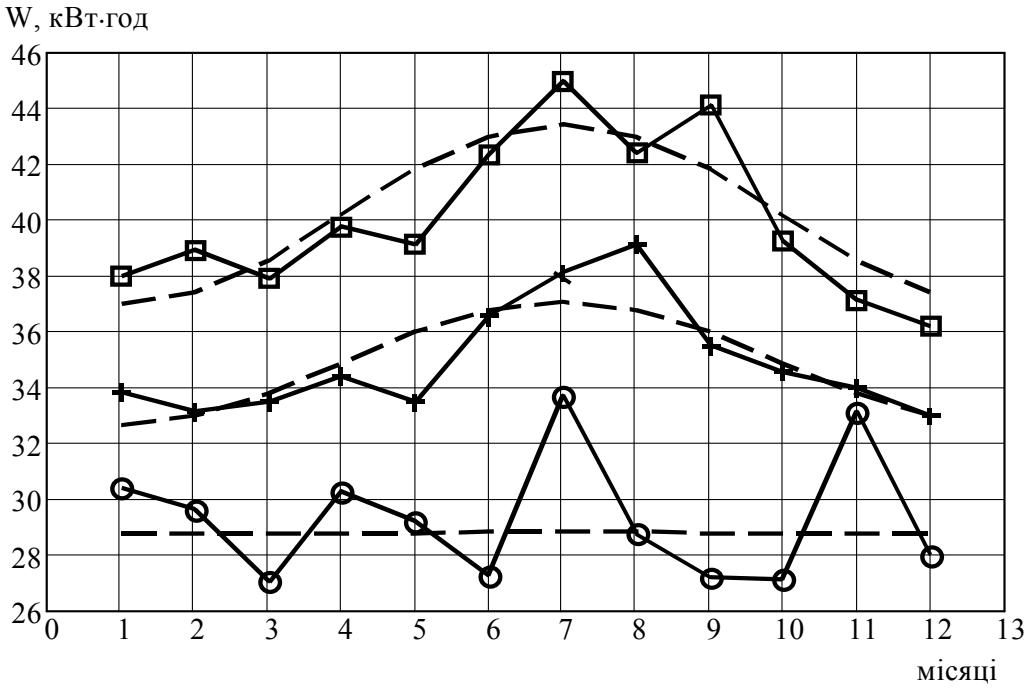


Рисунок 1.2 – Споживання електроенергії трамваями протягом досліджуваного періоду

3) споживання електроенергії трамваєм водія «Ч», що споживає мінімальну кількість електроенергії по депо, описується авторегресійною моделлю 4-го порядку:

$$\begin{aligned} \widetilde{W}_t^{(Ч)} = &-0{,}458\widetilde{W}_{t-1}^{(Ч)} - 0{,}343\widetilde{W}_{t-2}^{(Ч)} + \\ &+ 0{,}013\widetilde{W}_{t-3}^{(Ч)} + 0{,}298\widetilde{W}_{t-4}^{(Ч)} + a_t^{(Ч)} \end{aligned} \qquad (1.11)$$

з дисперсією білого шуму $\sigma_a^{(Ч)2} = 3{,}6$ і трендом

$$\mu_t^{(Ч)} = 28{,}733 + 0{,}021 \cdot \sin\left(0{,}524 \cdot (t-1) - 1{,}571\right), \qquad (1.12)$$

де $\widetilde{W}_t$ – центрований ряд спожитої електроенергії «усередненим» трамваєм ($\widetilde{W}_t^{(Д)}$ – для усередненого трамвая, $\widetilde{W}_t^{(К)}$ – для трамвая во-

дія «К», $\widetilde{W}_t^{(Ч)}$ – для трамвая водія «Ч»); a_t – імпульс білого шуму ($a_t^{(Д)}$ – для усередненого трамвая, $a_t^{(К)}$ – для трамвая водія «К», $a_t^{(Ч)}$ – для трамвая водія «Ч»).

За результатами аналізу рівня споживання електроенергії керівництво Вінницького комунального підприємства «Трамвайно-тролейбусне управління» розробило низку преміювальних заохочень для водіїв трамваїв, в результаті чого ситуація дещо покращилася. А це означає, що з часом могли змінитися й моделі, що адекватно описували б процес споживання електроенергії. Тобто потрібно здійснити їх перевірку.

1.3 Аналіз процесу струмознімання

Будь-який струмознімальний елемент відноситься до тих електричних апаратів, які впливають на експлуатаційну надійність всього об’єкта [23], а від якості процесу струмознімання залежить термін служби контактного проводу й бугеля пантографа, а також надійність електричної тяги вагона.

В трамваї струмознімальним елементом є його пантограф. В різних видах трамваїв використовуються штангові та бугельні пантографи або напівпантографи. Останні два різновиди знайшли більше практичне застосування. Задачі, які на них поставлені, є однаковими та й принцип роботи мало чим відрізняється. Тому технічні рішення щодо модернізації струмознімального елемента в даній роботі не розглядаються.

Незалежно від того, в якому режимі знаходиться вагон (струмознімання в режимі очікування, розгону, гальмування, нормального завантаження чи перевантаження), які кліматичні умови на нього діють (температура, вологість, ожеледиця), струмознімання завжди повинне бути задовільним.

Причин, які погіршують цей процес, достатньо багато. Вони мають різну фізичну природу. Основні з них наведені на рис. 1.3.

Процес струмознімання повинен задовольняти розв’язку одночасно дві взаємообернені задачі: з точки зору надійного та стійкого струмознімання контактний натиск повинен бути якомога більшим, а за умов мінімального зношення контактуючих матеріалів – по можливості якомога меншим, але не меншим значення, при якому забезпечується стійке протікання струму.

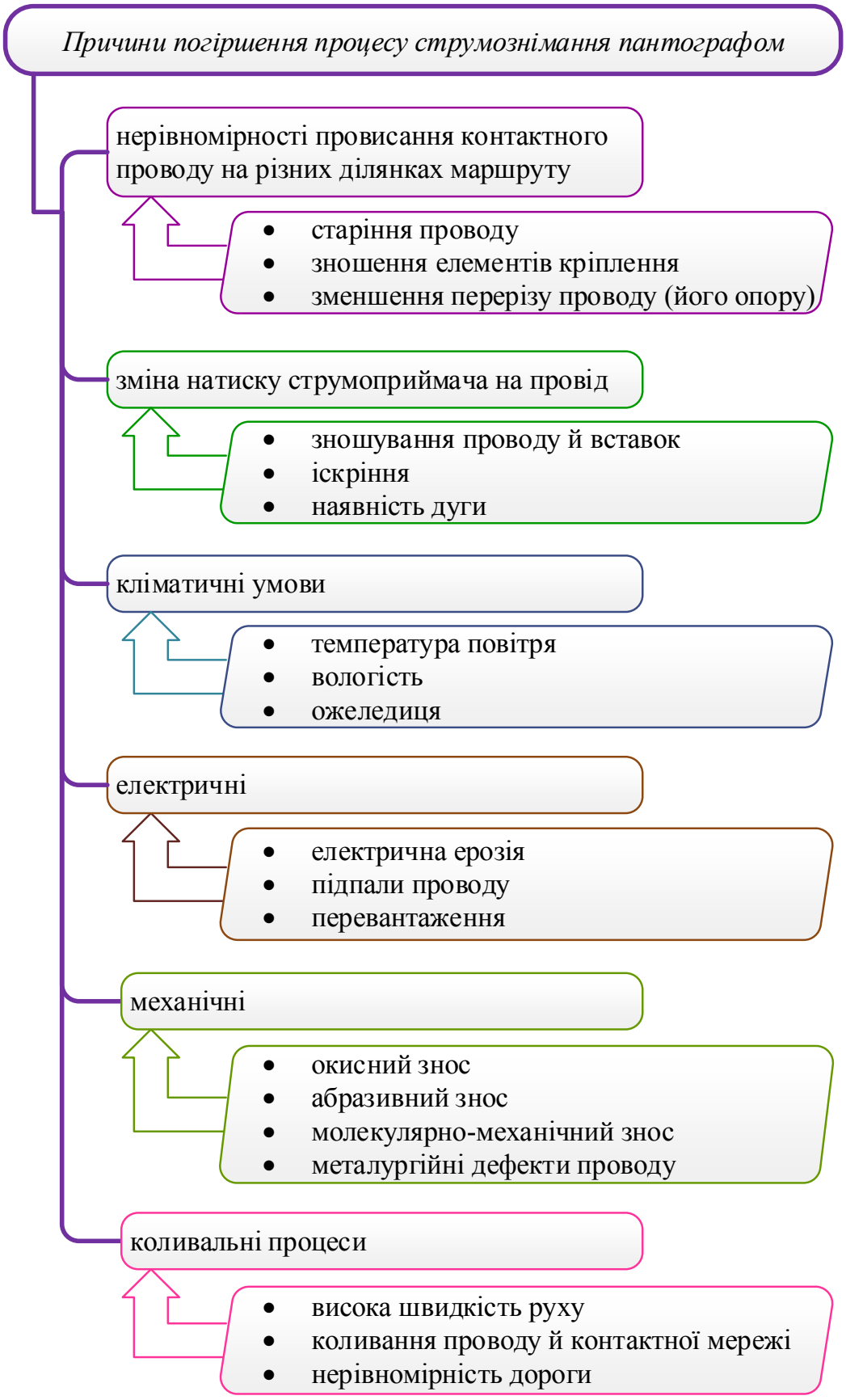


Рисунок 1.3 – Причини погіршення процесу струмознімання пантографом

Сказане гарно ілюструється (рис. 1.4) залежністю сумарних втрат ΔW в системі струмознімання від контактного натиску $P_к$ [24]: оптимальною є ділянка б-в, на ділянці а-б збільшуються втрати через підвищене електричне зношення вугільної вставки й проводу, на ділянці в-г збільшуються втрати через підвищене механічне зношення вугільної вставки й проводу.

Забезпечення розв'язання першої задачі характеризується достатньо високими показниками електричної тяги, а другої – зменшеними економічними витратами.

Реалізація надійного струмознімання між контактним проводом і пантографом супроводжується необхідністю контролю натягу контактного проводу та натиском струмоприймача на контактний провід, а реалізація зменшення економічних витрат – обмеженням часу простою вагону на зупинках із споживанням струму та часу руху в режимі тяги без перевантажень.

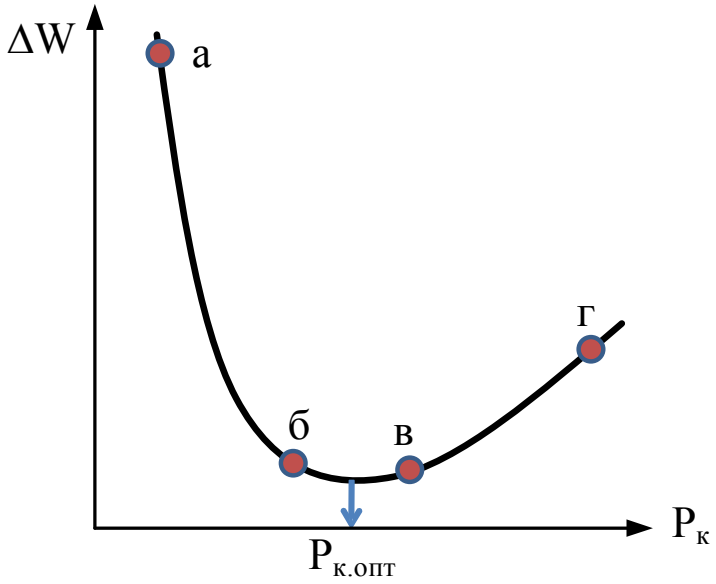


Рисунок 1.4 – Залежність сумарних втрат ΔW
в системі струмознімання від контактного натиску $P_к$

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що процес струмознімання пантографом трамвая є достатньо складним з точки зору забезпечення максимального натиску його робочою поверхнею на контактну мережу і водночас мінімізації електричних витрат. Крім

того важливим є врахування факторів, які впливають на цей процес. Зокрема, це стосується як контактної мережі, так і самого бугеля, які вже за великий проміжок часу суттєво зносилися, природних умов (вологості, температури тощо).

В роботі [25] запропоновано метод розрахунку взаємодії струмоприймача зі струмопроводом, який включає в себе розрахунок статичної та динамічної характеристик з урахуванням детермінованого впливу зі сторони стріл провисання струмопроводу.

В роботі [23] розглянуто критерії якості струмознімання, на основі чого встановлено, що основними критеріями стану контактної мережі є контактний натиск та коефіцієнти надійності й економічності струмознімання.

В проекті міждержавного стандарту [26] передбачено визначення середнього значення контактного натиску $P_{ср}$ за час, який містить n точок,

$$P_{ср} = \frac{\sum_{j=1}^{n} F_j}{n}, \tag{1.13}$$

де F_j – миттєве значення контактного натиску в точці j:

$$F_j = \sum_{i=1}^{k_f} F_{дi} + \frac{m}{k_a} \sum_{i=1}^{k_a} a_i, \tag{1.14}$$

де $F_{дi}$ – сила, виміряна і-м сенсором сили; a_i – прискорення, виміряне і-м сенсором прискорення; k_f – кількість сенсорів сили; k_a – кількість сенсорів прискорення; m – сума мас конструктивних елементів, які опираються на тензорезисторні силовимірювальні сенсори; і – номер сенсора.

Описані вище методики не враховують динаміку процесу струмознімання та впливу різних факторів, під дією чи в умовах яких цей процес відбувається.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА ПІДХОДІВ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТРАМВАЯМИ

2.1 Розробка лічильника електроенергії постійного струму для трамвая

На сьогоднішній день всіма підприємствами трамвайно-тролейбусних управлінь України аналіз спожитої енергії проводиться за щоденним, щотижневим або щомісячним показникам лічильників на вводах тягових підстанцій, що не дає можливості провести якісний аналіз економічності перетворення, передачі, споживання, а також втрат електроенергії.

Для порівняння кількості спожитої електроенергії різними транспортними засобами і встановлення норм споживання використовують різні критерії [27, 28], усереднення яких є причиною дуже приблизного підрахунку витрат енергоресурсів підрозділами підприємств, ускладнює складання загального балансу електроенергії по підприємству, завуальовує втрати і не дає можливості порівнювати діяльність споріднених підприємств. Тому актуальною постала задача створення пристрою – лічильника електроенергії постійного струму (ЛПС), який дозволив би точно вимірювати спожиту електроенергію рухомим складом на маршрутах.

Аналіз літературних джерел показав, що на терені колишнього Радянського Союзу були спроби створити такі лічильники, але через ненадійність, високу вартість та низку інших причин вони не знайшли масового застосування [29].

Тому постала необхідність розробки ЛПС з врахуванням вимог при його проектуванні:

– обчислення і видавання спожитої електричної енергії в дискретному вигляді з врахуванням коливання напруги контактної мережі в межах 400–720 В згідно з галузевим стандартом [24, 30];

– діапазон вхідного струму вимірювання не менший 500 А;

– діапазон вхідної напруги вимірювання до 1000 В у довготривалому режимі роботи і до 3500 В – не менше тривалості спрацювання релейного захисту підстанції;

– діапазон робочих температур від –35 °С до +65 °С;

– відносна вологість середовища до 90 %; похибка вимірювань не більша 2 %;

– напруга живлення ± (12–35) В;

– дискретність вимірювань 1 кВт·год.;

– здатність витримувати вібрації, допустимі для електрорухомого складу;

– повна безпека для обслуговуючого персоналу, зручність зчитування показів приладу, енергонезалежне збереження даних;

– невеликі габаритні розміри і маса; невисока вартість;

– міжповірочний термін не більше 2 роки;

– можливість застосування приладу на фідерах, що живлять контактну мережу (з відповідним вимірювальним елементом);

– придатність для автоматизованого зняття показів в перспективі;

– опір ізоляції між колами 600 В і 24 В не менше 20 МОм.

Математичну модель, що пропонується закласти у ЛПС, можна представити у вигляді стандартної формули [31]:

$$W = UIt, \qquad (2.1)$$

де W – енергія, що споживається споживачем постійного струму; U – напруга на вході кола; I – струм споживача; t – проміжок часу.

Ця математична модель реалізована у пристрої, структурна схема якого поданого на рис. 2.1 [32], де використані такі позначення: 1 – масштабний перетворювач струму $МП_I$; 2 – масштабний перетворювач напруги $МП_U$; 3 – блок живлення БЖ; 4 – перемножувач вхідних сигналів; 5 – перетворювач напруги в частоту; 6 – лічильник-дільник Л-Д; 7 – індикатор Ін.

Працює запропонований ЛПС таким чином. Значення струму I, що споживається, подається на масштабний перетворювач струму $МП_I$, на виході якого формується напруга U_I, пропорційна вхідному струму I. Напруга U цього споживача подається на масштабний перетворювач напруги $МП_U$, на виході якого, аналогічно попередньому, формується напруга U_U, пропорційна вхідній напрузі U. Сигнали U_I та U_U відповідно до виразу (2.1) перемножуються у блоці 4, на виході якого формується сигнал U_P, пропорційний спожитій потужності UI. В блоці 5 від-

бувається перетворення напруги U_P у відповідну частоту сигналу f, що подається на лічильник-дільник Л-Д, призначений для формування інтервалу часу та видачі лічильного імпульсу про спожиту енергію W. Лічильний імпульс, підсилений до необхідного рівня у тому ж блоці 6, надходить до індикатора Ін, який і видає числове значення спожитої енергії W.

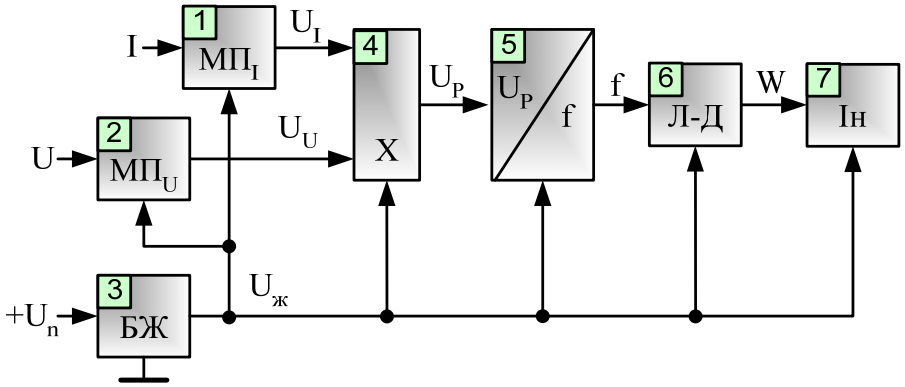


Рисунок 2.1 – Структурна схема ЛПС

Блоки 1, 2, 4–7 живляться напругою $U_ж$, яка подається з виходу блока живлення БЖ, на вхід якого подається деяка стала напруга $+U_n$ (24 В).

Струм I знімається із шунта 500 А (75 мВ) класу точності 0,5. Напруга U знімається із контактної мережі. Блок живлення БЖ отримує напругу із низьковольтної електричної системи трамвая.

Технічні характеристики ЛПС подані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики ЛПС

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання струму, А	1...1000
Діапазон вимірювання напруги, В	100…1000
Похибка вимірювання, %	2
Напруга живлення лічильника, В	+(10…35)
Споживана потужність, Вт	0,45
Діапазон робочих температур, °С	– 35…+65
Допустима відносна вологість, %	90
Поріг чутливості, мВ	2
Габаритні розміри, мм	220×100×80
Маса, кг	0,9

Схему підключення лічильника показано на рис. 2.2.

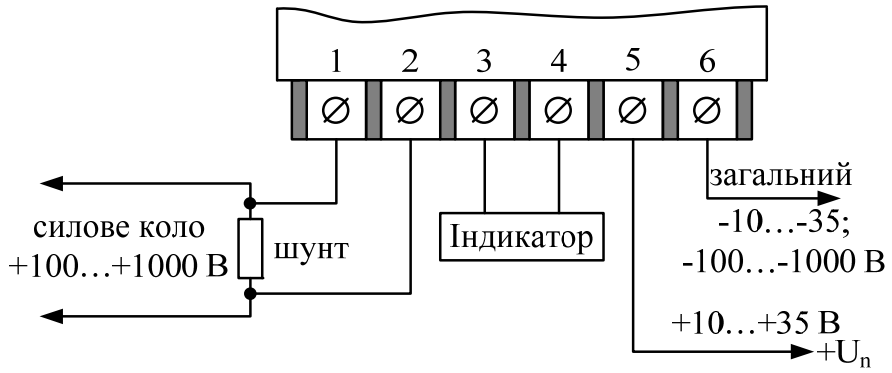


Рисунок 2.2 – Схема підключення лічильника

Впровадження ЛПС здійснено у Вінницькому комунальному підприємстві «Трамвайно-тролейбусне управління» ще в 1999 році. За цей період зібралася відповідна статистика по споживанню електроенергії трамвайним парком.

На рис. 2.3 показано тенденцію споживання електроенергії з 1995 р. Як видно, з моменту впровадження ЛПС, з 1999 р., наприклад по 2006 р, рівень електроспоживання трамваями знизився на 12,5 %. Такий спад пояснюється тим, що керівництво вказаного підприємства запровадило низку заходів щодо економії електроенергії, одним з яких є система преміювання [33].

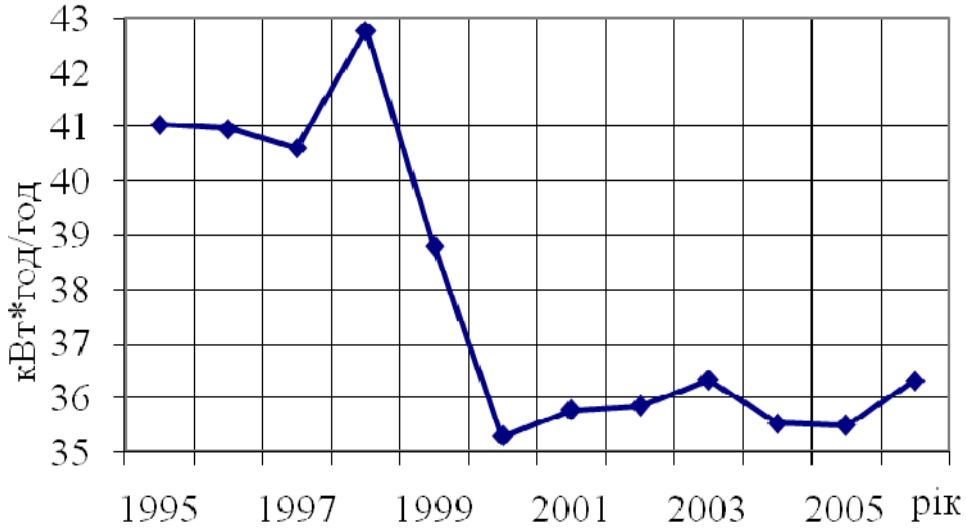


Рисунок 2.3 – Усереднене споживання електроенергії трамвайним парком Вінницького комунального підприємства «Трамвайно-тролейбусне управління» з 1995 р. по 2006 р.

2.2 Побудова емпіричного закону розподілу споживання електроенергії трамваями за годину

В роботах [19, 20] вже отримані деякі результати щодо характеру електроспоживання трамваями на маршрутах м. Вінниці. Однак вихідними даними для дослідження була статистика, зібрана в той період, коли водії трамваїв лише привчалися до економії електроенергії. Це стало можливим після вдалого впровадження системи обліку електроенергії по кожному вагону й кожному водію трамвайного депо за рахунок розміщення лічильників електроенергії безпосередньо у вагоні та преміювання кращих водіїв (трамваї яких споживали менший рівень електроенергії по відношенню до середнього по депо). За цей період процес електроспоживання суттєво змінився. Це вимагає додаткових досліджень для адекватної ідентифікації цього процесу.

Для аналізу використовуються усереднені статистичні дані споживання електроенергії трамваями типу КТ-4SU Вінницького комунального підприємства «Трамвайно-тролейбусного управління» поміс-ячно (з 01.01.2005 р. по 31.05.2006 поживання електроенергії W трамваями за годину з конкретними значеннями w за вказаний період має такі числові значення [34]:

$$\begin{aligned} w = \{&40{,}93;\ 41{,}87;\ 38{,}76;\ 32{,}72;\ 32{,}89;\ 32{,}31;\\ &31{,}88;\ 32{,}34;\ 32{,}76;\ 33{,}18;\ 36{,}78;\ 40{,}02;\\ &41{,}14;\ 43{,}11;\ 36{,}50;\ 34{,}23;\ 33{,}94\}, \end{aligned} \tag{2.2}$$

графічну інтерпретацію яких наведено на рис. 2.4.

Виділимо інтервали з діапазону значень W з врахуванням того, щоб мінімальне значення $w_{min} = 31{,}88$ попало в перший, а максимальне $w_{max} = 43{,}11$ – в останній інтервали. Отриманий варіаційний ряд вибірки електроспоживання трамваями за годину наведений в табл. 2.2, в якій частота $p_{(w)\,i}$ попадань випадкової величини W в кожний із шести виділених напіввідкритих інтервалів обчислена за формулою [35]:

$$p_{(w)i} = \frac{n_{(w)\,i}}{n}, \tag{2.3}$$

де n – сумарна кількість значень випадкової величини W; $n_{(w)\,i}$ – кількість значень W, які попали в σ_i напіввідкритий інтервал.

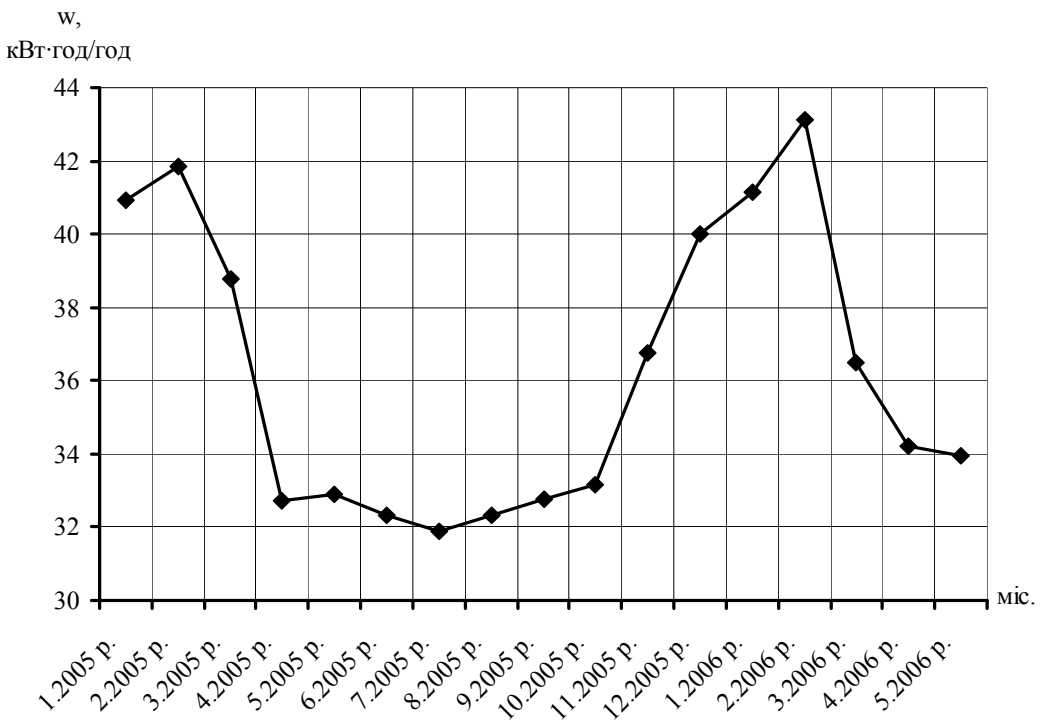


Рисунок 2.4 – Усереднені значення електроспоживання трамваями за годину по депо

Таблиця 2.2 – Варіаційний ряд вибірки (2.2) електроспоживання трамваями за годину

i	σ_i	$n_{(w)\,i}$	$p_{(w)\,i}$
1	[31–33)	6	0,352
2	[33–35)	3	0,176
3	[35–37)	2	0,118
4	[37–39)	1	0,059
5	[39–41)	2	0,118
6	[41–43)	2	0,118
7	[43–45)	1	0,059
Сума		17	1

Статистичні оцінки середнього значення m_w, дисперсії D_w та середньоквадратичного відхилення σ_w випадкової величини W [35]:

$$\begin{cases} m_w = \dfrac{1}{N} \cdot \sum\limits_{j=1}^{N} w, \\ D_w = \dfrac{1}{N-1} \cdot \sum\limits_{j=1}^{N} w^2 - m_w^2, \\ \sigma_w = \sqrt{D_w}. \end{cases} \qquad (2.4)$$

Результати розрахунку: $m_w = 36{,}2$; $D_w = 15{,}62$; $\sigma_w = 3{,}95$.

Гістограму варіаційного ряду (2.2), побудовану за даними табл. 2.2, представлено на рис. 2.5.

Проаналізувавши вид гістограми (рис. 2.5), висувається гіпотеза про логарифмічний нормальний закон розподілу споживання електроенергії трамваями за годину.

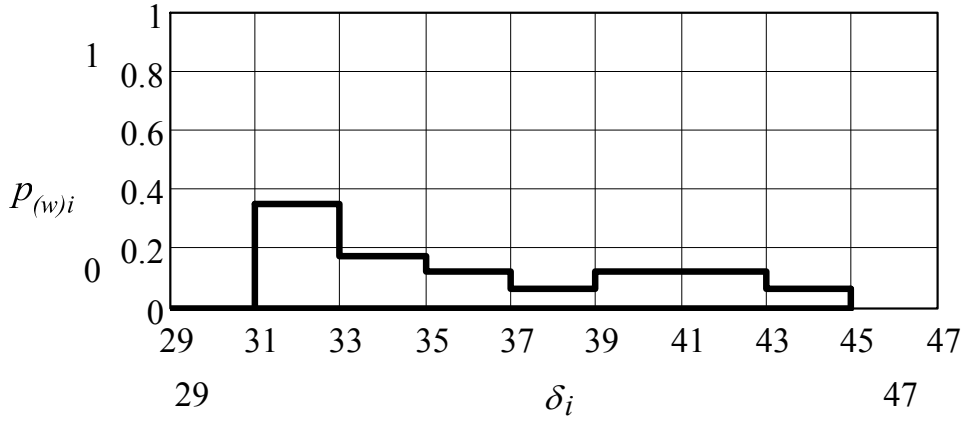


Рисунок 2.5 – Гістограма варіаційного ряду вибірки електроспоживання трамваями за годину

Для логарифмічного перетворення вибірки (2.2) використаємо оператор 10lgw:

$$\tilde{w} = 10 \lg w. \tag{2.5}$$

За таких умов отримаємо:

$$\begin{aligned} \tilde{w} = \{&16{,}12;\ 16{,}22;\ 15{,}88;\ 15{,}15;\ 15{,}17;\ 15{,}09;\\ &15{,}04;\ 15{,}1;\ 15{,}15;\ 15{,}21;\ 15{,}67;\ 16{,}02;\\ &16{,}14;\ 16{,}35;\ 15{,}62;\ 15{,}34;\ 15{,}31\}. \end{aligned} \tag{2.6}$$

Статистичні оцінки перетвореного ряду: $m_{\tilde{w}} = 15{,}56$; $D_{\tilde{w}} = 0{,}22$; $\sigma_{\tilde{w}} = 0{,}47$.

Перевірку гіпотези про нормальний логарифмічний закон розподілу електроспоживання трамваями за годину здійснюватимемо за χ^2-критерієм Пірсона, відповідно до якого статистика Q^2 визначається як [35]

$$Q^2_{(\tilde{w})} = \sum_{i=1}^{h_{(\tilde{w})}} \frac{\left(n^*_{(\tilde{w})_i} - m_{(\tilde{w})_i}\right)^2}{m_{(\tilde{w})_i}}, \tag{2.7}$$

де $h_{(\tilde{w})}$ – кількість інтервалів для випадкової величини $\tilde{W}$ з ненульовим значенням частоти попадання в ці інтервали.

З використанням функції нормального розподілу $\Phi(\tilde{w}_i)$ [35] розрахунок статистики $Q^2_{(\tilde{w})}$ наведено в табл. 2.3 і табл. 2.4.

Таблиця 2.3 – Розрахунок частоти $p^*_{(\tilde{w})_i}$

$\tilde{w}_i$	$\frac{\tilde{w}_i - m_{\tilde{w}}}{\sigma_{\tilde{w}}}$	$\Phi\left(\frac{\tilde{w}_i - m_{\tilde{w}}}{\sigma_{\tilde{w}}}\right)$	$p^*_{(\tilde{w})_i}$
$-\infty$	$-\infty$	0	
15,3	–0,55	0,29116	0,291
15,6	0,09	0,53586	0,245
15,9	0,72	0,76424	0,228
16,2	1,36	0,91308	0,149
∞	∞	1	0,087
Сума	–	–	1

Таблиця 2.4 – Розрахунок статистики $Q^2_{(\tilde{w})}$

Інтервали	$n^*_{(\tilde{w})_i}$	$p^*_{(\tilde{w})_i}$	$m_{(\tilde{w})_i}$	$\frac{\left(n^*_{(\tilde{w})_i} - m_{(\tilde{w})_i}\right)^2}{m_{(\tilde{w})_i}}$
$-\infty$…15,3	7	0,291	4,950	0,85
15,3…15,6	2	0,245	4,160	1,12
15,6…15,9	3	0,228	3,882	0,20
15,9…16,2	3	0,149	2,530	0,09
16,2…∞	2	0,087	1,478	0,18
Сума	17	1	17	2,43

В табл. 2.4 $m_{(\tilde{w})_i}$ – теоретична частота попадання значень $\tilde{W}$ в кожен і-й інтервал:

$$m_{(\tilde{w})_i} = n \cdot p^*_{(\tilde{w})_i}. \qquad (2.8)$$

З табл. 2.4 отримуємо значення статистики $Q^2_{(\tilde{w})} = 2{,}43$.

Для моделі нормального логарифмічного закону розподілу маємо кількість незалежних параметрів $r = 2$ ($m_{(\tilde{w})}$ і $\sigma_{(\tilde{w})}$) і $h_{(\tilde{w})} = 5$, а тому кількість степенів вільності $g_{(\bar{z})}$ статистики $Q^2_{(\tilde{w})}$ відповідно до [35] становитиме $g_{(\bar{z})} = 2$. Задаючись рівнем значимості $\alpha = 0{,}1$ з $g_{(\bar{z})} = 2$ за таблицею χ^2-розподілу Пірсона [35] знаходимо критичну область для статистики $Q^2_{(\tilde{w})кр} > 4{,}605$. Оскільки $Q^2_{(\tilde{w})} < Q^2_{(\tilde{w})кр}$, то гіпотеза про нормальний логарифмічний розподіл споживання електроенергії трамваями за годину є прийнятною.

Густина імовірності випадкової величини $\tilde{W}$ для моделі нормального закону розподілу мала б вигляд

$$f(\tilde{w}) = \frac{1}{\sigma_{(\tilde{w})}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(\tilde{w})-m_{(\tilde{w})}}{\sigma_{(\tilde{w})}}\right)^2}. \qquad (2.9)$$

Модель нормального логарифмічного закону для $\tilde{W}$ буде справедлива в формі (2.9) і (2.5).

Визначимо довірчі інтервали для статистичних оцінок нормального логарифмічного закону розподілу з довірчою імовірністю $\gamma = 0{,}98$. З таблиці розподілу Стьюдента [35] знайдемо величину $t_\gamma = 2{,}58$.

За таблицею χ^2-розподілу знайдемо дві пари чисел u_1 і u_2, які задовольняли б умову

$$P(u_1 \le \chi^2 \le u_2) = \gamma \qquad (2.10)$$

з симетричністю по ймовірності

$$\begin{gathered} P(\chi^2 < u_1) = P(\chi^2 > u_2) = \frac{1}{2}(1-\gamma), \\ P(\chi^2 > u_1) = \frac{1}{2}(1+\gamma). \end{gathered} \qquad (2.11)$$

Використовуючи таблицю χ^2-розподілу з роботи [35], отримаємо $u_1 = 5{,}812$; $u_2 = 32{,}0$.

Точність оцінки розраховуємо за формулою [35]

$$\Delta_{(\tilde{w})} = t_\gamma \frac{\sigma_{(\tilde{w})}}{\sqrt{n}}, \qquad (2.12)$$

$$\Delta_{(\tilde{w})} = 2{,}58 \cdot \frac{0{,}47}{\sqrt{17}} = 0{,}29.$$

Знаходимо довірчі інтервали для середнього значення $m_{\tilde{w}}$, дисперсії $D_{\tilde{w}}$ та стандартного відхилення $\sigma_{\tilde{w}}$ за відповідними формулами [35]:

$$\left[m_{\tilde{w}} - t_\gamma \frac{\sigma_{\tilde{w}}}{\sqrt{n}} \right] \le m_{\tilde{w}} \le \left[m_{\tilde{w}} + t_\gamma \frac{\sigma_{\tilde{w}}}{\sqrt{n}} \right],$$

$$\frac{(n-1)D_{\tilde{w}}}{u_2} \le D_{\tilde{z}} \le \frac{(n-1)D_{\tilde{w}}}{u_1}, \qquad (2.13)$$

$$\frac{\sigma_{\tilde{w}}\sqrt{n-1}}{\sqrt{u_2}} \le \sigma_{\tilde{w}} \le \frac{\sigma_{\tilde{w}}\sqrt{n-1}}{\sqrt{u_1}}.$$

В результаті розрахунків отримаємо такі довірчі інтервали [34]:

$$\begin{cases} 15{,}27 \le m_{\tilde{w}} \le 15{,}85; \\ 0{,}11 \le D_{\tilde{w}} \le 0{,}61; \\ 0{,}33 \le \sigma_{\tilde{w}} \le 0{,}78. \end{cases} \qquad (2.14)$$

2.3 Синтез авторегресійних математичних моделей процесу споживання електроенергії трамваями на маршрутах

Професійність водіїв суттєво сприяє зменшенню загального рівня електроспоживання трамваями на маршрутах, про що і свідчать реальні дані по Вінницькому трамвайному депо, проілюстровані на рис. 2.6, на якому показано рівні електроспоживання $W_t^{(K)}$ трамвая, водій якого є одним з найкращих в депо, та середньостатистичний $W_t^{(C)}$ в депо за період із жовтня по травень 2006 року [34].

Математичні моделі споживання електроенергії трамваєм будемо синтезувати у вигляді суми тренду та авторегресії порядку p, яку для центрованого часового ряду $\tilde{W}_t$ будемо шукати у вигляді:

$$\widetilde{W}_t = \phi_t \widetilde{W}_{t-1} + \phi_2 \widetilde{W}_{t-2} + \ldots + \phi_p \widetilde{W}_{t-p} + a_t, \qquad (2.15)$$

де $\phi_1, \phi_2, \ldots, \phi_p$ – коефіцієнти авторегресії порядку p; a_t – імпульс білого шуму [36, 37].

Для розв'язання поставленої задачі нам, насамперед, необхідно визначити коефіцієнти $\phi_1, \phi_2, \ldots, \phi_p$ виразу (2.15). Це можна зробити, використовуючи матричні рівняння Юла–Уокера [36, 37]:

$$M_k \cdot \Phi_k = \rho_k, \qquad (2.16)$$

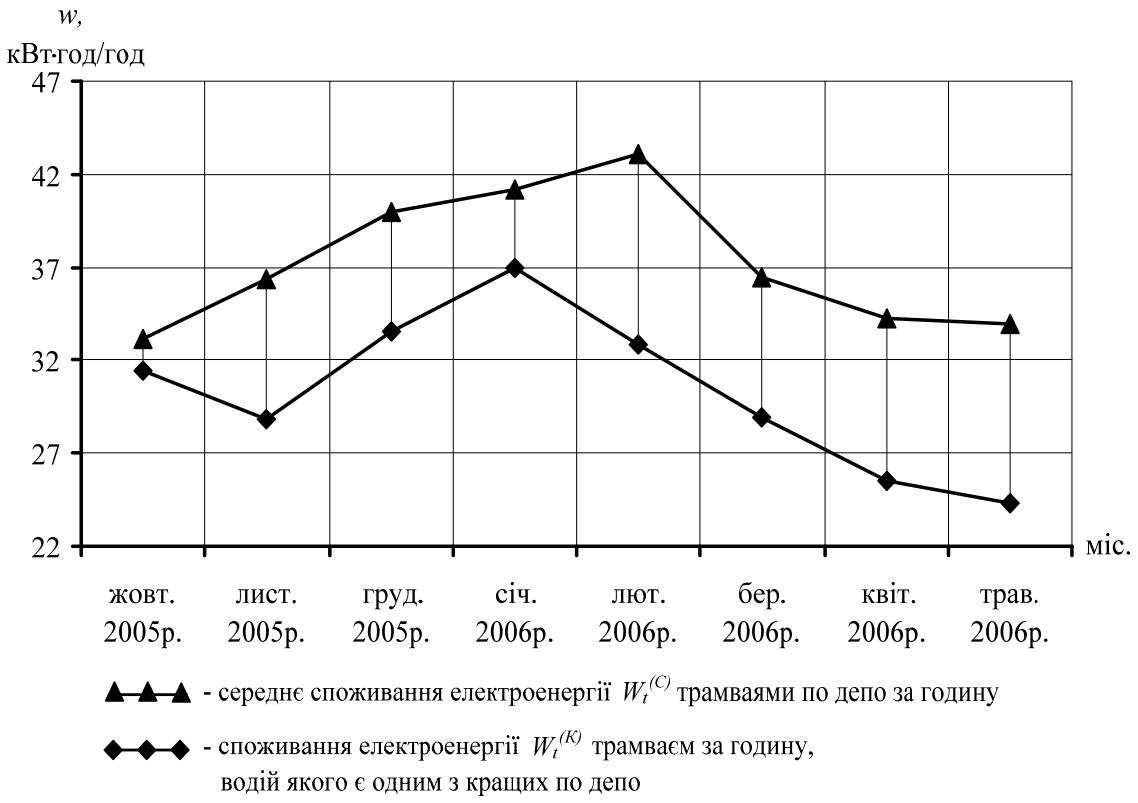


Рисунок 2.6 – Електроспоживання трамваями протягом досліджуваного періоду

де $M_k = \begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & \rho_0 & \rho_1 & \cdots & \rho_{p-2} \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_0 & \cdots & \rho_{p-3} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \rho_{p-3} & \cdots & \rho_0 \end{bmatrix}$ – квадратна матриця розміром

$(p \times p)$ значень коефіцієнтів автокореляції для часового ряду $\widetilde{W}_t$;

$\Phi_k = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \dots \\ \phi_p \end{bmatrix}$ – матриця-стовпчик розміром $(p \times 1)$ коефіцієнтів ϕ_k для рівняння авторегресії (2.16); $\rho_k = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \dots \\ \rho_p \end{bmatrix}$ – матриця-стовпець розміром $(p \times 1)$ коефіцієнтів автокореляції часового ряду $\widetilde{W}_t$, які можна визначити за формулою

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}, \tag{2.17}$$

де γ_k – коефіцієнти автоковаріації, розраховувати які будемо за формулою

$$\gamma_k = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1}^{N-k} \widetilde{W}_t \, \widetilde{W}_{t+k}, \tag{2.18}$$

де N – кількість статистичних даних; $\widetilde{W}_t$ – центрований часовий ряд, який можна отримати за допомогою виразу

$$\widetilde{W}_t = W_t - \mu_t, \tag{2.19}$$

де μ_t – тренд часового ряду W_t , який для нашої задачі можна знайти із виразу

$$\mu_t = A_0 + A \sin\left(\omega(t-1) + \psi\right), \tag{2.20}$$

де A_0, A – середнє значення й амплітуда синусоїди відповідно; ω – частота:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \tag{2.21}$$

де T – період (T = 12 місяців); ψ – фаза (для вибраного ряду $\psi = 0$).

У виразі (2.20) параметр t зсунуто на одну одиницю назад через те, що відлік місяця ми беремо не з величини 0, а з 1.

Маючи числові значення частоти ω та фази ψ, коефіцієнти синусоїди A_0 й A легко знайти за стандартною процедурою методу найменших квадратів, закладеною в кожній версії Mathcad.

Зрозуміло, що у виразі (2.17) величина

$$\gamma_0 = \sigma_W^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{t=1}^{N}(W_t - \mu_t)^2 \tag{2.22}$$

є дисперсією часового ряду W_t .

Розв'язок рівнянь (2.16) Юла-Уокера можна знайти у вигляді [37]

$$\Phi_p = M_p^{-1}\rho_p . \tag{2.23}$$

Для визначення гаусового білого шуму a_t з нульовим середнім значенням та дисперсією σ_a^2 скористаємося формулою

$$\sigma_a^2 = \sigma_W^2 - \phi_1\gamma_1 - \phi_2\gamma_2 - \ldots - \phi_p\gamma_p . \tag{2.24}$$

Використовуючи вище викладений алгоритм, синтезовано авторегресійні моделі для вибраного часового ряду. Коефіцієнти авторегресії та дисперсії білого шуму для авторегресійних моделей наведені в табл. 2.5 [34].

Таблиця 2.5 – Авторегресійні моделі середнього споживання електроенергії трамваями депо

Порядок	Числові значення параметрів авторегресії							
p	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7	$\sigma_a^{(C,\,p)2}$
1	–0,07							2,97
2	–0,05	–0,3						2,71
3	–0,09	–0,31	0,17					2,63
4	–0,11	–0,25	0,18	–0,12				2,60
5	–0,17	–0,21	0,09	–0,14	0,27			2,39
6	–0,3	–0,13	0,04	–0,02	0,2	–0,32		2,11
7	0,17	–0,52	0,26	–0,17	0,67	–0,23	–1,4	–3,62

З табл. 2.5 випливає, що середнє споживання електроенергії трамваями депо адекватно описується авторегресійною моделлю 6-го порядку у вигляді [34]

$$\begin{aligned}\widetilde{W}_t^{(C)} = &-0{,}3\widetilde{W}_{t-1}^{(C)} - 0{,}13\widetilde{W}_{t-2}^{(C)} + 0{,}04\widetilde{W}_{t-3}^{(C)} - \\ &- 0{,}02\widetilde{W}_{t-4}^{(C)} + 0{,}2\widetilde{W}_{t-5}^{(C)} - 0{,}32\widetilde{W}_{t-6}^{(C)} + a_t^{(C)}\end{aligned} \qquad (2.25)$$

з дисперсією білого шуму $\sigma_a^{(C)2} = 2{,}11$, а тренд має вигляд:

$$\mu_t^{(C)} = 34{,}82 + 6{,}18 \cdot \sin\left(0{,}524 \cdot (t-1)\right). \qquad (2.26)$$

2.4 Автоматизація процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах

2.4.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

Для працівників депо безпосереднє використання розроблених методики та моделей для кожного з водіїв трамваїв, а їх, наприклад, у Вінницькому комунальному підприємстві «Трамвайно-тролейбусне управління» понад 400 осіб, є достатньо громіздким процесом. Тому постає нова задача: розробити підхід до формалізації та автоматизації процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах.

2.4.2 Розробка підходу до формалізації і автоматизації процесу

Для розв'язання поставленої задачі прийнято такі положення щодо формалізації вхідних даних:

– дані повинні фіксуватись за кожен місяць експлуатації по окремо взятому трамваю;

– дані, за якими має будуватись регресійна математична модель, повинні утворювати повний динамічний ряд;

– значення варіантів динамічного ряду, що характеризують відповідні часові інтервали, повинні бути представлені у вигляді «01.MM.YYYY», де MM – порядковий номер місяця, YYYY – рік.

З оглядом на виконання вимог формалізації даних та відповідно до розробленої математичної моделі [19], підхід до автоматизації зазначеного процесу можна виразити такою послідовністю операцій:

1) введення і верифікація даних;
2) вибір масиву даних для обробки;

3) проведення розрахунку тренду для вибраного масиву динамічних даних;

4) визначення значень центрованого ряду та побудова відповідного графіка;

5) розрахунок значення дисперсії даних;

6) визначення коефіцієнтів автоковаріації, автокореляції та імпульсу білого шуму;

7) побудова авторегресійних математичних моделей та ідентифікація оптимальної.

Для практичної реалізації вказаного підходу потрібно використати програмний продукт, який має відповідати таким основним вимогам:

– низька вартість і широка розповсюдженість;

– простота у використанні, що не потребує глибоких знань в даному середовищі;

– зручність в обробці даних як для поставленої задачі, так і для допоміжних розрахунків, потреба у яких може виникнути, наприклад, для досліджень наукового характеру;

– можливість легкого виведення потрібної інформації на друк;

– візуалізація отриманих результатів;

– конвертація як вхідних, так і розрахункових даних.

Звичайно, практично кожен сучасний математичний пакет прикладних програм деякою мірою підходить для такої мети, за винятком, можливо, перших двох пунктів, причому для більшості підприємств визначальною є перша вимога.

Для розробки програмного пакета за основу пропонується використати редактор електронних таблиць Microsoft Excel, його математичні можливості і можливості створення автоматизованого інтерфейсу користувача на базі інтеграції цього середовища з середовищем програмування Microsoft Visual Basic for Application. Головною перевагою цього пакета є те, що на його придбання не потрібно витрачати додаткові кошти, адже кожне підприємство його вже має, оскільки свою документацію веде саме в пакеті програм Microsoft Office, до складу якого входять вказані середовища.

2.4.3 Практична реалізація запропонованого підходу

Виходячи із розроблених в роботах [19, 22] регресійних математичних моделей, створено програму «ModelAvtoreg» [38], що дозволяє

розв’язати поставлену задачу. Файл програми містить три листи в Microsoft Excel [39]:

1) «Початкові дані»;
2) «Обробка даних»;
3) «Результат».

Перший лист «Початкові дані» (рис. 2.7) призначено для введення, накопичення і впорядкування даних спостережень.

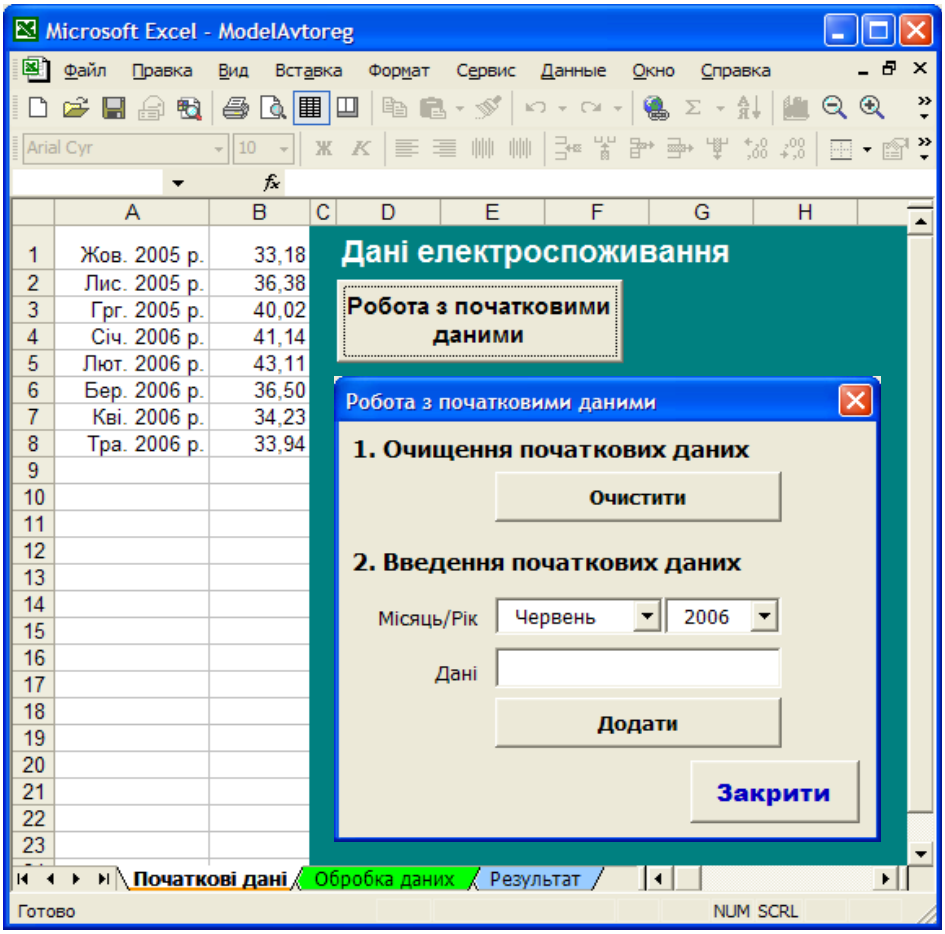


Рисунок 2.7 – Вигляд листа «Початкові дані»

Елементи листа дозволяють виконувати такі операції:

– вводити дані про кількість спожитої електроенергії трамваєм як за попередні місяці, так і за поточний місяць;

– за необхідності корегувати введені дані.

При натисканні на кнопку «Робота з початковими даними» (див. рис. 2.7), з’являється вікно з однойменною назвою (див. рис. 2.7), в якому автоматично пропонується дата для введення числових даних про кількість спожитої електроенергії за наступний місяць (з оглядом на дату останнього введеного місяця). Якщо з тих чи інших причин

трамвай протягом даного місяця не був на маршруті, є можливість змінити дату.

Елементи другого листа «Обробка даних» (рис. 2.8) виконують функції підготовки набору даних до моделювання, обчислення параметрів математичної моделі і відображення вибраних даних та результатів попередньої обробки.

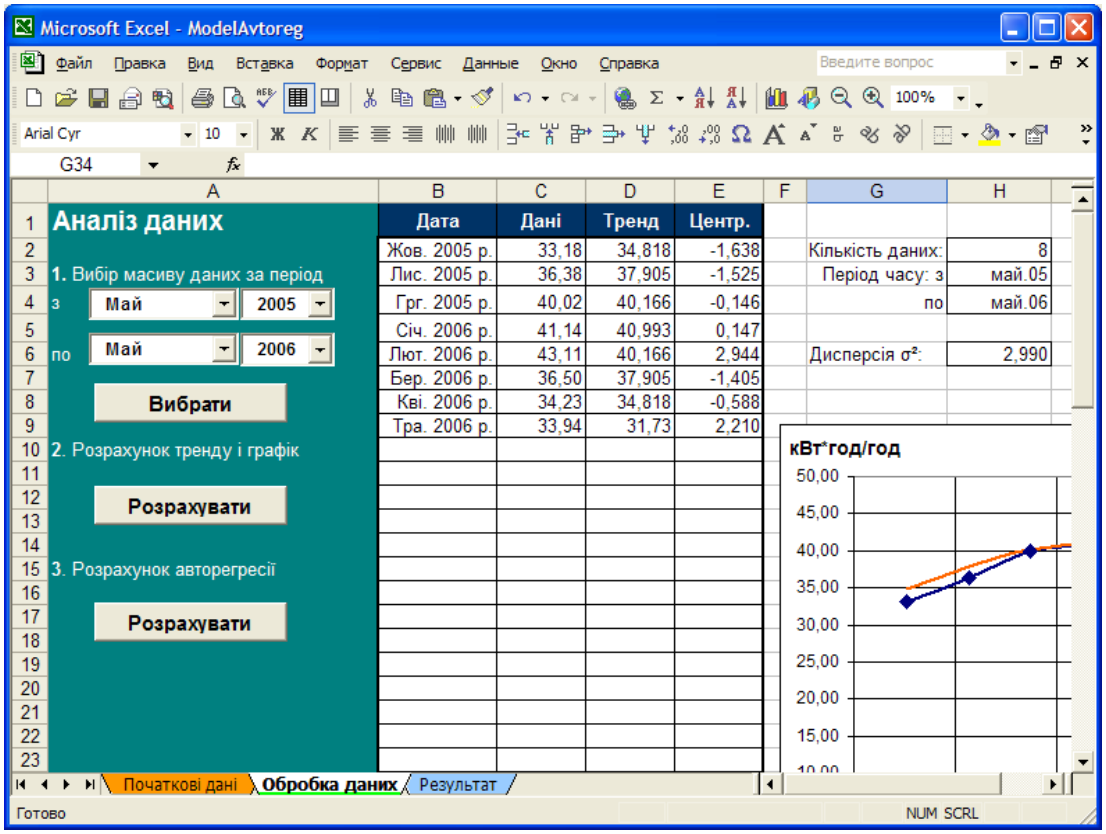


Рисунок 2.8 – Вигляд листа «Обробка даних»

На першому кроці «1. Вибір масиву даних за період» можна вибрати потрібний масив даних для аналізу, задаючи відповідний часовий діапазон. При натисканні кнопки «Вибрати»:

а) в колонках B і C (див. рис. 2.8) формуються всі числові значення, що відповідають вибраному часовому проміжку (в колонці C – значення, а в колонці B – відповідні дати). Якщо у вказаному діапазоні присутній пропущений місяць (місяці), то для аналізу вибираються лише значення, що починаються із початкової вибраної дати до останньої перед пропущеним місяцем;

б) у комірці H2 автоматично підраховується кількість вибраних статистичних даних.

На другому кроці «2. Розрахунок тренду, побудова графіка» при натисканні на кнопку «Розрахувати»:

– розраховується дисперсія вибірки (результат розміщується в комірці H6);

– розраховується тренд по вибраних даних (результат відображується в колонці D);

– відбувається центрування вибраних даних (результат відображається в колонці E);

– будується графік, що відображає тенденцію споживання електроенергії трамваєм протягом заданого часового діапазону та тренд (графік розміщується по праву сторону від центрованого ряду – рис. 2.8, рис. 2.9).

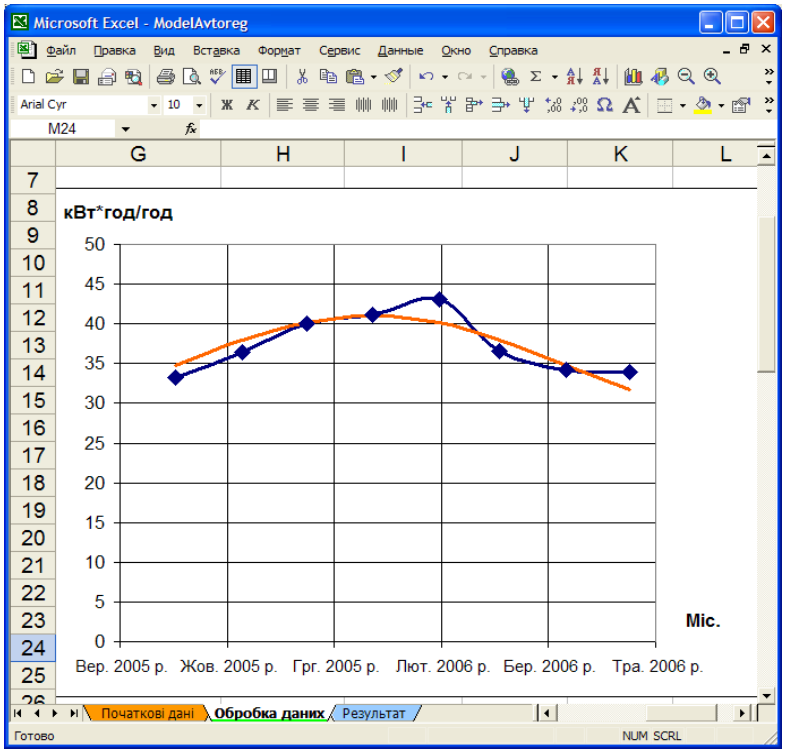


Рисунок 2.9 – Графік, що відображає тенденцію споживання електроенергії трамваєм протягом заданого часового діапазону

На третьому кроці «3. Розрахунок авторегресії» при натисканні на відповідну кнопку «Розрахувати» після виконання операцій з’являється повідомлення, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 2.10, та програма автоматично переключається на лист «Результат» (рис. 2.11), на якому в діапазоні колонок B–W розміщуються регресійні моделі процесу споживання електроенергії, в колонці X –

значення дисперсії білого шуму відповідного порядку моделі, а в колонці Y – імпульс самого білого шуму.

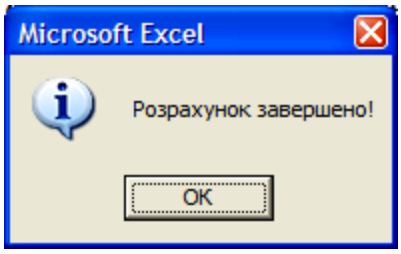


Рисунок 2.10 – Повідомлення, що з’являється в результаті натискання на кнопку «Розрахувати» третього кроку

Третій лист «Результат» (рис. 2.11) призначено для автоматичної ідентифікації оптимальної регресійної моделі та прогнозування рівня електроспоживання на заданий користувачем термін.

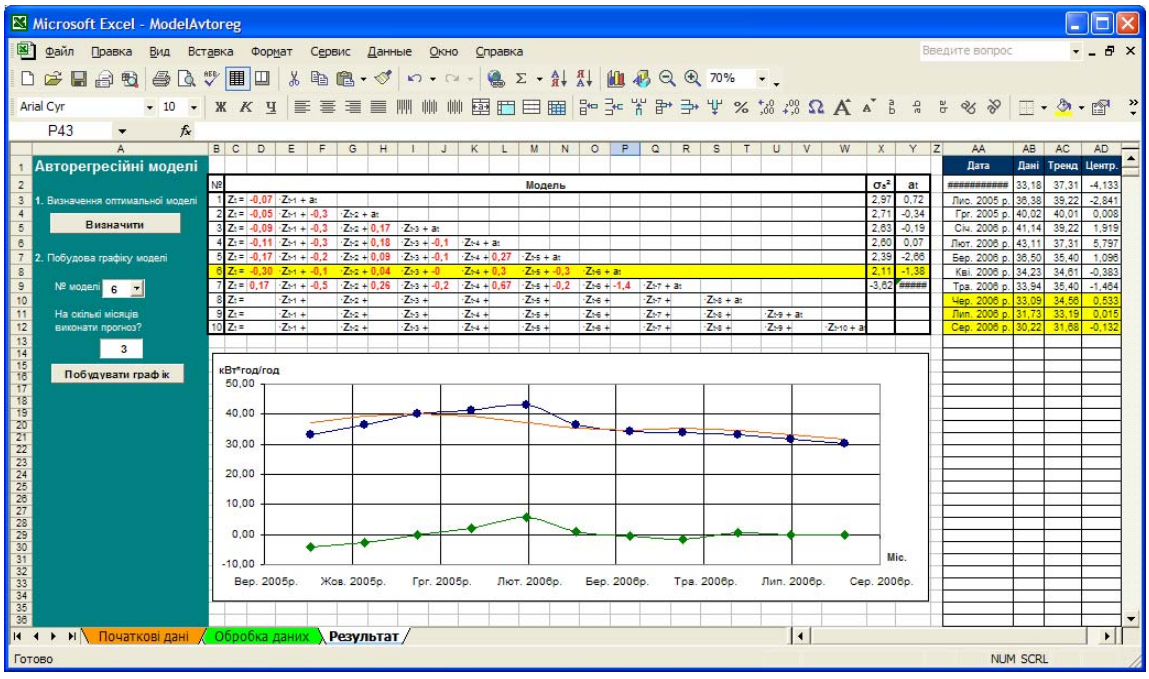


Рисунок 2.11 – Вигляд листа «Результат»

При натисканні на кнопку «Визначити» (див. рис. 2.11) програма виконує пошук оптимальної регресійної моделі з виданням результату у вигляді повідомлення (рис. 2.12) та його внесення в відповідну комірку (№ моделі) й виділяє жовтим кольором саму оптимальну регресійну математичну модель (див. рис. 2.11). Крім того, програма дозволяє оператору самостійно вибрати стартовий порядок моделі, який в процесі оптимізації уточнюється.

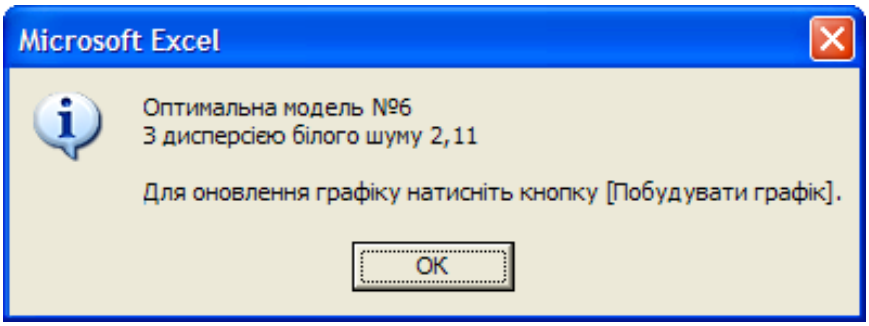


Рисунок 2.12 – Результат пошуку оптимальної моделі

Процес визначення оптимальної регресійної математичної моделі процесу споживання електроенергії трамваєм на маршруті на цьому кроці закінчується. Наступним кроком є процес прогнозування кількості спожитої електроенергії на наступні місяці. Для цього необхідно лише внести потрібне число в комірку з назвою «На скільки місяців виконати прогноз?» (на рис. 2.11 це «3») та натиснути на кнопку «Побудувати графік».

В результаті відбувається процес прогнозування споживання кількості електроенергії на вибраний період з побудовою відповідного графіка та ідентифікацією числових значень, які вносяться автоматично в комірки колонок AA–AD нижче вибраних даних із заливкою в кольорі (див. рис. 2.11).

2.5 Зниження електроспоживання трамвая КТ 4СУ за рахунок модернізації обмотки якоря двигуна двигун-генератора SMD 5001

2.5.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

Згідно з технічною документацією на трамвай КТ-4СУ [40], двигун-генератор типу SMD 5001 з вентиляторами на валу призначений для охолодження тягових двигунів і опорів прискорювача, для живлення електричних кіл трамвая і для зарядки акумуляторної батареї, причому основне призначення генератора двигун-генератора – зарядка акумуляторних батарей. Вентилятори, що розміщені на валу двигун-генератора, одночасно охолоджують і сам двигун-генератор. Двигун (послідовного збудження) і генератор (паралельного збудження) являють собою чотириполюсні машини з додатковими полюсами, змонтовані на одному валу.

З метою зменшення електроспоживання трамваєм пропонується модифікувати схему обмотки якоря двигуна двигун-генератора SMD 5001 таким чином, щоб зменшилася його частота обертання. При цьому зменшиться споживаний струм двигуна, а як наслідок, і вихідна потужність генератора. Але цієї потужності повинно вистачити на зарядку акумуляторних батарей, що здійснюється при напрузі 24 В та струмі зарядки до 50 А, а потік повітря вентилятора має бути достатнім для охолодження прискорювача та тягового двигуна (0,125 $м^3/с$).

2.5.2 Розв'язання поставленої задачі

Як відомо [41], якщо знехтувати насиченням магнітного кола машини постійного струму, то з невеликою похибкою залежність магнітного потоку $\Phi_Д$ від стуму збудження $I_{зД}$ можна вважати лінійною, тобто $\Phi_Д = k_{фД} I_{зД}$, де $k_{фД}$ – коефіцієнт пропорційності потоку. Для двигуна послідовного збудження струм збудження $I_{зД}$ є струмом якоря $I_{аД}$ і тому $\Phi_Д = k_{фД} I_{зД} = k_{фД} I_{аД.}$ Тоді швидкісна характеристика для такого двигуна має вигляд:

$$n = \frac{U_Д - R_{аД\Sigma} I_{аД}}{c_{еД}} = \frac{U_Д - R_{аД\Sigma} I_{аД}}{c_{еД} k_{фД} I_{аД}}, \qquad (2.27)$$

де $U_Д$ – напруга двигуна; $R_{аД\Sigma}$ – сумарний опір якірного кола двигуна (включає опір обмотки якоря $R_{аД}$, опір обмотки збудження $R_{зД}$ двигуна та опір додаткових полюсів $R_{д.п.Д}$, перехідний опір щіткових контактів $R_{щ}$); $C_{еД}$ – конструктивна стала машини.

Проаналізувавши вираз (2.27), можна прийти до висновку, що для зменшення частоти обертання двигуна і в той же час для зменшення струму споживання $I_{аД}$ потрібно збільшити значення опору $R_{аД\Sigma}$.

Звичайно, найпростішим способом реалізації сказаного вище є вмикання в коло двигуна додаткового опору. Але при цьому матимемо додаткові теплові втрати на цьому ж опорі. Тому потрібно збільшувати значення $R_{аД\Sigma}$ шляхом збільшення або $R_{аД}$, або $R_{зД}$, або $R_{д.п.Д}$.

Збільшити значення опорів обмотки додаткових полюсів або ж обмотки збудження (а це означає, згідно з відомою формулою [41]

$$R = \rho \frac{L}{S}, \qquad (2.28)$$

де ρ – питомий опір; L – довжина провідника; S – площа поперечного перерізу, збільшити довжину обмотувального проводу) не складає труднощів з технічної сторони виконання цієї операції.

Однак такі зміни спричинять погіршення експлуатаційних показників двигуна, наприклад, збільшиться ступінь іскріння під щітками в першому випадку, а в другому – погіршиться процес збудження машини.

Щодо збільшення опору обмотки якоря, то в цьому випадку перерахованих вище проблем не виникне, тим більше, що часу для збільшення кількості витків такої обмотки забере набагато менше, ніж при модернізації обмоток збудження і додаткових полюсів.

То ж пропонується збільшити кількість витків обмотки якоря для зменшення частоти обертання двигуна двигун-генератора, що дасть зменшення споживаного струму і потужності.

За таких умов збільшиться і конструктивна стала машини [42–46]:

$$c_{eД} = \frac{pN}{60a}, \tag{2.29}$$

де p – число пар полюсів; N – число активних провідників обмотки якоря; a – кількість паралельних гілок обмотки якоря.

Збільшення кількості витків обмотки якоря, а як наслідок, і збільшення $c_{eД}$, згідно з виразом (2.27), по-перше, обмежує споживаний струм, по-друге, сприяє зменшенню частоти обертання.

Експериментальні дослідження, проведені в трамвайному депо Вінницького комунального підприємства «Трамвайно-тролейбусне управління», дали такі результати.

При додаванні одного витка до обмотки якоря двигуна двигун-генератора частота обертання зменшується приблизно на 10 % (табл. 2.6) і, як наслідок, струм споживання двигуном зменшується на 2 А (що відповідає зменшенню споживаної потужності на $\Delta P = 8{,}16 – 6{,}8 = 1{,}36$ кВт). При цьому реле регулятора напруги виставляється в положення 26 В, що повністю відповідає технічним характеристикам заводу-виробника і правилам техніки експлуатації [47].

Таблиця 2.6 – Порівняння технічних параметрів двигун-генератора до і після модернізації

Параметри	Двигун-генератор	
	Старого зразка	Модернізований
$I_{хх}$, А	10,0	8,0
$I_н$, А	12,0	10,0
$n_{хх}$, об/хв	2080	1860
$n_н$, об/хв	1890	1700
$U_{мережі}$, В	680	680
Р, кВт	8,16	6,8

При зменшенні споживання потужності двигуном двигун-генератора зменшується і вихідна потужність генератора цього ж двигун-генератора на $\Delta P = 8,16 – 6,8 = 1,36$ (кВт).

Умовна схема електричних кіл, живлення яких здійснюється генератором двигун-генератора, подана на рис. 2.13, на якому використано такі позначення: АКБ – акумуляторна батарея; КЕГМ – колодочне електромагнітне гальмо; ПД – привод дверей; КОС – кола освітлення та сигналізації; КС – калорифер та склоочисники; СК – система керування; РГ – рейкове гальмо.

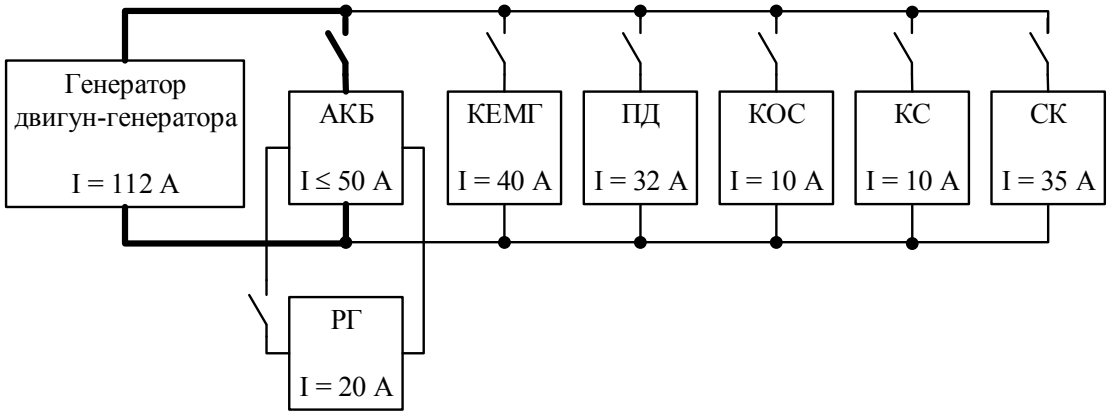


Рисунок 2.13 – Схема розподілу потужності між колами управління трамвая

При модернізації обмотки якоря двигуна двигун-генератора, як показали результати випробовувань, вихідної потужності генератора достатньо для того, щоб забезпечити функціонування всіх необхідних систем трамвая, живлення яких здійснюється від генератора (див. рис. 2.13), в режимі номінальних параметрів. При цьому перегріву тя-

гових двигунів другого візка та прискорювача трамвая не спостерігалося [48].

Крім зниження енергоспоживання, модернізація сприяла покращенню таких показників, як:

а) ресурс підшипників;

б) ресурс електричних щіток;

в) ресурс колекторів.

Перші три модернізовані двигун-генератори були встановлені на трамвайних вагонах № 208, № 194, № 199 Вінницького трамвайного депо в березні-квітні 2001 р. На сьогоднішній день вони продовжують працювати, підтверджуючи всі передбачення як з точки зору економічності, так і з точки зору безпечності і надійності.

Якщо врахувати, що трамвай на добу відпрацьовує l = 2 зміни по g = 8 год., а в місяці h = 30 днів, то при тарифі оплати за електроенергію c = 1,56 грн/(кВт·год) за 1 рік (d = 12 місяців) економія електроенергії одним трамваєм з модернізованим двигун-генератором становить

$$\Delta W_1 = \Delta P \cdot g \cdot l \cdot h \cdot d \cdot c, \qquad (2.30)$$

$$\Delta W_1 = 1{,}36 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 12 \cdot 1{,}56 = 12220{,}4 \text{ (грн).}$$

Припустивши, що з усього наявного парку Вінницького трамвайного депо на добу працюватиме лише q = 50 трамваїв, встановимо, що річна економія ΔW_{50} при цьому становитиме [47]

$$\Delta W_{50} = \Delta W_1 \cdot q, \qquad (2.31)$$

$$\Delta W_{50} = 12220{,}4 \cdot 50 = 611020 \text{ (грн).}$$

2.6 Спосіб економії електроенергії трамваєм КТ 4СУ в холодну пору року

2.6.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

Потужність, яка споживається трамваєм, можна представити виразом

$$P = P_т + P_{ДГ} + P_{ДВ} + P_{оп} + \Delta P, \qquad (2.32)$$

де $P_т$ – потужність тяги електропривода; $P_{ДГ}$ – потужність двигун-генератора; $P_{ДВ}$ – потужність двигун-вентилятора; $P_{оп}$ – потужність, що витрачається на опалення вагона в холодну пору року; ΔP – втрати потужності.

Виходячи з рівняння балансу потужності трамвая (2.32), припустимо, що в холодну пору року, коли температура навколишнього повітря не перевищує 10 °С і коли різко зростає споживання електроенергії вагонами, можна відключити систему вентиляції двигунів першого візка, що забезпечується двигун-вентилятором з номінальною потужністю $P_{ДВ\,ном} = 1{,}2$ кВт [40]. Таку економію можна реалізувати лише за умови, що не будуть перегріватися тягові електродвигуни типу ТЕ022.

2.6.2 Розв'язання поставленої задачі

Процес нагрівання двигуна протягом часу t згідно з [41, 49] можна описати виразом

$$\Theta = \Theta_{вст}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}, \qquad (2.33)$$

де $\Theta_{вст}$ – встановлене значення перевищення температури, °С; Θ_0 – температура машини до початку нагрівання, °С; T – стала часу нагрівання

$$T = \frac{cm}{\alpha S}, \qquad (2.34)$$

де c – питома теплоємність машини (c = 0,460 кДж/(кг·°С) при 20 °С [49]); m – маса машини (m = 320 кг); α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні машини (згідно з [50] $\alpha = 45{,}4$ Вт/(м^2·°С)); S – площа охолодження машини ($S = 0{,}75$ м^2).

З врахуванням цих даних стала часу нагрівання складає

$$T = \frac{460 \cdot 320}{45{,}4 \cdot 0{,}65} = 4223\ (\text{с}) \cong 1{,}2\ (\text{год}).$$

Встановлене значення перевищення температури згідно з [42, 49] можна визначити за виразом

$$\Theta_{вст} = \frac{Q}{\alpha S}, \qquad (2.35)$$

де Q – загальна кількість тепла, що виділяється за одиницю часу, Вт.

Враховуючи, що загальна кількість щіток тягового двигуна рівна 8 [40], величину тепла Q можна визначити із співвідношення [41]

$$Q = I^2\left(R_а + R_з + R_{д.п.}\right)\cdot m_T + 4\Delta U_щ I, \qquad (2.36)$$

де I – струм двигуна ($I = 150$ А [40]); $R_а$, $R_з$, $R_{д.п.}$ – відповідно опори обмотки якоря, збудження та додаткових полюсів ($R_а = 0{,}0545$ Ом, $R_з = 0{,}026$ Ом, $R_{д.п.} = 0{,}0245$ Ом [40]); $\Delta U_щ$ – спад напруги на один щітковий контакт (приймаємо $\Delta U_щ = 2$ В [41]); m_T – коефіцієнт приведення опору обмоток до робочої температури ($m_T = 1{,}22$ [51]).

Підставляючи наведені вище значення параметрів у формулу (2.37), знайдемо, що кількість тепла становитиме

$$Q = 150^2\left(0{,}0545 + 0{,}026 + 0{,}0245\right)\cdot 1{,}22 + 4\cdot 2\cdot 150 = 4082 \text{ (Вт)},$$

а встановлене значення перевищення температури

$$\Theta_{вст} = \frac{4082}{45{,}4\cdot 0{,}75} = 119{,}9 \text{ (°C)}.$$

Нагадаємо, що тяговий двигун трамвая має клас ізоляції В, для якого гранично допустима температура становить 130 °С [51].

Припустимо, що в початковий момент часу $\Theta_0 = 0$. Тоді нагрівання машини відповідно до (2.34) описуватиметься моделлю [52]

$$\Theta = 119{,}9\cdot\left(1 - e^{-\frac{t}{4323}}\right), \qquad (2.37)$$

графічна інтерпретація якої представлена на рис. 2.14.

Як відомо [52], при деякому $\Theta_0 > 0$, наприклад, $\Theta_0 = \Theta_1$, крива $\Theta = f(t)$ буде виходити з цього ж значення Θ_1 при $t = 0$, але на $\Theta_{вст}$ не вплине.

Режим роботи тягового двигуна є повторно-короткочасним. Нехай час роботи двигуна з навантаженням (час на подолання відстані між зупинками) в кожному циклі – $\tau_р$, а час холостого ходу (час перебування трамвая на зупинці) – τ_0. Тоді тривалість одного циклу складе $\tau = \tau_р + \tau_0$.

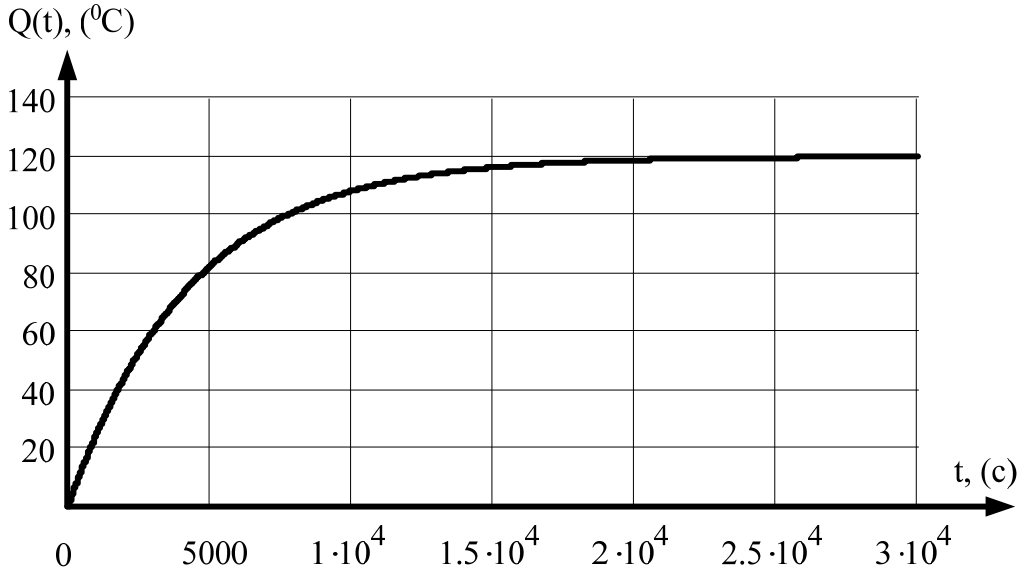


Рисунок 2.14 – Крива нагрівання тягового двигуна трамвая типу ТЕ022

В усталеному повторно-короткочасному режимі роботи трамвая максимальна температура згідно з [49] визначається з моделі

$$\Theta_{max} = \frac{1 - e^{-\frac{\tau_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{\tau}{T}}} \Theta_{вст} . \qquad (2.38)$$

Із (2.38) випливає, що при $\tau_0 = 0$, матимемо $\Theta_{max} = \Theta_{min} = \Theta_{вст}$. При тривалості вмикання 60 % (максимальне значення для такого класу двигунів) відповідно до (2.38) $\Theta_{max} = 73$ °С, тобто матимемо ще достатній запас по температурі. Виходячи з таких міркувань, можна зробити висновок, що при відключенні системи вентиляції двигунів першого візка останні перегріватися не будуть, тим більше що реалізацію такого режиму (без примусової вентиляції тягових двигунів першого візка) пропонується здійснювати лише в холодну пору року.

Проведені дослідження на трамваях № 194 і № 216 Вінницького комунального підприємства «Трамвайно-тролейбусне управління», які були випробувані в режимі повного завантаження протягом двох днів, показали, що перевищення температури двигунів першого і другого візків не спостерігалось. Виявилось, що потоку повітря від руху самого вагона достатньо для охолодження тягових двигунів, причому середньочасова споживана потужність одним тяговим електродвигуном, заміряна лічильником постійного струму, складає приблизно 30 % від

номінальної потужності самого двигуна, що є меншим від розрахункового 60 %.

На даний час вагони № 224 і № 219 експлуатуються за цією схемою ще з 2002 року.

Для модернізації вагона, тобто відключення вентиляції тягових двигунів першого візка в холодну пору року, потрібно в електричній схемі вагона закоротити блок-контакти реле RMV і витягнути запобіжник MV 6 А (600 В). Додаткові матеріальні затрати непотрібні. Всі роботи з переробки схеми трамвая займають 0,25 год.

Крім прямої економії електроенергії, а це $E = 1{,}2$ кВт·год., ще отримаємо непряму економію від зниження затрат на ремонт і технічне обслуговування двигун-вентиляторів.

Підрахуємо економічний ефект від такого впровадження. Якщо взяти умови функціонування трамваїв такими ж, як і в попередньому випадку (за рахунок модернізації обмотки якоря двигуна двигун-генератора SMD 5001), то вийде економія електроенергії одним трамваєм ΔW_1 з відключеною вентиляцією першого візка відповідно до (2.31):

$$\Delta W_1 = 1{,}2 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 6 \cdot 1{,}56 = 5391{,}36 \text{ (грн).}$$

Тоді річна економія при роботі лише q = 50 трамваїв при цьому становитиме відповідно до (8.32)

$$\Delta W_{50} = 5391{,}36 \cdot 50 = 269568 \text{ (грн).}$$

Крім того, слід відмітити, що споживана потужність двигун-вентиляторами в трамваях може і перевищувати 1,2 кВ і складати не менше 1,5 кВт, якщо в контактній мережі замість 550 В використовується, наприклад, 640 В, що є досить поширеним. За таких умов внаслідок природного охолодження тягових двигунів першого візка трамваїв річна економія буде ще суттєвішою.

2.7 Зниження електроспоживання трамвая КТ 4СУ за рахунок зміни конструкції системи опалення кабіни водія

Регулювання режиму роботи пічок в трамваях залежно від температури за бортом може забезпечити економію енергії, що споживається вагоном, до 10–25 % [1].

Згідно з технічною документацією на трамвай КТ-4СУ [40] для опалення кабіни водія використовується калорифер потужністю 6 кВт, нагріте повітря з виходу якого розподіляється через канали по всьому об'єму кабіни. Температура в кабіні водія підтримується сталою за рахунок температурного реле, спрацювання якого відбувається при досягненні температури 80 °С в камері з ТЕНами.

Заводом-виробником сконструйовано систему опалення кабіни водія таким чином, що у відсік 4 з ТЕНами (рис. 2.15а) надходить холодне повітря з температурою навколишнього середовища через повітряний канал 3 (протяжністю біля 2 м і діаметром 80 мм) з повітряним фільтром та відвідний патрубок 2 двигун-вентилятора 1. При проходженні повітря через повітряний канал 3 і фільтр до відсіку 4 з ТЕНами відбувається часткова втрата його напору. Крім того, повітря, що надходить в кабіну ззовні, створює в ній невеликий надлишковий тиск повітря, що спричиняє постійне його витіснення назовні через щілини і нещільності в перегородках, підлозі, дверях і т. д., що є неекономічним і нераціональним.

Пропонується, не змінюючи електричну схему і схеми автоматики, вентилятор калорифера розмістити в самій кабіні, або, не змінюючи розташування вентилятора, зробити забір повітря з кабіни [52]. Зауважимо, що другий варіант є нераціональним. Внаслідок таких змін отримаємо замкнену схему опалення, в якій в якості двигун-вентилятора може використовуватися двигун, що живиться від низької напруги 24 В, на вал якого насаджено відцентровий вентилятор 3 із напрямним кожухом (рис. 2.15б).

Повітря, що нагнітається вентилятором, потрапляє безпосередньо у відсік 4 із ТЕНами, тобто підігрівається лише те повітря, яке знаходиться в кабіні водія. При цьому надлишкового тиску в кабіні не буде створюватися, тому що ТЕНи калорифера обдуваються повітрям, що забирається із кабіни, а тому тепле повітря з виходу калорифера, віддавши тепло в навколишній простір кабіни, опускається і знову нагнітається в калорифер, тобто повітря циркулює в межах об'єму кабіни. Тому при використанні модифікованої системи опалення температура в кабіні підвищується швидше, оскільки відсутні втрати теплоти на підігрів холодного повітря, що надходить ззовні, та витіснення теплого повітря з кабіни за рахунок надлишкового тиску.

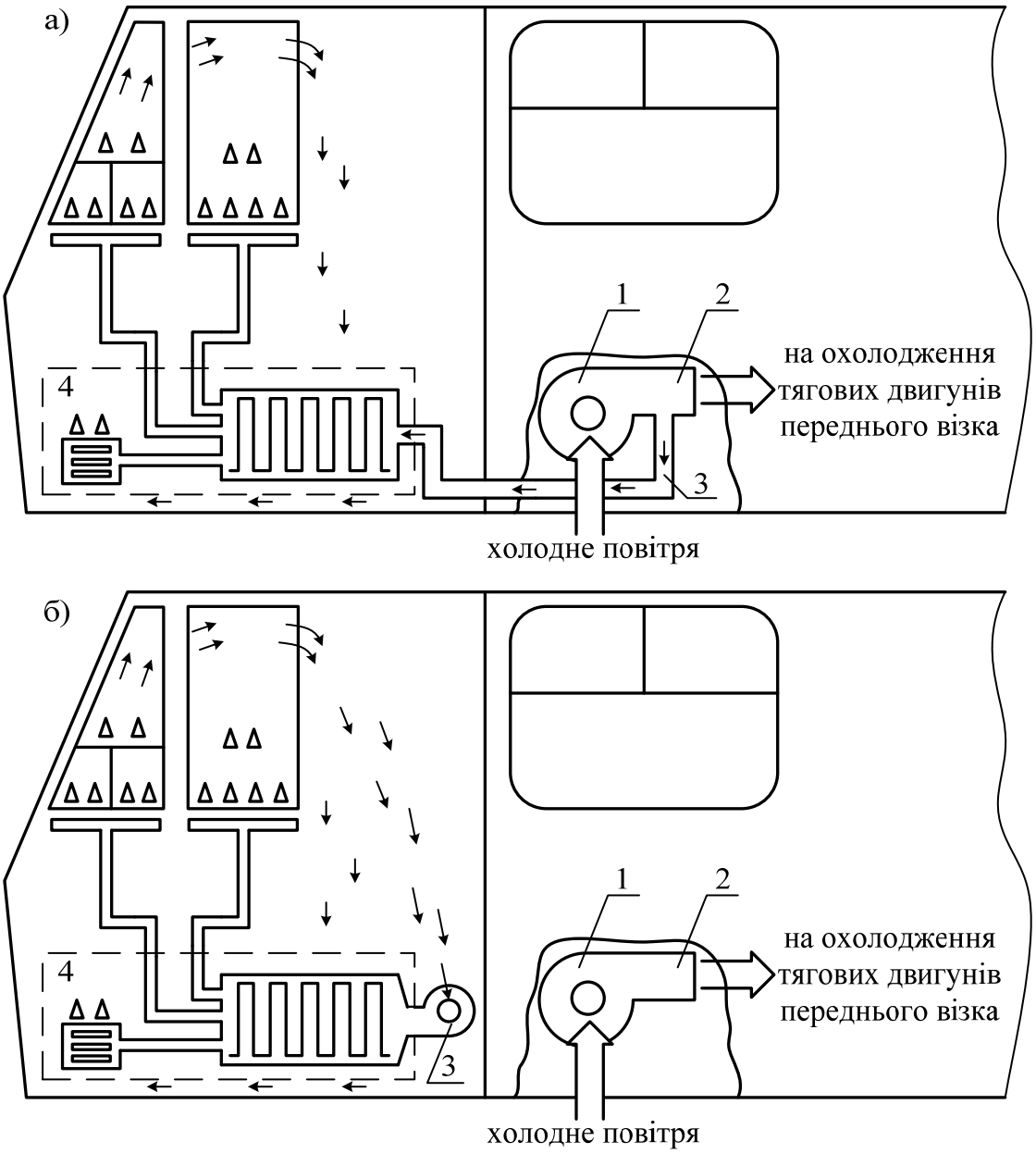


Рисунок 2.15 – Система опалення кабіни водія трамвая КТ4-SU:
а) – заводська система опалення; б) модернізована система опалення

Швидке наростання температури в кабіні приводить до того, що час роботи ТЕНів, який визначається температурним реле, зменшується, а тому потрібно менше часу для нагрівання кабіни до значення встановленої температури. Витрати електроенергії на обігрів кабіни водія, виміряні лічильником постійного струму, знижуються до 50 %.

Слід зауважити, що для забезпечення регламентованого санітарно-гігієнічними вимогами складу повітря в кабіні водія, опис та розраху-

нок яких можна знайти, наприклад, в роботах [54, 55], потрібно передбачити можливість надходження в кабіну свіжого повітря ззовні, що можна реалізувати за рахунок опущення скла в конструкції кабіни. При цьому отримаємо систему опалення із рециркуляцією. Підібравши оптимальний коефіцієнт рециркуляції, можна як забезпечити регламентовані параметри складу повітря, так і отримати теплову економічність цього процесу, теплові розрахунки якого можна знайти, наприклад, в роботі [56]. Тому перед впровадженням змін щодо модернізації системи опалення кабіни водія відповідно до запропонованого підходу, потрібно ще й провести теплові розрахунки для забезпечення оптимуму коефіцієнта рециркуляції та аналіз й вибір способів його досягнення з дотриманням санітарно-гігієнічних умов. Але це вже нова задача дослідження, яка в цій роботі не розглядається.

Розрахуємо економічний ефект від запропонованої модернізації системи опалення кабіни водія трамвая КТ 4СУ. Вихідні дані подані в табл. 2.7, в якій прийнято, що до модернізації системи опалення здійснювалося калорифером, потужність якого P = 6 кВт, а повітря забиралося ззовні, після модернізації – опалення здійснюється калорифером потужністю P = 3 кВт, розміщеним в кабіні водія [53].

Таблиця 2.7 – Вихідні дані для визначення економічного ефекту від модернізації системи опалення кабіни водія

№	Назва показника	Позначення	Од. вимірювання	До модернізації	Після модернізації
1	Потужність калорифера	P	кВт.	6	3
2	Кількість годин роботи трамвайних вагонів в місяць	N	год.	300	300
3	Кількість холодних місяців в році	h	міс.	6	6
4	Вартість електроенергії	w	грн. кВт·год	1,56	1,56
5	Кількість вагонів із модифікованою схемою опалення кабіни	n	од.		50
6	Вартість затрат на заміну системи	K	грн		80
7	Тривалість роботи схеми опалення	П	%		50

Вартість споживання електроенергії на опалення кабіни водія можна визначити із виразу

$$W = N \cdot h \cdot P \cdot w, \qquad (2.39)$$

яка для системи опалення до модернізації становить 16848 грн, а для системи опалення після модернізації – 8424 грн.

Економічний ефект від впровадження на десяти трамваях модернізованої системи опалення за рік становитиме:

$$E = n \cdot (W_1 - W_2) \cdot П - n \cdot K, \qquad (2.40)$$

$$E = 41320 \text{ грн.}$$

А якщо припустити, наприклад, що з усього наявного парку Вінницького трамвайного депо на добу працюватиме лише 50 трамваїв, то економічний ефект від модернізації системи опалення кабіни водія суттєво збільшиться (до 206,6 тис. грн).

2.8 Зменшення втрат електроенергії в пантографі трамвая

Дослідження здійснювалися в трамвайному депо Вінницького комунального підприємства «Трамвайно-тролейбусне управління» в середині березня 2008 року при температурі повітря біля 12°С.

Для зняття теплограм використовувався тепловізор «Крионик», а обробка теплограм здійснювалася апаратно-програмним комплексом «Крионик – 5».

Швидкодія цього тепловізора не дозволяє здійснювати контроль в швидкому темпі процесу. Тому для імітації режиму навантаження трамвая, близького до номінального, в ремонтному цеху трамвайного депо при натиснутому гальмі поступово збільшувалася сила струму, що протікає по тягових електродвигунах. При певному значенні струму, під дією якого тягова сила переважала силу гальма, вагон рушав з місця.

Через обмеженість довжини містка для огляду пантографа дистанція руху вагона була обмежена до чотирьох метрів.

Для запобігання впливу зовнішніх факторів теплограми знімалися після остигання контактної мережі та пантографа до температури повітря навколишнього середовища.

З врахуванням сказаного теплограма при першому рушанні вагона показана на рис. 2.16, з якої видно, що у місці контакту пантографа з контактним проводом температура становить 12,3 °С (точка 1). У місцях з'єднання контактного проводу (точка 2 і точка 3) температура дещо вища (13,7°С і 13,5°С відповідно) [57].

У місцях шарнірних з'єднань пантографа для зменшення втрат заводом-виробником передбачено шунтування рухомих частин гнучким міднім проводом [40]. Однак в цих місцях (точки 4, 5) спостерігаються максимальні втрати (температура становить 16 °С і 28,6 °С відповідно) електроенергії в пантографі.

Апаратно-програмний комплекс «Крионик–5» дозволяє вимірювати температуру та перетворювати її на відповідні втрати. Тому для кращої візуалізації теплових процесів, що протікають в пантографі на рис. 2.17 показані втрати, що відповідають його температурі згідно з рис. 2.16.

Після кількох рушань з місця та повернень на вихідну позицію трамвая теплограма дещо змінилася (рис. 2.18).

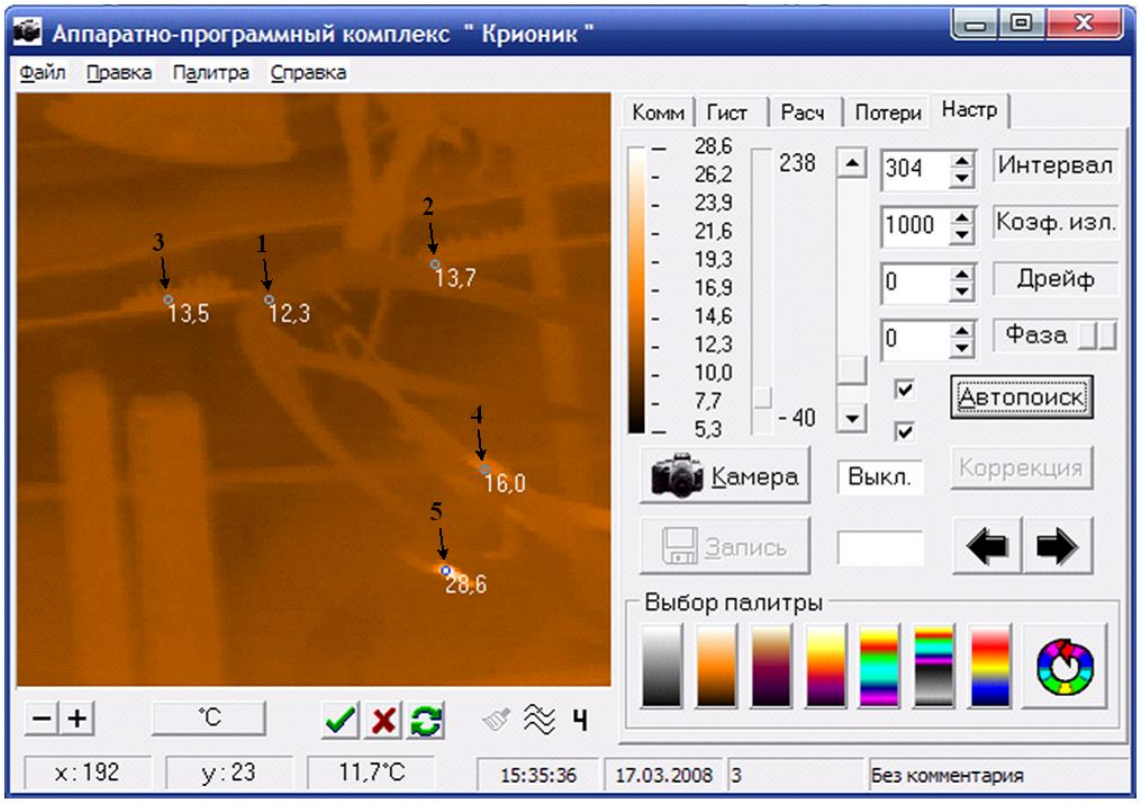


Рисунок 2.16 – Теплограма процесу струмознімання (вимірювання в °С)

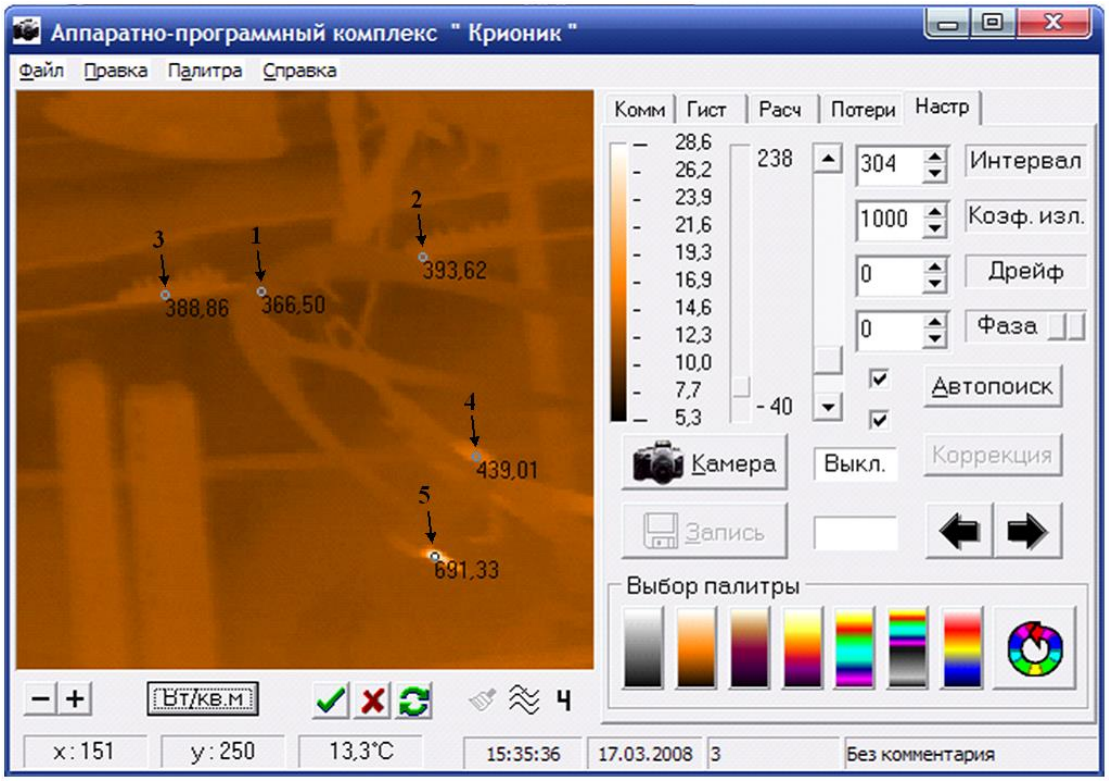


Рисунок 2.17 – Теплограма процесу струмознімання (вимірювання в $^{\circ}Вт/м^2$)

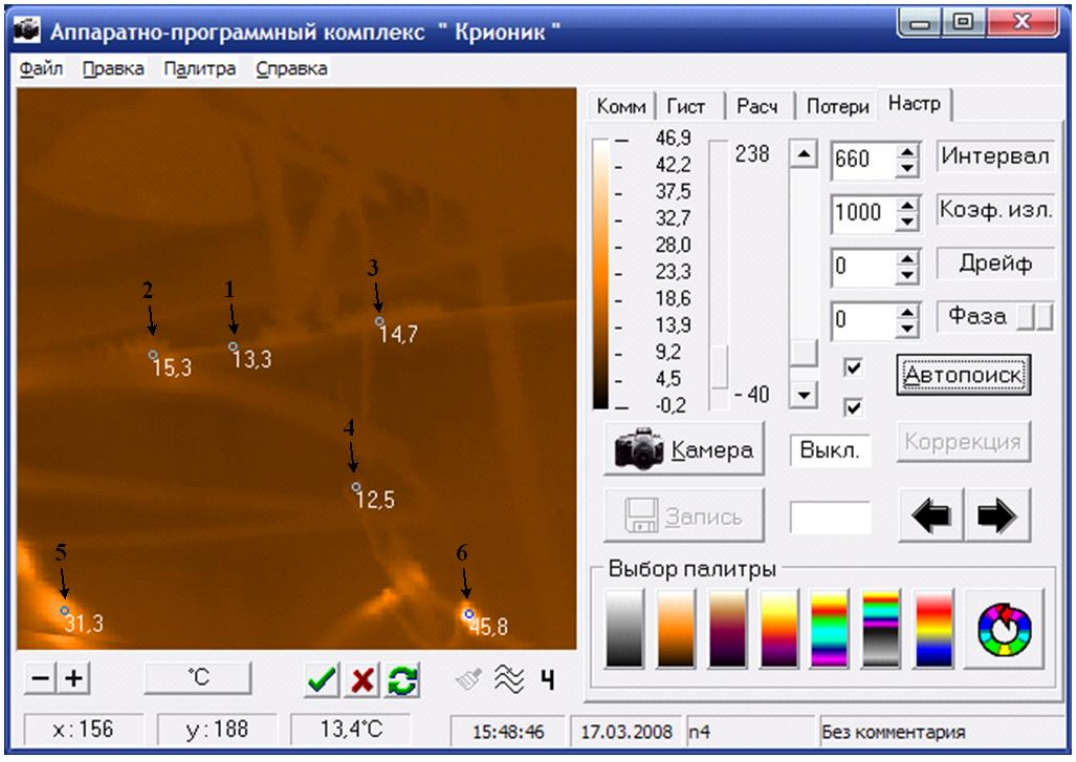


Рисунок 2.18 – Теплограма процесу струмознімання

Нагрівся сам контактний провід (точка 1 до 13,3 °С), місця його з’єднання (точка 2 до 15,3 °С, точка 3 до 14,7 °С), а у місцях з’єднань рухомих частин пантографа температура суттєво збільшилася (точка 5 до 31,3 °С, точка 6 до 45,8 °С). Точка 4 (12,5 °С) також є місцем з’єднання, однак її температура в 3,6 рази менша за температуру точки 6.

Більш чітко шунтування рухомих частин пантографа мідним проводом показано на рис. 2.19. Точки 1 та 2 на рис. 4 є точками 4 та 6 відповідно до рис. 2.18.

З рис. 2.18 видно, що перехідний контакт з’єднання (точка 6) вносить суттєву складову в загальні втрати електроенергії в пантографі.

Дослідження інших точок з’єднань рухомих частин пантографа шунтуванням мідним проводом на даному вагоні та на інших вагонах показали, що ці з’єднання є основним джерелом втрат електроенергії в пантографі. При подальшому аналізі встановлено, що «слабкою» ланкою в цьому процесі є клема, що з’єднує гнучкий мідний провід із елементами конструкції пантографа.

Рисунок 2.19 – Місця шунтування рухомих частин пантографа мідним проводом

Для усунення виявлених недоліків пропонується збільшити переріз вказаної вище клеми. Хоча це і збільшить одноразові витрати на виготовлення клеми більшої маси, але зменшить щоденні втрати електроенергії в пантографі.

Іншим джерелом втрат є рухомий контакт «бугель-контактний провід». Для дослідження цього процесу потрібно знайти оптимальне значення контактного натиску пантографа на мережу з врахуванням нерівномірності провисання контактного проводу на різних ділянках маршруту, кліматичних умов, електричних та механічних навантажень, а також синтезувати систему для визначення контактного натиску та розробити пристрій для її реалізації. Ці питання будуть розв’язані в подальших дослідженнях.

2.9 Визначення оптимального значення контактного натиску струмознімальним елементом на контактну мережу

Від якості процесу струмознімання залежить термін служби контактного проводу, струмознімального елемента (розглядається пантограф трамвая) а як наслідок – надійність електричної тяги вагона. Незалежно від режиму роботи вагона струмознімання завжди повинне бути задовільним. Причин, які погіршують цей процес, достатньо багато. Вони мають різну фізичну природу. Основні з них: нерівномірності провисання контактного проводу на різних ділянках маршруту, зміна натиску струмоприймача на провід, кліматичні умови, електричні, механічні, коливальні процеси [58].

В роботах [23, 25, 26] запропоновані різні підходи визначення значення контактного натиску, однак вони не враховують динаміку процесу струмознімання та впливу різних факторів, під дією чи в умовах яких цей процес відбувається.

Тому потрібно здійснити пошук оптимального значення контактного натиску пантографом на контактну мережу (рис. 2.20).

В якості вхідних параметрів, які впливають на оптимальність контактного натиску $P_к$ пантографа на контактний провід, використаємо основні з них, які носять найбільш виявлений характер: швидкість руху вагона (x_1), висота контактного проводу (x_2), температура навколишнього середовища (x_3), швидкість вітру (x_4) та завантаженість ва-

гона (x_5). Математичну модель з такою кількістю вхідних параметрів, які мають різне походження, побудувати з використанням звичайних диференціальних рівнянь достатньо складно. Тому скористаємося методами нечітких множин та нечіткої логіки.

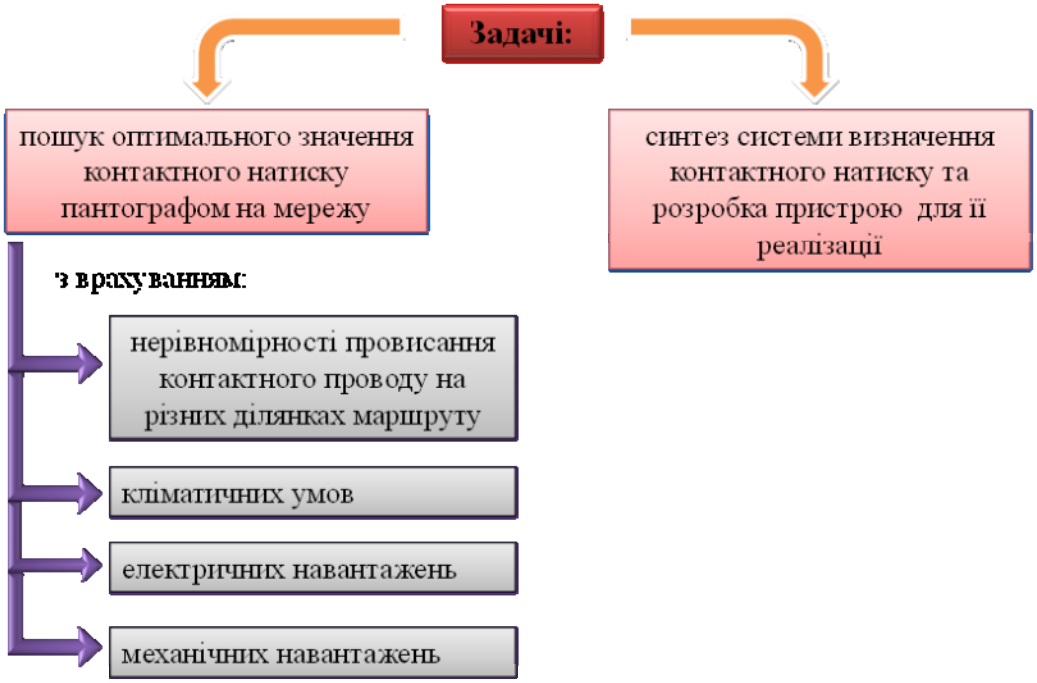


Рисунок 2.20 – Задачі для забезпечення оптимального процесу струмознімання

Розглянемо відображення $P_к = f(x_1, \ldots, x_n)$. Множину вхідних параметрів сформуємо як $X = \{x_i, i= 1, \ldots, n\}$, де x_i – змінні, які набувають числових значень, тобто $x_i \in [\underline{x_i}, \overline{x_i}]$, а вихідний параметр $P_к \in [\underline{P_{кj}}, \overline{P_{кj}}]$, де $j = 1, \ldots, m$.

Потрібно за заданим вектором значень вхідних параметрів $x^* = \left(x_1^*, \ldots, x_n^*\right)$ визначити розв'язок $P_к$. Знаходження значень $D = \{d_1, \ldots, d_m\}$ вихідного параметра $P_к$ за заданим вектором значень вхідних параметрів x^* і матрицею знань забезпечить можливість ідентифікувати оптимальність контактного натиску $P_к = f\left(x_1^*, \ldots, x_n^*\right)$.

В якості базового візьмемо трамвай KT4SU з пантографом КЕ 13. Максимальна швидкість відповідно [59] становить 65 км/год, саме низьке робоче положення пантографа КЕ 13 становить 740 мм, а робочий хід – 2300 мм [60], тоді як висота кузова 3110 мм [59]. За таких

умов діапазон зміни висоти контактного проводу задаємо в межах 3850…6150 мм. Приймаємо максимальну швидкість вітру 32 м/с. Задовільний натиск на контактний провід згідно з [60] повинен становити 7±4 кГ. Діапазони зміни кожної з вхідних змінних та їх лінгвістичні оцінки запропоновані в табл. 2.8.

Задаємо рівні зміни натиску на контактний провід (терми): d_1 – малий, d_2 – нижче номінального, d_3 – номінальний, d_4 – вище номінального, d_5 – великий. Наведені рівні d_j $(j=\overline{1,5})$ вважатимемо характеристиками натиску пантографом на контактний провід, а вихідним параметром розробленої моделі є зміна сили натиску, на основі якої здійснюється коригування натиску струмознімальним пристроєм на контактний провід.

Залежно від поєднання вхідних змінних x_i $(i=\overline{1,5})$ змінюватимуться і терми вихідної змінної d_j $(j=\overline{1,5})$:

$$d_j = f(x_i), \tag{2.41}$$

що дозволяє сформувати нечітку базу знань, представлену в табл. 2.9.

Таблиця 2.8 – Вхідні параметри моделі та їх параметри

Параметри	Назва вхідного параметра	Діапазон зміни	Терми
x_1	Швидкість руху вагона	0…65 км/год	низька (Н)
			середня (С)
			висока (В)
x_2	Висота контактного проводу	3850…6150 мм	низька (Н)
			середня (С)
			висока (В)
x_3	Температура навколишнього середовища	–30…+50 °С	низька (Н)
			близька до нуля (Х)
			вище нуля (Т)
			висока (В)
x_4	Швидкість вітру	0…32 м/с	низька (Н)
			середня (С)
			висока (В)
x_5	Завантаженість вагона	0…100 %	низька (Н)
			середня (С)
			вище середньої (ВС)
			висока (В)

Таблиця 2.9 – Нечітка база знань для системи нечіткого виведення

Номер вхідної комбінації значень	Вхідні параметри					Вихідний параметр $P_к$
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	d
1_1	Н	Н	В	Н	Н	d_1
1_2	Н	Н	Т	Н	Н	
2_1	Н	Н	В	Н	С	d_2
2_2	Н	Н	Т	С	Н	
2_3	Н	Н	В	Н	С	
2_4	Н	Н	Т	Н	ВС	
3_1	С	С	Т	С	ВС	d_3
3_2	С	С	Х	С	ВС	
3_3	С	С	Т	Н	ВС	
4_1	С	В	Х	В	ВС	d_4
4_2	С	С	Х	С	В	
4_3	С	В	Х	С	ВС	
4_4	С	В	Х	С	В	
5_1	В	В	Н	В	В	d_5
5_2	В	В	Н	С	В	
5_3	В	В	Х	В	В	
5_4	В	С	Х	С	В	

Для оцінки вхідних змінних x_i $(i = \overline{1, 5})$ нечіткі терми представимо у вигляді нечітких множин з використанням функцій належності. Як видно з табл. 2.8, вхідні параметри x_1, x_2 та x_4 мають по три терми, а x_3 та x_5 – по чотири терми. Пропонується для даної задачі скористатися дзвоноподібною функцією належності (*gbellmf*) для характеристики крайніх термів та гаусовою функцією належності *(gaussmf*) для середнього терму. Їх математичне представлення [61, 62]:

$$\text{gaussmf} = \mu^T(x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \qquad (2.42)$$

де c і σ – числові параметри (c – координата максимуму функції; σ – коефіцієнт концентрації-розтягування);

$$\text{gbellmf} = \mu^T(x) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}, \qquad (2.43)$$

де a, b, c – числові параметри, які приймають довільні діючі значення і впорядковані відношенням a < b < c, причому параметр b > 0.

Для нашої задачі та сформованої бази знань нечіткі терми представимо у вигляді логічних рівнянь [58]:

$$\mu^{d_1}(d) = [(\mu^{H}(x_1)\cdot\mu^{H}(x_2)\cdot\mu^{B}(x_3)\cdot\mu^{H}(x_4)\cdot\mu^{H}(x_5))\vee \vee(\mu^{H}(x_1)\cdot\mu^{H}(x_2)\cdot\mu^{T}(x_3)\cdot\mu^{H}(x_4)\cdot\mu^{H}(x_5))]; \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_2}(d) = [&(\mu^{H}(x_1)\cdot\mu^{H}(x_2)\cdot\mu^{B}(x_3)\cdot\mu^{H}(x_4)\cdot\mu^{C}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{H}(x_1)\times\mu^{H}(x_2)\cdot\mu^{T}(x_3)\cdot\mu^{C}(x_4)\cdot\mu^{H}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{H}(x_1)\cdot\mu^{H}(x_2)\cdot\mu^{B}(x_3)\times\mu^{H}(x_4)\cdot\mu^{C}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{H}(x_1)\times\mu^{H}(x_2)\cdot\mu^{T}(x_3)\cdot\mu^{H}(x_4)\cdot\mu^{BC}(x_5))];\end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_3}(d) = [&(\mu^{C}(x_1)\cdot\mu^{C}(x_2)\cdot\mu^{T}(x_3)\cdot\mu^{C}(x_4)\cdot\mu^{BC}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{C}(x_1)\cdot\mu^{C}(x_2)\times\mu^{X}(x_3)\cdot\mu^{C}(x_4)\cdot\mu^{BC}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{C}(x_1)\cdot\mu^{C}(x_2)\cdot\mu^{T}(x_3)\cdot\mu^{H}(x_4)\cdot\mu^{BC}(x_5))];\end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_4}(d) = [&(\mu^{C}(x_1)\cdot\mu^{B}(x_2)\cdot\mu^{X}(x_3)\cdot\mu^{B}(x_4)\cdot\mu^{BC}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{C}(x_1)\times\mu^{C}(x_2)\cdot\mu^{X}(x_3)\cdot\mu^{C}(x_4)\cdot\mu^{B}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{C}(x_1)\cdot\mu^{B}(x_2)\times\mu^{X}(x_3)\times\mu^{C}(x_4)\cdot\mu^{BC}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{C}(x_1)\cdot\mu^{B}(x_2)\cdot\mu^{X}(x_3)\cdot\mu^{B}(x_4)\cdot\mu^{B}(x_5))];\end{aligned} \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned}\mu^{d_5}(d) = [&(\mu^{B}(x_1)\cdot\mu^{B}(x_2)\cdot\mu^{H}(x_3)\cdot\mu^{B}(x_4)\cdot\mu^{B}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{B}(x_1)\times\mu^{B}(x_2)\cdot\mu^{H}(x_3)\cdot\mu^{C}(x_4)\cdot\mu^{B}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{B}(x_1)\cdot\mu^{B}(x_2)\cdot\mu^{X}(x_3)\times\mu^{B}(x_4)\cdot\mu^{B}(x_5))\vee\\ \vee&(\mu^{B}(x_1)\cdot\mu^{C}(x_2)\cdot\mu^{H}(x_3)\cdot\mu^{C}(x_4)\cdot\mu^{B}(x_5))].\end{aligned} \quad (2.48)$$

Для реалізації запропонованої моделі використано редактор системи нечіткого висновку FIS математичного пакета Matlab [63] (рис. 2.21) з використанням, наприклад, алгоритму Мамдані.

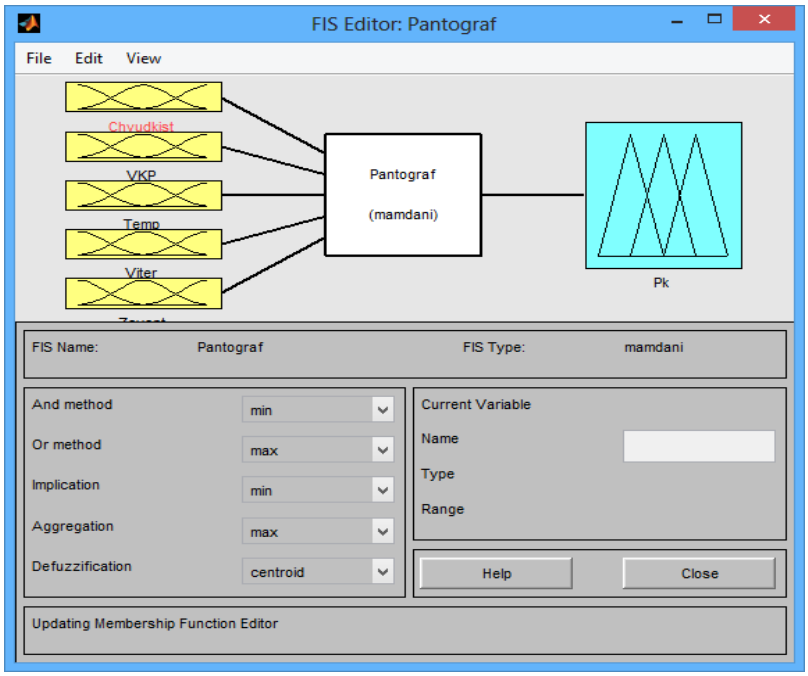


Рисунок 2.21 – Графічний інтерфейс редактора FIS після задання вхідних і вихідних параметрів для системи нечіткого висновку Pantograf

Задаючись функціями належності для кожного з термів вхідного й вихідного параметрів, вводячи правила системи нечіткого виведення, використовуючи метод центра ваги (centroid) можна визначити чітке значення контактного натиску $P_к$. Візуалізація результатів нечіткого виведення та отримання значення вихідного параметра залежно від значень вхідних параметрів показана на рис. 2.22.

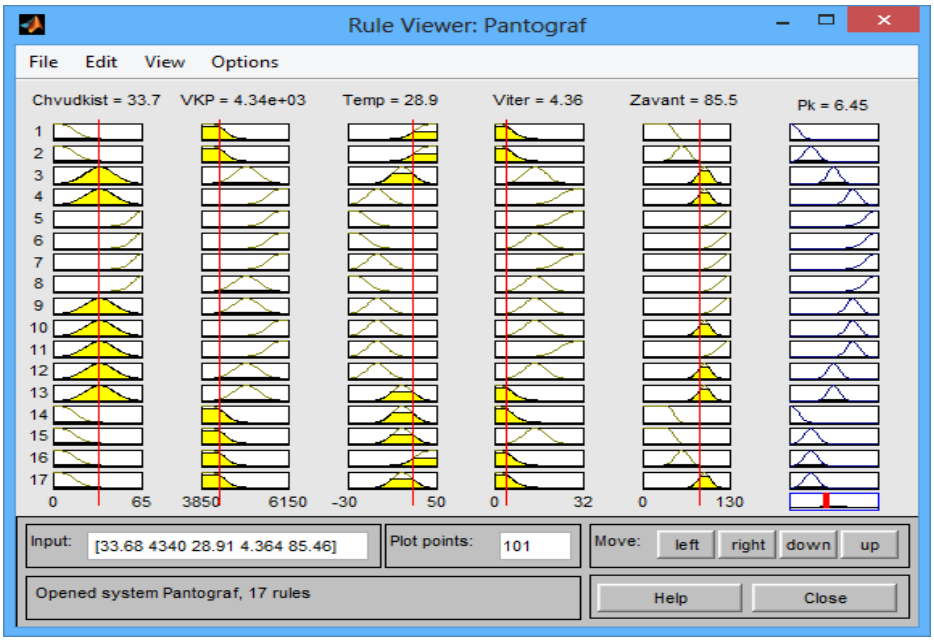


Рисунок 2.22 – Візуалізація результату нечіткого виведення

Для кожного значення вхідного параметра можна отримати конкретне значення контактного натиску. На рис. 2.23–2.26 показані деякі залежності оптимального натиску $P_к$ від вхідних параметрів.

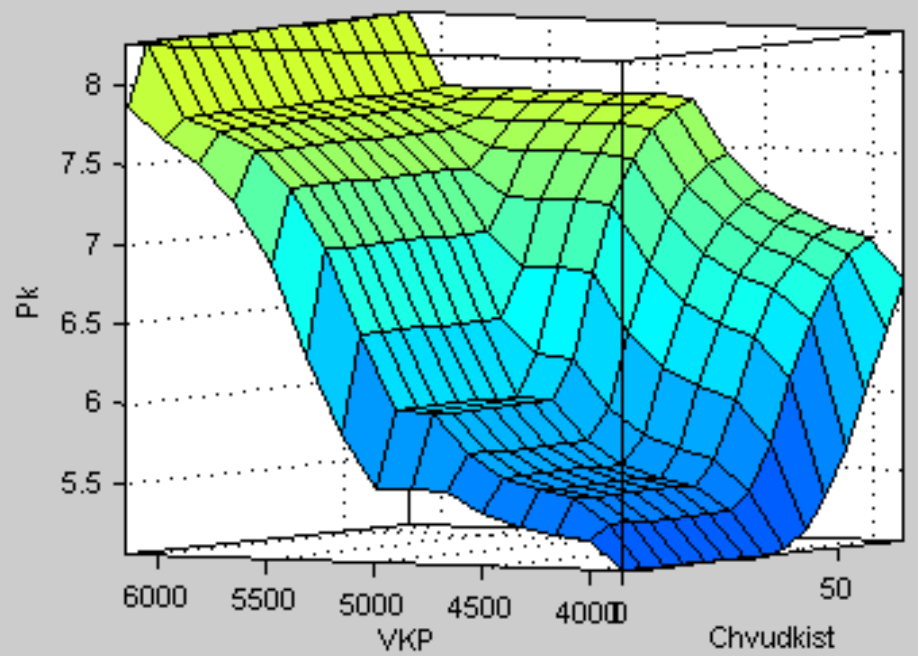


Рисунок 2.23 – Залежність $P_к$ від висоти контактного проводу та швидкості руху вагона

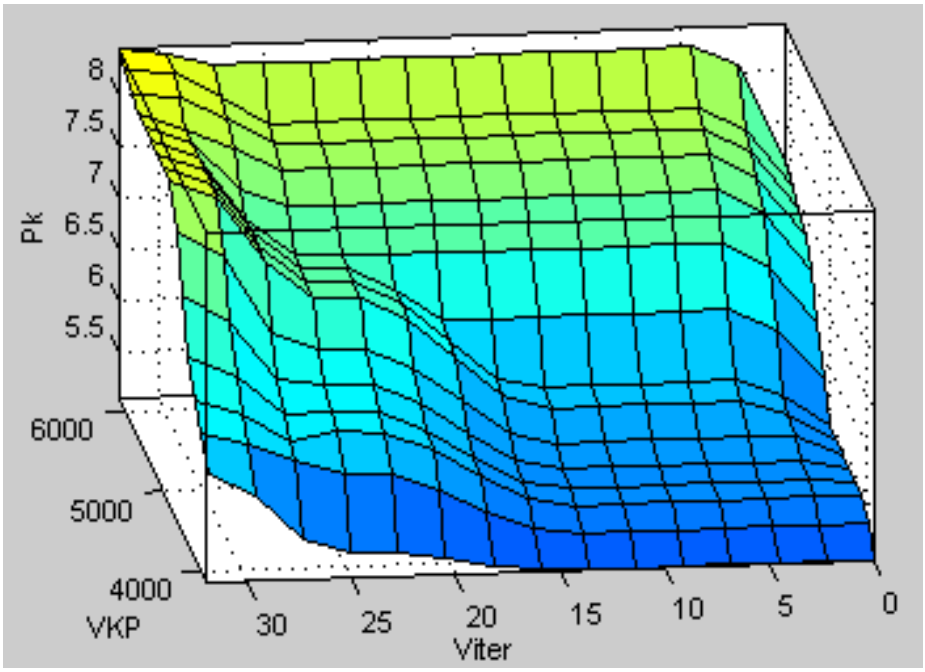


Рисунок 2.24 – Залежність Рк від висоти контаткного проводу та швидкості вітру

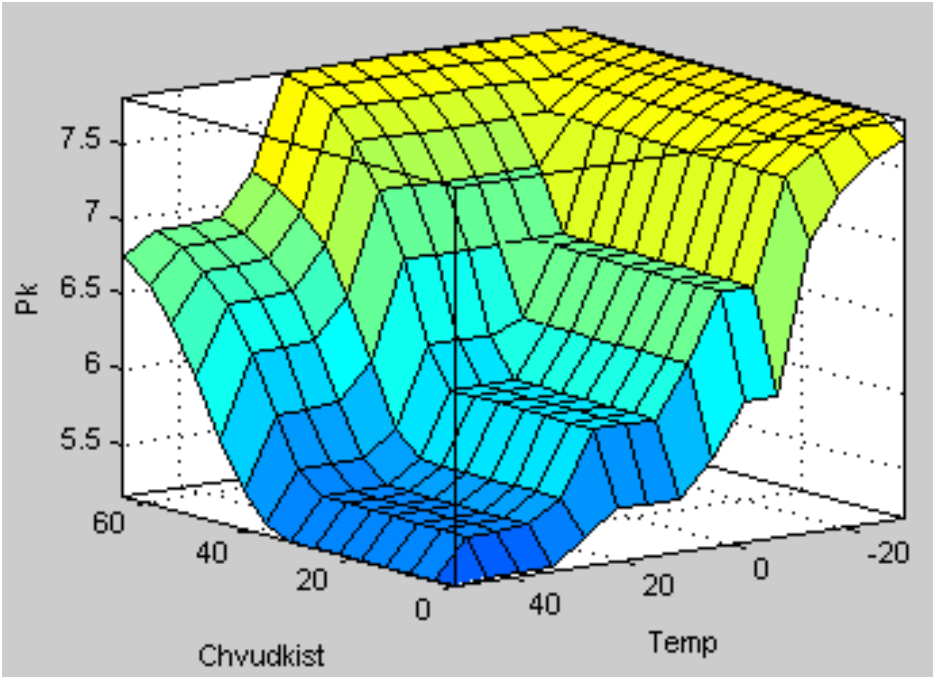


Рисунок 2.25 – Залежність $P_к$ від швидкості руху вагона
та температури навколишнього середовища

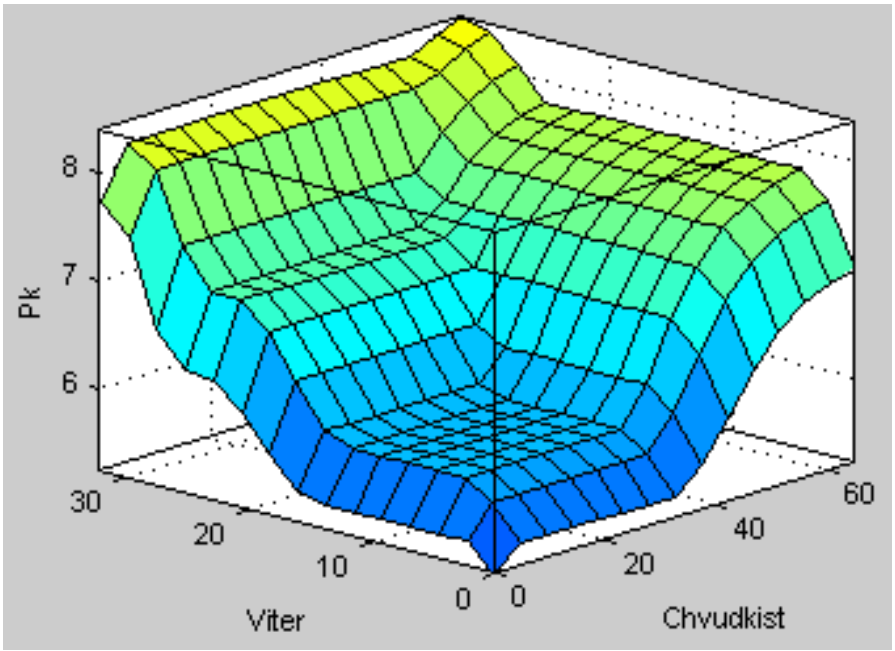


Рисунок 2.26 – Залежність $P_к$ від швидкості вітру та швидкості руху вагона

Значення контактного натиску $P_к$ можуть мати й інші результати, які залежать від формування правил у нечіткій базі знань, типів та форм функцій належностей, методу дефазифікації, а також від способів виконання нечітко-логічних операцій.

Не зайвим є оптимізація параметрів моделі з використанням генетичного алгоритму.

Запропоновану модель можна реалізувати в на базі fuzzy-регулятора.

В програмному середовищі Simulink (Matlab) можна здійснити моделювання запропонованої моделі. Як видно з рис. 2.27, при вхідних параметрах, ідентичних заданим на рис. 2.22, вихідне значення $P_к$ таке ж саме.

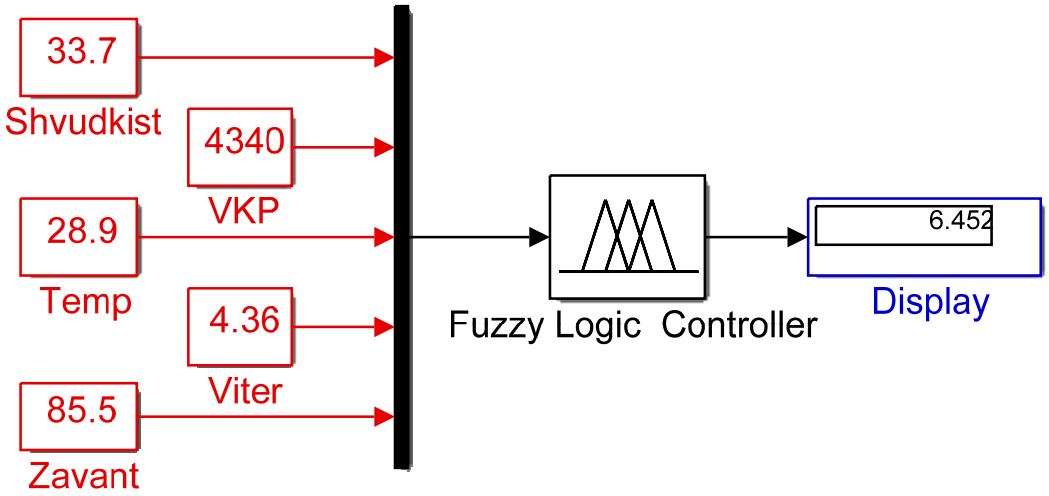


Рисунок 2.27 – Модель процесу струмознімання в статичному режимі

Для аналізу динаміки зміни $P_к$ при русі вагона в програмному середовищі Simulink (Matlab) була розроблена модель, представлена на рис. 2.28.

Блок «Вхідні параметри» формує сигнали задання швидкості руху вагона Shvudkist, висоти контактного проводу VKP, температури навколишнього середовища Temp, швидкості вітру Viter та завантаженості вагона Zavant. Блок «ПВП» здійснює перетворення значень вхідних параметрів для зручного відображення на графіку.

В роботі [64] вказано, що при спуску та підйомі на одній і ті й самій висоті натиск на контактний провід різний. Більшим він буде при спуску. Тому в моделі передбачено блок «ВНН», який здійснює визначення найнижчої точки провисання контактного проводу та формує цю різницю.

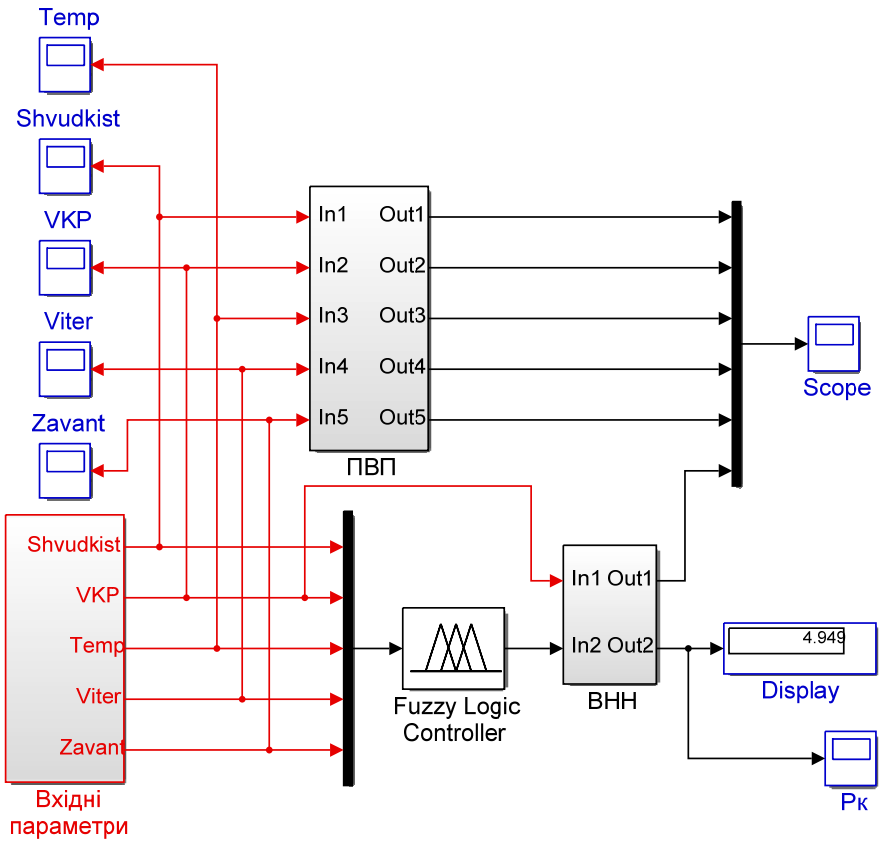


Рисунок 2.28 – Модель процесу струмознімання в динамічному режимі

Результат моделювання процесу струмознімання при Shvudkist = 55 км/год, VKP = 5000 мм на початку і в кінці прольоту, Temp = 15 °C, Viter = 3 м/с та Zavant = 60 % поданий на рис. 2.29.

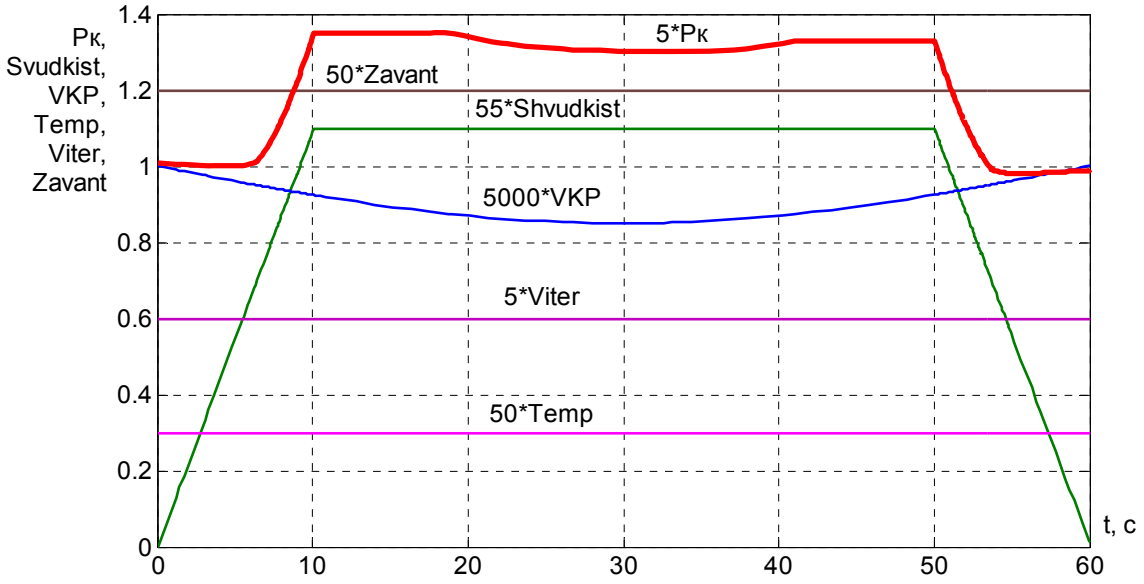


Рисунок 2.29 – Результат моделювання процесу струмознімання

Як видно з рис. 2.29, максимальне значення $P_{к.max} = 6{,}75$ Н, а мінімальне – $P_{к.min} = 4{,}94$ Н, тоді середнє значення становитиме $P_{к.ср} = 5{,}85$ Н.

Можна визначити й відсоткову різницю зміни контактного натиску на прольоті відносно $P_{к.ср}$:

$$\Delta P_к = \frac{P_{к.max} - P_{к.ср}}{P_{к.ср}} \cdot 100\%, \qquad (2.49)$$

$$\Delta P_к = \frac{6{,}75 - 5{,}85}{5{,}85} \cdot 100\% = 15{,}4\,(\%).$$

А якщо визначати відсоткову різницю зміни контактного натиску на прольоті відносно $P_{к.min}$, а не $P_{к.ср}$, то $\Delta P_к$ становитиме вже 36,6 %. Тобто система керування пантографом повинна достатньо швидко реагувати на зміну факторів, які впливають на процес струмознімання.

За таких умов регулювання контактного натиску забезпечуватиме надійне струмознімання та мінімальну зношеність контактного проводу й самого пантографа.

2.10 Фактор технічного стану транспортного засобу на витрату електроенергії

2.10.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

Будь-який транспортний засіб можна характеризувати, виходячи з його економічності, за витратами енергоносія на перевезення вантажу.

Для визначення складових енерговитрат транспортного засобу наведемо формулу руху, яка в нашому випадку для трамвая матиме вигляд [65]:

$$F_a = F - W, \qquad (2.50)$$

де F_a – результуюча сила, що визначає характер руху (сповільнений, прискорений або рівномірний), Н; F – сила тяги, що виробляється тяговими двигунами і направлена в сторону руху трамвая, Н; W – сили опору руху (сума сил, що перешкоджають руху), Н.

Остання складова (сили опору руху) є такою, що постійно присутня. Вона залежить від:

– опору тертя кочення колеса об рейку;

– тертя реборди об рейку;

– ударів об стики;

– прогину рейкового полотна при наїзді на нього колесом;

– невирівняного рейкового полотна;

– внутрішнього тертя транспортного засобу в підшипниках (букс колісних пар, тягових двигунів, осьових редукторів, карданних валів, редукторних передач);

– неякісного регулювання гальмівної системи;

– неякісного регулювання напівавтоматичного пуску і гальмування;

– завантаження транспортного засобу.

При цьому присутні і фактори, що виникають періодично або тимчасово:

– підйоми і спуски;

– рух по кривих ділянках рейкового полотна (на поворотах);

– вплив природних стихій (вітер, дощ, сніг, жара, мороз тощо);

– пробуксовування коліс (юз).

Опір руху визначається питомим опором *w* (кг·т), який показує відношення загального опору руху до повної маси трамвая і яка є строго регламентованою для кожного типу транспортного засобу. За значенням питомого опору руху можна говорити про технічний стан транспортного засобу.

На практиці для вимірювання *w* використовують чотири методи:

1. Метод вибігу – вибирають прямолінійну, горизонтальну з розміткою ділянку шляху, дають вагону певний розгін під струмом до швидкості 5 км/год. Далі, перевівши вагон в режим вибігу, заміряють секундоміром час пробігу до повної зупинки та пройдений шлях. Тоді [65]

$$w = \frac{1000\gamma \cdot 2L}{9{,}81t^2}, \qquad (2.51)$$

де L – пройдений шлях, м; t – час, с; γ – коефіцієнт інерції.

2. Метод сталого струму полягає в тому, що при сталій швидкості без прискорення, сила тяги дорівнює опору руху. Для цього необхідно

мати спеціальну ділянку контактної мережі з пониженою напругою (80…100 В), при якій трамвай може розвинути швидкість 3…5 км/год. При стабілізації значення швидкості, за штатним амперметром фіксують струм. Потім за спеціальними таблицями визначають питомий опір руху [65]:

$$w = \frac{W}{G}, \tag{2.52}$$

де W = F, Н; G – маса вагона, т.

3. Метод різниці швидкостей полягає в припущенні того, що при русі трамвая в режимі вибігу на заздалегідь відміряній ділянці відмірюють значення швидкості в двох контрольних точках і час проходження між ними, а потім за формулою [24]

$$w = \frac{\gamma\left(V_1^2 - V_2^2\right)\cdot 10^3}{2gL_к}, \tag{2.53}$$

де V_1, V_2 – швидкості руху в точці 1 та точці 2, відповідно, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; $L_к$ – ділянка між точками 1 та 2, м.

4. Метод динамометричний – реалізується за допомогою лебідки або іншого транспорту, з'єднаних за допомогою динамометра, що має можливість рухатися зі сталою швидкістю. При всій на перший погляд простоті методу, найбільші проблеми виникають під час рушання з місця і під час зупинки цієї конструкції, ну і саме те, що треба мати таку лебідку.

Всі зазначені методи не в повній мірі задовольняють підприємства, оскільки:

– на більшості вагонах прилади для вимірювання швидкості не працюють, а ділянки з пониженою напругою певної довжини відсутні;

– на сьогодні найбільш поширеним методом, що застосовується на підприємствах, є метод вибігу, але за відсутності швидкостемірів для виходу на сталу швидкість виміри є досить наближеними.

Тому постає необхідність в розробці нового методу визначення питомої величини w, що і є метою даної роботи.

2.10.2 Розв’язання поставленої задачі

Врахувавши той факт, що трамваї Вінницького комунального підприємства «Трамвайно-тролейбусне управління» оснащені бортовими лічильниками електричної енергії, пропонується новий підхід до визначення питомої величини w – по затраченій енергії, – що базується саме на кількості спожитої електроенергії.

Ідея полягає в тому, щоб проїхати трамваєм по мірній ділянці шляху на першому ступені розгону (240 А) певну відстань, витративши при цьому деяку нормовану кількість електроенергії (наприклад, 1 кВт·год), контрольовану лічильником. В результаті можна отримати, що при споживання однієї і тієї ж кількості електроенергії вагони проходитимуть різну довжину шляху, тобто чим довший шлях пройде трамвай в режимі тяги, тим меншим буде опір руху.

До переваг такого підходу можна віднести [65]:

– можливість окремо визначити потужність (силу), необхідну для зрушення трамвая з місця;

– доступність засобів для вимірюваних величин (пройдений шлях, витрачена норма електроенергії);

– можливість проводити безперервний моніторинг опору руху на лінії, знаючи по режимних картах кількість електроенергії, необхідної для переїзду між зупинками.

Крім того запропонований підхід можна використати і для оцінки кваліфікації водія трамвая, але для цього потрібен набагато більший відрізок шляху. Майстерність водія – чинник, що має суб’єктивний характер, яким постійно нехтують при аналізі кількості спожитої електроенергії транспортним засобом. Але від нього, не в менше ніж від питомого опору руху, залежить витрата електроенергії вагоном. Для підтвердження сказаного наведемо лише основні фактори при вдалому використанні яких можна досягти зменшення споживання електроенергії:

– проїзд по маршруту з меншим числом пусків – для цього потрібно добре вивчити маршрут, профіль і стан колії, роботу світлофорів, дорожні знаки, тобто відчувати дорожню обстановку;

– застосовувати швидкий розгін і максимально використовувати вибіг, знаючи технічні можливості трамвая;

– при підході до повороту вибирати оптимальну швидкість, щоб не доводилося зайвий раз прискорюватись або пригальмовувати;

– під час руху під гору намагатися виїжджати на вищій позиції контролера;

– під час проїзду ділянки з боковим хитанням вміти швидко виводити вагон із резонансного стану;

– на стоянці, коли відомо, що вона триватиме більше трьох хвилин, знеструмлювати тяговий електропривод вагона;

– в зимовий час, для збереження тепла салону на зупинках, мінімально тримати двері салону відчиненими, якщо пасажири зайшли-вийшли;

– відчувати достатній вибіг вагона.

Як визначити частку втрат електроенергії, що припадає на технічний стан транспортного засобу і на те, як майстерно керує ним водій? Для цього на підставі аналізу багаторічних статистичних даних про споживання електроенергії конкретними трамваями при керуванні ними конкретними водіями було отримано такі висновки:

– при роботі на одному трамваї в однакових умовах (час доби, погодні умови, період року, дорожня обстановка), але різними водіями кількість спожитої електроенергії була різною, причому ця різниця в окремих випадках досягала відмінності в 50 %, що говорить про різну кваліфікацію водіїв;

– при роботі конкретного водія, але на різних трамваях теж кількість спожитої електроенергії була різною, що говорить при різний технічний стан трамваїв.

Тому, маючи статистику по трамваях і водіях, знаючи середнє значення питомої витрати електроенергії по трамваях і по водіях, за критерієм енерговитрат можна визначити цю частку.

2.11 Контроль та реєстрація параметрів роботи трамвая

2.11.1 Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

Один із способів економії електроенергії трамваєм під час перебування його на маршруті – задання потрібного закону зміни швидкості руху трамвая на кожному перегоні (між зупинками), який визначається оптимальною залежністю струму тягових електричних двигунів від

довжини перегону, його параметрів та загальної маси вагона (з врахуванням пасажирів), що забезпечує мінімум електроспоживання.

Існує декілька пристроїв, що дозволяють контролювати та реєструвати параметри роботи вагонів, прикладом яких можуть бути пристрої, описані в роботах [67, 68]. Та всі вони працюють лише на ідентифікацію поточних параметрів без можливості внесення корегування для забезпечення оптимального подолання відстані маршруту.

Тому потрібно розробити новий пристрій для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая, що дозволив би врахувати перераховані вище зауваження.

2.11.2 Розв'язання поставленої задачі

Введемо деякі позначення: N_i – номер маршруту ($i = \overline{1,m}$, де m – загальна кількість трамвайних маршрутів міста); $n_{i,j}$ – номер перегону ($j = \overline{1,k}$, де k – загальна кількість перегонів на N_i-му маршруті); $L_{i,j,q}$ – відстань, яку подолав вагон від зупинки відправлення на n_i,-му перегоні ($q = \overline{0,R_{i,j}}$, де $R_{i,j}$ – довжина $n_{i,j}$-го перегону); $\vartheta_{i,j,q}$ – швидкість руху вагона.

Враховуючи вище сказане, можна описати оптимізований закон зміни швидкості вагона в такому загальному вигляді [69, 70]:

$$\vartheta_{i,j,q} = f\left(L_{i,j,q}; M_{i,j,q}\right), \tag{2.54}$$

де $M_{i,j,q}$ – маса вагона з пасажирами на ділянці $j, q,$ і-го маршруту (оскільки $M_{i,j,q}$ не залежить від q, то для спрощення можна було б індекс q опустити).

Закон зміни швидкості вагона, що описується рівнянням (2.54), в більш детальному представлені можна синтезувати, використовуючи роботи [71, 72].

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОГО СТРУМОЗНІМАННЯ ТА КОНТРОЛЮ Й РЕЄСТРАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ТРАМВАЯ

3.1 Розробка пристроїв для підтримання оптимального натиску пантографа на контактну мережу

Одним із способів зменшення втрат в контактній мережі міського електротранспорту є забезпечення оптимального процесу струмознімання пантографом трамвая [73, 74].

Для забезпечення стійкого струмознімання контактний натиск повинен бути якомога більшим, а за умов мінімальної зношеності контактуючих матеріалів – по можливості якомога меншої (але не меншої значення, при якому забезпечується стійке протікання струму) [24].

Розроблено пристрій для підтримання оптимального натиску на контактну мережу [74–77], схему якого показано на рис. 3.1.

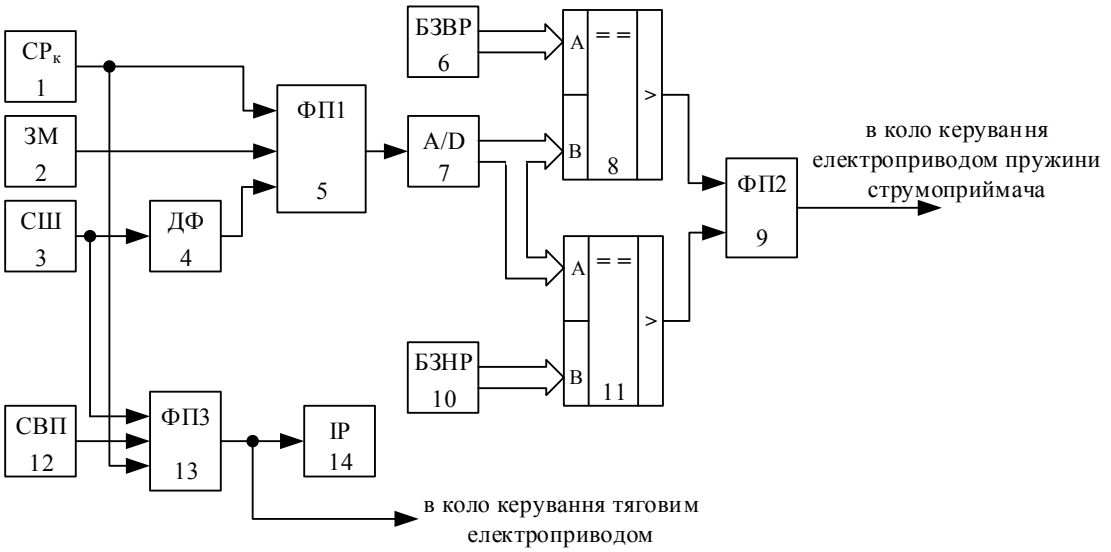


Рисунок 3.1 – Пристрій для підтримання оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу

На рис. 3.1: 1 – сенсор натиску СР$_к$; 2 – задавач приведених мас струмоприймача і контактної підвіски ЗМ; 3 – сенсор швидкості СШ; 4 – диференціатор ДФ; 5, 9, 13 – перший ФП1, другий ФП2 та третій

ФП3 функціональні перетворювачі; 6 – блок задання верхнього рівня БЗВР значення контактного натиску; 7 – аналого-цифровий перетворювач A/D; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратори; 10 – блок задання нижнього рівня БЗНР значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу СВП; 14 – індикатор ІР.

Запропонований пристрій працює так. Сенсор натиску $СР_к$ 1 вимірює поточне значення натиску $Р_к$ і передає на перший вхід першого функціонального перетворювача ФП1 5, на другий вхід якого подається значення приведених мас струмоприймача і контактної підвіски від ЗМ 2. Швидкість руху вагона вимірюється сенсором швидкості СШ 3 і після операції диференціювання, що виконується диференціатором ДФ 4, подається на третій вхід ФП1 5, який здійснює пошук оптимального значення контактного натиску $Р_{к.опт}$. Аналого-цифровий перетворювач A/D 7 перетворює аналоговий сигнал $Р_{к.опт}$ в цифровий і передає на другий вхід першого компаратора 8, на перший вхід якого подається максимально допустиме значення контактного натиску $Р_{к.max}$ від БЗВР 6.

Якщо $Р_{к.опт} > Р_{к.max}$, то на виході першого компаратора 8 формується сигнал логічної одиниці, який подається на перший вхід другого функціонального перетворювача ФП2 9.

Якщо $Р_{к.опт} < Р_{к.max}$, то на виході першого компаратора 8 формується сигнал логічного нуля. Цифрове значення $Р_{к.опт}$ з виходу A/D 7 подається і на перший вхід другого компаратора 11, на другий вхід якого подається мінімально допустиме значення контактного натиску $Р_{к.min}$ від БЗНР 10.

Якщо $Р_{к.опт} < Р_{к.minx}$, то на виході другого компаратора 11 формується сигнал логічної одиниці, який подається на другий вхід другого функціонального перетворювача ФП2 9.

Якщо $Р_{к.опт} > Р_{к.min}$, то на виході другого компаратора 11 формується сигнал логічного нуля.

Другий функціональний перетворювач ФП2 9 здійснює обробку вхідних сигналів від першого 8 та другого 11 компараторів і у випадку появи на його вході сигналу хоча б однієї логічної одиниці видає сигнал в коло керування електроприводом пружини струмоприймача для її послаблення або натягу (передбачається встановлення додаткового

електропривода керуванням натягу пружини струмоприймача; можливий і інший вид привода).

Сенсор висоти контактного проводу СВП 12 забезпечує вимірювання значення провисання контактного проводу і його передачу на другий вхід третього функціонального перетворювача ФП3 13, на перший вхід якого подається значення швидкості руху вагона з СШ 3, а на третій вхід – поточне значення натиску $Р_к$ пантографа на контактний провід із сенсора натиску $СР_к$ 1.

ФП3 13 забезпечує пошук оптимальної швидкості руху вагона з точки зору оптимального контактного натиску, яка реєструється на індикаторі ІР 14 і передається в коло керування тяговим електроприводом трамвая для її забезпечення.

Пристрій для підтримання оптимального натиску на контактну мережу [76] не враховує температуру та вологість навколишнього середовища, що зменшує оптимальність процесу струмознімання. Тому для підвищення оптимальності процесу струмознімання було запропоновано пристрій для оптимального струмознімання пантографом трамвая [77], схему якого показано на рис. 3.2.

На схемі рис. 3.2: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведених мас струмоприймача і контактної підвіски; 3 – сенсор швидкості; 4 – диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетворювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратор; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості.

Пристрій для оптимального струмознімання пантографом трамвая (див. рис. 3.2) відрізняється від пристрою для підтримання оптимального натиску на контактну мережу (див. рис. 3.1) тим, що в нього введено сенсор температури 15, сенсор вологості 16, четвертий 17 та п’ятий 18 функціональні перетворювачі відповідно, другий 19 та третій 20 аналого-цифрові перетворювачі відповідно.

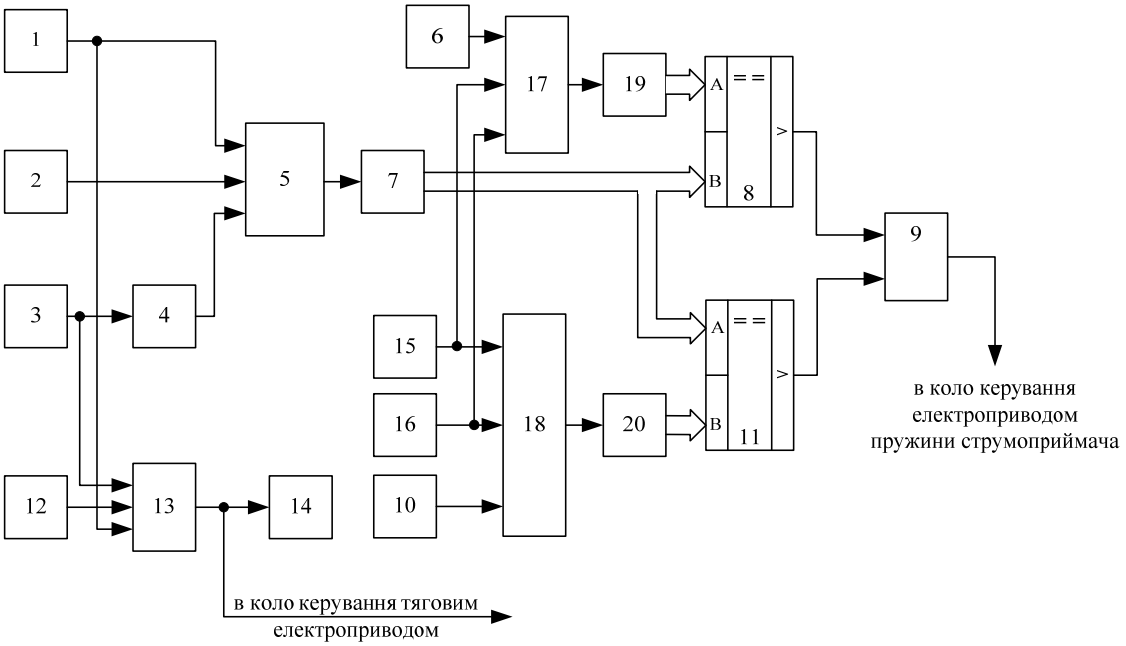


Рисунок 3.2 – Структура пристрою для оптимального струмознімання пантографом трамвая

Особливістю роботи є те, що значення температури навколишнього середовища, що вимірюється сенсором температури 15, а також значення вологості, що вимірюється сенсором вологості 16, надходять на четвертий 17 та п’ятий 18 функціональні перетворювачі.

На четвертий функціональний перетворювач 17 одночасно подається і максимально допустиме значення контактного натиску $P_{к.мах}$ від блока задання верхнього рівня значення контактного натиску 6, а на п’ятий функціональний перетворювач 18 – мінімально допустиме значення контактного натиску $P_{к.min}$ від блока задання нижнього рівня значення контактного натиску 10.

Четвертий функціональний перетворювач 17 в залежності від значень температури і вологості корегує значення максимально допустимого значення контактного натиску $P_{к.мах}$ до значення $P_{к.мах(кор.)}$, яке через другий аналого-цифровий перетворювач 19 подається на перший компаратор 8.

Якщо $P_{к.опт} > P_{к.мах(кор.)}$, то на виході першого компаратора 8 формується сигнал логічної одиниці, який подається на перший вхід другого функціонального перетворювача 9. Якщо $P_{к.опт} \leq P_{к.мах(кор.)}$, то на виході першого компаратора 8 формується сигнал логічного нуля.

П’ятий функціональний перетворювач 18 в залежності від значень температури і вологості корегує значення мінімально допустимого значення контактного натиску $P_{к.min}$ до значення $P_{к.min(кор.)}$, яке через третій аналого-цифровий перетворювач 20 подається на другий компаратор 11.

Якщо $P_{к.опт} < P_{к.min(кор.)}$, то на виході другого компаратора 11 формується сигнал логічної одиниці, який подається на другий вхід другого функціонального перетворювача 9. Якщо $P_{к.опт} \geq P_{к.min}$, то на виході другого компаратора 11 формується сигнал логічного нуля.

Пристрій для оптимального струмознімання пантографом трамвая [77] не враховує електричного навантаження, що зменшує оптимальність процесу струмознімання. Тому було запропоновано пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом трамвая на контактну мережу [78], схему якого показано на рис. 3.3.

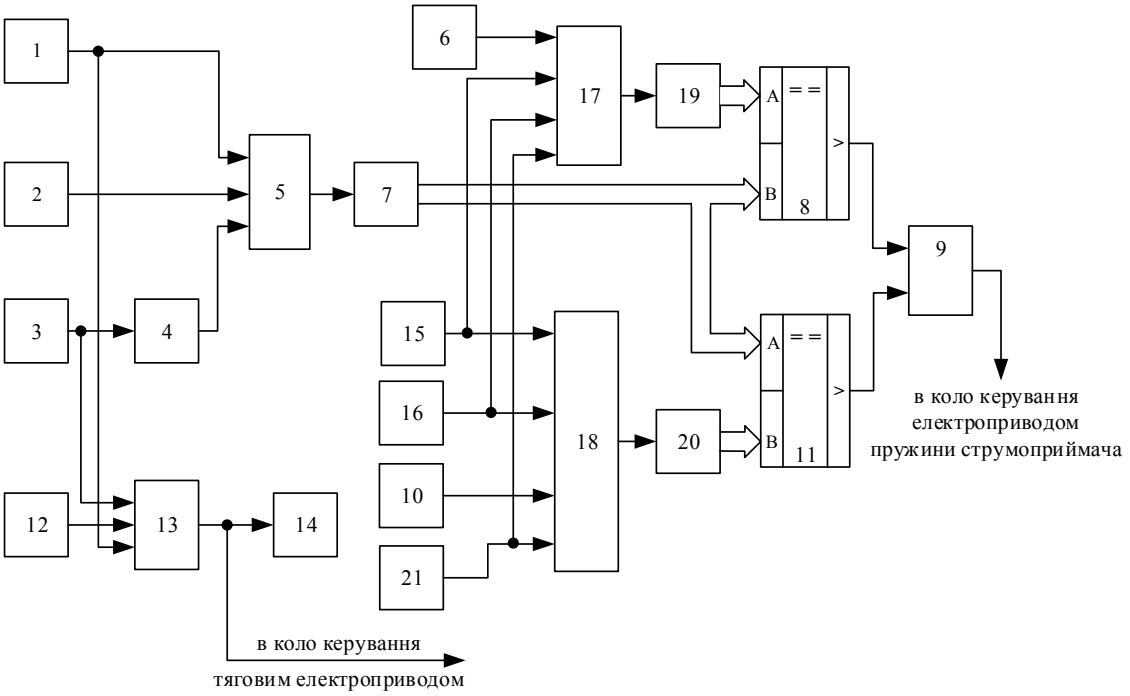


Рисунок 3.3 – Пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом трамвая на контактну мережу

На рис. 3.3: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведених мас струмоприймача і контактної підвіски; 3 – сенсор швидкості; 4 – диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетворювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього

рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратори; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості, 21 – сенсор струму.

Пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом трамвая на контактну мережу (див. рис. 3.3) відрізняється від пристрою для оптимального струмознімання пантографом трамвая (див. рис. 3.2) тим, що в нього введено сенсор струму 21.

Особливістю роботи є те, що значення струму, що вимірюється сенсором струму 21, надходить на четвертий 17 та п’ятий 18 функціональні перетворювачі.

Четвертий функціональний перетворювач 17 в залежності від значень температури, вологості та струму корегує значення максимально допустимого значення контактного натиску $P_{к.мах}$ до значення $P_{к.мах(кор.)}$, яке через другий аналого-цифровий перетворювач 19 подається на перший компаратор 8.

П’ятий функціональний перетворювач 18 в залежності від значень температури, вологості та струму корегує значення мінімально допустимого значення контактного натиску $P_{к.min}$ до значення $P_{к.min(кор.)}$, яке через третій аналого-цифровий перетворювач 20 подається на другий компаратор 11.

Пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом трамвая на контактну мережу [78] не забезпечує можливість корегувати приведену масу контактної підвіски на різних прогонах, що зменшує оптимальність процесу струмознімання. Тому було запропоновано пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом на контактну мережу (рис. 3.4) [79], що забезпечує можливість більш об’єктивно оцінити та скорегувати параметри роботи струмоприймача, що підвищує точність роботи пристрою та зменшує електричні втрати в перехідному контакті «контактний провід–струмоприймач».

На рис. 3.4: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведеної маси струмоприймача; 3 – сенсор швидкості; 4– диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетво-

рювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратор; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості, 21 – сенсор струму; 22 – задавач приведеної маси контактної підвіски, 23 – суматор.

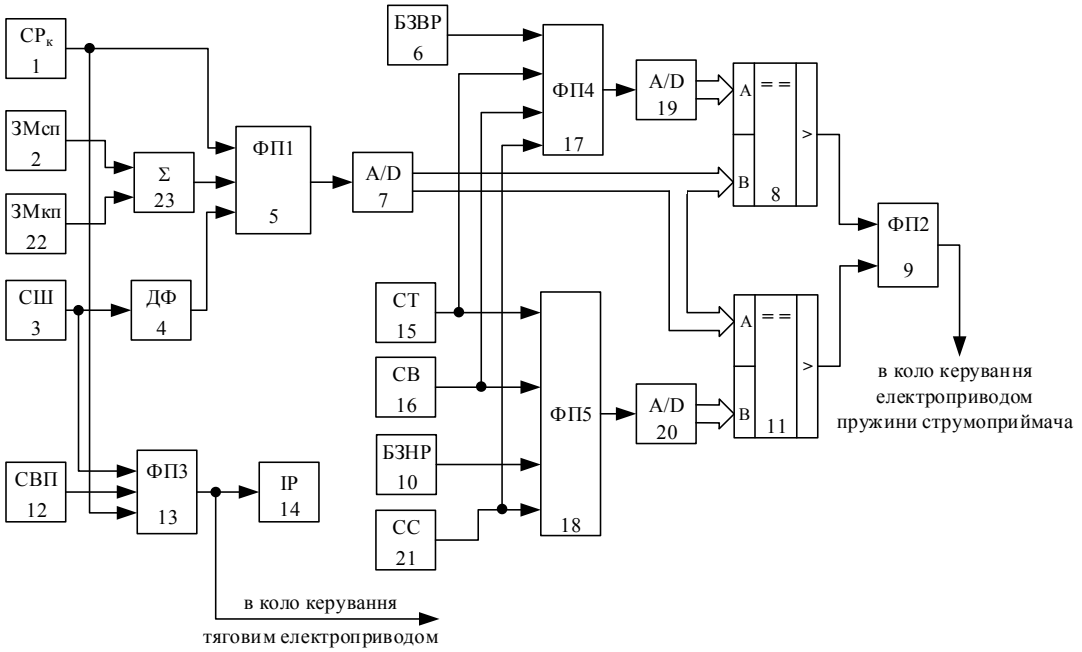


Рисунок 3.4 – Пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом на контактну мережу

Пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом на контактну мережу (див. рис. 3.4) відрізняється від пристрою для підтримання оптимального натиску пантографом трамвая на контактну мережу (див. рис. 3.3) тим, що в нього введено задавач приведеної маси контактної підвіски 22 та суматор 23.

Особливістю роботи є те, що значення приведеної маси струмоприймача з виходу задавача приведеної маси струмоприймача 2 та значення приведеної маси контактної підвіски з виходу задавача приведеної маси контактної підвіски 22 подаються на відповідні входи суматора 23, де відбувається їх додавання з подальшою передачею отриманого результату на другий вхід першого функціонального перетворювача 5.

В пристрої для підтримання оптимального натиску пантографом на контактну мережу [79] здійснюються об’єднані розрахунки в першому функціональному перетворювачі, що дають деякі похибки. Тому для підвищення точності роботи було запропоновано пристрій для підтримання оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу [80], схему якого показано на рис. 3.5.

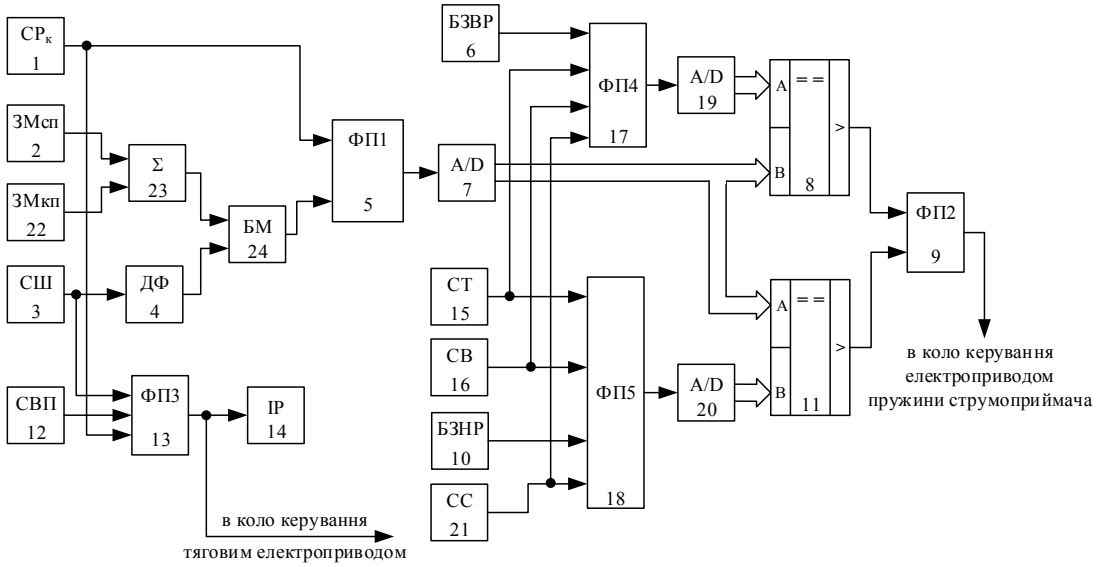


Рисунок 3.5 – Пристрій для підтримання оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу

На рис. 3.5: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведеної маси струмоприймача; 3 – сенсор швидкості; 4 – диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетворювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратори; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості, 21 – сенсор струму; 22 – задавач приведеної маси контактної підвіски, 23 – суматор, 24 – блок множення.

Пристрій для підтримання оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу (див. рис. 3.5) відрізняється від пристрою

для підтримання оптимального натиску пантографом на контактну мережу (див. рис. 3.4) тим, що в нього введено блок множення 24.

Особливістю роботи є те, що результат сумування з виходу суматора 23 (на вводи якого подаються значення приведеної маси струмоприймача з виходу задавача приведеної маси струмоприймача 2 та значення приведеної маси контактної підвіски з виходу задавача приведеної маси контактної підвіски 22) подається на перший вхід блока множення 24, на другий вхід якого подається результат операції диференціювання швидкості руху вагона, що вимірюється сенсором швидкості 3.

В блоці множення 24 відбувається множення сигналів, які надходять з виходів суматора 23 та диференціатора 24, а результат надходить на другий вхід першого функціонального перетворювача 5, який здійснює пошук оптимального значення контактного натиску $P_{к.опт}$.

Для підвищення точності роботи пристрою для підтримання оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу [80] було запропоновано пристрій для забезпечення оптимального струмознімання [81], схему якого показано на рис. 3.6.

На рис. 3.6: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведеної маси струмоприймача; 3 – сенсор швидкості; 4 – диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетворювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратор; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості, 21 – сенсор струму; 22 – задавач приведеної маси контактної підвіски, 23 – суматор, 24 – блок множення.

Пристрій для забезпечення оптимального струмознімання (див. рис. 3.6) відрізняється від пристрою для підтримання оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу (див. рис. 3.5) тим, що в нього введено зв’язок з виходу сенсора висоти контактного проводу 12 до третього входу першого функціонального перетворювача 5.

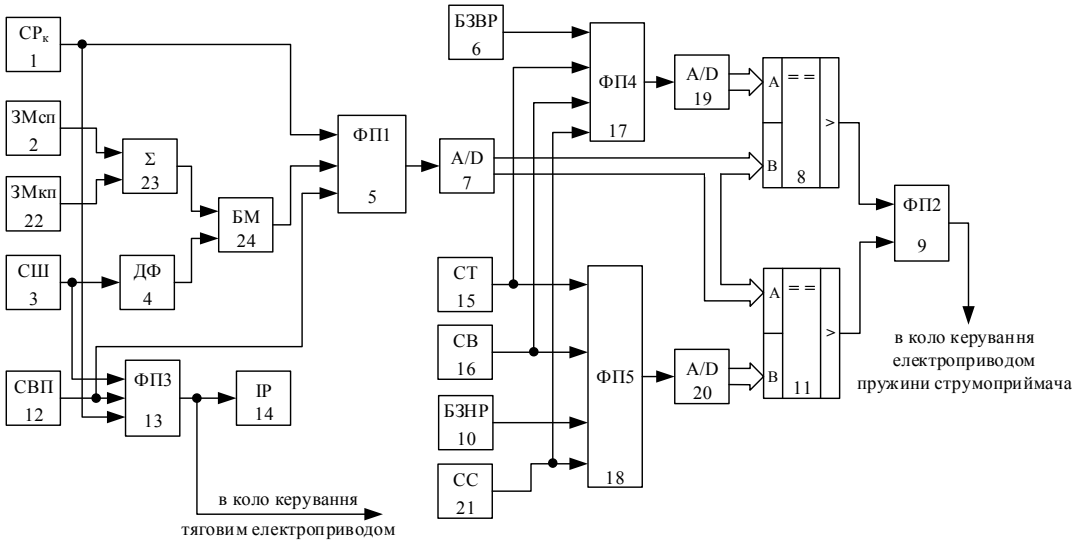


Рисунок 3.6 – Пристрій для забезпечення оптимального струмознімання

Особливістю роботи є те, що в першому функціональному перетворювачі 5 відбувається пошук оптимального значення контактного натиску $P_{к.опт}$ з врахуванням значення натиску $P_к$, що виміряне сенсором натиску 1, значення приведеної маси струмоприймача, що задається в задавачі приведеної маси струмоприймача 2, значення приведеної маси контактної підвіски, що задається задавачем приведеної маси контактної підвіски 22, та швидкості руху вагона, що вимірюється сенсором швидкості 3.

Пристрій для забезпечення оптимального струмознімання [81] не враховує провисання проводу на прогонах для визначення оптимального значення натиску струмознімального пристрою на контактну мережу, не враховує для пошуку оптимальної швидкості руху вагона довжини прогону, що зменшує оптимальність процесу струмознімання. Тому було запропоновано пристрій для підтримання оптимального струмознімання пантографом [82], схему якого показано на рис. 3.7.

На рис. 3.7: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведеної маси струмоприймача; 3 – сенсор швидкості; 4 – диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетворювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратор; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного

натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості, 21 – сенсор струму; 22 – задавач приведеної маси контактної підвіски, 23 – суматор, 24 – блок множення, 25 – задавач довжини прогону.

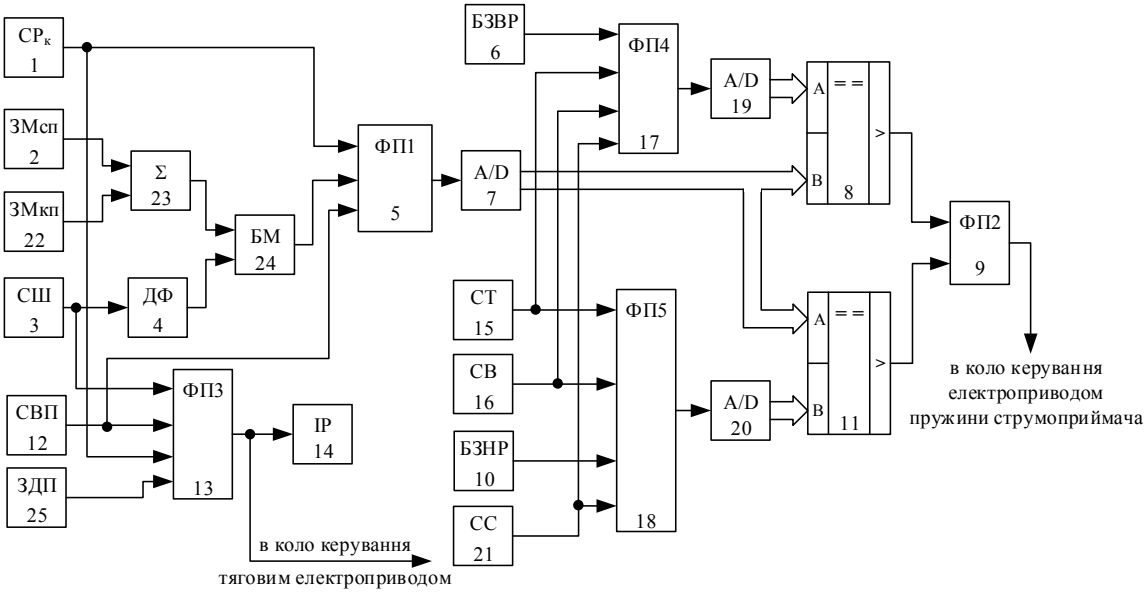


Рисунок 3.7 – Пристрій для підтримання оптимального струмознімання пантографом

Пристрій для підтримання оптимального струмознімання пантографом (див. рис. 3.7) відрізняється від пристрою для забезпечення оптимального струмознімання (див. рис. 3.6) тим, що в нього введено задавач довжини прогону 25.

Особливістю роботи є те, що третій функціональний перетворювач ФП 13 забезпечує пошук оптимальної швидкості руху вагона з точки зору оптимального контактного натиску з врахуванням висоти контактного проводу, виміряного сенсором висоти контактного проводу 12, довжини прогону, заданого в задавачі довжини прогону 25, швидкості вагона, виміряного сенсором швидкості 3, та поточного натиску, виміряного сенсором натиску 1.

Для підвищення роботи пристрою для підтримання оптимального струмознімання пантографом [82] було запропоновано пристрій для забезпечення оптимального натиску пантографом на контактну мережу [83], схему якого показано на рис. 3.8.

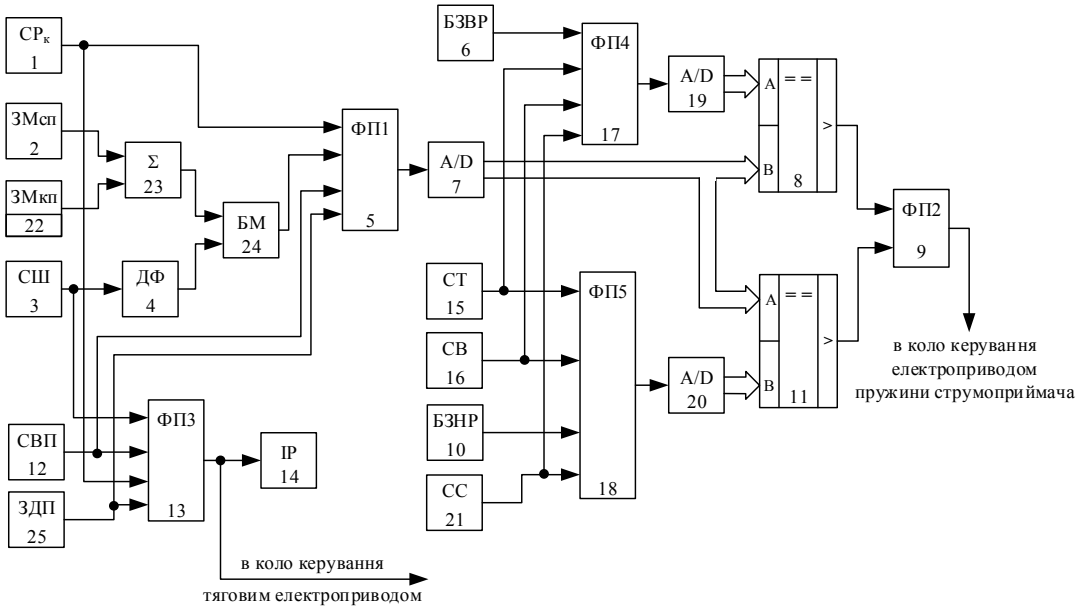


Рисунок 3.8 – Пристрій для забезпечення оптимального натиску пантографом на контактну мережу

На рис. 3.8: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведеної маси струмоприймача; 3 – сенсор швидкості; 4 – диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетворювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратор; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості, 21 – сенсор струму; 22 – задавач приведеної маси контактної підвіски, 23 – суматор, 24 – блок множення, 25 – задавач довжини прогону.

Пристрій для забезпечення оптимального натиску пантографом на контактну мережу (див. рис. 3.8) відрізняється від пристрою для підтримання оптимального струмознімання пантографом (див. рис. 3.7) тим, що в нього введено зв’язок з виходу задавача довжини прогону 25 до четвертого входу першого функціонального перетворювача ФП1 5.

Особливістю роботи є те, що перший функціональний перетворювач ФП1 5 здійснює пошук оптимального значення контактного натиску $Р_{к.опт}$ з врахуванням поточного натиску, приведених мас струмоп-

риймача й контактної підвіски, поточної швидкості вагона, висоти контактного проводу та довжини прогону.

Пристрій для забезпечення оптимального натиску пантографом на контактну мережу [83] не забезпечує можливості корегування мінімально та максимально допустимих значень контактного натиску залежно від провисання проводу та довжини прогону, що зменшує оптимальність процесу струмознімання. Тому було запропоновано пристрій для забезпечення оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу [84], схему якого показано на рис. 3.9.

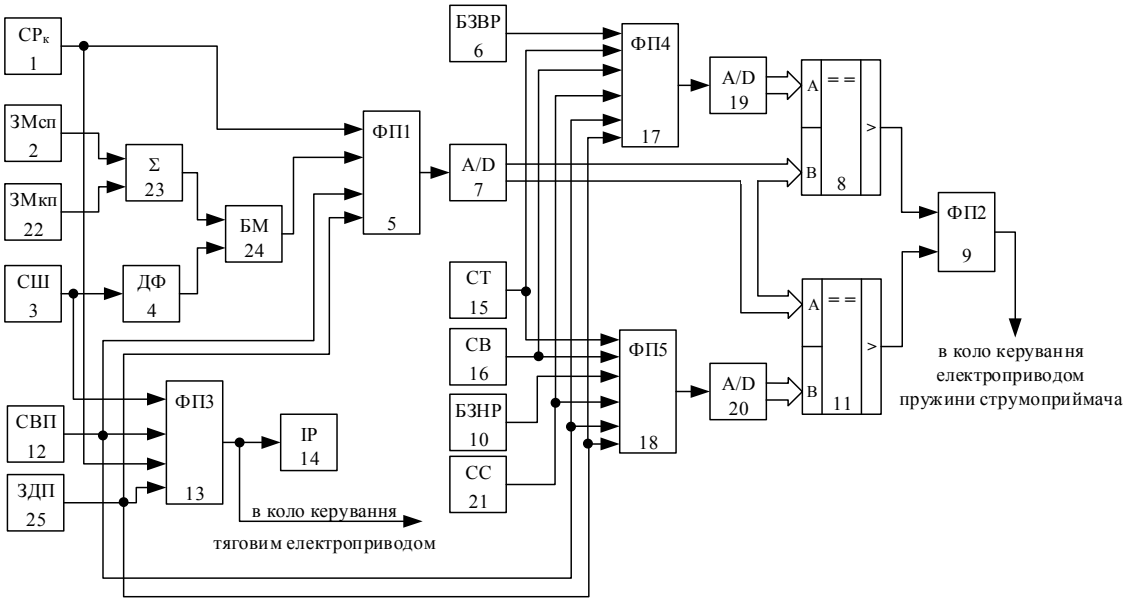


Рисунок 3.9 – Пристрій для забезпечення оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу

На рис. 3.9: 1 – сенсор натиску; 2 – задавач приведеної маси струмоприймача; 3 – сенсор швидкості; 4 – диференціатор; 5, 9, 13, 17, 18 – перший, другий, третій, четвертий та п’ятий функціональні перетворювачі відповідно; 6 – блок задання верхнього рівня значення контактного натиску; 7, 19, 20 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 8, 11 – відповідно перший і другий компаратори; 10 – блок задання нижнього рівня значення контактного натиску; 12 – сенсор висоти контактного проводу; 14 – індикатор; 15 – сенсор температури; 16 – сенсор вологості; 21 – сенсор струму; 22 – задавач приведеної маси контактної підвіски; 23 – суматор; 24 – блок множення; 25 – задавач довжини прогону.

Пристрій для забезпечення оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу (див. рис. 3.9) відрізняється від пристрою для забезпечення оптимального натиску пантографом на контактну мережу (див. рис. 3.8) тим, що в нього введено зв'язки з виходу сенсора висоти контактного проводу до третього входу четвертого функціонального перетворювача ФП4 17 та до третього входу п'ятого функціонального перетворювача ФП5 18, а також зв'язки з виходу задавача довжини прогону 25 до четвертого входу четвертого функціонального перетворювача ФП4 17 та до четвертого входу п'ятого функціонального перетворювача ФП5 18.

Особливістю роботи є те, що четвертий функціональний перетворювач ФП4 17 в залежності від значень температури, вологості, струму, висоти проводу та довжини прогону корегує значення максимально допустимого значення контактного натиску $P_{к.max}$ до значення $P_{к.max(кор.).}$, а п'ятий функціональний перетворювач ФП5 18 в залежності від значень температури, вологості, струму, висоти проводу та довжини прогону корегує значення мінімально допустимого значення контактного натиску $P_{к.min}$ до значення $P_{к.min(кор.)}$.

3.3 Розробка пристрою для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая

На рис. 3.10 представлено пристрій для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая, що реалізує модель (2.50), який містить [69, 70, 85]: 1 – задавач маршруту (ЗМ); 2 – лічильник пройденого шляху (ЛПШ); 3 – перший функціональний блок (ФБ1); 4 – сенсор стану дверей (ССД); 5 – сенсор маси вагона (СМВ); 6 – другий функціональний блок; 7 – блок ділення; 8 – блок управління; 9 – сенсор швидкості; 10 – реєстратор.

Запропонований пристрій працює так.

При виїзді на маршрут, встановлюється номер N_i маршруту в ЗМ 1 (див. рис. 3.10). Сигнал із ЗМ 1 подається на перший вхід ФБ1 3 та на вхід ЛПШ 2. При цьому останній обнулиться.

Вихідним сигналом ФБ1 3 є значення пройденого шляху на j-му перегоні і-го маршруту – $l_{i,j,q}$, який подається на перший вхід ФБ2 6, на другий і третій входи якого надходять сигнали, що відповідають стану

дверей (D = 1 – двері відкриті, D = 0 – двері закриті) від ССД 4 та маси вагона $M_{i,j,q}$ від СМВ 5 відповідно. ФБ2 6 реалізує закон управління (2.54) в залежності від вхідних даних, а на виході видає $\vartheta_{i,j,q}^{(опт)}$ для кожного j-го перегону і-го маршруту.

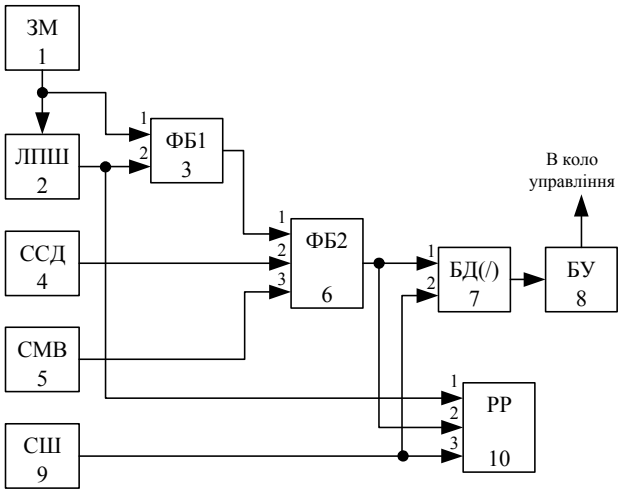


Рисунок 3.10 – Пристрій для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая

Зміна закону $\vartheta_{i,j,q}^{(опт)}$ на наступний перегін може відбувається відповідно до залежностей [69]

$$\vartheta_{i,j,q} = \begin{cases} f\left(L_{i,j,q}\right), & \text{при } L_{i,j,q} < R_{i,j} \wedge D = 0; \\ 0, & \text{при } L_{i,j,q} < R_{i,j} \wedge D = 1; \\ f\left(L_{i,j+1,q}\right), & \text{при } L_{i,j,q} \geq R_{i,j} \wedge D = 0; \\ 0, & \text{при } L_{i,j,q} \geq R_{i,j} \wedge D = 1. \end{cases} \qquad (3.1)$$

Інтерпретувати вираз (3.1) можна в такий спосіб: якщо шлях, пройдений вагоном на j-му перегоні і-го маршруту, менший довжини цього перегону $R_{i,j}$ і двері є закритими, то повинен спрацювати поточний закон оптимального керування (перший рядок системи (3.1); якщо шлях, пройдений вагоном на j-му перегоні і-го маршруту рівний або більший довжини цього перегону $R_{i,j}$ і двері закриті, то закон оптимального керування повинен змінитися на наступний (третій рядок системи (3.1); якщо ж двері вагона відкриті, то не залежно від пройденого шляху на систему керування електроприводом вагона сигнал про початок руху не повинен подаватися (другий та четвертий рядок системи (3.1).

В БД 7 відбувається процес ділення вхідних величин $\vartheta_{i,j,q}^{(опт)}$ та $\vartheta_{i,j,q}$, і результат надходить на БУ 8, що далі передається в коло управління електроприводом вагона. Якщо $\vartheta_{i,j,q}^{(опт)} \neq \vartheta_{i,j,q}$, то засобами системи електроприводу вагона відбувається підгонка швидкості руху вагона до оптимального значення.

РР 10 дозволяє реєструвати пройдений шлях кожного перегону із відповідними значення швидкості як реальної $\vartheta_{i,j,q}$, так і оптимальної $\vartheta_{i,j,q}^{(опт)}$.

Принцип роботи пристрою ілюструється алгоритмом, поданим на рис. 3.11.

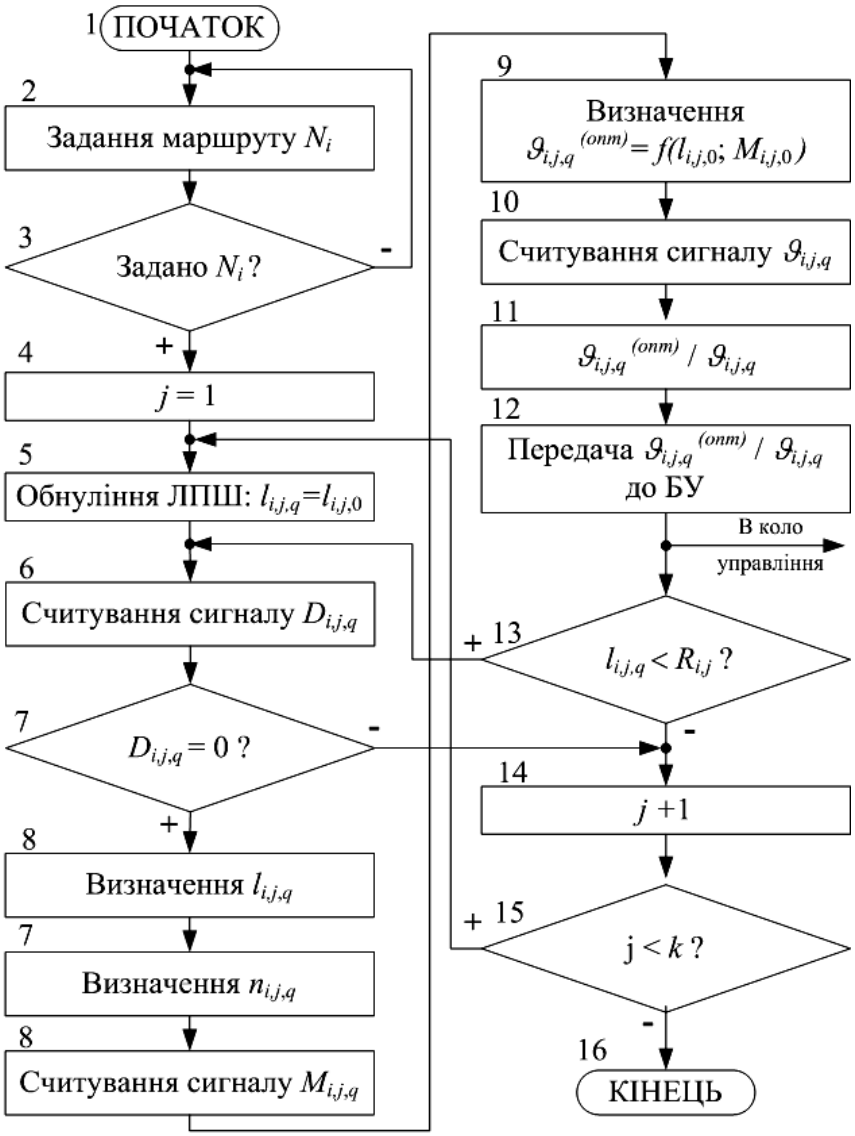


Рисунок 3.11 – Алгоритм роботи пристрою

ВИСНОВКИ

Основні результати роботи такі:

1. Здійснено аналіз особливостей споживання електроенергії трамваями.

2. Отримано статистичні оцінки процесу електроспоживання трамваями на маршрутах, визначено їхні довірчі інтервали, синтезовані авторегресійні математичні моделі даного процесу для усередненого трамвая депо. Незважаючи на плинність часу та суттєві зміни в організації роботи трамвайного парку, зокрема водіїв вагонів, споживання електроенергії трамваями залишається описуватися нормальним логарифмічним законом розподілу, а різниця рівнів електроспоживання трамваями між водіями з кращою кваліфікацією та середньостатистичною по депо залишається суттєвою, хоча вона дещо зменшилася.

3. Запропоновано підходи до формалізації та автоматизації процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах.

Для практичної реалізації вибрано програмне середовище на базі Microsoft Excel та Microsoft Visual Basic, що задовольняє низку критеріїв для розв'язання поставленої задачі.

Розроблено програму «ModelAvtoreg», що дозволяє отримати:

– оптимальні регресійні математичні моделі процесу споживання електроенергії трамваєм на маршруті з порядком авторегресії, не вищим десяти;

– прогноз рівня споживання електроенергії трамваєм на маршруті.

4. Показано, що можна отримати суттєву економію електроенергії трамваями КТ 4СУ:

– шляхом модернізації обмотки якоря двигуна двигун-генератора SMD 5001. Звернено увагу і на те, що модернізація сприяє підвищенню ресурсу деяких елементів самого двигун-генератора;

– шляхом відключення системи вентиляції (двигун-вентилятора) тягових електричних двигунів першого візка без їх перегріву) в холодну пору року. Дані рекомендації щодо реалізації такого режиму роботи електроприводу. Звернено увагу і на те, що може бути отримана додаткова економія внаслідок того, що не прийдеться на ці холодні місяці року виділяти кошти та час на ремонт і технічне обслуговування двигун-вентиляторів;

– шляхом модернізації системи опалення кабіни водія;

5. Запропоновано новий підхід до визначення питомої величини опору руху транспортного засобу за затраченою енергією, який може бу-

ти використаний для трамваїв, на борту яких є лічильники електроенергії. Крім того новий підхід може бути задіяний для оцінки рівня кваліфікації водія вагона.

6. Показано, що за наявності оптимального закону керування рухом трамвая можна зекономити на кількості спожитої електроенергії. Для реалізації такої можливості розроблений пристрій для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая та побудований алгоритм його функціонування.

7. Досліджено процес струмознімання, в результаті чого виявлено причини, які погіршують цей процес, сформовано задачі для забезпечення оптимального процесу струмознімання.

Розроблено математичну модель для визначення оптимального натиску струмознімальним елементом на контактний провід та моделі для аналізу цього процесу в програмному середовищі Simulink (Matlab).

Запропоновано пристрої, що дозволяють забезпечити оптимальне струмознімання пантографом трамвая, зменшуючи при цьому втрати електроенергії в перехідному контакті «бугель пантографа–контактний провід» та зношеність контактного проводу й вугільних вставок пантографа. Залежно від параметрів навколишнього середовища (температури й вологості повітря) та руху (швидкості, завантаження вагона, рельєфу дорожнього покриття) пристрій формує та подає керуючий сигнал в коло електропривода пружини струмоприймача та коригувальний сингал в коло тягового електропривода трамвая.

Практичне значення одержаних результатів полягає в зменшенні рівня споживання електроенергії трамваями на маршрутах.

Запропоновано лічильник електроенергії постійного струму, який можна використовувати для контролю спожитої електричної енергії трамваєм на маршруті, що дозволяє визначати технічний стан вагона, з одного боку, та оцінювати кваліфікацію водія, з другого. Показано, що використання такого лічильника на борту кожного з вагонів Вінницького підприємства «Трамвайно-тролейбусне управління» дозволило знизити рівень споживання електроенергії на 12,5 %.

За результатами аналізу процесу струмознімання пантографом трамвая встановлено, що найбільшим джерелом електричних втрат в пантографі є клема мідного гнучкого проводу, який з’єднує його рухомі частини. Для усунення цього недоліку запропоновано збільшити поперечний переріз вказаної клеми.

Сформульовано також задачі, розв’язання яких дозволить отримати додаткову економію електроенергії в процесі роботи трамвая.

ЛІТЕРАТУРА

1. Торкатюк В. И. Исследование особенностей экономии электроэнергии при эксплуатации электрифицированного транспорта в жилищно-коммунальном хозяйстве [Електронний ресурс] / В. И. Торкатюк, А. И. Кириченко, В. В. Благой, О. В. Хомутенко, И. А. Полчанинова. – Режим доступу: http://eprints.kname.edu.ua/31823/1/58.pdf

2. Колб А. А. Використання енергії рекуперації електротранспорту для управління якістю електроенергії / А. А. Колб // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – 2010. – Випуск 4(63). – Частина 1. – С. 98–102.

3. Саблін О. І. Оптимізація режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії в системах електричного транспорту / О. І. Саблін // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 11. – С. 53–60.

4. Дружкова Н. Л. Вопросы энергосбережения на городском транспорте [Електронний ресурс] / Н. Л. Дружкова, В. Д. Константинов. – Режим доступу: http://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6217/8.pdf?sequence=1.

5. Далека В. Х. Наукові основи ресурсозбереження при експлуатації міського електричного транспорту : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : спец. 05.13.22 «Управління проектами та розвиток виробництва» / Далека Василь Хомич ; Національний транспортний університет. – К., 2005.

6. Светодиодные лампочки в трамвай для экономии энергии и денег. – Електронний ресурс. – Режим доступу: http://forum.tr.ru/read.php?1,962487,962510.

7. Внутреннее светодиодное освещение для трамваев HELSINKI ARTIC – Електронний ресурс. – Режим доступу: http://www.teknoware.com/ru/vnutrennee-svetodiodnoe-osveshchenie-dlya-tramvaev-helsinki-artic.

8. Шибанов А. П. Мероприятия по энергосбережению в подвижном составе городского электрического транспорта [Електронний ресурс] / А. П. Шибанов // Электронный журнал «ЭНЕРГОСОВЕТ». 2011. – № 4(17). – С. 13–14. – Режим доступу: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=192.

9. Базарна О. Є. Проблема енергозбереження на підприємствах міського електричного транспорту [Електронний ресурс] /

О. Є. Базарна, Т. П. Юр’єва. – Режим доступу: http://eprints.kname.edu.ua/30209/1/37.pdf

10. Розводюк М. П. Перспективи розвитку нових вінницьких трамваїв [Електронний ресурс] / М. П. Розводюк // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015) : ІІІ Міжнародна науково-технічна конференція, (14–15 жовтня 2015 р. м. Вінниця) : тези доповідей. – Режим доступу: http://conf.vntu.edu.ua/energo/2015/Abstr_OCEI-2015.pdf

11. Мокін Б. І. Розробка розкладу руху електротранспорту / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Г. Сторчак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 3. – С. 35–38.

12. Мокін Б. І. Розробка програми для проектування розкладу руху електротранспорту / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Г. Сторчак // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2005) : VIII Міжнародної науково-технічної конференції : тези доповідей. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – С. 188.

13. Мокін Б. Програма «Розрахунок розкладу руху електротранспорту» / Б. Мокін, М. Розводюк, В. Сторчак // Інформаційні системи та комп’ютерна інженерія. – 2005. – № 6. – С. 30–34.

14. Мокін Б. І. До питання визначення необхідної кількості вагонів міського електротранспорту на маршруті / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Г. Сторчак // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : наукові праці КДПУ. – Кременчук : КДПУ, 2006. – Вип. 3 (38). – Частина 2. – С. 34–36.

15. Мокін В. Б. До питань оптимізації руху міського електротранспорту / В. Б. Мокін, М. П. Розводюк, В. Г. Сторчак // Збірник праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2007. – С. 258–260.

16. Комп’ютерна програма для автоматизації процесу складання розкладів руху міського електротранспорту («Racprach») : Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 21865 / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Г. Сторчак. Дата реєстрації 30.08.2007.

17. Штанг Александр Александрович. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дис. … канд. техн. наук : 05.09.03 / Александр Александро-

вич Штанг. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2006. – 233 с.

18. Муфтиев С. Р. Система стабилизации напряжения тяговых подстанций городского электротранспорта : дис. … кандидата технических наук : 05.09.03 / С. Р. Муфтиев. – Уфа : Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2014. – 169 С.

19. Дудко В. Б. Математичні моделі емпіричних законів розподілу споживання електроенергії трамваями / В. Б. Дудко, Б. І. Мокін, М. П. Розводюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 5. – С. 42–46.

20. Мокін Б. І. Математичні моделі та системи технічної діагностики основних електротехнічних систем міських трамваїв : монографія / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 126 с.

21. Дудко В. Б. Математичні моделі прогнозу споживання електроенергії трамваями на маршрутах / В. Б. Дудко, Б. І. Мокін, М. П. Розводюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 6. – С. 38–44.

22. Дудко В. Б. Математичні моделі споживання електроенергії трамваями / В. Б. Дудко, Б. І. Мокін, М. П. Розводюк // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 2003. – Вып. 49. – С. 184–189.

23. Корниенко В. В. Критерии качества токосъема, определяющие ресурсосбережение / В. В. Корниенко, И. В. Доманский // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 5. – С. 18–21.

24. Веклич В. Ф. Диагностирование технического состояния троллейбусов / В. Ф. Веклич. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.

25. Сидоров О. А. Расчет взаимодействия штангового токоприемника с жестким токопроводом / О. А. Сидоров, И. Л. Саля // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 5. – С. 165–168.

26. Токосъем токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Показатели качества и методы их определения [Електронний ресурс]. – Режим доступу до даних: http://www.vniizht.ru/files/file_260/2012-09-06/The_Standard_of_use_of_current_collection_of_railway_electric_rolling-Quality_indicators_and_methods_for_determining-24_08_2012.pdf.

27. Рекомендации по нормированию расхода электроэнергии на городском электрическом транспорте. – К. : МЖКХ УССР, 1979. – 42 с.

28. Витрати електроенергії трамвайними вагонами та тролейбусами. Нормативи. Метод розрахунку. Галузеві комунальні норми. – К. : Держбуд України, 2001. – 13 с.

29. Лічильник електричної енергії постійного струму: Пат. Україна, МПК G01R11/00 / В. В. Мосійчук. – №13878 ; заявлено 16.05.1994 ; опубл. 25.04.1997, Бюл. №2. – 4 с.

30. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений : ГОСТ 6962-75. – М. : Издательство стандартов, 1976. – 3 с.

31. Трегуб А. П. Электротехника / под ред. Э. В. Кузнецова. – К. : Вища школа, 1987. – 600 с.

32. Пат. 26458 UA, МПК G01R 11/00. Лічильник електричної енергії постійного струму [Текст] / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Б. Дудко (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u200704519 ; заявл. 23.04.2007 ; опубл. 25.09.2007, Бюл. № 15. – 2 с.

33. Мокін Б. І. Розробка лічильника електроенергії постійного струму для трамвая / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Б. Дудко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2007. – Вип. 3 (44). – С. 84–85.

34. Мокін Б. І. Дослідження процесу електроспоживання трамваями на маршрутах / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Б. Дудко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : наукові праці КДПУ. – Кременчук : КДПУ, 2006. – Вип. 5 (40). – Частина 1. – С. 42–46.

35. Колде Я. К. Практикум по теории вероятностей и математической статистике / Я. К. Колде. – М. : Высшая школа, 1991. – 157 с.

36. Бокс Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – 408 с.

37. Мокін Б. І. Математичні моделі ідентифікації електромеханічних процесів. Частина ІІ. Ідентифікація ЕМП у лінійних стохастичних системах із зосередженими параметрами / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 99 с.

38. Комп’ютерна програма для автоматизації процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах («ModelAvtoreg») : Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 16889 / Б. І. Мокін, М. П. Боцула, М. П. Розводюк, В. Б. Дудко. Дата реєстрації 07.06.2006.

39. Автоматизація процесу побудови регресійних математичних моделей споживання електроенергії трамваями на маршрутах / Б. І. Мокін, М. П. Боцула, М. П. Розводюк, В. Б. Дудко // Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія. – 2006. – № 2(6). – С. 123–127.

40. КТ4СУ. Описание и инструкция по уходу за электрооборудованием. – CKD PRAHA : Zavod TRAKCE, 1989. – 231 с.

41. Электрические машины : учеб. для электотехн. спец. Вузов : в 2-х ч. Ч. 2 / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1987. – 335 с.

42. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, І. В. Грабенко. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 86 с.

43. Грабко В. В. Електричні машини. Розрахунок експлуатаційних характеристик. Курсове проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 110 с.

44. Розводюк М. П. Електричні машини. Задачі для самостійного розв’язування : навчальний посібник / М. П. Розводюк. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 65 с.

45. Розводюк М. П. Електричні машини. Контрольні завдання для студентів напрямів підготовки «Електромеханіка», «Електротехніка та електротехнології» : навчальний посібник / М. П. Розводюк, С. М. Левицький. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 108 с.

46. Розводюк М. П. Електротехніка (Електричні машини, основи електропривода, електрозабезпечення, електроніка). Контрольні та розрахунково-графічні роботи для студентів неелектротехнічних спеціальностей : навчальний посібник / М. П. Розводюк, Є. Я. Блінкін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 144 с.

47. Зниження електроспоживання трамвая КТ 4СУ за рахунок модернізації обмотки якоря двигуна двигун-генератора SMD 5001 / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Б. Дудко, Д. П. Проценко // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – 2005. – № 4. – С. 64-65.

48. Розводюк М. П. Способи зменшення втрат електроенергії трамваєм / М. П. Розводюк, В. Б. Дудко // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 2009. – Вып. 90. – С. 423–427.

49. Филиппов И. Ф. Основы теплообмена в электрических машинах / И. Ф. Филиппов. – Л. : «Энергия», Ленинградское отделение, 1974. – 384 с.

50. Кошкин Н. И. Справочник по элементарной физике. – 8-е изд., перераб. / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 208 с.

51. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин : учебник для втузов / под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Высш. шк., 1984. – 431 с.

52. Мокін Б. І. Спосіб економії електроенергії трамваєм КТ 4СУ в холодну пору року / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, В. Б. Дудко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 4. – С. 50–52.

53. Розводюк М. П. Зниження електроспоживання трамвая КТ 4СУ за рахунок зміни конструкції системи опалення кабіни водія / М. П. Розводюк, В. Б. Дудко, Д. П. Проценко // Енергозбереження Поділля. – 2006. – № 1. – С. 48–50.

54. Пономарчук І. А. Вентиляція та кондиціювання повітря : навчальний посібник / І. А. Пономарчук, О. Б. Волошин. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 121 с.

55. Карпис Е .Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха / Е. Е. Карпис. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 268 с.

56. Промышленные тепломассообменные процессы и установки : учебник для вузов / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, О. Л. Данилов и др. ; под ред. А. М. Бакластова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.

57. Розводюк М. П. До питання зменшення втрат електроенергії в пантографі трамвая / М. П. Розводюк // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 4 (51). – Частина 1. – С. 84–86.

58. Розводюк М. П. Визначення оптимального значення контактного натиску струмознімальним елементом на контактну мережу / М. П. Розводюк // Nauka i utworzenie XXI Stulecia : Teoria, Praktyka. Innowacje». (29.11.2013–30.11.2013) : zbiór raportów naukowych. – Opole : Diamond trading tour, 2013. – 124 str. – S. 22–27.

59. KT4SU [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: http://depo.vn.ua/content/kt4su.

60. T4SU. Трамвайный вагон. Описание и инструкция по уходу за электрооборудованием. – Praha : ČKD PRAHA, Závod trakce, 1977.

61. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

62. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А .В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

63. Розводюк М. П. Особливості струмознімання пантографом [Електронний ресурс] / М. П. Розводюк, І. О. Діденко // Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2013) : II Міжнародна науково-технічна конференція, 22–24 жовтня 2013 р. : тези доп. – Вінниця. – С. 86. – Режим доступу: http://conf.vntu.edu.ua/energo/2013/tezy_dopov_okey-2013.pdf.

64. Берц Ю. А. Контактная сеть : иллюстрированное пособие / Ю. А. Берц, В. Е. Чекулаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1981. – 223 с.

65. Кнерель Г. М. Учебное пособие для водителя 3 класса / Г. М. Кнерель, М. Я. Резник, М. С. Черток. – М. : МКХ РСФСР, 1962. – 380 с.

66. Розводюк М. П. Вплив факторів технічного стану транспортного засобу на витрату електроенергії / М. П. Розводюк, В. Б. Дудко // Вісник Вінницького політехнічного інститут. – 2007. – № 3. – С. 50–52.

67. А. с. 1040501 СССР, МКИ G 07 C 5/08. Устройство для контроля и регистрации параметров работы локомотива / С. Н. Басович, А.Ф. Кукольников (СССР). – №3402544/18-24 ; заявлено 24.02.82 ; опубл. 07.09.83, Бюл. № 33. – 2 с.

68. А. с. 1446638 СССР, МКИ G 07 C 5/08. Устройство для контроля работы транспортных средств / В. Н. Дащук, С. Н. Демиденко, В. И. Петько, А. П. Струков, П. М. Чеголин (СССР). – №4137596/24-24 ; заявлено 20.10.86 ; опубл. 23.12.88, Бюл. № 47. – 7 с.

69. Розводюк М. П. До питання контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая / М. П. Розводюк, К. В. Барбалат // Електромеханічні і енергозберігаючі технології. – 2007. – Випуск 2 (2). – С. 65–66.

70. Розводюк М. П. Спосіб зменшення втрат електроенергії трамвая / М. П. Розводюк, В. С. Бомбик // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : збірник наукових праць

VII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 08–09 квітня 2010 р. – Кременчук : КДУ, 2010. – С. 513–514.

71. Мокін Б. І. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами електродвигунами постійного струму : монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 92 с.

72. Петров Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств / Ю. П. Петров. – Л. : Энергия, 1969. – 96 с.

73. Розводюк М. П. Пристрій для оптимального струмознімання пантографом трамвая / М. П. Розводюк, Д. Ф. Дворніцький // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : збірник наукових праць IX Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 07–08 квітня 2011 р. – Кременчук : КНУ, 2011. – С. 285–286.

74. Розводюк М. П. До питання зменшення втрат електроенергії трамваєм / М. П. Розволюк // Сталий розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : ХНАМГ, 2009. – С. 41–44.

75. Розводюк М. П. Пристрій для оптимального струмознімання пантографом трамвая / М. П. Розводюк, Л. А. Устяк // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації : збірник наукових праць VII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 08–09 квітня 2010 р. – Кременчук : КДУ, 2010. – С. 511–512.

76. Пат. 52718 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для підтримання оптимального натиску струмоприймача трамвая / М. П. Розводюк, Ю. В. Шевчук, В. С. Бомбик, Л. А. Устяк (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201001308 ; заявл. 08.02.2010 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 17. – 4 с.

77. Пат. 63947 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для підтримання оптимального натиску струмоприймача на контактну мережу / М. П. Розводюк, В. С. Бомбик, Л. А. Устяк (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u201103777 ; заявл. 29.03.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20. – 4 с.

78. Пат. 67828 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для підтримання оптимального натиску пантографа трамвая на контактну мережу /

М. П. Розводюк, В. С. Бомбик, Л. А. Устяк (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – №u 2011 08773 ; заявл. 12.07.2011 ; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. – 6 с.

79. Пат. 97875 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для підтримання оптимального натиску пантографом на контактну мережу / Розводюк М. П. (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u 2014 10922; заявл. 06.10.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. – 7 с.

80. Пат. 97873 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для підтримання оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу / Розводюк М. П. (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u 2014 10920 ; заявл. 06.10.2014 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. – 7 с.

81. Пат. 97874 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для забезпечення оптимального струмознімання / Розводюк М. П. (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u 2014 10921; заявл. 06.10.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. – 7 с.

82. Пат. 97871 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для підтримання оптимального струмознімання пантографом / Розводюк М.П. (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u 2014 10917 ; заявл. 06.10.2014 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. – 7 с.

83. Пат. 97872 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для забезпечення оптимального натиску пантографом на контактну мережу [Текст] / Розводюк М. П. (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u 2014 10918 ; заявл. 06.10.2014 ; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7. – 7 с.

84. Пат. 91863 UA, МПК B60L 5/00. Пристрій для забезпечення оптимального натиску струмоприймачем на контактну мережу / Розводюк М. П. (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № a 2013 14336 ; заявл. 09.12.2013 ; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. – 8 с.

85. Пат. 37416 UA, МПК G07C 5/00. Пристрій для контролю та реєстрації параметрів роботи трамвая / М. П. Розводюк, К. В. Барбалат (Україна), заявник і власник патенту Вінницький національний технічний університет. – № u200808309 ; заявл. 20.06.2008 ; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22. – 3 с.

Наукове видання

Розводюк Михайло Петрович

ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТРАМВАЯМИ

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено М. Розводюком

Підписано до друку 28.11.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різографічний. Ум. др. арк. 5,43.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2017-31

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.