

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Електротехніка та енергоефективність

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

другий (магістрський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення енергоефективності роботи цеху з ремонту рухомого складу ПАТ «Запоріжсталь»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1419  
спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми 141.00.11 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(назва освітньої програми)

М.В. Шкляренко

(ініціали та прізвище)

Керівник проф., доц., д.т.н. Артемчук В.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2020



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра електротехніки та енергоефективності  
Рівень вищої освіти другий (магістрський) рівень  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« 05 » 12 2020 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Шклярєнко Микола Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи (проєкту) Підвищення енергоефективності роботи цеху з ремонту рухомого складу ПАТ «Запоріжсталь»

керівник роботи Артемчук Віктор Васильович, д.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 14 » вересня 20 року № 1306-с

1 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020 р.

2 Вихідні дані до роботи Мережі внутрішньозаводського електропостачання напругою 6 - 10 кВ; цехові споживачі електричної енергії; рухомий склад середній тариф за 1 кВт·год. електроенергії – 2,45 грн/кВт год

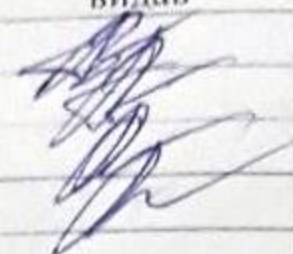
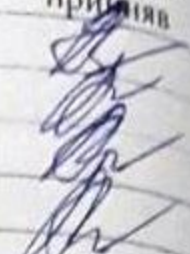
3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібні розробити) Аналіз виробничо-господарської діяльності ПАТ «Запоріжсталь»; аналіз існуючих методів визначення розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу; побудова імітаційної моделі технологічного процесу ремонту локомотивів

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень Види існуючих моделей; застосовування видів імітаційного моделювання загальний алгоритм побудови імітаційних моделей; адаптований до опису Т



ремонт рухомого складу; співвідношення часток електроенергії, спожитої модельованими ділянками

### 5 Консультанти розділів роботи

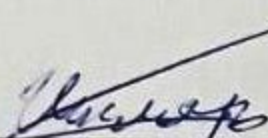
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Розділ 4	Артемчук В.В., професор		

6 Дата видачі завдання 02.09.2020

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз виробничої діяльності ПАТ «Запоріжсталь»	20.09.2020	
2	Аналіз існуючих методів визначення розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу	15.10.2020	
3	Побудова імітаційної моделі технологічного процесу ремонту локомотивів	15.11.2020	
4	Охорона праці	01.12.2020	

Студент

  
(підпис)

М.В. Шкляренко

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту)

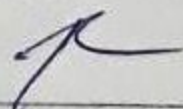
  
(підпис)

В.В. Артемчук

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

  
(підпис)

С.В. Башлій

(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Шклярєнко М.В. Підвищення енергоєфективності роботи цеху з ремонту рухомого складу ПАТ «Запоріжсталь»

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Артемчук В.В. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут. Кафедра електротехніки та енергоєфективності, 2020.

Пояснювальна записка містить 93 стор., 21 рисунок, 7 таблиць, 17 джерел.

Анотація. Проведено аналіз існуючих методів визначення розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу. Показана можливість застосування методу імітаційного моделювання для оцінки розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу. Розглянуто імітаційне моделювання діючих технологічних процесів. Проведена оцінка розходу електричної енергії на технологічні операції ремонту рухомого складу.

Ключові слова: електрична енергія, рухомий склад, технологічні процеси, моделювання, розходи електричної енергії.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»	8
2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗХОДУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА РЕМОНТ РУХОМОГО СКЛАДУ	17
2.1 Огляд існуючих підходів до планування витрат електричної енергії	
2.2 Планування витрат електричної енергії в структурних підрозділах Укрзалізниці та шляхи підвищення ефективності її використання	21
2.3 Аналіз можливості застосування методів імітаційного моделювання для опису технологічних процесів ремонту рухомого складу	27
2.4 Застосування методів імітаційного моделювання для оцінки розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу	37
3 ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕМОНТУ ЛОКОМОТИВІВ	54
3.1 Побудова імітаційної моделі технологічного процесу поточного ремонту тепловозів	58
3.2 Визначення витрати електричної енергії на технологічний процес ремонту локомотива серії ТЕМ	66
3.3 Оцінка витрати електричної енергії на технологічний процес заливки бабітом вкладишів МОП тягових електродвигунів тепловозів серії ТЕМ	67
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	71
ВИСНОВКИ	80
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	81
ДОДАТКИ	82

## ВСТУП

Підвищення енергоефективності та раціональне використання ресурсів є однією із пріоритетних напрямків діяльності ПАТ«Запоріжсталі». Раціональний підхід дозволяє знижувати собівартість і енергоємність продукції, витрати на енергоносії, забезпечує виконання вимог щодо забезпечення екологічної безпеки. Проте виробничо-господарська діяльність даного підприємства було б неможливою без логістичного забезпечення, яку виконує залізничний цех. При цьому рухомий склад залізничного цеху підприємства є одним з найбільш енергоємних споживачів. Одним з головних загальнотранспортних орієнтирів є підвищення продуктивності та рентабельності транспортних систем. Виявлення випадків нераціонального використання електричної енергії відкриває широкі можливості щодо підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів.

Однією з найважливіших умов забезпечення ефективного використання електричної енергії є дотримання питомих норм її витрати на випуск одиниці продукції, які в даний час відсутні для більшості структурних підрозділів залізничного цеху підприємства. Наявні питомі норми отримані на підставі фактичних даних про електроспоживання не дозволяють достовірно врахувати плановані зміни в організації виробництва.

Найважливішим завданням поточного періоду є створення методу, який дозволяє апріорно визначати витрати електричної енергії на технологічні процеси при ремонті рухомого складу; виконувати оцінку ефективності впровадження нових технологій, виявляти ділянки технологічних процесів з підвищеними втратами електричної енергії, визначати ефективність управляючих впливів щодо зниження енергоємності основних технологічних процесів, проводити оцінку ефективності заходів щодо отримання графіка навантаження, наближеного до рівномірного, до структурних підрозділів, так і по конкретним технологічним процесам.

Метою магістерської роботи є аналіз методу апіорної оцінки витрат електричної енергії на технологічні процеси ремонту рухомого складу шляхом використання результатів імітаційного моделювання для визначення гранично допустимого споживання і отримання питомих норм витрат електричної енергії на випуск одиниці продукції в рамках існуючої організації виробництва.

Об'єкт дослідження – рухомий склад залізничного цеху заводу.

Предмет дослідження – система ремонту рухомого складу залізничного цеху заводу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі методи визначення розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу;
- розглянути імітаційне моделювання діючих технологічних процесів;
- провести оцінку розходу електричної енергії на технологічні операції ремонту рухомого складу.

## 1 АНАЛІЗ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»

На сьогоднішній день ПАТ «Запоріжсталь» є п'ятим за величиною підприємством серед українських виробників сталі. За сім місяців у 2020 р. було вироблено 2108 тис. т чавуну, 2274 тис. тон сталі та 1961 тис. тон прокату. На металургійному комбінаті присутній інтегрований виробничий комплекс – власне виробництво агломерату, передільного чавуну, нерафінованої сталі, напівфабрикатів і готової сталевої продукції [1-4].

Характерною рисою комбінату є спеціалізація на виробництві продукції високих переділів: тонкого гарячекатаного (г/к) плоского прокату в рулонах і листах (для трубної та машинобудівної промисловості) та холоднокатаного (х/к) прокату в рулонах і в листах (для автомобіле- і машинобудування).

Попит на продукцію комбінату великий, про що свідчить диверсифікована географія поставок. Продукція експортується більш ніж в 45 країн світу, серед яких держави Близького та Середнього Сходу, держави ЄС, Турція, Азія, Африка та інші [1].

За останній повний календарний рік (2019 р.) комбінат виробив 3311,2 тис. тон чавуну, 3999,7 тис. т. сталі і 3344,3 тис. тон прокату. Напрями та обсяги реалізації продукції підприємством наведені на рисунках 1.1- 1.3.

Дотримуючись принципів орієнтованості на постійних клієнтів і підвищення конкурентоспроможності своєї продукції на світових ринках металу, ПАТ «Запоріжсталь» у 2019 році освоїв виробництво сталі з більш високим гарантованим вмістом алюмінію [1-4].

Нова продукція комбінату за своїми технічними характеристиками відповідає вимогам європейського стандарту EN 10025-1: 200. Нові марка сталі, що виготовляються на підприємстві, затребувані європейськими виробниками трубної продукції. Використання цих марок дозволяє підвищити міцність і довговічність трубної продукції, а саме оцинкованих труб. Серед споживачів такої сталі ключовим клієнтом підприємства є світова



потужна компанія Marcegaglia (Італія) [1-4].

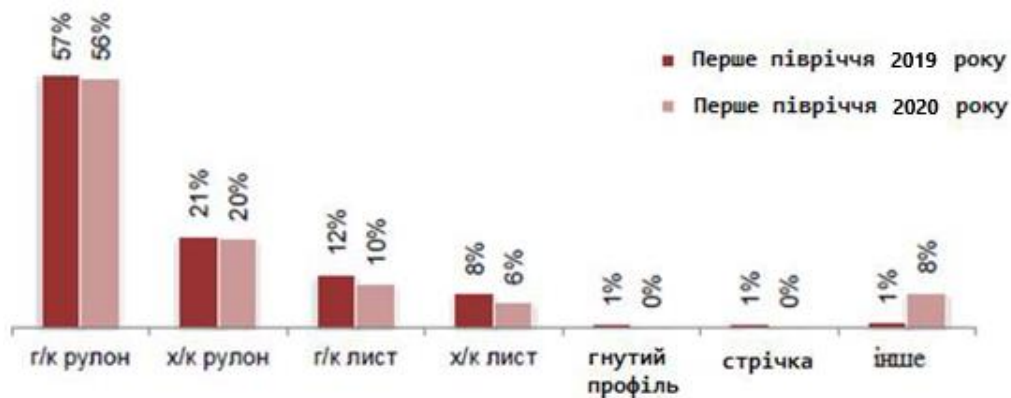


Рисунок 1.1 – Реалізація продукції ПАТ «Запоріжсталь» за часткою за видами продукції

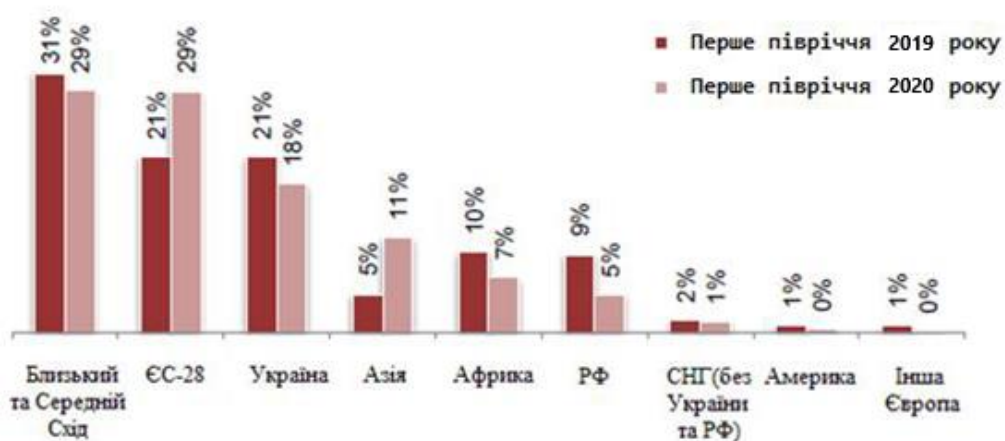


Рисунок 1.2 – Реалізація продукції ПАТ «Запоріжсталь» за часткою за регіонами

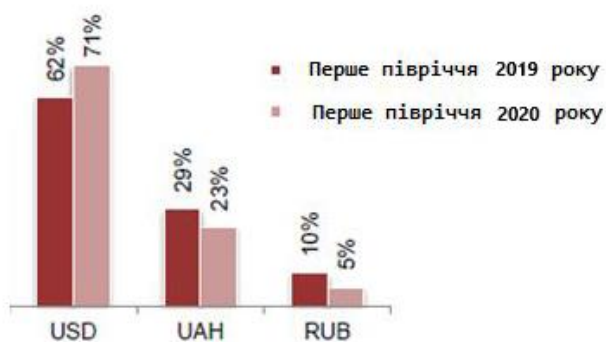


Рисунок 1.3 – Реалізація продукції ПАТ «Запоріжсталь» за часткою за видами валют

Для реалізації поставлених цілей ПАТ «Запоріжсталь» послідовно вирішує стратегічні завдання [1, 2]:

вироблення високоякісної металопродукції, що задовольняє потребам клієнтів;

- модернізація й реконструкція основних виробничих фондів;
- впровадження передових технологій і інновацій;
- досягнення лідируючих позицій в галузі виробництва, керування й організації бізнес-процесів;
- забезпечення промислової безпеки, здоровіших і безпечних умов праці;
- скорочення техногенного впливу на навколишнє середовище.

На даний час підприємство ПАТ «Запоріжсталь» веде масштабну модернізацію і реконструкцію виробничих потужностей.

#### Структура виробництва ПАТ «Запоріжсталь»

Виробничі потужності ПАТ «Запоріжсталь» складаються з таких структурних елементів [1-4]:

- агломераційний цех (6 агломашин);
- доменний цех (4 доменні печі, 3 з яких в роботі);
- мартенівський цех (7 мартенівських печей і 1 двованний сталеплавильний агрегат);
- копровий цех;
- ливарний цех;
- обжимний цех;
- цех гарячого прокату тонкого листа;
- цех холодного прокату (№1 та № 3) [1].

Залізорудна сировина, з додаванням додаткових матеріалів, яка пройшла кожну ланку структури комбінату в цій же послідовності, наприкінці має вид готової продукції.

У агломераційному цеху виготовляється основний залізорудний агломерат. Агломерат – ошматкований рудний концентрат, отриманий в

процесі агломерації [2]. Спечена в куски дрібна (часто пилоподібна) руда розмірами 5–100 мм з незначним вмістом дрібниці. Агломерат отримують при випалюванні залізних і свинцевих руд, цинкових концентратів та інших. У чорній металургії є основною залізородною сировиною для отримання чавуну в доменній печі. Практично всі процеси виробництва агломерату автоматизовані [2].

Доменне виробництво – перша ланка технологічного циклу комбінату з повним металургійним циклом та металургійного комбінату, його мета – виплавка чавуну, яка здійснюється у доменній печі. Основою технології доменного виробництва є теорія доменного процесу [3].

Доменне виробництво складається з таких основних процесів: підготовка та подача шихти, плавка, видалення продуктів плавки. Доменне виробництво щорічно виплавляє близько 3,5 млн. т чавуну. Відмінною особливістю чавуна виробництва МК «Запоріжсталь» є низький вміст у ньому сірки і фосфору [1-4].

Мартенівське виробництво – виробництво в мартенівських печах металургійних або машинобудівних заводів литої сталі заданого хімічного складу. Сталь виходить шляхом окислювальної плавки завантажених в піч залізовмісних матеріалів – чавуну, сталевого лому, залізняка і флюсів в результаті складних фізико-хімічних процесів взаємодії між металом, шлаком і газовим середовищем печі. Виробництво мартенівського цеху становить близько 4,0 млн. т сталі на рік. Мартенівські печі використовують природний газ, сталь продувається киснем і аргоном. Сталь виплавляється та розливається в злитки масою до 18,6 т, які використовуються для виробництва листового прокату [1-4].

Впровадження енергозберігаючих заходів

Пріоритетним напрямком діяльності МК «Запоріжсталь» є підвищення енергоефективності роботи та раціональне використання ресурсів. Система енергетичного менеджменту комбінату пройшла сертифікацію на відповідність міжнародному стандарту ISO 50001, що дозволяє досягти



істотної економії енергоресурсів за рахунок застосування кращої управлінської практики і без значних вкладень. Система енергетичного менеджменту дозволяє знижувати собівартість та енергоємність продукції, витрати на енергоносії, удосконалює поводження з відходами та забезпечує виконання вимог щодо зниження викидів парникових газів.

У числі ключових енергозберігаючих проектів, які успішно впровадив МК «Запоріжсталь» – введення в експлуатацію установки вдування пиловугільного палива, що дозволило комбінату повністю відмовитися від споживання природного газу в доменному виробництві. В цілому для підприємства це дало істотний ефект. Так споживання природного газу на підприємстві в 2014 році склало 332 млн м<sup>3</sup>, в 2015 році – 236 млн м<sup>3</sup> [1-4].

Ще більший енергозберігаючий ефект матиме перехід з мартенівського способу виплавки сталі на конверторний. Конверторний спосіб оснований на продувці рідкого чавуну киснем, який окислює домішки, які містяться в чавуні (кремній, марганець, вуглець та інші). Процес проводиться у кисневому конверторі, що являє собою стальну посудину грушоподібної форми, яка з середини футерована вогнетривкою цеглою. Подача кисню під тиском 0,8-1,2 МПа (8-12 кгс/см<sup>2</sup>) здійснюється через фурму, що охолоджується водою.

Перед початком процесу в конвертор завантажують залізну руду, стальний брухт, вапно і рідкий чавун. В конвертор опускають фурму і починають продувку киснем. Під дією дуття домішки чавуну окислюються, виділяючи значну кількість тепла, в результаті чого одночасно знижується вміст домішок у металі і підвищується температура.

Також на підприємстві приділяють істотну увагу раціональному використанню енергоресурсів. Енергозберігаючі заходи, здійснювані в різних структурних підрозділах МК «Запоріжсталь» на постійній основі, дозволили в 1 кварталі 2019 року порівняно з аналогічним періодом 2018 скоротити споживання природного газу на 18 %.

Енергозберігаючі заходи, які були проведені у 2017-2019 роках:

- подача коксового газу на повітряні нагрівачі доменних печей;
- подача коксового газу на запальні горни агломашин;
- впровадження автоматизованої системи комерційного обліку енергетичних ресурсів.

Аналіз структури електроспоживання ПАТ «Запоріжсталь»

ПАТ «Запоріжсталь» – одне з найбільших промислових підприємств України, продукція якого широко відома і користується попитом у споживачів на внутрішньому ринку і в багатьох країнах світу.

Спеціалізація комбінату – високоякісний сталевий г/к рулон, г/к лист, холоднокатаний лист, х/к рулон з вуглецевих і низьколегованих сталей, а також сталева стрічка, чорна жерсть, гнучий профіль. Основними споживачами продукції комбінату є виробники зварних труб, підприємства автомобільного, транспортного, сільськогосподарського машинобудування, виробники виробів побутової техніки. Дане підприємство – металургійний комбінат, який має повний цикл виготовлення продукції від самостійного виготовлення агломерату з поетапним додаванням додаткових ресурсів для отримання чавуну та сталі до кінцевого отримання продукції у вигляді того ж чавуну, сталі, а також г/к та х/к рулонів та листів, профілю та стрічки [1-4].

ПАТ «Запоріжсталь» є дуже енергоємним підприємством, що використовує велику кількість ресурсів: залізорудна сировина, вапняк, окатиші, природній та коксовий газ, кокс, кисень, металобрухт та електроенергію.

На сьогоднішній день більшість підприємств, які використовують електричну енергію для виробництва готової продукції, по-перше, приділяють достатню увагу її споживанню, через те що вартість електроенергії поступово змінює свою вартість у часі. По-друге, кількість використаної електричної енергії (у грошовому еквіваленті) закладається у собівартості продукції, тому, чим більша кількість спожитої електричної енергії для виготовлення продукції, тим більша частка (%) електроенергії закладається у собівартість, отже, тим більша собівартість продукції. Тому постає питання розгляду

споживання електричної енергії як виду енергоресурсу, який впливає на собівартість продукції [1-4].

За 2019 р. ПАТ «Запоріжсталь» спожив 1090,518 млн. кВт·год. На рисунку 1.4 наведена діаграма споживання електричної енергії ПАТ «Запоріжсталь» за структурою виробництва продукції [2].

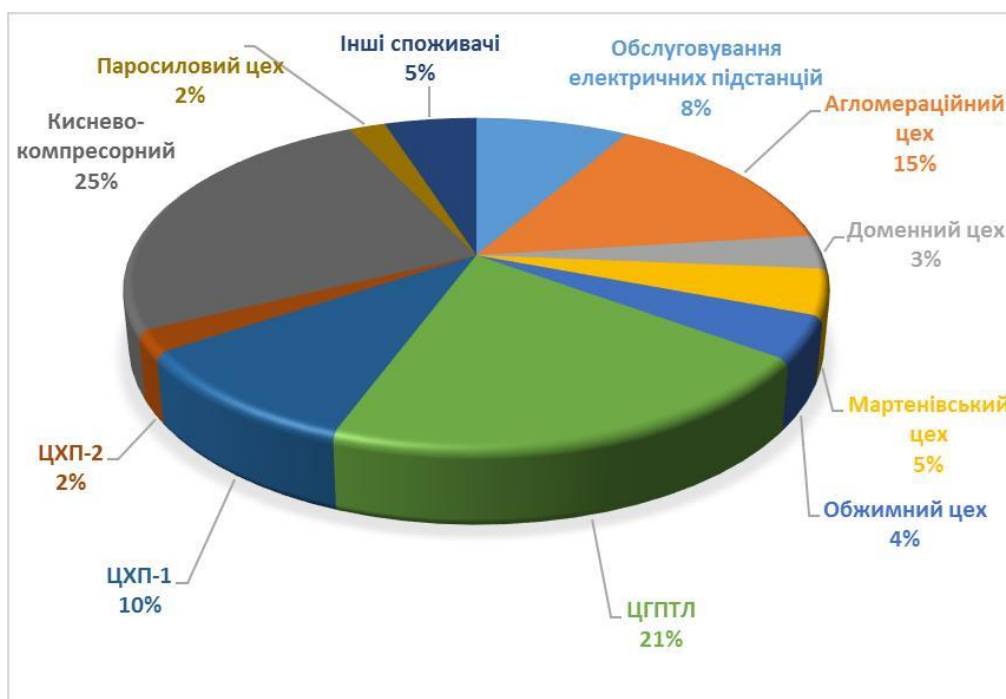


Рисунок 1.4 – Електроспоживання ПАТ «Запоріжсталь» за 2019 рік

Протягом багатьох років комбінат впроваджував енергозберігаючі заходи, які стосувалися споживання електричної енергії, та у першому півріччі 2018 року показник частки електроенергії у собівартості товарів склав 7%.

Проаналізувавши рисунок 1.6 висновок наступний – 37% споживається на виробництво прокату: 4,2% витрачається на обжимання злитків, та отримання слябів, з яких отримують г/к прокат, 20,67% приходиться на виготовлення г/к рулону та листа, 10% – на виготовлення х/к прокату ЦХП №1 та 2,12% – на виготовлення х/к прокату ЦХП №3. Попит на х/к прокат високої якості з кожним роком росте, про що свідчать дані з обсягу виробництва придатного прокату на ПАТ «Запоріжсталь» за 2011 – 2017 роки (рисунок 1.5) [2].



Найбільші споживачі електроенергії на підприємстві: киснево–компресорний цех (25,2%), агломераційний цех (14,7%), ЦГПТЛ (20,67%) та ЦХП №1 (10%).

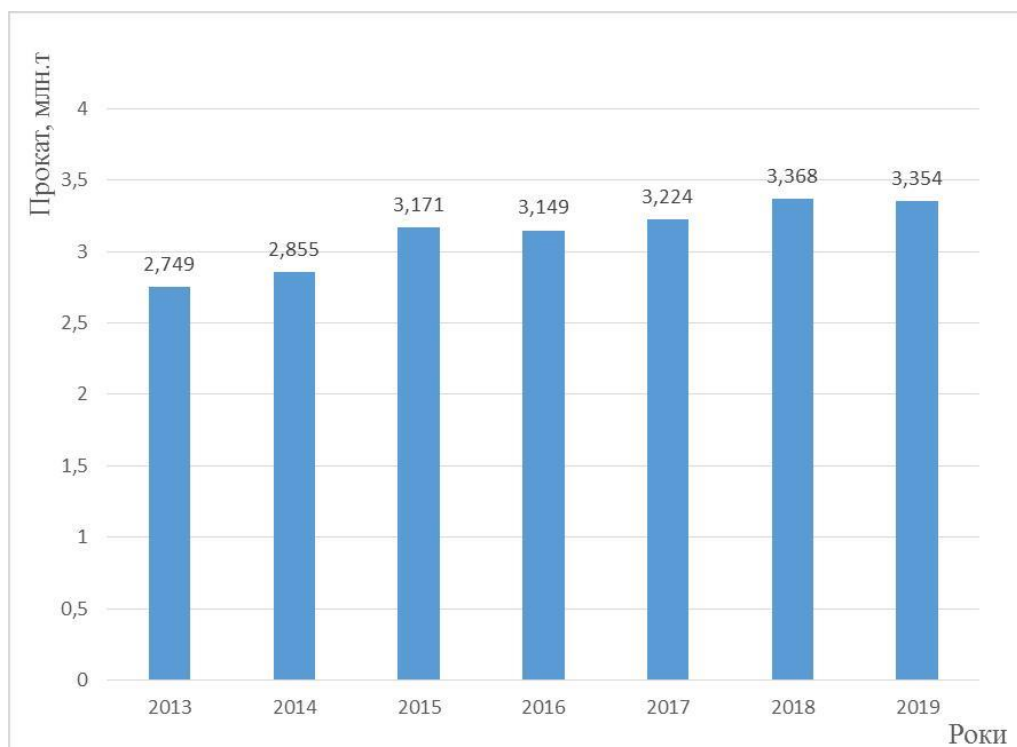


Рисунок 1.5 – Обсяги виробництва прокату за 2013 – 2019 роки на ПАТ «Запоріжсталь»

На сьогоднішній день ПАТ «Запоріжсталь» є п'ятим за величиною підприємством серед українських виробників сталі. Характерною рисою комбінату є спеціалізація на виробництві продукції високих переділів: тонкого гарячекатаного (г/к) плоского прокату в рулонах і листах (для трубної та машинобудівної промисловості) та холоднокатаного (х/к) прокату в рулонах і в листах (для автомобіле- і машинобудування) [1, 2].

Виробничі потужності ПАТ «Запоріжсталь» складаються з восьми цехів. Основною сировиною для отримання чавуну є залізорудна сировина, вапняк, кокс, окатиші, кисень та природній газ. Обсяг виробництва чавуну у 2018 р. склав 3,808 млн. т. Відмінна особливість чавуну – низький вміст сірки і фосфору, що робить дану продукцію конкурентоспроможною на внутрішньому та зовнішньому ринках. Достатня увага приділяється виробництву сталі, яка також користується попитом. Обсяг виробництва у тому ж році склав 3,980 млн. т (у 2018 р. склав 3,961 млн. т).

З кожним роком збільшує обсяги виробництва та збуту продукції. Сортамент продукції не змінився: домінує г/к прокат (сумарно 66%), частка х/к прокату менше (сумарно 34%). На експорт поставляється 82% продукції, найбільшими регіонами експорту є Близький і Середній Схід (29%), а також країни ЄС (29%). У 2014 р. відбулися зміни по структурі ринків збуту комбінату, а саме найбільш ефективний ринок України і найменш ефективний ринок Росії зменшилися, балансування експорту відбулося за рахунок ринків середньої маржинальності.

Підвищення енергоефективності роботи та раціональне використання ресурсів – пріоритетний напрямок діяльності ПАТ «Запоріжсталь», якому приділяється достатня увага. Наявність система енергетичного менеджменту, дозволяє знижувати собівартість та енергоємність продукції, витрати на енергоносії. У числі ключових енергозберігаючих проектів, які успішно впровадив МК «Запоріжсталь» – введення в експлуатацію установки вдування пиловугільного палива, що дозволило комбінату повністю відмовитися від споживання природного газу в доменному виробництві. Так, споживання природного газу на підприємстві у 2018 році склало 332 млн м<sup>3</sup>, у 2019 р. – 236 млн м<sup>3</sup> [1, 2].

Щодо структури залізничного цеху, то інвентарний парк його складає:

- локомотивів 82 од. (тепловозів серії ТЕМ – 29 од.; ТГМ4 – 53 од.);
- крани на залізничному ході – 20 од.;
- мотовози – 5 од.;
- вантажні дрезини – 7 од.;
- колійні машини – 9 од.;
- вагони різного призначення – 1495, з яких 395 – лізингові.

Як можна бачити з наведеної вище інформації, інвентарний парк рухомого складу на залізничному ході достатньо великий, тому необхідно шукати шляхи підвищення енергоефективності ремонту та експлуатації рухомого складу. Підвищення ефективності ремонту дозволить заощадити ресурси та у меншому ступені це буде позначатися на собівартості продукції.

## **2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗХОДУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА РЕМОНТ РУХОМОГО СКЛАДУ**

Одним з головних загальнотранспортних орієнтирів є підвищення продуктивності та рентабельності транспортних систем. Відмінною особливістю українського виробництва є його висока енергоємність. Енергоємність української продукції в 3...4 рази вище, ніж у розвинених європейських країнах і США, і в 7 разів вище, ніж в Японії [1]. Причому в останні роки цей показник продовжує погіршуватися.

Зниження енергоємності виробництва дозволить значною мірою підвищити рентабельність транспортних систем. Для поліпшення цього показника необхідно підвищувати ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів великими, енергоємними комплексами країни.

Залізничний транспорт в даний час є основою транспортної системи України і реалізує найбільшу частку вантажопотоку країни. У той же час залізничний транспорт є одним з найбільш енергоємних комплексів, на здійснення діяльності якого щорічно витрачається до п'яти відсотків вироблюваної в країні електричної енергії.

Таким чином, одним з основних орієнтирів інвестиційного та інноваційного розвитку залізниці в області стаціонарної енергетики є зниження енергоємності основних технологічних процесів мінімум на 10...15 %.

Для зниження енергоємності в структурних підрозділах активно впроваджуються організаційно-технічні заходи, інвестуються значні кошти в модернізацію виробництва. Облік змін організації виробництва при плануванні електроспоживання є актуальним завданням, а необхідність розробки методу, що дозволяє отримувати питомі норми витрат електричної енергії на випуск одиниць продукції з урахуванням місцевих особливостей технологічних процесів, носить першочерговий характер з точки зору контролю і аналізу електроспоживання.



## 2.1 Огляд існуючих підходів до планування витрат електричної енергії

Контроль електроспоживання, його аналіз і точне планування дозволяють знизити енергоємність основних технологічних процесів, суттєво підвищити ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів, що в умовах постійного зростання цін на енергоресурси приймає особливу актуальність.

Підвищення точності визначення витрати електричної енергії дозволяє підвищити ефективність її використання за рахунок обґрунтованого та своєчасного розпорядження грошовими коштами.

Якщо запланована витрата електричної енергії перевищує фактичну, то отриманий надлишок є невикористаними грошовими коштами і означає упущену вигоду. Якщо ж запланована витрата електричної енергії виявляється нижче фактичної, то виникає необхідність пошуку додаткових грошових коштів, що передбачає фінансування відповідних робіт, можливе оформлення кредитів на не вигідних умовах та інше.

У більшості методів планування витрати електричної енергії на підставі певного математичного апарату виконується облік впливу різних факторів, що впливають на процес споживання електроенергії. До таких факторів в першу чергу відноситься запланований обсяг випущеної продукції, безпосередньо визначає кількість необхідної електричної енергії. Також вплив мають сезонність технологічних процесів, метеоумови, зміни температури навколишнього середовища та інші чинники.

Великого поширення набули лінійні регресійні моделі і моделі, що розділяють навантаження на дві складові: базову (регулярну) і залежну від метеоумов і температури навколишнього середовища. Моделі такого плану дозволяють більш точно прогнозувати навантаження в періоди переходу від робочих днів до вихідних і назад, в нерегулярні (святкові і примикають до них) дні. Одним з достоїнств цих моделей є те, що вони орієнтовані на існуючий в більшості видів систем обліку електричної енергії обсяг інформації. Такі моделі, як правило, будуються для великих енергосистем (наприклад, таких як

міська енергомережа) і використовуються для прогнозування витрати електричної енергії.

Інший підхід до опису процесу споживання електричної енергії полягає в побудові математичної моделі, що враховує безліч факторів, але без опису їх впливу в явному вигляді. Прикладом такої моделі є трендові регулювання, при якому весь процес електроспоживання ділиться на дві складові: детерміновану (тренд) і стохастичну [4]. Потім виконується апроксимація тренда, а стохастична складова враховується за допомогою теорії ймовірностей. Такий підхід добре себе показує при прогнозуванні витрат електричної енергії в усталених системах.

Недоліком розглянутих вище моделей є їх лінійність, в той час як модельовані значення електроспоживання є нелінійними функціями зовнішніх факторів. У зв'язку з цим, в даний час активно починають розвиватися і впроваджуватися методи, засновані на використанні штучних нейронних мереж (ШНМ) і нечіткої логіки.

ШНМ є потужний математичний апарат, побудований за принципом організації та функціонування біологічних нейронних мереж [5]. В основі апарату лежить поняття штучного нейрона, який є нелінійною функцією одного аргументу – лінійної комбінації всіх його вхідних сигналів. Безліч штучних нейронів, з'єднаних між собою зв'язками з певними ваговими коефіцієнтами, об'єднується в єдину нейронну мережу.

Найбільшого поширення набули односпрямовані багат шарові мережі прямого поширення [6]. Приклад тришарової нейронної мережі даного типу представлений на рисунку 2.1.

Дана нейронна мережа складається з трьох шарів: вхідного, прихованого і вихідного. Передача сигналів відбувається в одному напрямку. Як правило, при проектуванні мережі її топологія і активаційні функції всіх нейронів задаються заздалегідь, а ваги зв'язків є параметрами і можуть змінюватися в процесі функціонування мережі. Завдання вибору топології мережі, зводиться до вибору кількості нейронів в прихованому шарі і на практиці виконується

шляхом тренінгів декількох мереж з подальшим вибором найбільш підходящою. Критерієм може служити кількість прихованих нейронів, яке повинно бути мінімальним, але достатнім для забезпечення заданого рівня точності.

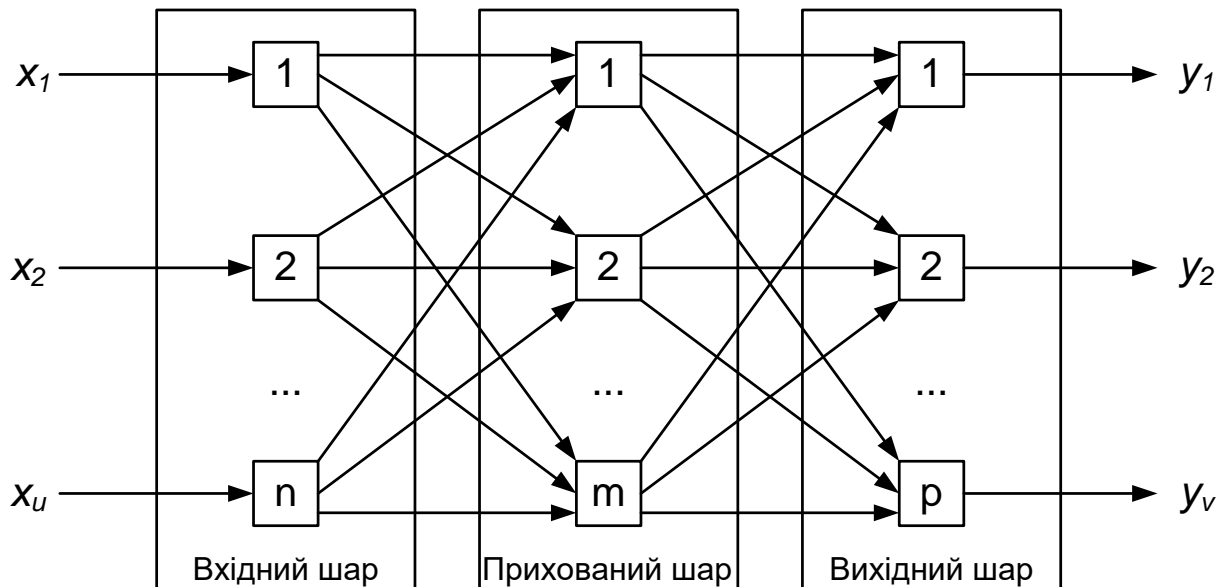


Рисунок 2.1 – Тришарова односпрямована нейронна мережа

Функціональність ШНМ значною мірою обґрунтована застосуванням математичного апарату нечіткої логіки [7], що є розширенням апарату класичної логіки та теорії множин.

Апарат ШНМ підходить для вирішення безлічі завдань. Основними перевагами апарату ШНМ є:

- здатність системи до самонавчання;
- можливість обліку безлічі чинників з достатнім ступенем достовірності;
- адаптація моделі до внутрішніх змін модельованої системи.

Використання апарату ШНМ в сукупності з нечіткою логікою відкриває великі можливості для прогнозування витрати електричної енергії. Однак подібне прогнозування дає тільки кількісну оцінку витрат електричної енергії в залежності від запланованого обсягу робіт і контрольованих чинників, але нічого не говорить про причини такого результату.

Модель, побудована на підставі ШНМ, здатна давати хороші результати з прогнозування витрат електричної енергії, але має ряд недоліків з точки зору аналізу процесу електроспоживання:

- не дозволяє контролювати структуру електроспоживання;
- при внутрішніх змінах досліджуваної системи необхідний період адаптації;
- відсутня можливість апріорно оцінити можливе значення витрати електричної енергії, при змінах у виробничому процесі підприємства.

Таким чином, розглянуті методи дозволяють досить точно прогнозувати витрати електричної енергії, але не дозволяють самим електроспоживачам проаналізувати отримані результати. Розглянуті методи не дають можливості виявити способи підвищення ефективності використання електроенергії, так як не описують внутрішні складові системи, не надають можливості аналізу отриманих даних, достовірного та обґрунтованого обліку змін в системах електроспоживачів.

У структурних підрозділах Укрзалізниці в даний час планування витрат електричної енергії здійснюється від досягнутого рівня, тобто на підставі інформації про витрати електроенергії за минулий період.

## 2.2 Планування витрат електричної енергії в структурних підрозділах Укрзалізниці та шляхи підвищення ефективності її використання

Невід'ємною частиною залізничного транспорту є структурні підрозділи, які здійснюють ремонт рухомого складу, основним завданням яких є підтримка парку рухомого складу в працездатному стані.

Для обслуговування рухомого складу прийнята планово-попереджувальна система, яка дає можливість складати перспективні плани ремонту, визначати потребу в ресурсах і технологічному обладнанні. Крім зниження ймовірності появи відмов в процесі експлуатації рухомого складу, такий підхід дозволяє знижувати витрати на ремонт і підвищувати ефективність

використання паливно-енергетичних і матеріальних ресурсів за рахунок апріорного визначення потреби в ресурсах і технологічному обладнанні.

Однак, для підвищення ефективності використання електричної енергії не досить точного прогнозування, так як сам процес електроспоживання може бути не ефективний. Виявлення випадків нераціонального використання електричної енергії відкриває великі можливості щодо зниження енергоємності виробництва.

Для отримання можливості порівняння спожитого при виконанні заданого обсягу робіт кількості електричної енергії з технологічно обґрунтованою кількістю електроенергії, достатнім для виконання того ж обсягу робіт, необхідно використовувати питомі норми витрат електричної енергії.

На даний момент відсутня можливість отримання достовірних питомих норм витрат електричної енергії на випуск одиничної продукції з урахуванням особливостей виробництва, планованих змін складу технологічного устаткування. Для отримання норм використовуються фактичні дані про спожитої електричної енергії та обсяги виконаних робіт, за замовчуванням містять інформацію про нераціональне використання електричної енергії, яку неможливо виділити і виключити.

В даний час в структурних підрозділах залізничного транспорту визначення витрати електричної енергії  $W^i$  на планований період здійснюється не за нормами, а на підставі інформації про спожиту електроенергію за минулий період  $W^{i \text{ попередній}}$ , з можливим корегуванням за формулою:

$$W^{\text{план}} = k_{\text{рес}} \cdot k_{\text{зм}} \cdot k_{\text{роб}} \cdot W^{\text{поперед}}$$

де  $k_{\text{рес}}$  - коефіцієнт, що враховує застосування ресурсозберігаючих технічних засобів і заходів;

$k_{зм}$  - коефіцієнт, що враховує можливі зміни в складі електроустаткування структурного підрозділу;

$k_{роб}$  - коефіцієнт, що враховує зміни в обсязі робіт в порівнянні з попереднім періодом, який обчислюють за формулою:

$$k_{роб} = \frac{N_{план}}{N_0}$$

де  $N_{план}$  - планований обсяг робіт підприємства;

$N_0$  - фактичний обсяг робіт за минулий період.

Отримана модель дозволяє наближено визначити обсяг електричної енергії, необхідний для виконання запланованого обсягу робіт. Для підвищення точності визначення необхідного обсягу електричної енергії, необхідно враховувати вплив різних факторів, з відображенням ступеня їх впливу на різних рівнях планування.

Для структурних підрозділів залізничного транспорту основним фактором, який впливає на споживання електричної енергії, є обсяг виконаних робіт. Однак залежність спожитої електроенергії від обсягу робіт не буде пропорційною [8]. Це пояснюється наявністю умовно постійної складової в споживанні електричної енергії, яка обумовлена електрообладнанням, режими роботи якого практично не залежать від обсягів виконаних робіт.

Відповідно, частка електроенергії, спожита обладнанням, режими роботи якого безпосередньо залежать від обсягу робіт структурного підрозділу, називається змінною складової електроспоживання.

Таким чином, наявність умовно постійної складової вимагає коректування вихідної моделі таким чином:

$$W^{план} = k_{рес} \cdot k_{зм} \left( W^{пост} + k_{роб} \cdot W^{змін} \right)$$

$W^{пост}$  - умовно постійна складова електроспоживання;



$W^{\text{змін}}$  - змінна складова електроспоживання.

Розділити електроспоживання на умовно постійну і змінну складові можна на підставі номінальних потужностей використовуваного обладнання або, що більш коректно, на підставі наведених потужностей електрообладнання. Планований витрата електричної енергії можна визначати за формулою:

$$W^{\text{план}} = \frac{k_c^{\text{план}}}{k_c^{\text{поперед}}} \cdot W^{\text{поперед}} \left( d^{y.n.} \cdot K_{\text{пр}}^{y.n.} \cdot \frac{L^{\text{план}}}{L^{\text{поперед}}} + d^{\text{змін}} \cdot K_{\text{пр}}^{\text{змін}} \cdot \frac{V^{\text{план}}}{V^{\text{поперед}}} \right)$$

де  $k_c^{\text{план}}$ ,  $k_c^{\text{поперед}}$  - коефіцієнти сезонності планованого і попереднього періодів відповідно;

$d^{y.n.}$ ,  $d^{\text{поперед}}$  - питомі ваги умовно-постійної і змінної складових витрат електричної енергії відповідно;

$K_{\text{пр}}^{y.n.}$ ,  $K_{\text{пр}}^{\text{змін}}$  - коефіцієнти зміни наведеної потужності з умовно-постійної і змінної складових витрат електричної енергії відповідно;

$L^{\text{план}}$ ,  $L^{\text{поперед}}$  - число робочих днів у планованому і попередньому періодах відповідно;

$V^{\text{план}}$ ,  $V^{\text{поперед}}$  - обсяг робіт в планованому і попередньому періодах відповідно.

Згідно з методикою в постійну складову входять такі групи електрообладнання, як освітлення та вентиляція. Технологічне обладнання повинно бути включено в змінну складову. Виділення частки електроенергії здійснюється на підставі використання наведених потужностей - номінальних потужностей, з коригуванням на час і коефіцієнт використання.

Методика дозволяє планувати витрати електричної енергії для типових об'єктів залізничного транспорту, наказує кожному структурному підрозділу враховувати відповідні зовнішні фактори, що найбільший вплив на рівень

споживання електричної енергії. Серед таких факторів виділені пора року, температура навколишнього повітря, обсяг робіт структурного підрозділу та ін.

Під типовими об'єктами розуміються цеха, відділення або виробничі ділянки структурних підрозділів незалежно від їх приналежності по господарствах залізниці, що характеризуються певним набором електрообладнання, видами виконуваних робіт і режимами роботи.

Так само діюча методика дозволяє враховувати зміни в структурі електроспоживачів, завдяки врахуванню планованого впровадження електрообладнання за допомогою коефіцієнтів зміни наведеної потужності з умовно-постійної і змінної складових електричної енергії.

Проте дана методика є тимчасовим засобом, що використовується для нормування витрат електричної енергії протягом перехідного періоду. До кінця перехідного періоду повинен бути розроблений апарат отримання достовірних, обґрунтованих питомих норм витрат електричної енергії на випуск одиничної продукції за типовими об'єктах залізничного транспорту.

У структурних підрозділах Укрзалізниці впроваджується безліч інноваційних проектів з підвищення виробничих показників. Впровадження здійснюється на підставі перспективних планів і рідко здійснюється на початку року. Для обліку запланованих змін при плануванні витрат електричної енергії необхідна апріорна оцінка зміни її витрати.

Таким чином, для підвищення ефективності використання електричної енергії, апарат розрахунку питомих норм витрат електричної енергії має вирішувати наступні завдання:

- визначення витрати електричної енергії з урахуванням впровадження інноваційних проектів з певного періоду часу;
- оцінка ефективності впровадження нових технологій;
- аналіз процесу електроспоживання ділянок з підвищеними втратами для виявлення способів їх зниження.

Другою важливою проблемою, вирішення якої дозволить підвищити ефективність використання електричної енергії, є опрацювання ефективних

управляючих впливів щодо зниження енергоємності основних технологічних процесів. Для отримання інформації про витрату електричної енергії на технологічні процеси в структурних підрозділах повинні бути впроваджені різні види автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії. Проте впровадження обліку є лише першим етапом організованої діяльності з підвищення ефективності використання електричної енергії і дозволяє підвищити достовірність одержуваних даних. Наступним етапом має стати отримання достовірної зворотного зв'язку від технологічних процесів.

Експериментування з технологічними процесами є не можливим, тому що пов'язане з дорогими експериментами, порушенням безперервного характеру роботи структурних підрозділів, вимагає багато часових і трудовитрат для реалізації та оцінки результатів порівняння і т.д.

Виходом в даній ситуації є розробка методу, що дозволяє апріорно визначати вплив керуючих впливів щодо зниження енергоємності основних технологічних процесів на параметри електроспоживання. Відповідно використовується модель ТП повинна адекватно відображати внутрішню структуру досліджуваного об'єкта.

Так само розроблений апарат повинен дозволяти не тільки оцінювати ефективність планованих до впровадження організаційно-технічних заходів зі зниження енергоємності технологічних процесів, а й визначати слабкі місця ТП в плані електроспоживання, вказуючи, де необхідна оптимізація, і яким чином можна домогтися більш ефективного використання електричної енергії.

Серйозною проблемою, вирішення якої дозволить суттєво підвищити ефективність використання електроенергії, є зниження нерівномірності споживання електричної енергії. Суттєве зменшення втрат в електромережах і скорочення плати за електроенергію за рахунок зниження заявленої потужності можливі завдяки зниженню пікових навантажень шляхом отримання графіка навантаження наближеного до рівномірного як по структурним підрозділам, так і по конкретних технологічних процесів. Досягти цього можна завдяки

коригуванню моментів початку робіт на підставі аналізу результатів моделювання та експериментування з моделями ТП.

Для отримання можливості визначення витрати електричної енергії із збереженням інформації про структуру досліджуваної системи в дипломній роботі розглянуто використання методів імітаційного моделювання (ІМ) [9].

2.3 Аналіз можливості застосування методів імітаційного моделювання для опису технологічних процесів ремонту рухомого складу

Основні види моделей, що розрізняються розв'язуваними завданнями, способом завдання і роботи з ними, показані на рисунку 1.2.

Розглянуті види моделей можуть об'єднуватися, утворюючи більш гнучкі методи опису, завдання, аналізу функціонування досліджуваних систем. Імітаційне моделювання - окремий випадок об'єднання математичного та комп'ютерного моделювання і використовується в тих випадках, коли аналітичний опис досліджуваного об'єкта за якимись причинами не можливо або методи вирішення отриманої таким чином моделі не досить розроблені або їх застосування не є доцільним [9].

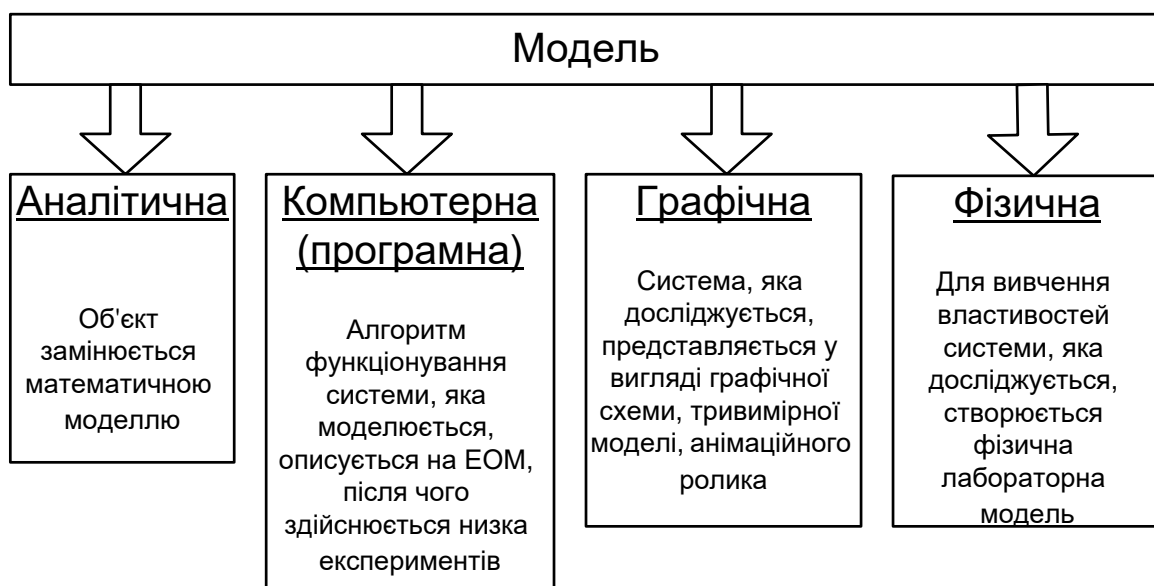


Рисунок 2.2 – Види моделей

Таким чином, імітаційна модель - логіко-математичний опис об'єкту, який може бути використаний для експериментування на комп'ютері в цілях проектування, аналізу та оцінки функціонування об'єкта.

Огляд систем імітаційного моделювання. Останнім часом в Україні імітаційне моделювання ІМ набуває все більшої популярності для вирішення широкого спектру завдань. Потреба в імітаційних моделях, як правило, виникає при проектуванні або модернізації виробничих ділянок.

На залізничному транспорті широко поширені програмні продукти, алгоритми роботи яких засновані на використанні методів імітаційного моделювання. Розділяють чотири основних види імітаційного моделювання:

- моделювання динамічних систем;
- дискретно-подієве моделювання;
- системна динаміка;
- агентні моделювання.

Для імітаційного моделювання динамічних систем застосовуються різні системи автоматизації проектних робіт, що дозволяють будувати аналітичні або графічні (дво- і тривимірні) моделі досліджуваних об'єктів, або такі системи імітаційного моделювання як MATLAB Simulink, VinSim.

Цей підхід використовується при проектуванні пристроїв, систем управління, але зовсім не підходить для моделювання ТП.

Системна динаміка - вид моделювання, що використовує графічні діаграми причинних зв'язків і глобальних впливів одних параметрів на інші в часі. Поведінка створеної на основі цих діаграм моделі імітується на комп'ютері. Цей вид моделювання дозволяє не тільки виявити причинно-наслідкові зв'язки між об'єктами і явищами, а й встановити суть того, що відбувається виявлення. За допомогою системної динаміки будують моделі бізнес-процесів, розвитку міста, моделі виробництва, динаміки популяції, екології, розвитку епідемії.

Прикладами систем імітаційного моделювання, що підтримують даний вид моделей, можуть служити системи Ithink, Powersim, Vensim. Як правило,

системна динаміка застосовується до довгострокових процесів, цікавим зі стратегічних позицій. Є розробки імітаційних моделей з метою аналізу енергоспоживання великих об'єктів, таких як місто, на основі використання техніко-філософського поняття техноценоз [2].

Однак для обґрунтованого визначення витрати електричної енергії на технологічні процеси ремонту рухомого складу методи системної динаміки не підходять, оскільки мають слабку смислову прив'язку до фізичної складової модельованих систем.

Агентне моделювання - відносно новий напрямок в імітаційному моделюванні, використовуване для дослідження децентралізованих систем, глобальні правила і закони функціонування яких є результатом індивідуальної активності членів групи (агентів). Метою агентних моделей є отримання уявлення про загальну поведінку системи, виходячи з припущень про індивідуальну поведінку її окремих активних об'єктів і характеру їхньої взаємодії. При цьому характерними рисами агентів є:

- активність;
- автономна поведінка;
- можливість прийняття рішень відповідно до деяким набором правил;
- взаємодія з навколишнім середовищем;
- здатність до самостійної зміни.

Робота з агентними моделями реалізована в таких системах імітаційного моделювання, як Swarm, Repast, AnyLogic.

Дискретно-подієве моделювання - підхід до моделювання, що дозволяє описувати основні події модельованої системи, такі як: «очікування», «обробка замовлення», «рух з вантажем», «розвантаження» та інші. Дискретно-подієве моделювання має широку область застосування. Прикладами систем дискретно-подієвого імітаційного моделювання є системи GPSS, Arena, eMPlant, AutoMod, PROMODHL, Enterprise, Dynamics, FlexSim.

Процентне співвідношення частоти використання зазначених видів моделювання наведено на рисунку 2.3. При побудові діаграми не розглядалися



системи моделювання «фізичного» рівня через суттєві відмінності цілей моделювання та областей застосування від розглянутих видів моделювання.

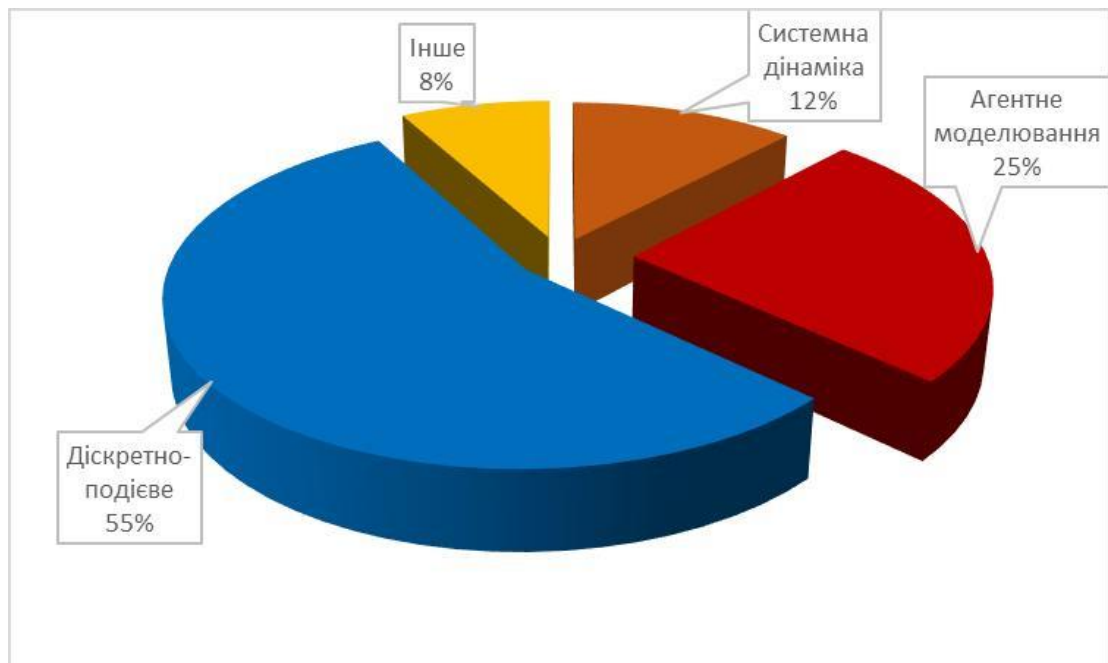


Рисунок 2.3 – Застосовувані види імітаційного моделювання

Для моделювання технологічних процесів ремонту рухомого складу найкращим чином підходить дискретно-подієве моделювання. Можливість застосування систем дискретно-подієвого моделювання для опису ТП ремонту рухомого складу обумовлена наступними обставинами:

- ТП ремонту рухомого складу має жорстку встановлену структуру виробничого потоку;

- ТП ремонту рухомого складу можна представити у вигляді стохастичної тимчасової мережі Петрі, вузлами якої є окремі технологічні операції;

- Технологічні операції можуть бути представлені у вигляді простих систем масового обслуговування з одним або кількома обслуговуючими пристроями;

- Параметри виконання технологічної операції (тривалість, відносна частота виконання, режими роботи обладнання тощо) Можуть бути описані за допомогою математичного апарату теорії ймовірностей.

Таким чином, функціональності дискретно-подієвих систем ІМ достатньо для опису ТП ремонту рухомого складу, і в той же час створення та налагодження моделі не є настільки трудомісткими, як при використанні агентного підходу до моделювання.

Математичні основи систем імітаційного моделювання. Створення і проведення експериментів з імітаційними моделями пов'язано із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, званого «система імітаційного моделювання», і вимагає знання спеціальних алгоритмічних мов, що дозволяють описувати ті поняття, якими оперує спеціаліст при створенні моделей.

В основі роботи систем, що реалізують дискретно-подієве моделювання, лежить математичний апарат стохастичних мереж Петрі.

Мережа Петрі є двочастковий орієнтований граф, що складається з вершин двох типів - позицій А та переходів В, які є статичними об'єктами мережі Петрі. Динамічними об'єктами мережі Петрі є мітки (маркери), здатні переміщатися через переходи між позиціями. Приклад мережі Петрі представлений на рисунку 2.4.

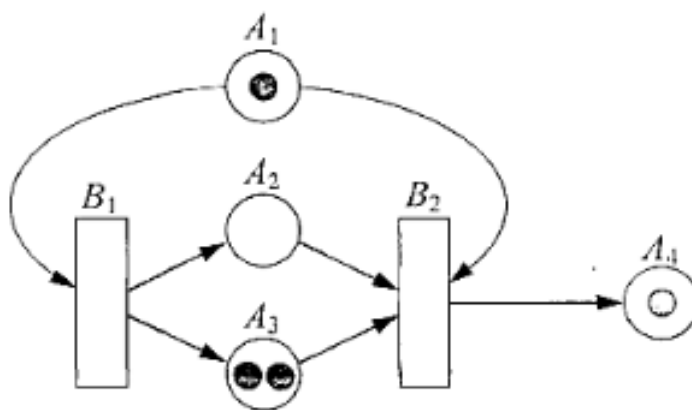


Рисунок 2.4 - Приклад мережі Петрі

Подією називається спрацьовування переходу, при якому мітки з вхідних позицій цього переходу переміщуються у вихідні позиції. Події відбуваються миттєво, різночасно при виконанні заданих умов. На позиції мітка може затримуватися будь-яку кількість часу до виконання заданої умови.

У класичній теорії мереж Петрі правило спрацьовування переходів формулюється так: перехід спрацьовує при виконанні умови 1.5 для кожної з його вхідних позицій:

$$N_i \geq K_i \quad (1.5)$$

де  $N_i$  - число маркерів  $i$ -ї вхідної позиції;

$K_i$  - кількість дуг, що йдуть від  $i$ -ї вхідної позиції до розглянутого переходу.

При спрацьовуванні переходу число маркерів  $i$ -ї вхідної позиції зменшується на величину  $K_i$ , а в  $j$ -й вихідній позиції збільшується на величину  $M_j$ , де  $M_j$  - число дуг, що пов'язують розглянутий перехід з  $j$ -ю позицією.

Маркування визначає поточний стан мережі Петрі. На рисунку 2.5 показаний приклад розподілу маркерів по позиціях. Перед спрацьовуванням маркування мережі записують у вигляді (2,2,3,1). Після спрацьовування переходу маркування приймає вид (1,0,1,4).

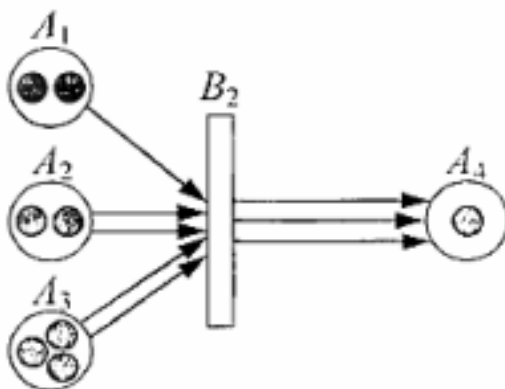


Рисунок 2.5 – Фрагмент мережі Петрі

Дискретно-подієве моделювання передбачає використання різних варіацій мереж Петрі, одержуваних шляхом введення ряду додаткових правил і умов в алгоритми роботи мережі.

При введенні в алгоритми роботи мережі Петрі модельного часу з'являється можливість описувати не тільки послідовність настання подій, а й

враховувати їх прив'язку до часу. З цією метою кожному переходу надається вага (затримка спрацьовування). Отриману модель називають тимчасовою мережею Петрі, а для аналізу її функціонування застосовують відповідні алгоритми.

Стохастична мережа Петрі виходить при завданні затримок спрацьовування випадковими величинами або при введенні в модель ймовірностей спрацьовування порушених переходів. На рисунку 2.6 представлений фрагмент мережі Петрі, що ілюструє конфліктну ситуацію. Маркер в позиції  $A_2$  може запустити перехід  $B_1$  або  $B_2$ . У стохастичній мережі Петрі в такій ситуації передбачений імовірнісний вибір переходу, що спрацьовує.

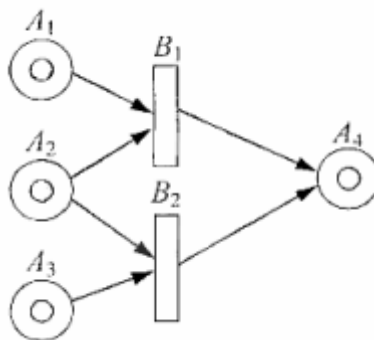


Рисунок 2.6 - Приклад конфліктної ситуації

При використанні мереж Петрі дослідник вручну або за допомогою обчислювальної техніки та відповідних програмних алгоритмів забезпечує функціонування створеної мережі, контролюючи умови виконання переходів і переміщуючи мітки від позиції до позиції.

Результатом дослідження є аналіз роботи мережі з точки зору поставлених перед дослідником цілей. Даний метод дослідження називається статистичним моделюванням.

Подібна методика проведення статистичного моделювання має пряме схожість з методом статистичних випробувань Монте-Карло - групою чисельних методів, заснованих на отриманні великого числа реалізацій стохастичного експерименту, який формується таким чином, щоб його

імовірнісні характеристики співпадали з аналогічними величинами розв'язуваної задачі. Подібність полягає в необхідності багаторазового розіграшу випадкової величини та отриманні рішення поставленої задачі на підставі статистичної обробки результатів експериментів.

Вищеописані принципи роботи мереж Петрі та методу статистичного моделювання застосовуються при імітаційному моделюванні дискретно-подієвого типу. У цьому випадку динамічні об'єкти називаються транзактами і переходять від одного статичного об'єкта до іншого при виконанні заданих умов. При здійсненні моделювання, створена мережа «живе» за вказаними законами, а після завершення моделювання збираються дані про її функціонування в термінах систем масового обслуговування з метою подальшого аналізу.

Системи масового обслуговування. Будь-який технологічний процес можна описати як послідовність простих систем масового обслуговування (СМО). Для завдання СМО необхідно визначити:

- вхідний потік вимог;
- дисципліни постановки в чергу і вибору з неї;
- правило обслуговування вимог;
- вихід двійкового вимог;
- режим роботи.

Формування вхідного потоку вимог відбувається шляхом завдання моментів часу надходження заявок в систему (визначення закону надходження). Закон надходження може бути детермінованим або імовірнісним. У другому випадку інтервал надходження вимог є випадковою величиною, що змінюється в заданих межах.

Дисципліни постановки в чергу і вибору з неї визначають алгоритм постановки вимог в чергу при зайнятості необхідного обслуговуючого пристрою та алгоритм вибору вимог з черги при звільненні відповідного обслуговуючого пристрою. При здійсненні ремонту рухомого складу виконання більшості технологічних операцій характеризується принципом «раніше

надійшов - раніше обслужили», який передбачає постановку вимог в чергу і вибір з неї в порядку надходження.

При моделюванні технологічних процесів ремонту рухомого складу основними характеристиками правила обслуговування є:

- Тривалість обслуговування;
- Кількість одночасно обслуговуваних вимог;
- Дисципліна обслуговування.

Важливу роль відіграє можливість імовірнісного завдання зазначених характеристик. Наприклад, у таблиці 1.1 представлені тимчасові інтервали надходження вимог в обслуговуючий пристрій та тривалості їх обслуговування, отримані шляхом розіграшу випадкової величини. На рисунку 2.7 графічним методом виконано «ручне» моделювання розглянутої одноканальної СМО.

В процесі моделювання збирається статистична інформація про роботу моделі при кожному просуванні системних годин модельного часу. Такою інформацією може бути величина черги, час перебування в черзі й пристрої обслуговування, коефіцієнт завантаження пристрою, стан приладу та інші параметри.

Таблиця 2.1 - Часові характеристики даної системи

№ вимог	1	2	3	4	5	6	7
Інтервал надходження,	1	2	4	1	1	2	1
Тривалість обслуговування,	3	2	3	3	2	1	3



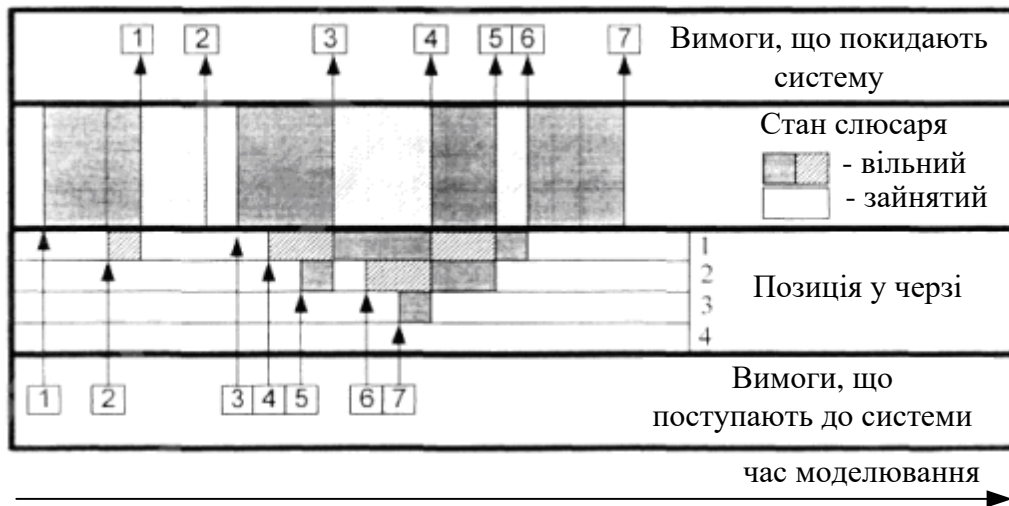


Рисунок 2.7 - «Ручне» моделювання одноканальної СМО

Для моделювання ТП ремонту рухомого складу необхідно використовувати поняття мережі СМО. В загальному вигляді мережу СМО представляється у вигляді ймовірнісної мережі Петрі, в якій позиціями є одноканальні і багатоканальні СМО.

Для розрахунку мереж СМО використовується теорія ймовірнісних мереж, однак більшість результатів застосовні лише при експоненційному законі розподілу значень параметрів СМО. При кількості вузлів мережі більше трьох для розрахунків застосовуються чисельні наближені методи.

Застосування операційного аналізу дозволяє встановлювати прості залежності між параметрами і показниками роботи системи, не абстрагуючись від логіки процесів її функціонування.

Наявність спеціалізованих машинних алгоритмів дозволяє виконувати моделювання складних СМО і отримувати значення вищенаведених величин за лічені секунди.

Програмні алгоритми, що реалізують роботу СМО, засновані на взаємодії підпрограм генерації транзактів, імітації їх обслуговування, знищення транзактів і управління процесом моделювання.

## 2.4 Застосування методів імітаційного моделювання для оцінки розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу

Актуальною проблемою контролю та аналізу витрат електричної енергії на технологічні процеси ремонту рухомого складу є відсутність можливості отримання обґрунтованих питомих норм витрат на випуск одиниці продукції з урахуванням фактичної організації виробництва.

В дипломній роботі розглянуті методи дискретно-подієвого імітаційного моделювання для опису технологічних процесів ТП ремонту рухомого складу РПС, що дозволить апріорно визначати витрату електричної енергії на ТП з урахуванням планованих змін в організації виробництва, і, як наслідок, оцінювати ефективність планованих до впровадження заходів з підвищення ефективності використання електроенергії.

У цьому розділі представлений розроблений метод апріорної оцінки витрат електричної енергії на технологічні процеси ремонту рухомого складу із застосуванням результатів імітаційних експериментів, а також розглянуті особливості застосування методів дискретно-подієвого моделювання для опису ТП РПС.

Побудова імітаційних моделей – процес, насилу піддається алгоритмізації. Структура імітаційної моделі визначається особливостями функціонування досліджуваного об'єкта, особливостями мислення програміста, що реалізує модель. Одна і та ж послідовність дій досліджуваної системи може бути змодельована різними послідовностями команд. Однак, загальний підхід і послідовність дій, які треба зробити для створення моделі, залишаються постійними.

Загальна мета моделювання, що впливає з поставлених завдань, і певні подібності досліджуваних об'єктів залізничного транспорту дозволяють конкретизувати загальний алгоритм, адаптувати його до побудови імітаційних моделей ТП ремонту рухомого складу.

Адаптація алгоритму побудови імітаційних моделей до опису технологічних процесів ремонту рухомого складу дозволить істотно знизити

обсяг вироблених робіт з підготовки до моделювання і скоротити час побудови імітаційної моделі.

Адаптація алгоритму побудови імітаційних, технологічних процесів ремонту рухомого складу

Загальний підхід і послідовність дій, які треба зробити для створення моделі, описуються алгоритмом, графічна схема якого зображена на рисунку 2.8.

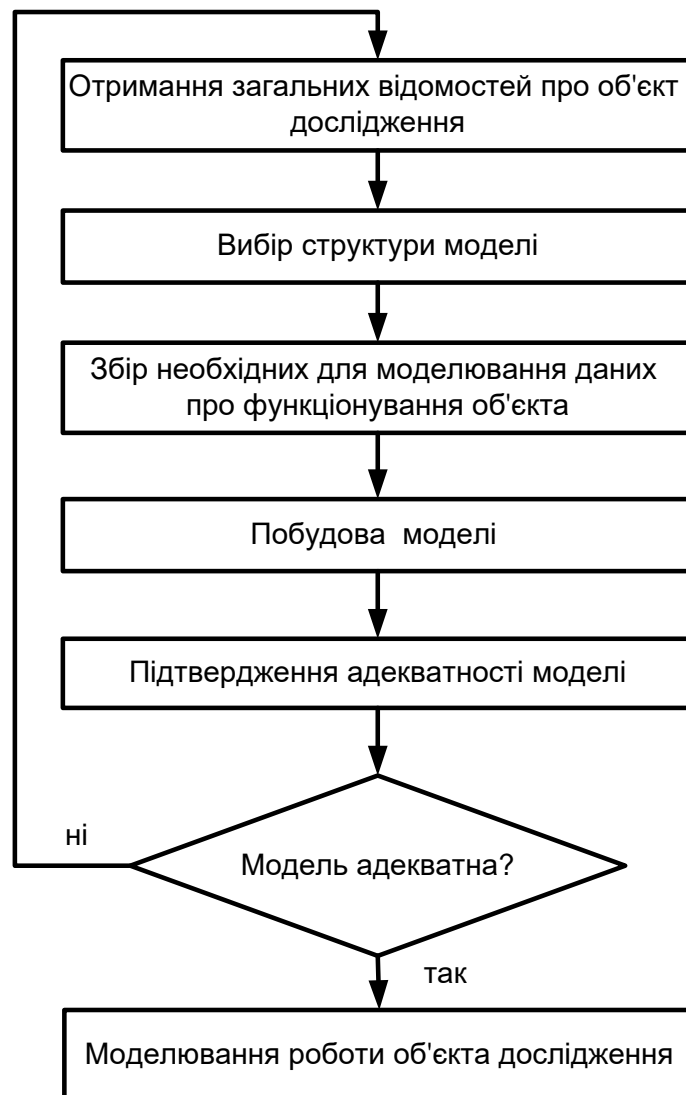


Рисунок 2.8 – Загальний алгоритм побудови імітаційних моделей

Вибір структури моделі передбачає:

- визначення складу динамічних об'єктів;

- визначення складу статичних об'єктів;
- визначення зв'язків, що забезпечують взаємодію розглянутих об'єктів;
- побудова на основі отриманих даних структурно алгоритмічної моделі.

Цей алгоритм є загальним для побудови ІМ будь-яких об'єктів. Подальша деталізація пунктів не проводиться, так як вона унікальна для кожного конкретного завдання.

Загальна мета моделювання, що впливає з поставлених у дипломній роботі завдань, і певні подібності досліджуваних об'єктів залізничного транспорту дозволяють конкретизувати даний алгоритм, адаптувати його до побудови імітаційних моделей ТП ремонту рухомого складу.

Метою моделювання в даному випадку є отримання адекватного опису процесу електроспоживання. Досліджуваними об'єктами є ТП ремонту рухомого складу. Це дозволяє модифікувати даний алгоритм наступним чином.

Блоки «отримання загальних відомостей про об'єкт дослідження» і «вибір структури моделі» передбачають виконання наступних операцій:

- Побудова переліку технологічних операцій;
- Вказівка обслуговуваних одиниць для кожної технологічної операції;
- Визначення внутрішніх структурних, логічних і транспортних зв'язків;
- Побудова структурно-алгоритмічної моделі.

Необхідними для моделювання даними є характеристики технологічних операцій, що дозволяють описати процес електроспоживання на кожній з них і врахувати результат їхнього виконання, якщо він впливає на виконання інших технологічних операцій.

В існуючому підході до моделювання немає певного, фіксованого способу підтвердження адекватності. Найбільше поширення має перевірка вибірок відгуків моделі і досліджуваної системи на рівність генеральних середніх та дисперсій.

При моделюванні ТП ремонту рухомого складу запропоновано використовувати трирівневу перевірку адекватності моделі.

Перший рівень – це перевірка структурно-алгоритмічної моделі на коректність відображення ТП ремонту рухомого складу. Ця перевірка здійснюється експертною оцінкою відповідних фахівців: технологів та майстрів відповідних цехів.

Другим рівнем перевірки є оцінка розробником коректності побудованої моделі. На цьому етапі перевіряється, відсутність помилок в роботі моделі, чи коректно побудована модель поводить, чи правильно відображає позиції структурно-алгоритмічної моделі.

Третій рівень – підтвердження адекватності на підставі обраного критерію. Це підтвердження повинне проводитися на підставі перевірки репрезентативних вибірок відгуків моделі і досліджуваної системи на однорідність.

Наявність помилок, виявлених на першому рівні перевірки адекватності, вимагає повторне дослідження ТП і коригування структурно-алгоритмічної моделі. Помилки, виявлені на другому рівні, усуваються шляхом налагодження роботи моделі самим розробником. Якщо модель не проходить третій рівень перевірки адекватності (підтвердження), то доцільним є перехід до повторної перевірки першого рівня з метою виявлення причин розбіжності фактичних та отриманих від моделі даних та здійснення можливого коректування структурно-алгоритмічної моделі.

Таким чином, адаптований до опису ТП ремонту рухомого складу алгоритм побудови імітаційних моделей зображений на рисунку 2.9.

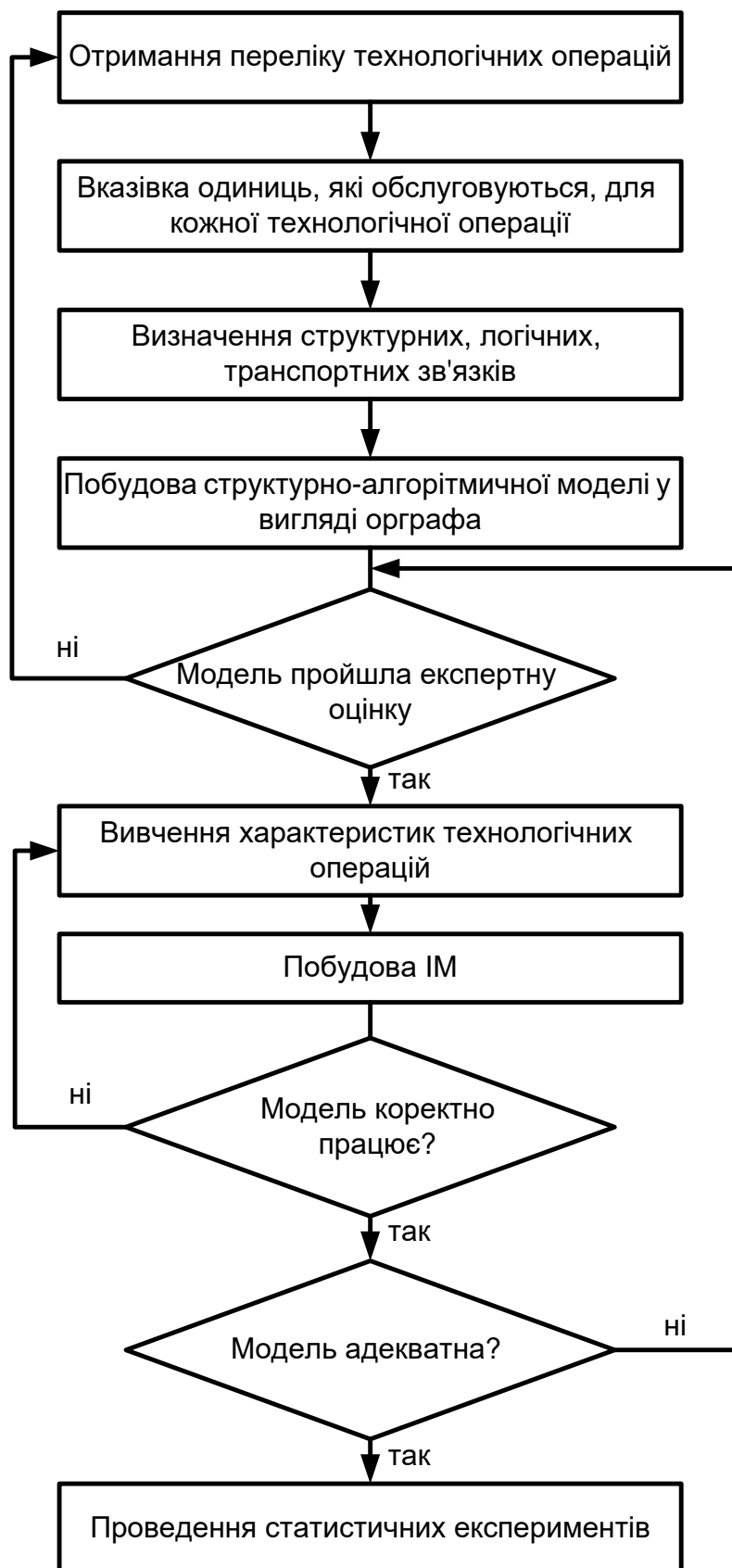


Рисунок 2.9 – Адаптований до опису ТП ремонту рухомого складу алгоритм побудови імітаційних моделей

Вибір необхідного рівня деталізації та складання структурно-алгоритмічної моделі технологічного процесу

В залежності від складності досліджуваного ТП і завдань, поставлених перед дослідником, повинен бути вибраний відповідний рівень деталізації опису ТП.

Основними критеріями вибору необхідного рівня деталізації опису ТП є:

- поставлена перед дослідником завдання моделювання складових ТП ремонту рухомого складу (енергетичної, технологічної, матеріально-технічної та ін);
- прийнятий рівень агрегатного опису ТП ремонту рухомого складу.

Оскільки при визначенні витрат електричної енергії на ТП ремонту рухомого складу основним завданням моделювання є коректне відображення процесу електроспоживання, то має сенс обмежитися описом тих технологічних операцій, для яких виконується одна з умов:

- для виконання технологічної операції може знадобитися електрична енергія;
- результат виконання технологічної операції впливає на необхідність чи параметри виконання інших технологічних операцій.

Таким чином, якщо досліджуваний ТП має велику кількість різноманітних технологічних операцій, то має сенс розбити його на частини або перейти до укрупнених об'єктах моделювання згідно з прийнятим рівнем агрегатного опису ТП. Якщо ж кількість модельованих об'єктів дозволяє, то можна обійтися і однією достатньо деталізованою моделлю.

Технологічні процеси, що дозволяють виконати моделювання на високому рівні деталізації, можуть мати місце в цехах з невеликою кількістю обладнання або на виробничих ділянках, де виконується мала кількість технологічних операцій. Такий підхід дає можливість отримання точної імітаційної моделі, адекватно відтворює всі необхідні параметри досліджуваного процесу. Прикладом може служити ТП заливки бабітом вкладишів МОП в локомотивному ремонтному депо.

При моделюванні великих, розподілених у часі і просторі ТП має сенс обмежити набір даних одержуваних від моделі, розбити всю систему на складові частини і, можливо, перейти від моделювання кожної одиниці технологічного обладнання до моделювання укрупнених позицій. Прикладом такого великого ТП є поточний ремонт локомотивів в обсязі ПР-3.

Після визначення ступеня деталізації основних складових моделі необхідно побудувати структурно-алгоритмічну модель на підставі обробки мережевого графіка розглянутого технологічного процесу.

Технологічний процес ремонту рухомого складу супроводжується технологічною картою, в якій описана послідовність операцій, необхідних для виконання. На підставі аналізу технологічних карт будується мережевий графік, який наочно представляє структуру ТП. Мережевий графік обов'язково супроводжується визначником робіт.

Застосування програмного комплексу з мережевого планування при організації ремонту рухомого складу дозволить оптимізувати технологічні процеси, підвищує продуктивність праці технологів за рахунок автоматизації обчислювальних операцій. Робота машинних оптимізаційних алгоритмів потрібно поєднати з ручною роботою, що забезпечить необхідну гнучкість програмного комплексу.

Наявність мережного графіка дозволяє значно прискорити процес створення структурно-алгоритмічної моделі, яка будується у вигляді орієнтованого графа вигляду:

$$(G^P, G^T, F^G)$$

де  $G^P$  - безліч статичних об'єктів, кожен з яких відображає відповідне обслуговує пристрій;

$G^T$  - безліч переходів між статичними об'єктами;

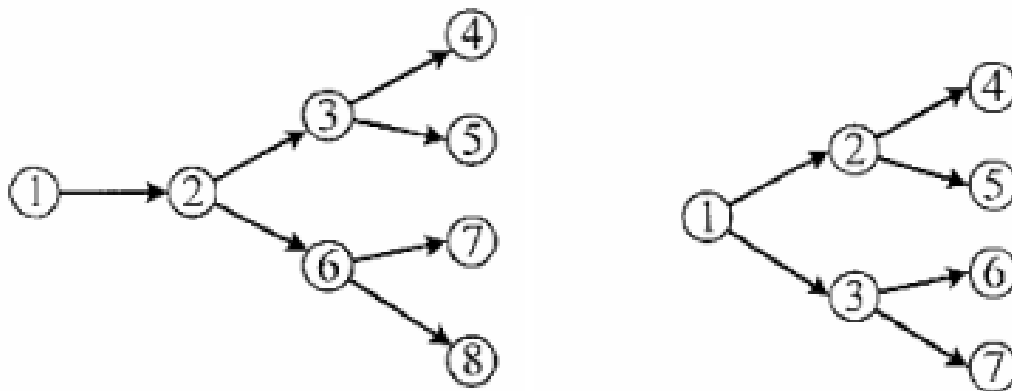
$F^G$  - функція інцидентності оргграфа.



Обслуговуючими пристроями, що знаходяться у вузлах орграфу, є позиції ТП, на яких виконуються відповідні роботи. Переходи, що з'єднують вузли, відображають потоки об'єктів, що піддаються обробці.

На різних ділянках моделі в потоці можуть брати участь різні об'єкти. Так при моделюванні ТП розбирання вагона, на початку моделі від однієї позиції до іншої в якості об'єкта обслуговування буде переміщатися сам вагон. Після виконання робіт з від'єднання, викатки і подальшої розбирання візків об'єктами-учасниками виробничого процесу стають кузов вагона, колісні пари, рами візків і т.д. Кожна одиниця рухається по своєму шляху і піддається відповідним технологічним операціям. Після складання вагона, на позицію якої повинні прийти всі об'єкти, що з'явилися в результаті розбирання, об'єктом обслуговування стає цілий вагон.

Приклад мережевого графіка і отриманої на його основі структурно-алгоритмічної моделі ділянки ТП капітального ремонту тепловозу зображений на рисунку 2.10, а відповідний їм визначник робіт представлений у таблиці 2.2.



а) мережевий графік; б) структурно-алгоритмічна модель

Рисунок 2.10 – Приклад мережного графіка і структурно-алгоритмічної моделі ділянки технологічного процесу

Таблиця 2.2 – Визначник робіт ділянки технологічного процесу

Номер роботи з мережевого графіку	Номер роботи по структурно-алгоритмічній моделі	Найменування роботи
1-2	1	Викочування візка
2-3	2	Розбір візка
3-4	4	Мийка рами візка
3-5	5	Розбір колісно-моторного блоку
2-6	3	Демонтаж даху тепловоза
6-7	6	Ремонт даху тепловоза
6-8	7	Демонтаж допоміжних машин

Отримана структурно-алгоритмічна модель повинна супроводжуватися відповідним визначником робіт, який містить найменування робіт, вироблених на кожній позиції ТП.

Для кожної технологічної операції, що моделюється, визначається використовуване технологічне обладнання, його параметри і режим використання.

Наприклад, позиція підняття кузова тепловоза передбачає використання електродомкратів. Так як мета моделювання – визначення витрати електричної енергії, то основним цікавлячим параметром обладнання є номінальна потужність. Режим використання електродомкратів передбачає їх роботу протягом усього часу виконання технологічної операції «підняття кузова тепловоза».

Незаперечною перевагою застосування імітаційного моделювання для обґрунтованого визначення витрати електричної енергії є можливість відтворення випадковості технологічних операцій.

Так як час кожної операції є випадковою величиною, то необхідно визначити можливі межі її зміни. Для визначення тимчасових характеристик використовують хронометраж з використанням лічильників часу. Для отримання достовірної оцінки необхідно провести серію вимірів тривалості виконання операції. Кількість замірів залежить від особливостей технологічної операції і має забезпечувати адекватну оцінку тривалості виконання операції. Якщо результати вимірів характеризуються великим розкидом значень, то кількість вимірювань повинно бути збільшено.

Для отримання середньої тривалості виконання роботи можна скористатися емпіричною формулою:

$$t_{cp} = \frac{2t_{\max} + 3t_{\min}}{5} \quad (2.2)$$

де  $t_{cp}$  - очікувана тривалість виконання роботи;

$t_{\max}$  - максимальна оцінка тривалості виконання роботи;

$t_{\min}$  - мінімальна оцінка тривалості виконання роботи.

Якщо відсутня можливість встановлення закону розподілу тривалості виконання технологічної операції, то при моделюванні ТП допускається прийняти рівномірний закон розподілу за умови обов'язкового підтвердження адекватності отриманої моделі. Однак, враховуючи формулу (2.2), можна зробити висновок, що медіана тривалості виконання технологічної операції повинна бути зміщена в бік мінімальної оцінки. Таким чином, використовувана при моделюванні функція розподілу буде мати вигляд, що відрізняється від стандартної функції рівномірного розподілу.

Стандартна функція рівномірного розподілу і функція розподілу, яка може бути використана при моделюванні ТП ремонту рухомого складу, представлені на рисунку 2.11. Тут тривалість виконання технологічної операції

знаходиться в межах  $(t_1; t_2)$ . Але медіана  $t_{cp1}$  зміщується в бік меншої оцінки, на відміну від медіани стандартного рівномірного розподілу  $t_{cp2}$ .

При визначенні структури модельованого ТП особливу увагу слід приділяти опису робіт, ймовірність виконання яких відрізняється від одиниці.

Як правило, це роботи, необхідність виконання яких визначається станом об'єкта, що може бути оцінений на позиціях дефектоскопії або візуального огляду. Для таких технологічних операцій визначаються умови, при яких вони будуть виконуватися, після чого повинна бути проаналізована інформація про частоту виникнення цих ситуацій.

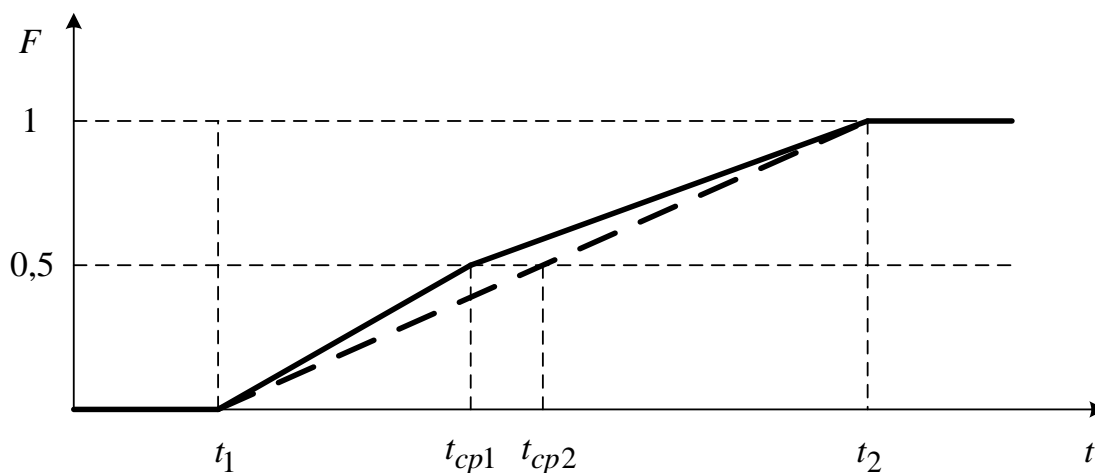


Рисунок 2.11 – Стандартна функція рівномірного розподілу і функція розподілу, яка може бути використана при моделюванні ТП ремонту рухомого складу

Статистична обробка інформації про частоту виконання технологічної операції може бути проведена на підставі даних, отриманих з журналів робіт або зі звітності цеху або структурного підрозділу про обсяги виконаних робіт. Експериментально відносну частоту виконання технологічної операції можна визначити за формулою:

$$V_k = \frac{N_k}{N}$$

де  $N_k$  - кількість деталей, оброблених на  $k$ -й технологічній позиції;

$N$  - загальна кількість об'єктів, яке могло надійти на розглянуту позицію.

Побудова імітаційної моделі технологічного процесу в термінах обраної мови імітаційного моделювання

Огляд системи імітаційного моделювання GPSS World

Після отримання всіх необхідних для моделювання даних виконується побудова моделі в обраній системі імітаційного моделювання. У дипломній роботі для опису ТП ремонту рухомого складу запропоновано використовувати дискретно-подієвий підхід.

Серед систем ІМ, що реалізують роботу з дискретно-подійними моделями, незрівняним лідером є система GPSS (General Purpose Simulation System загальноцільова система імітаційного моделювання), розроблена в 1961 році Джеффри Гордоном.

Існує безліч версій даної системи, найбільш актуальною з яких є GPSS World, що розроблена в 1993 році.

Система ІМ GPSS складається з декількох взаємодіючих один з одним модулів, зображених на рисунку 2.6.

Мова ІМ GPSS побудована за принципом об'єктно-орієнтованої мови і носить декларативний характер. Основними складовими є динамічні та статичні об'єкти.

У GPSS динамічні об'єкти називаються транзактами. Фізичний сенс, приписаний транзакту, визначається розробником моделі і може відрізнятися не тільки в різних моделях, але й в межах однієї моделі. Це можуть бути локомотиви, колісні пари або, скажімо, втулки в залежності від ступеня деталізації моделі.

З точки зору GPSS транзакт – це структура даних, що містить такі поля:

- ім'я або номер транзакта;
- час появи транзакта;
- поточне модельне час;
- номер блоку, в якому знаходиться транзакт;

- номер блоку, в який направляється транзакт;
- момент часу початку просування;
- пріоритет транзакта;
- користувацькі параметри транзакта.

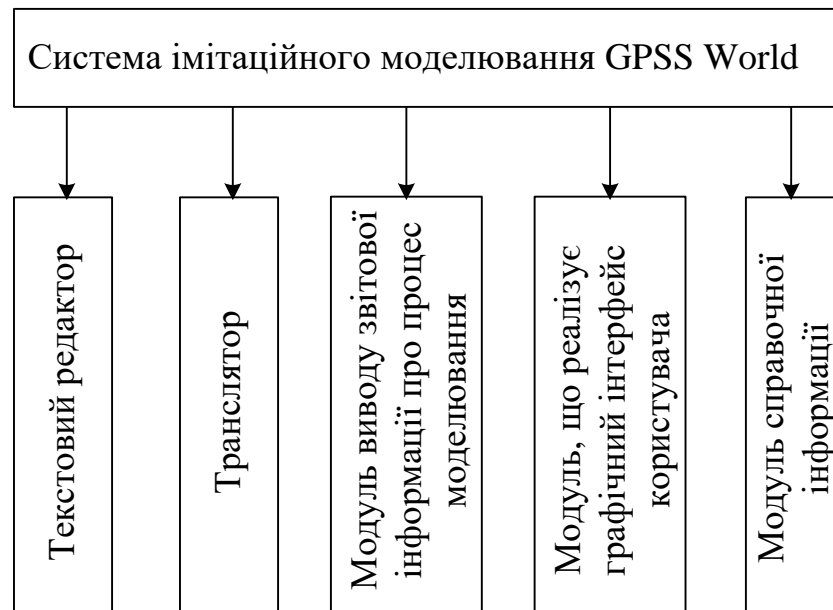


Рисунок 2.12 – Складові системи IM GPSS World

Блоки мови GPSS є підпрограми, мають фіксований набір операндів. Звернення до блоків відбувається за допомогою пересування транзактов.

Обслуговуючі пристрої реальних систем в GPSS моделюються за допомогою об'єктів типу «ресурс», до яких відносяться одноканальні і багатоканальні пристрої, логічні ключі. Відповідно до ідеології об'єктно-орієнтованого програмування кожен об'єкт має свій набір властивостей і методів. У GPSS властивості об'єктів називаються стандартними числовими атрибутами (СЧА).

При моделюванні інтерпретатор автоматично обчислює наступні СЧА:

- загальний час зайнятості пристрою;
- число транзактів, що займають пристрій;
- коефіцієнт використання пристрою;

- середній час зайнятості пристрою одним транзактом.

Значення цих СЧА можуть бути отримані при завершенні моделювання.

При затримці руху транзактів через недоступність потрібного ресурсу транзакти можуть ставати в черги. Розробник моделі сам визначає точки, в яких за допомогою відповідних підпрограм-реєстраторів черг буде збиратися статистика про черги.

За створеної моделлю здійснюється імітаційний експеримент, який повинен максимально повторювати умови роботи реальної системи. При ІМ ТП ремонту рухомого складу доцільно користуватися двома підходами до організації моделювання.

Перший підхід полягає в моделюванні ТП з заданим (однаковим) обсягом робіт і застосовується для підтвердження адекватності створеної моделі. Наприклад, відділення бабітозаливки деякого локомотивного депо щодня обробляє по 8 МОП. Для підтвердження адекватності створеної моделі і отримання представницької вибірки відгуків моделі виконується 100 запусків моделі, кожен з яких імітує обробку відділенням бабітозаливки 8 МОП.

Другий підхід реалізує імітацію роботи розглянутого ділянки протягом заданого періоду часу. При цьому імітаційний експеримент повинен максимально повторювати планований графік робіт розглянутого технологічного процесу. Наприклад, можна побудувати експеримент таким чином, що кожен запуск моделі ними імітує роботу відповідного робочого дня, а 30 запусків дадуть результат місячної роботи. При цьому зберігається можливість встановлювати в кожен день свій обсяг робіт, зовнішні умови, які надають дію на роботу системи. при другому підході також рекомендується виконувати серію імітаційних експериментів для зниження впливу випадкової складової похибки.

Таким чином, для моделювання технологічних процесів ремонту рухомого складу в дипломній роботі запропоновано використовувати систему дискретно-подієвого імітаційного моделювання GPSS World, що володіє необхідним потенціалом.

Побудова імітаційних моделей технологічних процесів ремонту рухомого складу в системі GPSS World

В даній роботі використовується система ІМ GPSS World. Побудова моделі виконується мовою імітаційного моделювання GPSS у вбудованому в систему ІМ текстовому редакторі. Також середу GPSS World включає в себе мову програмування нижнього рівня PLUS (мова програмування під Simulation).

Моделювання з використанням PLUS-виразів може бути включено практично в будь-яке місце GPSS-програми, в будь-який блок або процедуру виклику, що дозволяє збільшити потужність створюваних програм. Мова PLUS дозволяє програмно керувати розміщенням результатів, що колосально економить час, що витрачається на процес моделювання та обробку результатів імітаційних експериментів.

Технологічне обладнання, інформація про роботу якого цікавить розробника, і технологічні операції, результат виконання яких впливає на роботу інших елементів системи, повинні бути описані в термінах мови GPSS.

Технологічна позиція, що моделюється одноканальним обслуговуючим пристроєм, в загальному вигляді описується послідовністю чотирьох операторів. Приклад такого опису технологічної позиції виглядає наступним чином:

<i>mDevice1</i>	<i>TEST L</i>	<i>RN1, 1000, mDevice2</i>
	<i>SEIZE</i>	<i>Device 1</i>
	<i>ADVANCE</i>	<i>20</i>
	<i>RELEASE</i>	<i>Device1</i>

Перший рядок задає ймовірність використання ресурсу. Мітка «*mDevice1*» служить для направлення транзактів безпосередньо до зазначеного блоку, порушуючи лінійність ходу програми.

Блок TEST виконує порівняння двох величин, зазначених у першому і другому операнді блоку. Символ, наступний безпосередньо за словом «Тест»



визначає умову, за яким буде виконуватися порівняння, і може приймати значення «E», «L», «G», «LE», «GE», «NE». У даному прикладі символ «L» позначає знак «менше» (англ. - *less*). Відповідно, перевіряється виконання нерівності  $x < 1000$ , де  $x$  - значення, отримане від генератора випадкових чисел RN 1.

Випадкові числа в системі GPSS World є видаються генераторами випадкових чисел (ГВЧ), які позначаються символами «RN» і наступно. за ними цифрою, яка задає початкове зміщення випадкової послідовності. Кожен ГВЧ видає псевдовипадкову послідовність чисел. У загальному випадку можна використовувати будь-яку кількість генераторів, однак тільки для перших семи початкове зміщення може змінюватися спеціальним блоком *RMULT* в процесі виконання програмної моделі.

Якщо умова, що перевіряється виконується, то транзакт переходить до наступного по порядку блоку. При невиконанні умови, що перевіряється наведена в прикладі структура блоку *TEST* припускає перехід транзакта до блоку з міткою «*mDevice1*».

При зверненні до ГВЧ в тілі програми генератор видає цілі значення від 0 до 999 включно. Тому в даному випадку вираз « $x < 1000$ » означає стовідсоткову ймовірність виконання заданої умови і безумовний перехід транзакта до наступного блоку.

Якщо, наприклад, транзакт повинен увійти в блок з імовірністю 0,3, блок *TEST* повинен мати наступний вигляд:

```
mDevice1  TEST L      RN1, 300, mDevice2
```

В цьому випадку тільки 30 % транзактів пройдуть до наступного блоку, а 70 % перейдуть до блоку «*mDevice2*».

Блок *SEIZE* є парним з блоком *RELEASE*. Кожному блоку *SEIZE* повинен відповідати свій блок *RELEASE*. Ця пара блоків моделює зайнятість пристрою і позначає відповідно технологічні операції «зайняти пристрій» і «звільнити пристрій». Операндом цих блоків є ім'я обробного пристрою.

Блок *ADVANCE* задає затримку, яка імітує виконання відповідної технологічної операції. Операнди блоку *ADVANCE* визначають тривалість обслуговування транзакта. Для опису багатоканальних пристроїв, використання яких доцільно при моделюванні групи однакових одиниць технологічного устаткування, пара операторів *SEIZE-RELEASE* замінюється операторами *ENTER-LEAVE*. При цьому передбачена можливість заняття або звільнення транзактом довільної кількості обслуговуючих пристроїв. Загальна кількість пристроїв у групі визначається блоком *STORAGE*.

Для отримання статистичної інформації про черги до обслуговуючих пристроїв в модель додаються реєстратори черг, які задаються парою операторів *QUEUE-DEPART*, що імітують потрапляння в чергу і її покидання. Для опису систем з динамічною зміною параметрів в імітаційній моделі числові константи замінюються змінними або функціями, обумовленими розробником.

За результатами імітаційного експерименту видається програмний звіт про моделювання, в якому відображаються необхідні параметри роботи моделі. Однак при здійсненні багаторазових запусків імітаційної моделі зручніше користуватися функціями запису в текстовий файл, завдяки яким необхідні параметри записуються в загальний файл у зручній для наступного аналізу формі.

### **3 ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕМОНТУ ЛОКОМОТИВІВ**

Розглянемо імітаційне моделювання технологічного процесу ремонту рухомого складу в умовах локомотиворемонтного заводу

Ремонт тягового рухомого складу призначений для відновлення експлуатаційних характеристик, повного або часткового відновлення ресурсу основних вузлів і агрегатів, заміни та ремонту зношених, несправних деталей, вузлів і агрегатів локомотивів, часткової заміни трубопроводів, кабелів, проводів і обладнання з виробленим ресурсом на нове.

Технологічний процес поточного посиленого ремонту локомотива практично збігається з поточним ремонтом третього обсягу. Різниця полягає в тому, що при поточному посиленому ремонті не виконуються роботи по ремонту автозчеплень, колісних пар, двигунів електричних машин і деяких інших елементів. Зазначені елементи при цьому ремонті підлягають обов'язковій заміні і на локомотив встановлюються після заводського ремонту.

В результаті аналізу мережевого графіка технологічних процесів ТП ремонту локомотива, складеного в локомотиворемонтному заводі, була побудована укрупнена структурно-алгоритмічна модель, представлена на рисунку 3.1.

Після заїзду в цех локомотив виставляється проти електродомкратів. При цьому починаються роботи по демонтажу пневматичного обладнання та приладів безпеки та підготовка локомотива до підйому кузова. Демонтоване обладнання доставляється до відповідних цехів для визначення технічного стану та можливого проведення ремонту або заміни. Підготовка локомотива до підйому кузова полягає у від'єднанні міжсекційних проводів і повітропроводних рукавів.

Готову до підйому секцію переміщують під другу пару електродомкратів. Для цього на одному з тягових електродвигунів секції збирають електричну схему і подають на неї постійну напругу 250 В.

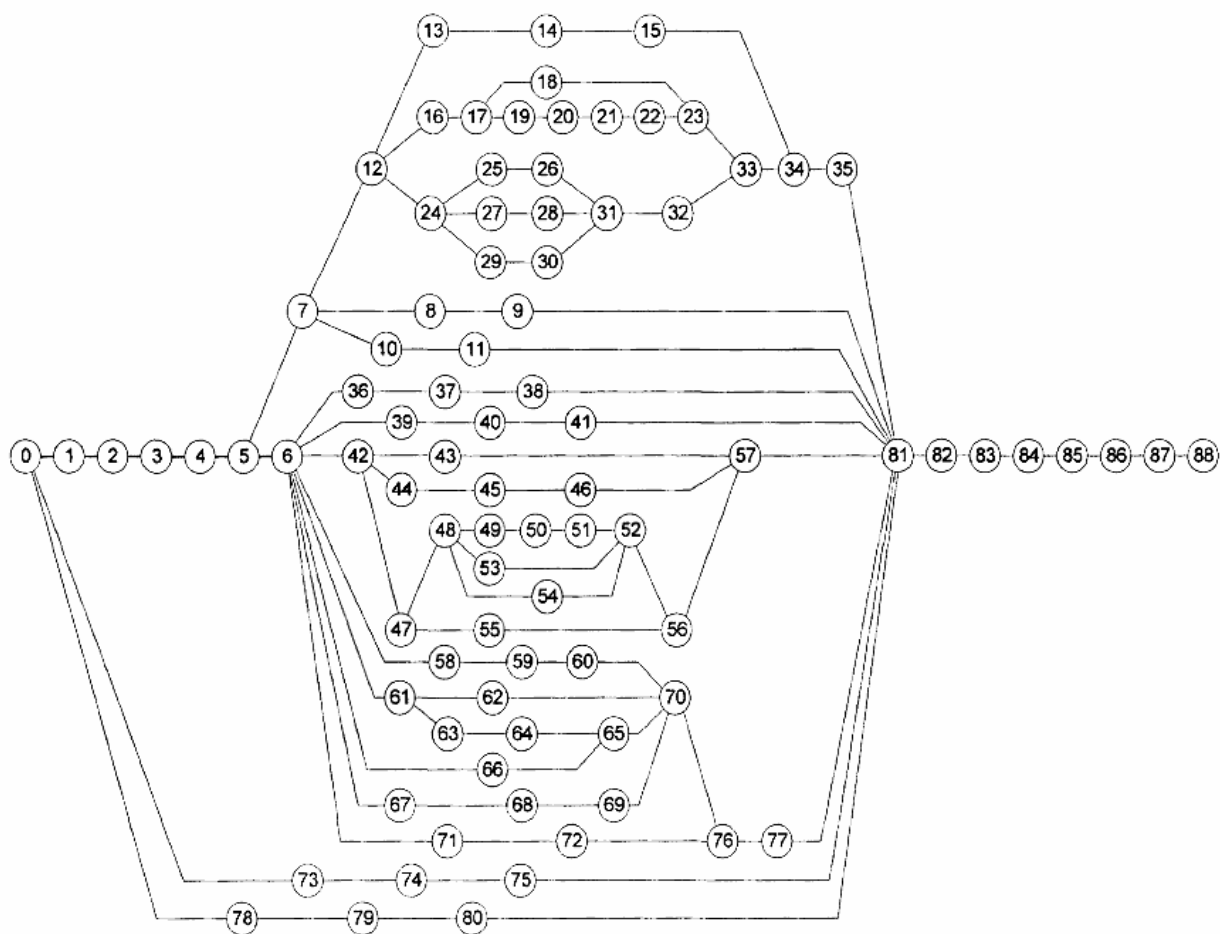


Рисунок 3.1 – Структурно-алгоритмічна модель

Дана структурно-алгоритмічна модель відповідає за поопераційний перелік укрупнених робіт, представлений у таблиці 3.1

Перед підйомом кузова виконується від'єднання візків локомотива. Для цього від'єднують дроти тягових електродвигунів від силової мережі кузова локомотива, вентиляційні патрубки від тягових двигунів, кожухи шкворней від шкворневих балок візків та інш.

Перед підйомом кузова виконується від'єднання візків, після чого консолі домкратів висуваються і встановлюються під наддомкратні опори на рамі кузова. До цього моменту всі роботи в кузові і на даху повинні бути припинені.

Таблиця 3.1 – Перелік укрупнених технологічних операцій ремонту локомотива (фрагмент)

№	Найменування робіт
1	2
0	Заїзд в цех
1	Підготовка локомотива до підйому кузова
2	Викочування секції
3	Від'єднання візків
4	Підйом секції
5	Викочування візків
6	Опускання секції
7	Демонтаж бічних опор
8	Мийка пружин
9	Випробування пружин
10	Мийка кришок масляних ванн бічних опор
11	Ремонт кришок масляних ванн бічних опор
12	Розбирання візків
13	Мийка поздовжніх регульованих тяг і поперечин важільної гальмової передачі
14	Перевірка гальмівних тяг і поперечиною важільної гальмової передачі
15	Ремонт гальмівних тяг і поперечок важільної гальмової передачі
16	Мийка рами візка
17	Розбирання рами візка
18	Випробування листових ресор
19	Дефектоскопія зварного з'єднання шкворневого бруса
20	Переміщення рами візка на позицію лазерної перевірки геометрії

Після викатки всіх візків кузов опускають і приступають до демонтажу обладнання, що залишилось:

- дахів;
- повітряних резервуарів;
- автозчепного пристрою;
- акумуляторних батарей;
- електроапаратів.

Демонтоване обладнання надходить до відповідних відділень, де здійснюється виявлення та усунення можливих дефектів. Виявлення дефектів відбувається на позиціях візуального огляду, різних видів дефектоскопії, випробування. Усунення дефектів досягається шляхом здійснення ремонту або заміни обладнання або його частин. Готове до експлуатації обладнання монтується на локомотив у зворотному порядку.

Візки після викочування надходять на позицію розбирання в цеху поточного ремонту, після чого виконується їх миття. Після миття складові візка надходять на відповідні позиції ремонту. При цьому тягові двигуни надходять в електромашинне відділення, колісні пари – в колісний, рами візка залишаються в цеху поточного ремонту. Інші елементи надходять у відповідні відділення заготівельного цеху. Розподіл механічного обладнання по відділеннях заготівельного цеху показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Відділення ремонту вузлів механічної частини тепловоза

Найменування елемента	Відділення цеху
Поздовжні регульовані тяги і поперечини гальмівної передачі	Зварювальне, токарно-слюсарне, ковальське
Кожухи зубчастої передачі	Відділення по ремонту кожухів
Бічні опори	Зварювальне, токарно-слюсарне, ковальське
Люлечне підвішування	Стрижневе відділення
Кульовий зв'язок	Зварювальне, токарно-слюсарне
Гідравлічний гаситель коливань	Відділення по ремонту гідравлічних гасителів коливань

Після монтажу всього обладнання виконується підкатка зібраних візків під тепловоз, з'єднання секцій і тепловоз переганяється на оглядову канаву, де виконується монтаж пісочних труб, регулювання гальмової системи, запресовування кульової зв'язки, регулювання опор кузова, висоти автозчепних пристроїв та інші роботи.

Готовий тепловоз переганяється в цех БПР, де відбувається його випробування на діагностичних комплексах.

### 3.1 Побудова імітаційної моделі технологічного процесу поточного ремонту тепловозів

Технологічний процес поточного ремонту тепловозів та умови цеху характеризується великим обсягом робіт і складністю внутрішніх структурних зв'язків.

З цієї причини доцільно виконати побудову імітаційної моделі з досить низьким ступенем деталізації, якої має бути досить для отримання адекватної оцінки витрат електричної енергії на розглянутий технологічний процес.

Оскільки моделювання великого, розподіленого технологічного процесу допускає введення деяких припущень, то в даному випадку обліку підлягали лише ті технологічні операції, на яких здійснюється безпосереднє споживання електричної енергії або результат виконання яких впливає на режими роботи електрообладнання.

Оскільки відносно мала частка технологічного обладнання споживає електроенергію, то опис ТП поточного ремонту тепловоза на високому рівні деталізації є недоцільним. До того ж існуючий рівень агрегатного опису передбачає досить низький рівень деталізації. Таким чином для опису ТП ПР-3У тепловоз прийнятий середній рівень деталізації, а імітаційна модель розбита на 15 блоків відповідно до існуючої організації праці в локомотивному депо.

Технологічні операції, що увійшли в кожний з п'ятнадцяти блоків моделі, і структурні зв'язки між блоками представлені на рисунку 3.2.

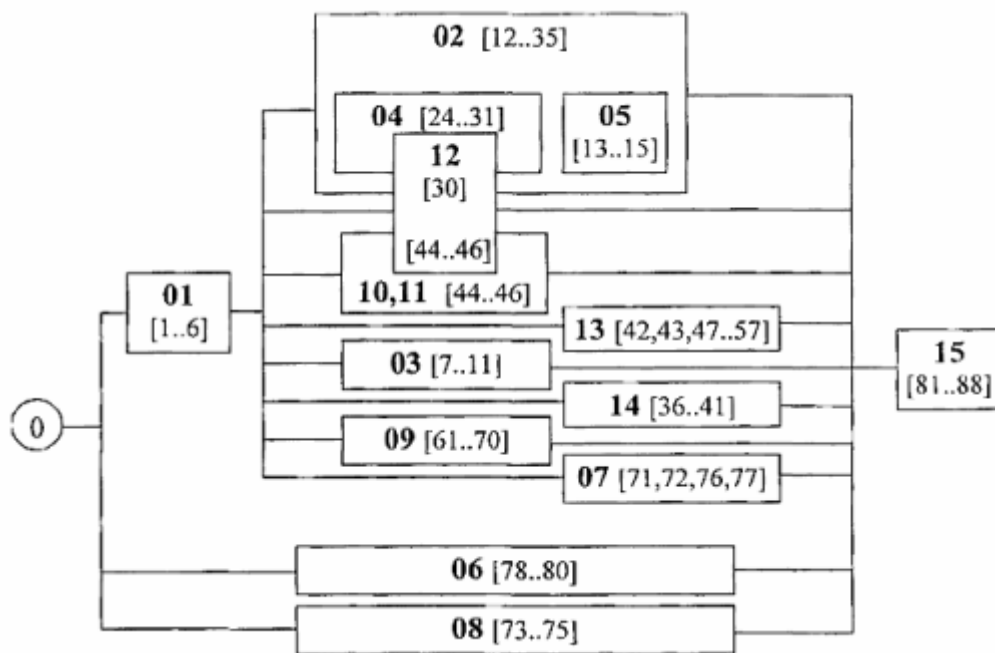


Рисунок 3.2 – Розбиття імітаційної моделі на частини

Блок 1 описує попередню підготовку локомотива до розбирання, викочування візків.

Блоки 2 і 3 описують ремонт механічної частини локомотива. При цьому в блоці 2 описаний розбір, ремонт і складання візка, а в блоці 3 – ремонт гідравлічних гасителів коливань, бічних опор або люлечне підвішування. В середині блоку 2 виділено 2 підблока – номер 4 і 5. Блок номер 4 описує мийку і ремонт кожухів зубчастої передачі, мийку та заміну колісних пар, мийку тягових електродвигунів. Процес заміни тягових електродвигунів (технологічна операція № 30) описаний в блоці 12. Блок номер 5 описує ремонт гальмівної передачі.

Блок 13 описує демонтаж, ремонт та монтаж дахів, пантографів, дахове обладнання.

Блоки 10, 11 і 12 описують демонтаж, випробування і ремонт допоміжних машин. Зокрема блок 10 описує ремонт і випробування мотор-компресора, що складається з компресора та електродвигуна. Блок 11 описує випробування і ремонт мотор-вентилятора, що складається з електродвигуна і відцентрового



вентилятора, а в блоці 12 крім випробування тягових електродвигунів описаний процес випробування перетворювачів.

Блок 14 описує ремонт гальмівних циліндрів і противорозвантажного пристрою, що виконується в заготівельному цеху.

Блок 9 описує демонтаж, ремонт або заміну і монтаж автозчепів і фрикційних апаратів, а також ремонт дверей, блокувань і щитів високовольтної камери, вентиляційних каналів кузова, стінок кузова, обладнання кабін, санвузлів, патрубків тягових електродвигунів, колієочищувачів, ручного гальма, основ допоміжних машин, шкворневих вузлів, підвідних проводів допоміжних машин, клемових рейок, н/в і в/в кондуктів, панелі управління.

Блок 7 описує демонтаж, ремонт, монтаж та випробування електроапаратів локомотива.

Блоки 6 і 8, виконання яких починається безпосередньо після постановки локомотива в цех середнього ремонту, описують демонтаж, ремонт та монтаж відповідно пневматичного устаткування та приладів безпеки, контрольно-вимірювальних приладів.

Розрахунок загальної витрати електричної енергії на технологічний процес середнього ремонту тепловоза виконаний за наступним алгоритмом.

1. У програму розрахунку загальної витрати електричної енергії, виконану в Microsoft Excel (ліцензійну) занесена інформація про все електрообладнання досліджуваного структурного підрозділу. При цьому вказується:

- найменування електроспоживача;
- кількість одиниць;
- приналежність до певного цеху або відділення;
- номінальна потужність;
- коефіцієнт використання навантаження;
- коефіцієнт використання потужності.

Отримані дані використані для розрахунку частки електричної енергії, спожитої устаткуванням при виконанні досліджуваного технологічного процесу, на підставі наведених потужностей.

2. Дані про час моделювання та коефіцієнти використання обслуговуючих пристроїв, отримані в результаті імітаційного моделювання, занесені в другу таблицю програми розрахунку загальної витрати електричної енергії.

3. На основі отриманих у другому пункті даних виконується розрахунок часу роботи кожної технологічної операції.

4. Із загального переліку електрообладнання вибрано технологічне обладнання, яке згруповано по цехам і відділенням структурного підрозділу. Для кожної одиниці електроустаткування вказані номінальна потужність і коефіцієнти використання навантаження і потужності технологічних операцій.

5. На підставі всіх раніше отриманих даних зробити розрахунок часу роботи кожної одиниці технологічного електрообладнання та спожитої ним електричної енергії.

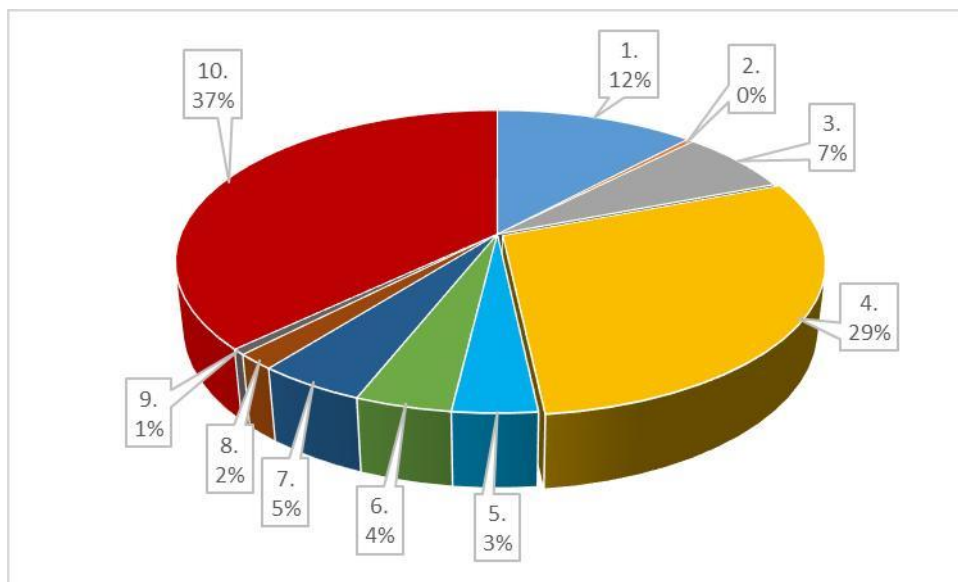
6. За допомогою підсумовування обсягів спожитої електроенергії по всьому технологічному обладнанню або по обладнанню досліджуваних цехів виходить величина витрат електричної енергії розглянутого об'єкта.

По локомотивному ремонтному депо визначити загальну витрату електричної енергії на технологічний процес поточного посиленого ремонту тепловозів і витрата електроенергії дев'яти найбільш енергоємних цехів в рамках виконання розглядуваного технологічного процесу.

Підтвердження адекватності імітаційної моделі технологічного процесу капітального ремонту локомотивів

Для підтвердження адекватності створеної імітаційної моделі технологічного процесу поточного ремонту локомотивів були використані дані про електроспоживання дев'яти енергоємних ділянок, на яких були встановлені лічильники електричної енергії і в роботі яких можуть бути чітко визначені моменти виконання технологічного процесу поточного ремонту тепловоза.

Частка електричної енергії, спожитої цими ділянками, склала 63 %. Співвідношення обсягів електроенергії, спожитої розглянутими ділянками та іншим обладнанням, наведено на рисунку 3.3.



1. Випробувальна станція – 11,9 %;
2. Відділення по ремонту струмоприймачів – 0,4 %;
3. Відділення по ремонту кожухів зубчастої передачі – 6,8 %;
4. Цех середнього ремонту - 29,2 %;
5. Акумуляторне відділення - 3,6 %;
6. Зварювальне відділення - 4,1 %;
7. Відділення по ремонту гідравлічних гасителів коливань - 4,6 %;
8. Стрижневе відділення - 1,7 %;
9. Автоматний цех - 0,6 %;
10. Ділянки без обліку електроспоживання - 37,1 %.

Рис. 3.3 – Співвідношення часток електроенергії, спожитої модельованими ділянками

По кожній ділянці отримана вибірка відгуків системи, що представляє собою сукупність значень витрати електричної енергії за періоди часу виконання зроблених робіт в обсязі поточного ремонту тепловоза.

Обсяги вибірок залежать від наявної інформації про електроспоживання і від особливостей технологічного процесу аналізованої ділянки.

Для підтвердження адекватності створеної імітаційної моделі здійснимо 100 імітаційних експериментів. Для кожної отриманої реалізації технологічного процесу з запропонованого методу необхідно визначити витрату електричної енергії на аналізовані ділянки технологічного процесу ремонту локомотиву. У кожній з реалізацій вироблено моделювання обсягу робіт, відповідного ремонту одного тепловоза.

За результатами проведених імітаційних експериментів отримують вибірки відгуків моделі для кожної розглянутої ділянки. Для підтвердження адекватності перевіряється статистична гіпотеза про однорідність вибірок відгуків досліджуваної системи та імітаційної моделі.

Обчислені значення параметрів порівнюваних вибірок наведено в таблиці 4.3 і показують відносну близькість розподілів значень в порівнюваних вибірках.

Перевірка гіпотези  $H_0: F(x) = G(x)$ , де  $F(x)$  - функція розподілу значень вибірки відгуків системи, а  $G(x)$  - функція розподілу значень вибірки відгуків моделі, перевіряється за допомогою непараметричного критерію однорідності типу  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта.

Обчислення розрахункового значення  $A$ -статистики для критерію типу з  $\omega^2$  Лемана-Розенблатта виконувалося за алгоритмом, представленим на рисунку 4.4. Обсяги вибірок відгуків системи представлені в таблиці 4.3, а обсяг вибірок відгуків моделі дорівнює 100.

Розрахункові значення  $A$ -статистики для розглянутих вибірок представлені в таблиці 4.3 і опинилися нижче критичного значення, що становить 0,461 при рівні значимості 0,05.

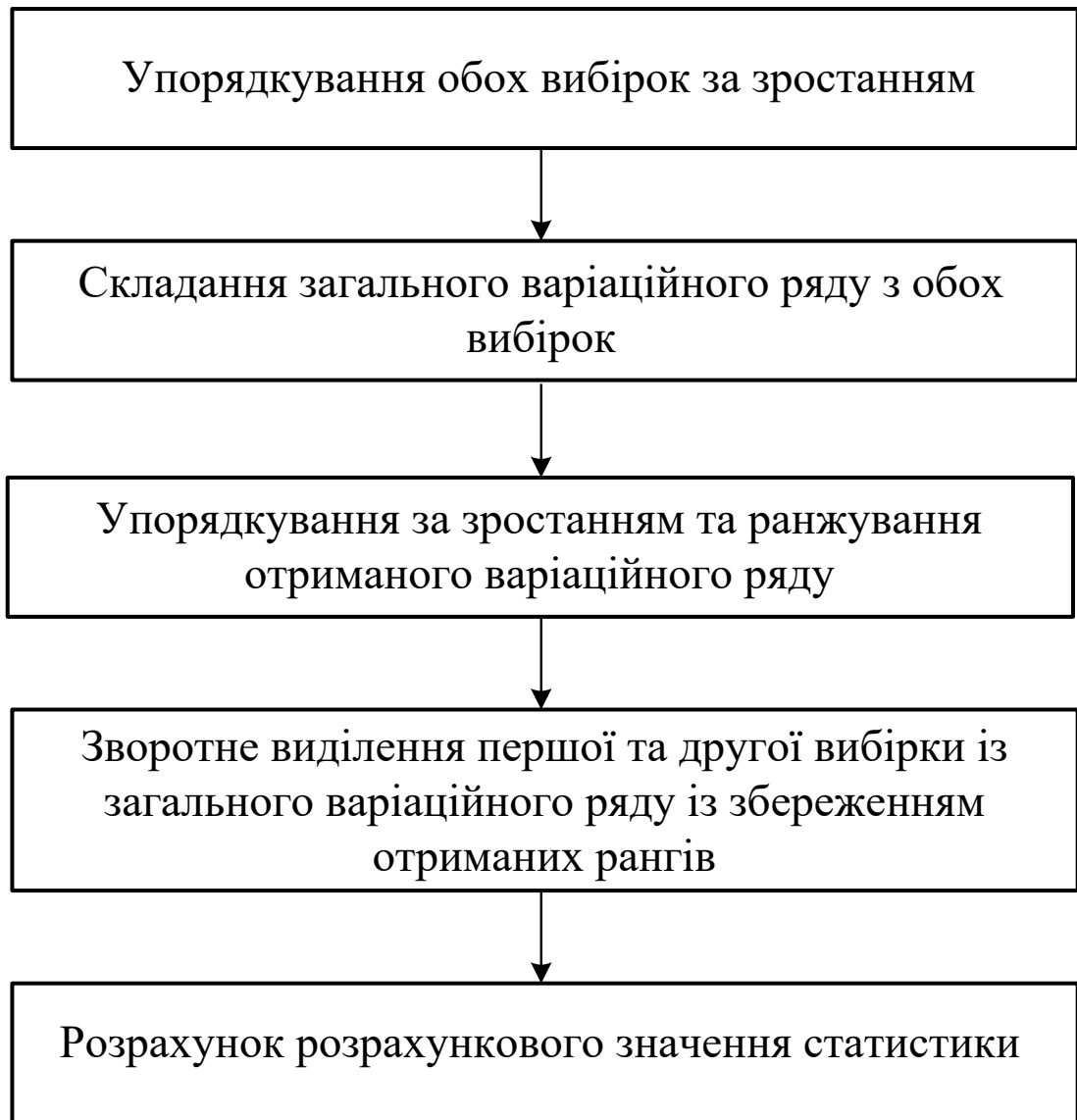


Рисунок 3.4 – Алгоритм обчислення розрахункового значення A-статистики

Отже, гіпотеза про однорідність всіх пар розглянутих вибірок не спростовується, і на рівні значущості 0,05 підтверджується адекватність створеної імітаційної моделі.

Налагодження моделі необхідно проводити на базі даних електроспоживання локомотивного ремонтного депо за певний рік. На підставі наведених потужностей з загальної витрати електричної енергії по депо обчислювати її кількість, що припадає на технологічний процес поточного ремонту локомотивів, яке склало для тепловозів 253177,7 кВт-год.

Таблиця 3.3 – Параметри вибірок відгуків системи і моделі

Розглядувана ділянка	Система			Модель		Розрахункове значення критерію однорідності
	Обсяг вибірки	Вибіркове середнє, кВт/год	Виправлена вибіркова дисперсія (кВт/год) <sup>2</sup>	Вибіркове середнє, кВт/год	Виправлена вибіркова дисперсія (кВт/год) <sup>2</sup>	
1. Випробувальна станція	47	1531,67	405,84	1525,51	341,38	0,379
2. Відділення по електричного обладнання	52	47,25	64,85	45,45	75,39	0,152
3. Відділення але ремонту кожухів зубчастої передачі	58	888,48	3203,65	875,99	3060,90	0,191
4. Цех поточного ремонту	26	3763,14	4470,20	3743,40	3800,90	0,186
5. Акумуляторне відділення	41	468,73	2106,83	460,44	1831,48	0,121
6. Зварювальне відділення	35	536,51	1847,08	529,63	1385,06	0,094
7. Відділення по ремонту гідравлічних гасителів коливачів	32	445,86	75,19	443,03	50,77	0,381
8. Відділення по ремонту стрижнів	36	231,13	650,15	223,44	891,75	0,263
9. Автоматний цех	39	77,48	122,14	79,99	96,80	0,199

Витрата електричної енергії на розглянутий технологічний процес, визначений згідно з представленим методом, склала 248810,6 кВт-год. Таким чином, похибка визначення витрати електричної енергії на досліджуваний технологічний процес за розробленим методом складає 1,72 %, що також служить підтвердженням адекватності створеної моделі.

### 3.2 Визначення витрати електричної енергії на технологічний процес ремонту локомотива серії ТЕМ

Використання розглядуваної імітаційної моделі технологічного процесу ремонту тепловоза ТЕМ проведена для залізничного цеха.

Промодельована робота цехів, що брали участь у ремонті протягом 2019 року і з використанням отриманих результатів виконано оцінку витрат електричної енергії на ТП ремонту тепловоза.

За базовий 2019 рік загальна витрата електричної енергії у депо склала 4747567 кВт·год. На підставі використання наведених потужностей виділена частка електричної енергії, яка припадає на розглядуваний ТП. В результаті отримано, що за 2019-й рік на здійснення ТП ремонту тепловозів витрачено 253177,7 кВт·год.

У магістерській роботі проведений розрахунок витрати електричної енергії на ТП ремонту тепловозів протягом 2020 року за допомогою діючої по мережі залізниць методики.

Визначити витрату електричної енергії на розглянутий ТП протягом розрахункового 2020 року за діючою методикою можна на підставі формули:

$$W_{cp}^{20} = W_{cp}^{19} \left( d^{y.n.} + d^{зм} \frac{P_{пр.зм}^{20}}{P_{пр.зм}^{19}} \frac{V_{cp}^{20}}{V_{cp}^{19}} \right)$$

де  $W_{cp}^{19}$  - кількість електричної енергії, спожите технологічним обладнанням локомотивного депо при виконанні технологічного процесу ремонту тепловозів за 2019 рік;

$d^{y.n.}$ ,  $d^{зм}$  - частка умовно-постійної і змінної складових витрати електричної енергії, що припадає на технологічний процес середнього ремонту тепловозів;

$P_{пр.зм}^{19}$ ,  $P_{пр.зм}^{20}$  - наведена потужність задіяного при ремонті технологічного обладнання, режим роботи якого, згідно з чинною методикою, залежить від обсягів виконаних робіт, відповідно за 2019 та 2020 роки;

$V_{cp}^{19}$ ,  $V_{cp}^{20}$  - обсяги виконаних робіт по ремонту тепловозів склали 9 і 12 локомотива, відповідно за розрахунковий 2019 і планований 2020 роки.

Результати розрахунку витрати електричної енергії на розглянутий технологічний процес, отримані на підставі розрахунку за чинною методикою і на підставі розробленого методу з використанням імітаційного моделювання, і відхилення їхніх оцінок наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку витрати електричної енергії

Параметр	Діюча методика	Розроблений метод
Фактичне значення розходу електричної енергії на ТП ремонту за 2020 рік, кВт·год	275624,7	
Розрахункове значення розходу електричної енергії на ТП ремонту за 2020, кВт·год	314060,8	281542,1
Абсолютне відхилення розрахункової оцінки, кВт·год	38436,1	5917,4
Відносне відхилення розрахункової оцінки, %	13,95	2,15

### 3.3 Оцінка витрати електричної енергії на технологічний процес заливки бабітом вкладишів МОП тягових електродвигунів тепловозів серії ТЕМ

Застосування імітаційної моделі технологічного процесу заливки бабітом вкладишів МОП тягових електродвигунів проведемо на прикладі відділення бабітозаливки цеха.

За базовий місяць, на підставі якого виконано розрахунок електроспоживання на наступні місяці, загальна кількість електричної енергії, спожитої відділенням бабітозаливки, склала 11595,23 кВт·год. Виділена на підставі наведених потужностей частка витрат електричної енергії, яка припадає на технологічне обладнання, становить 0,88. Таким чином, кількість



електричної енергії, що припадає на технологічний процес заливки бабітом вкладишів МОП, за базовий період складає:

$$W_{\text{баз}} = 11595,23 \cdot 0,88 = 10202,64 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

У дипломній роботі виконана апріорна оцінка витрат електричної енергії на технологічний процес (ТП) заливки бабітом вкладишів МОП протягом трьох наступних місяців на підставі результатів статистичних даних з побудованої імітаційної моделі.

Було проведено порівняння витрат електричної енергії на ці ж місяці за допомогою діючої по мережі залізниць методики згідно з формулою:

$$W^{\text{план}} = k_{\text{сез}} \cdot W^{\text{пред}} \left( d^{\text{у.п.}} \frac{L^{\text{план}}}{L^{\text{пред}}} + d^{\text{перем}} \frac{V^{\text{план}}}{V^{\text{пред}}} \right) \quad (3.1)$$

де  $k_{\text{сез}}$  - зміна коефіцієнта сезонності, значення якого розраховується за середньостатистичними значеннями;

$W^{\text{пред}}$  - кількість електричної енергії, спожита досліджуваною ділянкою за попередній період;

$d^{\text{у.п.}}$  - частка електрообладнання, що не відноситься до технологічного процесу, режим роботи якої приймається умовно-постійною;

$d^{\text{перем}}$  - частка електрообладнання, що відноситься до технологічного процесу, режим роботи якого безпосередньо залежить від обсягів роботи візкового відділення;

$L^{\text{план}}$ ,  $L^{\text{пред}}$  - кількість днів в планованому і попередньому періодах;

$V^{\text{план}}$ ,  $V^{\text{пред}}$  - обсяг робіт візкового відділення в планованому і попередньому періодах.

Розрахунок на кожен місяць виконувався на підставі факту витрат електроенергії за попередній місяць з урахуванням зміни коефіцієнта сезонності.

Витрати електричної енергії на розглянутий технологічний процес, отримані на підставі аналізу (за формулою 3.5) і на підставі розробленого методу з використанням результатів імітаційного моделювання, наведені в таблиці 3.1, а відхилення оцінок – у таблиці 3.6.

В результаті аналізу результатів, відображених в таблиці 3.6 видно, що використання методу апріорної оцінки витрат електричної енергії дозволило суттєво підвищити точність розрахунків для технологічного процесу заливки бабітом вкладишів МОП за рахунок врахування особливостей досліджуваного технологічного процесу.

Таблиця 3.5 – Витрати електричної енергії на технологічний процес

Розрахунковий місяць	Витрати електричної енергії, кВт·год		
	Фактично	Діюча методика	Розроблений метод
Квітень	7240,84	5921,054	6890,93
Травень	6928,13	5709,88	7112,16
Червень	7502,84	6047,512	7662,88

Таблиця 3.6 – Відхилення оцінок порівнюваних методик

Розрахунковий місяць	Абсолютне відхилення, кВт год		Відносне відхилення, %	
	діюча методика	розроблений метод	діюча методика	розроблений метод
Квітень	1319,79	349,91	18,23	4,83
Травень	1218,25	-184,03	17,58	-2,66
Червень	1455,33	-160,04	19,40	-2,13
Загальне значення за 3 місяці	3993,36	5,84	18,43	0,03

Як видно з таблиці 3.6 використання імітаційного моделювання більш точно відображує витрати електричної енергії на технологічні процеси ремонту деталей рухомого складу є найбільш близькими до фактичних витрат.

В результаті проведених розрахунків інтегральний економічний ефект від впровадження визначення необхідного обсягу електричної енергії на технологічний процес ремонту тепловозів за розрахунковий період становить 362,2 тис. грн. Таким чином, проект є ефективним. Розрахунковий термін окупності складає 21 місяць (1,75 року).

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Вимоги безпеки праці під час виконання робіт при ремонті рухомого складу

Під час виконання ремонтних робіт необхідно дотримуватись вимог з охорони праці відповідно до НАОП 5.1.11-1.18 «Правила по охроне труда при техническом облуживании и текущем ремонте тягового подвижного состава и грузопододъёмных кранов на железнодорожном ходу» та пожежної безпеки згідно із Законом України «Про пожежну безпеку», ГОСТ 12.1.004 ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования», НАПБ 03.004-2002 «Норми оснащення об'єктів і рухомого складу залізничного транспорту пожежною технікою та інвентарем», НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні», інструкціями з відповідними вимогами до техніки безпеки на конкретних ділянках цехів.

Також при виконанні робіт застосовують обладнання для механічної обробки металів, а саме різні верстати, різальні інструменти.

Стенди й механізовані пристосування для ремонту обладнання, що споживають при роботі електричний струм, повинні мати надійне захисне заземлення з опором заземлення 40 Ом. Опір ізоляції стендів повинна бути не менше 0.51 Ом.

Роботи, що виконують на обладнанні

Зварювальні роботи проводять зварювальним апаратом з необхідним устаткуванням. Зварювальні роботи виконують відповідно до Інструктивних вказівок по зварювальних роботах при ремонті тепловозів, електровозів та моторвагонного рухомого складу. При визначенні механічних характеристик використовують допоміжні засоби, важелі та інше.

Пристрої електропостачання використовують для ремонту та ревізії струмоприймачів, що представляє собою небезпеку для життя та здоров'я працівників.

Обладнання для механічної обробки металів, а саме різні верстати, різальні інструменти використовують при виконанні відповідних робіт.

## Аналіз шкідливих та небезпечних факторів

Конкретні небезпечні і шкідливі виробничі чинники встановлюються за результатами атестації умов праці.

До шкідливих факторів відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку», ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації», ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», які впливають на здоров'я людини відносять:

- виробничий пил, який утворюється в результаті механічної обробки твердих тіл, завантажувально-вивантажувальних робіт, транспортування пиловидних матеріалів.

- забруднення повітря парами масляних і паливних аерозолів, в механічних відділеннях, повітря забруднюється окисом вуглецю, аерозолем окислів заліза і змащувально-охолоджуючої рідини;

- інший, не менш шкідливий фактор - виробничі шуми. Вони впливають на нервову систему, а через неї на інші органи;

- значний вплив на здоров'я людини має виробниче випромінювання. Сильне випромінювання спостерігається на зварювальних ділянках, а також, при проведенні зварювальних робіт на рухомому складі;

- метеорологічні умови також сильно впливають на здоров'я і працездатність людини. Лише при наявності теплового балансу між організмом і оточуючим середовищем, мікроклімат сприймається людиною як прийнятний.

Порушення теплообміну веде до перегріву або до переохолодження організму, що в свою чергу, може негативно вплинути на продуктивність праці.

Потрібно враховувати, що крім безпосереднього переохолодження працівників, що працюють на відкритому повітрі причинами порушення теплового балансу можуть бути рухомий склад, який заходить в приміщення, а також зони біля вхідних дверей при їх відчиненні.

Перераховані фактори негативно впливають на здоров'я працюючих. Наприклад, одночасно з забрудненням повітря в організм людини поступає велика кількість шкідливих речовин, частина з яких не видаляється з повітрям яке видихається. Гази і пари, що вдихаються з повітрям розчиняються в легеневій рідині. Поступово відбувається накопичення цих речовин і зростає їх несприятливий вплив на організм людини.

При експлуатації і ремонті електричного обладнання людина може опинитися в сфері дії електромагнітного поля або в безпосередньому дотику з провідниками, що знаходяться під напругою. В результаті проходження струму через людину може виникнути порушення його життєдіяльних функцій.

До організаційних заходів, що забезпечують безпеку роботи в електроустановках, відносяться оформлення роботи, допуск до роботи, нагляд під час роботи, оформлення перерви в роботі, перевід на інше робоче місце.

При виконанні ремонтно-зварювальних робіт на працюючих можуть впливати шкідливі і небезпечні виробничі фактори:

- ультразвукове й інфрачервоне випромінювання зварювальної дуги;
- електромагнітні поля;
- ультразвук;
- статичне навантаження на руки.

При зварюванні, напилюванні, пайки в зону подиху працюючих можуть надходити зварювальні аерозолі, що містять у складі тверді фази, окисли різних металів (хрому, нікелю, міді, алюмінію, заліза), їхні окисли й інші з'єднання, а також токсичні гази (окис азоту, вуглецю, фтористий водень), при пайці - аерозоль флюсів і припоїв, що містить свинець, цинк, олово.

Кількість і склад зварювальних аерозолів, їхня токсичність залежить від хімічного складу зварювальних матеріалів і металів, що зварюються, ведучи технологічний процес. Вплив на організм шкідливих речовин, що виділяються, може з'явитися причиною гострих і хронічних захворювань і отруєнь.

Інтенсивність випромінювання зварювальної дуги в оптичному діапазоні і його спектрі залежать від потужності дуги, застосовуваних матеріалів,

захисних і плазмоутворюючих газів. При відсутності захисту можливі поразки органів зору й опіки шкірних покривів. Негативний вплив на здоров'я може зробити інфрачервоне випромінювання попереднє підігрітих виробів.

Неправильна експлуатація електроустаткування може призвести до поразки електричним струмом. Застосування відкритого газового полум'я, відкритих дуг, наявність бризів, іскор і викидів розплавленого металу, шлаку створюють не тільки можливість опіків, але і підвищують небезпека виникнення пожеж. Небезпеку створюють використання при зварюванні палих газів і кисню, а також експлуатація судин працюючих під тиском не рівному атмосферному тискові.

Небезпека ураження електричним струмом загострюється тим, що, по-перше, струм не має зовнішніх ознак і, як правило, людина без спеціальних приладів не може завчасно виявити небезпеку, яка їй загрожує; по-друге, дія струму на людину у більшості випадків приводить до серйозних порушень найбільш важливих життєдіяльних систем, таких як центральна нервова, серцево-судинна і дихальна, що збільшує важкість ураження; по-третє, змінний струм здатний викликати інтенсивні судороги м'язів, які приводять до невідпускаючого ефекту, при якому людина самостійно не може звільнитися від дії струму; по-четверте, дія струму викликає у людини різку реакцію віддюргування, а у ряді випадків і втрату свідомості, що може привести до додаткових травм.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, може викликати біологічну, теплову, механічну і хімічну дію. Біологічна дія полягає в здатності електричного струму роздразнювати і збуджувати живі тканини організму, тепла – в здатності викликати опіки тіла, механічна – приводити до розриву тканин, а хімічна – до електролізу крові.

Дія електричного струму на організм людини може бути причиною електротравми. Умовно електротравми поділяють на місцеві і загальні. При місцевих електротравмах виникає місцеве пошкодження організму, яке виявляється в появі електричних опіків, електричних знаків, в металізації

шкіри, механічних пошкодженнях і електрофтальмії (запалення зовнішніх оболонок ока). Загальні електротравми, або електричні удари, приводять до ураження всього організму, яке виражається в порушенні чи повному припиненні діяльності найбільш життєвоважливих органів і систем – легенів (дихання), серця (кровообіг).

Вологість і температура повітря, наявність заземлених металічних конструкцій, струмопровідний пил та інші фактори навколишнього середовища викликають додатковий вплив на умови електробезпеки. При підвищенні вологості і температури складаються найбільш благоприємні умови, при яких забезпечується найкращий контакт зі струмоведучими частинами. Наявність заземлених металічних конструкцій створює підвищену небезпеку ураження внаслідок того, що людина практично постійно зв'язана з одним полюсом (землею) електроустановки. Струмопровідний пил також покращує умови для електричного контакту людини як зі струмоведучими частинами, так і з землею.

Опромінення при зварюванні відбувається в результаті видимих світлових та ультрафіолетових та інфрачервоних променів. Видимі світлові та інфрачервоні промені послаблюють зір, а ультрафіолетові промені негативно діють на зовнішні частини очей та шкіряні покриви.

#### Міри безпеки при організації роботи в ремонтно-ревізійних цехах

Організація виробництва робіт в ремонтній-ревізійних цехах проводять згідно вимог Правил, Інструкцій, вказівок з питань охорони праці. Безпека виробництва робіт в ремонтно-ревізійних цехах забезпечується за рахунок правильної організації, оформлення робіт і виконання організаційно-технічних заходів. Правильність організації робіт полягає у своєчасному і грамотному оформленні заявки на виконання робіт з вказівкою необхідних і достатніх заходів безпеки для виробництва робіт, правильного підбору працівників для виконання дорученої ним роботи і забезпечення їх всіма необхідними захисними засобами і монтажними пристосуваннями. Наступними важливими етапами в забезпеченні безпеки працюючих є правильне оформлення робіт



(нарядом або нарядом-допуском, розпорядженням або переліком робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації), виконання підготовки робочих місць, проведення цільового інструктажу бригаді перед початком виробництва робіт, забезпеченні допуску до роботи і нагляду під час роботи.

Крім того проводиться ввідний інструктаж з питань пожежної безпеки згідно розробленої і затвердженої програми, що включає основні вимоги по забезпеченню дотримання вимоги Закону України «Про пожежну безпеку», знайомлять працівників також з інструкцією підприємства по пожежній безпеці і про порядок забезпечення протипожежного режиму в підрозділах і на робочих місцях дистанції електропостачання.

Контроль за дотриманням вимог з охорони праці працівниками проводиться згідно затвердженої системи оперативного контролю, яка складається з трьох ступенів. Перший ступінь оперативного контролю проводиться щодня на робочому місці керівником робіт або уповноваженим трудового колективу з охорони праці і включає:

- перевірку підготовки робочого місця, наявність, достатність і справність інструменту, захисних засобів, монтажних пристосувань і дотримання термінів їх випробувань і відповідності вимогам Правил, наявність технологічних карт на виробництво робіт, посвідчень про перевірку знань;

- наявність і стан спецодягу;
- виконання вимог правил і інструкцій при виробництві робіт;
- дотримання правил внутрішнього трудового розпорядку;
- дотримання правил безпеки при роботі з шкідливими і пожежебезпечними речовинами і матеріалами;
- справність вентиляції приточної та витяжної.

Другий ступінь оперативного контролю за станом охорони праці проводиться начальником підрозділу, старшим електромеханіком або електромеханіком і включає перевірку:

- наявність наряду (наряду-допуску) або розпорядження на роботу, що проводиться;

- достатності заходів безпеки працюючих у відповідності категорії робіт і можливості безпечного її виконання;
- правильності виконання технічних заходів, що забезпечують безпеку тих, що працюють і, особливо, достатність, і місце установки заземлень, огорожі місця робіт і т.п.;
- організації нагляду за тими, що працюють;
- наявність технологічних карт і правильності проведення роботи відповідно до неї;
- відповідності складу бригади, вказаному в наряді, достатність кваліфікації осіб для виконуваної роботи;
- наявність у членів бригади посвідчень про перевірку знань і термінів їх дії.

Третій ступінь оперативного контролю за станом охорони праці проводиться керівниками і інженерно-технічними працівниками шляхом проведення раптових перевірок працюючих бригад і комплексними комісійними перевірками стану охорони праці в кожному підрозділі в ремонтно-ревізійних цехах, згідно затвердженого графіка. При проведенні раптових перевірок працюючих бригад перевіряється:

- достатність заходів безпеки, відповідності категорії роботи і можливості її безпечного виконання;
- правильність виконання технічних заходів, що забезпечують безпеку тих, що працюють;
- організацію нагляду за тими, що працюють;
- наявність достатності, справності і придатності захисних засобів, сигнального приладдя, монтажного і інших пристосувань;
- наявність технологічної карти і правильність проведення роботи відповідно до неї;
- відповідність складу бригади, вказаному в наряді, достатність кваліфікації осіб для виконання роботи;
- наявність у членів бригади посвідчень про перевірку знань і термінів їх дії.

Виконання вимог по безпечній організації і виробництву робіт в

пристроях електропостачання, забезпеченні контролю за дотриманням всіма працівниками ремонтно-ревізійного цеху вимог з охорони праці, забезпечує безпеку працівникам ремонтно-ревізійного цеху.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Працівник зобов'язаний:

- у всіх випадках виявлення обривів проводів живлення, несправності заземлення і інших пошкоджень електроустаткування, появи запаху гару негайно відключити живлення і повідомити про аварійну ситуацію головному фахівцеві з електронного устаткування;

- при виявленні людини, що потрапила під напругу, негайно звільнити його від дії струму шляхом відключення електроживлення і надати потерпілому першу (долікарську) допомогу;

- у будь-яких випадках збоївши в роботі технічного устаткування або програмного забезпечення негайно викликати головного фахівця з електронного устаткування;

- при спалахуванні устаткування відключити живлення і прийняти заходи по гасінню вогнища пожежі за допомогою углекислотного вогнегасника, викликати пожежну команду і повідомити про подію керівникові робіт.

У разі відключення електроживлення припинити роботу і доповісти керівникові. Не намагатися самостійно з'ясувати і усунути причину. Пам'ятати, що напруга може також несподівано з'явитися.

При загорянні або пожежі необхідно пам'ятати, що гасити електроустановки слід углекислотними вогнегасниками щоб уникнути поразки електричним струмом.

На території, виробничих та службових приміщень забороняється:

- накопичувати горючі відходи і розташовувати сміттєприймальники та контейнери на відстані менше 20 м від споруд та будівель III, IV ступенем вогнестійкості;
- залишати неприбраним скошені трави, опавше листя;
- залишати після роботи відкритими двері, вікна, пройми в шахтах та люки у виробничих та іншого призначення приміщеннях. Ключі від приміщень повинні знаходитись у визначених місцях;

- влаштовувати з горючих будівельних матеріалів конторки, кладові, антресолі, настили, майданчики та перегородки і ін.

Дороги, проїзди та під'їзди до пожежних джерел води, будівель та споруд повинні мати тверде покриття, бути постійно вільними та утримуватися у справному стані, а в нічний час освітлюватись.

Сточні канали, лотки повинні постійно очищуватись від сміття, пролитих рідин та закриватися плитами з негорючих матеріалів.

Всі види опалення та вентиляцій повинні бути в строгій відповідності з діючими будівельними нормами та правилами.

Встановлення тимчасових печей, як правило, не допускається.

Електричні мережі та електрообладнання, яке використовується в депо, повинно відповідати вимогам діючих ПТЕ та ПТБ при експлуатації електроустановок споживачів.

Біля входу у виробниче приміщення повинен бути напис зі вказанням класу по вибуховій та пожежній небезпеці.

В усіх приміщеннях, які після закінчення роботи закриваються та не контролюються, енергосистеми повністю обезструмлюється.

Користування електронагрівальними приладами у виробничих, службових та іншого призначення приміщеннях допускається тільки у спеціально відведених та обладнаних місцях, з письмового дозволу керівника підприємства.

Вогневі роботи у вагонах електросекцій, локомотивах допускається проводити тільки після видалення утеплювача підлоги, стін на відстані (в радіусі) не менше 2 м від місця нагріву металу та виключення попадання іскор розжареного металу на горючі речовини або після надійного захисту їх від займання металевими екранами.

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі розглянута задача більш точної оцінки витрат електричної енергії при технічному ремонті тягового рухомого складу.

Як відомо, залізничний транспорт є одним з найбільш енергоємних споживачів, на здійснення діяльності якого щорічно витрачається близько п'яти відсотків вироблюваної в країні електричної енергії. Одним з головних загальнотранспортних орієнтирів є підвищення продуктивності та рентабельності транспортних систем. Виявлення випадків нераціонального використання електричної енергії відкриває широкі можливості щодо підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів.

В магістерській роботі показано, що однією з найважливіших умов забезпечення ефективного використання електричної енергії є дотримання питомих норм її витрати на випуск одиниці продукції, які в даний час відсутні для більшості структурних підрозділів залізничного транспорту. Наявні питомі норми отримані на підставі фактичних даних про електроспоживання не дозволяють достовірно врахувати плановані зміни в організації виробництва.

В магістерській роботі проведено аналіз існуючих методів визначення розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу, які не відображають дійсний розход електричної енергії.

Застосування методів імітаційного моделювання для оцінки розходу електричної енергії на ремонт рухомого складу дозволить більш точно планувати витрати електричної енергії в структурних підрозділах Укрзалізниці. Також даний метод дозволить підвищити ефективність використання електричної енергії. Розглянути у дипломній роботі метод дозволяє апріорно визначати витрати електричної енергії на технологічні процеси при ремонті рухомого складу; виконувати оцінку ефективності впровадження нових технологій, виявляти ділянки технологічних процесів з підвищеними втратами електричної енергії, визначати ефективність управляючих впливів щодо зниження енергоємності основних технологічних процесів.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Ермилов, А. А. Электроснабжение промышленных предприятий/ А. А. Ермилов. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 208.
2. Рожкова, Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций: учебник/Л.Д. Рожкова, В.С.Козулин, Москва. Энергоатомиздат. 1987г.- 246с.
3. Правила улаштування електроустановок. Четверте видання, перероблене й доповнене — Х.: Вид-во «Форт», 2011.— 736 с.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Гмурман В.Е. — М.: Высш. Школа, 2000. — 480 с.
5. Мілютіна, О.С. Статистичний аналіз графіків навантаження трансформаторної підстанції/ О.С. Мілютіна, С.А. Левченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко – технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2017.- No 16 (1238). – С. 48-53./ Бібліогр.: 10 назв.- ISSN 2079-5459
6. Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок М.: Высшая Школа, 1990. - 363 с
7. Воротницкий, В.Э. Нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: результаты, проблемы, пути решения. ОАО «НТЦ электроэнергетики».; ВНИИЭ; 2007. – 256с
8. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов.Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков – 4-е изд., перераб. и доп. – М.:Энергоатомиздат, 1989.- 608с.
9. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. - М.: НУ ЭНАС, 2002. - 280с.
10. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592с.

11. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред. Д.В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. – 573с.

12. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. -176с.

13. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.: Под ред. В.Н. Казанцева. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 268с.

14. Цирель Я.А., Поляков В.С. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985.-264с.

15. Блок В.М. Электрические сети и системы: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1986. – 430с.

16. Боровиков В.А. и др. Электрические сети энергетических систем. Учебник для техникумов. Изд. 3-е, переб. Л.: «Энергия», 1977. – 392с.

17. Воротницкий В.Э., Калинкина М.А. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Учебно-методическое пособие. 2-е изд. - М.: ИПК госслужбы, 2002. - 57 с.

18. Правила технической эксплуатации и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Атомиздат, 1974 –352с.

19. Фёдоров А.А. «Основы по электроснабжению промышленных предприятий». –М.: Энергия, 1978.

20. Шапиро, И.З. Вероятностно – статистические модели для определения и прогнозирования потерь энергии в распределительных сетях 6-10 кВ.- Известия вузов. Энергетика. 1978 №4, с. 15-20.

21. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 504 с.

22.Воротніцкій, В.Е. Програма розрахунку технічних втрат потужності та електроенергії в розподільних мережах 6 - 10 кВ. - Електричні станції, 1999,В.Е. Воротніцкій, С.В. Заслонов, М .А. Калінкіна № 8, с.38-4

23. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991.– 178 с.

24. Охрана труда в электроустановках: Учебник для вузов / под. ред. Б.А.Князевского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336с.

25. ГОСТ12.0.00374(1999) «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» Введ. 01.01.1976 -85с.

26. Методичні рекомендації до виконання та оформлення дипломних робіт(проектів) першого (бакалаврського) рівня вищої освіти для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання. О. І.Коваленко, Л. Р. Коваленко, Л. Ю. Осипова. – Запоріжжя, ЗДІА, 2017 –60 с.

27. ГКД 341.004.00194 «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 6-750 кВ» Введ. - Х.: Видавництво «ІНДУСТРІЯ» 2011.- 345с.

28. Харечко, Ю.В. Основы заземления электрических сетей и электроустановок зданий. 6-е изд., перераб. и доп. – М.: ПТФ МИЭЭ, 2012. – 304 с.

29. ГКД 34.20.507 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила» Введ 2003 -К.:Вид. Об'єднання енергетичних підприємств «галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» - 597с.

30. НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок»

31. «Вимоги до окремих видів пристроїв» ГОСТ 12.2.007.3-75 (2001) «ССБТ. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности».