

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

бакалаврської кваліфікаційної роботи

Удосконалення системи резервного електроживлення ліфтового
обладнання

Виконав:

студент 4 курсу, групи ЕТ 2022-1

Арсеній ДОВГАЛЬ

Керівник бакалаврської роботи:

Анатолій КУЗНЕЦОВ

ХАРКІВ – 2026 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О.М. Бекетова

Навчально-науковий інститут Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра Електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма – Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 **Микола ХВОРОСТ**

“ 16 ” червня 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Довгаль Арсеній Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Удосконалення системи резервного електроживлення ліфтового обладнання

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи **Кузнєцов Анатолій Іванович,**
к.т.н., доцент

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

затверджені наказом університету від “22” травня 2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи
20.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики, Електричні схеми та фізичні моделі електроприводу змінного та постійного струму.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Стан питання. Виконати порівняльний аналіз втрат у двигунах редукторних лебідок ліфтів.

4.2. Розробка технічного завдання.

Виконати дослідження резервування електроживлення та компенсація реактивної потужності силового приводу ліфтового обладнання.

4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення)

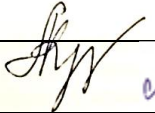
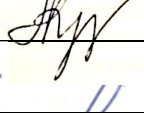
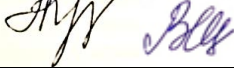
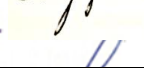
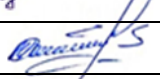
Виконати вибір акумулятора для резервування електроживлення приводу ліфта за одномодульною схемою.

4.4. Охорона праці. Забезпечення охорони праці на законодавчому рівні.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)

Ліфтова лебідка з приводом від двошвидкісного асинхронного двигуна; система керування приводом ліфта з інтегруванням сигналу датчика швидкості; схема випробувального стенду ліфтової лебідки; графік залежності коефіцієнта потужності від ємності СК; загальний вид пасажирського ліфта.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

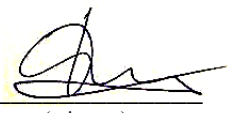
Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Олександр ДОНЕЦЬ, доц.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 01.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	02.05.26-07.05.26	
2.	Розробка технічного завдання	07.05.26-13.05.26	
3.	Розрахункова частина	13.05.26-20.05.26	
4.	Охорона праці	20.05.26-28.05.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	28.05.26-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	12.06.26-19.06.26	

Студент


(підпис)

Арсеній ДОВГАЛЬ
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)



Анатолій КУЗНЦОВ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано удосконалення системи резервного електроживлення ліфтового обладнання.

Виконано порівняльний аналіз втрат у двигунах редукторних лебідок ліфтів; порівняльний аналіз втрат потужності з редукторним частотно-регульованим приводом; шляхи вдосконалення електроприводу масових ліфтів.

Розглянуто питання резервування електроживлення та компенсація реактивної потужності силового приводу ліфтового обладнання; методика резервування заміщенням електроживлення вантажопідійомних механізмів та ліфтів; розрахунок ефективності використання акумуляторних батарей як резервного джерела живлення електроприводу ліфта; технічні вимоги та методи випробування акумуляторних батарей.

Склад бакалаврської роботи:

- листів розрахунково-пояснювальної записки - 53
- рисунків - 24
- таблиць - 0
- формул - 24
- Графічна частина до бакалаврської роботи складається з 10 слайдів.

ЗМІСТ

	Стор
ВСТУП.....	7
1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ У ДВИГУНАХ РЕДУКТОРНИХ ЛЕБІДОК ЛІФТІВ	9
1.1 Порівняльний аналіз втрат потужності з редукторним частотно-регульованим приводом.....	9
1.2 Шляхи вдосконалення електроприводу масових ліфтів.....	16
2 РЕЗЕРВУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИЛОВОГО ПРИВОДУ ЛІФТОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....	20
2.1 Методика резервування заміщенням електроживлення вантажопідйомних механізмів та ліфтів.....	20
2.2 Дослідження відмов пасажирських ліфтів.....	29
3 ВИБІР АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ РЕЗЕРВУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПРИВОДУ ЛІФТА ЗА ОДНОМОДУЛЬНОЮ СХЕМОЮ.....	32
3.1 Розрахунок ефективності використання акумуляторних батарей як резервного джерела живлення електроприводу ліфта.....	32
3.2 Технічні вимоги та методи випробування акумуляторних батарей.....	34
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	43
4.1 Задачі розділу.....	43

4.2	Аналіз нормативно-правової бази з охорони праці при експлуатації електрообладнання ліфтів.....	43
4.3	Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації електрообладнання ліфтів.....	45
4.4	Розрахунок штучного освітлення машинного відділення ліфта.....	46
4.5	Розрахунок захисного заземлення електрообладнання ліфта...	48
4.6	Висновки до розділу охорони праці.....	50
	ВИСНОВКИ.....	51
	СПИСОК ПОСИЛАНЬ.....	52

ВСТУП

Сьогодні в масових ліфтових установках зі швидкістю руху до 2 м/с найчастіше використовується редукторний електропривод на базі двошвидкісного двигуна.

Для забезпечення надійної роботи системи високу ефективність демонструють схеми резервного живлення з паралельним підключенням свинцево-кислотних акумуляторних батарей (АБ). Окрім своєї основної функції, такі АБ додатково виступають у ролі компенсаторів реактивної потужності [1].

Проте обмежена швидкість окисно-відновних процесів під час електрохімічних реакцій заряду-розряду акумуляторної батареї (АБ) звужує не лише час її розряду та ємність (номінальне значення якої регламентується для 20-годинного режиму), але й лімітує граничні значення коефіцієнта корисної дії (ККД).

АБ підключається в систему разом із інвертором і, окрім забезпечення резервного живлення, виконує функцію компенсатора реактивної потужності. Разом з тим, через значну ємність батареї існує ризик перекомпенсації реактивної потужності, що зумовлює зростання її реактивної складової і, як наслідок, призводить до додаткових непродуктивних втрат електроенергії. Крім того, живлення асинхронного електроприводу від АБ потребує обов'язкового використання інвертора, що також знижує загальний ККД системи резервного електропостачання.

З огляду на це, актуальним науково-технічним завданням є розробка систем резервного живлення на базі накопичувачів енергії, які мають меншу ємність порівняно з АБ, але здатні забезпечувати високу швидкість розряду. Для збереження високого ККД такі пристрої доцільно підключати безпосередньо до мережі змінного струму, яка живить силовий привід ліфтових механізмів, що дозволяє виключити зі схеми додаткові інвертори.

Одним із перспективних шляхів розв'язання цієї проблеми – для короткочасного електропостачання та одночасної компенсації реактивної потужності силового електроприводу – є застосування суперконденсатора (СК) як додаткового накопичувача енергії.

Актуальність даної теми Поява нової елементної бази забезпечила можливість створення моделей електроприводів та електроустаткування ліфтів, придатних як для нових, так і для модернізації раніше розроблених установок.

Мета: вдосконалення автоматизованої системи керування електроприводом ліфта.

Завдання:

- проведено аналіз конструкції ліфтів; класифікація ліфтів за конструкцією; особливості елементів монтажу ліфтів
- здійснити вибір параметрів електричної принципової схеми електроприводу ліфта
- вибір силового електрообладнання

Апробація: Любимий В. С., Довгаль А. С. Удосконалення системи безперебійного електроживлення для комп'ютерного обладнання ХІХ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛИЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД» 18 квітня 2026 р м. Харків.

1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВТРАТ У ДВИГУНАХ РЕДУКТОРНИХ ЛЕБІДОК ЛІФТІВ

1.1 Порівняльний аналіз втрат потужності з редукторним частотно-регульованим приводом

Завдяки прогресу в галузі силової електроніки відбулося масове впровадження електромеханічних комплексів, що базуються на взаємодії частотного перетворювача та двигуна змінного струму. У світовій практиці цей тип електроприводу визнано одним із найбільш дієвих рішень для заощадження ресурсів, підвищення енергоефективності та захисту довкілля.

Режим роботи електропривода ліфтових установок є повторно-короткочасним із високою частотою пусків та зупинок. Повний цикл руху кабіни складається з таких послідовних стадій: розгін електродвигуна до усталеної швидкості, рух із постійною швидкістю, сповільнення при наближенні до цільового поверху, а також гальмування та фіксація кабіни на рівні точної зупинки.

Завдяки зниженню втрат у перехідних режимах, використання таких електроприводів забезпечує суттєвий енергозберігаючий ефект. Частотний перетворювач (ЧП), окрім безпосередньої оптимізації енергоспоживання, виконує низку критично важливих функцій: керування пуском і гальмуванням, регулювання кутової швидкості й моменту, забезпечення плавності ходу, а також захист і комплексну діагностику обладнання. Це дозволяє значно підвищити загальний технічний рівень привода [2, 3].

Розрахунок енергетичних втрат здійснювався з урахуванням як усталених режимів роботи, так і динамічних перехідних процесів (ПП) під час розгону та зупинки кабіни. Для спрощення математичного аналізу втрати енергії на етапах пуску та гальмування прийняті як рівнозначні.

Конструктивна схема ліфтової лебідки з приводом на базі двошвидкісного асинхронного двигуна (ДАТ) містить маховик, черв'ячний редуктор, канатоведучий шків (КВШ), а також систему тягових канатів і кабінку рисунок 1.1.

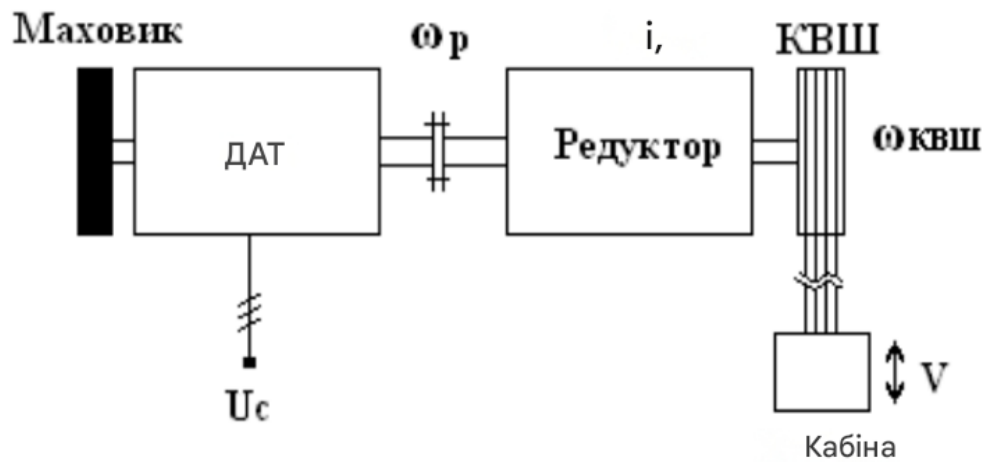


Рисунок 1.1 – Ліфтова лебідка з приводом від двошвидкісного асинхронного двигуна

Параметри двигуна 5АФ200МА6/24НЛБУХЛ4: $P_1 = 6,5$ кВт; $P_2 = 1,6$ кВт; $n_1 = 940$ (об/хв); $n_2 = 215$ (об/хв); $\eta_1 = 0,835$; $\eta_2 = 0,345$. Коефіцієнт редукції черв'ячного редуктора $i = 15$.

Момент інерції ротора $J_{рот} = J_{ред} = 0,55$ кг \times м², момент інерції маховика та муфти $J_{мах} = 0,8$ кг \times м², $J_{квш} = 0,8$ кг \times м². Швидкість руху кабіни $V = 1$ м/с. Кутова швидкість обертання ротора двигуна приблизно дорівнює $\omega_p = 98$ (1/с) весняний вигляд ліфтового електроприводу показаний на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд ліфтового електроприводу

На рисунках 1.3, 1.4 представлені електромеханічні характеристики прямого пуску ліфтової лебідки із приводом від двошвидкісного асинхронного двигуна.

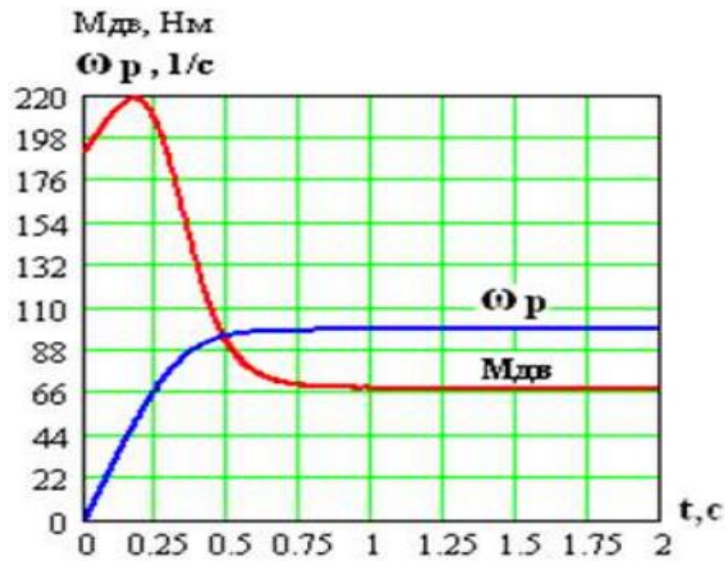


Рисунок 1.3 – Залежність моменту та швидкості ротора двигуна у часі при прямому пуску приводу ліфта

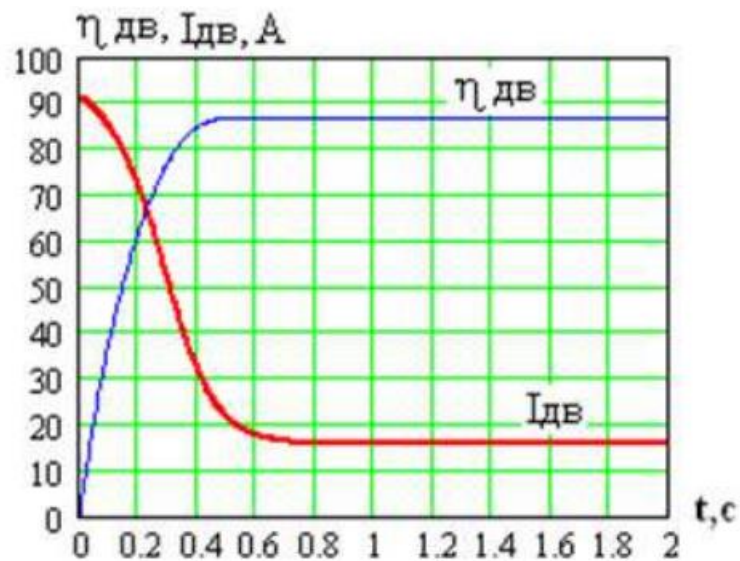


Рисунок 1.4 – Залежність струму статора та к.к.д. двигуна при прямому пуску приводу ліфта

Час перехідного процесу становить $t_p = 0,8$ с. У процесі пуску струми статора двигуна змінюються від пускових до номінальних, пускові потужності і втрати значно вище значень, що встановилися на рисунку 1.5.

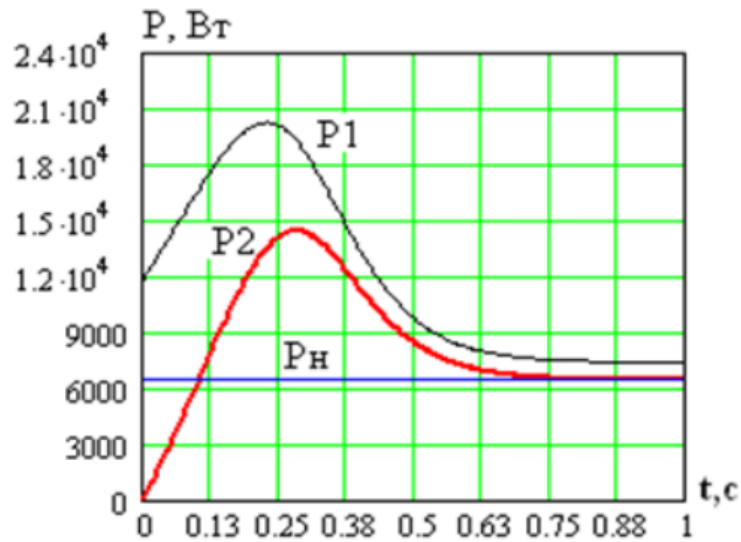


Рисунок 1.5 – Залежність потужності двигуна P_2 , вхідної потужності P_1 та номінальної потужності двигуна при прямому пуску

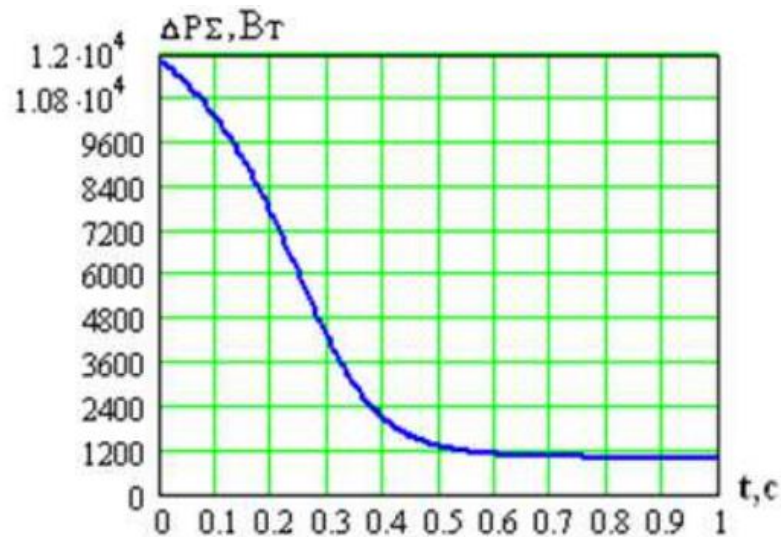


Рисунок 1.6 – Залежність втрат потужності двигуна при прямому запуску

Під час роботи ліфтової установки частина енергії витрачається на подолання механічних втрат. Із підвищенням тривалості руху обсяг спожитої енергії пропорційно зростає, причому ця залежність від часу має практично лінійний характер показаний на рисунку 1.6.

Врахування втрат енергії у динамічних режимах призводить до зміни кута нахилу графіків енергоспоживання. У режимі частих пусків і зупинок

частка втрат, зумовлена перехідними процесами (ПП), є цілком співмірною із загальними енергетичними втратами системи.

Застосування регульованого частотного електропривода має низку вагомих переваг: керування частотою обертання ротора забезпечує високу плавність ходу кабіни, уможливорює м'який пуск і гальмування, а відсутність маховика дозволяє суттєво знизити сумарний момент інерції механічної системи.

Втрати потужності в двигуні в перехідних процесах і на «марші» складаються із втрат у міді, механічних втрат $P_{\text{МЕХ}} = 0,5P_{\text{Н}}$ і втрат у сталі $P_{\text{СТ}} = 390 \text{ Вт}$:

$$\Delta P = P_{\text{СИ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{СТ}} \quad (1.1)$$

Втрати енергії залежить від часу роботи ліфта:

$$\Delta W = \Delta P_{\text{ПП}} t_{\text{НН}} + \Delta P_{\text{МАР}} t_{\text{МАР}} \text{ (Дж)} \quad (1.2)$$

де $\Delta P_{\text{ПП}}$ – втрати потужності двигуна у перехідних процесах (Вт);

$t_{\text{НН}}$ – час перехідних процесів (с);

$\Delta P_{\text{МАР}}$ – втрати потужності в режимі, що встановився;

$t_{\text{МАР}}$ – час руху ліфта на марші.

На рисунку 1.7 наведено порівняльні залежності втрат енергії від тривалості роботи ліфта для різних умов функціонування електродвигуна ДАД: без урахування та з урахуванням втрат у перехідних процесах, а також за частотного регулювання зі скалярним і векторним керуванням.

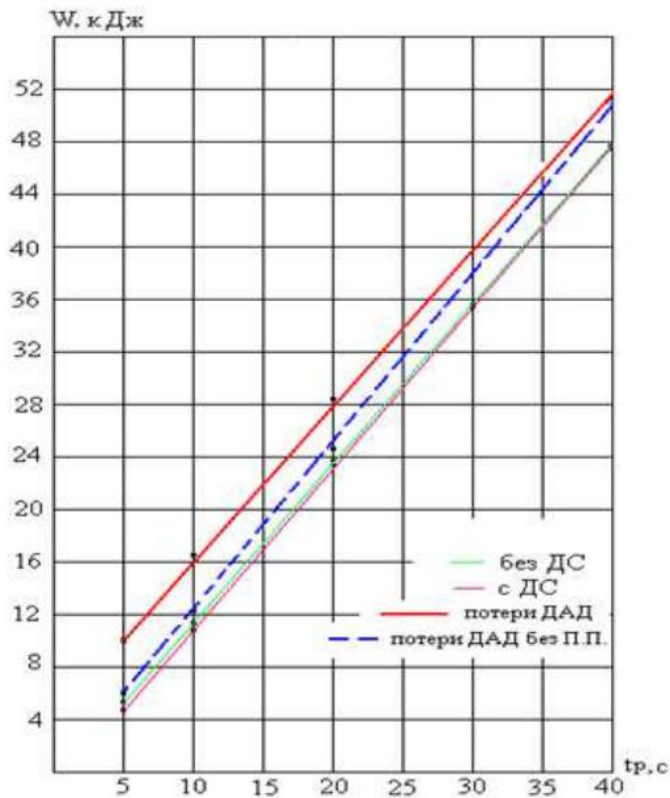


Рисунок 1.7 – Втрата енергії двигуна в залежності від часу руху кабіни.

Уривчаста залежність – втрати енергії у двошвидкісному двигуні без урахування втрат на перехідні процеси

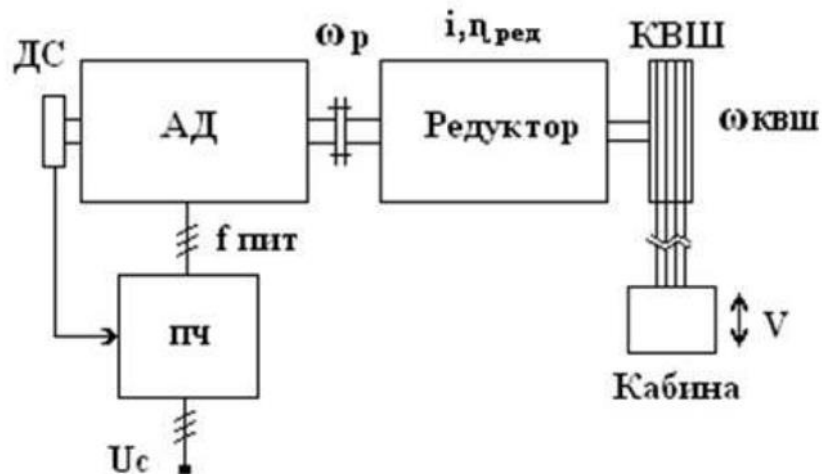


Рисунок 1.8 – Схема випробувального стенду ліфтової лебідки з векторним керуванням

Обсяг втрат в електродвигуні безпосередньо зумовлений тривалістю роботи привода: із продовженням руху в усталеному режимі питома вага втрат

у перехідних процесах закономірно знижується. При цьому ймовірна висота підйому ліфта становить:

$$H_B = (0,7/0,9)H \quad (1.4)$$

де H – висота підвісу ліфта. $H_B = 28 \div 36$ м.

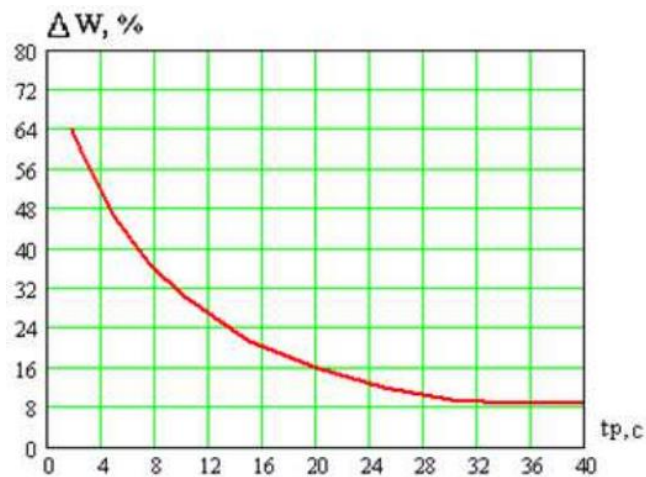


Рисунок 1.9 – Зниження втрат енергії при застосуванні частотно-регульованого приводу щодо двошвидкісного приводу ліфтів

Без урахування перехідних процесів, з висотою підвісу, що дорівнює H_B , порівняльні втрати енергії складають відповідно до рис. 10 від 10 до 8%, а за рис. 11 - від 1,2 до 1%.

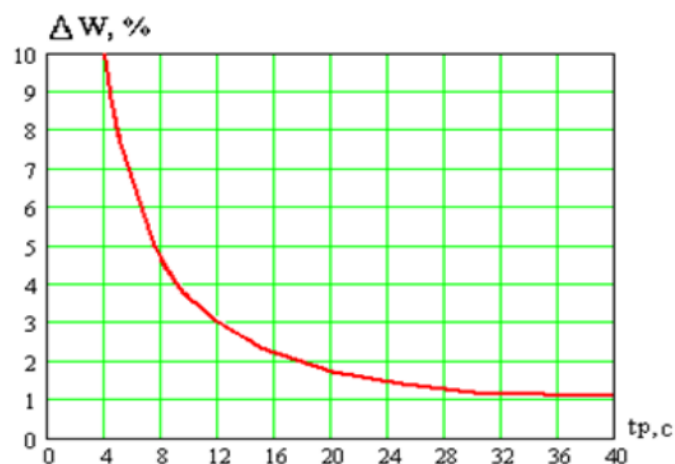


Рисунок 1.10 – Зниження втрат енергії при застосуванні частотно-регульованого приводу з векторним керуванням щодо приводу зі скалярним керуванням

Отже, аналіз енергетичних втрат із урахуванням динамічних режимів свідчить, що впровадження частотно-регульованого привода забезпечує зниження втрат енергії порівняно з двошвидкісним ліфтовим електроприводом на 8–10% на маршовій швидкості. Водночас із підвищенням питомої ваги перехідних процесів у загальній тривалості роботи привода рівень енергетичних втрат зростає до 60–70%.

Зіставлення різних алгоритмів регулювання показує, що застосування частотно-регульованого привода з векторним керуванням порівняно зі скалярним забезпечує додаткове зменшення втрат енергії на 1–1,2% на маршовій швидкості. Проте зі збільшенням частки перехідних процесів у сумарному часі роботи системи енергетичні втрати зростають понад 10%.

1.2 Шляхи вдосконалення електроприводу масових ліфтів

Для реалізації системи керованого гальмування як функції шляху, до складу електропривода мають входити пристрої, які визначають поточну гальмівну відстань і забезпечують функціональну залежність зміни швидкості кабіни ліфта від шляху, що залишився до зупинки.

Найбільш доступним способом визначення гальмівного шляху є використання сигналу про частоту обертання електродвигуна або вала відцентрового обмежувача швидкості (за допомогою тахогенератора чи імпульсного датчика) з його подальшою обробкою. Одна з перших подібних систем змінного струму, побудована на базі тиристорного регулятора напруги, зображена на рисунок 1.11.

Процес гальмування ініціюється під час наближення кабіни до датчика положення відповідного поверхового майданчика. За сигналом від цього датчика блок задавання гальмування починає формувати тахограму сповільнення, а корегування швидкості здійснюється у функції гальмівного шляху, що залишився до зупинки.

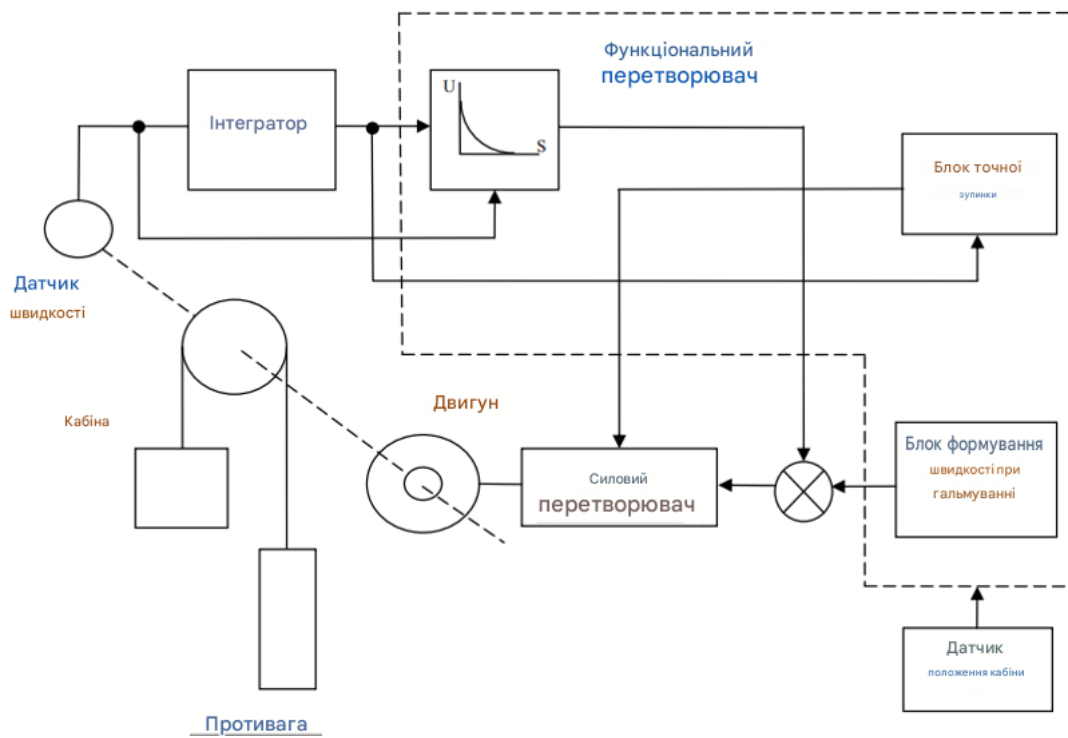


Рисунок 1.11 – Система керування приводу ліфта з інтегруванням сигналу датчика швидкості

Для цього на вхід інтегратора надходить сигнал від датчика швидкості (тахогенератора), а функціональний перетворювач у відповідному масштабі відтворює залежність між величиною гальмівного шляху та швидкістю кабіни.

Інший підхід до розв'язання задачі позиціонування з керуванням у функції шляху пов'язаний з обчисленням заданого значення швидкості безпосередньо в процесі гальмування кабіни залежно від відстані, що залишилася до зупинки [6].

Особливістю цього алгоритму є виокремлення кінцевої ділянки сповільнення, на якій можливе гальмування з постійним прискоренням i , відповідно, зниження швидкості до нуля. Функціональну схему ліфтового привода, що працює за цим алгоритмом, наведено на рисунок 1.12.

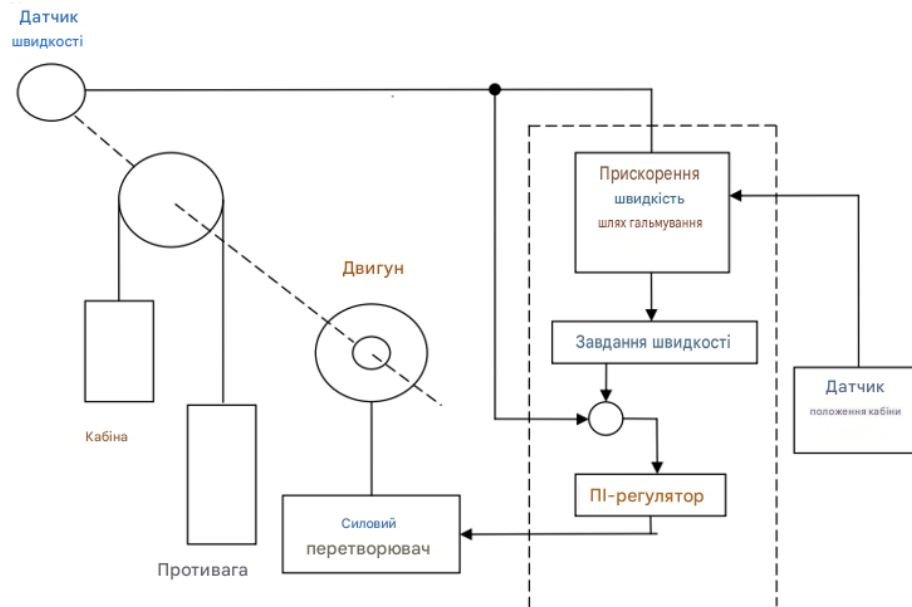


Рисунок 1.12 – Схема приводу ліфта з обчисленням сигналу завдання на швидкість при гальмуванні

Розрахунок швидкості кабіни ліфта на етапі сповільнення виконується таким чином. На основі залишкової відстані до точки зупинки (яка визначається шляхом інтегрування сигналу від датчика швидкості двигуна головного привода) обчислюється величина прискорення, необхідна для завершення маневру на гальмівному шляху, що залишився.

Якщо це значення перевищує гранично допустиму за умовами експлуатації ліфта величину, то сповільнення відбувається з максимально дозволеним прискоренням. Коли поточний залишок гальмівного шляху дозволяє знижувати швидкість із меншою інтенсивністю, запускається процедура корегування заданого значення швидкості. Цей процес триває до моменту визначення фінальної ділянки сповільнення, на якій за постійного розрахованого уповільнення швидкість кабіни зменшиться точно до нуля в точці зупинки.

У системах керування гальмуванням як функції шляху для обчислення пройденої відстані зазвичай використовують сигнал від датчика швидкості, встановленого на валу електродвигуна. Проте в такому разі під час визначення координати кабіни завжди присутня систематична похибка. Вона зумовлена

прослизанням тягових канатів на канатоведучому шківі (КВШ), а також недостатньою жорсткістю механічної підсистеми, що вимагає обов'язкового корегування за фактичним положенням кабіни в шахті.

У зв'язку з цим на ринку ліфтового обладнання активно розвивається інший підхід до вирішення задачі точного позиціонування. Він передбачає використання датчика положення, змонтованого безпосередньо на кабіні, який зчитує інформацію про поточну координату зі спеціальної інформаційної «напрямної» (стрічки), розташованої по всій висоті шахти.

Аналіз розглянутих підходів до реалізації керованого гальмування у функції пройденого шляху для швидкісних ліфтів (із швидкістю понад 2 м/с) свідчить, що всі базові компоненти, необхідні для цього алгоритму (дискретний датчик швидкості, обчислювальний блок та датчик положення кабіни), уже інтегровані в структуру сучасних частотно-регульованих приводів масового застосування.

Це зумовлює високу актуальність задачі впровадження точного позиціонування на етапі сповільнення. Таке рішення, попри певне ускладнення програмних алгоритмів, дозволяє суттєво розширити потенціал енергозбереження ліфтових систем при одночасному підвищенні їхньої продуктивності та комфортності перевезення пасажирів.

2 РЕЗЕРВУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИЛОВОГО ПРИВОДУ ЛІФТОВОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Методика резервування заміщенням електроживлення вантажопідйомних механізмів та ліфтів

Відомо, що в ліфтових установках та вантажних підйомниках можуть застосовуватися електроприводи на базі двигунів постійного струму [5, 6]. Проте останнім часом найбільшого поширення набули енергоефективні асинхронні електроприводи, зокрема системи, що реалізовані за принципом «тиристорний регулятор напруги – двошвидкісний асинхронний двигун».

У таких конфігураціях АБ інтегрується разом із інвертором і, окрім забезпечення резервного живлення, виконує функцію компенсатора реактивної потужності.

Водночас через значну ємність батареї виникає ризик перекомпенсації, що призводить до зростання реактивної складової струму та, як наслідок, до збільшення непродуктивних втрат електроенергії.

Додатковим недоліком застосування АБ для живлення асинхронного електроприводу є обов'язкова наявність інвертора, що знижує загальний ККД системи резервного електропостачання.

Це зумовлює актуальність розв'язання завдання щодо резервування живлення за допомогою накопичувачів меншої ємності, які мають високу швидкість розряду. Для збереження високої енергоефективності такі пристрої доцільно підключати безпосередньо до мережі змінного струму ліфтових механізмів, що дозволяє повністю виключити зі схеми проміжні інвертори

Одним із шляхів розв'язання поставленого завдання щодо короткочасного електропостачання та одночасної компенсації реактивної потужності силового електроприводу є застосування суперконденсатора (СК) як додаткового накопичувача енергії.

Ефект від комбінованого підключення АБ та СК розглянуто на прикладі системи резервного живлення ліфта вантажопідйомністю 630 кг, що оснащений асинхронним електроприводом із такими номінальними параметрами: потужність $P = 4,5$ кВт, напруга $U = 380$ В, струм $I = 12,3$ А. Приймавши ці значення за базові (тобто характерні для системи без урахування компенсації), визначимо початковий коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{3} UI} = \frac{4500}{\sqrt{3} * 380 * 12,3} = 0,56 \quad (2.1)$$

Очевидно, що отримане значення коефіцієнта потужності є значно нижчим за рекомендований ПУЕ показник, який має становити 0,95. Низький коефіцієнт потужності призводить до зростання втрат електроенергії в усіх струмопровідних елементах системи. Це зумовлює необхідність компенсації реактивної потужності шляхом паралельного підключення СК з метою підвищення коефіцієнта потужності до нормованого значення:

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi) \quad (2.2)$$

де ω – кругова частота;

φ – зсув фази після компенсації реактивної потужності відповідно.

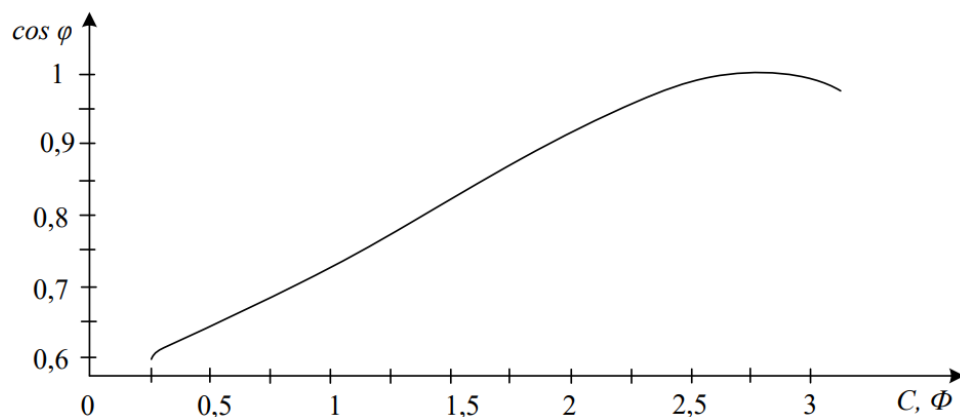


Рисунок 2.1 – Графік залежності коефіцієнта потужності від ємності СК

Коефіцієнт потужності після компенсації паралельним включенням СК змінюється нелінійно рисунок 2.1, досягаючи максимального значення при використанні СК ємністю 2,81 Ф.

Відомо, що ємність СК може перевищувати 3,5 Ф, чого цілком достатньо для досягнення максимального коефіцієнта потужності. Однак, оскільки гранична напруга окремих серійних елементів СК не перевищує 2,3–2,7 В, для забезпечення їхньої роботи за лінійної напруги 380 В необхідно об'єднувати кілька комірок у послідовні збірки (модулі). Це, у свою чергу, призводить до пропорційного зменшення загальної ємності системи.

Аналіз доступних ринкових пропозицій показав, що з номенклатури серійних суперконденсаторів для роботи під напругою 380 В доцільно використовувати набірні СК фірми «ТехноКор» типу 0,93/350-Б ємністю 0,93 Ф. Паралельне з'єднання двох таких компонентів дозволяє отримати елемент з еквівалентною ємністю 1,86 Ф.

Застосування СК зазначеної ємності забезпечує підвищення коефіцієнта потужності з початкового рівня 0,566 до 0,87 (див. рис. 1). Для оцінки можливості резервування електроживлення суто за допомогою суперконденсаторів (враховуючи, що номінальна потужність приводу ліфта залишається незмінною) визначимо пусковий струм, який виникає за умови компенсації паралельним увімкненням СК. Номінальне значення струму після підвищення коефіцієнта потужності становитиме:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{4.5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87} = 7,86 \text{ A} \quad (2.3)$$

Оскільки пусковий струм завжди перевищує номінальний, а для більшості асинхронних двигунів загальнопромислового призначення потужністю від 0,6 до 1000 кВт його початкове значення може бути більшим у 5,5–7 разів, цей фактор є критичним для розрахунку перехідних режимів.

Враховуючи зазначене співвідношення, а також те, що після компенсації реактивної потужності коефіцієнт потужності електроприводу ліфта становить $\cos\varphi = 0,86$, визначимо час розряду СК:

$$t = \frac{PC}{I^2} \quad (2.4)$$

Виходячи з цього отримаємо нелінійну залежність часу розряду конденсатора від пускового струму рисунок 2.2.

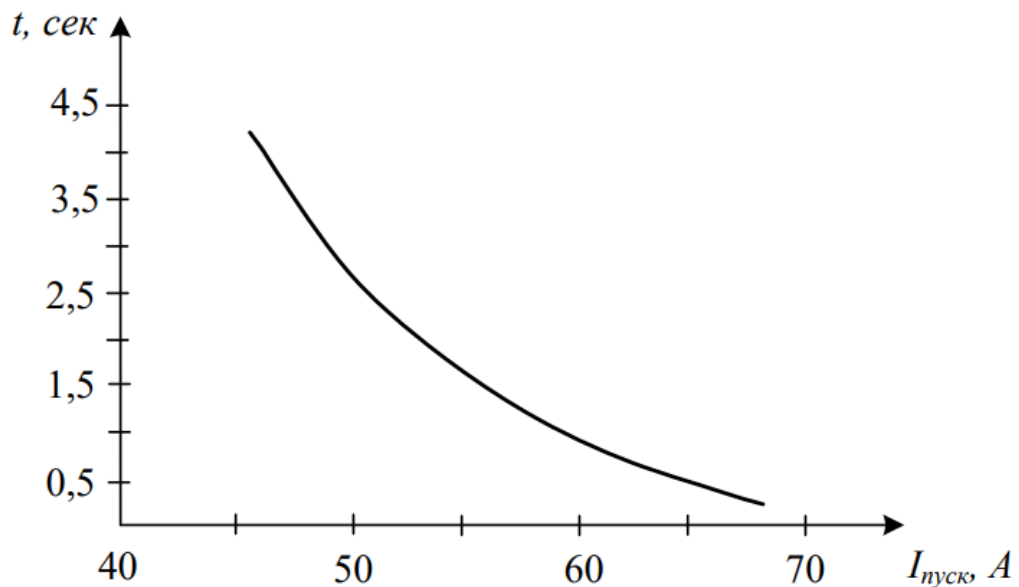


Рисунок 2.2 – Залежність часу розряду СК з його ємності

З отриманої графічної залежності (рис. 2.2) очевидно, що час розряду змінюється нелінійно в межах від 0,24 до 36 с. Варто зазначити, що діапазон номінальних швидкостей сучасних ліфтів масового використання становить від 0,18 до 4 м/с [7].

Висота міжповерхового простору в багатоповерхових спорудах залежить від конкретного проекту: зазвичай вона варіюється від 2,5 до 2,8 м для панельних будівель та сягає 3 м для цегляних.

Таким чином, за умови відсутності спеціальної автоматики, яка у разі аварійного вимкнення електропостачання визначає оптимальний напрямок руху кабіни до найближчого поверху, для розрахунків приймається

максимальний шлях евакуації завдовжки 3 м та мінімальна швидкість руху – 0,18 м/с.

З урахуванням зроблених припущень встановлено, що час, необхідний для гарантованого завершення робочого циклу ліфта, становить **17 с**. Це у п'ять і більше разів перевищує тривалість автономного електроживлення, яка забезпечується розрядом СК рисунок 2.2.

Таке співвідношення підтверджує неможливість забезпечення надійного резервування системи електропостачання за умови використання виключно суперконденсаторів.

Як було показано вище, АБ має низку суттєвих недоліків. У свою чергу, суперконденсатори, попри такі беззаперечні переваги, як високий ККД, здатність до швидкого розряду та можливість компенсації реактивної потужності, не здатні самостійно забезпечити тривале резервування силового електроприводу.

З огляду на це, доцільно інтегрувати СК у схему електропостачання ліфтового приводу для спільної роботи з акумулятором рисунок 2.3. Це дозволить ефективно покривати великі пускові струми безпосередньо за рахунок енергії суперконденсатора.

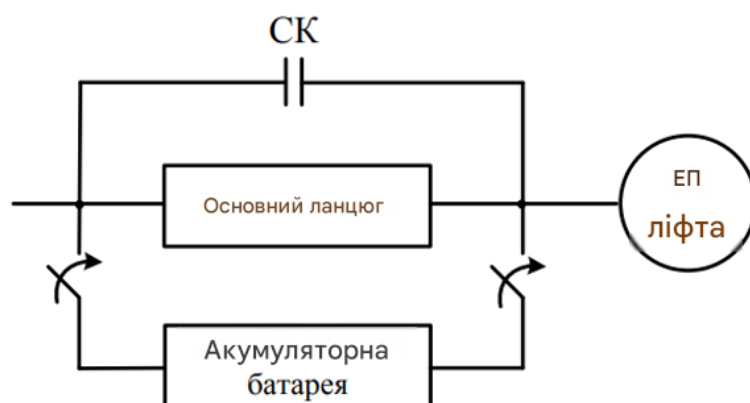


Рисунок 2.3 – Схема включення суперконденсатора у ланцюг резервного електропостачання електроприводу ліфта

Таким чином, за рахунок використання СК, здатного до швидкої віддачі енергії, має забезпечуватися полегшений пуск приводу в разі відмови основного кола живлення, тоді як акумуляторна батарея гарантуватиме триваліше автономне резервування.

Оцінимо, як зміниться ймовірність безвідмовної роботи системи після встановлення додаткового елемента, враховуючи комбінований характер резервування за допомогою АБ та СК. Розрахунок зміни показників надійності виконаємо відповідно до розробленого раніше алгоритму [8]. При цьому обов'язковою умовою успішного функціонування системи вважатимемо одночасну справність як АБ, так і СК:

$$p = p_{аб}p_{ск} \quad (2.5)$$

В іншому разі, за відмови СК, система функціонуватиме в умовах, аналогічних розглянутим у [2]. Тоді ймовірність працездатного стану не лише охоплює умову спільної роботи обох компонентів, а й допускає автономне функціонування одного з них за умови відмови іншого.

Проте слід враховувати, що в разі відмови АБ самої лише енергії конденсатора не вистачить для повного завершення аварійного режиму евакуації кабіни.

У перші секунди пуску приводу все навантаження сприймає СК, після чого відбувається перемикання на живлення від АБ. Таким чином, можна вважати, що здійснюється резервування заміщенням за умови ненавантаженого (холодного) резерву. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи АБ приймається в діапазоні від 0,8 до 0,95, а ймовірність справності всього кола резервування визначається відповідно до виразу:

$$p_{рц} = 1 - (1 - \prod_{i=1}^n p_i)^{m+1} \quad (2.6)$$

де $P_{рц}$ – ймовірність роботи резервуючого кола;

p_i – ймовірність роботи i -го елемента резервного ланцюга за умови заміщення послідовного ланцюжка з i елементів, $i=1$;

m – кратність резервування, $m = 1$.

З урахуванням прийнятих величин отримано такі результати: для $P_{раб} = 0,95$ ймовірність безвідмовної роботи кола резервування становить $P_{рц} = 0,9975$, а для $P_{раб} = 0,8$ – $P_{рц} = 0,96$. Очевидно, що після інтеграції СК ймовірність справної роботи резервного контуру істотно підвищується порівняно з вихідною схемою: на 5% та 20% відповідно.

Задавши значення інтенсивності відмов основного та резервного кіл, оцінимо ймовірність безвідмовної роботи системи за умови резервування заміщенням для випадку, коли інтенсивності відмов основного кола та резервного елемента є різними:

$$p_{заміщ} = e^{-\lambda t} + \frac{\lambda}{\lambda_{рц} - \lambda} (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda_{рц} t}) \quad (2.7)$$

де λ – інтенсивність відмов основного ланцюга електропостачання;

t – напрацювання на відмову;

$\lambda_{рц}$ – інтенсивність відмов резервуючого кола.

Припускаючи, що ймовірності відмови АБ та СК протягом їхнього терміну служби є зневажливо малими, і враховуючи, що середній термін служби СК становить близько 10 років, а АБ – приблизно 4,5 роки, на основі виразу (7) отримаємо, що загальна інтенсивність відмов кола резервування становить близько 10^{-4} год.

Однак слід зауважити, що інтервал безвідмовної роботи АБ та СК є істотно меншим за наведені вище терміни експлуатації й обмежується виключно часом розряду СК та АБ рисунок 2.4.

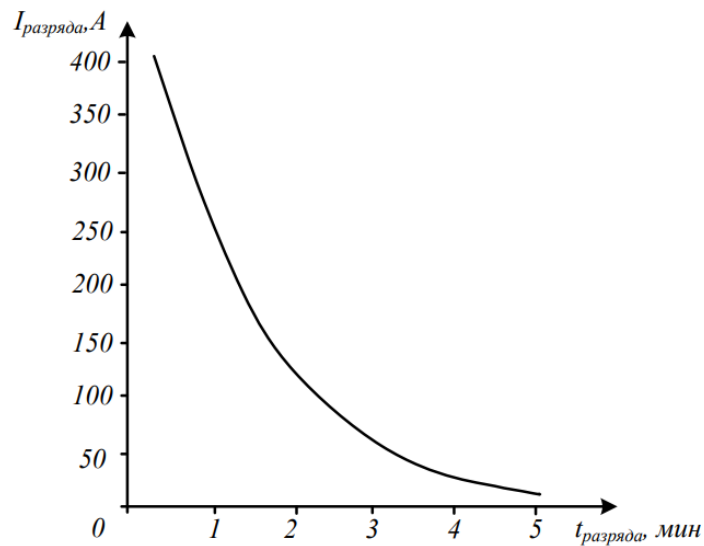


Рисунок 2.4 – Залежність тривалості розряду необслуговуваної АБ

З наведених графіків видно, що АБ здатна забезпечувати пусковий струм 50 А лише протягом 3 хв. Оскільки робоча напруга АБ становить 12 В і перетворюється зовнішнім інвертором із постійного струму в змінний частотою 50 Гц, напругою 380 В, то навіть без урахування втрат в інверторі відбувається значне зростання пускового струму на первинній стороні. Це, як наслідок, призводить до скорочення очікуваного 4-хвилинного інтервалу безвідмовної роботи.

Таким чином, під час розрахунку параметрів надійності основного кола електропостачання обраного типу ліфта з урахуванням його номінальних характеристик [1] було визначено, що за відсутності резервної батареї ймовірність відмови основного кола становить $P_{\text{воц}} = 2,10^{-5}$, ймовірність безвідмовної роботи – $P_{\text{роц}} = 0,999973$, а інтенсивність відмов дорівнює:

$$- \lambda_{\text{оц}} = 0,01 \text{ рік}^{-1}. \quad (2.8)$$

Водночас напрацювання на відмову суперконденсатора обмежується тривалістю його розряду. Як було показано вище, час забезпечення електропостачання від аварійного джерела живлення становить 17 с.

За допомогою виразу оцінимо зміну ймовірності відмови системи електропостачання ліфта відносно базової величини за умови використання резервного джерела для різних значень тривалості збоїв в основній мережі рисунок 2.5.

Отримані розрахункові дані зіставимо з результатами для схеми без використання СК, а також із показниками надійності, що були визначені у джерелі [5].

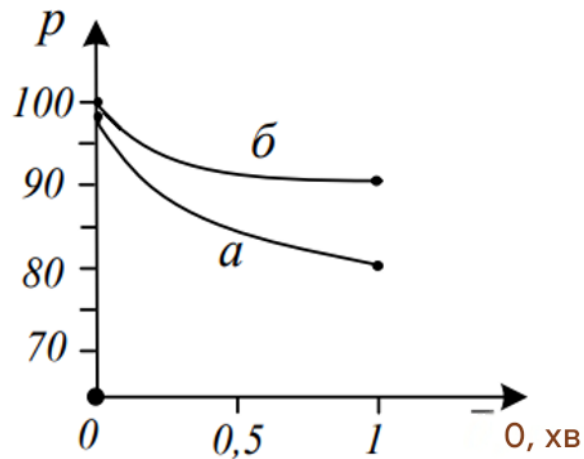


Рисунок 2.5 – Імовірність забезпечення необхідного рівня безвідмовності функціонування системи ліфта за різної тривалості перерви основного електропостачання: а – без використання СК; б – при одночасному використанні АБ та СК (розроблено авторами)

Зростання ймовірності безвідмовної роботи (приблизно на 10%) пояснюється тим, що СК знімає пікове навантаження з АБ під час пуску двигуна – саме в момент максимального кидка струму та найбільшого споживання енергії. Подальше живлення аварійного кола здійснюється вже за рахунок енергії, накопиченої в акумуляторі.

Застосування суперконденсатора в системі резервного живлення ліфтового електроприводу є доцільним лише за умови його спільної роботи з АБ. Оскільки на короткому інтервалі часу (0,5 хв) це забезпечує підвищення ймовірності безвідмовного функціонування електроживлення з 85% (без використання СК) до 95% (у комбінованій схемі). СК мінімізує розряд

аккумулятора під час старту двигуна, значно полегшуючи умови його експлуатації.

Однак використання СК як самостійного елемента є недоцільним, оскільки його повний розряд відбувається всього за 3,6 с. Цього інтервалу часу недостатньо для безпечного завершення аварійного доведення кабіни ліфта до найближчого поверху та подальшої висадки пасажирів.

2.2 Дослідження відмов пасажирських ліфтів

На рисунку 2.6 зображено основні конструктивні елементи пасажирського ліфта. Транспортування пасажирів здійснюється в кабіні, яка переміщується по вертикальних напрямних. Рух кабіни забезпечується за допомогою системи тягових канатів від лебідки, встановленої в машинному приміщенні.

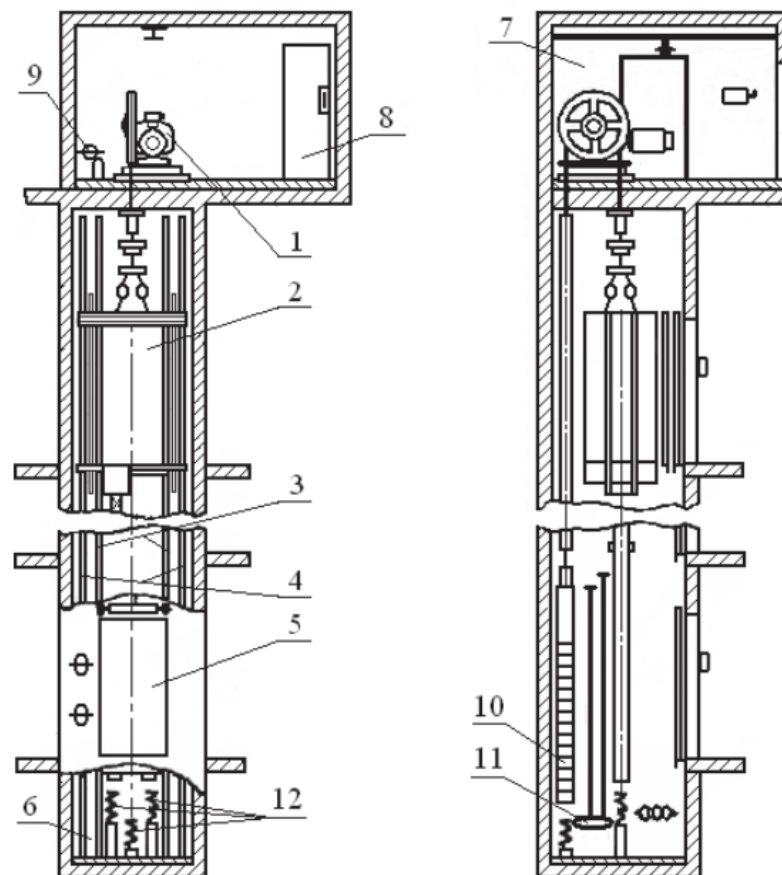


Рисунок 2.6 – Загальний вид пасажирського ліфта: 1 – лебідка; 2 – кабіна; 3 – напрямні противаги; 4 – напрямні кабіни; 5 – двері шахти; 6 – пряминок; 7 –

машинне приміщення; 8 – станція управління; 9 – обмежувач швидкості; 10 - противага; 11 - натяжний пристрій каната обмежувача швидкості; 12 – буфери кабіни та противага

Для входу та виходу пасажирів шахта ліфта на рівнях поверхових зупинок обладнана прорізами, які зачиняються дверима шахти. Усередині шахти також розміщено противагу, а допоміжне обладнання зосереджено в її нижній частині (прямку), безпосередньо на кабіні та в машинному приміщенні.

Як видно з наведеного загального вигляду пасажирського ліфта, його конструкція містить значну кількість взаємопов'язаних компонентів, покликаних гарантувати надійну та безпечну експлуатацію.

З метою визначення перспективних напрямів удосконалення ліфтової системи застосовано системний аналіз, який дозволяє побудувати її структурну модель. Одним із ключових завдань цього підходу є формування повного переліку елементів на кожному ієрархічному рівні, а також встановлення функціональних зв'язків і підпорядкованості між ними.

У межах системного аналізу ліфт представлено як структуру з такими ознаками: задані внутрішні зв'язки, умовна неподільність компонентів та взаємодія із зовнішнім середовищем як єдиного цілого.

Надійність ліфта критично залежить від роботи лебідки, де застосовуються двошвидкісні асинхронні двигуни. Хоча частка їхніх відмов становить лише 10%, вони зумовлюють найтриваліші простоя техніки та потребують найбільших фінансових витрат на ліквідацію наслідків.

Дослідження тривалості простоїв свідчить, що ремонт гальмівного механізму, редуктора, комутаційної апаратури та канатоведучого шківів триває в середньому втричі менше, ніж повне відновлення працездатності електродвигуна.

Найважливішими заходами, спрямованими на зниження параметру потоку відмов і підвищення довговічності асинхронних двигунів (і, як

наслідок, пасажирських ліфтів загалом), є неухильне дотримання регламенту технічної експлуатації. До них належать регулярне профілактичне обслуговування, планово-запобіжний ремонт, а також систематичний контроль зносу конструктивних деталей.

3 ВИБІР АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ РЕЗЕРВУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ПРИВОДУ ЛІФТА ЗА ОДНОМОДУЛЬНОЮ СХЕМОЮ

3.1 Розрахунок ефективності використання акумуляторних батарей як резервного джерела живлення електроприводу ліфта

Застосування акумуляторних батарей (АБ) як резервного джерела дозволяє підтримувати працездатність ліфтового електроприводу в разі виникнення аварійних ситуацій в основній системі електропостачання.

Під час аналізу ефективності таких рішень береться до уваги той факт, що акумуляторна батарея не здатна миттєво відновлювати свою номінальну ємність. Показано, що ємність АБ доцільно обирати з умови, щоб максимальний струм навантаження не перевищував значення розрядного струму $2C$.

Апробацію запропонованої методики виконано шляхом моделювання системи резервного живлення пасажирського ліфта вантажопідйомністю 630 кг із тяговим електроприводом потужністю 4,5 кВт. При цьому було враховано динаміку відновлення ємності акумуляторних батарей, що входять до складу аварійного джерела живлення.

Для розглянутого прикладу доведено, що акумуляторна батарея, яка складається з чотирьох окремих елементів ємністю 55 А·год кожен, за заданих характеристик ліфтового електрообладнання не здатна підтримувати його тривалу автономну роботу (до 24 годин). Відтак, таке резервування електроживлення є доцільним виключно для забезпечення можливості аварійного доведення кабіни до найближчого поверху.

Крім того, на основі аналізу напрацювання на відмову, виконаного з урахуванням ризику відмови бодай одного з паралельно з'єднаних акумуляторів у батареї, доведено, що надмірне нарощування ємності шляхом

їхнього паралельного включення призводить до зниження часу спільної безвідмовної роботи до рівня менш ніж 1,4 місяця.

Водночас зменшення сумарної ємності акумуляторів, що працюють спільно, супроводжується зростанням відносного пускового струму (кратності розрядного струму), що критично скорочує кількість циклів «заряд-розряд».

Як відомо, забезпечення безвідмовності функціонування енергетичних установок і комплексів електрообладнання є першорядним завданням як під час розгортання високотехнологічного виробництва, так і в процесі забезпечення життєдіяльності населення [9].

Відмова обладнання на промисловому підприємстві може призвести до виходу з ладу суміжних елементів технологічного ланцюга і, як наслідок, спричинити значні економічні збитки [8]. Водночас цивільний сектор електроенергетики також потребує підвищеної уваги щодо забезпечення надійності та безперебійності електроживлення споживачів, яскравим прикладом чого є системи життєзабезпечення та ліфтове обладнання висотних будівель.

Згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), ліфти належать до споживачів електроенергії I категорії надійності. Відповідно, перерва в їхньому електропостачанні від одного з двох передбачених взаєморезервованих джерел допускається лише на час автоматичного відновлення живлення [7].

Проте інженерна практика свідчить, що ця нормативна вимога часто порушується. Це призводить до аварійних зупинок ліфтів, зокрема до випадків блокування пасажирів у кабіні в момент вимкнення енергопостачання.

Результати попередніх досліджень [4–6] довели можливість ефективного резервування живлення ліфтового електроприводу за одномодульною схемою з подвійним перетворенням напруги, де як резервне джерело використовується акумуляторна батарея (АБ).

За такої топології підключення АБ забезпечує евакуаційне доведення кабіни до найближчого поверху для безпечної висадки пасажирів, що підвищує

ймовірність безвідмовного функціонування електроприводу ліфта орієнтовно на 10%.

Водночас при оцінюванні тривалості резервування, яку можна забезпечити шляхом підключення АБ до електроприводу, необхідно також враховувати час відновлення системи, адже акумуляторна батарея не здатна поновлювати свій заряд миттєво.

Тривалість цього процесу безпосередньо залежить від глибини розряду акумулятора. З одного боку, що більша ємність АБ, то меншою є глибина її розряду під час аварійного циклу, і, відповідно, менше часу потрібно для повернення її параметрів до номінальних значень.

З іншого боку, збільшення ємності акумулятора призводить до тривалішого процесу його заряджання у разі глибокого розряду, що сумарно збільшує час відновлення готовності системи. Це зумовлює актуальність розв'язання задачі визначення раціональної ємності АБ. Одним із шляхів її вирішення є оцінювання надійності резервування електроживлення з обов'язковим урахуванням інтервалу відновлення АБ до номінальної ємності.

3.2 Технічні вимоги та методи випробування акумуляторних батарей

Відповідно до технічних вимог та методів випробувань, окремий акумуляторний елемент повинен витримувати розряд струмом короткочасного режиму до кінцевої напруги 1,5 В. Для досліджуваної АБ, що складається з 6 послідовно з'єднаних елементів, цей поріг становить 9,0 В. Водночас, згідно з чинним стандартом із якості електроенергії «Електрична енергія.

Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», в електричних мережах низької напруги за нормальних робочих умов поодинокі швидкі зміни напруги не повинні перевищувати 5% від її номінального значення.

Викликані ці вимоги тим, що при зниженні напруги нижче зазначеного рівня, момент двигуна, що крутить, приводу різко падає і двигун може зупинитися, що рівносильно роботі в аварійному режимі короткого замикання, і може призвести до виходу двигуна з ладу.

Тому, враховуючи, що інвертор, який перетворює постійну напругу АБ на змінну, змінює її вихідне значення пропорційно до напруги на клеммах батареї, та приймаючи номінальну напругу АБ рівною 12 В, отримуємо мінімальну напругу розряду на рівні 11,4 В.

Цей поріг обмежує корисний час роботи АБ як джерела живлення. Таким чином, під час визначення тривалості роботи акумулятора в режимі резервування силового електроприводу ліфта слід вважати, що час його розряду обмежений досягненням кінцевого значення напруги 11,4 В. Типове сімейство розрядних характеристик (залежність напруги від часу для різних значень струму розряду АБ) наведено на рисунок 3.1

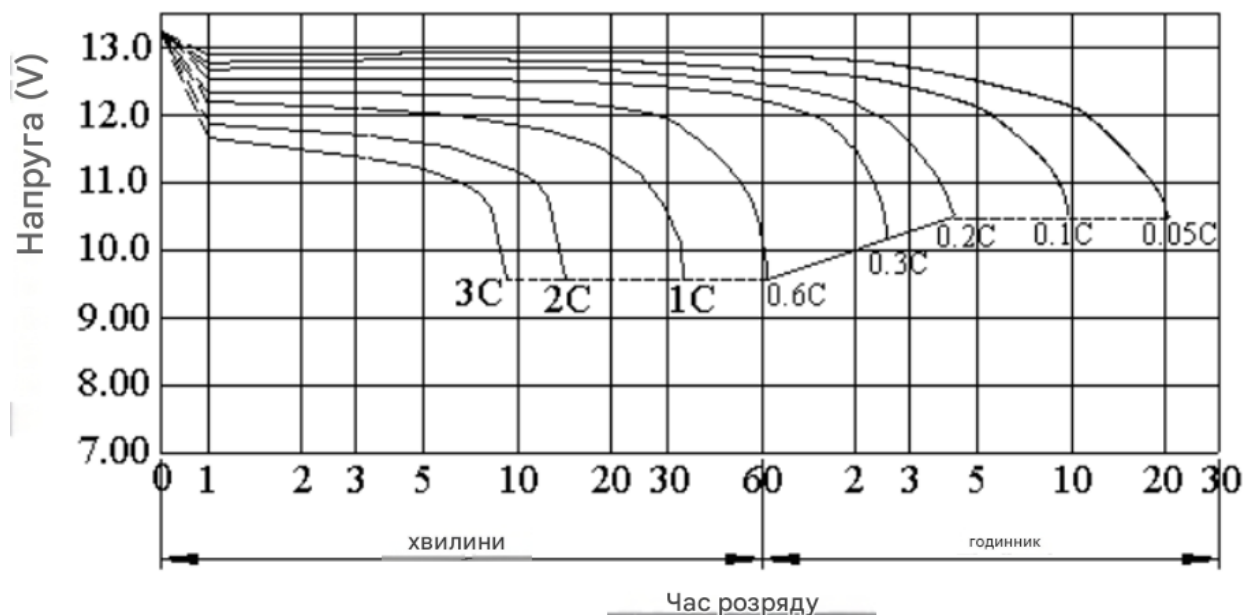


Рисунок 3.1 – Розрядні характеристики акумуляторних батарей

Прийmemo тривалість роботи електроприводу від аварійного джерела живлення на базі АБ рівною до 1 хв. Очевидно, що в зазначеному часовому проміжку кінцева напруга розряду 11,4 В досягається за умови розряджання

батареї в усьому заданому діапазоні струмів – від $0,05C$ до $3C$ (де C – номінальна ємність АБ, виражена в $A \cdot год$).

Відомо, що віддана ємність акумуляторів залежить від величини кінцевої напруги розряду. При падінні напруги до $11,4 В$ залишкова ємність свинцево-кислих тягових АБ від більшості виробників не перевищує $10\text{--}15\%$, що є характерним для режиму глибокого розряду. Оскільки ємність АБ можна повноцінно відновити лише до 80% від номінальної після $2\text{--}3$ таких глибоких розрядів, для розв'язання задачі забезпечення багаторазового резервування живлення ліфтового електроприводу вбачається доцільним обмежити зниження ємності батареї рівнем не більше ніж 60% від її початкового заряду

рисунок 3.2.

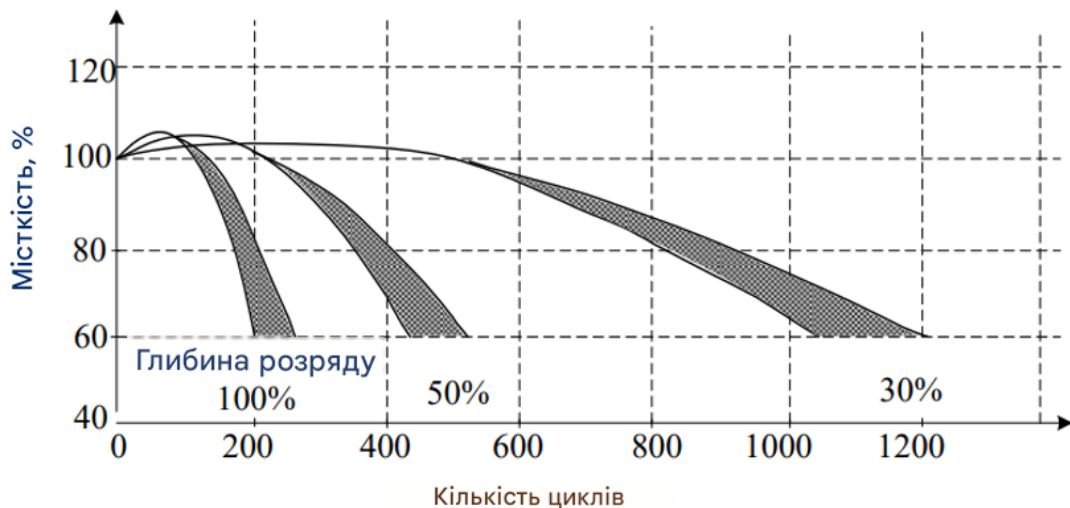


Рисунок 3.2 – Залежність кількості циклів заряджання розрядки від глибини розряду

Таким чином, для забезпечення циклічного ресурсу АБ на рівні не менше ніж 500 циклів, у розрахунках прийнято допустимим зниження рівноважної напруги розімкненого кола на клеммах батареї до $11,9 В$, що відповідає розрядному струму силою не більше ніж $2C$ рисунок 3.2.

Для визначення часу відновлення системи резервного електроживлення оцінено тривалість процесу заряджання АБ залежно від глибини її розряду. Експериментальні дослідження проводилися на базі дослідного зразка – стартерної акумуляторної батареї VAIPER типу 6СТ-55 (номінальна ємність 55

А·год, пусковий струм 420 А), яка розряджалася постійним струмом 0,1С на активне (омічне) навантаження.

Зменшення ємності батареї контролювалося шляхом вимірювання рівноважної напруги розімкненого кола (НРК) на клеммах АБ за температури 20 °С. При цьому напруга 12,7 В відповідала 100% номінальної ємності; 12,55 В – 75%; 12,20 В – 50%; 11,95 В – 25% відповідно.

Застосовані під час вимірювань прилади та апаратура для реєстрації температури, напруги й розрядного струму повністю відповідають вимогам чинних стандартів ГОСТ.

Заряджання АБ здійснювалося за постійної напруги 14,0 В із пульсаціями, що не перевищували 2,5% від номінального значення, за допомогою зарядного пристрою типу ЗУ-120М-3, призначеного для акумуляторних батарей ємністю від 50 до 120 А·год. Результати експериментальних досліджень наведено на рисунку 3.3.

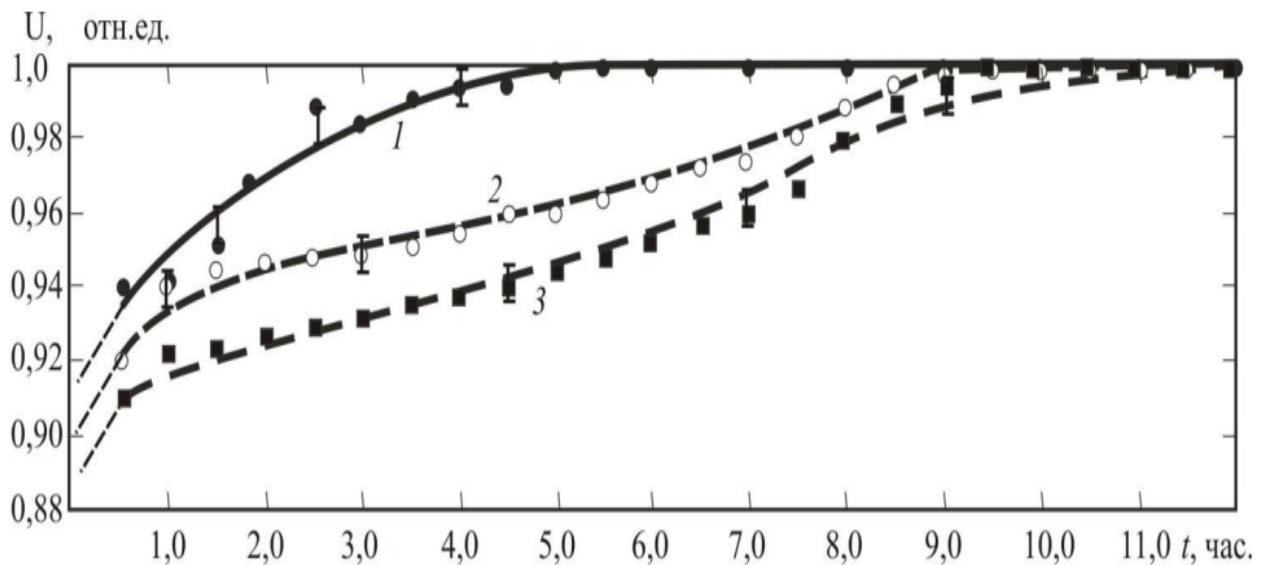


Рисунок 3.3 – Криві заряди акумулятора за різного ступеня розряду: 1 – АБ розряджений до 75% від номінальної ємності; 2 - АБ розряджений до 70% від номінальної ємності; 3 - АБ розряджений до 60% від номінальної ємності

Як видно з отриманих даних, зі збільшенням глибини розряду (що відповідає зниженню залишкової ємності з 75% до 60%), час відновлення

системи, під яким мається на увазі тривалість повного циклу заряджання, зростає з 5,5 до 12 годин.

За умови, що функція розподілу часу відновлення підпорядковується усічено-нормальному закону, було побудовано графік (рис. 4), представлений у відносних одиницях. При цьому ймовірність відмови системи аналітично визначається виразом [9]:

$$\bar{p} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\theta} e^{-(\theta-\gamma)^2/(2\sigma^2)} d\theta \quad (3.1)$$

де: σ – середньоквадратичне відхилення, $\sigma=0,1$;

γ – математичне очікування часу відновлення, $\gamma=0,3$;

θ – час відновлення.

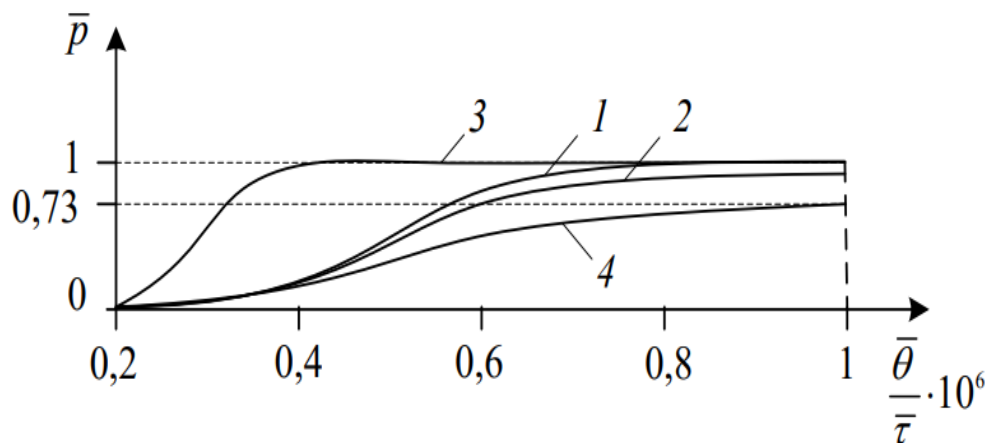


Рисунок 3.4 – Зміна ймовірності відмови електропостачання при усічено-нормальному розподілі часу відновлення ($\sigma = 0,1$; $\gamma = 0,3$): 1 – система без використання резерву; 2 – з використанням АБ; 3 – з використанням суперконденсатора (СК); 4 – спільне використання СК та АБ

Урахувавши отримані експериментальним шляхом значення часу відновлення АБ для різних рівнів її розряджання, було побудовано залежність ймовірності безвідмовної роботи у відносних одиницях. Ці величини виражено через середнє напрацювання на відмову та тривалість відновлення заряду батареї рисунок 3.5.

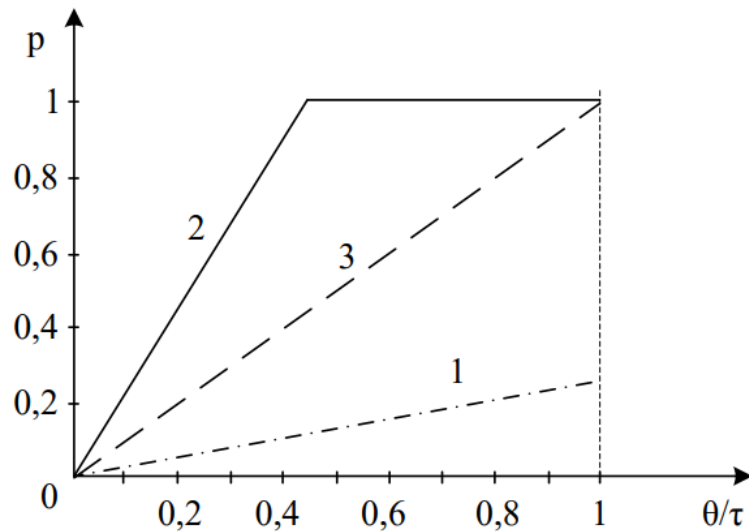


Рисунок 3.5 – Залежність ймовірності роботи АБ для усічено-нормального закону розподілу величин: 1 – при $\theta=5$ год., $\tau=0,5$ год. (75% заряду); 2 – за $\theta=12$ год., $\tau=1,5$ год. (70% заряду); 3 – при $\theta=9,5$ год., $\tau=1$ год. (63% заряду)

Згідно з аналізом, ліміт розрядного струму АБ становить $2C$. Для приводу потужністю 4500 Вт струм розряду (без урахування ККД інвертора) дорівнює $4500 \text{ Вт} / 12 \text{ В} = 375 \text{ А}$. За умови $2C = 375 \text{ А}$ розрахункова ємність накопичувача має становити $C = 187,5 \text{ Агод}$. Оскільки номінал однієї батареї складає 55 А год, для побудови системи потрібно задіяти чотири паралельно з'єднані блоки.

Розрахуємо зміну показників надійності загальної АБ, що сформована з кількох паралельних гілок (парціальних елементів). Критерієм відмови системи приймемо вихід з ладу щонайменше одного акумулятора:

$$\lambda = n_{\text{АБ}}\lambda_{\text{АБ}} + n_c\lambda_c \quad (3.2)$$

де: $n_{\text{АБ}}$ – число АБ;

$\lambda_{\text{АБ}}$ – інтенсивність відмов АБ;

n_c – кількість з'єднань;

λ_c – інтенсивність відмов з'єднань.

Відповідно до відомих рекомендацій [9] приймаємо, що $\lambda_{AB} = \lambda_c$, а $n_c = 2,25n_{AB}$. Тоді

$$\lambda = 3,25n_{AB}\lambda_{AB} \quad (3.3)$$

Приймаємо відповідно до рекомендацій ГОСТу за час напрацювання на відмову парціального АБ $T_{AB}=18$ мес. Вважаючи, що $\lambda_{AB}=1/T_{AB}$ і відповідно $\lambda=1/T$ отримуємо, що час напрацювання на відмову батареї акумуляторів, що складається з декількох АБ:

$$T = \frac{T_{AB}}{3,25n_{AB}} \quad (3.4)$$

Аналіз результатів показує, що зі збільшенням кількості паралельно з'єднаних акумуляторів напрацювання на відмову системи, яке лімітується умовою виходу з ладу бодай одного елемента, лінійно знижується. Зокрема, для структури з 4 паралельних гілок цей показник зменшується з 18 до 14 місяців.

Установлення АБ як аварійного джерела в систему електропостачання ліфтового обладнання дозволяє гарантувати працездатність та автономність підйомного комплексу в аварійних режимах мережі.

Доведено, що номінальну ємність батареї доцільно обирати з розрахунку, щоб максимально допустимий струм її розрядження не перевищував значення $2C$.

На прикладі системи аварійного резервування електроживлення ліфта вантажопідйомністю 630 кг із приводом потужністю 4,5 кВт показано, що автономна робота може забезпечуватися збіркою з чотирьох свинцево-кислих АБ ємністю 55 А·год кожна.

Зменшення кількості паралельно з'єднаних акумуляторів призводить до зростання розрядного струму кожної складової АБ, через що різко скорочується її циклічний ресурс (кількість циклів зарядження-розрядження). Це унеможливорює надійне багаторазове застосування системи резервування за

простою однолінійною схемою. Водночас надмірне збільшення кількості паралельних гілок із метою нарощування сумарної ємності акумуляторної батареї супроводжується пропорційним зниженням її напрацювання на відмову.

Оскільки напрацювання на відмову акумуляторної батареї лімітується умовою виходу з ладу бодай одного елемента, цей показник лінійно знижується і для конфігурації з 4 елементів скорочується до 1,4 місяця. Це доводить недоцільність подальшого нарощування сумарної ємності системи живлення за рахунок збільшення кількості паралельно підключених складових (парціальних) АБ.

Зіставлення отриманих значень тривалості автономної роботи показує, що за заданих параметрів ліфтового електрообладнання акумуляторна батарея не здатна підтримувати його функціонування протягом тривалого періоду (до 24 год).

Розрахункова ємність акумулятора лінійно залежить від тривалості його роботи; зокрема, для забезпечення необхідного часу автономності $t_{\text{необх}} = 16$ хв потрібна батарея ємністю 100 А·год.

Слід зауважити, що наведена залежність є справедливою для усталеного (тривалого) режиму роботи, який для більшості свинцево-кислотних акумуляторів визначається часовим інтервалом розрядження не менше ніж 8–10 годин. Натомість у разі функціонування в короткочасному режимі великої потужності ефективна ємність акумуляторної батареї нелінійно зменшується (рис. 3.6).

Однак при її застосуванні для резервного електроживлення з метою забезпечення безаварійної висадки пасажирів шляхом доведення ліфтової кабіни до найближчого поверху її використання стає доцільним.

Дійсно, обмежуючи час гарантованої роботи електроприводу ліфта інтервалом 4 хвилини видно (див. табл.), що як резервне живлення може бути використаний акумулятор ємністю 55 А·год.

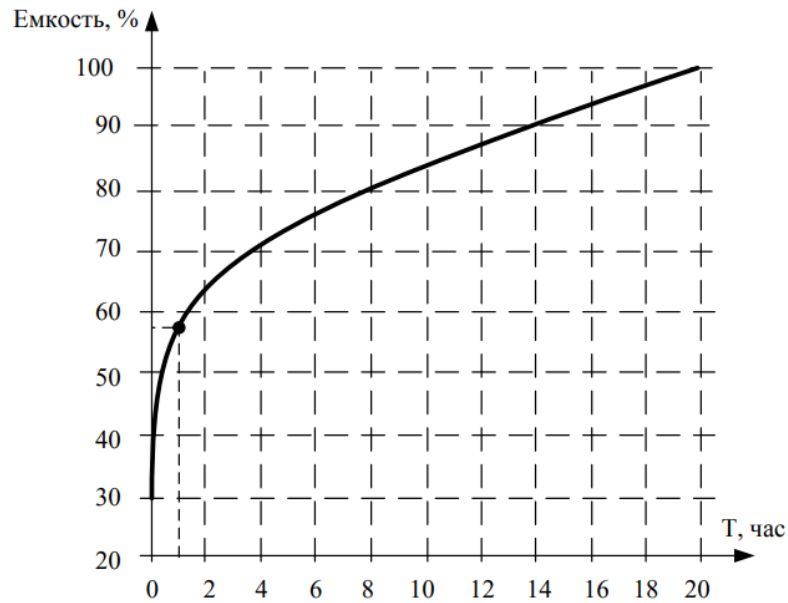


Рисунок 3.6 – Залежність ємності, що віддається акумулятором, залежно від часу розряд

Застосування з цією метою акумуляторів більшої ємності дозволить забезпечити живлення протягом більш тривалого періоду часу, але при цьому відбувається глибший розряд батареї, що знижує термін її експлуатації, а також значно збільшуються економічні витрати на придбання батарей великої ємності та їх обслуговування.

Згідно з проведеним аналізом можна зробити такі висновки:

1. встановлення акумуляторної батареї як резервне джерело живлення системи електропостачання ліфтового електроустаткування дозволяє забезпечити працездатність ліфта в аварійному режимі;
2. використання батареї, що має ємність, розрахованої виходячи з номінальних параметрів ліфта, прийнятно на короткочасний інтервал часу;
3. Тривалість можливості живлення обладнання від резервної батареї залежить як від параметрів самого джерела, і від параметрів мережі та електрообладнання, до якого батарея підключається.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

Експлуатація ліфтового електрообладнання є відповідальним та потенційно небезпечним видом виробничої діяльності, оскільки ліфти та підйомні механізми широко використовуються як у житлових, так і в промислових об'єктах для переміщення вантажів та людей [10].

Електрична частина ліфта включає силові двигуни, пускозахисну апаратуру, ланцюги керування, пристрої безпеки та сигналізації, що працюють під напругою до 380 В змінного струму.

Недотримання правил технічної експлуатації, несправності ізоляції, порушення режимів роботи або необачні дії обслуговуючого персоналу можуть спричинити електротравми, механічні ушкодження, пожежі та інші тяжкі наслідки.

Тому розділ охорони праці є обов'язковою складовою проектної та експлуатаційної документації, метою якої є системне виявлення шкідливих і небезпечних факторів, оцінка ризиків та розробка комплексу організаційно-технічних заходів, що гарантують безпечні умови праці для електромеханіків, слюсарів, диспетчерів та інших працівників, які взаємодіють з ліфтовим обладнанням.

4.2 Аналіз нормативно-правової бази з охорони праці при експлуатації електрообладнання ліфтів

Правове регулювання безпечної експлуатації ліфтів та їх електрообладнання в Україні базується на системі законодавчих актів, підзаконних нормативних документів, державних стандартів та галузевих правил. Основним законом є Закон України «Про охорону праці», який

визначає відповідальність роботодавця за створення безпечних умов праці та обов'язки працівників дотримуватися вимог безпеки [10].

Безпосередньо до ліфтового господарства застосовуються «Правила будови та безпечної експлуатації ліфтів», затверджені наказом Держгірпромнагляду України, які встановлюють технічні вимоги до конструкцій, електроустаткування, систем управління, захисних та блокувальних пристроїв, а також регламентують порядок проведення технічних оглядів, випробувань та ремонтів. Ці правила тісно пов'язані з «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів» (ПТЕЕС) та «Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (ПБЕЕС), які детально описують вимоги до захисного заземлення, ізоляції, комутаційної апаратури, а також періодичність вимірювань опору ізоляції, струмів витоку та перевірки спрацювання захисних автоматів.

Важливим міжнародним документом є ДСТУ EN 81-1:2003 «Правила безпеки щодо конструкції та монтажу ліфтів», гармонізований з європейськими нормами, який містить сучасні вимоги до електричних пристроїв безпеки, зокрема до кінцевих вимикачів, обмежувачів швидкості, ловителів та буферів.

Згідно з цим стандартом, усі електричні кола безпеки мають бути виконані за схемою з контрольованим замиканням, а будь-яке порушення електричного контакту має призводити до зупинки ліфта.

Окрему групу нормативів складають правила пожежної безпеки – НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», які вимагають оснащення машинних відділень ліфтів порошковими або вуглекислотними вогнегасниками, автоматичними сповіщувачами диму та аварійним освітленням, а також передбачають заборону на зберігання горючих речовин безпосередньо біля електрошаф. Наказ Міністерства соціальної політики «Про затвердження

Переліку робіт з підвищеною небезпекою» відносить обслуговування ліфтів до категорії небезпечних, що вимагає проведення попередніх та

періодичних медичних оглядів (щорічно) працівників відповідних професій, а також спеціального навчання, стажування та перевірки знань з охорони праці не рідше одного разу на рік.

Крім того, кожне підприємство, що експлуатує ліфти, повинно розробляти та затверджувати локальні інструкції з охорони праці для електромеханіків, операторів та чергового персоналу, з урахуванням конкретних умов роботи, типу ліфтів та наявних засобів захисту.

Узагальнюючи, можна зазначити, що нормативна база є доволі розгалуженою та технічно обґрунтованою, проте ефективність її застосування значною мірою залежить від рівня кваліфікації персоналу, наявності оперативного контролю та своєчасного оновлення документації, тому подальші заходи мають спрямовуватись на практичну реалізацію цих вимог через систему інструктажів, тренувань та інструментальних перевірок.

4.3 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації електрообладнання ліфтів

У процесі експлуатації, технічного обслуговування та ремонту електрообладнання ліфтів працівники зазнають впливу різноманітних шкідливих та небезпечних факторів, які за походженням поділяються на фізичні, хімічні, психофізіологічні та біологічні.

Найбільшу загрозу становить електричний струм, оскільки силове обладнання живиться напругою 380 В, а ланцюги керування та сигналізації – 220 В; дотик до струмопровідних частин за пошкодженої ізоляції або відсутності захисного заземлення може спричинити фібриляцію серця, опіки, параліч дихання, а за величиною струму понад 100 мА – летальний наслідок.

Механічні небезпеки пов'язані з рухомими елементами: канатоведучим шківом, редуктором, гальмівними колодками, противагою та самою кабіною ліфта – можливі защемлення кінцівок, падіння в шахту, удари об конструкції або падіння вантажу під час завантаження.

Шум та вібрація, джерелами яких є електродвигун, редуктор, контактори та пускові резистори, при рівні звуку понад 85 дБ знижують гостроту слуху, підвищують стомлюваність та зменшують концентрацію уваги, що побічно сприяє виникненню помилок.

Мікроклімат машинних відділень часто є незадовільним: через недостатню вентиляцію влітку температура може перевищувати $+30^{\circ}\text{C}$, що викликає перегрів організму, а взимку відсутність опалення призводить до переохолодження, особливо під час тривалих ремонтів у шахті. Освітлення робочих зон часто не відповідає гігієнічним нормам (особливо в приямку та на верхніх майданчиках), що ускладнює візуальний контроль і підвищує ризик травм.

Хімічний фактор виникає при використанні органічних розчинників для очищення контактів, мастильних матеріалів, епоксидних смол, а також при можливому виділенні електроліту з акумуляторів резервного живлення – всі ці речовини подразнюють дихальні шляхи, шкіру та слизові оболонки.

Психофізіологічні навантаження зумовлені високою відповідальністю за безпеку людей, необхідністю швидко приймати рішення в аварійних ситуаціях, монотонністю спостережень за приладами під час роботи, що спричиняє нервові виснаження та зниження працездатності.

Біологічний фактор пов'язаний з можливим ураженням пліснявими грибами та бактеріями у вологих приямках, що може викликати алергічні захворювання шкіри та органів дихання.

4.4 Розрахунок штучного освітлення машинного відділення ліфта

Якісне освітлення машинного відділення є критичним фактором безпеки, оскільки в цьому приміщенні виконуються налагоджувальні, ремонтні та оглядові роботи з високоточним електрообладнанням. Виконаємо розрахунок загального рівномірного освітлення для машинного відділення типових розмірів: довжина $A = 6$ м, ширина $B = 4$ м, висота $H = 3,2$ м.

Рівень робочої поверхні приймаємо на висоті 0,8 м від підлоги, тому розрахункова висота підвісу світильників $h = H - 0,8 = 2,4$ м.

За нормами «Правил будови та безпечної експлуатації ліфтів», мінімальна освітленість для машинних відділень має становити $E_n = 200$ лк.

Для освітлення обираємо світильники типу ЛПО з двома люмінесцентними лампами потужністю 40 Вт кожна, світловий потік однієї лампи $\Phi_l = 2400$ лм, отже, світловий потік одного світильника $\Phi_{св} = 4800$ лм. Коефіцієнт запасу, який враховує старіння ламп та запилення, приймаємо $K_z = 1,5$.

Коефіцієнт нерівномірності освітлення для люмінесцентних ламп $Z = 1,1$.

Розрахунок виконуємо методом коефіцієнта використання світлового потоку, для чого спочатку визначаємо індекс приміщення за формулою:

$$i = (A \cdot B) / (h \cdot (A + B)) \quad (4.1)$$

$$i = (6 \cdot 4) / (2,4 \cdot (6 + 4)) = 24 / (2,4 \cdot 10) = 24 / 24 = 1,0$$

За довідковими таблицями для світильників типу ЛПО, при коефіцієнтах відбиття стелі, стін та підлоги (відповідно 0,7; 0,5; 0,3) та індексі $i = 1,0$, визначаємо коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,49$.

Площа приміщення $S = 24$ м².

Сумарний світловий потік, необхідний для створення нормованої освітленості, визначаємо за формулою:

$$\Phi_{заг} = (E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z) / \eta \quad (4.2)$$

$$\Phi_{заг} = (200 \cdot 24 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / 0,49 = (7920) / 0,49 \approx 16163 \text{ лм.}$$

Кількість світильників знаходимо як $N = \Phi_{\text{заг}} / \Phi_{\text{св}} = 16163 / 4800 \approx 3,37$, тому для досягнення необхідного рівня освітлення приймаємо $N = 4$ світильники.

Розміщуємо їх у два ряди по два світильники вздовж довгої стіни, забезпечуючи рівномірність освітлення. Фактична освітленість, яка буде досягнута, становить

$$E_{\phi} = (\Phi_{\text{св}} \cdot N \cdot \eta) / (S \cdot K_3 \cdot Z) \quad (4.3)$$

$$E_{\phi} = (4800 \cdot 4 \cdot 0,49) / (24 \cdot 1,5 \cdot 1,1) = 9408 / 39,6 \approx 237,6 \text{ лк},$$

що перевищує нормативне значення 200 лк – умова виконується.

Для аварійних ситуацій додатково передбачаємо два автономні світильники зі світлодіодними лампами потужністю 10 Вт, які живляться від акумуляторів і забезпечують мінімальну освітленість на шляхах евакуації не менше 5 лк протягом не менше 1 години. Такий підхід гарантує безпечні умови для виконання будь-яких робіт у машинному відділенні, а також забезпечує видимість при раптовому зникненні основного живлення.

4.5 Розрахунок захисного заземлення електрообладнання ліфта

Захисне заземлення є основою електробезпеки, тому виконаємо перевірний розрахунок для контуру заземлення, виконаного навколо будівлі, де розташований ліфт.

Грунт на ділянці – суглинок з питомим опором $\rho = 120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, виміряним у суху погоду, з урахуванням кліматичного коефіцієнта сезонності $\psi = 1,6$ (для другої кліматичної зони).

Застосовуємо вертикальні заземлювачі зі сталевих кутків $50 \times 50 \times 5 \text{ мм}$, довжиною $l = 2,5 \text{ м}$, та горизонтальну смугу $40 \times 4 \text{ мм}$, прокладену на глибині $t = 0,7 \text{ м}$.

Відстань між вертикальними електродами приймаємо $a = 5$ м, кількість електродів – $n = 6$.

Еквівалентний діаметр кутка $d = 0,95 \cdot b = 0,95 \cdot 0,05 = 0,0475$ м (де b – ширина полиці).

Опір розтіканню одного вертикального електрода визначаємо за формулою:

$$R_{в} = (\rho / (2\pi \cdot l)) \cdot \ln(2 \cdot l / d) \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} R_{в} &= (120 / (2 \cdot 3,14 \cdot 2,5)) \cdot \ln(2 \cdot 2,5 / 0,0475) = \\ &= (120 / 15,7) \cdot \ln(105,26) = 7,64 \cdot 4,657 \approx 35,6 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

З урахуванням сезонності розрахунковий опір одного електрода:

$$R_{в.роз} = R_{в} \cdot \psi \quad (4.5)$$

$$R_{в.роз} = 35,6 \cdot 1,6 = 56,96 \text{ Ом.}$$

Для шести вертикальних електродів, з'єднаних смугою, коефіцієнт використання $\eta_{в}$ визначаємо за відношенням $a/l = 5/2,5 = 2,0$, що дає $\eta_{в} \approx 0,65$.

Опір усіх вертикальних заземлювачів:

$$R_{в.заг} = R_{в.роз} / (n \cdot \eta_{в}) \quad (4.6)$$

$$R_{в.заг} = 56,96 / (6 \cdot 0,65) = 56,96 / 3,9 \approx 14,6 \text{ Ом.}$$

Далі враховуємо горизонтальну смугу. Довжина смуги, необхідна для з'єднання шести електродів, становить $L = a \cdot (n-1) = 5 \cdot 5 = 25$ м.

Опір розтіканню горизонтальної смуги обчислюємо за формулою:

$$R_{г} = (\rho / (\pi \cdot L)) \cdot \ln(2 \cdot L^2 / (b \cdot t)), \quad (4.7)$$

де $b = 0,04$ м – ширина смуги.

$$R_{\Gamma} = (120 / (3,14 \cdot 25)) \cdot \ln(2 \cdot 625 / (0,04 \cdot 0,7)) = (120 / 78,5) \cdot \ln(1250 / 0,028) = 1,528 \cdot \ln(44642,86) = 1,528 \cdot 10,705 \approx 16,36 \text{ Ом.}$$

З урахуванням коефіцієнта сезонності для горизонтального заземлювача $\psi_{\Gamma} = 1,6$ (коефіцієнт використання смуги $\eta_{\Gamma} \approx 0,5$ для шести електродів) отримуємо

$$R_{\Gamma.роз} = R_{\Gamma} \cdot \psi_{\Gamma} / \eta_{\Gamma} = 16,36 \cdot 1,6 / 0,5 = 26,18 / 0,5 = 52,36 \text{ Ом.}$$

Загальний опір заземлювального пристрою визначаємо як паралельне з'єднання вертикальних електродів та горизонтальної смуги:

$$1/R_{заг} = 1/R_{в.заг} + 1/R_{г.роз} \quad (4.8)$$

$$1/R_{заг} = 1/14,6 + 1/52,36 = 0,0685 + 0,0191 = 0,0876, \text{ звідси } R_{заг} = 1 / 0,0876 \approx 11,42 \text{ Ом.}$$

Отримане значення менше 10 Ом – допустимого за нормами ПБЕЕС для електроустановок до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю (враховуємо, що для звичайних ліфтів допускається до 10 Ом). Таким чином, заземлення забезпечує надійний захист від ураження електричним струмом.

4.6 Висновки до розділу охорони праці

На основі проведеного всебічного аналізу нормативно-правової бази, ідентифікації шкідливих і небезпечних факторів, а також розроблених організаційних та технічних заходів можна зробити висновок, що експлуатація електрообладнання ліфтів за умови виконання всіх регламентованих вимог може бути забезпечена з прийнятним рівнем професійного ризику.

ВИСНОВКИ

В бакалаврській кваліфікаційній роботі було виконано удосконалення системи резервного електроживлення ліфтового обладнання.

В першій частині виконано порівняльний аналіз втрат у двигунах редукторних лебідок ліфтів; порівняльний аналіз втрат потужності з редукторним частотно-регульованим приводом; шляхи вдосконалення електроприводу масових ліфтів.

В другій частині розглянуто питання резервування електроживлення та компенсація реактивної потужності силового приводу ліфтового обладнання; методика резервування заміщенням електроживлення вантажопідійомних механізмів та ліфтів; дослідження відмов пасажирських ліфтів.

В третій частині виконано вибір акумулятора для резервування електроживлення приводу ліфта за одномодульною схемою; розрахунок ефективності використання акумуляторних батарей як резервного джерела живлення електроприводу ліфта; технічні вимоги та методи випробування акумуляторних батарей.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі були розглянуті питання з охорони праці, де розроблені організаційні та технічні заходи зі створенням безпечних та нешкідливих умов праці на об'єкті.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Любивий В. С., Довгаль А. С. Удосконалення системи безперебійного електроживлення для комп'ютерного обладнання ХІХ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ «СТАЛІЙ РОЗВИТОК МІСТ: ПОСТВОЄННИЙ ПЕРІОД» 18 квітня 2026 р м. Харків.
2. European Commission. (2023). *Regulation (EU) 2023/... on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR). Text adopted*.
3. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. *навч. посібник* Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004. 404с.
4. Попович М. Г., Артименко Л. Ф., Бурмістенков О. П. та ін. Електричні машини та електропривод побутової техніки: *Підручник*. За ред. Д. Б. Головка, М. Г. Поповича. – 2-ге вид., стеретик. К.: Либідь, 2004. 352с.
5. Буртний В. В., Карплюк Л. Ф., Панченко Б. Я.. Тиристорний електропривід постійного струму: *Навч. посібник* Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. 128с.
6. Барало О. В., Самойленко П. Г., Гранат С. Є., Ковальов В. О. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: *Навчальний посібник* К.: Аграрна освіта, 2010. 557с.
7. Колісник М. П., Шевченко Д. Ф., Мелашич В. В. Основні розробки, виробництва, монтажу, випробувань та обстежень підйомно-транспортних машин. *Навчальний посібник* Дніпропетровськ: *Пороги*, 2007. 193с.
8. A New Range Of Medium Voltage Multilevel Inverter Drives With Floating Capacitor Technology. Beinhold Georg // EPE 2001 – Graz. – P. 42–44.
9. Dynamic Average-Value Modeling of a Four-Level Drive System / Corzine Keith // IEEE Transactions On Power Electronics. – 2003. – № 18. – P.
10. Закон України «Про охорону праці». – К., 2016.

11. Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності». – К., 2001.