

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О.М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ
ЗАРЯДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОБУСІВ НА МАРШРУТІ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Назар ОХТОВ

гр. СТ 2023 -1у

Керівник:

Надія КУЛЬБАШНА

доцент, к. т. н.

Харків – 2026

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
« » 2026 р.

З А В Д А Н Н Я

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Охтов Назар Русланович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема: Використання фотоелектричних джерел енергії для зарядження електробусів на маршруті

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи Кульбашна Надія Іванівна, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету №440-03 від 22.05.2026

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи. 1. Інформація з міських сайтів і сайтів виробників 2. Характеристики сонячних панелей

4. Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Загальна характеристика і опис об'єкта. 1.1 Відомості щодо впровадження електробусів в місті Харкові. 1.2 Загальна концепція облаштування маршрутів фотоелектричної технології.

2. Технічне завдання. 2.1 Характеристика маршруту для впровадження концепції. 2.2 Вибір електробусу для зазначеної концепції. 2.3. Технічне рішення для підвищення потужності фотоелектричного модуля.

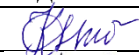





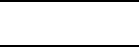

3. Розрахунок потужності від запропонованої концепції. 2.1 Розрахунок ємності фотоелектричних панелей на підприємстві (депо). 2.2 Кількість енергії від енергоощадного дорожнього покриття. 2.3 Розрахунок отриманої потужності від панелей на павільйонах зупиночних пунктів. 2.4 Генерування енергії фотоелектричними панелями на даху електробусів.

4. Охорона праці.

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

1. Титульний лист. 2. Перелік графічного матеріалу. 3. Мета та завдання роботи. 4. Концепція маршруту електробуса на підставі комплексної фотоелектричної технології. 5. Схема маршрута і його характеристики. 6. Встановлення виробітку енергії від фотоелектричних панелей на підприємстві (депо). 7. Отримання енергії від енергоощадного дорожнього покриття. 8. Розрахунок отриманої потужності від панелей на павільйонах зупиночних пунктів. 9. Генерування енергії фотоелектричними панелями на даху електробусів. 10. Підвищення потужності фотоелектричного модуля. 11. Висновки

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Головна частина	Надія КУЛЬБАШНА, доц.		
Охорона праці БНС	Микола МОРОЗ, доц.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКЮ, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 10.04.26

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Дослідження загального маршруту	25.05.26	
2.	Вибір електробусу для концепції	31.05.26	
3	Розрахунок фотоелектричних панелей та акумуляторних батарей.	05.06.26	
4	Блок-схема загальної системи живлення	09.06.26	
5.	Розробка заходів з охорони праці	13.06.26	
6.	Оформлення електронного варіантів роботи	16. 06.26	
7.	Підготовка доповіді та презентації	18. 06.26	

Здобувач _____
(підпис)

Назар ОХТОВ
(ім'я та прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Надія КУЛЬБАШНА
(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

У першому розділі проведено аналіз сучасних технологій впровадження електробусів у системі міського транспорту, розглянуто досвід експлуатації електробусів у місті Харкові та запропоновано загальну концепцію облаштування маршрутів із використанням фотоелектричних технологій.

У другому розділі сформовано технічне завдання для впровадження фотоелектричної концепції на маршрутах міського транспорту. Наведено характеристику обраного маршруту, виконано вибір електробуса для реалізації запропонованої концепції та розглянуто технічне рішення щодо підвищення потужності фотоелектричного модуля .

У третьому розділі виконано розрахунок потужності та виробітку електроенергії від запропонованої концепції. Проведено розрахунок фотоелектричних панелей, розміщених на території депо, визначено кількість енергії, що може генеруватися енергоощадним дорожнім покриттям, розраховано потужність сонячних панелей на павільйонах зупиночних пунктів, а також оцінено можливість генерування електроенергії фотоелектричними панелями, встановленими на даху електробусів

У розділі «Охорона праці» розглянуто питання безпеки праці персоналу, який здійснює монтаж, експлуатацію та технічне обслуговування фотоелектричних систем на території депо та об'єктах транспортної інфраструктури.

Бакалаврська кваліфікаційна робота містить 63 сторінки, 13 рисунків, 15 формул, 34 літературні джерела, 12 слайдів презентації.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І ОПИС ОБ'ЄКТУ	8
1.1 Відомості щодо впровадження електробусів в місті Харкові.....	8
1.2 Загальна концепція облаштування маршрутів фотоелектричної технології..	9
2.1 Характеристика маршруту для впровадження концепції.....	15
2.2 Вибір електробусу для зазначеної концепції.....	20
2.3 Технічне рішення для підвищення потужності фотоелектричного модуля.	23
3 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ВІД ЗАПРОПОНОВАНОЇ КОНЦЕПЦІЇ	28
3.1 Розрахунок ємності фотоелектричних панелей на підприємстві (депо).....	28
3.2 Кількість енергії від енергоощадного дорожнього покриття	31
3.3 Розрахунок отриманої потужності від панелей на павільйонах зупиночних пунктів.....	34
3.4 Генерування енергії фотоелектричними панелями на даху електробусів....	40
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	46
4.1 Вступ	46
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	47
4.3 Організаційно-технічні заходи з забезпечення безпеки	49
4.4 Висновки за розділом 4	56
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

ВСТУП

Відновлювані джерела енергії були в центрі зусиль зі сталого розвитку. За останні кілька років зростає кількість проєктів із використання сонячної енергії на різних видах житлових комплексів для задоволення енергетичних потреб будівель, різні галузі виробництв застосовують сонячну енергію у своєму намаганні зменшити потребу в електроенергії від централізованих мереж [1]. Аналогічно, електричні автобуси використовувалися в низці випадків для зменшення викидів вуглекислого газу від транспорту. Очевидно, що використання сонячної енергії для малих транспортних систем ще перебуває на початковій стадії. Хоча в літературі можна знайти кілька досліджень пілотних конфігурацій, аналіз реалізації таких конфігурацій досі обмежений. Ексклюзивне використання сонячних панелей для підтримки автобусних маршрутів досі не було ретельно досліджене, хоча використання сонячної енергії для цієї мети, незважаючи на її переваги, досі розглядається. У нещодавньому дослідженні [2] розглянули єдину конфігурацію для збору та зберігання енергії, не роблячи компромісів між різними системами зберігання енергії та автомобільними технологіями.

Розглядається перспектива заміни звичайних автобусів на викопному паливі електробусами, які переважно базуються на сонячній енергії, накопиченій у батареях, але також підключені до центральної електромережі.

Виходячи з можливих варіантів збору сонячної енергії, існуючої інфраструктури маршруту, запропоновано чотири сценарії збору та використання сонячної енергії для електробусів: навіси автобусних зупиночних пунктів і кінцевих станцій, вкриті сонячними панелями; дахи будівель на території депо та невикористані відкриті простори з сонячними панелями біля них; сонячні дороги, тобто спеціально розроблені панелі, які можна встановити на дорожньому покритті, та сценарій розташування панелей на дахах електробусів. Оскільки доступність сонячної енергії залежить від рівня сонячного світла, було розглянуто

можливість гнучких підходів розміщення панелей у кожному сценарії, щоб обрати способи і місця з найвищим сонячним випромінюванням. [3]

Також передбачається загальний експрес-підхід вивчення капітальних витрат та енергоспоживання вибраних транспортних засобів, зарядних станцій і сонячних панелей. Нарешті, найменш інтенсивний сценарій з точки зору капітальних витрат, тобто виробіток сонячних панелей у відкритому просторі, оцінюється на основі спостережуваних щоденних даних сонячної радіації маршруту для щоденної оцінки продуктивності системи з точки зору надійності та прибутковості, що виникають у процесі купівлі та продажу енергії в мережу. Також оцінюється вплив масштабу встановлення фотоелектричної мережі в розмірі економії за рік.

Мета роботи: розроблення концепції маршруту електробуса, що складається на сукупності можливих варіантів збору фотоелектричної енергії, для підвищення енергозаощадження на міському електричному транспорті.

Завдання роботи:

1. Розкриття змісту концепції фотоелектричних технологій на маршруті.
2. Визначення маршруту і типу електробуса для можливих варіантів збору фотоелектричної енергії, запропонувати технологію підвищення ККД сонячної панелі.
3. Розрахувати генеровані потужності за концепцією збору сонячної енергії.
4. Розробити заходи з охорони праці.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА І ОПИС ОБ'ЄКТУ

1.1 Відомості щодо впровадження електробусів в місті Харкові

Введення електричних автобусів у Харкові є важливим кроком для створення екологічно чистої і надійної транспортної системи. Це має велике значення в умовах військових труднощів та постійних атак на енергетичну інфраструктуру міста. Уважно розглянемо важливі аспекти цього завдання з точки зору транспортних схем для цього проєкту [5].

Цей проєкт реалізується в рамках ініціативи «Міський Комунальний транспорт України II» яку підтримує Європейський інвестиційний банк. Закупівля охоплює 30 низькопідлогових електробусів з довжиною 12 метрів. Фінансування загального плану підприємства становить 15 мільйонів євро у вигляді вигідного кредитування на 22 роки.

Актуальність питання полягає в тому, що міська влада міста Харкова в березні 2024 року оголосила запит на постачання електробусів та необхідної інфраструктури для їх обслуговування.

Перехід на електробуси в Харкові має низку технічних особливостей, які відрізняють їх від тролейбусів.

Перевагою є автономія. Електробуси, на відміну від тролейбусів, не залежать від контактної мережі, що дозволяє їм швидко змінювати маршрути якщо є пошкодження інфраструктури. Така особливість дає змогу їм маневрувати навколо перешкод або пристосовуватись до кричущих обставин. Також електробуси мають перевагу з огляду на бюджет так, як не потребують додаткових витрат на обслуговування транспортних електромереж.

Проєкт передбачає закупівлю швидкісних зарядних станцій. Це уможливить-заряджати транспорт на кінцевих зупинках, на маршруті і ~~або~~ в депо. Така система підзарядки транспорту працювати за будь-яких умов протягом усього дня [6].

За актуальними прогнозами термін виконання проєкту, міською владою передбачається, що тестові транспортні засоби очікуються на своїх маршрутах протягом 2026-2027 років.

Виклики воєнного часу та стратегічна роль складаються в тому, що електробуси розглядаються не лише як екологічна заміна дизельним автобусам, але й як елемент енергетичної стійкості: гнучкість під час відключень електроенергії: у періоди нестабільної роботи енергосистеми, коли наземний електротранспорт (трамваї та тролейбуси) змушений зупинятися, електробуси з накопичувачами енергії можуть продовжувати роботу протягом певного часу або заряджатися в періоди надлишку електроенергії.

Заміна маршрутного таксі розвиває стратегію міста, що передбачає поступову заміну приватних перевізників малотоннажним транспортом на користь великих муніципальних електробусів.

Вплив на місто має позитивний фактор з погляду екології: повна відсутність викидів CO₂ у місцях експлуатації, з погляду економіки: зменшення витрат на паливно-мастильні матеріали та спрощення технічного обслуговування порівняно з двигунами внутрішнього згорання, з погляду комфорту: низький рівень шуму та сучасні системи кондиціонування повітря, що є обов'язковою вимогою тендерної документації.

Наразі проєкт перебуває на стадії оцінювання тендерної пропозиції. Успішне реальне впровадження зробить місто Харків одним із лідерів України у сфері чистої міської мобільності.

1.2 Загальна концепція облаштування маршрутів фотоелектричної технології

Розглядаються чотири сценарії збору та використання сонячної енергії:

1) сонячні панелі, встановлені на дахах виробничих приміщень і на невикористовуваних відкритих просторах депо;

2) сонячні панелі, встановлені на дахах павільйонів і навісів зупиночних пунктів і на просторі поруч, а також на кінцевих станціях;

3) сегменти доріг, побудовані з фотоелектричних матеріалів, ~~зазвичай звані~~ що називають сонячними дорогами, які зберігають отримані енергію в акумуляторах уздовж дороги;

4) гнучкі сонячні панелі на даху електробусів[7].

У всіх чотирьох випадках передбачається, що на терміналі депо необхідний стаціонарний зарядний пристрій, щоб транспортні засоби могли розпочати рух по маршруту повністю зарядженими [8]. Тобто передбачено зарядження швидкісне у ночі. У наступних розділах аналізується кожен сценарій з точки зору його технічної конфігурації та виробленої енергії.

Сценарій 1: сонячні автобусні зупиночні пункти

У цьому сценарії досліджується нова концепція сонячних автобусних зупинок, тобто автобусні зупинки збирають сонячну енергію або зі свого навісу, побудованого з фотоелектричних матеріалів, або з фотоелектричних панелей, встановлених у безпосередній близькості від автобусної зупинки, і передають енергію до буферних акумуляторних батарей уздовж маршруту, від яких електробуси можуть заряджатися на окремих зупиночних пунктах через пантограф [9]. Передбачається, що площа сонячного даху на кожній автобусній зупинці становить 30 м^2 ($10 \text{ м} \times 3 \text{ м}$), що відповідає значенню, наведеному в літературі [10]. Виходячи з середньорічної сонячної радіації на території маршруту ($1109 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2/\text{рік}$), сонячна енергія на рік у районі всіх автобусних зупинок може становити $166 \text{ МВт}\cdot\text{год}$. З урахуванням ККД сонячних панелей (з урахуванням перетворення енергії у 14%) вироблення електроенергії протягом року можна прогнозувати $16 \text{ МВт}\cdot\text{год}$, або приблизно $16/239 = 0,067 \text{ МВт}\cdot\text{год}\cdot\text{день}$ в середньому за кожен день роботи. Очевидно, що сонячні панелі на автобусних зупинках не забезпечують достатньо енергії для автономної роботи автобусів, і в середньому знадобиться за прогнозом $572 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{добу}$ додаткової електроенергії з мережі.

Сценарій 2: дахи виробничих приміщень підприємства та відкритий простір із сонячними батареями.

Тут запропоновано використовувати дахи виробничих приміщень тролейбусного депо №3 м. Харкова та вільні місця на території цього депо, де можна розташувати панелі.

У цьому сценарії розглядається концепція нічної зарядки, за якої автобуси заряджаються на станціях у нічний час. Така зарядка може реалізовуватися повільно протягом 6...8 годин через роз'єм і 2...4 години швидко через напівпантограф. Енергія буде зберігатися в акумуляторах депо високої ємності не менше 700 кВт·год.

В роботі [11] за такої конфігурації енергія виробітку на території депо площею 9100 м² та площею комерційної сонячної панелі приймалася рівною 1,93 м², а її коефіцієнт потужності — 14 %, а сонячні панелі займали територію у кількості 4145 штук і можуть генерувати 951378 кВт/год на рік. В цьому дослідженні встановлено, що в такій кількості сонячні панелі можуть в середньому адекватно задовольнити потреби автобуса в енергії. Надлишки енергії продаватимуться в мережу.

При використанні методу нічної зарядки сонячна енергія, зібрана в денний час, може бути перетворена на електроенергію та збережена в батареях АКБ. Якщо припустити, що з акумуляторною батареєю ємністю 225 кВт·год з урахуванням корисної потужності за наявності в депо зарядного пристрою середньої потужності 60 кВт для заряджання електробуса ємністю 225 кВт·год знадобиться середня тривалість заряджання \approx 4 години. Такий підхід до стягнення плати забезпечує надійність під час експлуатації маршрутів, тоді як тривала зарядка вночі в цьому випадку не є проблемою, оскільки автобуси курсують у денний час. Для задоволення потреб в енергії для зарядки 3 електробусів потрібна 1 зарядна станція.

Сценарій 3: сонячні дороги у вигляді енергогенеруючого дорожнього покриття

Третій сценарій передбачає встановлення сонячних панелей уздовж сегментів дорожньої мережі маршруту (рис. 1.1), щоб збирати сонячну радіацію, збираючи електроенергію на акумуляторні батареї, що розташовані уздовж траси маршруту, збираючи цю енергію і передаючи до зупиночних пунктів.

Загальна площа дорожнього покриття маршруту, становить $178\,800\text{ м}^2$. На основі місць, показаних на рисунку 1.1 щодо сонячної радіації доріг, вибираються ділянки дороги довжиною близько 300 м і шириною 12 м (загальна площа $3\,600\text{ м}^2$) за двома критеріями: висока сонячна радіація, що надходить, і низька затемненість. Виділені території не використовуються для короткострокового паркування. Без урахування ефектів накопичення пилу та динамічного або статичного затінення загальна річна ефективність подібних установок оцінюється в 8,6 % [12]. У даній роботі для врахування затінення від рухомих автомобілів та підвищеної концентрації пилу коефіцієнт потужності дещо знижено до 7 %. Однак слід зазначити, що коефіцієнт потужності таких конфігурацій становить лише 4 % .

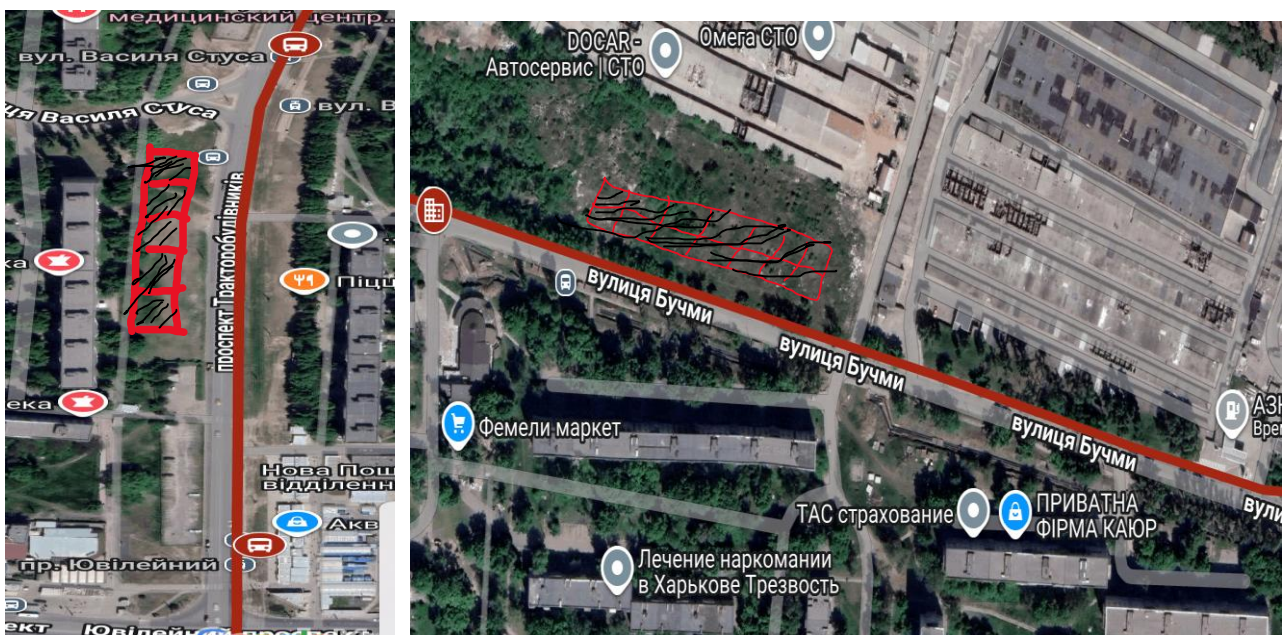


Рисунок 1.1– Можливе місце встановлення панелей

Сценарій 4: Розміщення панелей на дахах електробусів

Встановлення сонячних панелей на електробусах не є повною заміною заряджання від традиційної електромережі, а розглядається як додатковий засіб для подальшого підвищення енергоефективності транспорту. Головна мета полягає у безпосередньому виробленні частини електроенергії під час роботи транспортного засобу, як під час руху, так і під час зупинки. Отриману електроенергію можна використовувати для живлення допоміжних систем або для часткового заряджання акумуляторної батареї [13].

На початковому етапі впровадження необхідно провести аналіз самого електробуса. До важливих параметрів належать площа даху, яка зазвичай становить близько 20–30 квадратних метрів, споживання енергії (в середньому 1–1,5 кВт·год на кілометр) та ємність акумулятора, що коливається в діапазоні від 200 до 400 кВт·год. Саме площа даху є визначальним фактором максимальної потужності сонячної електростанції, що є важливим обмежувальним фактором.

Далі слід вибрати тип сонячних панелей. Найбільш підходять монокристалічні панелі. Це пов'язано з їх високим коефіцієнтом перетворення (приблизно 20–23 %). Існують також гнучкі панелі, які мають невелику вагу та легко пристосовуються до форми даху, але їхня ефективність нижча. За сучасних умов максимальна потужність становить приблизно 150–220 Вт на 1 м², що уможливорює встановлення на електробусі системи загальною потужністю близько 3–6 кВт.

Енергетичний ефект від такої системи залежить від кліматичних умов і тривалості сонячного випромінювання. У середньому можна отримати приблизно 12–30 кВт·год електроенергії на добу. Це дозволяє або збільшити пробіг електробуса приблизно на 10–20 кілометрів, або повністю забезпечити роботу допоміжних систем, таких як кондиціонування, освітлення та електроніка.

Наступним важливим етапом є інтеграція сонячної системи в електричну архітектуру транспортного засобу. Для цього використовуються спеціальні контролери (наприклад, MPPT), які оптимізують роботу панелей, а також

перетворювачі напруги та система керування батареєю. Енергія може або напряму подаватися на допоміжні системи, або накопичуватися в акумуляторі.

Конструкційно встановлення панелей також має свої особливості. Необхідно враховувати додаткову вагу (приблизно 100–300 кг), вплив на аеродинаміку, а також стійкість до вібрацій і погодних умов. Найбільш ефективним є варіант інтеграції панелей безпосередньо в конструкцію даху, а не їх простого монтажу зверху.

2 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ КОНЦЕПЦІЇ

2.1 Характеристика маршруту для впровадження концепції

За основу концепції було взято вже існуючий маршрут 204 автобусу в Харкові.

Автобусний маршрут 204 у Харкові є одним із важливих елементів міської транспортної системи, оскільки забезпечує зв'язок між великими житловими районами та ключовими транспортними вузлами [14]. Його основна функція полягає у перевезенні пасажирів із густонаселених спальних районів, Салтівки, до станцій метрополітену і промзони, що розташовані уздовж маршруту, що дає можливість швидко дістатися центральної частини міста. По своїй суті, він охоплює значну частину цього густонаселеного району, забезпечуючи зручне сполучення між житловими кварталами, ринками, станціями метро та торговельними центрами.

Маршрут проходить через декілька великих житлових масивів та проміжних районів, а саме: Північну Салтівку, Центральну Салтівку та район Немишлі. Кінцева зупинка розташована поблизу станції метро «Індустріальна». Хоча цей маршрут не проходить через історичний центр міста, він відіграє важливу роль у перевезенні пасажирів до метро, яке стає для них наступним видом транспорту.

Ключовою особливістю цього маршруту є його інтеграція з системою метро. Він проходить поблизу кількох станцій, зокрема «Індустріальна», «Тракторний завод» та «Масельський». Це робить його типовою підвізною лінією, яка забезпечує пасажиропотік до систем швидкісного транспорту.

Маршрут проходить паралельно з трамвайною лінією, що є потенціальним заходом скорочення руху трамвая на небезпечному Немишлянському ухилі (рис. 2.1).

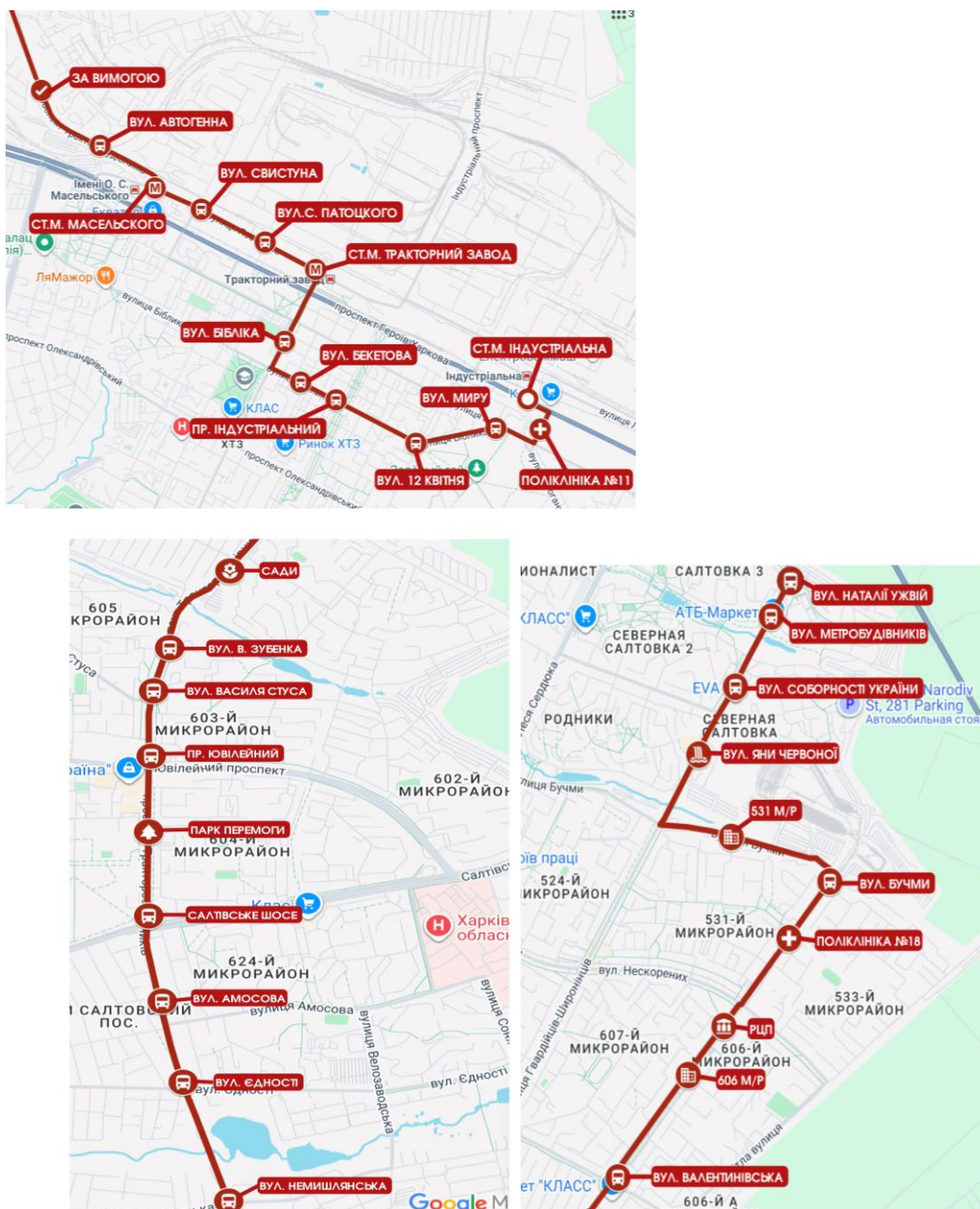


Рисунок 2.1 – Схема маршруту 204 м. Харкова

Окрім транспортної функції, ця лінія також виконує соціальну роль. Вона забезпечує доступ до об'єктів соціальної інфраструктури, таких як лікарні, поліклініки, державні установи та комерційні райони. Як результат, нею активно користуються найрізноманітніші верстви населення.

Також варто зазначити, що маршрут є одним із пригородно-міських, з високим пасажиропотоком у години пік. Він активно використовується жителями

приватного сектора та сіл, таких як Докучаєвське, завдяки відсутності зручного альтернативного транспорту.

Загальна площа дорожнього покриття маршруту становить 178 800 м². Він налічує 34 зупинки (рис. 1.2) («ст.м. «Індустріальна», поліклініка №18, вул. Миру, вул.12 квітня, пр. Індустріальний, вул. Бекетова, вул. Бібліка, ст. м. «Тракторний завод», вул. Северин Потоцький, вул. Санкт-Вістлер, ст.м. «Масельського», вул. Автогенна, зупинка на вимогу, вул. Немишлянская, вул. Єдності, вул.Амосова, Салтовське шосе, Парк Перемоги, пр. Ювілейний, вул. Василь Стус, вул. Владислава Зубенка, Сади, вул. Валентиновська, 606 м/р, Регіональний сервісний центр, Поліклініка №11, вул. Бучма, 531 м/р, вул. Рудникова, вул. Ради України, вул. Метробудівників, вул. Наталії Ужвій»).

Так як маршрут велику частину шляху проходить вздовж трамвайних колій, що сильно ускладнює встановлення сонячних панелей. Тому потрібно розглядати пусті ділянки на узбіччі дороги або парковки (рис. 2.2).

Але беручі його загально можна зауважити дві великі локації: парк Перемога та Манжосів яр. Беручі їх до уваги, маємо велику територію, де можна встановити панелі (рис. 1.4) [14]. На вході в парк пуста територія, що не ускладнює їх встановлення. Проблематика Манжосівського яру полягає в тому, що це природнича зона з щільним розміщенням дерев, і для встановлення обладнання виникає потреба в усуненні частини дерев.



Рисунок 2.2 – Зони можливого встановлення панелей парку Перемоги та Мінжасівського яру

Умови на маршруті ускладнює наявність затяжного ухилу. Немишлянський ухил проходить по пр. Тракторобудівників. Трамвайний шлях розташовано на відособленому полотні з правої сторони в напрямку слідування до станції Миротворча. Перетинається з вул. Литовською, Естонською, Немишлянською, Танковою, Єдності, Амосова, Північною (рис. 2.3).

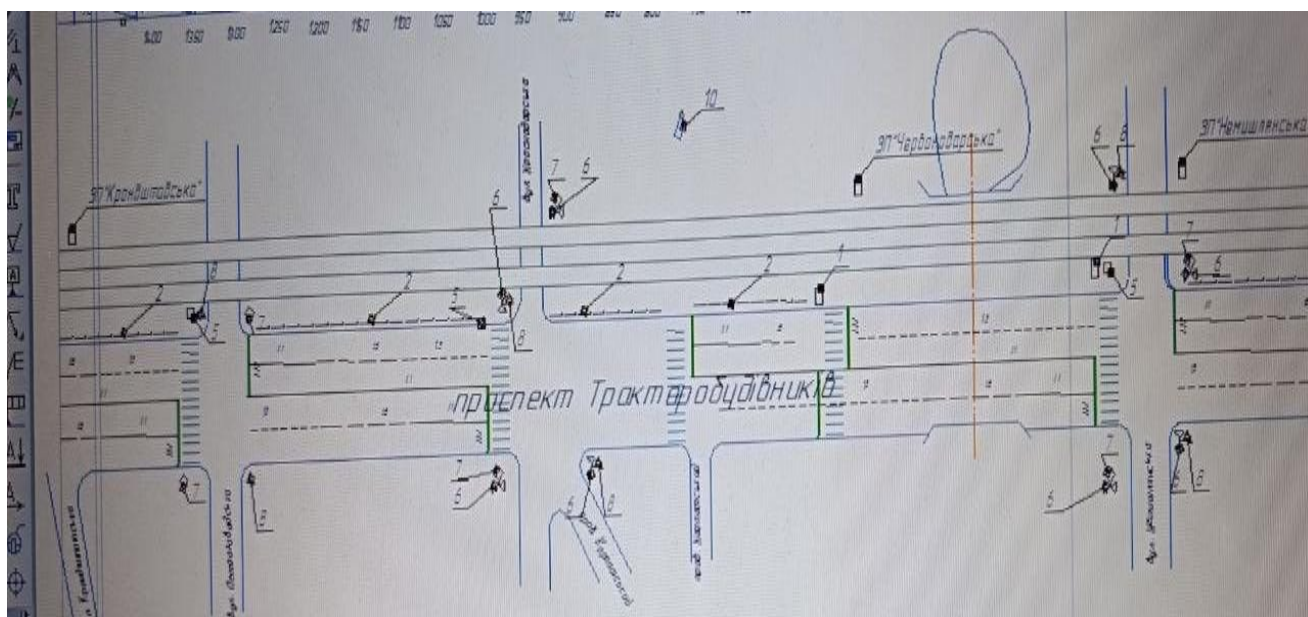


Рисунок 2.3 – Схема Немішлянського ухилу

Цей ухил – це довга ділянка дороги з сильним поздовжнім нахилом, що досягає в деяких місцях 60 промілей. Хоча він не є особливо крутим порівняно з гірськими дорогами, але він має значний вплив на міський транспорт. Його наявність впливає на швидкість руху, споживання енергії та загальну експлуатаційну ефективність транспортних засобів.

Піднімаючись на Немішлянський ухил, транспортні засоби потребують додаткової потужності. Для традиційних автобусів це означає підвищене споживання палива, а для електробусів – більший розхід енергії з акумуляторів. У таких умовах двигун працює під більшим навантаженням, що може вплинути на його термін експлуатації та характеристики роботи.

Однак ситуація змінюється під час спуску. Для електробусів створюються сприятливі умови для використання рекуперативного гальмування. У цьому режимі електродвигун працює як генератор і повертає частину енергії в акумулятор. Це частково компенсує енергію, витрачену під час підйому, та покращує загальну енергоефективність маршруту.

При розгляді ухилу для встановлення панелей, кут ухилу немає великого негативного впливу на збір сонячної енергії. Оскільки в більшості це відкрита

ділянка дороги. Проте рух транспорту впливає на кут нахилу відносно сонця тому на цій ділянці немає великих переваг в зборі енергії відносно типових міських умов. Крім цього облаштування частки дороги на ухилі енергозберігаючими панелями на проїзній частині може значно впливати на безпеку руху. Так як ці панелі мають не великий коефіцієнт зчеплення, це може негативно впливати на гальмування, подовжуючи гальмівні шляхи електробусу. Тому ділянки, що мають проміле більше 60, енергогенеруючими панелями не облаштовують.

Важливим питанням є вибір кількості електробусів, які мають експлуатуватися на маршруті. З урахуванням прийнятого інтервалу руху на маршруті 8 хв, часу оборотного рейсу 60 хв на маршруті мають бути задіяні 18 рухомих одиниць. Це означає, що в роботі заплановано із 30 закуплених електробусів їхня значна частина буде працювати на запропонованому маршруті.

2.2 Вибір електробусу для зазначеної концепції

За основу електробуса для концепції обрано вітчизняний електробус «Електрон» (рис. 2.4). На даному етапі встановлення пантографа на електробус не передбачається, оскільки це потребує додаткової модернізації рухомого складу та значних капітальних витрат. Разом з тим, у подальшому розвитку проєкту можливе впровадження технології швидкісного заряджання за допомогою пантографа на зупинках громадського транспорту або на території депо. Таке рішення дає змогу скоротити час заряджання АКБ, підвищити ефективність експлуатації електробусів та збільшити їхній добовий пробіг. Крім того, розробка та впровадження подібних систем сприятиме розвитку вітчизняних технологій у сфері електротранспорту, створенню конкурентоспроможних технічних рішень та розширенню можливостей українських виробників на ринку транспортної інфраструктури.



Рисунок 2.4 – Електробус Електрон E19101

Електробуси «Електрон» побудовані з використанням рішень, перевірених в конструкції тролейбусів. Вони забезпечують достатньо довгий строк експлуатації, оскільки кузов виконаний з нержавіючої сталі, в ходовій частині застосовуються агрегати ZF, салон і робоче місце водія просторе, світле та зручне. Для пасажирів з обмеженими можливостями переміщення передбачена рампа, що встановлюється вручну, та місце в салоні, обладнане ременями безпеки. Рідинна система опалення (включаючи автономний обігрівач) та кондиціонери забезпечують оптимальний мікроклімат в салоні в будь-яку погоду [15].

Загальна пасажиромісткість становить 100 осіб, з них 36 сидячих. Довжина електробусу 12 м. Електробус забезпечений сучасними акумуляторними батареями, а саме літій-залізо-фосфатний акумулятор фірми Winston Battery місткістю 225 кВт·год, які забезпечують роботу в широкому температурному діапазоні, безпечні в експлуатації і характеризуються значним ресурсом (кількість циклів заряду-розряду становить від 2000 до 8000, в залежності від умов експлуатації й обслуговування). Також вони витримують швидке зарядження великим струмом (за 15-20 хвилин до 70 %).

В конструкції електробуса передбачена можливість встановлення різної кількості батарей. Це допускає підбір оптимального варіанта за співвідношенням пасажиромісткості та дальності ходу.

Електробус забезпечений системою контролю й обслуговування батареї (BMS), яка безперервно відстежує роботу акумуляторної батареї та стан її окремих ланок, та системою керування високовольтними та низьковольтними ланцюгами з допомогою CAN шини. Дисплей на панелі керування водія відображає інформацію про режими роботи вузлів і стану компонентів.

Приводом для реалізації тяги послуговують використовуватися як тягові електродвигуни з класичними мостами, так і ведучі мости з мотор-колесами. В режимі рекуперації створюється часткове повернення електроенергії до акумуляторної батареї. В модельному ряді електробуса, яка використовується в місті Львів, як задній ведучий міст є порталний міст з інтегрованими асинхронними двигунами ZF AVE 130 з максимальною потужністю $2 \cdot 125$ кВт.

Тяговий інвертор «Електрону» працює в режимі векторного керування електродвигуном, що має високу точність та оперативно регулює швидкість і момент на валу двигуна, а також забезпечує високий ККД за рахунок мінімізації втрат на нагрівання та перемагнічування.

Електрон обладнаний бортовим зарядним пристроєм, що забезпечує зарядження акумуляторної батареї від мережі 380 В.

Основні характеристик будови вказані на рисунку 2.5.

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Модель	E181	E191
Довжина/ширина/висота	10,17/2,55/3,33м	12,1/2,55/3,33м
Колісна база	5150мм	5880мм
Формула дверей	1-2-1 або 1-2-0	2-2-2 або 2-2-0
Ширина дверей, двостулкових/одностулкових	1400/800мм	1400мм
Відсоток низької підлоги	100%	100%
Висота входу/з функцією «kneeling»	340/250мм	340/250мм
Пасажиромісткість* (місце для сидіння/візок інвалідний)	65-87(28-30/1)	80-98(36-41/1)
Максимальна швидкість	70км/год	70км/год
Акумуляторні батареї	LiFePO4	LiFePO4
Ємність акумуляторних батарей	115-230кВт·год	115-230кВт·год
Пробіг без підзарядки (враховуючи рекуперацію)*	80-200км	80-200км
Потужність тягового двигуна	2x125кВт	2x125кВт
Споряджена маса/повна маса	11,0-11,5/18,0т	12,0-12,5/19,0т
Кермове керування	BOSCH	BOSCH
Вісь передня (незалежна підвіска)	ZF	ZF
Вісь задня	ZF	ZF
Підвіска	ECAS пневматична з «kneeling»	
Гальмівна система	EBS (двоконтурна, ABS, ASR), стоянкове, світлофорне гальма	
Каркас кузова	нержавіюча сталь	
Електрообладнання	CAN-шина	

* залежить від кількості батарей

СП «ЕЛЕКТРОТРАНС»
вул. Шевченка, 311, Львів, 79069, Україна
Тел.: +38(032) 239 5599
Факс: +38(032) 239 5718
E-mail: office@eltrans.electron.ua
www.eltrans.electron.ua



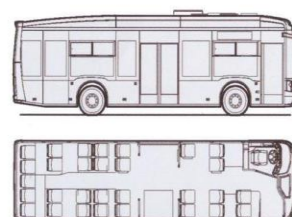
ЕЛЕКТРОБУСИ

ПЕРЕВАГИ ЕЛЕКТРОБУСУ

- Підвищений комфорт для пасажирів за рахунок низьких рівнів шуму і вібрації в салоні
- Зниження загальноміського шумового фону
- Відсутність шкідливих викидів в атмосферу
- Низькі витрати на обслуговування та ремонт.



E181 ELECTRON



E191 ELECTRON



Рисунок 2.5 – Буклет презентації електробусів «Електрон»

2.3 Технічне рішення для підвищення потужності фотоелектричного модуля

У традиційних сонячних електростанціях послідовне з'єднання модулів є основною слабкою ланкою. Навіть якщо лише один модуль знаходиться в тіні, забруднений або перегрітий, потужність знижується, що призводить до зменшення ККД усього ланцюга. Ця проблема особливо гостро стоїть у міських умовах. У міських районах щодня трапляються випадки часткового затінення деревами, електроопорами, будівлями або транспортними засобами. Особливо це

помітно на парковках, дахах автомобілів та об'єктах дорожньої інфраструктури [21].

Тому в цій роботі запропоновано технічне рішення для підвищення потужності фотоелектричного модуля. Ця система складається з послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів $PV_1 \dots PV_n$ та секції, підключеної до центрального інвертора. Головною відмінністю цієї схеми від традиційних конструкцій є встановлення окремого локального перетворювача постійного струму на базі резонансного конденсатора передачі (SCC) між кожною парою сусідніх модулів. Кожен перетворювач постійно контролює стан потужності двох сусідніх модулів і, за потреби, передає потужність між ними [22].

За нормальних умов, коли всі модулі генерують приблизно однакову потужність, перетворювачі залишаються неактивними, а центральний інвертор безперервно отримує живлення. Центральний інвертор перетворює постійний струм (DC) і подає потужність до споживача або в мережу.

Якщо один із модулів (позначений як PV_x (рис. 2.6)) працює в несприятливих умовах через затінення, забруднення або часткове нагрівання, його струм знижується порівняно з іншими частинами ланцюга. У традиційній системі послідовного з'єднання це безпосередньо обмежує струм усього ланцюга за принципом «найслабшої ланки». У цій системі перетворювачі $Converter_{x-1}$ та $Converter_{x-2}$, розташовані по обидва боки несправного модуля, автоматично активуються та перенаправляють частину потужності з сусідніх модулів у несправну ділянку. На електричній схемі ці струми позначені як PD_{x-1} та PD_{x-2} . Цей механізм врівноважує струми всередині ланцюга, забезпечує стабільність вихідного струму I_{out} системи та мінімізує втрати потужності.

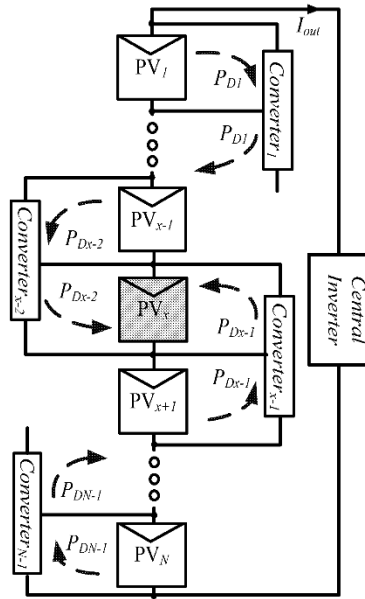


Рисунок 2.6 – Фотоелектрична система з локальними MPPT-перетворювачами

У центрі кожного локального перетворювача розташований резонансний LC-контур у поєднанні з імпульсним конденсатором. Ця схема налаштована таким чином, що перемикання транзисторів відбувається, коли струм, що протікає через них, дорівнює нулю. Цей режим називається Zero Current Switching (ZCS). Практичне значення цього режиму полягає в тому, що під час увімкнення або вимкнення струм дорівнює нулю, тому різке перемикання не спричиняє електричного навантаження, перехідних стрибків напруги та тепловиділення. Резонансний контур природним чином генерує синусоїдальну форму струму і тим самим автоматично виконує умову ZCS, не вимагаючи додаткової схеми згладжування перешкод.

Кожен інвертор оснащений алгоритмом відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Однак центральний MPPT визначає єдину робочу точку для всіх ланцюгів. У той час як в іншому випадку робочі умови сусідніх модулів вимагали б компромісу, локальний MPPT на кожному інверторі окремо визначає оптимальну точку для підключеного модуля. Таким чином, кожен модуль працює в точці пікової потужності своєї власної кривої потужності, незалежно від сусідніх модулів. У цьому випадку загальна потужність системи дорівнює сумі

потужностей усіх модулів. Це принципово відрізняється від традиційних методів установки, де загальна потужність ланцюга обмежується потужністю модуля з найнижчою потужністю.

Конструктивні особливості та переваги цієї системи в наступному.

Завдяки використанню ковзних конденсаторів замість ємнісних компонентів розміри кожного інвертора можна значно зменшити. Оскільки великі котушки клапанів і трансформатори не потрібні, конструкція є компактною та легкою, що дозволяє встановлювати інвертор безпосередньо на задній стороні панелі або на профілі рами модуля. Поєднання резонансного режиму роботи та ZCS мінімізує електромагнітні перешкоди, полегшує сертифікацію та знижує вимоги до захисту.

Ця система підходить для міських сонячних електростанцій — наприклад, сонячних електростанцій на зупинках громадського транспорту, на дорожній інфраструктурі та на дахах автопарків. Міські сонцезахисні конструкції та подібні об'єкти є особливо ефективними. У цих місцях нерівномірне сонячне випромінювання на поверхні панелей через рухомі тіні є не рідкістю, а скоріше нормальним станом у повсякденній експлуатації.

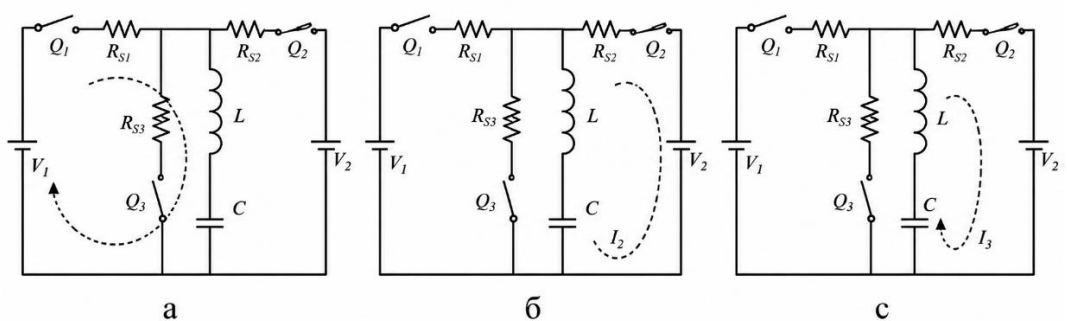


Рисунок 2.7 – Забезпечення локального МРРТ-керування та компенсація втрат потужності при частковому затіненні сонячних панелей

Схема складається з двох джерел напруги V_1 та V_2 , які імітують сусідні сонячні панелі, трьох ключів Q_1 , Q_2 , Q_3 , резисторів R_{S1} , R_{S2} , R_{S3} , індуктивності L та конденсатора C . Індуктивність та конденсатор формують резонансний контур, який забезпечує передачу енергії з мінімальними втратами.

На рисунку 2.7 а система працює в режимі накопичення енергії від першої панелі. У цей момент замкнений ключ Q_1 , а енергія від джерела V_1 надходить до резонансного контуру. Струм проходить через індуктивність L , у якій накопичується магнітна енергія, а конденсатор C починає заряджатися. Таким чином система накопичує частину енергії першої сонячної панелі.

На рисунку 2.7 б показано режим передачі енергії до другої панелі. У цьому режимі ключ Q_1 розімкнений, а ключ Q_2 замкнений. Накопичена в LC-контурі енергія передається до джерела V_2 . Індуктивність починає віддавати накопичену енергію, а струм проходить через резистор R_{S2} . Завдяки цьому відбувається балансування потужності між сусідніми фотоелектричними модулями.

На рисунку 2.7 в показаний резонансний режим роботи. У цьому випадку замкнений ключ Q_3 , а між індуктивністю L та конденсатором C формується замкнений резонансний контур. Енергія циклічно передається між магнітним полем індуктивності та електричним полем конденсатора. Саме цей режим дозволяє реалізувати технологію Zero Current Switching (ZCS), завдяки якій зменшуються втрати енергії та нагрів силових елементів.

Робота даного SCC-перетворювача дозволяє ефективно передавати енергію між сусідніми сонячними панелями. Якщо одна панель затінена або працює менш ефективно, система автоматично компенсує втрати шляхом передачі частини енергії від інших модулів. Це забезпечує стабільну роботу всієї фотоелектричної установки та підвищує загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Дане технічне рішення є особливо ефективним для міських сонячних систем, таких як сонячні зупинки громадського транспорту, дорожня інфраструктура та фотоелектричні системи депо, де часто виникає нерівномірне освітлення поверхні сонячних панелей.

3 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ВІД ЗАПРОПОНОВАНОЇ КОНЦЕПЦІЇ

3.1 Розрахунок ємності фотоелектричних панелей на підприємстві (депо)

Найлегшим та наймасовішим продуктом для концепції можна вважати звичайні сонячні панелі. На ринку альтернативних джерел живлення є багато різноманітних моделей, тому вибір фотоелектричних панелей пов'язаний з продукцією компанії Jinko Solar, який виділяється вигідною ціною та високим показником ККД (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Параметри фотоелектричних модулів

Параметри	Jinko Solar 615Вт JKM615N-66HL4M-V Tiger Neo N-Type 35 мм
Тип фотомодулів	монокристалічні
Потужність, Вт	615
Ефективна складова перетворення енергії, %	22,77
Номінальний струм, А	15,1
Номінальна напруга, В	40,73
Напруга за розімкнутим контуром, В	48,8
Розміри, мм	2278 × 1134 × 35
Маса, кг	33,5
Вартість, грн.	5160
Площа, м ²	2,6

Використання сонячних панелей Jinko Solar уможливорює досягти оптимального балансу між продуктивністю та розмірами, одночасно максимізуючи енергетичну щільність на одиницю площі. У рамках проєкту міської інфраструктури це дає можливість значно оптимізувати логістичні

витрати, системи монтажу, кабельну систему та кількість інверторів, що безпосередньо знижує вартість встановленого 1 кВт.

Технологічна база цього модуля базується на архітектурі, що складається зі 132 монокристалічних комірок типу N, які мають високу стійкість до часткового затінення та гарантують стабільність генерації електроенергії. Однією з головних переваг технології типу N є майже повна відсутність фотоіндуктивного зносу, що дає змогу уникнути швидкого зниження ККД на початку експлуатації та гарантує високу продуктивність протягом усього життєвого циклу фотомодуля, порівняно з традиційними рішеннями типу P.

Високий рівень захисту обраної моделі відповідно до стандарту IP68 гарантує безпечну та довготривалу роботу системи навіть у складних умовах навколишнього середовища. Ці панелі можуть бути використані за таким планом розміщення: дахи адміністративних будівель, дах виробничої зони, навіси над стоянкою автобусів та навіси над стоянкою для персоналу (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – План розміщення сонячних панелей на території депо

Загальна площа покриття панелями 9100 м². На даху виробничої зони площа покриття становить 3300 м². Задля безпеки, щоб несучі конструкції витримали вагу панелей, використовується не вся площа даху, а місця, під якими встановлені несучі стіни. Таке розміщення запобігає перевантаженню даху та подальшого обвалу [16].

Пропонується також встановлення навісів над паркувальною зоною для персоналу та рухомого складу, що дасть додаткові 4000 м² площі.

Враховуючі, що площа однієї панелі становить 2,7 м², загальна кількість встановлених панелей на території депо \approx 3370 панелей. Загальна потужність станції [17]:

$$P = 3370 \cdot 615 = 2,07 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

На день станція виробляє:

$$E_d = P \cdot t_d, \quad (3.1)$$

де t_d – кількість сонячних годин на день МВт/год :

$$E_d = 2,07 \cdot 8 = 16,56 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

Розрахунок ефективності системи, ураховуючи з втратами в інверторі та врахування втрати потужності буде становити

$$E_d = 16,56 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,77 = 7,65 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

На рік виробництво електроенергії становить:

$$E_p = 7,65 \cdot 365 = 2792 \text{ МВт} \cdot \text{год на рік.}$$

В концепції використовується метод нічної зарядки, для забезпечення потреб 18 електробусів з ємністю батареї 250, КВт·год:

$$E_z = 7,65 - 0,25 \cdot 18 = 3,15 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

За результатом розрахунку сонячна станція забезпечить маршрут повністю та отримується залишок 3,15 МВт·год.

Розрахунок буферної акумуляторної батареї [18]:

$$C = \frac{E_a \cdot k_s}{\eta \cdot D}, \quad (3.2)$$

де C – необхідна ємність акумуляторів, А·год;

E_a – запас енергії, Вт;

k_s – коефіцієнт резерву, для LiFePO_4 акумуляторів $k_s = 1,2$;
 D – глибина розряду акумулятору АКБ, $D = 0,8$;
 η – ККД акумуляторної системи $\eta = 0,95$.

$$C = \frac{3,15 \cdot 1,2}{0,95 \cdot 0,8} = 4,97 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Тобто для цієї станції потрібно АКБ з загальною ємністю 26,15 МВт·год.

3.2 Кількість енергії від енергоощадного дорожнього покриття

Технологія енергогенеруючого дорожнього покриття не призначена для заряджання електромобілів під час руху; натомість, вироблена енергія накопичується в акумуляторах, розташованих уздовж дороги, і згодом використовується для заряджання електробусів та електромобілів, для допоміжного освітлення доріг або для передачі електроенергії місцевим споживачам.

Енергозберігаюче дорожнє покриття інтегровано до єдиної системи, що уможливорює дорозі функціонувати автономно, незалежно від зовнішніх джерел енергії (рис. 3.3). Така технологія, зазвичай, дає можливість та розподіляти зайву електроенергію та постачати будинками та підприємствам уздовж дороги. В цій роботі запропоновано отриману енергію використовувати для живлення електробусів під час їхньої зупинки на зупиночному пункті.

Дорога складається з шестикутних модулів, кожен з яких має захисну кришку з високоміцної прозорої акрилової смоли. В середині перебувають волокнисті нагрівальні елементи. У основі стовпчиків, на яких встановлено верхню захисну кришку, знаходяться п'єзоелектричні елементи (п'єзоелектричні генератори). Вони генерують електроенергію при натисканні. Фотоелектричні модулі виготовлені з кремнієвих сполук і містять світлодіоди. Панелі, утворені цими модулями, оснащені електронними платами управління та кабельними каналами. Вся система підключена до акумуляторної батареї, встановленої в технічному

відсіку, розташованому поруч із дорогою. До однієї акумуляторної батареї підключаються від п'ятисот до тисячі таких панелей [7].

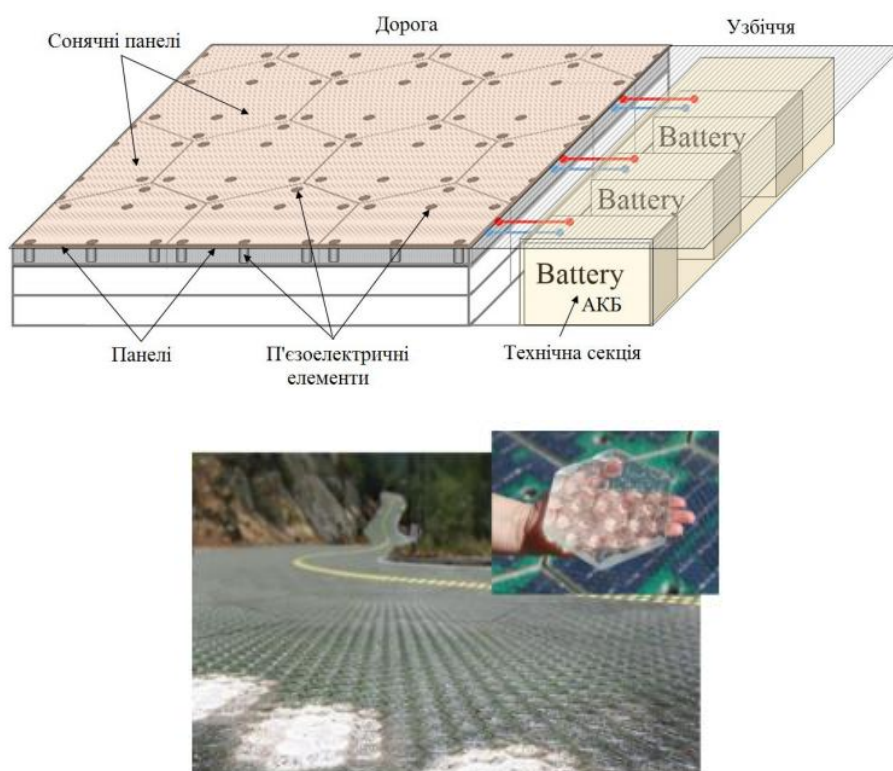


Рисунок 3.2 – Дорога з модульними сонячними панелями, до яких інтегровані п'єзоелектричні елементи

Коефіцієнт покриття панелями дорожнього покриття з функцією генерації електроенергії (ЕДП) становить 75 %. Щоб виробити 1 кВт·год електроенергії при коефіцієнті покриття панелями 100 %, потрібно 6,6 м² ЕДП. Отже, при коефіцієнті покриття панелями 75 % площа становить [18]:

$$6,6 \cdot \frac{75}{100} = 4,95 \text{ м}^2.$$

Для генерації 1 кВт·год електричної енергії потрібна ділянка дороги площею 4,95 м².

100 кВт·год електроенергії зможе згенерувати ділянка площею 495 м² ЕДП. Шестикутна панель має радіус $R = 0,46$ м, тоді її площа визначається:

$$S = 3\sqrt{3} \cdot \frac{R^2}{2} = 3\sqrt{3} \cdot \frac{0,46^2}{2} = 0,55 \text{ м}^2.$$

Кількість панелей для ЕДП задля генерації 100 кВт·год електроенергії становить:

$$\frac{495}{0,55} = 900 \text{ шт.}$$

Майже на всьому маршруті йде чотирьох-смугова дорога, тож її ширина становить 12 м. Довжина ділянки обраної, дороги з ЕДП, яка здатна генерувати 100 кВт·год електричної енергії:

$$\frac{495}{12} = 41,25 \text{ м.}$$

Отже для генерації 100 кВт/год електричної енергії за одну годину своєї роботи має бути ділянка дороги шириною 12 м і довжиною 41,25 м. Але враховуючі реальні експлуатаційні умови, а саме кут падіння сонячних променів на сонячні пристрої, забруднення поверхні кришок модулів, затінення частини дороги, які відповідно можуть збільшити довжину ділянки дороги до 100 м, щоб забезпечити генерування 100 кВт/год Е: електричної енергії:

$$100 \cdot 12 = 1200 \text{ м}^2.$$

Тобто ділянка дороги площею 1200 м² забезпечує генерацію електричної енергії 100 кВт/год. Ця ділянка дороги складатиметься з:

$$\frac{1200}{0,55} = 2182 \text{ одиниць панелей.}$$

До кожної поверхні кришок модулів інтегровано по 150 світлодіодів RGB, які споживають 9,6 Вт·год електроенергії. Отже, для забезпечення електроенергією освітлення 2 182 панелей протягом години роботи необхідно забезпечити живлення:

$$2182 \cdot 9,6 = 20,9 \text{ кВт·год.}$$

У цьому випадку оцінювання проводиться з урахуванням того, що панель працює на повній потужності. Таким чином можна оцінити роботу EDP в умовах максимального споживання електроенергії та зробити висновки щодо її електричної продуктивності.

Кожна панель EDP має нагрівальний елемент потужністю 2,5 Вт. Отже, щоб нагрівальні елементи 2182 панелей могли працювати протягом години, потрібна потужність:

$$2182 \cdot 0,025 = 54,55 \text{ кВт} .$$

Відповідно, в зимові місяці ділянка дороги, що генерує 100 кВт електроенергії, в темний час доби буде споживати за одну годину роботи:

$$54,55 + 20,9 = 75,45 \text{ кВт} \cdot \text{год} .$$

За результатом отриманих даних потужність на обраній ділянці дороги оцінюється приблизно в 24 кВт·год. Звичайно, оскільки інтенсивність руху на різних дорогах відрізняється, це досить приблизне значення. Однак у випадку п'єзоелектричних елементів інтенсивність руху безпосередньо визначає кількість електроенергії, яку можуть генерувати панелі EDP. З огляду на таку невизначеність та припущення пропонується не враховувати електроенергію, що генерується п'єзоелектричними елементами.

Проведені розрахунки є орієнтовними (оціночними) і демонструють потенціал EDP на дорогах. На основі результатів розрахунків, можна розрахувати довільну ділянку.

Беручі весь наш маршрут, з вилученням ділянки з великим ухилом, дорога з чотирма смугами руху шириною 12 м. При довжині 13 км матиме ≈ 85800 панелей. Ця кількість здатна генерувати 13МВт·год, при цьому 9,88 МВт·год буде витрачатися на власні потреби (оцінка для зимової пори року), а 3,12 МВт·год – іншими споживачами. Тобто така ділянка ЕДП здатна генерувати за один день близько $\sim 74,9$ МВт електроенергії.

3.3 Розрахунок отриманої потужності від панелей на павільйонах зупиночних пунктів

Один із важливих моментів концепції є зупинки транспорту з сонячними панелями на даху. Це вигідний варіант, який поєднує в собі міську інфраструктуру та відновлювальні джерела енергії.

Отримана енергія від зупинок, використовується для роботи самої зупинки, а надлишок йде в акумулятивні батареї. Використання енергії для живлення зупинки передбачає собою освітлення, систему відеоспостереження, електронне табло з розкладом руху та USB-порти для заряджання мобільних пристроїв.

Вагома перевага зупинок такого типу в їхній енергетичній автономності. Вони не потребують живлення із загальної мережі, а також виступають як пункти підзарядки для населення під час екстрених або аварійних відключень світла.

Вибір фотоелектричних модулів для зупиночних пунктів відповідно кількості панелей створювався з урахуванням розмірів павільйону зупинки, який визначається пасажирообміном (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Вибір фотоелектричних модулів для зупиночних пунктів

Зупинки з максимальною кількістю панелей	«ст.м. «Індустріальна» , ст. м. Тракторний завод, вул. Северин Потоцький, вул. Санкт-Вістлер , ст.м. Масельського , вул. Автогенна , зупинка на вимогу, вул. Немишлянская , вул. Єдності, вул.Амосова, Салтовське шосе, Парк Перемоги , пр. Ювілей, вул. Василь Стус, вул. Владислава Зубенка, Сади, вул.Валентиновська ,606 м/р, Регіональний сервісний центр, вул. Бучма, вул. Рудникова , вул.Ради України, вул. Метробудівників, вул. Наталії Ужвій»
Зупинки з малою кількість панелей	«Поліклініка №18, пр. Індустріальний, вул. Бекетова, вул. Миру, вул.12 квітня, вул. Бібліка, Полілініка №11, 531 м/р»

При огляді місцевості обрано два типу зупинок. Розумні зупинка з двома панелями на даху (рис. 3.3) та зупиночні павільйони з 16 панелями (рис. 3.4).



Рисунок 3.3 – Зупинка з двома панелями

Перший тип це зупинки які будуть отримувати енергію тільки для особистого забезпечення. В них буде встановлене освітлення та місця для підзарядки гаджеті. На даху встановлені дві сонячні панель Solar board 550Вт. Сонячна панель потужністю 550 Вт належить до класу великоформатних монокристалічних модулів нового покоління. Такі панелі використовують технологію PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) або TOPCon, що дозволяє досягти вищого ККД порівняно зі стандартними полікристалічними аналогами.

Отримана потужність з панелей [18]:

$$P = 2 \cdot 550 = 1\,100 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

На день фотопанелі вироблятимуть:

$$E_d = P \cdot t_d, \quad (3.3)$$

де t_d – кількість сонячних годин на за світловий день, МВт·год :

$$E_d = 1100 \cdot 8 = 8\,800 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Розрахунок ефективності фотосистеми з втратами в інверторі та врахування втрати потужності становить

$$E_d = 8800 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,78 = 4\,118 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

На рік виробництво електроенергії становить:

$$E_p = 4118 \cdot 365 = 1\,503 \text{ кВт}\cdot\text{год на рік.}$$

Загальна кількість павільйонів 16 враховуючі обидві сторін дороги. Всі зупинки разом згенерують :

$$A = 1\,503 \cdot 16 = 24\,048 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Для розрахунку АКБ взято ділянку дороги в 1км, вздовж маршруту на цю ділянку ≈ 2 зупинку, що ≈ 4 павільйони на 1 км.

Загальна потужність цієї ділянки на день:

$$E_{\text{діл}} = 24,55 \cdot 8 \cdot 10 + 4,12 \cdot 4 = 1\,980,48 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Для автономної роботи використовується коефіцієнт запасу $K = 1,2$:

$$E_{\text{АКБ}} = 1\,980,48 \cdot 1,2 = 2\,376,57 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Враховуємо параметри акумуляторної батареї для LiFePO_4 АКБ глибина розряду: $DOD = 0.8$, ККД АКБ: $\eta = 0.95$.

Ємність батареї встановимо з співвідношення:

$$C = \frac{E_{\text{АКБ}}}{DOD \cdot \eta} \quad (3.4)$$

Остаточний розрахунок АКБ надає:

$$C = \frac{2\,376,57}{0,8 \cdot 0,95} = 3\,168,76 \text{ А}\cdot\text{год.}$$

Отже для 4 сонячних зупинок та сонячної дороги довжиною 100 м необхідна загальна АКБ ємністю = 3 168,76 А·год.

Такою потужності достатньо для підтримування освітлення та уможлиблює невелику підзарядку для очікуючих пасажирів.



Рисунок 3.4 – Павільйон з 12 панелями

Таблиця 3.3 – Параметричні властивості фотоелектричних модулів

Параметричні властивості	Сонячна панель Solar board 550W
Тип фотомодулів	монокристалічні
Власна потужність, Вт	550
Ефективна складова перетворення енергії, %	21,5
Номінальний струм, А	13,3
Номінальна напруга, В	42
Напруга за розімкнутого контуру, В	50
Розміри, мм	2278 × 1134 × 30/35 мм
Маса, кг	32,2
Вартість, грн.	4390
Площа, м ²	2,7

Для великої зупинки випростовуються Jinko Tiger Neo JKM590N-72HL4-V 590 Вт, вони підходять для більших сонячних станції. Як і в минулому випадку чудовий показник ККД, що зробить можливим самозабезпечення та накопичення до АКБ (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Параметричні властивості фотоелектричних модулів

Параметричні властивості	Сонячна панель Jinko Tiger Neo JKM590N-72HL4-V
Тип фотомодулів	монокристалічні
Власна потужність, Вт	590
Ефективна складова перетворення енергії, %	21,68
Номінальний струм, А	13,5
Номінальна напруга, В	43,7
Напруга розімкнутого контуру, В	52,6
Розміри, мм	2278 × 1134 × 30 мм
Маса, кг	27.0

Вартість, грн.	4 750
Площа, м ²	2,5

Отримана потужність з панелей:

$$P = 12 \cdot 590 = 7\,080 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

На день панелі вироблятимуть:

$$E_d = 7\,080 \cdot 8 = 56\,640 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Розрахунок ефективності системи з втратами в інверторі та врахування втрати потужності

$$E_d = 75520 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,78 = 26\,507 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

На рік виробництво електроенергії становить:

$$E_p = 26\,507 \cdot 365 = 9\,675 \text{ кВт} \cdot \text{год на рік.}$$

Витрати на LED освітлення потужністю 60 Вт·год при роботі 12 годин на добу 0,7 кВт/год.

Порти USB видаватимуть 20 Вт. Якщо одночасно заряджаються 5 телефонів протягом 10 годин сумарно на день - 1 кВт·год.

WI-FI та інформаційне табло споживатимуть 40 Вт·год, тобто приблизно- 1 кВт·год.

Розрахунок залишку енергії яка подаватиметься в АКБ:

$$E_z = 26,5 - 0,7 - 1 - 1 = 23,8 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

На рік від системи вийде:

$$E_{pz} = 23,8 \cdot 365 = 8\,687 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Загальна кількість павільйонів 48 враховуючі обидві сторін дороги. Всі зупинки разом згенерують :

$$A = 8\,607 \cdot 48 = 416\,976 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Для розрахунку АКБ взято ділянку дороги в 1 км, вздовж маршруту на цю ділянку ≈ 2 зупинку, що ≈ 4 павільйони на 1 км.

Загальна потужність цієї ділянки на день:

$$E_{\text{діл}} = 24,55 \cdot 8 \cdot 10 + 23,8 \cdot 4 = 2\,059,2 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Для автономної роботи використаємо коефіцієнт запасу $K = 1,2$:

$$E_{\text{АКБ}} = 2\,059,2 \cdot 1,2 = 2\,471,04 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Враховуємо параметри акумуляторної батареї для LiFePO_4 АКБ глибина розряду: $DOD = 0,8$, ККД АКБ: $\eta = 0,95$.

Ємність батареї за формулою (3.4) надає остаточний розрахунок:

$$C = \frac{2\,471,04}{0,8 \cdot 0,95} = 3\,294,72 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Отже для 4 сонячних зупинок та сонячної дороги довжиною 100 м необхідна загальна АКБ ємністю = 3 294,72 А · год.

3.4 Генерування енергії фотоелектричними панелями на даху електробусів

Головним питанням є доцільність впровадження фотоелектричних панелей на обраному для перевезень електробусі Електрон Е19101, що є продуктом Львівського виробництва.

Розрахунок економії енергії за рахунок сонячних модулів, встановлених на «Elektron E19101» (загальна довжина 12 м, ширина 2,5 м) розглянуто у роботі [19]. З урахуванням розташування блоків електричного обладнання на даху електробуса (при певній конфігурації) за корисну площу для встановлення модулів приймається вільний простір за довжиною 10,5 м і за шириною 2,4 м (площа 25,2 м²).

Оскільки напруга сонячних фотопанелей повинна бути приведена у відповідність до напруги бортової мережі 24 В, розраховується максимальна потужність сонячних модулів на вільній площі даху електробуса, що визначена у 25,2 м².

Наразі на ринку доступні численні різні моделі сонячних панелей. З урахуванням розмірів даху електробуса «Electron E19101» (10,5 м × 2,4 м) для розрахунку використовуються технічні характеристики сонячної панелі Daranener SP200 (табл. 3.5). Ця панель є сучасним рішенням у сфері мобільної фотоелектрики та поєднує в собі високу ефективність, компактність і стійкість до зовнішніх впливів. У цій панелі використовується технологія покриття з ETFE. ETFE — це легкий, екологічний і високопрозорий матеріал, який пропускає більше сонячного світла до фотоелектричних елементів, тим самим підвищуючи енергоефективність. Крім того, покриття з ETFE забезпечує чудовий захист від екстремальних температур (високих і низьких), сильних вітрів, граду та сильних дощів, що значно подовжує термін експлуатації панелі та зменшує потреби в технічному обслуговуванні.

Таблиця 3.5 – Параметри фотоелектричних модулів для електробусу

Параметри	Daranener SP200
Тип фотомодулів	монокристалічні
Потужність, Вт	200
Ефективна складова перетворення енергії, %	22
Номинальний струм, А	5
Номинальна напруга, В	40
Напруга за розімкнутим контуром, В	48
Розміри, мм	2220 × 568 × 25
Маса, кг	6,2
Вартість, грн.	9 500

Отже, вздовж вільного простору даху кузова можна розташовувати по 5 сонячних модулів ($2\,220 \cdot 5 = 11\,100$ мм), а також повторювати 4 ряди ($568 \cdot 4 = 2\,272$ мм) у напрямку, перпендикулярному до кузова, загальна площа яких

становитиме $11,1 \cdot 2,24 = 24,86 \text{ м}^2$. Ця площа на $0,34 \text{ м}^2$ менша за встановлену норму $25,2 \text{ м}^2$ і може бути використана для кріплення панелей.

Оскільки вихідна потужність одного сонячного модуля становить 200 Вт , загальна потужність 20 модулів, які необхідно встановити на даху, при номінальній напрузі $V_{\text{ном}} = 40 \text{ В}$ та номінальному струмі $I_{\text{ном}}$ становитиме $200 \cdot 20 = 4\,000 \text{ Вт}$. При паралельному з'єднанні модулів подається струм $5 \cdot 20 = 100 \text{ А}$.

У сучасних автобусах та електробусах бортові системи низьковольтного живлення мають практично однакову конструкцію, а основними споживачами електроенергії є акумуляторні батареї (у режимі заряджання), сигнальні ліхтарі, гідравлічні насоси та електроприводи для відкривання дверей, склоочисники, а також системи управління та освітлення. Наразі потужність встановленого на транспортному засобі електрообладнання (електродвигуни, генератори) та електронних перетворювачів напруги знаходиться в діапазоні від $2,2$ до $5,0 \text{ кВт}$.

Отже, можна сказати, що 20 сонячних модулів *Daranener SP200* потужністю 4 кВт , встановлених на даху, частково забезпечують роботу всіх низьковольтних систем електробуса Електрон Е1910.

Оскільки згадані вище низьковольтні електричні пристрої не працюють одночасно, можна зменшити загальне споживання електроенергії, накопичуючи електроенергію, вироблену сонячними панелями, у тягових акумуляторах або надконденсаторах, а потім використовуючи цю накопичену енергію в режимі запуску за відсутності сонячного світла.

Таким чином, встановлення сонячних панелей на даху електробуса Електрон Е19101 дозволяє отримати додаткове джерело енергії потужністю до 4 кВт , що при 10 -годинній експлуатації на день забезпечує економію електроенергії в розмірі $4 \cdot 10 = 40 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Парк складається з 18 електробусів, а річний коефіцієнт використання становить $0,8$, економію електроенергії можна розрахувати за такою формулою:

$$E_{P_{\text{рiч}}} = n \cdot E_{\text{доб}} \cdot t_{\text{роб}} \cdot k_{\text{кл}} \cdot k_{\text{екв}}, \quad (3.5)$$

де $E_{P_{\text{рiч}}}$ – річний обсяг електроенергії, виробленої фотоелектричними панелями;

n – кількість електробусів, що взяті для розрахунку;

$E_{\text{доб}}$ – виробок електроенергії за добу, ($E_1 = 40$ кВт·год);

$t_{\text{роб}}$ – кількість днів роботи електробусу протягом року,

$k_{\text{кл}} = 0,6$ – коефіцієнт, що враховує кліматичні умови місцевості;

$k_{\text{екв}} = 0,8$ – коефіцієнт експлуатаційного використання рухомого складу.

Розрахунок економії електроенергії на маршруті електробуса 204 з урахуванням кількості рухомого складу у 18 РО надає:

$$E_p = 18 \cdot 40 \cdot 365 \cdot 0,6 \cdot 0,8 = 126\,144 \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

що є досить значним показником для вирішення завдань, пов'язаних з енергозбереженням.

Для розрахунку економії електроенергії, досягнутої завдяки використанню панелей Daganener SP200 на електробусі Електрон 19101, для обраного маршруту, протяжність якого в обидва кінці становить 29,9 км. Згідно з розкладом, транспортний засіб проїжджає в середньому 357,6 км на день.

Таким чином, щоденне споживання електроенергії електробусом становитиме:

$$P_{\text{сд}} = P_{\text{п}} \cdot L_{\text{проб}} = 1,1 \cdot 375 = 393,4 \text{ кВт}\cdot\text{год},$$

де $P_{\text{п}} = 1,1$ кВт·год питома витрата електроенергії на 1 км маршруту для електробуса Електрон Е19101;

$L_{\text{проб}}$ – сереньодобовий пробіг електробусу по маршруту, км.

Отже річний обсяг споживаної електроенергії визначатиметься за формулою:

$$P_{\text{рiч}} = n \cdot P_{\text{сд}} \cdot t_{\text{роб}} \cdot k_{\text{екв}}, \quad (3.6)$$

що в розрахунку становитиме:

$$\text{Річ} = 18 \cdot 393,4 \cdot 365 \cdot 0,8 = 2\,067\,710 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

При споживаній електроенергії електробусом Електрон Е19101 – 2 067 710 кВт·год економія електроенергії у разі встановлення фотоелектричних панелей Daranener SP200 буде дорівнювати 5,81 %.

З урахуванням усіх розрахунків визначимо загальну згенеровану енергію від запропонованої концепції застосування фотоелектричної технології для електробуса (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Загальний виробіток електроенергії

Концепція	Річний виробіток, МВт·год
Дорога з фотоелектричними модулями (ділянка 1 км)	2 047 653,65
Сонячні зупинки №1 (2 панелі по 500 Вт)	24,048
Сонячна зупинки №2 (16 панелей по 615 Вт)	416,976
Фотоелектрична система депо	2792
Дах електробуса	126,14
Разом	2 051 012,814

За результатами проведених розрахунків сумарний річний виробіток електроенергії від запропонованої системи, що включає фотоелектричну систему депо, два типи сонячних зупинки громадського транспорту, сонячну дорогу довжиною 1 км та даху електробуса, становить близько 2 051 012,814 МВт·год на рік. Найбільшу генерацію забезпечує сонячна дорога. Сонячні зупинки виконують не лише функцію додаткового джерела електроенергії, а й демонструють можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії в міську транспортну

інфраструктуру. Отримана електроенергія може використовуватися для живлення інфраструктури електротранспорту, заряджання електробусів, освітлення та передачі надлишків у загальну електромережу (рис. 3.5).

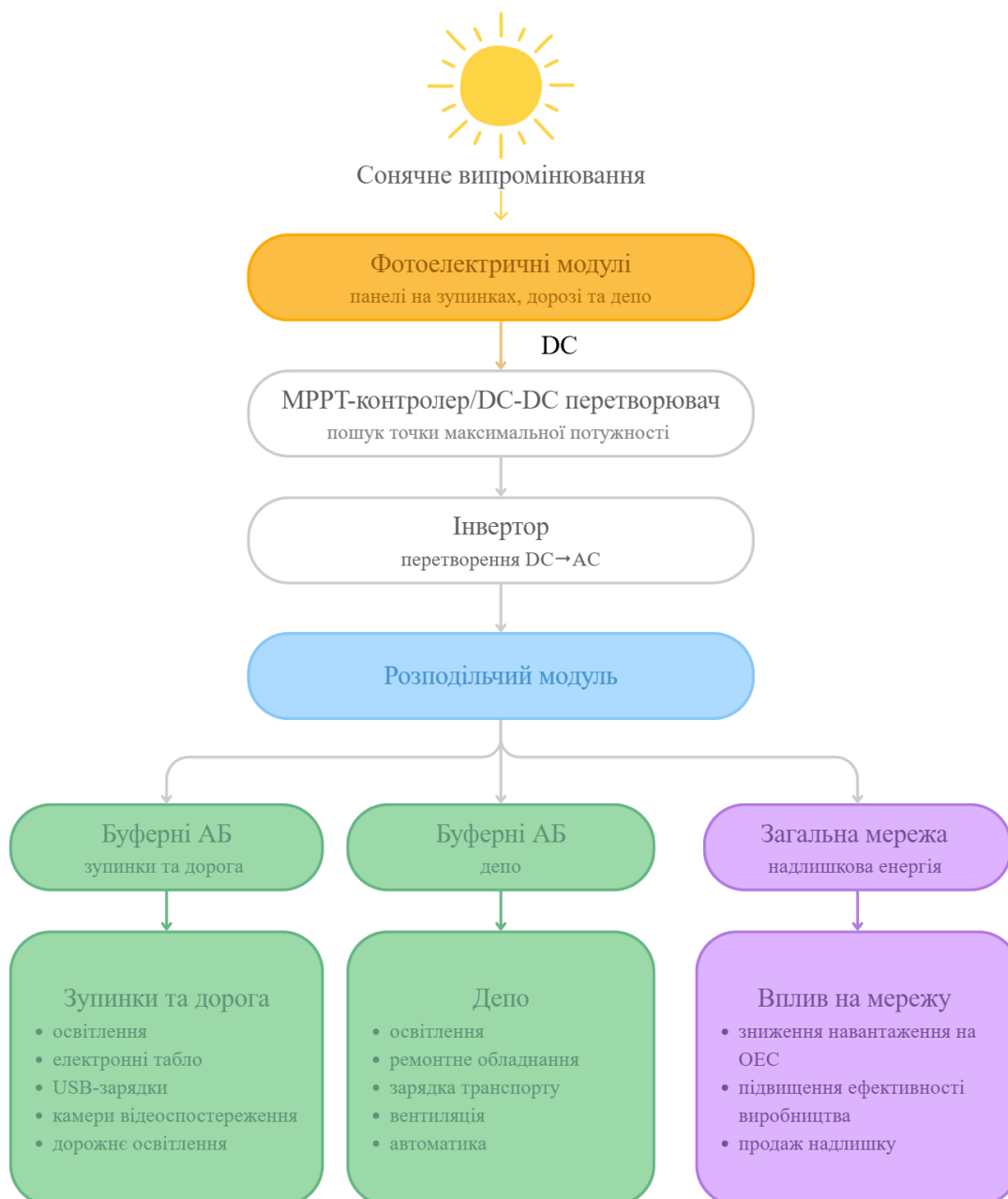


Рисунок 3.5 – Загальна схема виробітку енергії і способи її розподілення

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

Об'єктом дослідження в цьому розділі є технічний персонал, що буде обслуговувати систему впровадження електробусів із фотоелектричним живленням у місті Харкові. Система включає рухомий склад — електробуси, депо для їх технічного обслуговування та зберігання, систему заряджання, а також фотоелектричні установки, змонтовані на покрівлі депо та зупиночних павільйонах маршруту. Усі зазначені складові є потенційними джерелами небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть впливати на здоров'я та безпеку персоналу транспортного підприємства, а також пасажирів і пішоходів у зонах маршруту [23].

Особливістю є поєднання двох категорій виробничої небезпеки: традиційних ризиків міського електричного транспорту (висока напруга контактної мережі та тягових акумуляторів, механічні небезпеки рухомого складу) і специфічних ризиків фотоелектричних систем (постійна напруга до 48 В, що генерується навіть при слабкому освітленні, пожежонебезпека літій-залізо-фосфатних накопичувачів, роботи на висоті при обслуговуванні панелей). За статистикою, електротравми складають близько 8–10% від загальної кількості травмування на підприємствах міського електричного транспорту України [24].

Основною метою є аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають при експлуатації фотоелектричних систем електробусів у депо та на маршруті, а також розробка конкретних організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці для всіх категорій персоналу транспортного підприємства.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Аналіз умов праці проводиться відповідно до «Державних санітарних норм та правил. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Небезпечні та шкідливі фактори систематизовано за групами відповідно до класифікатора [25].

Основним і найбільш небезпечним фізичним фактором при експлуатації електробусів є підвищена напруга в електричних ланцюгах. Акумуляторні батареї мають робочу напругу 400–600 В. Фотоелектричні панелі формують напругу до 48 В і є джерелом постійного струму, що не переривається навіть при мінімальному розсіяному освітленні. Відповідно до НПАОП 40.1-1.01-97 [26], будь-які роботи поблизу струмовідних частин, що перебувають під напругою, без їх відключення належать до категорії робіт підвищеної небезпеки та потребують особливих організаційних і технічних заходів захисту. Ураження електричним струмом є найбільш поширеною причиною виробничого травматизму на транспортних підприємствах і може призводити до летальних наслідків навіть при відносно малих значеннях струму (від 50 мА).

Підвищений рівень шуму та вібрації характерний для робочого місця водія електробуса та персоналу, що виконує технічне обслуговування рухомого складу в депо. Рівень шуму в кабіні водія під час руху може досягати 75–80 дБА, тоді як допустима норма для постійних робочих місць складає 60 дБА згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [27]. Тривалий вплив підвищеного шуму спричиняє порушення слуху, погіршення уваги та підвищення ризику помилкових дій водія. Вібрація від дорожніх нерівностей передається на крісло водія і при відсутності належної амортизації може стати причиною захворювань опорно-рухового апарату.

Пожежна небезпека є специфічним ризиком, пов'язаним із застосуванням акумуляторних батарей типу LiFePO₄. При тепловому розгоні (thermal runaway) — некерованому саморозігріві елементів батареї — виникає займання електроліту

та виділення токсичних газів. Небезпека підсилюється тим, що тепловий розгін може відбутися раптово, а температура горіння досягає 800–1000°C, що унеможливорює гасіння звичайними засобами пожежогасіння [28].

Становлять небезпеку і електромагнітні поля. Тягові електродвигуни, силова електроніка (інвертори, зарядні пристрої) та зарядні станції є джерелами електромагнітних полів у широкому діапазоні частот. Інвертори фотоелектричної системи депо генерують поля з частотами від одиниць кілогерц до кількох мегагерц. Тривалий вплив електромагнітних полів підвищеної інтенсивності може призводити до функціональних порушень нервової та серцево-судинної систем відповідно до ДСН 239-96 [29].

Мікрокліматичні умови впливають на виникнення потенційних небезпек. Обслуговування фотоелектричних панелей на покрівлі депо та зупиночних павільйонах виконується на відкритому повітрі, що пов'язане з впливом несприятливих метеорологічних умов протягом усього року. У літній період при роботі на покрівлі температура поверхонь панелей може перевищувати +60°C, у зимовий — існує ризик обмороження при виконанні технічних операцій на морозі. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99, роботи категорії Пб (середньої важкості) мають виконуватися при температурі повітря 17–19°C у холодний та 20–22°C у теплий сезон, що на відкритому повітрі потребує додаткових організаційних заходів.

Небезпеку становлять дії при роботі на висоті. Монтаж та обслуговування сонячних панелей на покрівлі депо та дахах зупиночних павільйонів відноситься до категорії робіт на висоті, оскільки висота покрівлі депо перевищує 4 м, а висота стандартного електробуса складає близько 3,4 м. Падіння з висоти є однією з провідних причин важкого та смертельного травматизму у виробничій сфері.

Психофізіологічні фактори. Праця водія електробуса є однією з найбільш нервово напружених у галузі міського транспорту: водій несе повну відповідальність за безпеку пасажирів, виконує роботу в умовах інтенсивного дорожнього руху, щоденно взаємодіє з великою кількістю людей і зазнає впливу монотонності при русі по фіксованому маршруту. Тривала нервово-психічна

напруженість підвищує ризик помилкових рішень за кермом та є фактором розвитку серцево-судинних захворювань.

За результатами аналізу встановлено, що найбільш значущими небезпечними та шкідливими факторами при реалізації проєкту є: ураження електричним струмом, пожежонебезпека акумуляторних батарей, вплив електромагнітних полів, несприятливий мікроклімат при роботі на відкритому повітрі, небезпека падіння з висоти при обслуговуванні фотоелектричних панелей та підвищена нервово-психічна напруженість водіїв. Для зниження впливу кожного з перелічених факторів розробляється комплекс організаційних і технічних заходів.

4.3 Організаційно-технічні заходи з забезпечення безпеки

Навчання та інструктажі з охорони праці. Відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05, весь персонал, що допускається до обслуговування електробусів, зарядних станцій та фотоелектричних систем, зобов'язаний пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці до початку самостійної роботи [29]. Водії електробусів проходять первинний інструктаж перед першим виїздом, повторний — не рідше одного разу на квартал, а також позаплановий інструктаж у разі зміни умов праці або після нещасного випадку. Технічний персонал депо, що обслуговує електрообладнання напругою вище 1000 В, допускається до роботи лише після присвоєння відповідної кваліфікаційної групи з електробезпеки: для персоналу, що обслуговує акумуляторні батареї та зарядні станції — не нижче III, для персоналу, що виконує оперативні перемикання — не нижче IV.

Організація безпечного ведення робіт. Технічне обслуговування та ремонт електробусів і зарядних станцій виконуються виключно після повного знеструмлення обладнання, встановлення попереджувальних плакатів «Не вмикати! Працюють люди» та заземлення струмовідних частин відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.01-97 [26]. Обслуговування фотоелектричних панелей організовується в ранкові або вечірні години зі зниженою інтенсивністю

сонячного випромінювання для мінімізації генерованої напруги. Роботи на покрівлі та дахах зупиночних павільйонів виконуються бригадою у складі не менше двох осіб з обов'язковим призначенням відповідального за безпеку. Перед початком робіт на висоті складається наряд-допуск із зазначенням усіх заходів безпеки, переліку засобів захисту та відповідальних осіб.

Встановлення кваліфікаційних вимог до персоналу. До керування електробусом допускаються особи, які отримали відповідну категорію водійського посвідчення, пройшли медичне обстеження та отримали допуск до роботи відповідно до вимог НПАОП 60.2-1.01-06 [30]. Обов'язковим є щозмінний передрейсовий медичний огляд водіїв: особи у стані алкогольного або наркотичного сп'яніння, з підвищеним артеріальним тиском або у хворобливому стані до керування транспортним засобом не допускаються. Технічний персонал, що виконує монтаж і обслуговування фотоелектричних систем, повинен пройти спеціальне навчання з особливостей роботи з обладнанням постійного струму.

Забезпечення засобами індивідуального захисту. Персонал, що обслуговує електрообладнання в депо, забезпечується діелектричними рукавичками (клас 0 для мереж до 1000 В), діелектричними калошами, захисними окулярами та спецодягом із негорючих матеріалів. Персонал, що виконує роботи на висоті, оснащується страхувальними поясами, анкерними пристроями та захисними касками. При виконанні робіт у зонах маршруту поблизу проїзної частини застосовуються сигнальні жилети підвищеної видимості класу 3 відповідно до ДСТУ EN 471 [32]. При роботі на покрівлі в літній сезон видаються засоби захисту від сонячного опромінення.

Раціональний режим праці та відпочинку. Для водіїв електробусів встановлюється тривалість робочої зміни не більше 8 годин з обов'язковою перервою на відпочинок та харчування не менше 30 хвилин у середині зміни. При добовій тривалості роботи понад 8 годин вводяться додаткові перерви по 10–15 хвилин. Персонал, що виконує роботи на відкритому повітрі при температурі нижче -10°C або вище $+30^{\circ}\text{C}$, отримує регламентовані перерви для обігрівання або

оохолодження тривалістю не менше 10 хвилин кожні 2 години відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [27].

Застосування знаків та кольорів безпеки. На всій території депо встановлюються знаки безпеки відповідно до ДСТУ ISO 7010: знаки заборони («Не вмикати!», «Вхід стороннім заборонено»), знаки попередження («Обережно, електрична напруга!», «Обережно, навантаження, що рухається»), знаки приписування («Обов'язково використовуй засоби захисту»). Зарядні станції та електрощитові позначаються жовто-чорними попереджувальними смугами по периметру небезпечних зон.

Забезпечення електробезпеки. Відповідно до вимог ПУЕ [10] та ДСТУ EN 61140:2019, усе електрообладнання депо та зарядних станцій виконується з надійним захисним заземленням за системою TN-S, де нульовий захисний (PE) та нульовий робочий (N) провідники розведені по всій мережі. Опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати 4 Ом для мереж 380/220 В. Для захисту від ураження електричним струмом при непрямому торканні встановлюються пристрої захисного відключення (ПЗВ) з номінальним відключаючим струмом витоку не більше 30 мА та часом відключення не більше 0,04 с. Зарядні порти та розетки для підключення електробусів оснащуються захисними кришками з ступенем захисту не нижче IP44. Увімкнення зарядного з'єднувача можливе лише після фізичного з'єднання роз'єму, що виключає іскроутворення у відкритому просторі.

Захист від пожежної небезпеки АКБ. Відсіки акумуляторних батарей електробусів обладнуються системою управління батареями (BMS), яка здійснює безперервний контроль температури, напруги та струму кожного елемента і при досягненні критичних значень автоматично відключає батарею від навантаження і зарядного пристрою. Зарядна зона депо виділяється в окреме приміщення з посиленою вентиляцією — кратністю повітрообміну не менше 5 об'ємів приміщення на годину — для запобігання накопиченню водню до вибухонебезпечної концентрації. У зарядній зоні встановлюються вуглекислотні

вогнегасники ВВК-5 (не менше 4 штук) та автоматична система пожежної сигналізації з тепловими та димовими датчиками.

Захист від небезпеки падіння з висоти. На покрівлі депо, де розміщені панелі, по периметру встановлюються постійні огорожувальні поручні висотою не менше 1,0 м. Доступ на покрівлю здійснюється через стаціонарні сходи із ухилом не більше 60° та захисними дугами. Для переміщення між рядами панелей на покрівлі встановлюються стаціонарні анкерні лінії, до яких приєднуються страхувальні пояси типу HALT з амортизатором. Обслуговування панелей на дахах зупиночних павільйонів виконується лише з використанням пересувних риштувань або телескопічних вишок-сходів, що забезпечують стійке робоче місце.

Захист від електромагнітних полів та шуму. Силові інвертори фотоелектричної системи депо та зарядні пристрої розміщуються в металевих шафах із ступенем екранування не менше 30 дБ у діапазоні 10 кГц — 1 МГц, що забезпечує відповідність рівнів електромагнітного поля у робочих зонах вимогам ДСН 239-96 [29]. Для зниження рівня шуму в кабіні водія електробус оснащується звукопоглинальним облицюванням панелі приладів і перегородки між кабіною і салоном із матеріалів із коефіцієнтом звукопоглинання не менше 0,6, що дозволяє знизити рівень шуму до нормативного значення 60 дБА.

Освітленість робочих зон депо. Освітленість у приміщеннях депо для технічного обслуговування має складати не менше 300 лк на рівні підлоги та 500 лк у зонах виконання точних технічних операцій (оглядові ями, стенди налагодження). Для забезпечення нормованої освітленості встановлюються LED-світильники з індексом кольоропередачі $R_a \geq 80$, що забезпечують рівномірне освітлення без стробоскопічного ефекту. Аварійне евакуаційне освітлення з автономним живленням від акумуляторів забезпечує освітленість не менше 1 лк по всіх евакуаційних шляхах протягом не менше 1 години.

Безпека при роботі на маршруті. Зупиночні павільйони, обладнані фотоелектричними панелями та зарядними пристроями, мають ступінь захисту оболонки обладнання не нижче IP65 та захисні огороження, що виключають доступ пасажирів до кабельних з'єднань і розподільчих шаф. Кабелі від панелей до акумуляторів зупиночного павільйону прокладаються у захисних гофрованих трубах або в підземних кабельних каналах на глибині не менше 0,7 м. Роботи з обслуговування фотоелектричних установок на зупинках виконуються із застосуванням дорожнього огороження — конусів та знаку «Дорожні роботи» — на відстані не менше 50 м від місця робіт у напрямку руху транспорту відповідно до НПАОП 60.2-1.01-06[30].

4.3.1 Розрахунок захисного заземлення зарядної станції електробуса

Зарядна станція електробуса встановлюється на відкритому майданчику депо та підключається до трифазної мережі змінного струму напругою 380/220 В із глухозаземленою нейтраллю за схемою TN-S. Номінальна потужність зарядної станції — 150 кВт. Відповідно до вимог ПУЕ [33] та ДСТУ 7237:2011 [34], нормативно допустимий опір заземлювального пристрою для електроустановок напругою до 1000 В із глухозаземленою нейтраллю становить $R_n = 4$ Ом.

Ґрунт на майданчику — суглинок вологий. Питомий опір ґрунту $\rho = 100$ Ом·м (за таблицями нормативних довідників для суглинку при нормальній вологості). Сезонний коефіцієнт для вертикальних заземлювачів $\psi_1 = 1,4$, для горизонтального з'єднувального провідника $\psi_2 = 3,5$ (кліматична зона II, місто Харків) [33].

Конструкція заземлювача: вертикальні стрижньові заземлювачі зі сталевого круглого прокату діаметром $d = 16$ мм, довжиною $l = 3$ м, заглиблені так, що верхній торець стрижня знаходиться на глибині $t_0 = 0,7$ м від поверхні землі. Відстань від поверхні до середини стрижня:

$$t = t_0 + \frac{1}{2} ; \quad (4.1)$$

$$t = 0,7 + 1,5 = 2,2 \text{ м.}$$

З'єднувальний горизонтальний провідник — смугова сталь 40×4 мм, прокладена на глибині 0,7 м від поверхні землі.

Розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикальних заземлювачів з урахуванням сезонного коефіцієнта:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \rho \cdot \psi_1; \\ \rho_1 &= 100 \cdot 1,4 = 140 \text{ Ом}\cdot\text{м.} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Опір розтіканню струму одиночного вертикального стрижньового заземлювача визначається за формулою [33]:

$$R_B = \left(\frac{\rho^1}{2\pi l} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4t+l}{4t-l} \right) \right],$$

де $l = 3$ м — довжина стрижня, м;

$d = 0,016$ м — діаметр стрижня, м;

$t = 2,2$ м — відстань від поверхні до середини стрижня.

Підставляємо числові значення:

$$\begin{aligned} R_B &= \left(\frac{140}{2 \times 3,14 \times 3} \right) \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,016} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 2,2 + 3}{4 \cdot 2,2 - 3} \right) \right] = 7,43 \cdot \left[\ln(375) + \right. \\ &\quad \left. 0,5 \cdot \ln \left(\frac{11,8}{5,8} \right) \right] = \\ &= 7,43 \cdot [5,927 + 0,5 \cdot 0,709] = 7,43 \cdot 6,282 = 46,7 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Попередня кількість вертикальних заземлювачів (без урахування взаємного екранування):

$$\begin{aligned} n' &= \frac{R_B}{R_H}; \\ n' &= \frac{46,7}{4} \approx 12 \text{ шт.} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Приймаємо розміщення заземлювачів у ряд з відстанню між ними $a = 3$ м, що відповідає відношенню $a/l = 1$. За таблицями ПУЕ для $n \approx 12$ стрижнів при $a/l = 1$ коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів $\eta_B = 0,56$.

Уточнена кількість вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта використання:

$$n = \frac{n'}{\eta_B}, \quad (4.4)$$

$$n = \frac{12}{0,56} \approx 21,4 \rightarrow n = 22 \text{ шт.}$$

Довжина горизонтального з'єднувального провідника при розміщенні 22 стрижнів у ряд з кроком $a = 3$ м:

$$L_\Gamma = a \cdot (n - 1); \quad (4.5)$$

$$L_\Gamma = 3 \cdot (22 - 1) = 63 \text{ м.}$$

Розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтального провідника:

$$\rho_2 = 100 \cdot 3,5 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Опір горизонтального з'єднувального провідника [3]:

$$R_\Gamma = \left(\frac{\rho^2}{2\pi L_\Gamma} \right) \cdot \ln \left(\frac{2L_\Gamma^2}{(b \cdot t)} \right), \quad (4.6)$$

де $b = 0,04$ м — ширина смуги, м;

$t = 0,7$ м — глибина закладання, м.

$$R_\Gamma = \left(\frac{350}{2 \cdot 3,14 \cdot 63} \right) \cdot \ln \left(2 \cdot \frac{63^2}{0,04 \cdot 0,7} \right) = 0,884 \cdot \ln(283\,500) = 0,884 \cdot 12,555 = 11,1 \text{ Ом.}$$

Для $n = 22$ заземлювачів при $\frac{a}{l} = 1$ коефіцієнт використання горизонтального провідника $\eta_\Gamma = 0,36$. Опір горизонтального провідника з урахуванням коефіцієнта використання:

$$R_{\Gamma. \text{ розр}} = \frac{R_\Gamma}{\eta_\Gamma}; \quad (4.7)$$

$$R_{\Gamma. \text{ розр}} = \frac{11,1}{0,36} = 30,8 \text{ Ом.}$$

Опір паралельно з'єднаних вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта використання:

$$R_{\text{в. пар}} = \frac{R_{\text{в}}}{n \cdot \eta_{\text{в}}}; \quad (4.8)$$

$$R_{\text{в. пар}} = \frac{46,7}{22 \cdot 0,56} = \frac{46,7}{12,32} = 3,79 \text{ Ом.}$$

Результуючий опір заземлювального пристрою, що складається з вертикальних заземлювачів та горизонтального з'єднувального провідника, з'єднаних паралельно.

Перевірка умови: отриманий опір заземлювального пристрою $R_{\text{зп}} = 3,37 \text{ Ом}$ не перевищує нормативно допустимого значення $R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом}$, що відповідає вимогам ПУЕ та ДСТУ EN 61140:2019 [32]:

$$R_{\text{зп}} = 3,37 \text{ Ом} < R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом} \text{ — умова виконується.}$$

Таким чином, для забезпечення захисного заземлення зарядної станції електробуса необхідно встановити 22 вертикальних стрижньових заземлювачі ($\text{Ø}16 \text{ мм}$, $l = 3 \text{ м}$) у ряд з кроком 3 м, з'єднаних горизонтальним провідником зі смугової сталі $40 \times 4 \text{ мм}$ завдовжки 63 м. Заземлювачі заглиблюються до позначки 0,7 м від поверхні землі. Розрахований опір заземлювального пристрою $R_{\text{зп}} = 3,37 \text{ Ом}$ забезпечує надійний захист персоналу від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції зарядного обладнання.

4.4 Висновки за розділом 4

У розділі «Охорона праці» проведено аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають при реалізації концепції впровадження електробусів із фотоелектричним живленням у місті Харкові. Встановлено, що пріоритетними небезпеками є: ураження електричним струмом від фотоелектричних установок (до 48 В постійного струму), пожежна небезпека акумуляторних батарей LiFePO_4 , небезпека падіння з висоти при обслуговуванні панелей, вплив електромагнітних полів від силової електроніки, несприятливий

мікроклімат при роботах на відкритому повітрі та підвищена нервово-психічна напруженість водіїв .

Для забезпечення безпечних умов праці запропоновано комплекс організаційних заходів: систему навчання та інструктажів відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05, встановлення кваліфікаційних вимог до персоналу (групи електробезпеки III–IV), обов'язковий передрейсовий медичний огляд водіїв, забезпечення всіх категорій персоналу засобами індивідуального захисту згідно з нормами, регламентація виконання робіт на висоті через систему нарядів-допусків, а також нанесення відповідної сигнальної розмітки і знаків безпеки на всій території депо та в зонах маршруту.

Серед технічних заходів передбачено: захисне заземлення всього електрообладнання за системою TN-S з опором не більше 4 Ом та встановлення ПЗВ з порогом відключення 30 мА, обладнання акумуляторних відсіків системами BMS та автоматичного пожежогасіння, посилену вентиляцію зарядної зони депо (5 об'ємів/год), встановлення постійних огорожень і страхувальних анкерних ліній на покрівлі депо, екранування джерел електромагнітних полів, а також забезпечення нормованої освітленості робочих зон (300–500 лк) і захист зупиночної інфраструктури від несанкціонованого доступу пасажирів.

Реалізація запропонованих заходів у комплексі забезпечить безпечні умови праці для водіїв, технічного персоналу депо та бригад обслуговування фотоелектричних систем на маршруті, відповідає чинному законодавству України з охорони праці та безпеки на міському електричному транспорті.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасного стану впровадження електробусів у системі міського транспорту та розглянуто перспективи розвитку електротранспорту в місті Харкові. Досліджено особливості використання фотоелектричних технологій для забезпечення потреб електробусних маршрутів. Запропоновано загальну концепцію використання сонячної енергії шляхом розміщення фотоелектричних панелей на території депо, зупинкових павільйонах, енергоощадному дорожньому покритті та на даху електробусів.

2. Виконано аналіз обраного маршруту № 204 та здійснено вибір електробуса Електрон, технічні характеристики якого відповідають умовам експлуатації на маршруті. Розглянуто можливі варіанти збору сонячної енергії та запропоновано технічне рішення для підвищення ефективності роботи фотоелектричних на підставі використання локального МРРТ-керування, що дозволяє зменшити втрати потужності при частковому затіненні панелей та підвищити загальний коефіцієнт корисної дії фотоелектричної системи.

3. Виконано розрахунок генерованої потужності від усіх елементів запропонованої концепції. Проведено визначення виробітку електроенергії фотоелектричними панелями, розташованими на території депо, на павільйонах зупиночних пунктів та на енергоощадному дорожньому покритті. Також розглянуто можливість використання фотоелектричних панелей на даху електробуса, як додаткового джерела енергії для живлення допоміжних систем транспортного засобу. За результатами розрахунків встановлено, що найбільший внесок у загальний виробіток електроенергії забезпечують фотоелектричні панелі, розміщені на ділянках доріг. Сумарний річний виробіток електроенергії, що становить близько 2 051 012 МВт·год, підтверджує доцільність впровадження запропонованої концепції для часткового забезпечення потреб маршруту електробуса та передачі надлишкової енергії до загальної електромережі.

4. У розділі «Охорона праці» розглянуто питання безпеки працівників під час монтажу, експлуатації та технічного обслуговування фотоелектричних систем. Проведено аналіз основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть виникати під час роботи з електротехнічним обладнанням та фотоелектричними модулями. Запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці та зниження ризику виникнення нещасних випадків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Концепція «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Режим доступу: <https://menr.gov.ua/news/34424.html> (дата звернення: 15.10.2024).
2. Choudhury et al. (2018) « Switched-Capacitor Converter-Based Multi-Port Converter Integrating Bidirectional PWM and Series-Resonant Converters for Standalone Photovoltaic Systems
3. Duarte i Ferreira (2016) «Energy harvesting on road pavements: state of the» art https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2019/20/mateconf_tran-set2019_06001/mateconf_tran-set2019_06001.html
4. Gao et al. (2017) «Bidirectional flyback based isolated-port submodule differential power processing optimizer for photovoltaic applications https://www.researchgate.net/publication/320891681_Bidirectional_flyback_based_isolated-port_submodule_differential_power_processing_optimizer_for_photovoltaic_applications
5. Аргун Щ. В. Електробуси – перспективний міський транспорт Харкова. Автомобільний транспорт, вип. 44, 2019. С. 59 – 65.
6. Башинська І. О. Розумна система міського пасажирського транспорту як складова Smart City: монографія // Башинська І.О., Філіппов В.Ю. – Харків: вид-во «Діса плюс», 2018. – 220 с. <http://dspace.opu.ua/xmlui/handle/123456789/8363>
7. Ефективність використання сонячних батарей для тролейбусу / Упоряд. Л. С. Іванов, Б. Ю. Мальцев – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 150 с. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/9519e2fc-581f-4753-ae71-70a7b05857ee/content>
8. Перспективні технології фотоелектричної сонячної енергетики. Режим доступу : <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky> (дата звернення: 1.10.2024).

9. Гнатов А. В., Ульянець О. А., Аргун Щ. В. Міський електробус з надшвидкою зарядкою. Друга всеукраїнська науково-практична конференція «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні»: тези доповідей] (17-18 березня 2016 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 112 с. – С. 43 – 44.

10. Franken & Meyer. The clean development mechanism, solid waste management and greenhouse gas emissions reduction: A case study of South Africa, 2014

http://www.scielo.org.za/scielo.php%3Fscript%3Dsci_abstract%26pid%3DS1021-447X2014000300007

11. Kawashima & Fujioka. Evaluation of the effect of rooftop photovoltaic systems on the urban thermal environment, 2008.

<https://lj.uwpress.org/content/39/1/21/tab-references>

12. Jewel et al., *Modeling and performance analysis of a submodule-level maximum power point tracking system for photovoltaic arrays*. 2016.

https://www.researchgate.net/publication/283784747_Gallium_Nitride_Based_Submodule_Integrated_Converters_for_High-Efficiency_Distributed_Maximum_Power_Point_Tracking_PV_Applications

13. Shekhar et al., 2015 Submodule-Level Differential Power Processing Subsystem for Photovoltaic Applications <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11880>

14. Н. Кульбашна, Н. Лукашова, В. Далека, В. Скуріхін. Шляхи підвищення енергоефективності електробусів за рахунок сучасних фотоелектричних технологій. Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. Харків : ХНУГХ ім. О. М. Бекетова, 2025, том 1. № 189(2025). С. 52-60.

<https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/en/article/view/6447>.

15. Маршрути міста Харків https://gortransport.kharkov.ua/city_routes/75/

16. Петренко А.І. Вступ до GRID-технологій в науці та освіті. – К.: Політехніка, 2008. – 175 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/566a2c0f-259d-4838-977e-0f37ba1eccaf/content>

17. US9906189B2. Resonant switched-capacitor gyrator-type converter with local MPPT capability for PV cells.

18. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : Підручник / С. О. Кудря. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.

19. Герасимов Є. Г., Герасимов Г. Г. Використання відновлювальних джерел енергії : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2023. 467 с. 24. Руденко Д. В., Васюченко П. В. Моделювання фізичних процесів роботи сонячних фотоелектричних батарей. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 30 (69) Ч. 2 № 2 2019. С. 42 – 47.

20. Методи розрахунку ресурсів поновлюваних джерел енергії: навчальний посібник / А.А. Бурмістров, В.І. Віссаріонов, Г.В. Дерюгіна, В.А. Кузнєцова, Д.Н. Кунакін, Н.К. Малінін, Р.В. Пугачов / Под ред. В.І. Віссаріонова. - М.: Видавничий Дім МЕІ; 2007 р. - 144 с. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b4f46f28-4308-4c29-bc7b-09df16034042/content>

21. Електрон Електронмаш <http://eltrans.electron.ua/electrobuses/>

22. Перетворення та акумулювання енергії відновлюваних джерел: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Бутько., М. О. Бутько, О. В. Козачук – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с. <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0057802.pdf>

23. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.

24. Звіт Державної служби України з питань праці про стан виробничого травматизму за 2024 рік. Київ: Держпраці, 2025. URL: <https://dsp.gov.ua>.

25. Данова К. В., Мороз М. О. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних проєктах бакалаврів спеціальності 141. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. 19 с.

26. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. Київ: Держнагляд охорони праці, 1997. 464 с.

27. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ: МОЗ України, 1999.

28. Правила пожежної безпеки в Україні: затверджені наказом МВС № 1417 від 30.12.2014. НАПБ Б.01.008-2004 Правила експлуатації вогнегасників. Київ, 2014.

29. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. Київ: МОЗ України, 1996.

30. НПАОП 60.2-1.01-06. Правила охорони праці на міському електричному транспорті. Київ, 2006. 178 с.

31. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. Київ, 2005.

32. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): затверджені наказом Міненергуюгільля № 476 від 21.07.2017. ДСТУ EN 61140:2019. Захист від ураження електричним струмом. Київ, 2017.

33. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): затверджені наказом Міненергуюгільля № 476 від 21.07.2017. Київ, 2017.

34. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. Київ, 2011.