

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт

Інженерія вбудованих систем

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

На тему: **«РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ СВІТЛОФОРМ ІЗ
ПРІОРИТЕТОМ ДЛЯ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ»**

Шифр: «TSP vehicle»

АНОТАЦІЯ

Конкурсна робота: 31 стор., 2 табл., 18 рис., 14 джерел.

НАЗЕМНИЙ ГРОМАДСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, АКТИВНИЙ СВІТЛОФОРНИЙ ПРІОРИТЕТ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАМВАЯ, АДАПТИВНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ СВІТЛОФОРОМ, ТЕМПОРАЛЬНИЙ КЕРУЮЧИЙ АВТОМАТ, ГІПЕРСТАН, МІКРОКОНТРОЛЕР ATSAME53, BLUETOOTH.

Об'єкт дослідження – перехрестя зі світлофорами та наземний громадський транспорт.

Предмет дослідження – моделі та методи динамічного керування світлофором для надання пріоритетного проїзду перехрестя наземним громадським транспортом.

Мета роботи – розробка адаптивної системи автоматичного керування в реальному часі світлофором для надання пріоритетного проїзду перехрестя наземним громадським транспортом з урахуванням його маршруту.

Результати роботи – отримана математична модель гальмування трамвая при під'їзді його до перехрестя та виконана перевірка її на адекватність, а також розроблена адаптивна модель керування світлофором в реальному часі для надання пріоритету для громадського транспорту. Отримані проєктні рішення з апаратної та програмної частин адаптивної системи автоматичного керування світлофором, в рамках яких описані схемотехнічні та конструкторські проєктні рішення апаратної частини системи, а також визначено дисципліну обслуговування маршрутних транспортних засобів, описана інформація про транспортний засіб, що надходить в реальному часі в систему, та розроблено алгоритм роботи системи.

Практична цінність – САК дозволить оптимізувати рух громадського транспорту на основі зменшення часової затримки маршрутних ТЗ на перехрестях, а в цілому, кількості рухомого складу, та підвищення регулярності руху і, тим самим, зменшити споживання енергоресурсів громадським транспортом за рахунок скорочення їх часу простою на перехрестях.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	4
Вступ.....	5
1 Теоретичні дослідження.....	6
1.1 Математична модель гальмування трамвая та перевірка її на адекватність	6
1.1.1 Опис математичної моделі рейкового міського транспортного засобу.....	7
1.1.2 Перевірка адекватності математичної моделі трамвая Tatra T3 ..	10
1.2 Адаптивна модель керування світлофором в реальному часі та надання пріоритету для громадського транспорту.....	14
2 Експериментальні дослідження.....	18
2.1 Проєктні рішення з апаратної частини адаптивної системи автоматичного керування світлофором	18
2.2 Проєктні рішення з програмної частини адаптивної системи автоматичного керування світлофором	24
2.2.1 Дисципліна обслуговування маршрутних транспортних засобів.	24
2.2.2 Інформація про маршрутний транспортний засіб та її представлення.....	26
2.2.3 Алгоритм роботи системи автоматичного керування світлофором	27
Висновки	29
Перелік джерел посилання.....	30

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

FSM – Finite State Machine;

TSP – Transit Signal Priority;

V2I – Vehicle to Infrastructure;

АСКДР – автоматизована система керування дорожнім рухом;

ГТ – громадський транспорт;

ГШ – гальмівний шлях;

ІТС – інформаційна транспортна система;

МК – мікроконтролер;

ММ – математична модель;

МТЗ – маршрутний транспортний засіб;

САК – система автоматичного керування;

СРЧ – система реального часу;

СБО – система багатьох одиниць;

ТА – темпоральний автомат.

ВСТУП

Із кожним роком в містах дедалі більша увага приділяється якісному переміщенню великої кількості людей. Правильно обрана транспортна стратегія міста – є однією із суттєвих складових, що дозволяють підвищити якість міського середовища. А ефективне використання енергоресурсів – це додаткова можливість істотно зменшити забруднення навколишнього середовища та вдосконалити транспортний сервіс.

На теперішній час ведеться активна модернізація транспортних систем переміщення великої кількості містян, пов'язана з підвищенням середньої швидкості, регулярності руху громадського транспорту та збільшенням частоти його курсування. І що завантаженішою є спільна ділянка маршрутів вуличного громадського транспорту або сам магістральний маршрут, то важливішим є вибір критерію, що визначає стратегію надання пріоритетного проїзду для маршрутних транспортних засобів. Наприклад, одним з найбільш популярних критеріїв керування є відповідність графіку руху розкладові. Інший підхід до вибору критерію передбачає зменшення затримки на людину для всіх транспортних засобів, що перетинатимуть перехрестя.

З метою оптимального розподілу часових ресурсів між транспортними ресурсами, необхідно виконати моделювання динаміки транспортного засобу що дозволить САК коректно розраховувати час його наближення до перехрестя та, за можливості, усунути необхідність повної зупинки. Це дозволить уникнути дуже високих пускових струмів або перевитрат палива для громадського транспорту, що разом із часовою ефективністю дозволить суттєво вдосконалити його енергоефективність.

Таким чином актуальною є розробка адаптивної системи автоматичного керування світлофором (світлофорним об'єктом) в реальному часі із пріоритетом для громадського транспорту, якою можуть бути доповнені наявні контролери світлофорів, що вдосконалисть якість сервісу надаваного міським громадським транспортом.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для адаптивної системи автоматичного керування (САК) світлофором із пріоритетом для громадського транспорту об'єктом керування є динамічний процес перемикання світлофора для надання активного пріоритетного проїзду перехрестя наземним громадським транспортом. На теперішній час рівень розробки САК обмежується розглядом окремого світлофора та його реакції на наближення маршрутного транспортного засобу (МТЗ) певного маршруту.

Системи автоматичного керування повинна своєчасним перемиканням світлофора надати пріоритет для проїзду перехрестя наземним громадським транспортом при його наближенні до світлофора. Це потребує для надання пріоритету узгодження часу під'їзду громадського транспорту до перехрестя та часу перемикання світлофора. При цьому необхідно враховувати те, що при під'їзді громадського транспорту (наприклад, трамвая) до перехрестя, з міркувань безпеки він завжди пригальмовує. Окрім цього, на моделі САК також можливо проведення експериментальних досліджень із визначення найбільш прийнятного закону керування світлофором. Вирішення зазначених задач потребує проведення експериментів на моделі САК, для чого необхідно отримати математичну модель гальмування МТЗ, наприклад, трамвая.

1.1 Математична модель гальмування трамвая та перевірка її на адекватність

Математична модель (ММ) є наближеним описом будь-якого природного або технологічного явища. Метод математичного моделювання є засобом пізнання зовнішнього світу, а також прогнозування та керування.

Моделювання передбачає дослідження властивостей певного об'єкта шляхом аналізу подібних властивостей іншого об'єкта, який є більш зручним для дослідження і має певну відповідність із першим об'єктом. В такому випадку

перший об'єкт є оригіналом, а другий – моделлю.

В цій роботі застосовується фізична модель транспортного засобу, де здійснюється заміна оригіналу на матеріальне тіло. Для реалізації САК світлофором достатньо виконати аналіз фізичної ММ повздовжньої динаміки руху МТЗ перш за все з метою визначення гальмівного шляху (ГШ).

1.1.1 Опис математичної моделі рейкового міського транспортного засобу

Задіяна ММ [1] передбачає безпосереднє моделювання динаміки руху рейкового міського МТЗ (трамвая), а саме Tatra T3.

Його основні характеристики, що визначають динаміку руху наведено у табл. 1.1 [2, 3].

Таблиця 1.1 - Значення динамічних характеристик трамвая Tatra T3

№ з/п	Характеристики	Значення
1	Максимальна швидкість порожнього вагона	65 км·год ⁻¹
2	Середнє вповільнення за службового гальмування	1,4 м·с ⁻²
3	Максимальне вповільнення за аварійного гальмування	3,5 – 4,0 м·с ⁻²
4	Маса порожнього вагона	18,1 т
5	Номінальна місткість вагона	100
6	Максимальна місткість вагона	145

Використана ММ визначає зусилля гальмування шляхом передачі обертового моменту двигуна під час електродинамічного гальмування на колеса, що потім впливає на лінійну динаміку руху трамвая. Вирази (1.1) та (1.2) визначають відповідно кутову та лінійну динаміку процесу гальмування трамвая.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\mu(v_s)Mg - [0,0147M + 125,83v(t)] - Mgsin \theta}{M}; \quad (1.1a)$$

$$v_s(t) = r\omega_{wh}(t) - v(t); \quad (1.1b)$$

$$\mu(v_s) = c_a e^{-a_a v_s} - d_a e^{-b_a v_s}, \quad (1.1b)$$

де $\mu(v_s)$ – коефіцієнт тертя між колесом та рейкою, що залежить від швидкості прокручування v_s ;

M – діюча маса вагона трамвая [кг];

θ – градієнт колії [рад];

$r\omega_{wh}(t)$ – лінійна швидкість обертання колеса рейкового МТЗ [м·с⁻¹];

$v(t)$ – лінійна швидкість поступального руху рейкового МТЗ [м·с⁻¹];

a_a, b_a, c_a, d_a , – параметри зчеплення, що залежать від погодних умов (табл. 2.1).

Таблиця 1.2 – Значення параметрів зчеплення [4] (зчеплення 0 означає ідеальні умови, а 3 – найгірші, як от ожеледиця або полій).

Зчеплення Параметр	0	1	2	3
a_a	0,54	0,54	0,54	0,05
b_a	1,2	1,2	1,2	0,5
c_a	1,0	0,2	0,1	0,08
d_a	1,0	0,2	0,1	0,08

$$\frac{d\omega_{wh}}{dt} = \frac{3e^{-3t}1176p - r \cdot \mu(v_s)Mg}{0,5m_{wh}r^2}, \quad (1.2)$$

де $p \in \{-7, -6, \dots, -1\}$ – позиція контролера тяги/гальмування (лише підмножина позицій гальмування);

r – радіус колеса трамвая [м];

m_{wh} – маса колеса трамвая [кг].

В рамках теоретичних досліджень динамічного процесу гальмування рейкового МТЗ було також розглянуто випадок системи багатьох одиниць (СБО), де двигуни кожного вагона керуються єдиним сигналом із головного вагона, відповідно зусилля гальмування рівномірно розподілені між всіма вагонами, що входять до складу СБО. Зрозуміло, що для СБО із абсолютно

однакових вагонів динаміка гальмування не відрізнятиметься від випадку одного вагона, проте для вагонів різної маси необхідне обчислення середньозваженого прискорення, яке б враховувало масу кожного вагона. Структурну схему моделі, створену у середовищі динамічного блокового моделювання Simulink наведено на рис. 1.1–1.2.

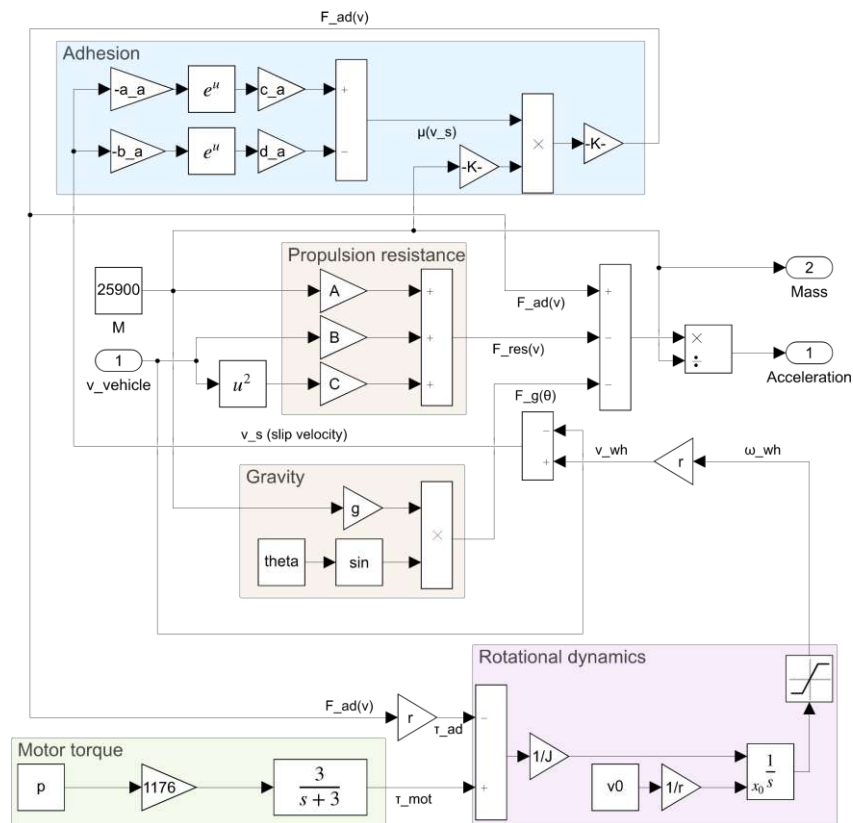


Рисунок 1.1 – Структурна схема ММ поздовжньої динаміки трамвайного вагона

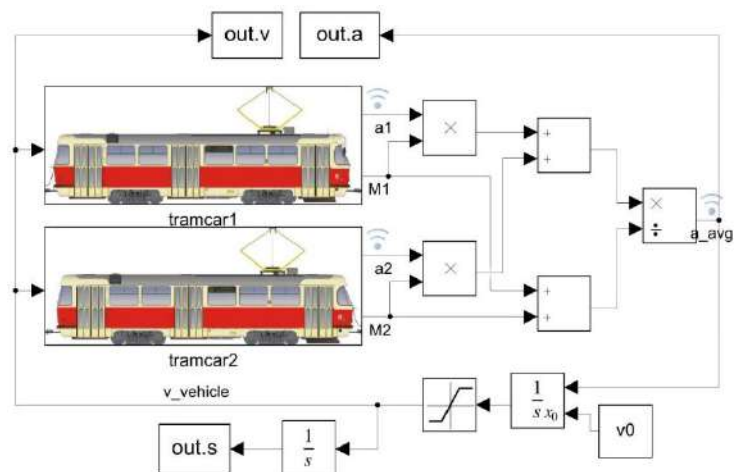


Рисунок 1.2 – Структурна схема ММ поздовжньої динаміки МТЗ (СБО)

1.1.2 Перевірка адекватности математичної моделі трамвая Tatra T3

Для можливості задіяння описаної ММ в адаптивній САК світлофором із пріоритетом для громадського транспорту, ця ММ має задовольняти умовам адекватности. Адекватність ММ є її здатністю описувати властивості оригіналу з похибкою, яка не перевищує задану. Невід’ємною умовою адекватности ММ є подібність моделі та оригіналу. Задіяна ММ характеризується повною подібністю, тобто суттєві для дослідження процеси є подібними в просторі й часі, а також із достатньою повнотою характеризують досліджуване явище стосовно конкретної постановки задачі дослідження.

Адекватність фізичної природи аналогічних явищ поділяють на математичну (відповідність схожих параметрів процесів різної фізичної природи) і фізичну (відповідність фізичної природи явищ). Для фізичної подібности виділяють кінематичну (подібність швидкостей і прискорень), матеріальну (подібність мас окремих елементів системи) і динамічну (подібність сил, що викликають рух) подібності, які разом утворюють механічну подібність.

Суттєвою складовою подібности для мети цього дослідження є механічна фізична подібність. Проаналізувавши етапи перевірки моделі [1], можна зробити висновок, що вона є придатною для оцінки гальмівного шляху об’єкта управління, оскільки відхилення пройденого шляху у 217 м не перевищує 10 м. Це відхилення переважно зумовлене похибкою інтегрування, оскільки вимірюваною характеристикою було прискорення (рис. 1.3).

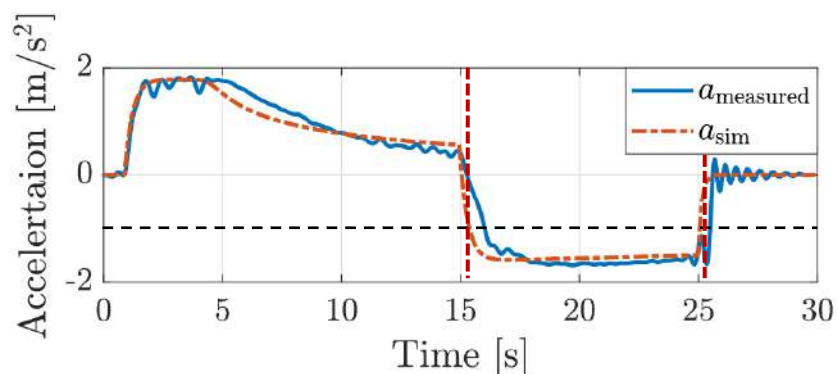


Рисунок 1.3 – Порівняння характеристик моделі та фактичних вимірювань для максимального прискорення й уповільнення

Червоним кольором відзначено найбільші миттєві абсолютні різниці значень уповільнення моделі та оригіналу ($\approx 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ та $\approx 1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

На рис. 1.4-1.5 наведено порівняння динаміки гальмування єдиного вагона та СБО для кількох значень мас (припускаючи, що кожен пасажир має масу 65 кг). Всі подальші динамічні характеристики отримані за максимального зусилля службового гальмування ($p = -7$).

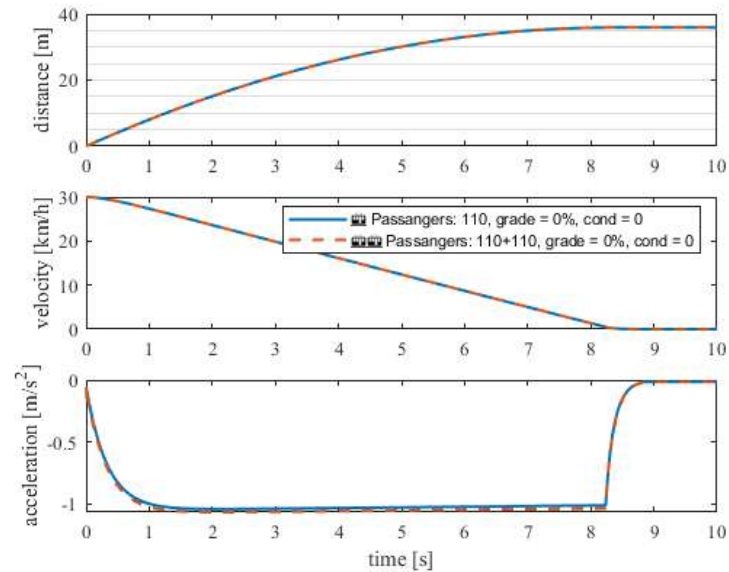


Рисунок 1.4 – Порівняння динамік гальмування вагона та СБО із вагонів із однаковими масами (ГШ = 36 м)

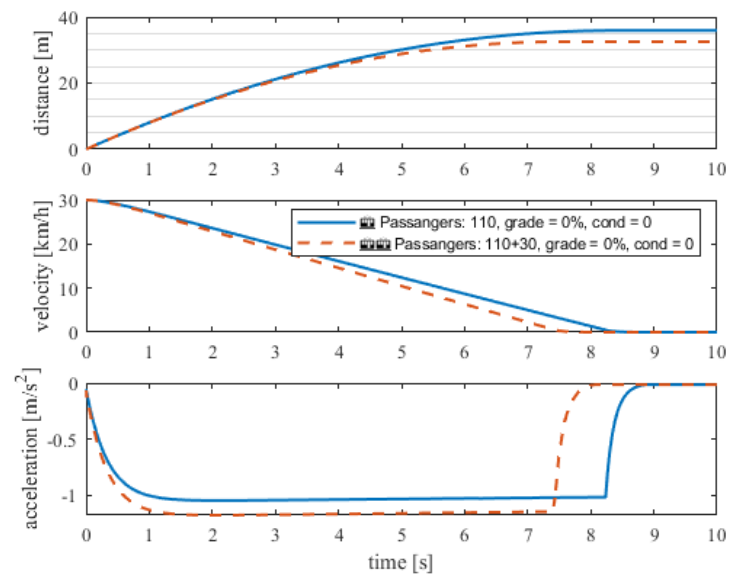


Рисунок 1.5 – Порівняння динаміки гальмування вагона та СБО вагонів із різними масами (ГШ₂ = 32 м)

На рис. 1.6 наведено вплив ухилу на динаміку гальмування трамвая. На спуску у 3% за ідеальних умов ГШ зростає на 15 м (50 м проти 35 м).

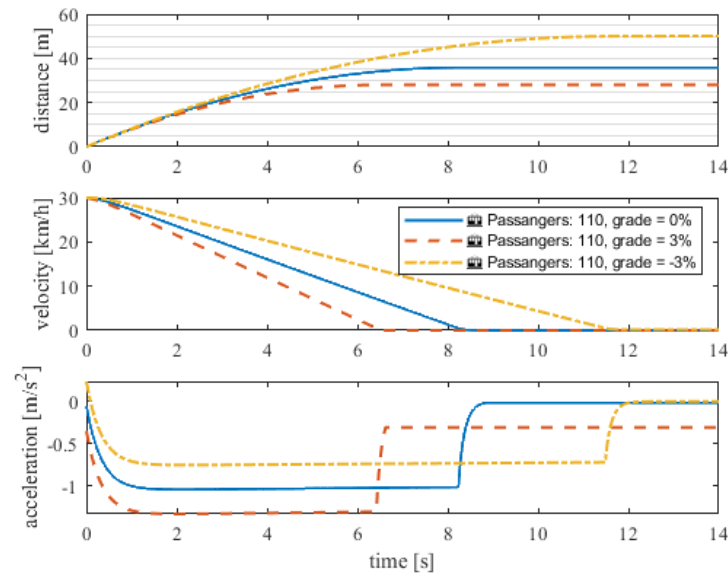


Рисунок 1.6 – Порівняння динаміки гальмування трамвая для різного ухилу колії

На рис. 1.7 наведено вплив погодних умов на динаміку гальмування трамвая. На рівній ділянці за найнесприятливіших умов зростання гальмівного шляху є незначним і становить менше 5 м, ГШ ≈ 37 м.

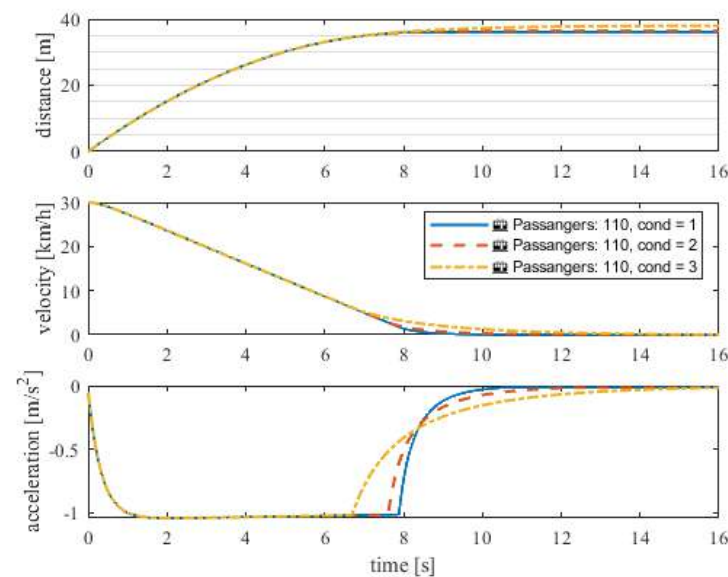


Рисунок 1.7 – Порівняння динаміки гальмування трамвая для різних умов зчеплення (табл. 1.2)

На рис. 1.8 наведено порівняння динаміки гальмування окремого вагона та СБО, що перевозить ту ж кількість пасажирів, розподілену між двома вагонами, на спуску у 5% за ідеальних погодних умов і за умов легкого снігу. Можна спостерігати, що різниця гальмівного шляху для різних погодних умов в процесі гальмування майже відсутня, а наростаюча різниця після $a = \text{const}$, зумовлена тим, що на такому крутому схилі зусиль службового гальмування вже недостатньо, і для повної зупинки із 4 км год^{-1} необхідно задіяти магнітнорейкове гальмо. Також з рис. 1.8 можна зробити висновок, що для СБО, яка перевозить ту ж кількість людей, ГШ буде відрізнятися приблизно на 20 м.

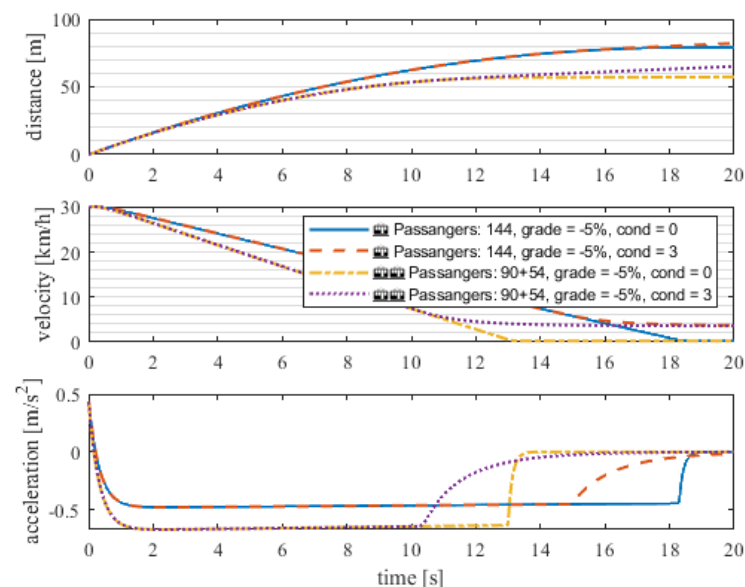


Рисунок 1.8 – Порівняння динаміки гальмування одного вагона та СБО на значному ухилі та за несприятливих погодних умов

Для всіх випадків абсолютне значення прискорення не перевищувало $1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$, що відповідає середньому вповільненню службового гальмування трамвая Tatra T3 (табл. 1.1).

Необхідно зазначити, що для визначення гальмівного шляху також необхідно враховувати час реакції водія, який складається з таких складових [5]:

- 1) виявлення: водій помічає об'єкт в полі зору;
- 2) ідентифікація: водій отримує якнайбільше інформації для ухвалення рішення;

3) рішення: водій вирішує, як відреагувати;

4) реакція: водій застосовує рішення.

У звіті [6] аналізується випадок зіткнення трамвая із пішоходом, і загальний час реакції водія за результатами дослідження становить 2,5 с, причому значну частину цього часу становить час визначення рішення (ввімкнути дзвінок, застосувати гальмування тощо). Це зумовлено надзвичайною ситуацією, що склалася. За звичайних умов, до яких належить наближення до світлофора, час реакції становитиме менше 1 с [7], тобто для початкової швидкості 30 км год^{-1} ($8,33 \text{ м с}^{-1}$) ГШ шлях збільшується приблизно на 8 м.

Кінцеве значення ГШ визначається за умов $\Delta v < \varepsilon$ та $v < v_1$, де v_1 гранична швидкість, за якої зростання ГШ не є значним, і для якої є припустимим застосування екстреного гальма (магнітнорейкового для трамвая).

1.2 Адаптивна модель керування світлофором в реальному часі та надання пріоритету для громадського транспорту

В цій науковій роботі об'єктом керування є динамічний процес перемикання світлофора для надання пріоритетного проїзду перехрестя наземним громадським транспортом. Модель [8] розроблена з урахуванням того, що заснована на ній адаптивна САК керуватиме стандартним світлофором Т5.х [9], який використовується для регулювання руху трамваїв та решти МТЗ, які рухаються виокремленими смугами. Зображення такого світлофора наведено на рис. 1.9.

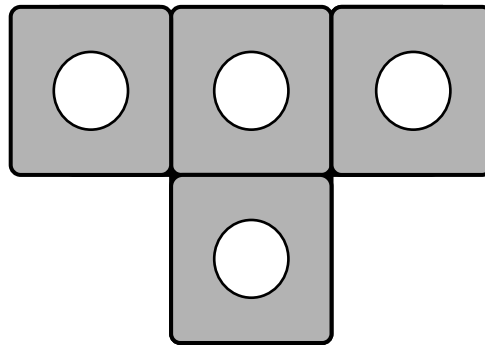


Рисунок 1.9 – Світлофор Т5.1 для МТЗ

Оскільки модель враховує маршрути трамваїв, що під'їжджають до перехрестя, то керуючі сигнали для них та для решти учасників дорожнього руху відрізнятимуться, тому обов'язковим є використання різних типів світлофорів для запобігання будь-яким неточностям.

На рис. 1.10 зображено можливі стани світлофора Т5, та спосіб, в який вони розподілені за режимами роботи світлофора всередині моделі так, що наближення трамвая однозначно визначить стан моделі для надання права пріоритетного проїзду.

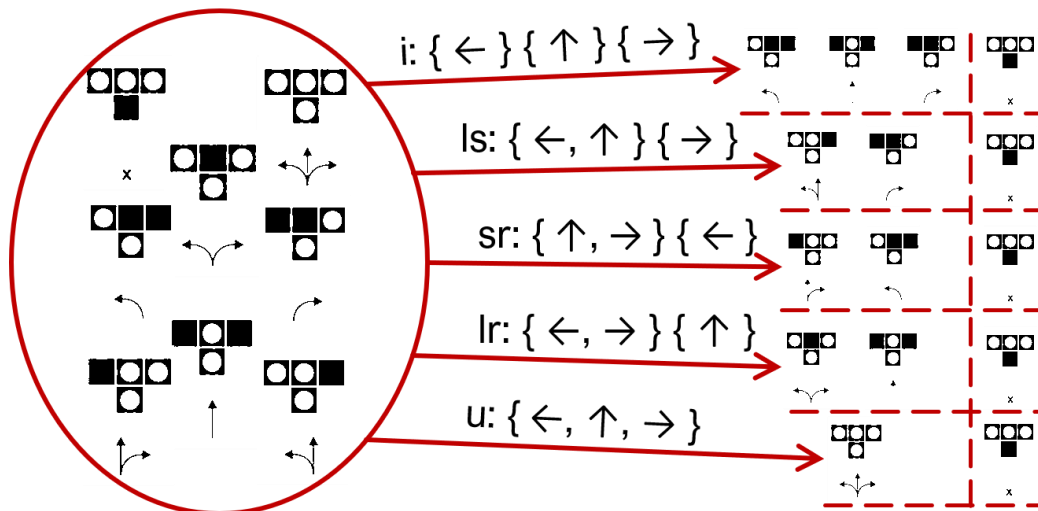


Рисунок 1.10 – Можливі стани світлофора Т5 та визначення режимів роботи

Оскільки надання права пріоритетного проїзду в усіх напрямках за виявлення МТЗ не є доцільним, а саме це має відбуватися в режимі *u* (*universal*), то перехід у нього визначається лише часовими параметрами, й не залежить від

сигналів МТЗ. На відміну від універсального режиму, в інших режимах переходи до кожного стану, який фактично є фазою світлофора, спрацьовують за наближення МТЗ.

Адаптивна модель в основному реалізує підхід «вставки фази» світлофорного пріоритету для громадського транспорту (TSP) та, можливо, «подовження зеленого» (рис. 1.11).

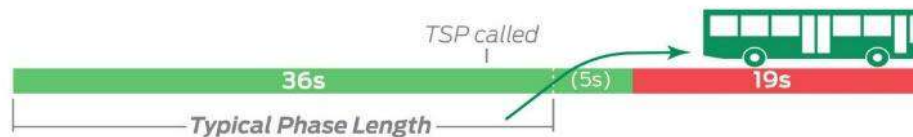


Рисунок 1.11 – Робота TSP, що реалізує підхід «подовження зеленого» [10]

Останній підхід є особливо корисним в універсальному режимі роботи світлофора або в інших режимах у випадку дуже звантажених місць із багатьма маршрутами. Підхід «подовження зеленого» запобігає затримці останнього з двох послідовних МТЗ на перехресті, якщо їм потрібно рухатись у напрямку, для якого вже ввімкнена дозвільна фаза попереднім МТЗ. Втім, у деяких випадках це може спричинити небажане скупчення МТЗ, чого неможливо уникнути без надійної інформації про графік.

В універсальному режимі це є менш проблематичним, оскільки фази світлофора керовані часом, в такому разі «подовження зеленого» просто надає МТЗ право пріоритетного проїзду. Навіть якщо він прибуде наприкінці дозвільної фази, йому буде надано кілька додаткових секунд, аби не чекати на наступний світлофорний цикл.

Адаптивна модель керування світлофором в реальному часі розроблена, використовуючи підхід темпоральних автоматів (ТА) [11]. Вони є розширенням скінченних автоматів (FSM) зі скінченням, але довільним числом таймерів у неперервному часі. Граф переходів керуючого ТА наведено на рис. 1.12.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблена адаптивна САК в реальному часі світлофором для надання пріоритетного проїзду перехрестя наземним громадським транспортом є апаратно-програмним комплексом. Апаратна частина системи є універсальною і забезпечує отримання даних від МТЗ в масштабі реального часу та взаємодію з усіма можливими конфігураціями світлофорів для перехрестя на чотири напрямки. В програмній частині системи реалізується закон керування світлофором на основі отриманої в реальному часі інформації від МТЗ, що наближається до перехрестя зі світлофором. Адаптивність керування світлофором полягає у своєчасному перемиканні світлофора для надання пріоритетного проїзду перехрестя наземним громадським транспортом на основі отриманої в реальному часі інформації від нього при його наближенні до перехрестя.

Заснований на теоретичних дослідження дослідницький зразок системи дозволить оптимізувати рух громадського транспорту відповідно до таких критеріїв:

- Зменшення часової затримки маршрутних транспортних засобів на перехрестях, а в цілому, кількості рухомого складу, необхідного для обслуговування маршрутів громадського транспорту, та підвищення регулярності руху наземного громадського транспорту;

- Зменшення споживання енергоресурсів наземним громадським транспортом за рахунок скорочення їх часу простою на перехрестях.

2.1 Проектні рішення з апаратної частини адаптивної системи автоматичного керування світлофором

Згідно з рис. 2.1, система складається з двох частин: моделі трамвая (ліворуч) та моделі світлофорного об'єкта (праворуч). Модель інформаційної

транспортної системи (ІТС) МТЗ надає САК через радіоканал дані про маршрут та поточну швидкість трамвая. Через природу взаємодії транспортного засобу із інфраструктурою (V2I), ініціюючим пристроєм є радіомодуль трамвая, а керованими є радіомодулі САК світлофорним об'єктом. Але передбачено взаємодію в дуплексному режимі з метою отримання зворотного зв'язку від МТЗ.

Службовий модуль, що входить до складу САК, має індикатор режиму очікування, а також через інтерфейс Ethernet РНУ забезпечує зв'язок із моделлю центральної автоматизованої системи керування дорожнім рухом (АСКДР), від якої отримує дані про напрямки маршрутів громадського транспорту, опорні часові параметри світлофорного циклу й інші конфігураційні параметри.

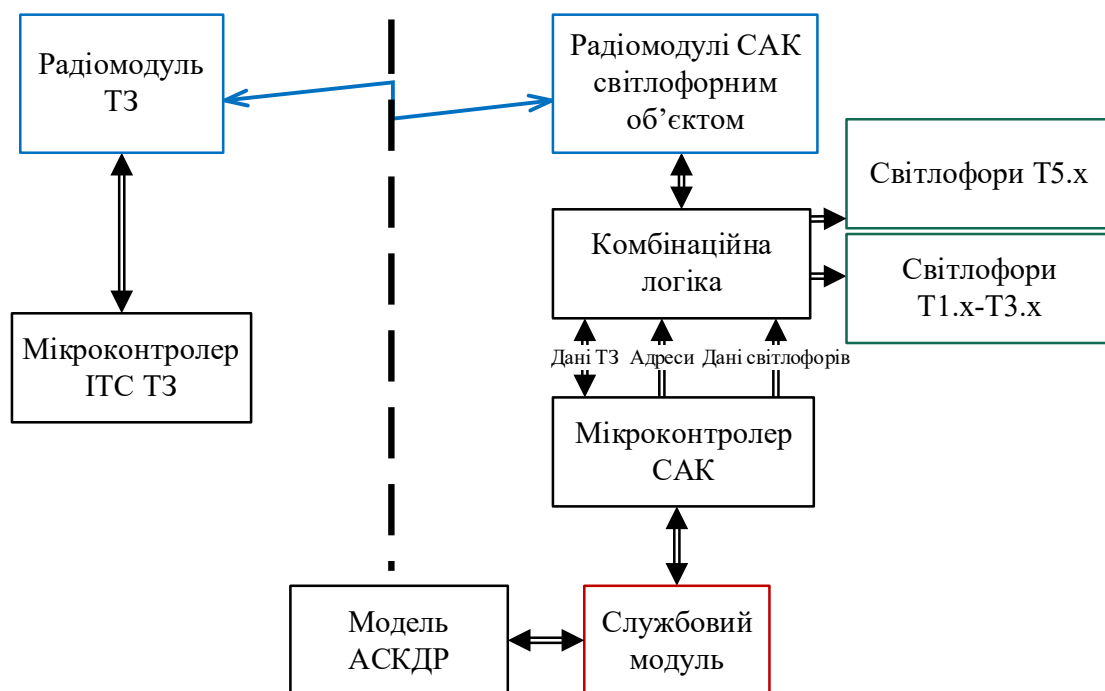


Рисунок 2.1 – Структурна схема адаптивної САК світлофорним об'єктом

Блок комбінаційної логіки (мультиплексори-демультиплексори) забезпечує передачу даних про поточний стан системи керування до радіомодулів та світлофорів. За такого підходу система є масштабованою, і для трьохрозрядної шини адрес є можливою потенціальна підтримка світлофорних перехресть від 3-х до 8-х напрямків включно, що є більш ніж достатньо. У

розробленій САК для кожної лінії даних (індикатори та радіомодулі) виділено відповідний комбінаційний пристрій.

Так, зв'язок зі світлофорами типу Т5 здійснюється через блоки U_SX (рис. 2.2), де X – це розташування індикатора (Left, Middle, Right, Bottom). Зв'язок із радіомодулями (по два на кожен бік перехрестя) виконується через блоки U_DXY, де X визначає роль датчика (check-In, check-Out), а Y – напрям спілкування UART (Transmit, Receive). Подібним чином для взаємодії зі світлофорами типу Т1-Т3 [9] використовуються блоки U_TXY де X визначає колір сигналу (Red, Amber, Green), а Y – напрям руху (Left, Straight, Right).

На рисунку 2.3 наведено розроблену друковану плату адаптивної САК.

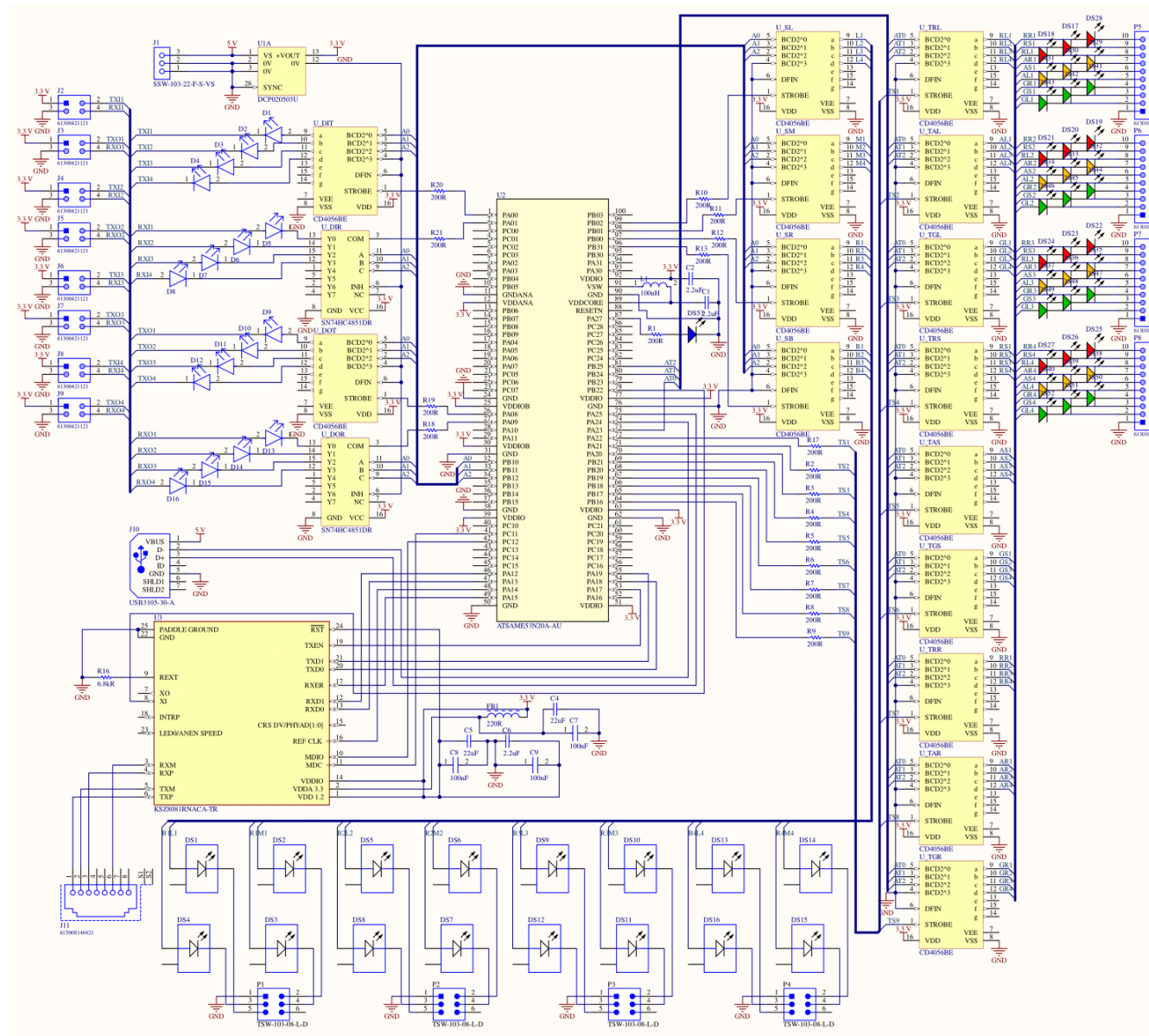


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова адаптивної САК світлофорним перехрестям

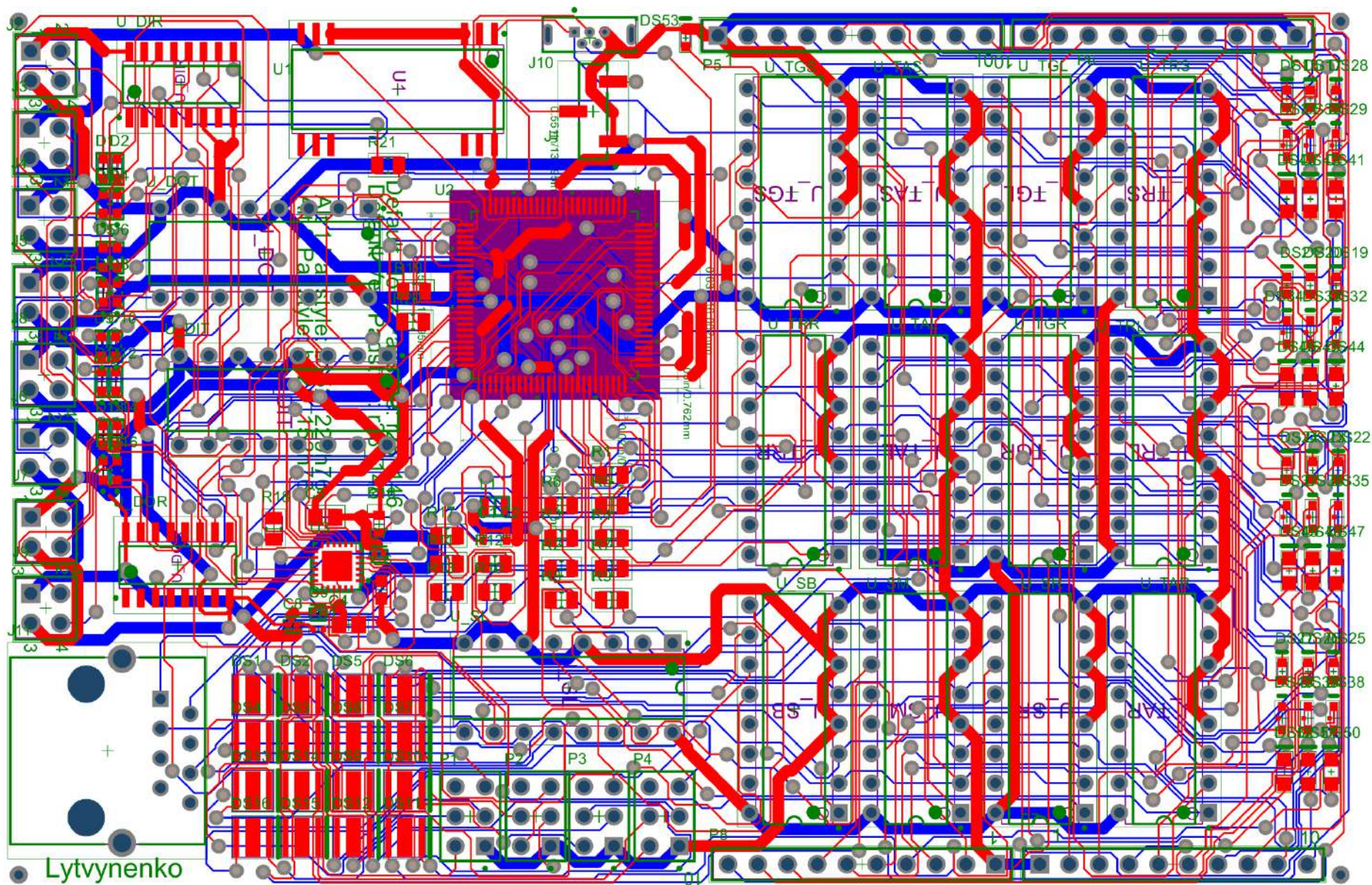


Рисунок 2.3 – Схема друкованої плати адаптивної САК світлофорним перехрестям

В апаратну частину закладено потенціальну можливість незалежного керування всіма різновидами світлофорів типів Т1-Т3, оскільки сигнали формуються окремо для кожного трьохколірного блоку кожного напрямку руху (рис. 2.4). В програмній частині за допомогою різноманітних логічних вентилів є можливим формування керуючих сигналів відповідно до конкретного типу світлофора, встановленого з певного боку перехрестя, та їх видача на відповідні виходи портів P5-P8.

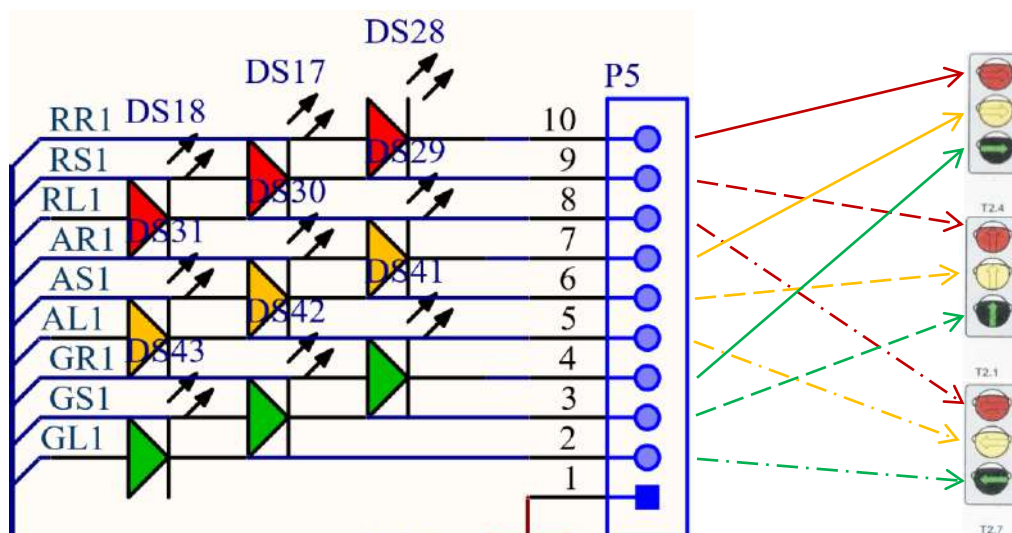


Рисунок 2.4 – Універсальний блок індикації світлофорів

Задіяний 32-х бітний МК ATSAME53N20A виробництва Atmel Corporation заснований на архітектурі ARM®, належить до високопродуктивних енергоефективних МК загального призначення серії Cortex®-M4 [12]. Підтримує тактову частоту до 120 МГц, високошвидкісний інтерфейс USB, послідовне спілкування SERCOM із прямим доступом до пам'яті, 10/100 Мбіт/с Ethernet MAC для індустріальних та цілей загального призначення. Має апаратну підтримку лічильника реального часу та вбудовані функції безпеки: один модуль просунутої системи шифрування (AES) із 256-х бітною довжиною ключа та швидкістю передачі даних до 2 МБ/с, два генератори дійсно довільних чисел (TRNG) та контролер криптографії з публічним ключем. Обсяг пам'яті для інструкцій становить 1024 КБ, оперативної – 256 КБ. Можливе розширення

засобами SDIO/SD-CARD/eMMC. Робоча температура від -40°C до 150°C .

На рис. 2.5 наведено 3D-модель розробленої друкованої плати, отриманої в середовищі Altium Designer.

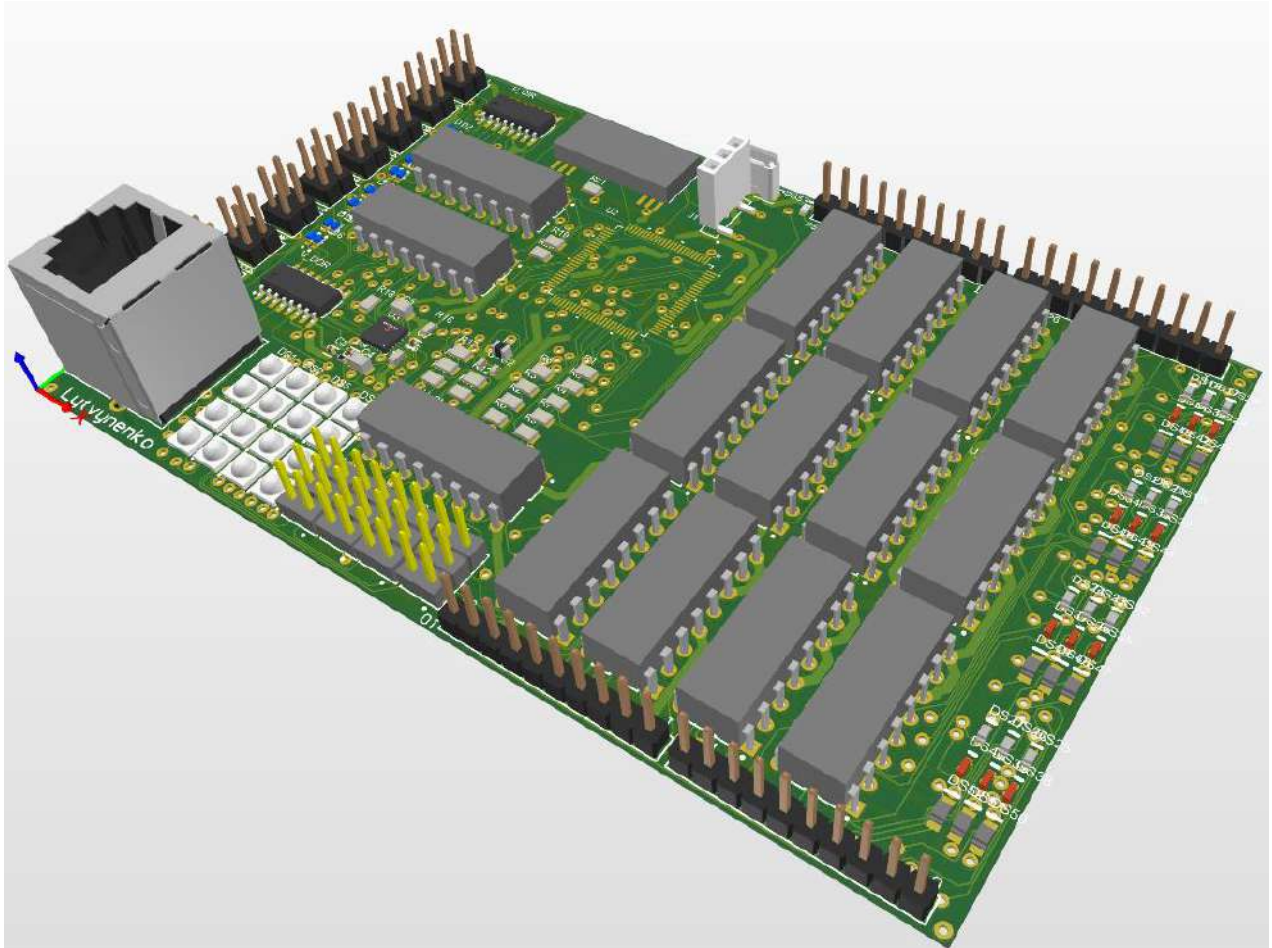


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд 3D-моделі друкованої плати

2.2 Проектні рішення з програмної частини адаптивної системи автоматичного керування світлофором

2.2.1 Дисципліна обслуговування маршрутних транспортних засобів

Програмна частина адаптивної САК світлофором для надання пріоритетного проїзду перехрестя наземним громадським транспортом є системою реального часу (СРЧ) із твердими вимогами до часу [13], тому заявка

як виявлення радіосигналу від МТЗ, має бути оброблена протягом декількох хвилин, інакше система працюватиме неправильно із певною ймовірністю. Однак у дуже завантажених частинах мережі громадського транспорту СРЧ повинна працювати із жорсткими вимогами, тому обробка сигналу від МТЗ повинна здійснюватися протягом кількох секунд до прибуття наступного МТЗ інакше система вірогідно втратить працездатність.

Власне, обробка радіосигналу від МТЗ не обов'язково означає, що йому буде миттєво надано дозвіл на пріоритетний проїзд перехрестя, ввімкнувши для нього дозвільну фазу. Обробка цього сигналу просто передбачає додавання відповідного маршруту до FIFO черги очікування. Кожен елемент цієї черги обслуговується якнайшвидше відповідно до внутрішнього стану керуючої моделі. Черга очікування ніколи не переповнюється, тобто система завжди залишається в стаціонарному режимі. Це досягається за рахунок резервування достатнього місця для зберігання інформації про маршрути очікування, а також фізичними обмеженнями (рис. 2.6) радіозв'язку малої дальності, який використовується в системі [14].

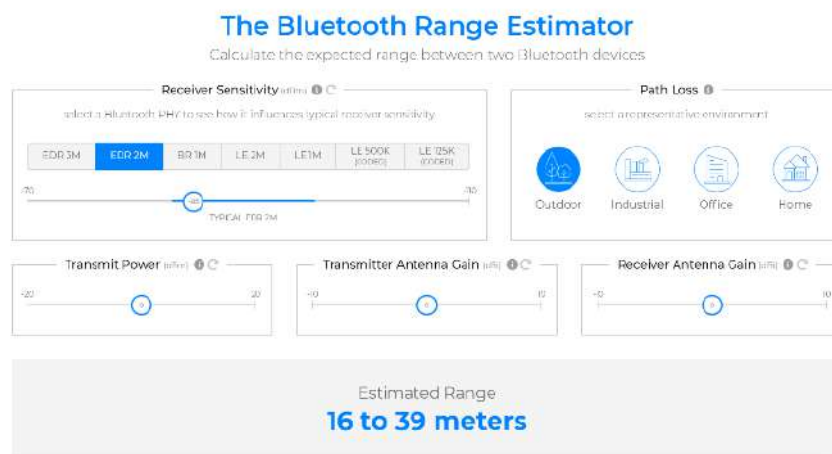


Рисунок 2.6 – Оцінка дальности зв'язку відповідно до параметрів обладнання та робочих умов

2.2.2 Інформація про маршрутний транспортний засіб та її представлення

Окрім поточної швидкості, сигнал МТЗ містить інформацію про номер маршруту, початковий і кінцевий пункти та числовий ідентифікатор МТЗ. Ця основна інформація є достатньою для чіткої ідентифікації виявленого МТЗ та маршруту, яким він рухається. Наприклад, використовуючи таку ідентифікацію, система не реагуватиме на МТЗ протилежного напрямку, а також зможе розрізнити два МТЗ поспіль навіть одного і того ж маршруту. Ця інформація (окрім ідентифікатора ТЗ) повинна бути введена в систему водієм МТЗ до виїзду з депо. Під час рейсу внесена інформація передаватиметься у формі повідомлень.

Інформація про маршрут на боці МТЗ та адаптивної САК світлофором зберігається у вигляді $NNN<<PPP>>DDD^{\wedge}Dv-...Dv-##VEHNUM\\V^{**}MMM:C$ та $NNN<<PPP>>DDD^{\wedge}Dv-...Dv-#\backslash n$ відповідно, де поле NNN – це літерно-цифровий номер маршруту (2 байти), PPP і DDD – коди початкового та кінцевого пунктів (2 байти), Dv – код відхилення (1 байт), може бути список відхилень. Поле $VEHNUM$ представляє бортовий номер МТЗ в межах транспортного підприємства (4 байти). Цей компонент не є відомим під час налаштування САК, але таке поле дозволяє запобігти постійному аналізу сигналу від одного й того ж МТЗ. Врешті, поле V (1 байт) містить інформацію про поточну швидкість МТЗ (трамвая), MMM – загальну масу МТЗ (2 байти), C – кількість вагонів.

Як було зазначено, система дозволяє по-різному обробляти маршрути з однаковими кінцевими, але різними проміжними зупинками. Такі випадки називаються відхиленнями (deviations). Вони можуть з'являтися як за звичайної роботи мережі, і в разі аварій, що змінюють її конфігурацію, тож МТЗ вимушені слідувати скоригованими маршрутами. Обробка відхилень стосується лише світлофора, де маршрути мають розгалуження. В інших місцях достатньо надати очікуваний напрямок руху для цього маршруту незалежно чи це відхилення або звичайний маршрут.

2.2.3 Алгоритм роботи системи автоматичного керування світлофором

Робота системи починається з визначення вхідних параметрів:

- опорні часові параметри (тривалості фаз);
- дозволи на подовження дозвільних фаз;
- режим роботи світлофора;
- обробка відхилень;
- напрямки руху маршрутів (елементи відповідних множин за напрямками руху). В разі обробки відхилень і звичайний, і «відхилений» маршрути мають бути вказані;
- профіль колії в безпосередній близькості до перехрестя $\theta(S)$;
- поточні погодні умови.

Після налаштування системи та надання їй інформації про очікувані маршрути, адаптивна САК готова обслуговувати МТЗ, що з'являються. Після натискання зовнішньої кнопки запуску залежно від того, чи є система переведеною до режиму u (рис. 1.12), після початкового стану очікування S_0 керуючий автомат або переходить до темпорального стану S_{14} , або до робочого стану очікування S_1 . Подальший перехід з нього спричинить лише сигнал від МТЗ будь-якого запланованих маршрутів. Вираз Vx_i означає, що перехід спрацює лише в разі виявлення МТЗ маршруту x_i із множини напрямку X . Це працює як побітова («помаршрутна») операція АБО.

Гіперстан HS_1 здійснює блимання нижнього індикатора світлофора, інформуючи водія МТЗ, що незабаром буде надано пріоритетну фазу. Тривалість блимання T_9 визначається оцінкою ГШ МТЗ (трамвая). Потім, відповідно до напрямку руху МТЗ та режиму роботи системи, спрацює перехід у стан 4, 6, 7, 9, 10 або 12. Після закінчення часу, відведеного на процедуру обслуговування МТЗ, система повертається до стану очікування 13, або в випадку дозволеного подовження фази, і, якщо є сигнал від наступного МТЗ, також дає дозвіл на перетин перехрестя. Подовження фази у певному напрямку може відбутися лише

в тому випадку, якщо попередня фаза вже дозволила рух у цьому напрямку.

При переході з дозвільної фази перший МТЗ FIFO черги очікування не просто вилучається, але перед виходом із поточного стану система виконує так зване «підтвердження від'їзду» (clearance acknowledgement). Це означає, що система має переконатись, що нещодавно обслуговуваний МТЗ успішно перетнув перехрестя і його сигнал більше не реєструється системою. Інакше це може спричинити суттєві проблеми, оскільки якщо через певні причини МТЗ було затримано на перехресті, і він не виїхав з нього, наступний зіткнеться з тією ж проблемою. І, нарешті, з точки зору системи немає МТЗ в очікуванні, тоді як насправді є два заблоковані МТЗ, які не можуть рухатися навіть після вирішення проблем, які були викликані затримкою, оскільки система не передбачала б надання дозволу на проїзд перехрестя.

Оскільки немає прямого способу перевірити, що зв'язок V2I було розірвано, і сама така перевірка мала б недостатню надійність, для подолання цього питання була використана методика запит-відповідь. Ідея полягає у тому, щоб перевірити наявність поточного МТЗ, надіславши спеціальне повідомлення та порівнявши дані умовно отриманого повідомлення з початковим. Якщо МТЗ не відповідає або в черзі є більше одного МТЗ, то попередній МТЗ вважається таким, що покинув перехрестя, оскільки через характер радіозв'язку в певний момент часу може бути встановлений лише один зв'язок між головним і конкретним веденим. Важливо зазначити, що вхідний датчик повинен бути встановлений за сотню метрів до динамічно керованого світлофора, а вихідний датчик повинен бути встановлений поблизу світлофора для громадського транспорту. Але на поточному етапі ці датчики поєднані для простоти тестування та моделювання системи.

ВИСНОВКИ

У цій роботі представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень в рамках розробки адаптивної системи автоматичного керування в реальному часі світлофором із пріоритетом для громадського транспорту.

У теоретичних дослідженнях отримана математична модель гальмування трамвая при під'їзді його до перехрестя та виконана перевірка її на адекватність, а також розроблена адаптивна модель керування світлофором в реальному часі для надання пріоритету громадському транспортові.

В експериментальних дослідженнях наведено проєктні рішення з апаратної та програмної частин адаптивної системи автоматичного керування світлофором, в рамках яких описані схемотехнічні та конструкторські проєктні рішення системи, а також визначено дисципліну обслуговування маршрутних транспортних засобів, описана інформація про транспортний засіб, що надходить у реальному часі до системи, та розроблено алгоритм роботи системи.

Система автоматичного керування своєчасним перемиканням світлофора надає пріоритет для проїзду перехрестя наземним громадським транспортом за його наближення до світлофора.

Системи автоматичного керування світлофором дозволить оптимізувати рух громадського транспорту відповідно до таких критеріїв:

- зменшення часової затримки маршрутних транспортних засобів на перехрестях, а в цілому, кількості рухомого складу, необхідного для обслуговування маршрутів громадського транспорту, та підвищення регулярності руху наземного громадського транспорту;
- зменшення споживання енергоресурсів наземним громадським транспортом за рахунок скорочення їхнього часу простою на перехрестях..

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Do L. Onboard Model-based Prediction of Tram Braking Distance [Електронний ресурс] / L. Do, I. Herman, Z. Hurák. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: arxiv.org/abs/2001.10231 (дата звернення: 23.01.2021).
2. Трамвай. Подвижной состав. Tatra-T3 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://gortransport.kharkov.ua/ps_models/49/ (дата звернення: 23.01.2021).
3. ŠKD Tatra T3 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://imhd.sk/ba/popis-typu-vozidla/20/%C4%8CKD-Tatra-T3> (дата звернення: 23.01.2021).
4. Takaoka Y. Disturbance observer based adhesion control for Shinkansen [Текст] / Y. Takaoka and A. Kawamura. // 6th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No.00TH8494), Nagoya, Japan, – 2000, C. 169–174, doi: 10.1109/AMC.2000.862851.
5. Olson P. Forensic Aspects of Driver Perception and Response [Текст] / P. Olson, G. Farber., 2003. – 372 с. – (Lawyers & Judges Publishing Company).
6. Rail Accident Investigation Report. Fatal collision between a tram and pedestrian at Woodbourn Road, Sheffield 22 December 2016 [Електронний ресурс] // Rail Accident Investigation Branch, Department for Transport. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.gov.uk/raib-reports/fatal-collision-at-woodbourn-road-sheffield> (дата звернення: 05.02.2021).
7. Stopping Distance [Електронний ресурс] // Transport Department the Government of the Hong Kong Special Administrative Region. – 2020. – URL: https://www.td.gov.hk/en/road_safety/road_users_code/index/chapter_5_for_all_drivers/stopping_distance_/index.html (дата звернення: 05.02.2021).
8. Model and Means of Timed Automata-based Real-time Adaptive Transit Signal Control [Текст] / *TSP Vehicle*, O. Shkil, I. Filippenko, L. Rebezyuk. // 2020

IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Varna, Bulgaria, – 2020, С. 1–4, doi: 10.1109/EWDTS50664.2020.9225116..

9. ДСТУ 4092:2002. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосовування та вимоги безпеки [Чинний від 2003-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2003. 27 с. (Інформація та документація).

10. Active Transit Signal Priority [Електронний ресурс] // The National Association of City Transportation Officials – Режим доступу до ресурсу: <https://nacto.org/publication/transit-street-design-guide/intersections/signals-operations/active-transit-signal-priority/> (дата звернення: 05.02.2021).

11. Timed Automata with Action Durations – From Theory to Implementation [Текст] / S.Guellati, I. Kitouni, R. Matmat, D. Saidouni. // International Conference on Information and Software Technologies. – 2014. – №465. – С. 94–109.

12. ATSAME53N20A [Електронний ресурс] // Microchip Technology Inc – URL: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATSAME53N20A> (дата звернення: 05.02.2021).

13. Kaldewey T. Firm Real-Time Processing in an Integrated Real-Time System [Електронний ресурс] / T. Kaldewey, C. Lin, S. Brandt // Univ. of California, Santa Cruz. – 2006. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Firm-Real-Time-Processing-in-an-Integrated-System-Brandt/37e2e6e72ce9361cf8ffc68856af904814d6f3cf> (дата звернення: 05.02.2021).

14. Understanding Bluetooth Range | Bluetooth® Technology Website, Bluetooth® Technology Website. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/range/> (дата звернення: 05.02.2021).