

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»


Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

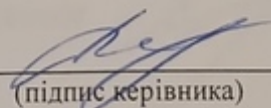
на тему: Розробка та дослідження пристроїв точкового каналу
зв'язку «колія-локомотив»

за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»
зі спеціальності: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

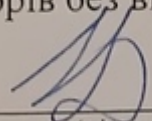
Виконав: студент групи АТ2321 (967М)


_____ / Данило КАСЬКО /
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ


_____ / Костянтин ГОНЧАРОВ /
(підпис керівника)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент 
_____ (підпис студента)

Дніпро – 2025 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Computer Technologies and Systems

Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Development and investigation the devices of point communication channel «track – locomotive»

according to educational curriculum «Automatic machinery and automation in transport industry»

in the Specialty: 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics

Done by the student of the group AT2321 (967M)

/ Danylo KASKO /

Scientific Supervisor: associate professor

/Kostiantyn HONCHAROV/

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем
Кафедра: Автоматика та телекомунікації
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті
Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

« _____ » _____ 202__ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
(ступінь вищої освіти)

студенту Касько Данилу Сергійовичу
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Розробка та дослідження пристроїв точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»

Керівник роботи: Гончаров Костянтин Вікторович, к.т.н., доцент
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом від _____ "05" жовтня 2023 р. № 991ст

2. Строк подання студентом роботи: 06.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: структура та принципи побудови систем керування рухом поїздів на базі баліз, технічні характеристики євробалізи

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: виконати аналітичний огляд існуючих систем керування рухом поїздів на базі баліз. 4.2 Основна частина: 1) розробити структуру та загальні принципи функціонування вітчизняної системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз; 2) виконати моделювання каналу бездротового живлення колійної балізи; 3) розробити локомотивні та колійні пристрої точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»

5. Перелік графічного матеріалу:

Структурна схема системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз, структурні та принципові електричні схеми, блок-схеми алгоритмів роботи пристроїв точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд існуючих систем керування рухом поїздів на базі колійних баліз	06.05.2024	
2	Розробка структури та загальних принципів функціонування вітчизняної системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз	01.07.2024	
3	Моделювання каналу бездротового живлення колійної балізи	28.10.2024	
4	Розробка локомотивних та колійних пристроїв точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»	23.12.2024	
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	06.01.2025	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	13.01.2025	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	20.01.2025 – 24.01.2025	

Студент

_____ (підпис)

Данило КАСЬКО

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Костянтин ГОНЧАРОВ

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

65 сторінок., 27 рисунків, 5 таблиць, 13 джерел.

Об'єкт розробки – точковий канал зв'язку «колія-локомотив».

Мета роботи – підвищення безпеки руху поїздів шляхом впровадження точкового каналу зв'язку «колія-локомотив».

Методи дослідження – аналіз існуючих технічних рішень, методи визначення взаємної індуктивності та аналізу електричних кіл, методи розробки електронних схем та алгоритмів роботи.

В роботі проведено аналіз існуючих систем керування рухом поїздів на базі колійних баліз, визначено їх переваги та недоліки. Запропоновано структуру та алгоритм роботи системи інтервального регулювання рухом поїздів на базі баліз, яку на нашу думку доцільно впроваджувати в Україні. Проведено моделювання точкового каналу зв'язку «колія-локомотив», за результатами якого визначені оптимальні параметри локомотивної антени, а також розрахована довжина зони чутливості балізи. Розроблені принципові електричні схеми та алгоритми роботи структурних вузлів точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»: локомотивного генератора на частоту 27,095 МГц, що використовується для бездротового живлення балізи, та пристрою узгодження сигнальної точки автоблокування з балізою (блок LEU).

Висновок. Впровадження запропонованої системи керування рухом поїздів на базі баліз дозволить підвищити безпеку руху поїздів та підвищити ефективність систем інтервального регулювання.

Ключові слова: СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ, БАЛІЗА, ВЗАЄМНА ІНДУКТИВНІСТЬ, ЛОКОМОТИВНИЙ ГЕНЕРАТОР, РАДАР ДОПЛЕРА, ПРИСТРІЙ УЗГОДЖЕННЯ, КОДУВАННЯ DVRL, БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ РОБОТИ.

ЗМІСТ

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ НА БАЗІ КОЛІЙНИХ БАЛІЗ	8
1.1 Особливості Європейської системи керування залізничними перевезеннями ERTMS/ETCS	8
1.2 Рівні системи ERTMS/ETCS	11
1.3 Особливості та рівні китайської системи керування рухом поїздів CTCS	23
1.4 Висновки за розділом 1	26
2 СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИП ДІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ НА БАЗІ КОЛІЙНИХ БАЛІЗ.....	27
2.1 Структура системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз ...	27
2.2 Алгоритм роботи системи забезпечення безпеки руху поїзда.....	28
2.3 Принцип дії радару Доплера	31
2.4 Алгоритм визначення фактичної швидкості поїзда	33
2.5 Висновки за розділом 2	34
3 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ БЕЗДРОТОВОГО ЖИВЛЕННЯ КОЛІЙНОЇ БАЛІЗИ	36
3.1 Особливості та технічні характеристики євробаліз	36
3.2 Визначення взаємної індуктивності між локомотивною та колійною котушками	40
3.3 Визначення потужності живлення колійної балізи.....	43
3.4 Результати моделювання	45
3.5 Висновки за розділом 3	48

4 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ТОЧКОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ «КОЛІЯ-ЛОКОМОТИВ».....	49
4.1 Розробка пристрою узгодження сигнальної точки автоблокування з євробалізою	49
4.2 Розробка локомотивного генератора для точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»	57
4.3 Висновки за розділом 4	62
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	64

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ НА БАЗІ КОЛІЙНИХ БАЛІЗ

1.1 Особливості Європейської системи керування залізничними перевезеннями ERTMS/ETCS

На сьогоднішній день існують 2 найвідоміші системи керування рухом поїздів на базі баліз – це європейська ERTMS/ETCS та китайська CTCS. У цьому розділі буде докладно розказано про їх структуру, застосування, та історію.

З 1990-х років – іде постійна еволюція ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System/European Train Control System). Працюючі системи запроваджені не тільки для досягнення ефективного перетину кордону, але й для можливості роботи обладнання від одного виробника з інфраструктурою іншого. [5]

ERTMS – концепт локомотивного керування і сигналізування нового покоління. Включає в себе: покращену систему захисту локомотива (АТР), що наглядає та керує швидкістю і гальмуванням локомотива; використання і надання локомотивам інформації про градієнти швидкості, показання сигналів, потенціалу гальмування, що дозволяє розрахувати безпечну швидкість; можливість втручання системи, якщо поїзд занадто пришвидшиться, і повернення його у границі допустимої швидкості; можливість автоматичної повної зупинки, при будь якому сигналі загрози локомотиву та багато інших. [5]

ETCS застосовується в усіх видах поїзних системах, на відміну від старших систем національних виробників. Головний принцип його універсальності – високий рівень функціональної автономії локомотивного обладнання. Включає в себе всі звичні функції потрібні для контролю та застосування обмежень швидкості.

Можливість накладення ETCS на існуючі системи керування зі збереженням функцій, дозволяє поступово і дуже гнучко здійснити перехід з старих на нові системи.

Розглянемо компоненти системи ERTMS/ETCS.

Структурно ETCS складається з колійного обладнання та локомотивного. Структурна схема ERTMS/ETCS зображена на рисунку 1.1.

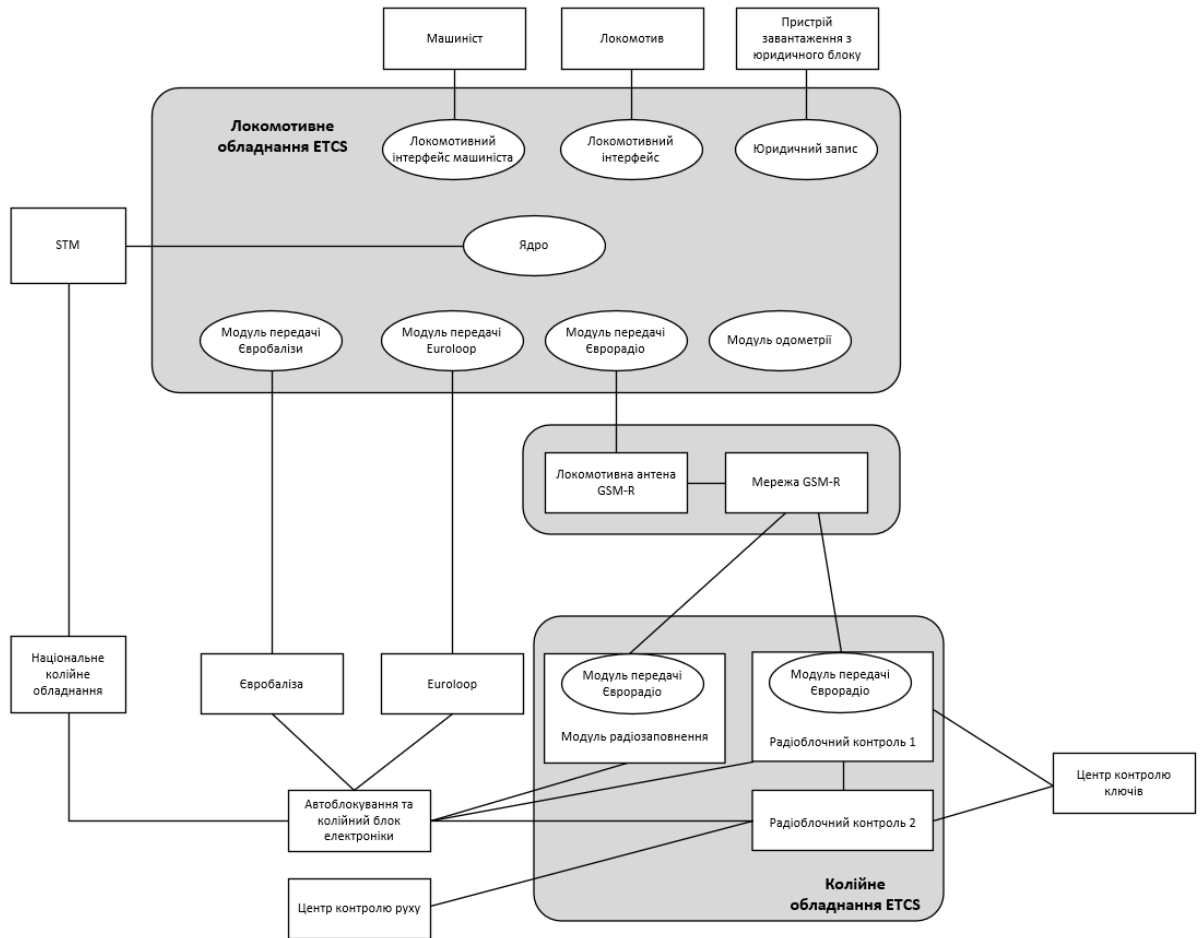


Рисунок 1.1 – Структурна схема ERTMS/ETCS

Колійне обладнання

Євробалізи – це пристрій для передачі телеграм на локомотивне обладнання. Балізи можуть передавати, як і фіксовані, так і змінні телеграми, тільки коли приєднані до LEU. Балізи організовані в групи, кожна баліза в якій передає свою телеграму, і комбінація всіх телеграм визначає, що саме за повідомлення передала група баліз.[1]

Euroloop – складається з неізолюваного кабелю і модему, що може надсилати телеграми до локомотивного обладнання. Euroloop використовується тільки на

першому рівні ETCS, надаючи заздалегідь сигналізаційну інформацію щодо стану наступного сигналу в напрямку руху локомотиву (функція заповнення).[1]

Lineside Electronics Unit (LEU) – або колійний блок електроніки, являє собою електричний пристрій, що генерує телеграми для євробаліз, спираючись на інформацію від зовнішніх колійних пристроїв. Також він може бути під'єднаний до Euroloop та Radio Infill Units, щоби мати змогу відправити повідомлення за допомогою них. [1]

Колійна радіомережа GSM-R – використовується для двостороннього обміну повідомленнями між локомотивним обладнанням та RBC і RIU. Радіомережа ні розроблялась, ні стандартизувалась під структуру і задачі ERTMS/ETCS першого рівня. Вона використовує стандарти інтерфейсу EIRENE/MORANE. Оригінальне призначення GSM-R – голосовий зв'язок машиніста з персоналом, що знаходиться в стаціонарних місцях. [1]

Центри радіоблочного контролю (Radio Block Centres (RBC)) – комп'ютерна система, що опрацьовує повідомлення від зовнішніх колійних систем (блокування, блокових систем, зміни рівнів) на базі інформації отриманої з локомотивних підсистем, інформація від яких має бути відправлена на локомотив. Основна задача цих повідомлень – надати дозвіл на рух (movement authority (MA)) локомотиву для безпечного руху по колійній інфраструктурі, яка знаходиться під контролем RBC. [1]

Radio Infill Unit (RIU) – пристрій радіозаповнення, що використовує передачу від GSM-R для надання сигнальної інформації заздалегідь щодо наступного головного сигналу в напрямку руху локомотиву. [1]

Локомотивне обладнання

Все локомотивне обладнання в ERTMS/ETCS комп'ютерне і складається з наступних модулів. Не всі з цих модулів є обов'язковими, і робляться під потреби замовника.

Kernel module – ядро, є модулем, що імплементує основні логічні функції ETCS (OBU).

Train Interface Unit (TIU) – контролює взаємодію між локомотивом і локомотивними системами ETCS.

Balise Transmission Module (BTM) – контролює взаємодію між локомотивними системами ETCS і євробалізами, що знаходяться на колії.

Loop Transmission Module (LTM) - контролює взаємодію між локомотивними системами ETCS і Euroloop, що знаходяться на колії.

Euroradio module - контролює взаємодію між локомотивними системами ETCS і мобільними пристроями GSM-R.

Odometry module – включає в себе обробку інформації з різних датчиків, щоби розрахувати швидкість руху локомотиву.

Juridical Recording Unit (JRU) – юридичний записуючий блок, записує усі події для розслідувань у випадку інцидентів, зазвичай записує усі події, що відносяться до обладнання або дій машиніста, також діагностує обладнання ETCS.

Driver-Machine Interface (DMI) – інтерфейс між машиністом і локомотивом.

Локомотивне GSM-R обладнання – складається з декількох пристроїв для обміну даними між локомотивним обладнанням і RBC або RIU на колії.

1.2 Рівні системи ERTMS/ETCS

Для того щоб запропонувати клієнту оптимальний результат – існує 5 функціональних рівнів ETCS. Ці рівні задані на колії і передаються за допомогою євробаліз або Euroloop та RIU, і вони активують відповідний за функціоналом рівень на локомотиві [1]. Взаємозв'язки між обладнанням і рівнями наведені в таблиці 1.1

ETCS може бути налаштована на будь який з цих рівнів:

- 0 рівень ETCS – локомотив обладнаний ERTMS/ETCS, але лінія не обладнана ETCS або національною системою, що підтримується.
- STM рівень ETCS – локомотив обладнаний ERTMS/ETCS, лінія обладнана національною системою, що підтримується STM модулем на локомотиві.
- 1 рівень ETCS – локомотив обладнаний ERTMS/ETCS, лінія обладнана

Євробалізами (точкова передача) і опціонально радіозаповнення Євробалізами, Euroloop, RIU.

- 2 рівень ETCS – локомотив обладнаний ERTMS/ETCS, лінія контролюється RBC (постійна передача) і обладнана Євробалізами і Euroradio, перевірка вільності і цілісності рухомого складу виконується колійними пристроями.
- 3 рівень ETCS – схожий на 2 рівень, але вже локомотивними системами відстежується положення локомотива, зайнятість колії, цілісність рухомого складу, і національні системи зовсім не потрібні.

Таблиця 1.1 – Залежність між обладнанням і рівнем ETCS

Рівень	0	STM	1		2	3
Колійні сигнали	+	+	+		-	-
RIU	-	-	-	Баліза, Loop, Радіо	-	-
Передача	Баліза	Баліза	Баліза	Баліза, Loop, RIU	Баліза, Радіо	Баліза, Радіо
Радіомережа	-	-	-	Часткова	Повна	Повна
RBC	-	-	-		+	+
Цілісність составу	-	-	-		+	+
Високопродуктивний блок	-	-	-		+	+
Рухомий блок	-	-	-		-	+
Локалізація	Баліза	STM Баліза	Баліза		Баліза	Баліза
Перевірка вільності колії	Колійна	Колійна	Колійна		Локомотивна	Колійна
Тип балізи	Фіксована	STM	Фіксована і контрольована		Фіксована	Фіксована
LEU	-	-	+		_*	_*
Сигналізація	Колійна	Колійна	Колійна		Локомотивна	Локомотивна
DMI	Швидкість	Накладення	Локомотивна сигналізація		Локомотивна сигналізація	Локомотивна сигналізація

* використання LEU можливе для зміни порядків рівнів в залежності від налаштувань маршруту

Є можливість використовувати декількох рівнів на одній лінії одночасно. Наприклад національні системи (STM рівень), і 2 рівень. Рівні 1,2,3 – є зворотно сумісні, наприклад це означає, що локомотив з 2 рівнем може їхати по колії, обладнаній 1 рівнем. ETCS на локомотиві може бути тільки одним з наведених рівнів. Можливі переходи між різними STM рівнями від різних національних систем.

Докладніше про рівні.

Рівень 0

З погляду специфікації для рівня 0 вважається, що колія необладнана ні ETCS, ні національною системою, або колійне обладнання вийшло з ладу, і не може бути використано (під час обслуговування, поломки і т.д.). Наразі рівень 0 має також бути обраним для деяких локомотивів, або коли колія обладнана національною системою автоблокування, де обладнання АБ на локомотиві не під'єднане до локомотивного блоку ETCS (OBU), і тому не вважається STM. В додаток рівень 0 може бути використаний для руху локомотивами з несправним або відсутнім обладнанням (відсутній зв'язок, не підтримується потрібний STM) на ділянках з змішаним керуванням (ETCS+національні системи). Колійні сигнали, або інші види зовнішнього сигналізування, використовуються для безпеки руху.

Єдине обладнання ETCS, що використовується – максимально дозволена швидкість руху (національне значення). У рівні 0 з колії не приймаються будь-які дозволи, окрім: базових команд з баліз, оголошення зміни рівню, тимчасові обмеження швидкості, прийом текстових повідомлень.

На екрані локомотива буде зображено: тільки рівень 0 і поточну швидкість руху локомотиву. Дозволена швидкість – буде показана тільки за вимогою машиніста, що відповідальний за коректний рух локомотива.

Наразі, деякі оператори залізниць використовують рівень 0 паралельно з національними системами на рисунку 1.2 зображено як це працює.

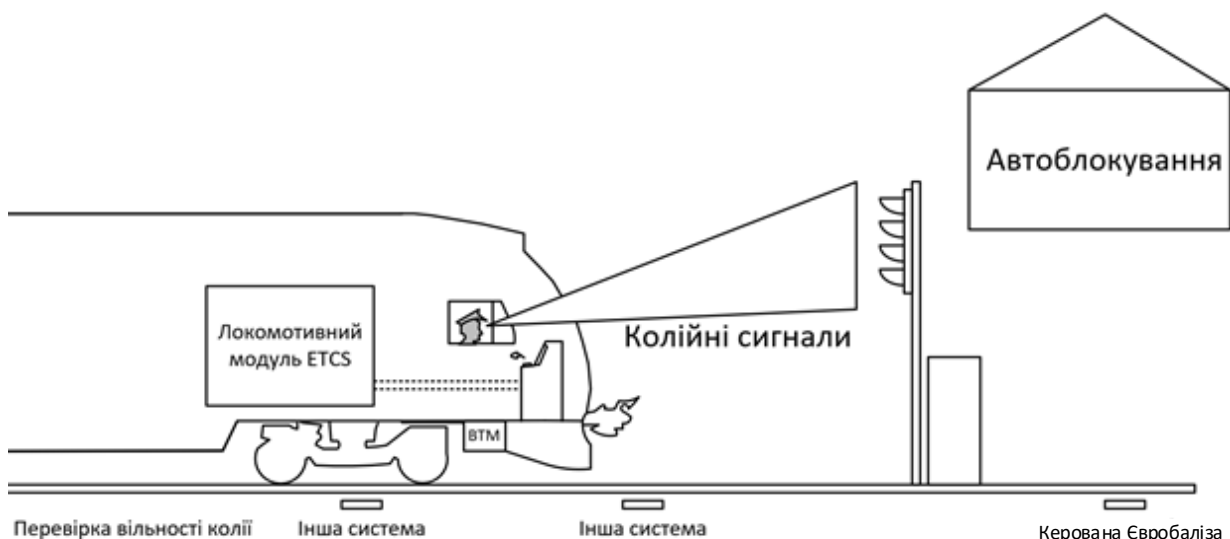


Рисунок 1.2 – Схема рівня 0 ETCS

Характеристики рівня 0

Колійне обладнання:

- Відсутнє обладнання ETCS, окрім євробаліз, для оголошення змін рівня і деяких додаткових команд.

Основні функції колійного обладнання ETCS:

- Відсутні.

Локомотивне обладнання:

- Локомотивне обладнання ETCS та роботи з євробалізами (OBU+BTM).

Основні функції колійного обладнання ETCS:

- Контроль над максимально дозволеною швидкістю локомотива.
- Контроль над максимально дозволеною швидкістю на окремій ділянці.
- Зчитування євробаліз, для виявлення змін у рівні ETCS, та спеціальних команд. Всі інші повідомлення від баліз ігноруються.
- Відсутність локомотивної сигналізації.

Виявлення місцезнаходження локомотива на рівні 0:

- OBU зчитує усі групи баліз на рівні 0. Якщо група баліз не позначена, як небажана, то інтервал впевненості буде скинутий на значення отримане

від останньої пройденої групи баліз. Інтервал впевненості потім збільшується в залежності від дистанції до наступної групи баліз.

- Немає колійного обладнання на рівні 0, яке потребує місцезнаходження локомотива. Але якщо є зв'язок з RBC під час проходження лінії обладнаної рівнем 2, то OBU доповість своє місцезнаходження RBC.

Контроль над швидкістю локомотива:

- На рівні 0 OBU контролює максимально дозволена швидкість спираючись на максимально дозволена швидкість в країні, і якщо можливо, то тимчасові обмеження.
- На рівні 0 розрахунок максимально обмеженого профілю руху (MRSP), спирається на:
 - Тимчасові обмеження швидкості (TSR) передані балізою
 - Обмеження швидкості, пов'язані з режимом руху.
 - Обмеження швидкості, пов'язані з швидкістю локомотива.
 - Обмеження швидкості, пов'язані з ручним обмеженням.
- Якщо машиніст не контролює локомотив згідно з обмеженнями від MRSP, то OBU задіє гальмування.

Рівень STM – це визначення для колій, що обладнані національним колійним обладнанням і локомотивним обладнанням ETCS, яке взаємодіє з національною системою за допомогою спеціального інтерфейса FFFIS STM (form fit function interface specification for specific transmission module (специфікація для функцій підгонки форми для спеціального модуля передачі)) [3]. Як повинна виглядати схема інтерфейсу STM зображено на рисунку 1.3.

Локомотивна частина ETCS, що сумісна з конкретним національним обладнанням називається – STM. STM може бути активованим, як з локомотивного обладнання ETCS, переходом з одного рівня на інший, так і вручну машиністом.

На рівні STM локомотиви отримують інформацію з колійної частини національної системи. В системі ETCS зазвичай через DMI виводиться інформація, що була отримана від національної системи, але зміст і форма залежить від

конкретного STM, але ETCS не забороняє паралельні національні інтерфейси (локомотивні світлофори і т.д.).

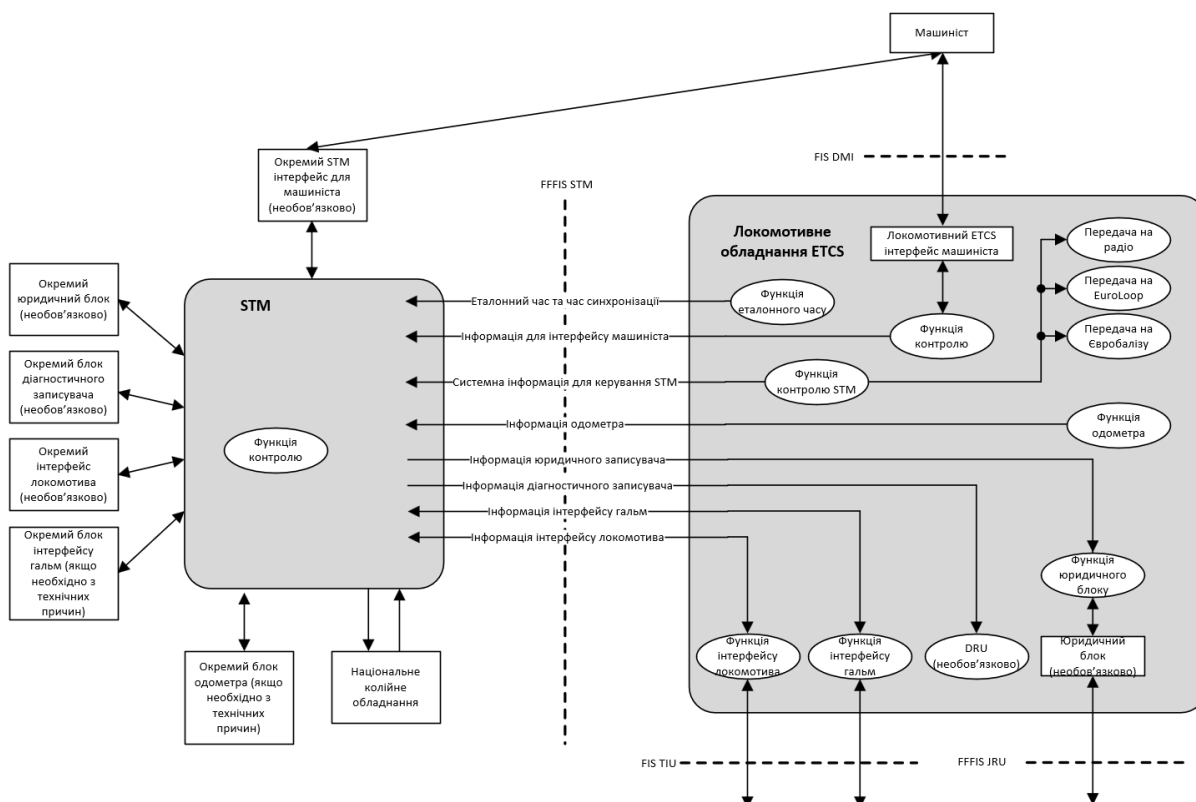


Рисунок 1.3 – Схема інтерфейсу FFFIS STM для ETCS і національної системи.

Функціональність національної системи не обмежена ніяким європейським стандартом. Межа контролю та безпеки від національної системи може варіюватися: від рідких повідомлень зупинитись або продовжувати рух, до безперервного контролю з великою кількістю повідомлень або команд надісланих з колії.

Коли локомотив рухається по колії, що обладнана національною системою, ETCS OBU знаходиться в режимі SN (STM національний), тоді OBU отримує доступ до деяких функцій національної системи: локомотивний інтерфейс, інтерфейс машиніста, гальмівна система і одометрія. Якщо STM вийде з ладу, то ETCS повідомить машиністу і застосує гальма. [3]

Рівень STM не сумісний з будь-яким іншим рівнем.

Рівень 1 був розроблений, як накладення на існуючу колійну інфраструктуру: автоблокування, колійну сигналізацію. В загалом без змін у розміщенні існуючої. Так і з'явився рівень 1 ETCS, як система точкової передачі.

На рівні 1 – постійний контроль швидкості і місцезнаходження локомотиву. Це означає, що всі важливі профілі швидкості, градієнти і відстані включені у розрахунок. Через це в ETCS з'являється функція дозвіл на рух (Movement Authority (MA)), вона передається в локомотивне обладнання ETCS через євробалізи. Інформація подається машиністу на екран (DMI).

Колійне обладнання для передачі інформації базується на євробалізах (керованих і некерованих). Постійна інформація (максимально дозволена швидкість на ділянці, схил і т.д.) передається – через некеровані балізи, а динамічна інформація (MA) – через керовані.

Контрольовані балізи отримують інформацію, щодо поточного показання сигналу, через з'єднання з LEU, що отримує поточне показання сигналу (від колійних сигналів або автоблокування не більше 500 м), і вибирає відповідну телеграму і передає балізі через інтерфейс C1 (кабель). Показання сигналу може змінитись під час проходження локомотиву над групою баліз. В такому випадку керовані балізи отримують нову телеграму через інтерфейс C1 і телеграми змінюються під час проходження локомотива. Контрольовані балізи зазвичай розміщуються на сигналах, щоби забезпечити локомотив необхідною інформацією, доступною йому під час проходження сигналу[2].

За замовчуванням MA завжди передається групою баліз, що знаходиться поблизу важливого сигналу, з обмеженням руху до наступного важливого сигналу. Наступний сигнал може змінити своє показання на зелений поки локомотив рухається йому на зустріч, і OBU не отримає інформацію про зміну показання, тому що він вже проїде відповідну групу баліз, що мала передати зміну сигналу, і тому локомотив може рухатись на зустріч зеленому показанню гальмуючи. Через це цю особливість передачі інформації, локомотив має проїхати над наступною групою баліз, для отримання наступного MA.

Функція заповнення (Infill) була розроблена для передачі зміни сигналу на локомотив раніше, щоб запобігти необов'язкового гальмування. З встановленням додаткових євробаліз ("баліз заповнення") або Euroloop перед основним сигналом, що дає новий сигнал слідування, який передається неперервно. Інформація заповнення також може бути передана на локомотив через функцію радіозаповнення. Так можна передавати локомотиву інформацію про стан сигналів, знаходячись на відстані від них, що збільшує пропускну спроможність лінії. Схема рівня 1 зображена на рисунку 1.4

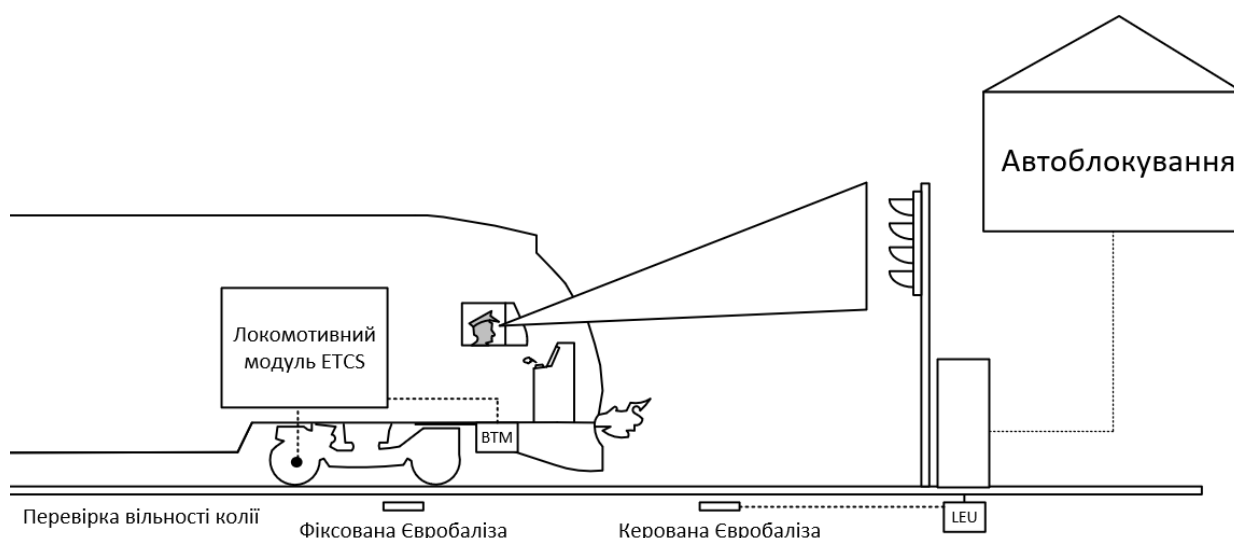


Рисунок 1.4 – Схема рівня 1 ETCS

Характеристики рівня 1

Колійне обладнання:

- Євробалізи для точкової передачі від колії локомотиву.
- LEU для зчитування показання сигналу вільності і передача відповідної телеграми на контрольовану балізу.
- Контрольовані балізи для передачі змінної інформації.
- Напівнеперервна передача інформації заповнення використовуючи Euroloop, та модулі радіозаповнення.

Основні функції колійного обладнання ETCS:

- Визначення дозволу руху (МА) згідно з існуючою системою сигналізації.
- Передача дозволу руху (МА) і інформацію про колію локомотиву.

Локомотивне обладнання:

- Локомотивне обладнання ETCS та роботи з євробалізами (OBU+BTM).
- Обладнання для зчитування Euroloop, та роботи з радіозаповненням, якщо очікується робота з ними.

Основні функції колійного обладнання ETCS на рівні 1:

- Отримання дозволу руху і інформації про колію, що відноситься до баліз.
- Вибір найбільш забороняючого обмеження швидкості, з урахуванням обмежень на наступних ділянках.
- Розрахування динамічного профілю швидкості, ураховуючи можливості локомотива з розгону і гальмування, які вираховуються з локомотивної і колійної інформації.
- Порівняння реальної швидкості локомотива з обмеженнями швидкості і застосування гальм, за потреби.
- Локомотивна сигналізація машиністу.

Рівень 2 ETCS також розроблений, як накладення на існуючу колійну інфраструктуру. Контроль наявності і цілісності локомотива здійснюється національними колійними системами і автоблокуванням. Рівні 2 і 3 вже не потребують колійних сигналів.

Колійне обладнання складається з некерованих баліз і центрів радіоблочного контролю (RBC).

Для двохстороннього зв'язку між локомотивним обладнанням ETCS і RBC – використовується обладнання GSM-R. Локомотив, обладнаний ETCS, рухається в зоні контролю RBC і постійно підтримує зв'язок з ним. Балізи виконують тільки функцію показчиків відстані і зміни рівнів.

В RBC вся постійна інформація, як профілі швидкості, градієнти, стан колії і положення баліз, знаходиться в формі мапи руху. Через пряме з'єднання між RBC і

автоблокуванням – вся необхідна динамічна інформація, як стани точок маршруту і сигнали, знаходиться в RBC. Таким чином в RBC знаходиться повна картина ситуації в ділянці його відповідальності.

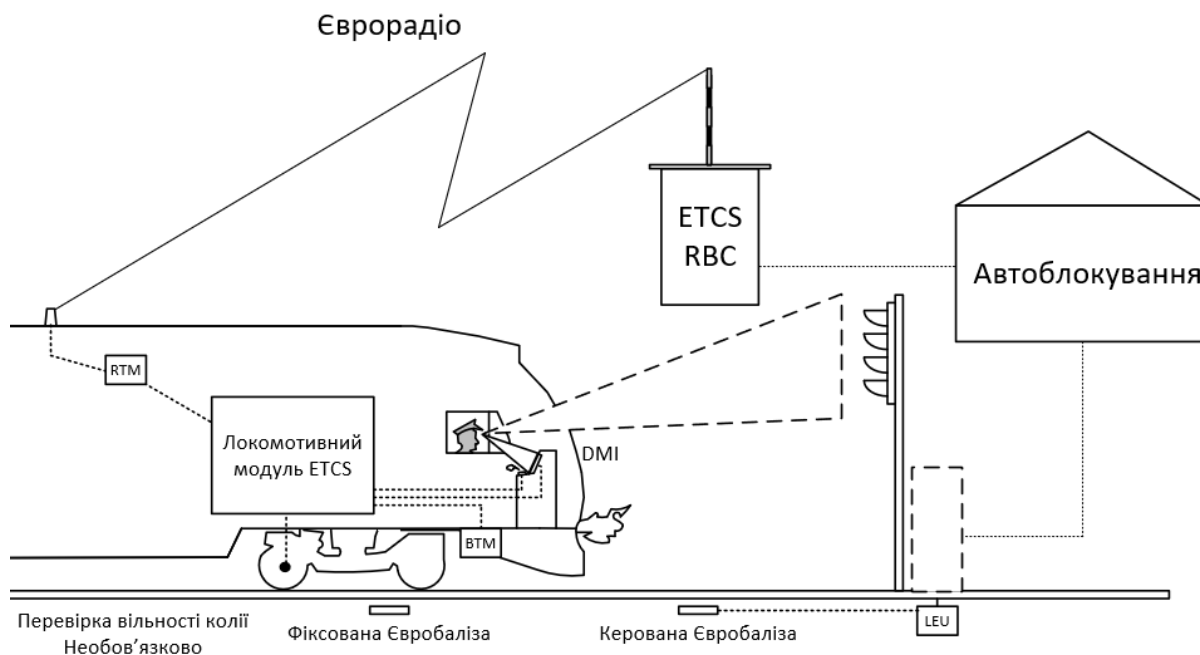


Рисунок 1.5 – Схема рівня 2 ETCS

З цією інформацією RBC постійно розраховує і надсилає МА для кожного локомотиву, обладного ETCS і який знаходиться в зоні відповідальності RBC. Локомотивний блок ETCS обробляє інформацію, отриману через радіо і доступну на локомотиві, такі як гальмівні можливості, щоби вирахувати потрібний профіль швидкості і визначити, яку інформацію треба вивести машиністу на екран. Спираючись на доповіді з місцезнаходження, в RBC може більш оперативно змінюватись інформація про положення локомотивів на мапі руху. Схема рівня 2 приведена на рисунку 1.5.

Характеристики рівня 2

Колійне обладнання:

- Центри радіоблокового контролю.
- Єврорадіо для двостороннього зв'язку локомотив-колія.
- Євробалізи переважно тільки для визначення місцезнаходження.

Основні функції колійного обладнання ETCS:

- Контроль місцезнаходження кожного локомотива, обладнаним ETCS та в області контролю RBC.
- Визначення, для кожного локомотиву, дозволу руху (MA) згідно з колійним обладнанням і обстановкою.
- Передача дозволу руху (MA) і опису колії, окремо для кожного локомотиву.
- Передача контролю над локомотивом на кордоні, між зонами контролю різних RBC.

Локомотивне обладнання:

- Локомотивне обладнання ETCS та пристрої для роботи з євробалізами та єврорадіо (OBU+VTM+RTM).

Основні функції колійного обладнання ETCS на рівні 2:

- Локомотив зчитує євробалізи і відправляє своє місцезнаходження, відносно зчитаних баліз, до RBC.
- Локомотив отримує дозвіл на рух (MA) і інформацію про колію, через єврорадіо відносно до балізи.
- Вибір найбільш забороняючого обмеження швидкості, з урахуванням обмежень на наступних ділянках.
- Розрахування динамічного профілю швидкості, урахуваючи можливості локомотива з розгону і гальмування, які вираховуються з локомотивної і колійної інформації.
- Порівняння реальної швидкості локомотива з обмеженнями швидкості і застосування гальм, за потреби.
- Локомотивна сигналізація машиністу.

На рівні 3 ETCS локомотиви отримують MA від RBC через GSM-R, як і на рівні 2. Але взагалі не потрібні колійні сигнали. Машиніст отримує всю необхідну інформацію, дивлячись на екран (DMI) ETCS, і OBU буде керувати рухом локомотива згідно з інформацією, отриманою від RBC.

На сьогоднішній день тільки декілька європейських країн розглядають перехід на 3 рівень, але нема ще жодної країни де би він повністю був імплементований.

Якщо на колії, обладнаній рівнем 3, використовуються колійні сигнали, то у них повинен бути відповідний сигнал для руху локомотивів на рівні 3. Це основна проблема на коліях зі змішаною сигналізацією. Якщо колійне обладнання ERTMS/ETCS не отримує інформацію про проходження забороняючих або несправних сигналів, то інформація на екрані і на колії – буде відрізнятись. Тому експлуатаційна документація має бути готова до таких ситуацій.

Колійне обладнання складається з RBC, єврорадіо і євробаліз, на додачу до функцій автоблокування.

На рівні 3 наявність локомотивів на кожній частині колії – відповідає інформації наданій RBC від локомотивів. Не використовується жодне колійне автоблокування, так як контроль цілісності лежить на показаннях з локомотива. Інформація про цілісність може бути надана як локомотивним обладнанням, яке відповідає за перевірку цілісності, так і машиністом, яке може не бути частиною ERTMS/ETCS або відповідати цим стандартам. Схема рівня 3 приведена на рисунку 1.6

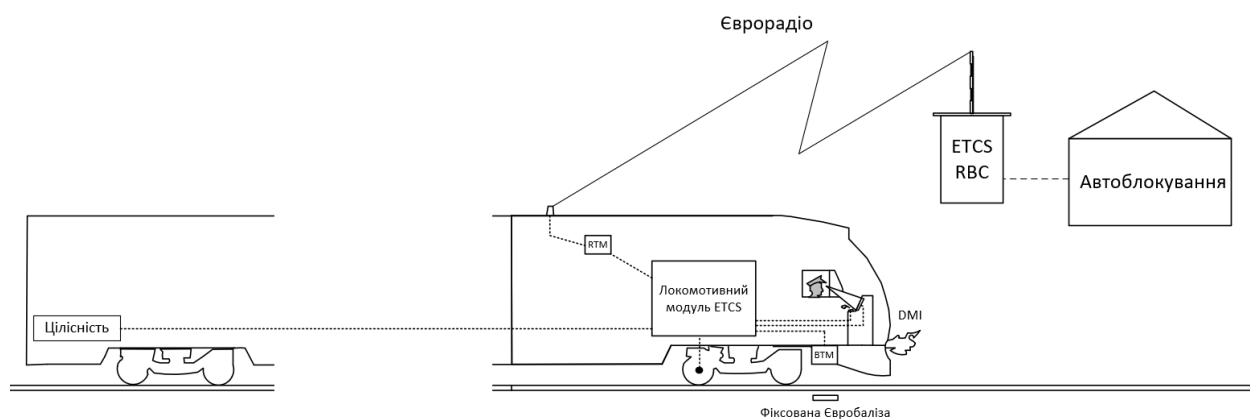


Рисунок 1.6 – Схема рівня 3 ETCS

Рівень 3 може бути застосований:

- На коліях, де відсутнє обладнання для визначення наявності локомотива.
- Коли потрібне використання рухомих блок-ділянок для збільшення пропускної здатності лінії.

- На коліях, де неможливо застосовувати рейкові кола.

Стан і перспективи ETCS

Станом на 2024 рік з усіх колій в Європі – тільки приблизно 7500 км обладнано ETCS. І зараз активно планується збільшити цю кількість до 40000 км до 2030 року. В Балтійських країнах наразі немає активних ліній ETCS, але будується дослідна ділянка у Литві поблизу з кордоном Польщі. У Польщі зараз активно будується декілька ліній: одна у сторону Німеччини, а інша до Балтійських країн, та декілька інших[5].

1.3 Особливості та рівні китайської системи керування рухом поїздів CTCS

CTCS (Chinese Train Control System) – китайська система контролю поїздів. Дуже спирається на ERTMS/ETCS, і частково сумісна з ним. Згідно з вимог і характеристик – рівні застосування CTCS діляться на 5 рівнів (0-4), в залежності від обладнання, системи передачі, ділянки колій, перевірки вільності, режиму контролю тощо [6].

Рівень 0 – базовий рівень, складається з існуючих рейкових систем: універсальної локомотивної сигналізації, і т.д. На рівні 0 колійні сигнали – головні, а локомотивні – додаткові. Необов'язкова зміна колійних систем до рівня 0, потрібно тільки встановлення локомотивного обладнання CTCS, що включає в себе ядро та систем нагляду і запису. Підтримує максимальну швидкість до 120 км/год [6].

Рівень 1 складається з цифрових рейкових кіл (ZPW-2000) [8], баліз, та системи автоматичного захисту локомотива ATP (automatic train protection), що знаходиться на локомотиві, та системи запису і діагностики (LKJ-2000). На цьому рівні, колійні сигнали можна прибрати, за рух і безпеку відповідає локомотивна система ATP, яка керує основними функціями локомотиву: максимальною дозволеною швидкістю, відстань до кінця маршруту, відкривання і закривання дверей. Передавачі встановлюються на колії. Вимоги до обладнання вище на рівні. Максимальна швидкість 120-160 км/год.

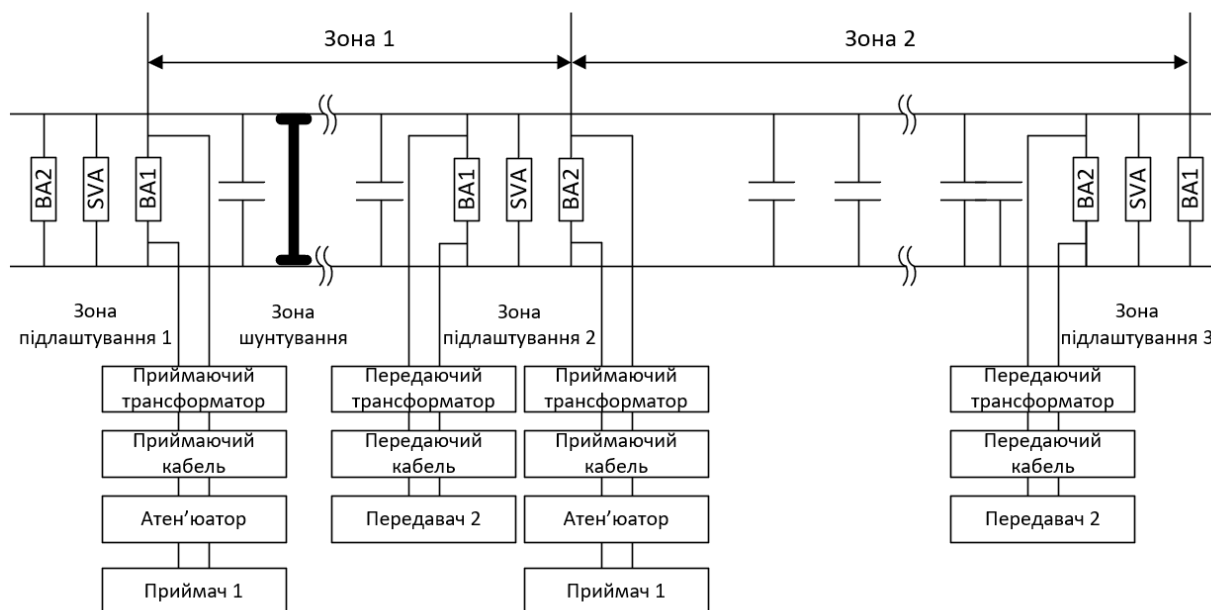


Рисунок 1.7 – Структурна схема ZPW-2000A

Рівень 2 складається з цифрових рейкових кіл (ZPW-2000A), баліз, і АТР. Відсутнє аналогове колійне обладнання. Цифрове рейкові кола передають інформацію про вільність наступних блок-ділянок, а балізи передають інформацію про маршрут, що надає АТР всю необхідну інформацію для керування локомотивом. Все ще використовується фіксовані колійні блок-ділянки. Використовується резервування головного комп'ютера (Vital Computer (VC)) 2 з 2. Максимальна швидкість 200-250 км/год. Схема рівня 2 зображена на рисунку 1.8.

Рівень 3 складається з цифрових рейкових кіл, баліз, АТР з GSM-R, і RBC (Центри радіоблочного контролю). На рівні 3 рейкові кола виконують тільки функції контролю зайнятості колії та перевірки цілісності составу. Рейкові кола більше не передають інформацію, потрібну для експлуатації локомотива.

Вся потрібна інформація передається через двосторонній GSM-R канал. GSM-R стає основою рівня, на цьому рівні все ще використовуються фіксовані блок-ділянки. RBC генерує дозвіл на рух (МА), балізи використовуються для визначення місцезнаходження. Дозволяє знизити інтервал між швидкісними поїздами до 3 хвилин. Використовується резервування головного комп'ютера (VC) 2 з 2. Максимальна швидкість – 300-350 км/год. Схема рівня 3 зображена на рисунку 1.9.

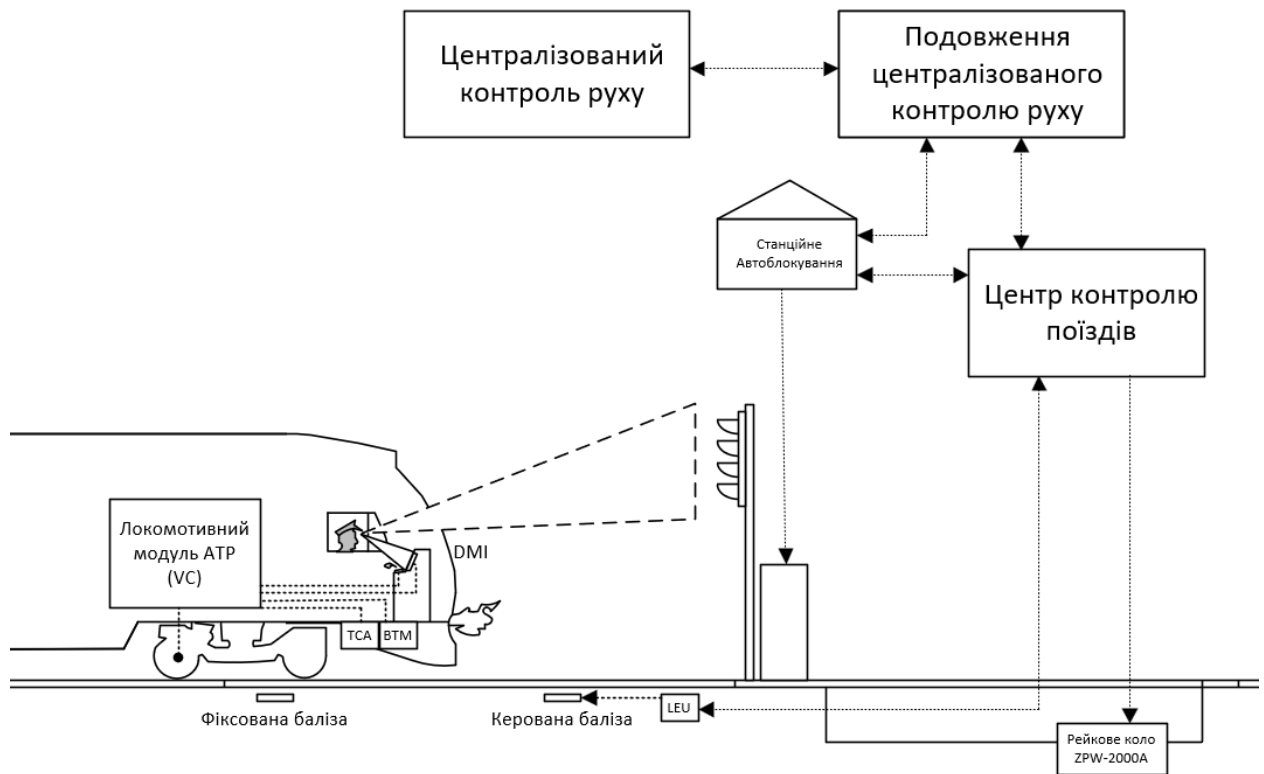


Рисунок 1.8 – Схема рівня 2 CTCS

Рівень 4 – на цьому рівні з'являється функція рухомих блок-ділянок. Вся інформація між локомотивами і колійними пристроями передається за допомогою GSM-R, тільки GPS або балізи використовуються для визначення місцезнаходження. Перевірка цілісності складу виконується локомотивними системами. Рейкові кола використовуються тільки на станціях. Кількість колійних пристроїв зменшена до мінімуму, щоби зменшити витрати на обслуговування системи.

Рівні 2,3,4 зворотно сумісні з нижчими рівнями. Як видно з опису функціональність рівня 3 CTCS еквівалентна рівню 2 ETCS. Рух у рухомих блок-ділянках, зниження відстаней гальмування, і зменшення кількості колійного обладнання можна побачити в рівнях 4 і 3, CTCS та ETCS відповідно.

У КНР CTCS-3/ETCS рівень 2 встановлений на першій високошвидкісній лінії, близько 1000 кілометровій, між містами Ухань і Гуанчжоу. Лінія була введена в експлуатацію у 2010 році. Повне покриття CTCS – близько 4200 км [7].

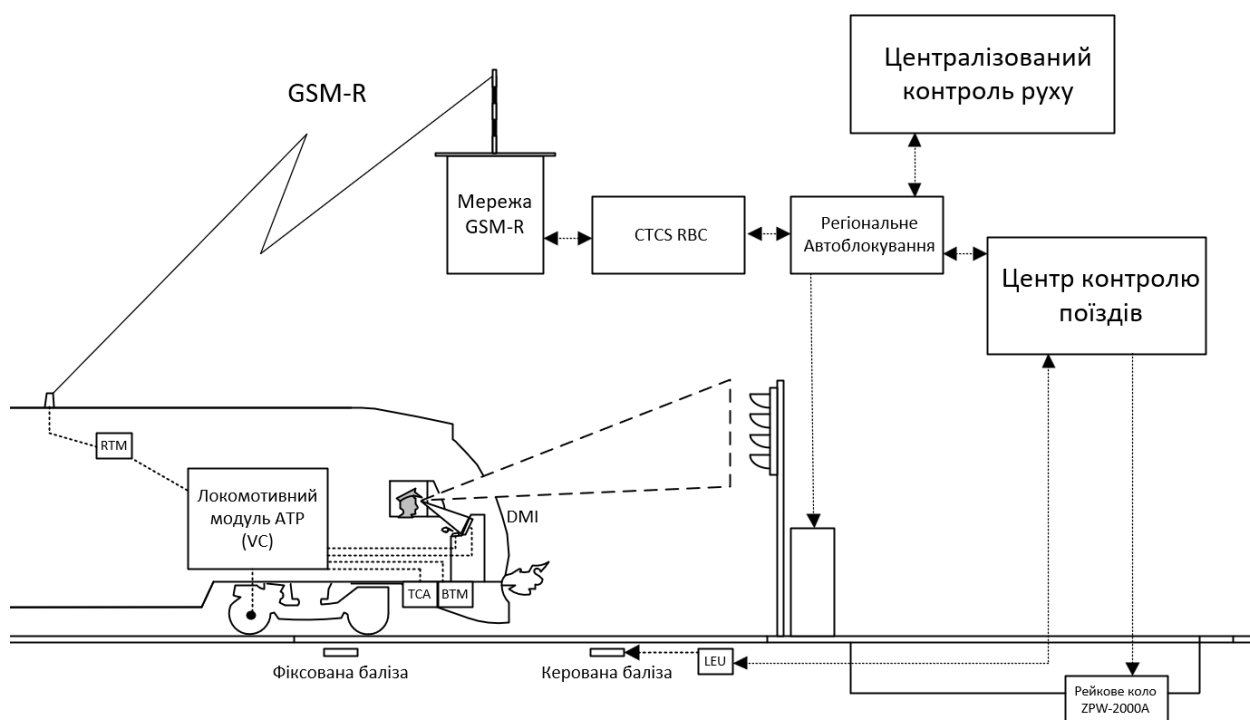


Рисунок 1.9 – Схема рівня 3 CTCS

1.4 Висновки за розділом 1

Можна побачити, з описаних вище систем ERTMS/ETCS та CTCS, що основні цілі систем – це відкритість архітектури, простота, інтероперабельність, компактність, гнучкість системи під потреби замовника. У перших рівнях – накладення нових систем на існуючі, без суттєвих змін у конструкції, і можливість синергії існуючих систем з новими з додаванням баліз та STM модулів. На більш високих рівнях – збільшення пріоритету передачі інформації через GSM-R, а не через колійне обладнання, і додавання дозволу на рух (Movement Authority (MA)), і контролю місцезнаходження через балізи. А у майбутньому двох систем – відмова від колійних пристроїв, і покладання майже повністю на GSM-R, що дуже зменшить витрати на обслуговування систем, та перекладення контролю цілісності состава на локомотивне обладнання з колійного.

Тому, спираючись на досвід цих систем, ми запропонуємо розроблену нами систему контролю рухом поїздів на базі колійних баліз.

2 СТРУКТУРА ТА ПРИНЦИП ДІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ ПОЇЗДІВ НА БАЗІ КОЛІЙНИХ БАЛІЗ

2.1 Структура системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз

У цьому розділі ми розробимо структурну схему та алгоритм роботи системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз, а у наступних розділах ми розберемо окремі блоки системи.

Запропоновану систему керування рухом поїздів на базі колійних баліз ми зробимо на основі існуючої колійної інфраструктури, з додаванням керованих і некерованих баліз, і пристроїв ув'язки з існуючою інфраструктурою (LEU), щоби запропонованими покращеннями зберегти і покращити існуючий рівень безпеки.

В системі диспетчерська централізація контролює стан колійних сигналів, стрілок, станційних пристроїв на віддаленні через систему автоматичного блокування (АБ) та електричної централізації (ЕЦ). Якщо ЕЦ відповідає за станційні пристрої, то АБ за перегони. З інформації, що наявна в системі – вирішується, як треба перевести стрілки, яке треба вивести показання світлофора. З цієї ж вирішальної інформації, в запропонованій системі ми будемо керувати балізами.

Наприклад, якщо на якійсь блок ділянці на перегоні поїзд заходить на ділянку, і через рейкові кола іде інформація на ДЦ, що рейкове коло зайнято - то на світлофор, який стоїть на вході в цю ділянку, в АБ подається сигнал про зміну з зеленого кольору (код 3), змінюється на червоний (код відсутній), і на світлофори за декілька блок ділянок до цього червоного відправляються коди КЖ, Ж щоби попередити наступні поїзди про зайнятість наступних ділянок. Тоді з цього вирішального сигналу від АБ про переведення на червоний, ми беремо і відправляємо інформацію в запропонований блок LEU, який конвертує та відправить цю інформацію, кабелем в зрозумілий для запропонованої керованої колійної балізи, яка під час зчитування, локомотивною антеною, на локомотив відправить цю інформацію, і на ДМІ машиніста з'явиться показання про наступну

зайнятість і обмеження швидкості для того щоб уникнути аварії з наступним поїздом. І паралельно цей же локомотив отримує цю інформацію, через зчитування приймальною котушкою АЛС, з рейкового кола, і виведе інформацію, про показання наступного світлофора, на локомотивний світлофор.

Це був приклад роботи системи з керованою балізою, а некерована баліза може передавати фіксовані значення про колійну ситуацію (майбутні підйоми, спуски, повороти, наближення до станцій, переїздів, мостів, тунелів), та постійні обмеження швидкості пов'язані з цим.

Структурна схема системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз представлена на рисунку 2.1.

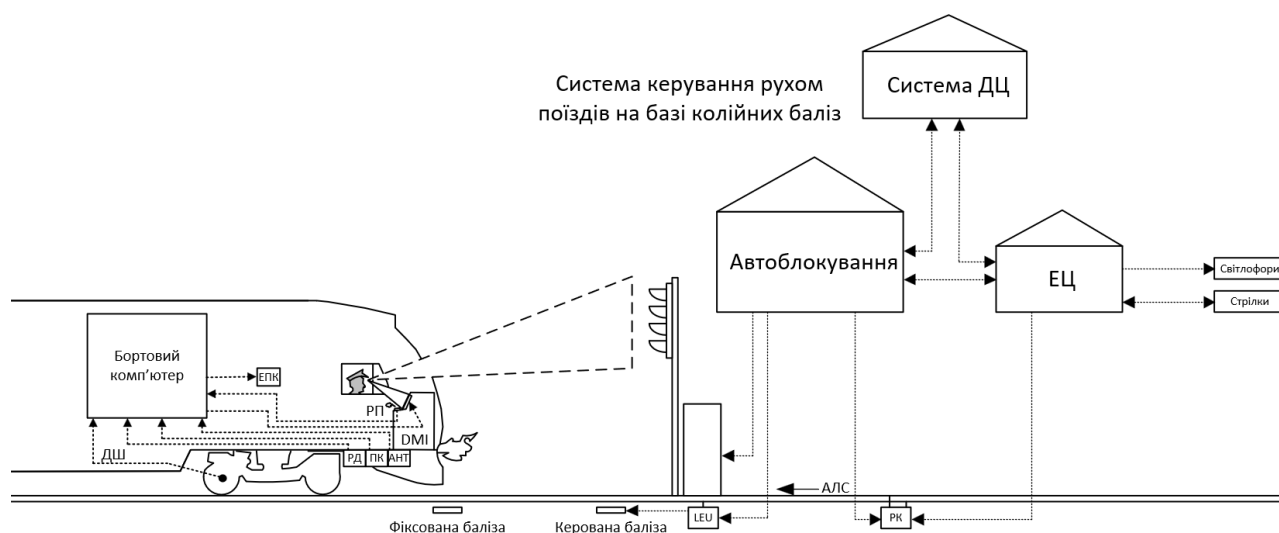


Рисунок 2.1 – Структура системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз

2.2 Алгоритм роботи системи забезпечення безпеки руху поїзда

У минулому розділі ми описали приклад роботи запропонованої системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз, і для забезпечення безпеки руху поїзда та не зменшення загальної надійності, системи додаванням нових підсистем до існуючої колійної інфраструктури – ми розробимо алгоритм, що буде коректно працювати і забезпечувати безпеку руху.

Блок-схема розробленого алгоритму роботи системи забезпечення безпеки руху поїзда представлена на рисунку 2.2.

Будемо вважати, що запропонований алгоритм починає працювати з ініціалізації руху поїзда, і в нього є початково задані обмеження руху в пам'яті локомотива, для безпечного початку руху, і отримання наступних команд через балізи або АЛС.

Після початку руху визначається наявність сигналу балізи, якщо сигнал є то визначення якого типу баліза, і визначення з цих даних обмеження швидкості, і занесення допустимої швидкості руху в змінну V_d , якщо немає сигналу, то буде зчитування даних з пам'яті, і встановлення допустимої швидкості руху з неї.

Далі визначається наявність сигналу АЛС, якщо сигнал є, то індикація найбільш забороняючого сигналу, і визначення з цих даних обмеження швидкості, і занесення допустимої швидкості руху в змінну V_d , тільки якщо ця швидкість менше за ту, що уже в змінній.

У наступному блоці ми зчитуємо фактичну швидкість (V_f) з алгоритму визначення фактичної швидкості поїзда (підрозділ 2.4), і виводимо на ДМІ V_f , V_d .

Далі порівнюємо V_f та V_d , якщо $V_f < V_d$, то повертаємось до початку, якщо $V_f > V_d$, то відбувається звукове та світлове попередження. Потім через 6-7 секунд перевіряється чи натиснута ручка пильності (РП), якщо так то знову повертаємось до блоку визначення фактичної швидкості, якщо ні, то застосовується автоматичне гальмування, поїзд зупиняється, кінець алгоритму.



Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи системи забезпечення безпеки руху поїзда

2.3 Принцип дії радару Доплера

Принцип дії радару Доплера базується на визначення різниці між відправленою та відбитою частотою від об'єкта опромінення, доплерівським зсувом. І для визначення швидкості радаром використовується формула (2.1) [13]

$$v_{pd} = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot f_0}, \quad (2.1)$$

де c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у повітрі $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с,

Δf – доплерівський зсув частоти,

f_0 – частота випромінюваного сигналу.

Зазвичай, радары Доплера є статичними і вимірюють рухомі цілі, але у цьому випадку радар Доплера знаходиться на локомотиві, знаходиться у русі і проводить вимірювання відносно землі, тому будемо компенсувати деякі труднощі, що виникають у зв'язку з цим.

Перша проблема – це частотний діапазон. Розглянемо декілька діапазонів і оберемо той, що нам більше підходить:

X-діапазон (8-12 ГГц)

Застосування:

Раніше використовувався в поліцейських радарях, зараз для аматорських та деяких спортивних застосунків.

Особливості:

Низька вартість, обмежена дальність, більш схильний до впливу перешкод.

K-діапазон (18-27 ГГц)

Застосування:

Часто використовується для сучасних портативних радарів

Особливості:

Гарний баланс між дальністю та точністю, широке використання в транспортній промисловості, більш схильний до затухання сигналу в дощ та туман.

Ka-діапазон (27-40 ГГц)

Застосування:

Часто використовується у сучасних високоточних радарях.

Особливості:

Висока точність і завадостійкість, затухання сигналу на великих відстанях, велика вартість обладнання.

Обираємо К-діапазон, а саме 24 ГГц – ISM-діапазону (24.0-24.25 ГГц) (Industrial, Scientific, and Medical), цей діапазон часто використовується в портативних радарх та промисловості та не потребує спеціальних ліцензій на використання в більшості країн[11].

Друга проблема – це розміщення радару. Розміщуватись радар буде якнайближче до землі, для мінімальної похибки. Кут нахилу радару: як відомо, у радара Доплера – є один суттєвий мінус, коли радар направлений строго перпендикулярно до поверхні та паралельно напрямку руху, то ефект Доплера майже відсутній. Це пов'язано з тим, що радіохвилі не мають складових руху вздовж напрямку руху і відстань до об'єкту вимірювання статична, і при таких складових зсув частоти буде мінімальним і дані - некоректні. Тому для цього ми направляємо промінь трохи під кутом θ до вертикалі, щоби з'явився рух у напрямку радару, приклад на рисунку 2.3. Тому якщо підставити у формулу урахування кута нахилу радару то,

$$v_{pd} = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot f_0 \cdot \cos(\theta)}, \quad (2.2)$$

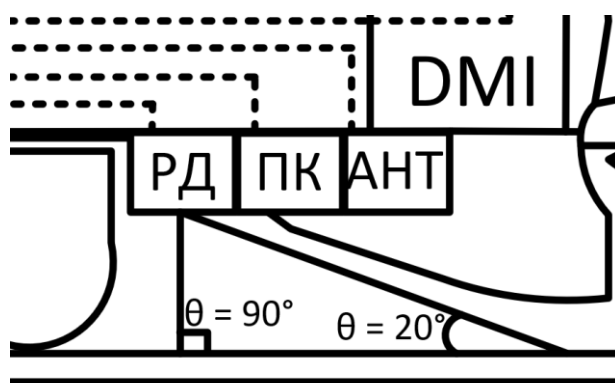


Рисунок 2.3 – Кут нахилу радару Доплера

При $\theta = 0^\circ$ (радар дивиться уздовж руху) – максимальна точність

При $\theta = 90^\circ$ (радар дивиться перпендикулярно вниз) – вимірювання неможливі

Тому з цього треба обрати кут якнайближче до 0° , з цього оберемо кут $\theta = 20^\circ$.

Підставимо отримані дані у формулу (2.5) і отримаємо коефіцієнт $K1$ для наступних формул [13]

$$v_{pd} = \frac{\Delta f * 3 * 10^8}{2 * (24 * 10^9) * \cos(20^\circ)} \quad (2.3)$$

$$v_{pd} = \frac{\Delta f}{150.035088} \quad (2.4)$$

$$K1 = \frac{1}{150.035088} = 0.0066511 = 6.6511 * 10^{-3} \quad (2.5)$$

$$v_{pd} = \Delta f * K1 \quad (2.6)$$

Ще одна проблема радарів Доплера – при руху цілі на швидкостях близьких до 0, радар перестає сприймати зміни швидкості. Розрахуємо яка буде мінімальна швидкість спрацювання радара з запропонованими параметрами.

Розрахунок мінімальної швидкості

Більшість радарів, в лабораторних умовах, зараз можуть сприймати зміни відбитої частоти з точністю до 1 Гц і менше, але в реальній експлуатації ця цифра ближче до 10-20 Гц, оберемо гірший варіант – 20 Гц.

Підставимо дані у формулу (2.6)

$$v_{pd} = 20 * 6.6511 = 0.133 \frac{м}{с} = 0.479 \frac{км}{год} \approx 0.5 \frac{км}{год} \quad (2.7)$$

Ми з'ясували, що радар Доплера на запропонованих налаштуваннях може почати розпізнавати швидкість від 0.5 км/год.

2.4 Алгоритм визначення фактичної швидкості поїзда

Для точного визначення швидкості локомотива ми будемо використовувати два датчика вимірювання швидкості, які дуже відрізняються за методом визначення.

Перший датчик – тахометричний, який рахує кількість обертів колеса за визначений проміжок часу і з цього визначає швидкість. Але у нього є проблеми з точністю через знос колісної пари та не притаманні режими роботи: Буксування, коли на колесо передається зависокий момент і колесо не може зачепитись за рейку

і рухомий склад майже не рухається; Юз, коли на швидкості застосовується гальма, колесо зупиняється, але через високу інерцію рухомий склад продовжує рух. І на цих непритаманних режимах тахометричний датчик буде видавати некоректні дані швидкості.

Другий датчик – радар Доплера, який вимірює швидкість відправленням радіохвиль в напрямку об'єкта та отримання відбитих радіохвиль і вирахування з різниці частоти (Δf), формула (2.6) для розрахунку швидкості за допомогою радара Доплера. Мінуси радару ми розглянули у минулому підрозділі. Але підсумуємо їх тут: це кут нахилу до напрямку руху і зниження точності вимірювання через це, частота радара, та неможливість вимірювання швидкості менше 0.5 км/год.

Тому враховуючи плюси і мінуси обох датчиків був розроблений алгоритм визначення швидкості поїзда, блок-схема якого зображена на рисунку 2.4.

2.5 Висновки за розділом 2

У другому розділі запропонована система керування рухом поїздів на базі баліз для застосування в Україні. Розроблена структурна схема та алгоритм роботи системи. Запропоновано також алгоритм визначення фактичної швидкості поїзда, який базується на застосуванні двох датчиків: тахометричного та радара Доплера. Виконано розрахунок параметрів Доплера. У наступних розділах розглянемо більш детально інші блоки запропонованої системи керування рухом поїздів на базі колійних баліз.

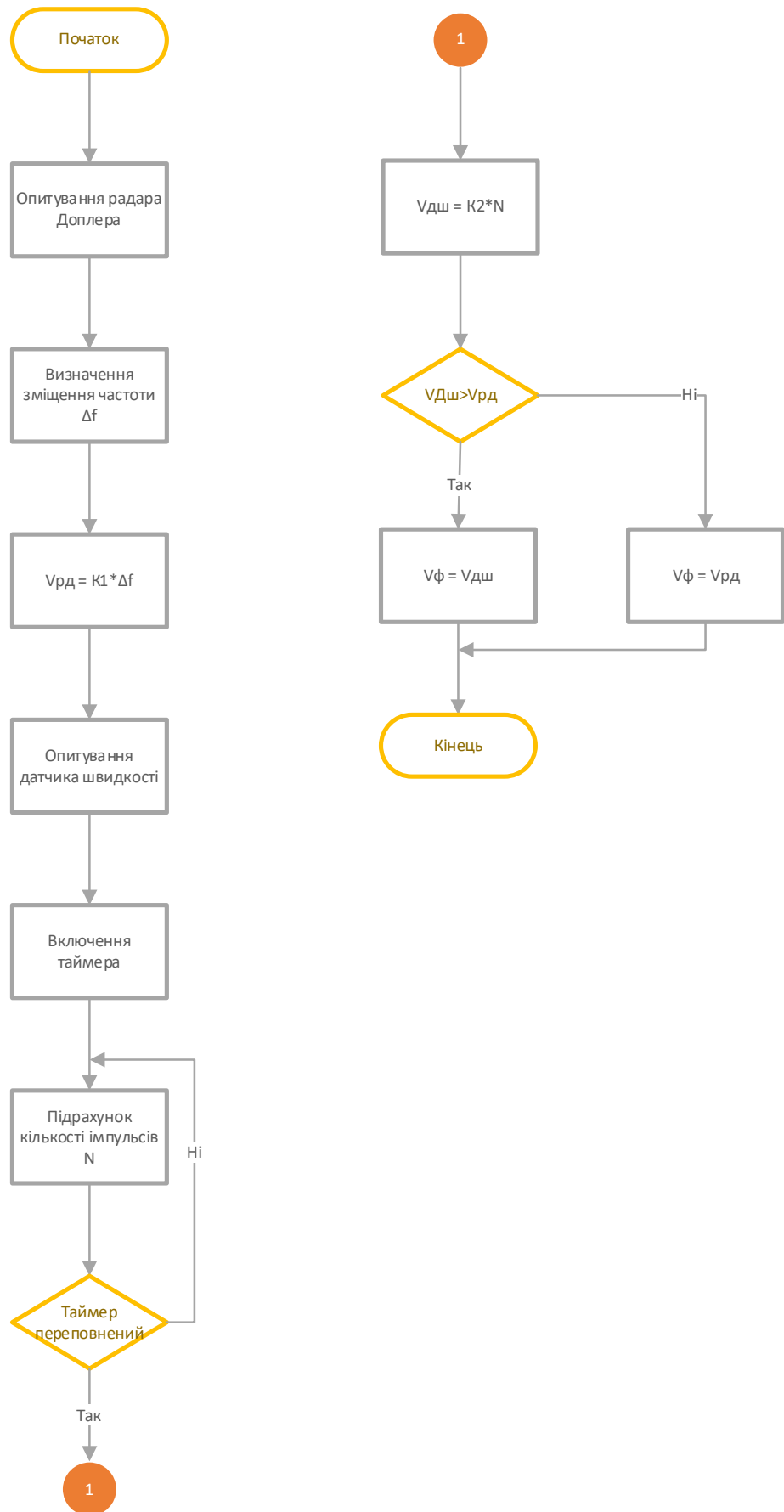


Рисунок 2.4 – Алгоритм визначення фактичної швидкості поїзда

3 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ БЕЗДРОТОВОГО ЖИВЛЕННЯ КОЛІЙНОЇ БАЛІЗИ

3.1 Особливості та технічні характеристики євробаліз

Для забезпечення точкової передачі даних з колії на локомотив використовуються балізи.

Колійна баліза – це пристрій для передачі телеграм на локомотивне обладнання. Балізи можуть передавати як фіксовані, так і змінні телеграми, змінні – коли приєднані до LEU, а постійні треба спеціально перепрограмувати. Зазвичай, балізи організовані в групи, кожна баліза в якій передає свою телеграму і комбінація всіх телеграм визначає, що саме за повідомлення передала група баліз [2].

Частота сигналу живлення балізи від локомотивної антени дорівнює $27.095 \text{ МГц} \pm 5.419 \text{ кГц}$

Частота зворотного інформаційного сигналу балізи дорівнює $3.9\text{-}4.5 \text{ кГц} \pm 0.1 \text{ кГц}$

Формат телеграми описаний у Таблиці 3.1. Є два варіанти: довгий формат, і короткий. Довгий $n_L = 1023 (=93*11)$ бітів, а короткий $n_S = 341 (=31*11)$ біт. Де біти телеграми позначаються, як $b_{n-1}, b_{n-2}, \dots, b_1, b_0$. Телеграма передається зліва направо.

Частота помилок (BER – bit error rate) при передачі даних, у центральній зоні контакту кожної балізи, має менше ніж $1 * 10^{-6}$.

Таблиця 3.1 – Формат телеграми колійної балізи

Сформовані дані	Контрольні біти (cb)	Біти скремблінгу (sb)	Додаткові біти скремблінгу (esb)	Перевірочні біти
$83*11=913$ або $21*11=231$ біт	3 біти	12 бітів	10 бітів	85 бітів

Телеграма починається з блоку сформованих даних, де дані користувача пройшли скремблінг і були відформатовані за наступними правилами :

Скремблінг:

1. Заміна перших 10 бітів користувача на функцію з усіх бітів користувача.
2. Обчислення 32-бітного цілого числа 'S' з 12 бітів скремблінгу (sb).
3. Скремблінг, використовуючи 32-бітний регістр зсуву лінійного зворотного зв'язку з початковим значенням числом 'S'

Призначення пункту 1 і формулювання 3-го, щоб впевнитись, що зміна навіть одного біту користувача у підсумку дасть повністю іншу послідовність після скремблінгу [2].

Перетворення з 10 біт на 11 біт:

1. Біти, що пройшли скремблінг поділяються на блоки по 10 бітів, і повинно вийти 83 блоки – з довгого формату, та 21 – з короткого.
2. Кожен блок перетворюється в 11-бітне вісімкове слово, використовуючи таблицю підстановки. Правило підстановки у тому, що кожен блок розглядається, як ціле число 'i' між 0 і 1023, і перетворене на i-те слово зі таблиці вісімкових значень.

У довгому форматі цей блок складається з 913 бітів (з 83-х 11-бітних слів), тобто біти $b_{1022...110}$. У короткому форматі блок складається з 231 біта (з 21-го 11-бітного слова), біти $b_{340...110}$. Кожне слово містить в собі 10 бітів користувача, тобто у довгому – 830 бітів користувача, а у короткому – 210.

Контрольні біти (cb) - $b_{109...107}$, перший b_{109} – біт інверсії завжди 0, два інших $b_{108...107}$ – зараз не використовуються, і залишені на майбутнє, зараз вони $b_{108} = 0$, $b_{107} = 1$.

Біти скремблінгу (sb) - $b_{106...95}$, містять в собі початковий стан скремблера, який працює с даними до скремблінгу.

Додаткові біти скремблінгу (esb) - $b_{94...85}$ використовуються для дотримання обмежень на незалежність перевірочних бітів від скремблінгу, вони ігноруються приймачем (окрім випадків, коли контрольні біти вже перевірені).

Контрольні біти - $b_{84...0}$, 75 з яких перевіряють парність для коду, що виявляє помилки, а інші 10 для синхронізації.

Зазвичай, телеграма повторюється без змін, на увесь час проїзду локомотиву, але якщо передавач переходить на іншу телеграму, то між старою та новою телеграмою – вставляється послідовність нулів довжиною від 75 до 128 бітів, для логічного розділення телеграм.

Декодування телеграми приймачем іде у двох варіантах, для довгого ($n=1023$), та короткого ($n=341$):

1. Визначення проміжку послідовно прийнятих бітів $n+r$ (для довгого $r=77$, для короткого $r=121$, якщо послідовність перейшла за 7500 бітів, то $r=n$).
2. Перевірка на парність, якщо не сходяться – 1 пункт.
3. Перевірка на збіг найправих та найлівих бітів, якщо не сходяться – 1 пункт.
4. Перевірка чи всі 11-бітні слова правильні, якщо не сходяться – 1 пункт.
5. Після цього моменту телеграма вже безпечна.
6. Перевірка чи біт $b_{109} = 1$, якщо так, то всі отримані біти можуть бути використані після інверсії.
7. Перевірка чи біти $b_{108} = 1$ або $b_{107} = 0$, то переривається повідомленням “невідомий формат телеграми”.
8. Провести зворотнє 10 то 11-біт перетворення.
9. Дескремблювання
10. Видати біти користувача в оригінальному стані з $b_{109} = 0$.

Таблиця 3.2 – Залежність довжини телеграми від максимально дозволеної швидкості

Тип балізи	Максимально дозволена швидкість	
	До 300 км/год	Від 300 до 500 км/год
Стандартний розмір	Довга (1023 біти) і коротка (341 біт)	Довга (1023 біти) і коротка (341 біт)
Зменшений розмір	Довга (1023 біти) і коротка (341 біт)	Коротка (341 біт)

Експлуатаційні вимоги системи передачі євробалізи залежать від: дизайну антенного блоку (локомотив), дизайну балізи, і вимог документації. Розглядаються два розміри євробалізи :

Стандартний, має мати розміри 358 мм × 488 мм

Зменшений, має мати розміри 200 мм × 390 мм

Зменшена баліза має можливість бути встановленою поперек рейкової колії. Всі виробники баліз мають дотримуватись однакових розмірів, щоб була можлива сумісність. Довжина телеграми має враховувати розмір балізи та максимально дозволена швидкість на відрізку [2]. Залежності між довжиною телеграми та швидкістю представлені у таблиці 3.2, характеристики віддачі – на рисунку 3.1 та у таблицях 3.3, 3.4, часова діаграма інформаційного частотно-модульованого сигналу балізи – на рисунку 3.2.

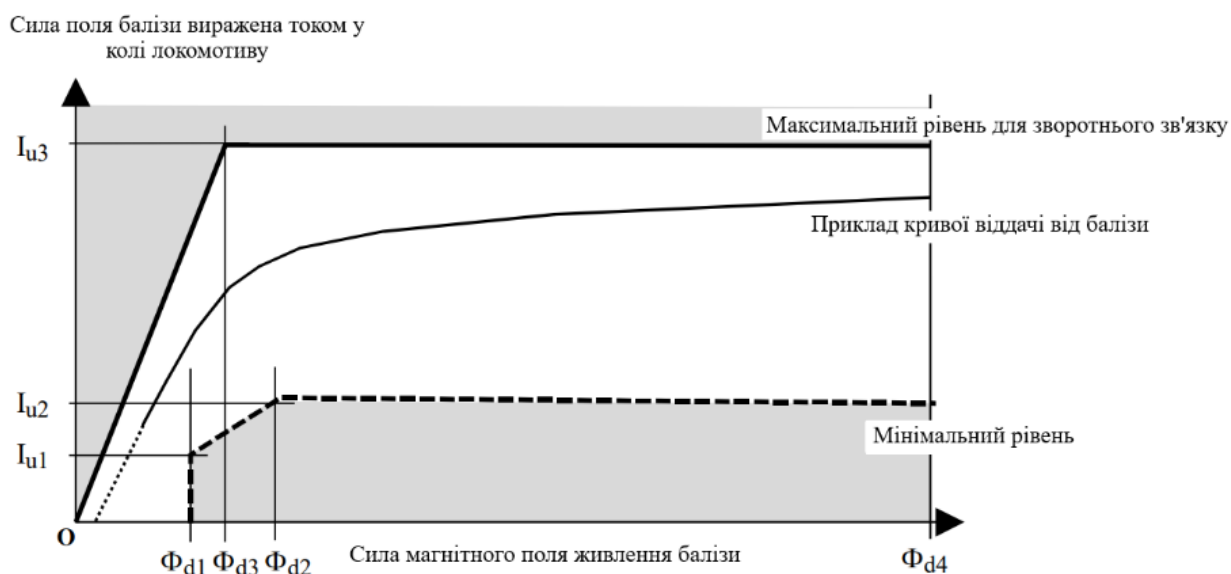


Рисунок 3.1 – Залежність рівня зворотного зв'язку балізи від сили магнітного поля передавача

Таблиця 3.3 – Характеристики віддачі стандартної балізи

$I_{u1} = 23 \text{ мА}$	$I_{u2} = 37 \text{ мА}$	$I_{u3} = 116 \text{ мА}$	$I_{u4} = 116 \text{ мА}$	Зворотні пошкодження
$\Phi_{d1} = 7.7 \text{ нВс}$	$\Phi_{d2} = 12.2 \text{ нВс}$	$\Phi_{d3} = 9.2 \text{ нВс}$	$\Phi_{d4} = 200 \text{ нВс}$	$\Phi_{d5} = 300 \text{ нВс}$

Таблиця 3.4 – Характеристики віддачі зменшеної балізи

$I_{u1} = 37 \text{ мА}$	$I_{u2} = 59 \text{ мА}$	$I_{u3} = 186 \text{ мА}$	$I_{u4} = 186 \text{ мА}$	Зворотні пошкодження
$\Phi_{d1} = 4.9 \text{ нВс}$	$\Phi_{d2} = 7.7 \text{ нВс}$	$\Phi_{d3} = 5.8 \text{ нВс}$	$\Phi_{d4} = 130 \text{ нВс}$	$\Phi_{d5} = 250 \text{ нВс}$

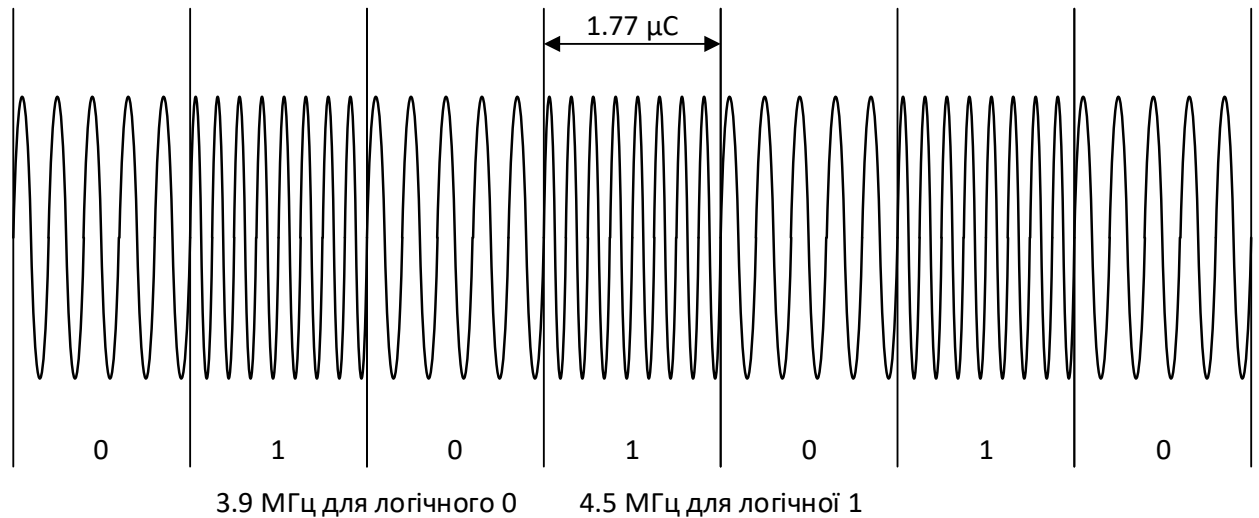


Рисунок 3.2 – Частотна модуляція вихідного сигналу балізи

3.2 Визначення взаємної індуктивності між локомотивною та колійною котушками

Виконаємо моделювання каналу бездротового живлення колійної балізи. Спочатку розрахуємо взаємну індуктивність між локомотивною та колійною котушками.

Розглянемо два довільних індуктивно зв'язаних контури (рисунок 3.3). Взаємна індуктивність таких контурів визначається наступним виразом

$$M = \frac{M_0}{4\pi} * \iint_{L_1 L_2} \frac{dl_1 * dl_2}{r}, \quad (3.1)$$

де $M_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна стала;

L_1, L_2 – перший та другий контур;

dl_1, dl_2 – ділянки контурів 1 та 2, по яким виконується інтегрування;

r – відстань між ділянками контурів.

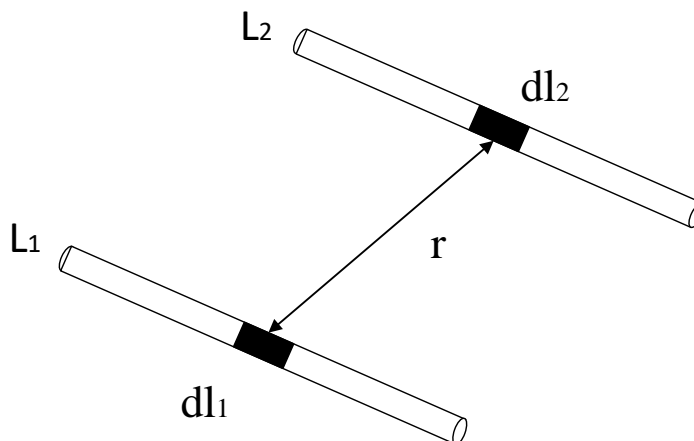


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення ділянок двох контурів, що індуктивно взаємодіють

Взаємно розташування колійної котушки (КК) та локомотивної котушки зображене на рисунку 3.4. Кожна котушка складається з чотирьох ділянок. Розглянемо дві довільних точки на ділянках 1 та 1'.

На ділянці 1 точка має координати (x_1, y_1, z_1) , а на ділянці 1' – (x_2, y_2, z_2) . Тому відстань між цими точками визначаємо за формулою

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3.2)$$

Далі спростимо формулу для зручності розрахунку для ділянки 11'.

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (D - a_2 + a_1)^2 + h^2} \quad (3.3)$$

де a_1, b_1 – розміри колійної котушки

a_2, b_2 – розміри локомотивної котушки

Тоді взаємна індуктивність між точками на ділянках 1 та 1':

$$M_{11'} = \frac{M_0}{4\pi} * \int_{-b_1}^{b_1} \int_{-b_2}^{b_2} \frac{dx_1 * dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (D - a_2 + a_1)^2 + h^2}} \quad (3.4)$$

Аналогічно визначимо взаємну індуктивність між іншими ділянками контурів.

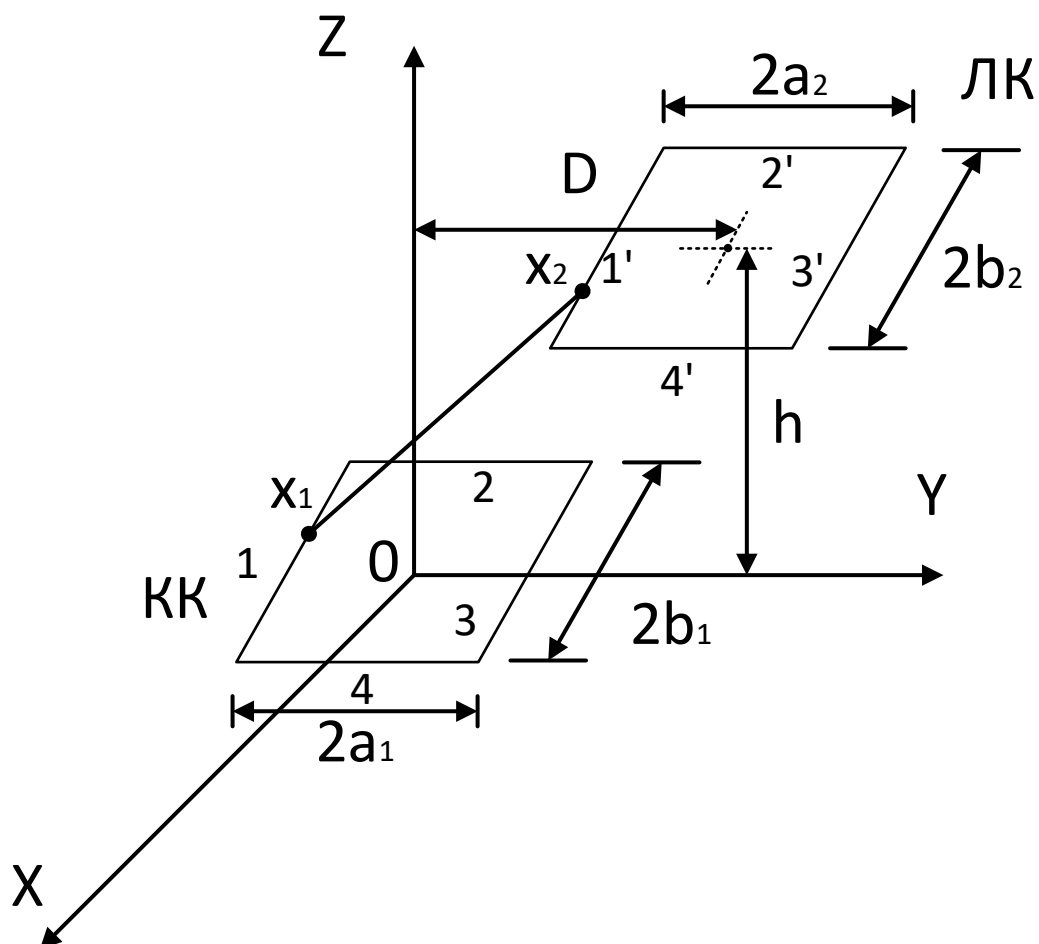


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення розташування двох колійної та локомотивної котушок

Між ділянками 1 та 3`:

$$M_{13'} = \frac{M_0}{4\pi} \int_{-b_1}^{b_1} \int_{-b_2}^{b_2} \frac{dx_1 * dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (D + a_2 + a_1)^2 + h^2}} \quad (3.5)$$

Між ділянками 3 та 1`:

$$M_{31'} = \frac{M_0}{4\pi} \int_{-b_1}^{b_1} \int_{-b_2}^{b_2} \frac{dx_1 * dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (D - a_2 - a_1)^2 + h^2}} \quad (3.6)$$

Між ділянками 3 та 3`:

$$M_{33'} = \frac{M_0}{4\pi} \int_{-b_1}^{b_1} \int_{-b_2}^{b_2} \frac{dx_1 * dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (D + a_2 - a_1)^2 + h^2}} \quad (3.7)$$

Між ділянками 2 та 2`, а також 4 та 4`,:

$$M_{22'} = M_{44'} = \frac{M_0}{4\pi} * \int_{-a_1}^{a_1} \int_{-a_2}^{a_2} \frac{dx_1 * dx_2}{\sqrt{(y_2 - y_1 + D)^2 + (b_2 - b_1)^2 + h^2}} \quad (3.8)$$

Між ділянками 2 та 4', а також 4 та 2',:

$$M_{24'} = M_{42'} = \frac{M_0}{4\pi} * \int_{-a_1}^{a_1} \int_{-a_2}^{a_2} \frac{dx_1 * dx_2}{\sqrt{(y_2 - y_1 + D)^2 + (b_2 + b_1)^2 + h^2}} \quad (3.9)$$

Взаємна індуктивність всіх перпендикулярних між собою ділянок дорівнює нулю.

З урахуванням напрямків протікання струмів на різних ділянках взаємна індуктивність дорівнює:

$$M = M_{11'} - M_{13'} + M_{33'} - M_{31'} + 2M_{22'} - 2M_{24'} \quad (3.10)$$

Якщо кількість витків в першому контурі – w_1 , а в другому – w_2 , то взаємна індуктивність визначається:

$$M = w_1 * w_2 * (M_{11'} - M_{13'} + M_{33'} - M_{31'} + 2M_{22'} - 2M_{24'}) \quad (3.11)$$

Власна індуктивність колійної та локомотивної котушки визначається наступним чином:

$$L_1 = \frac{M_0}{\pi} * \left[a_1 * \ln \frac{2 * a_1 * b_1}{r_1 * (a_1 + d_1)} + b_1 * \ln \frac{2 * a_1 * b_1}{r_1 * (b_1 + d_1)} - 2 * (a_1 + b_1 - d_1) \right] + \frac{\mu * M_0}{\pi} * \left(\frac{a_1 + b_1}{4} \right) * w_1^2 \quad (3.12)$$

$$L_2 = \frac{M_0}{\pi} * \left[a_2 * \ln \frac{2 * a_2 * b_2}{r_2 * (a_2 + d_2)} + b_2 * \ln \frac{2 * a_2 * b_2}{r_2 * (b_2 + d_2)} - 2 * (a_2 + b_2 - d_2) \right] + \frac{\mu * M_0}{\pi} * \left(\frac{a_2 + b_2}{4} \right) * w_2^2, \quad (3.13)$$

де μ – магнітна проникність матеріалу проводу;

r_1, r_2 – радіуси перерізу проводів котушок;

$$d_1 = \sqrt{a_1^2 + b_2^2} \quad (3.14)$$

$$d_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (3.15)$$

3.3 Визначення потужності живлення колійної балізи

Після того, як ми отримали величини індуктивності котушок, ми зможемо розрахувати потужність, яку отримає колійна котушка (КК) від проходження над

нею локомотивної котушки (ЛК). Схема заміщення схеми зображена на рисунку 3.5.

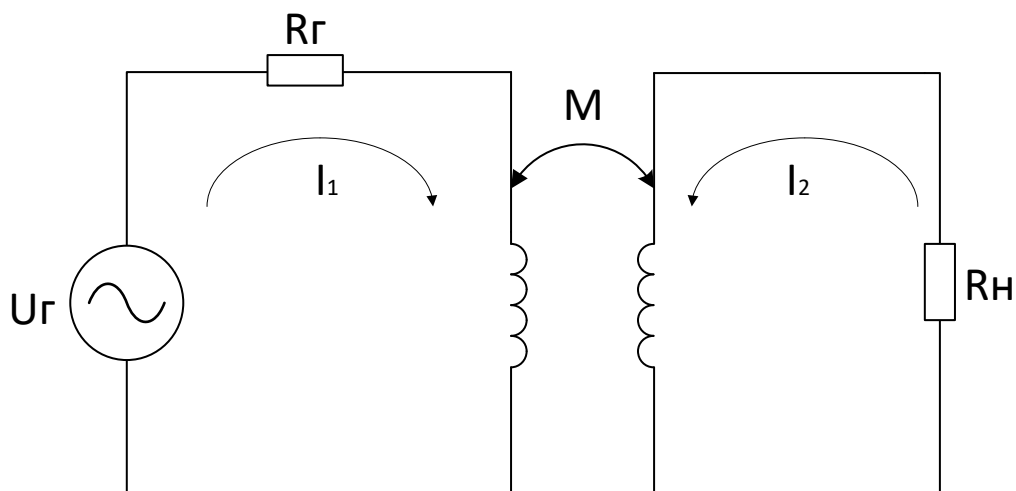


Рисунок 3.5 – Схема заміщення електричних кіл двох котушок

На рисунку 3.5 :

U_{Γ} – напруга на виході локомотивного генератора;

R_{Γ} – активний опір локомотивного контуру;

$R_{\text{н}}$ – активний опір електронної схеми балізи (опір навантаження);

L_1, L_2 – індуктивності локомотивної та колійної котушок відповідно.

Для розрахунку потужності спочатку напишемо перший закон Кірхгофа в комплексній формі для локомотивного та колійного контурів.

$$\begin{cases} \dot{U}_r = \dot{I}_1 * R_r + j * \omega * L_1 * \dot{I}_1 + j * \omega * M * \dot{I}_2 \\ -j * \omega * M * \dot{I}_1 = j * \omega * L_2 * \dot{I}_2 + \dot{I}_2 * R_{\text{н}} \end{cases} \quad (3.16, 3.17)$$

З рівняння (3.16) визначимо струм I_1

$$I_1 = \frac{\dot{U}_r - j * \omega * M * \dot{I}_2}{R_r + j * \omega * L_1} \quad (3.18)$$

Підставимо вираз (3.18) у рівняння (3.17)

$$-j * \omega * M * \frac{\dot{U}_r - j * \omega * M * \dot{I}_2}{R_r + j * \omega * L_1} = \dot{I}_2 (R_{\text{н}} + j * \omega * L_2) \quad (3.19)$$

Виконаємо спрощення виразу (3.19)

$$\begin{aligned} -j^* \omega^* M^* \dot{U}_r - \omega^2 * M^2 * \dot{I}_2 &= \dot{I}_2 (R_n + j^* \omega^* L_2) * (R_r + j^* \omega^* L_1) \\ -j^* \omega^* M^* \dot{U}_r &= \dot{I}_2 (R_n + j^* \omega^* L_2) * (R_r + j^* \omega^* L_1) + \omega^2 * M^2 * \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

За формулою (3.20) знайдемо струм \dot{I}_2

$$\dot{I}_2 = \frac{-j^* \omega^* M^* \dot{U}_r}{(R_r + j^* \omega^* L_1) * (R_n + j^* \omega^* L_2) + \omega^2 * M^2} \quad (3.21)$$

Далі визначимо потужність живлення колійної балізи

$$P_2 = \frac{I_{2m}^2 * R_n}{2}, \quad (3.22)$$

де $I_{2m}^2 = |\dot{I}_2|$ – амплітуда струму навантаження.

На базі цих формул була розроблена програма в середовищі MATLAB для моделювання бездротового каналу живлення колійної балізи.

3.4 Результати моделювання

В результаті моделювання були отримані залежності потужності, що наводиться у колійній котушці, від різних параметрів локомотивної та колійної котушок.

Дослідження проводимо за такими параметрами:

- Розміри котушки 2 (балізи): ширина = 0.358 м, довжина = 0.488 м.
- Відстань між котушками $h = 0.21$ м.
- Частота сигналу живлення $f = 27.095$ МГц.
- Радіус перерізу проводу котушок $R1=R2= 0.0005$ м.

Залежність потужності у колійній котушці від довжини і ширини локомотивної котушки представлена на рисунку 3.6. При визначені даної залежності вважали, що горизонтальне зміщення між котушками відсутнє.

Розглянемо кілька точок отриманої залежності.

Крайнє значення 1

0.1 м - ширина

1 м – довжина

Показало середню потужність

$$P_2 = 1.85 \text{ мВт}$$

Крайнє значення 2

1 м - ширина

0.1 м – довжина

Показало середню потужність

$$P_2 = 4.6 \text{ мВт}$$

Крайнє значення 3

1 м – ширина

1 м – довжина

Показало середню потужність

$$P_2 = 4.2 \text{ мВт}$$

Найбільш ефективне значення

0.45 м - ширина

0.35 м – довжина

Показало середню потужність

$$P_2 = 0.1 \text{ Вт}$$

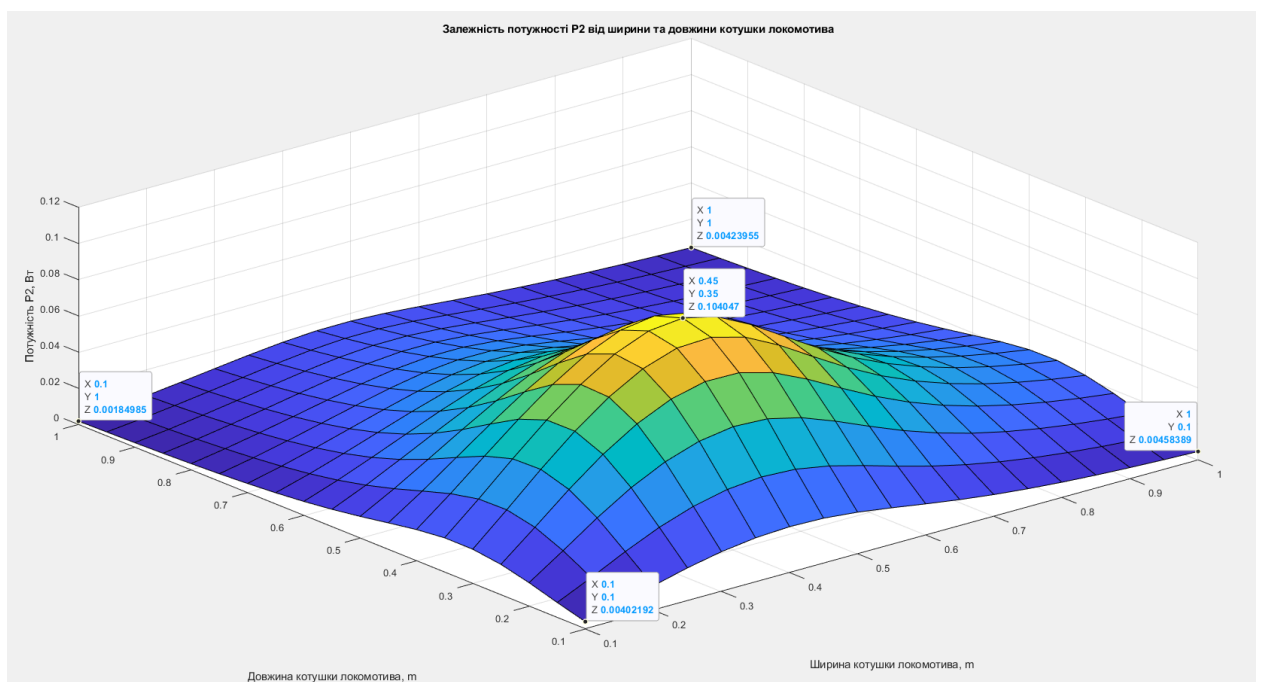


Рисунок 3.6 – Залежність P_2 від ширини та довжини локомотивної котушки

Далі розглянемо залежність потужності у колійній котушці від числа витків W_1 , W_2 . При виконанні цих розрахунків вважали, що локомотивна котушка має розміри: ширина = 0.45 м, довжина = 0.35 м.

Було встановлено, що найбільша потужність досягається для трьох співвідношень числа витків: 1) $W_1 = 4$, $W_2 = 1$; 2) $W_1 = 2$, $W_2 = 2$; 3) $W_1 = 1$, $W_2 = 4$.

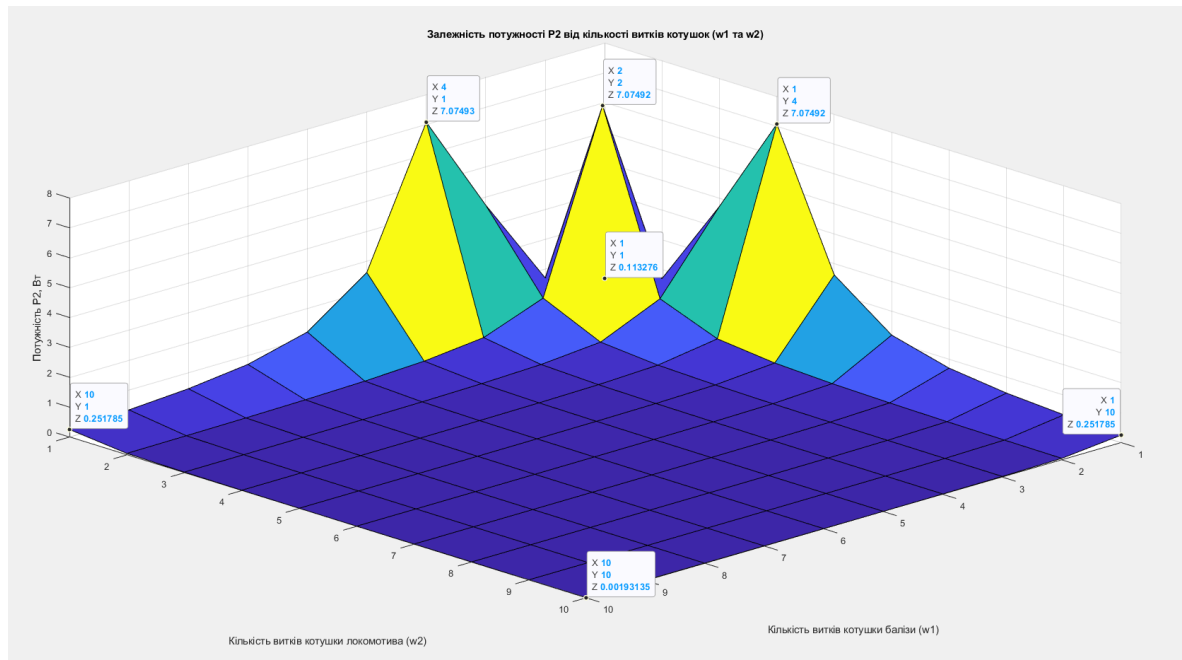


Рисунок 3.7 – Залежність P_2 від кількості витків котушок w_1 , w_2 (к3)

Залежність потужності у колійній котушці від горизонтального зміщення між котушками представлена на рисунку 3.8. При визначенні цієї залежності були обрані наступні параметри котушок.

Розміри локомотивної котушки:

Ширина = 0.45 м, Довжина = 0.35 м

Кількість витків котушок:

w_1 (баліза) = 2 витка, w_2 (локомотив) = 2 витка.

Отримана залежність дозволяє отримати ширину зони чутливості балізи відповідно до граничного найменшого значення потужності, при якому

активується баліза. Наприклад, при граничному рівні 1 Вт ширина зони чутливості складає приблизно 0,8 м (від -0,4 м до +0,4 м).

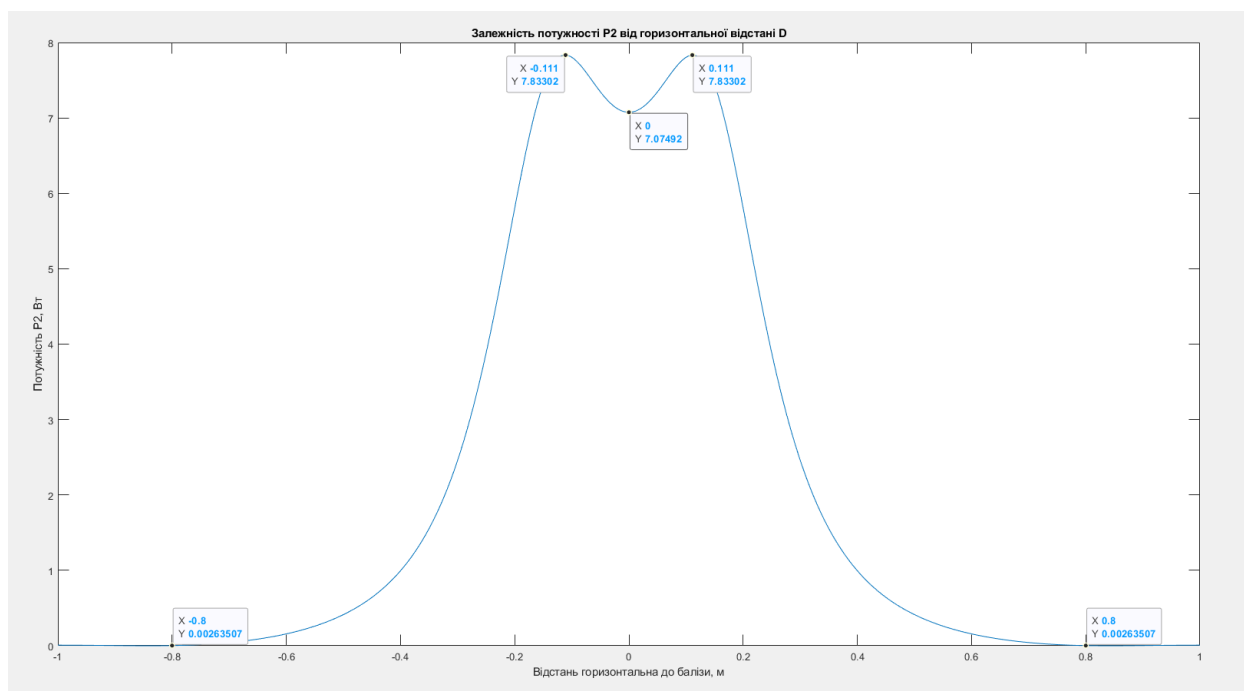


Рисунок 3.8 – Залежність P_2 від горизонтальної відстані D між котушками

3.5 Висновки за розділом 3

В даному розділі розглянуто особливості та технічні характеристики євробаліз, які використовуються в системі керування залізничними перевезеннями ERTMS/ETCS, проведено аналіз формату телеграм та методів забезпечення завадостійкості. Проведене також моделювання каналу бездротового живлення колійної балізи. Отримані математичні вирази для визначення взаємної індуктивності між локомотивною та колійною котушками, а також потужності, що наводиться у балізі. Відповідно до отриманих виразів розроблена програма в середовищі Matlab, за допомогою якої отримані залежності потужності у колійній котушці від параметрів котушок. За результатами моделювання сформульовано рекомендації щодо вибору параметрів локомотивної котушки, а також визначена ширина зони чутливості балізи. При виконанні розрахунків параметри колійної котушки (балізи) були обрані відповідно до специфікації стандарту ERTMS/ETCS.

4 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ТОЧКОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ «КОЛІЯ-ЛОКОМОТИВ»

4.1 Розробка пристрою узгодження сигнальної точки автоблокування з євробалізою

У цьому розділі ми розробимо пристрій узгодження сигнальної точки автоблокування з євробалізою (LEU), розглянемо інтерфейс C1, який потрібен для передачі даних до балізи, розробимо алгоритми для функціонування LEU.

4.1.1 Особливості інтерфейсу C1

Для передачі інформації від ДЦ та колійного обладнання до балізи – використовується інтерфейс C1, це канал контролю балізи який розроблений і використовується тільки для обміну інформацією з балізою.

Далі наведені вимоги стандартів системи ERTMS/ETCS для інтерфейсу C1:

1. Використовується для передачі телеграм від блока LEU до балізи.
2. Забезпечується захист від короткого замикання
3. Сигнал має бути незалежним від полярності (заміна двох вхідних проводів не впливає на отриманий бітовий потік)
4. Забезпечується швидкість передачі даних 564,48 кбіт/с
5. Використовується кодування DBPL
6. Вихідний опір на рівні євробалізи має бути 120 Ом.

Для передачі даних від блоку узгодження до балізи використовується сигнал з кодуванням DBPL, який зображений на рисунку 4.1. На рисунку використовуються наступні позначення:

Символ А – перемикавання від +1 до -1 (зріз імпульсу)

Символ В – перемикавання від -1 до +1 (фронт імпульсу)

Логічна “1” – символ такий самий, як попередній

Логічний “0” – символ відрізняється від попереднього

“X” – визначити символ не можливо

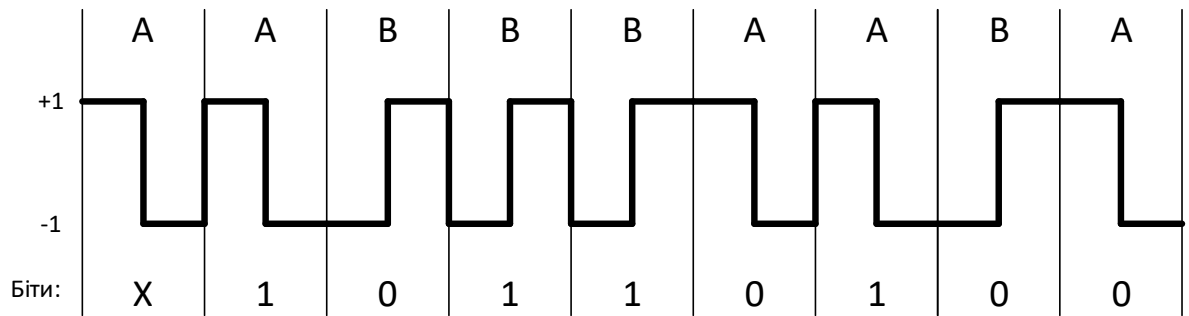


Рисунок 4.1 – Приклад схеми кодування DBPL

4.1.2 Структура пристрою LEU

Розроблений в рамках даної роботи пристрій передачі даних від сигнальної точки автоблокування до колійної балізи складається з таких елементів:

1. Контролери dsPIC30f4012 1 та 2, які працюють в режимі гарячого резерву, а саме всі контролери працюють постійно, але коли у контролера 1 стається відмова – система автоматично бере дані з контролера 2, який постійно працює, і надсилає повідомлення про відмову.
2. CAN-трансивери MCP2551 1 та 2, які приймають та відправляють, CAN-мережею, з мікроконтролерів 1 та 2 відповідно, сигнали про стан, або команди від та до системи ДЦ.
3. Оптрони PC817, які забезпечують гальванічну розв'язку, де оптрони DA3-6 зчитують показання з фронтних і тильних контактів реле З,Ж,О,ОД, що надає інформацію про стан цих реле.
4. Система контролю і комутації у вигляді оптронів PC817 1-2, які забезпечують гальванічну розв'язку, де оптрони DA1-2, через які мікроконтролер відправляє протифазні тестові сигнали, які при замиканні лінії гасять один одного, та при нормальній роботі мікроконтролера показують, з якого зчитується контакту фронтного чи тильного.
5. Схема узгодження і захисту на транзисторах і трансформаторі із зворотнім зв'язком, що забезпечує узгодження вихідного опору сигналу з рівнем

потрібним інтерфейсу С1 (120 Ом), що відправляє сигнал до балізи, та забезпечує захист від коротких замикань схеми, та кодування у форматі DBPL, що забезпечує незалежність від полярності підключення.

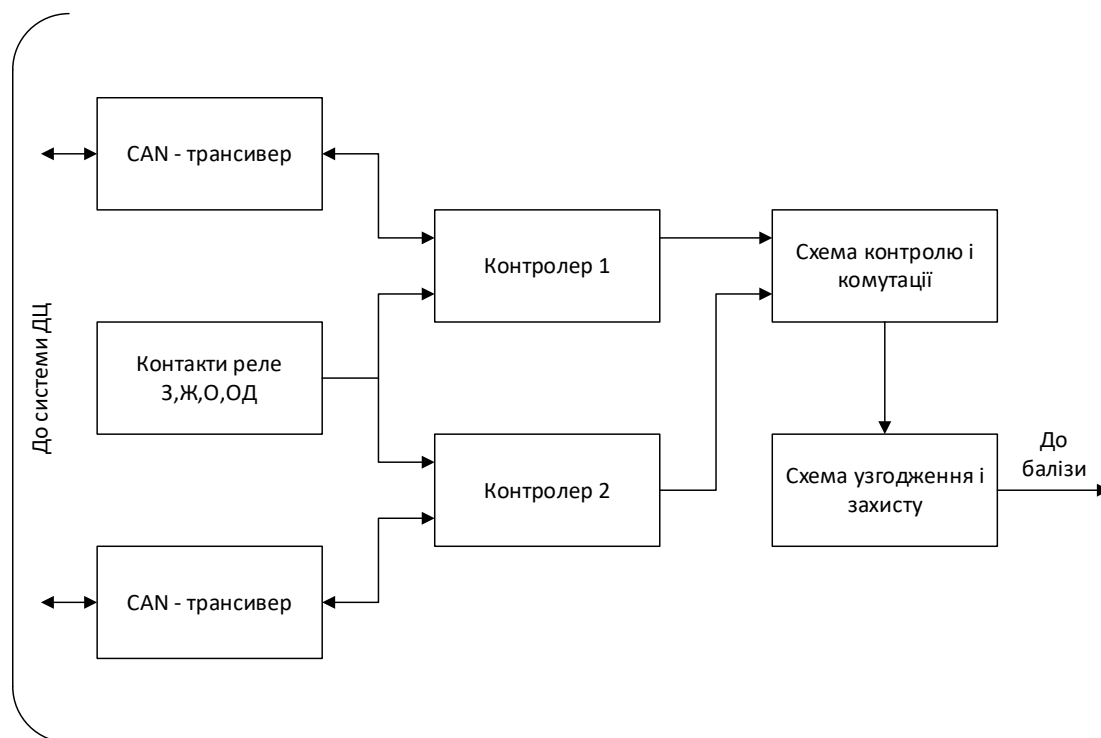


Рисунок 4.2 – Структурна схема пристрою LEU

4.1.3 Алгоритм роботи пристрою LEU

Блок-схема алгоритму роботи пристрою LEU представлена на рисунку 4.3, а блок-схема алгоритму кодування DBPL – на рисунку 4.4. Після ініціалізації LEU починає цикл тестування: перевіряється справність основного контролера, якщо він несправний, то виконується перемикання на резервний мікроконтролер, і через CAN-мережу до системи ДЦ відправляється повідомлення про часткову відмову. Далі перевіряється резервний контролер, якщо і він несправний, то через CAN-мережу до системи ДЦ відправляється повідомлення про повну відмову і цикл закінчується. Але якщо усі, або хоча би резервний контролер справні, то починається визначення стану реле (3,Ж,О,ОД) сигнальної точки, і прийом інформації від ДЦ. Далі формується інформаційна послідовність (телеграма)

довжиною 341 біт, яка кодується завадостійким кодом (див. розділ 3.1), а потім додатково кодується кодом DBPL (рисунок 4.4), призначення якого щоб, в незалежності від полярності підключення проводів – приходила ідентична кодова комбінація. Далі ця бітова послідовність відправляється до балізи, і пристрій LEU знову повертається до циклу тестування.

Далі розпишемо алгоритм коду DBPL. Коли починається кодування лічильник бітів (n) – встановлюється на значення «0», а на вихідний сигнал (out) встановлюється «1». Далі налаштовується і запускається таймер, який відраховує половину тактового інтервалу, лічильник дорахував – таймер налаштовується заново, і інвертується вихідний сигнал. Далі коли таймер дорахував у друге таймер знову налаштовується, і перевіряється вихідний сигнал, якщо там “1”, то сигнал інвертується, якщо там “0”, то до n додається +1 і перевіряється чи дорівнює $n = 341$, якщо ні то система повертається до циклу першого переповнення таймеру. Коли $n = 341$, тоді ця закодована комбінація передається до балізи.

4.1.4 Розробка принципової електричної схеми пристрою LEU

Розглянемо принципову електричну схему пристрою LEU (рисунок 4.5). Схема умовно ділиться на 5 частин.

Центральною частиною схеми – є 2 сигнальні процесори dsPIC30f4012, які виконують усі маніпуляції з сприйняття, обробки, і кодування інформації у потрібному вигляді (на схемі для спрощення зображений тільки основний контролер). Також для забезпечення функціонування мікроконтролера є коло резонатора Q1, яке задає тактову частоту у 40 МГц, що забезпечить достатню швидкість обробки і кодування даних і під’єднується до виходів 9 та 10 мікроконтролера. Ще є коло з перемикачем S1, що використовується для перезавантаження мікроконтролера, під’єднується до виводу 1.

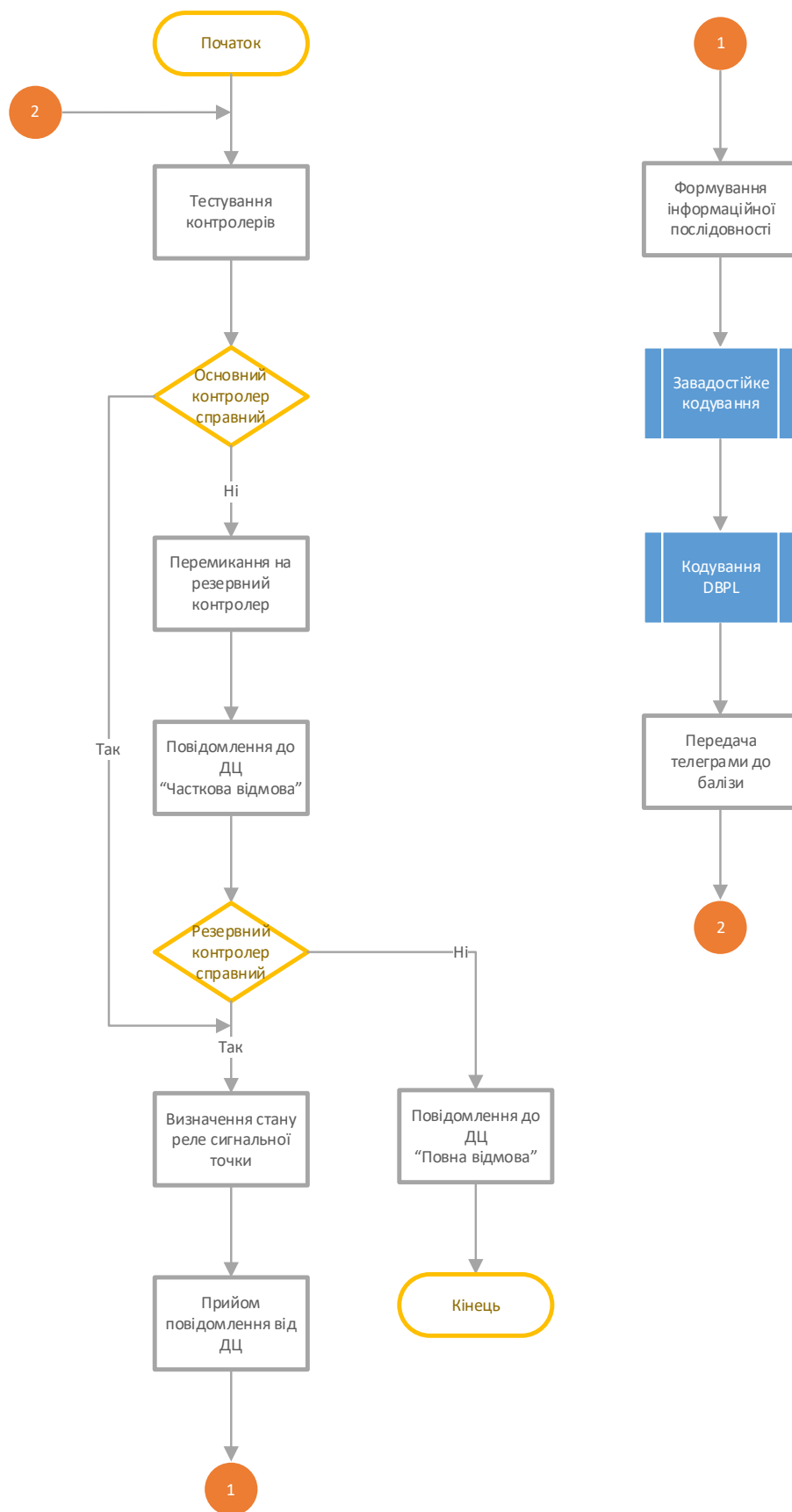


Рисунок 4.3 – Алгоритм роботи пристрою узгодження сигнальної точки АБ з євробалізою

Частина з CAN-трансивером MCP2551 – виконує комутування сигналів по каналам CANL та CANH відповідно командам з ДЦ, і під'єднується до виходів 17 та 18 мікроконтролера своїми виходами 8 та 5 відповідно.

Частина з оптронами PC817 DA3-6 – забезпечує гальванічну розв'язку з колійними системами, та знімає показання з тильових і фронтних контактів реле З,Ж,О,ОД, що вказує на вільність шляху, дозволена швидкість, та цілісність ниток червоного вогня. Підключається до виходів 2-5 мікроконтролера відповідно.

Частина з оптронами PC817 DA1-2 – тестова частина, підключається до контактів мікроконтролера 24-23 відповідно, через яку мікроконтролер відправляє тестові сигнали протилежної полярності, підключаються до вихідних фронтних і тильових контактів реле З,Ж,О,ОД. І через них сигнал повертається на мікроконтролер і, він розуміє з якого контакту прийшов сигнал.

Схема узгодження і захисту. У цій частині контролер формує імпульсний сигнал в форматі DBPL, який підсилюється транзисторами VT1, VT2 та через імпульсний трансформатор Тр.1 та кабельну лінію приєднується до балізи. Транзистори VT1, VT2 забезпечують підсилення струму та потужності сигналу. Трансформатор забезпечує узгодження вихідного опору пристрою та хвильового опору кабелю (120 Ом), також реалізується гальванічна розв'язка.

Для захисту від перенапруги використовується варістор VAR10-30. Для захисту від короткого замикання в лінії використовується додаткова обмотка трансформатора, напруга з якої випрямляється діодом VD1 і конденсатором C1 та керує транзисторним ключем VT3. У разі короткого замикання в лінії напруга на додатковій обмотці зменшується, транзистор VT3 закривається і на вхід зворотного зв'язку мікроконтролера 25 передається логічна 1.

Після отримання цього сигналу мікроконтролер припиняє передачу імпульсного сигналу, формує на вихідній лінії (DD2 контакт 26) логічну 1, що призводить до закривання VT1.

4.2 Розробка локомотивного генератора для точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»

У цьому розділі ми розробимо локомотивний генератор сигналу 27,095 МГц, розрахуємо номінали елементів для правильного функціонування генератору.

4.2.1 Структура та принцип дії локомотивного генератора

Схема розробленого локомотивного генератора для формування сигналу 27,095 МГц представлена на рисунку 4.5.

Локомотивний генератор складається з наступних елементів:

- 1) Задаючого генератора синусоїдальних коливань на базі біполярного транзистора VT1;
- 2) Каскаду попереднього підсилення на базі транзистора VT2;
- 3) Трансформаторного двохтактного вихідного каскаду підсилення на транзисторах VT3 та VT4;

Для стабілізації частоти задаючого генератора використовується кварцовий резонатор ZQ1 з частотою резонатора 27,095 МГц. Задаючий генератор побудований за схемою “ємнісної трюхточки”. Разом з конденсаторами C2, C3 кварцовий резонатор утворює коливальний контур. Завдяки підключенню конденсатора C2 в коло база-емітер в схемі реалізується позитивний зворотній зв'язок. Резистори R1, R2 забезпечують вибір режиму роботи транзистора VT1. Конденсатор C4 – розділовий, пропускає лише змінну складову сигналу і відфільтровує постійну.

На базі транзистора VT2 реалізований селективний підсилювач. Навантаженням транзистора є коливальний контур, який утворює первинна обмотка трансформатора Tr.1 та конденсатор C5. Контур налаштований на частоту резонансу 27,095 МГц. Базовий дільник R3, R4 забезпечує подачу напруги зміщення та вибір режиму роботи транзистора VT2. Завдяки включенню резистора

R5 в емітерне коло транзистора реалізується негативний зворотній зв'язок за постійним струмом, що забезпечує стабілізацію режиму роботи транзистора VT2. Для виключення негативного зворотного зв'язку за змінним струмом резистор R5 шунтується конденсатором С6.

Для стабілізації напруги живлення задаючого генератора та селективного підсилювача на транзисторі VT2 використовується параметричний стабілізатор, що містить стабілітрон VD1 та баластний резистор R6.

Вихідний трансформаторний каскад на транзисторах VT3, VT4 побудований за двохтактною схемою та працює в економічному режимі класу АВ. Для подачі напруги зміщення на емітерні переходи транзисторів використовується базовий дільник R7, R8. Вхідний трансформатор Тр.1 забезпечує формування двох протифазних сигналів на базах транзисторів VT3, VT4. Вихідний трансформатор Тр.2 використовується для узгодження вихідного каскаду та опору локомотивної антени L_A , яка забезпечує передачу енергію до балізи. Разом з котушкою L_A конденсатор С7 утворює коливальний контур, який налаштовується на частоту резонансу 27,095 МГц.

4.1.2 Розрахунок елементів локомотивного генератора

У цій частині ми розрахуємо номінали елементів схеми. Вихідні дані для розрахунку елементів локомотивного генератора:

- Частота генератора $f = 27,095$ МГц;
- Індуктивність локомотивної котушки $L_A = 1,74$ мкГн;
- Напруга живлення (бортова напруга локомотива) $E = 50$ В.

Розрахунок схеми

1. Коливальний контур $C7-L_A$ налаштований на частоту резонансу $f = 27,095$ МГц. Визначаємо ємність конденсатора С7

$$C7 = \frac{1}{4 * \pi^2 * f^2 * L_A} = \frac{1}{4 * 3.14^2 * (27.095 * 10^6)^2 * 1.74 * 10^{(-6)}} = 1.98 * 10^{(-11)} (\Phi) \quad (4.1)$$

Обираємо стандартне значення ємності $C7 = 20$ пФ.

2. Для побудови вихідного каскаду VT3, VT4 обираємо потужні високочастотні транзистори BD139, які мають наступні параметри:

- Максимальна напруга колектор-емітер $U_{кемах} = 80$ В;
- Максимальний струм колектора $I_{кмах} = 1,5$ А;
- Максимальна потужність розсіювання $P_{кмах} = 12,5$ Вт;
- Гранична частота $f_{гр} = 190$ МГц;
- Коефіцієнт передачі струму $h_{21e} = 25 \dots 250$.

3. Обираємо струм дільника R7, R8 $I_{дiл2} = 5$ мА.

Визначаємо опір резисторів дільника

$$R7 = \frac{U_{бeо3}}{I_{дiл2}} = \frac{0,4}{5 * 10^{-3}} = 80(Ом) \quad (4.2)$$

де $U_{бeо3} = 0,4$ В – напруга зміщення транзисторів VT3, VT4.

$$R8 = \frac{E - U_{бeо3}}{I_{дiл2}} = \frac{50 - 0,4}{5 * 10^{-3}} = 9920(Ом) \quad (4.3)$$

Обираємо стандартні значення опорів резисторів

$R7 = 82$ Ом, $R8 = 10$ кОм.

4. Визначаємо ємність конденсатора C5

$$C5 = \frac{1}{4 * \pi^2 * f^2 * L_1} = \frac{1}{4 * 3,14^2 * (27,095 * 10^6)^2 * 10^{(-6)}} = 3,45 * 10^{(-11)}(\Phi) \quad (4.4)$$

де $L_1 = 1$ мкГн – індуктивність первинної обмотки трансформатора Тр.1

Обираємо стандартне значення ємності 33 пФ.

5. Обираємо струм спокою транзистора VT2 $I_{кoVT2} = 50$ мА.

Вважаємо, що на опорі R5 падає 20% напруги живлення

$$U_{R5} = 0,2 * E_1 = 0,2 * 12 = 2,4(В) \quad (4.5)$$

де $E_1 = U_{ст} = 12$ В – напруга стабілізації стабілітрона VD1.

$$R5 = \frac{U_{R5}}{I_{кoVT2}} = \frac{2,4}{50 * 10^{-3}} = 48(Ом) \quad (4.6)$$

Обираємо стандартне значення $R5 = 47$ Ом.

6. Визначаємо ємність конденсатора C6

$$C6 \geq \frac{1}{4 * \pi * f * R6} = \frac{1}{4 * 3.14 * 27.095 * 10^6 * 10^{-6}} = 1.25 * 10^{-9} (\Phi) \quad (4.7)$$

Обираємо стандартне значення $C6=1,5$ нФ.

7. Визначаємо базовий струм спокою транзистора VT2

$$I_{\text{бoVT2}} = \frac{I_{\text{кoVT2}}}{h_{21eVT2}} = \frac{50 * 10^{-3}}{200} = 2,5 * 10^{-4} (\text{мА}) \quad (4.8)$$

8. В якості транзисторів VT1, VT2 – обираємо малопотужні високочастотні транзистори КТ3102Б, які мають наступні параметри:

- Максимальна напруга колектор-емітер $U_{\text{кeтmax}} = 50$ В;
- Максимальний струм колектора $I_{\text{кmax}} = 100$ мА;
- Гранична частота $f_{\text{гр}} = 300$ МГц;
- Коефіцієнт передачі струму $h_{21e} = 200 \dots 500$.

9. Обираємо струм дільника R3, R4

$$I_{\text{дiл1}} = 5 * I_{\text{бoVT2}} = 5 * 0.25 * 10^{-3} = 1,25 * 10^{-3} (\text{А}) \quad (4.9)$$

Визначаємо опір резисторів дільника

$$R4 = \frac{U_{\text{бeo2}} + U_{R5}}{I_{\text{дiл1}}} = \frac{0.6 + 2.4}{1.25 * 10^{-3}} = 2400 (\text{Ом}) \quad (4.10)$$

$$R3 = \frac{E1 - U_{\text{бeo2}} - U_{R5}}{I_{\text{дiл1}} + I_{\text{бoVT2}}} = \frac{12 - 0.6 - 2.4}{1.25 * 10^{-3} + 0.25 * 10^{-3}} = 6000 (\text{Ом}) \quad (4.11)$$

Обираємо стандартні значення опорів

$$R4 = 2,4 \text{ кОм}; R3 = 6,2 \text{ кОм}.$$

10. Визначаємо еквівалентний опір дільника

$$R_{\text{дiл}} = \frac{R3 * R4}{R3 + R4} = \frac{2400 * 6200}{2400 + 6200} = 1,73 * 10^3 (\text{Ом}) \quad (4.12)$$

Визначаємо ємність конденсатора C4

$$C6 \geq \frac{1}{4 * \pi * f * R_{\text{дiл}}} = \frac{1}{4 * 3.14 * 27.095 * 10^6 * 1.73 * 10^3} = 3.4 * 10^{-11} (\Phi) \quad (4.13)$$

Обираємо $C4 = 100$ нФ.

11. Обираємо кварцовий резонатор ZQ1 з частотою резонансу 27,095 МГц

12. Обираємо струм спокою транзистора VT1

$$I_{\text{кoVT1}} = 10 \text{ мА}.$$

Визначаємо базовий струм транзистора VT1

$$I_{\text{бo}VT2} = \frac{I_{\text{кo}VT1}}{h_{21eVT1}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{200} = 5 \cdot 10^{-5} (\text{A}) \quad (4.14)$$

13. Визначаємо опори резисторів R1, R2

$$R1 = \frac{E1 - U_{\text{бe}o1} - U2}{I_{\text{бo}VT1}} = \frac{12 - 0.6 - 6}{50 \cdot 10^{-3}} = 108 \cdot 10^3 (\text{Oм}) \quad (4.15)$$

$$R2 = \frac{U_{R2}}{I_{\text{кo}VT1}} = \frac{6}{10 \cdot 10^{-3}} = 600 (\text{Oм}) \quad (4.16)$$

Обираємо стандартні значення опорів

$$R1 = 100 \text{кOм}; R2 = 620 \text{ Oм}.$$

14. Для стабілізації напруги живлення каскадів VT1, VT2 обираємо стабілітрон Д815Д, який має напругу стабілізації $U_{\text{CT}} = 12 \text{ В}$.

15. Визначаємо опір резистора R6

$$R6 = \frac{E - U_{\text{cm}}}{I_{\text{H}} + I_{\text{cm}}} = \frac{50 - 12}{100 \cdot 10^{-3} + 200 \cdot 10^{-3}} = 126.7 (\text{Oм}) \quad (4.17)$$

де $I_{\text{H}} = 100 \text{ мА}$ – струм споживання транзисторів VT1, VT2;

$I_{\text{CT}} = 200 \text{ мА}$ – струм стабілітрона

Обираємо стандартні значення опорів $R6 = 120 \text{ Oм}$.

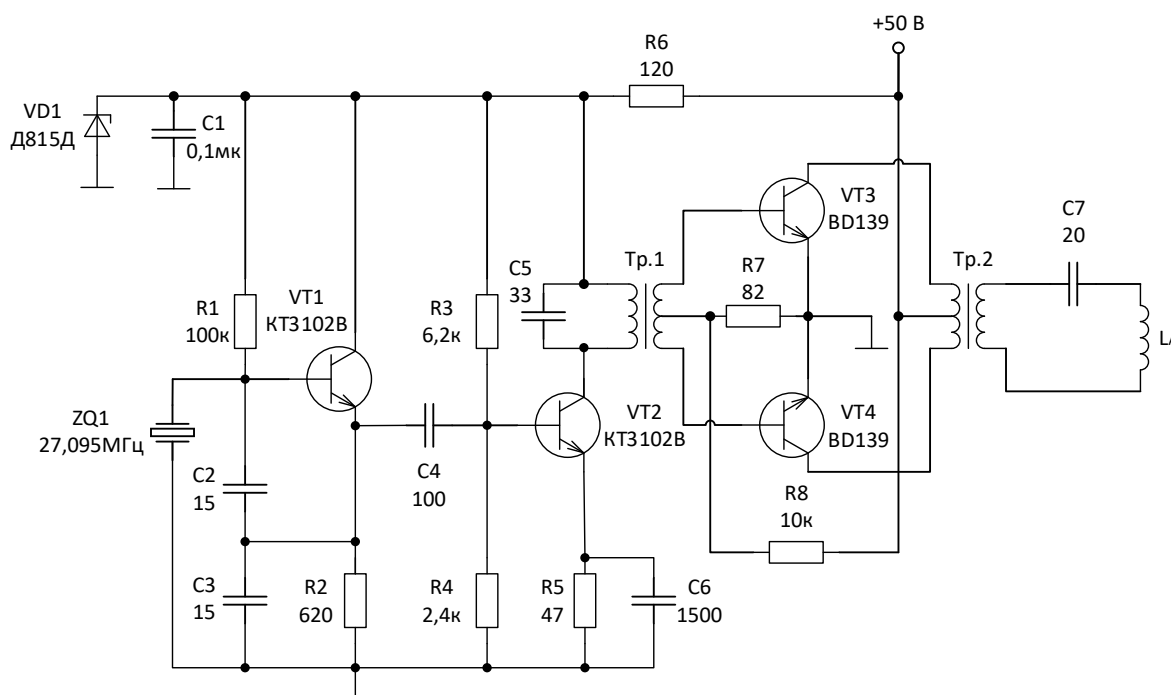


Рисунок 4.5 – Принципова електрична схема локомотивного генератора
27,095 МГц

4.3 Висновки за розділом 4

У цьому розділі ми розробили два електричні пристрої для точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»: Пристрій узгодження сигнальної точки автоблокування з євробалізою (LEU), та локомотивний генератор частотою 27,095 МГц. Для пристрою узгодження (LEU) розробили алгоритм роботи та алгоритм кодування сигналу DBPL. Для локомотивного генератора обрали і розрахували номінали елементів для забезпечення правильної форми сигналу частотою 27,095 МГц.

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі проведений аналіз існуючих закордонних систем керування рухом поїздів, що використовують балізи, розглянуто їх переваги та недоліки. На підставі даного аналізу з урахуванням особливостей вітчизняних систем залізничної автоматики запропонована система інтервального регулювання руху поїздів на базі баліз, яку на нашу думку доцільно впроваджувати в Україні. Була розроблена структурна схема та алгоритм роботи такої системи. Розроблений також алгоритм точного визначення фактичної швидкості поїзда, який базується на використанні двох типів датчиків: тензодатчика та радара Доплера.

Проведене моделювання каналу бездротового живлення колійної балізи. Отримані математичні вирази для визначення взаємної індуктивності між локомотивною та колійною котушками, а також потужності, що наводиться у балізі. Відповідно до отриманих виразів розроблена програма в середовищі Matlab, за допомогою якої отримані залежності потужності у колійній котушці від параметрів котушок. За результатами моделювання сформульовано рекомендації щодо вибору параметрів локомотивної котушки, а також визначена ширина зони чутливості балізи.

Розроблені також структурні вузли точкового каналу зв'язку «колія-локомотив»: пристрій узгодження сигнальної точки АБ з євробалізою та локомотивний генератор частотою 27,095 МГц, що буде жити цим сигналом колійні євробалізи. Розроблені принципові електричні схеми та алгоритми роботи даних пристроїв, проведений розрахунок елементів.

Запропонована система може стати корисною при подальшому курсі країни на впровадження євростандартів та систем керування поїздами на базі баліз за прикладом ERTMS/ETCS. Крім цього дана система забезпечує підвищення безпеки руху поїздів за рахунок використання додаткового каналу передачі даних та контролю швидкості поїзда.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ETCS for Engineers [Текст] / Peter Stanley. — TZ-Verlag & Print GmbH. Roßdorf, 2011, — 310 с.
2. FFFIS for Eurobalise [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos3_index009_-_subset-036_v310.pdf
3. Specific Transmission Module FFFIS [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos3_index008_-_subset-035_v320.pdf
4. Test Specification for Eurobalise FFFIS [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.era.europa.eu/system/files/2023-01/sos2_index043_-_subset-085_v300.pdf
5. State of play [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/state-play_en
6. Chinese high speed railway train control system [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.studocu.vn/vn/document/truong-dai-hoc-giao-thong-van-tai/ky-thuat-dieu-khien-tu-xa-trong-giao-thong-duong-sat/slide-chines/59310378>
7. Reliability analysis on the train control system in the CTCS-3 operating mode [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/srt-10-2020-0019/full/html>
8. Analysis on the influence of tuning area fault on the transmission characteristics of ZPW-2000 track circuit [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/337872160_Analysis_on_the_influence_of_tuning_area_fault_on_the_transmission_characteristics_of_ZPW-2000_track_circuit
9. Microchip. MCP2551 Data Sheet [Текст] / Microchip. — USA, 2010. — 24 р.
10. Інструкція з сигналізації на залізницях України. ЦШ-001 [Текст]: Затв.: Наказ Мінтрансу та зв'язку України 23.06.2008. №747 / Мін-во транспорту. та зв'язку України. — К., 2008. — 82 с.
11. Рішення НКРЗ 12.01.2012 №18, ред.25.08.2021. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/vr018864-12#Text>

12. ETSI EN 302 288-1. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/30228801/01.06.01_30/en_30228801v010601v.pdf

13. Fundamentals of Radar Signal Processing. [Текст] / Richards M.A.— 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2022. 648 p.