

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри
_____ /Д. О. Босий/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Імітаційне моделювання електромагнітних процесів в тяговій мережі з розподіленими параметрами**

Theme **Simulation modeling of electromagnetic processes in a traction network with distributed parameters**

Керівник дипломної роботи

доц. _____ Т. М. Міщенко

Нормоконтролер

доц. _____ В. М. Ляшук

Студент групи ЕС1921

_____ О. М. Чіпак

Student

Chipak Oleksandr

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені
академіка В.Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри:

_____ Сиченко В.Г.
(підпис)

« 20 » січня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студент групи ЕС 1921 ЧІПАК Олександр Миколайович

1. Тема дипломної роботи: «Імітаційне моделювання електромагнітних процесів в тяговій мережі з розподіленими параметрами» затверджена наказом по університету від «17» січня 2020р. № 52 ст.
2. Термін подання студентом закінченої роботи « 07 » грудня 2020 р.
3. Вихідні дані до дипломної роботи: детерміновані дані параметрів показання СТЕ змінного струму.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): Види і характеристика тягових мереж, імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні з консольним живленням, імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні 4 поїзда і двостороннє живлення.
5. Перелік креслень (демонстраційного матеріалу) : ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу дипломного проекту	Термін виконання	Обсяг розділу, %
1	Вступ	09.09.2020	5
2	Види і характеристика тягових мереж	21.10.2020	25
3	Імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні з консольним живленням	11.11.2020	30
4	Схематичне рішення розподіленої СТЕ на основі сонячної батареї	25.11.2020	30
5	Імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні 4 поїзда і двостороннє живлення	07.12.2020	10

Дата видачі завдання: « 20 » січня 2020 р.

Керівник дипломного проекту: доцент _____ Т.М. Міщенко
(підпис)

Завдання прийняв до виконання: студент _____ О.М. Чіпак
(підпис)

Реферат

Пояснювальна записка магістерської роботи на тему «Імітаційне моделювання електромагнітних процесів в тяговій мережі з розподіленими параметрами» складається з трьох розділів, представлена на 63 сторінках основного тексту та містить 8 використаних джерел, 56 рисунків, 12 таблиць.

В вступі представлена основна мета та передумови проектно-дослідницької роботи.

В першому розділі теоретичні передумови схем живлення тягової мережі на фідерних зонах ділянки та існуючі методи моделювання електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання.

В другому розділі є теоретичні передумови та результати створення імітаційної моделі електротягового навантаження з розподіленими параметрами і зосередженими параметрами з консольним живлення.

Третій розділ містить основні результати та аналіз моделювання електромагнітних процесів в електрифікованій ділянці з розподіленими параметрами двостороннє живлення

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОРУХОМИЙ СКЛАД, ФІДЕРНА ЗОНА, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, НАПРУГА, МОДЕЛЮВАННЯ, КОНТАКТНА МЕРЕЖА, СИСТЕМА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, КОНТАКТНИЙ СТРУМ, ДВОСТОРОННЯ СХЕМА, КОНСОЛЬНА СХЕМА .

Зміст

Вступ.....	
1 Види характеристика тягових мереж.....	
1.1 Схема заміщення та умови при яких ТМ є мережею з розподіленими параметрами.....	
1.2 Параметри пасивних елементів ТМ з розподіленими параметрами.....	
1.3 Існуючі методи аналізу електромагнітних процесів ТМ з розподіленими параметрами.....	
2 Імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні з консольним живленням.....	
2.1 Розрахункова схема та імітаційна модель у випадку руху двох поїздів.....	
2.2 Результати моделювання величини напруги на струмоприймачах.....	
2.3 Характер зміни та чисельний результат струмів електровозів.....	
2.4 Оцінка струмів на елементах ділянки ТМ.....	
2.5 Розрахунок спадів напруги на ділянках фідерної зони.....	
3 Імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні 4 поїзда і двостороннє живлення.....	
3.1 Розрахункова схема та імітаційна модель у випадку руху 4-х поїздів.....	
3.2 Результати моделювання величини напруги на струмоприймачах.....	
3.3 Характер зміни та чисельний результат струмів електровозів.....	
3.4 Оцінка струмів на елементах ділянки ТМ.....	
3.5 Розрахунок спадів напруги на ділянках фідерної зони.....	

ВСТУП

В даний час імітаційне дослідження впливу ряду величин і параметрів системи тягового електропостачання (СТЕ) є досить актуальним та мало затратним. Імітаційним методом розглянуто перехідні електромагнітні процеси вмикання з розподіленими параметрами. При цьому враховувалась: відстань від електровозу до тягової підстанції (ТП); електричні параметри тягової мережі (ТМ).

Актуальність роботи. Не зважаючи на винайдені за останні роки методи розрахунку перехідних процесів в системах тягового електропостачання. Імітаційний метод має велику перевагу над іншими методами (аналітичним, фізичним та іншими) тому, що при моделюванні можна враховувати всі нюанси котрі потрібно враховувати при поставленій задачі. Наприклад можна одночасно запускати декілька змодельованих підстанцій і знімати з них показання.

Мета і завдання роботи. Метою цієї роботи є розробка (в середовищі Matlab (Simulink)) методики розрахунку з розподіленими параметрами за допомогою імітаційного моделювання.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

Сформульовано наукові умови, при яких вважається, що тягова мережа з розподіленими параметрами системи електричної тяги змінного струму є “довгою лінією”, що дозволяє моделювати в ній хвильові електромагнітні процеси.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблена на основі імітаційних моделей методика розрахунку яка дає можливість оцінки розподілиними параметрами

Особистий внесок здобувача.

Розробка імітаційних моделей, визначення параметрів для імітаційної моделі, виконання розрахунків навантаження та струмів в СТЕ

Публікації. Автор – Тирсовий Р.П., Таптунов Д.О. , Чіпак О.М., Науковий керівник – д.т.н., Міщенко Т.М. Моделювання випадкових електромагнітних процесів перетворення електроенергії на тяговій підстанції змінного струму / X Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель , 26-27 листопада 2020 р.) : Ч.5 / «МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»; «БЕЛОРУССКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»; УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ: «БЕЛАРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА» під заг. Ред. Ю. І. Кулаженко – Гомель : БелГУТ. 2020. – 229 с. ISBN 978-985-554-946-9 (ч. 5)

1 Види і характеристика тягових мереж

1.1 Схема заміщення та умови при яких ТМ є мережею з розподіленими параметрами

Тягова мережа складається з контактної мережі, рейкового шляху, живильних і відсмоктувальних ліній (фідерів), а також інших проводів і пристроїв, які приєднуються по довжині лінії і контактної підвіски безпосередньо або через спеціальні автотрансформатори. Основним споживачем електричної енергії в тяговій мережі є електричний рухомий склад (електровози та електричний моторвагонний рухомий склад – ЕРС). Внаслідок випадкового розташування поїздів неминучі випадкові поєднання навантажень, які можуть істотно вплинути на режими роботи системи тягового електропостачання.

Живлення ТМ (тягова мережа) здійснюється від шин 110 та 220 кВ через знижувальний трансформатор. Він має 3 обмотки:

I - обмотка високої напруги 110 або 220 кВ;

II - обмотка низької (середньої) напруги 27,5 кВ для живлення контактної мережі;

III - обмотка середньої (низької) напруги 35...10 кВ для живлення нетягових споживачів.

Переваги системи:

- підвищення напруги в контактній мережі до 25 кВ зменшує струм навантаження, втрати напруги і потужності;

- збільшено відстань між тяговими підстанціями до 40-60 км і зменшено їх кількість (у два-три рази);

- зменшений строк будівництва;

- менші витрати кольорових металів.

Недоліки системи:

- несиметричний режим роботи трифазних трансформаторів і, як наслідок, погіршення показників якості електричної енергії і значне зниження їхньої доступної потужності;

- несинусоїдальності споживаних струмів, а також погіршення якості електричної енергії в системі живлення електропостачання (у кривій споживаного струму містяться негативні вищі гармоніки);

- тягової мережі змінного струму є джерелом електромагнітного впливу на суміжні пристрої, у тому числі на лінії зв'язку;

- наявність зрівнювальних струмів, а отже, додаткових великих втрат електричної енергії.

Зазначено, що вирівнювання напруги у високодобротних лініях з розподіленими параметрами є необхідним і має бути враховано у процесі проектування тягових мереж. Для тягових мереж шахтного рейкового транспорту з індукційною передачею енергії нерівномірність розподілу напруг може бути усунена тільки завдяки раціональному розміщенню компенсуючих пристроїв та обґрунтуванню раціональних режимів пуску перетворювача. Підкреслено, що однією умов надійної роботи комплексу транспорту з індукційною передачею енергії є електромагнітна сумісність тягового перетворювача частоти й іскробезпека сторонніх провідників за перехідних режимів тягової мережі. Запропоновано оцінити способи аналізу якості напруги з урахуванням особливостей режимів тягових перетворювачів.

Встановлено закономірності зміни режимів у тяговій мережі безконтактного транспорту, обґрунтовано вибір необхідних параметрів у режимах електроспоживання з урахуванням стану мережі живлення або тягового перетворювача, що забезпечує підвищення ефективності роботи транспорту за рахунок зниження рівня втрат та виключення перенапруг.

Запропоновано математичну модель визначення параметрів пускового та сталого режиму тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії, яка враховує, на відміну від відомих моделей, активну провідність кабельної

лінії. Для таких систем з розподіленими параметрами належать, наприклад, фідери, елементи радіотехнічних приладів, вимірювальні лінії, узгоджувальні прилади тощо.

1.2 Параметри пасивних елементів ТМ з розподіленими параметрами

Відомо, що система тягового електропостачання складається з декількох складових. Якщо тягові підстанції є статичними елементами, то тягова мережа має довжину у десятки кілометрів. Ця обставина спонукає до розгляду електромагнітних процесів у тяговій мережі з двох позицій: розгляд її як ланцюга із зосередженими параметрами або ланцюга з розподіленими параметрами.

Теорії електропостачання електрифікованих залізниць приймається, що тягова мережа є лінією із зосередженими параметрами як на постійному ($\omega=0$), так і на змінному ($\omega=2\pi f$, $f=50$ Гц) струмі, а розрахунок енергообмінних процесів здійснюється за схемами заміщення, параметри яких визначаються множенням погонних параметрів (Ом/км, Гн/км) на відповідну довжину.

В той же час у реальних умовах перетворення та споживання електричної енергії в системі тягового електропостачання у тяговій мережі (ТМ) відбувається циркуляція вищих гармонійних складових, які необхідно враховувати при моделюванні та розрахунку системи тягового електропостачання.

Відомо, що будь-яку лінію необхідно розглядати як довгу (тобто з розподіленими параметрами), коли її довжина співпадає або більша довжини хвилі струму або напруги. Довжина хвилі визначається за формулою:

$$\lambda = v * T = \frac{v}{f}$$

де λ - фазова швидкість, $v = 2,5 * 10^8$ м/с; T - період гармоніки струму або напруги.

Для прикладу розглянемо канонічні гармоніки в прийнятому для СТЕ діапазоні 2 кГц для шестипульсового випрямляча:

min - 300 Гц, max - 2400 Гц;

для дванадцятипульсового випрямляча:

min - 600 Га, max - 2400 Га.

Тягова мережа складається з двох складових: контактну (КМ) та рейкову (РМ) мережі, кожна, з яких має свої особливості побудови схеми заміщення. Особливістю розрахунку електромагнітних процесів у КМ є те, що основні реактивні елементи (L і C) зосереджені на тяговій підстанції. При цьому, оскільки двигуни електровозу приєднуються безпосередньо до КМ (на відміну від електровозів змінного струму) то це підсилює взаємозв'язок режимів роботи електровоза та КМ, що в умовах фактично безперервних перехідних процесів (зміна режиму роботи електровоза, зміна елементів профілю, відриви струмоприймача, проходження стиків рейок, зміна режимів роботи системи зовнішнього електропостачання, аварійні процеси і т.ін.) може привести до виникнення локальних (місцевих) комутаційних перенапруг або коливальних процесів у взаємодіючій парі «електровоз - ТМ».

Для розрахунку електромагнітних процесів та їх моделювання в КМ найбільше поширення має кінцевого-елементна модель лінії з розподіленими параметрами, яка складається із послідовно з'єднаних елементів, зображених на рис. 1. При цьому передбачається, що зміна параметрів схеми відбувається лінійно, оскільки через низький периметр проводів КМ явище поверхневого ефекту не проявляється.

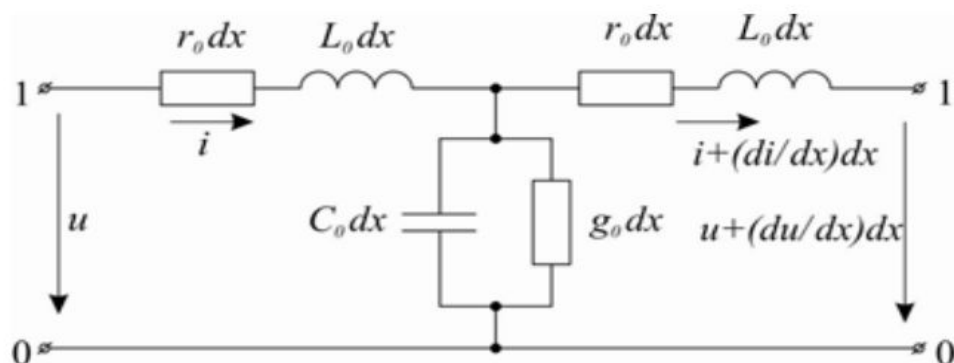


Рис. 1.1 Схема заміщення ділянки лінії довжиною dx

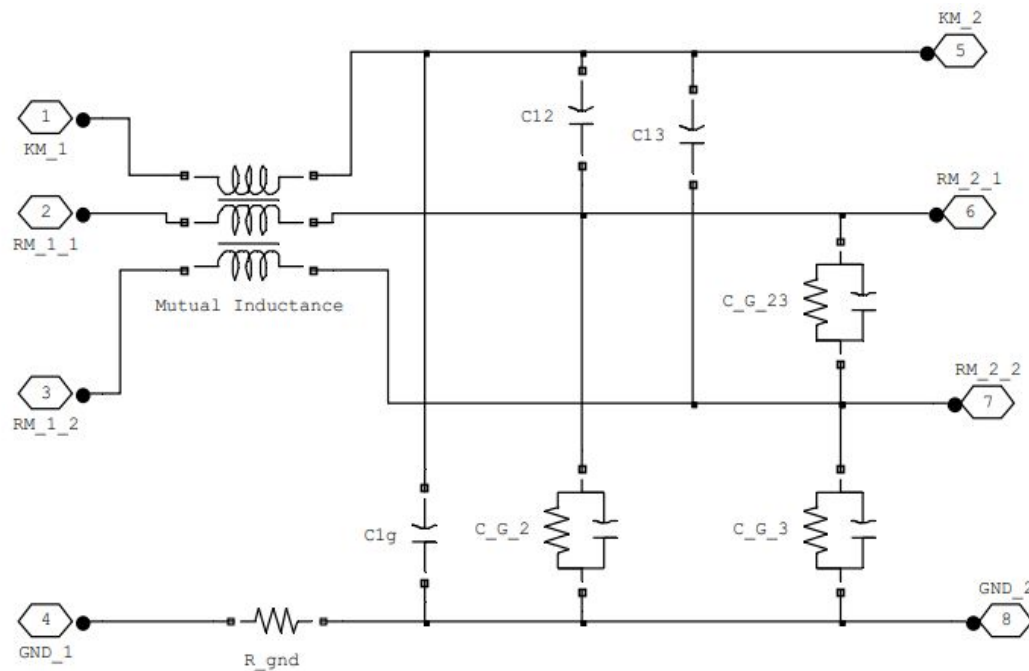


Рис. 1.2. Модель елементарної ділянки СТЕ з розподіленими параметрами

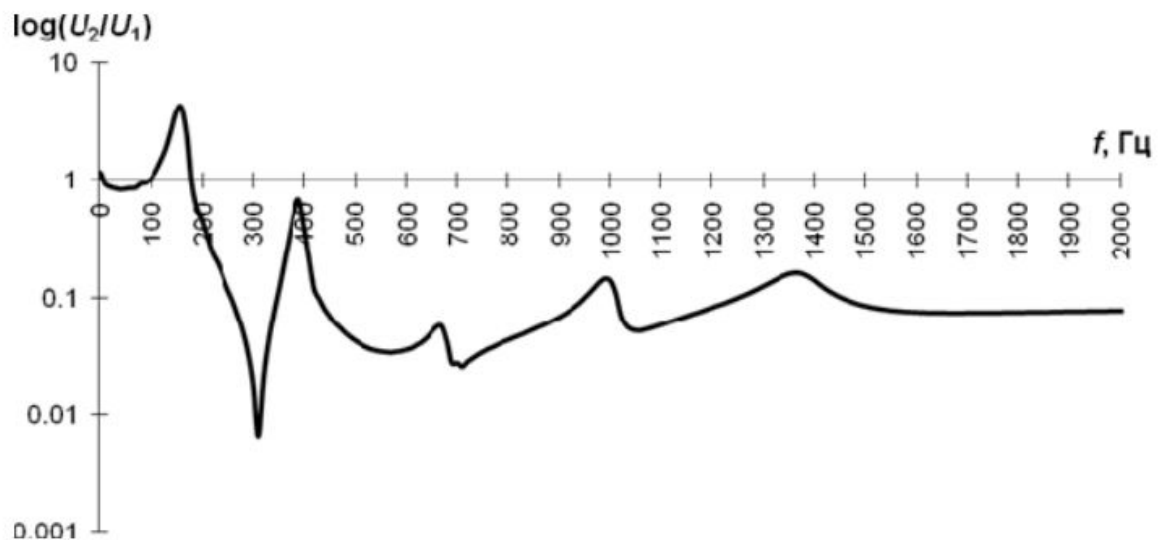


Рис. 1.3. Амплітудно-частотна характеристика тягової мережі для моделі з розподіленими параметрами

В більшості випадків елементи СЕП задовольняють таким припущенням: схеми заміщення елементів містять пасивні чи активні нелінійні та нестационарні елементи з зосередженими параметрами; процеси в елементах системи є детермінованими; використання блоків регулювання та контролю, які можна представляти функціональними моделями. Розраховано елементи

пасивної та активної частин ГКРП(гібридний компенсатор реактивної потужності).

Такий підхід дозволяє враховувати випадковий характер зміни напруги на струмоприймачі електровозу, як наслідок, тягового струму, та адаптувати роботу компенсатора до параметрів напруги контактної мережі. Застосування зазначеного підходу дозволяє також враховувати такі фактори, як характер режиму роботи електровозу, прохід меж ділянок контактної мережі, тощо.

Під резистивним елементом або активним опором розуміють такий ідеалізований елемент електричного кола, в якому електромагнітна енергія безповоротно перетворюється в теплоту або в інші види енергії. При цьому вважають, що на цій ділянці кола відсутні електричні або магнітні поля.

Елемент електричного кола, який характеризує створення магнітного поля і запасання енергії в ньому, називають індуктивним елементом або індуктивністю. Індуктивність в електричному колі реалізують за допомогою індуктивної котушки, яка має малий активний опір.

Елемент електричного кола, який характеризує створення електричного поля і запасання в ньому енергії, називається ємнісним елементом. Ємність в електричному колі реалізують спеціально виготовленим елементом – конденсатором. Найпростіший конденсатор складається з двох металевих пластин, розділених діелектриком.

1.3 Існуючі методи аналізу електромагнітних процесів ТМ з

розподіленими параметрами

Аналізу електромагнітних процесів в системі електротяги зводиться до того, що за заданими імовірнісними характеристиками випадкових величин параметрів кола системи електротяги та ЕРС тягового трансформатора необхідно визначити імовірнісні характеристики фідерних струмів і струмозподілення між поїздами в різних режимах. Тобто, при дослідженнях перехідних електромагнітних процесів в системах електричної тяги необхідно розв'язувати задачі статистичної динаміки нелінійних систем.

Для розв'язання таких задач у теперішній час у математиці поки що не існує точних аналітичних методів навіть для детермінованих вхідних дій, а при випадковій вхідній дії труднощі зростають у багато разів. Тому для розв'язання поставленої задачі треба застосовувати наближені методи, основні з яких приведені нижче.

1. Метод «звичайної» (простої) лінеаризації. В випадку, коли дисперсія значень параметрів вузька, тобто, коли елементи системи є не суттєво нелінійними, і перша похідна вхідної дії до системи достатньо мала за модулем, тоді застосовують методи «звичайної» лінеаризації характеристики нелінійних елементів системи. Він полягає у тому, що спочатку знаходять розв'язання нелінійного диференціального рівняння при відсутності малої випадкової дії, а потім рівняння лінеаризують відносно малих випадкових відхилень ΔI шуканої випадкової величини, наприклад, струму $I(t)$ процесу, від збурених значень параметрів.

Нелінійними членами, які містять ці випадкові відхилення, нехтують. У результаті для випадкових відхилень утворюється лінійне диференціальне рівняння, яке розв'язують відомими методами. Далі знаходять імовірнісні характеристики для ΔI з наступним переходом до імовірнісних характеристик вихідного процесу $I(t)$. Методи лінеаризації дозволяє значно просте визначення математичного сподівання та кореляційної функції шуканого процесу $I(t)$ в стаціонарному та нестаціонарному режимах. Однак при негаусовому збуренні дуже складно (наприклад, методом визначення моментів) знайти навіть одномірну густину імовірності для $I(t)$.

2. Метод стохастичної лінеаризації. Для нелінійних систем, які містять суттєво нелінійні елементи, імовірнісні характеристики принципово не можуть бути лінеаризовані, тому що немає простого зв'язку між математичними очікуваннями і відповідно кореляційними функціями вхідної дії та вихідних величин $I(t)$. У цих задачах доцільним і єдино можливим є застосування інших

методів, ніж методів простої лінеаризації, зокрема, методу статистичної лінеаризації.

В основі цього методу лежить ідея такої лінеаризації характеристик нелінійних елементів системи, при якій статистичні характеристики (математичне очікування і кореляційна функція) вихідних величин $I_k(t)$ співпадали з аналогічними імовірнісними характеристиками нелінійних елементів або були найбільш близькі до них. Тоді для визначення випадкової функції $I(t)$ на виході системи формально маємо лінеаризовані рівняння, для розв'язання яких можливо застосування апарату лінійної теорії.

А поєднання використання коефіцієнтів статистичної лінеаризації для нелінійних елементів або методу Дункана призводить до найбільш простого та закінченого розв'язання задачі визначення перших двох статистичних моментів шуканих величин $I_i(t)$. Практика застосування методу статистичної лінеаризації показує, що він найбільш ефективний, простий і знаходить широке використання при аналізі простих систем, причому в усталеному режимі їх роботи.

При дослідженнях складних систем він громіздкий, а, головне, при розв'язанні деяких задач метод дає не тільки великі помилки, але й якісно невірні результати. Крім цього, метод статистичної лінеаризації передбачає наперед визначену густину імовірності вихідного процесу за нормальним законом.

Але, як доводять автори, у складних динамічних системах, що містять, як правило, інерційні нелінійні елементи, функцію розподілення густини імовірності вихідного процесу можна приблизно вважати за законом Гаусса; спрощує цю проблему також застосування перетворення Гільберта. Для аналізу складних систем більш застосовані методи, що засновані на безпосередньому інтегруванні нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь, які описують стан системи, перш за все, метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло) і метод еквівалентних збурень (метод невинуватих дій).

3. Метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло). Суть цього методу зводиться до уведення випадкових реалізацій вхідних випадкових функцій або параметрів на відповідні входи досліджуваної системи. На кожен із входів системи при одному випробуванні повинна бути подана одна реалізація вхідного збурення, при цьому буде отримана реалізація кожної з вихідних величин. Повторюючи подібні випробування багато разів, отримаємо для кожної з вихідних величин сукупність реалізацій. Піддаючи далі ці сукупності статистичній обробці, визначаємо закони розподілу вихідних величин або, що простіше, окремі характеристики цих законів.

Для відтворення та уведення вхідних збурень разом із використанням реальних записів їх реалізацій застосовується фізичне або математичне моделювання випадкових функцій і параметрів. Очевидними достоїнствами цього методу є універсальність і простота. Разом із тим недоліком методу статистичних випробувань є необхідність накопичення великих масивів вихідних величин системи, що пов'язане з виконанням значного об'єму обчислень.

Для того, щоб отримати закони розподілу вихідних величин системи або хоч би їх окремі характеристики з прийнятою для практики точністю, потрібно обчислити сотні і навіть тисячі значень цих величин. Тобто, метод об'ємний і трудомісткий, оскільки приходить до багаторазово чисельного інтегрувати систему диференціальних рівнянь для різних варіантів значень вхідних випадкових величин із подальшою статистичною обробкою отриманих реалізацій шуканих величин.

4. Метод марковських процесів. Якщо вхідна дія $U(t)$ являє собою гаусовий процес великої інтенсивності, то можливо застосування методу марківських процесів. Зокрема, для аналізу поведінки динамічних систем з марковським вихідним процесом можливо застосувати рівняння Фоккера–Планка–Колмогорова. Метод марківських процесів навіть у суттєво

нелінійних задачах принципово дозволяє знаходити густину імовірності вихідного процесу $I(t)$.

Однак існує складність фактичного отримання розв'язку цим методом для конкретної задачі, яка суттєво залежить від порядку диференціального рівняння, що описує поведінку системи, виду початкових і граничних умов. Крім цього, метод марковських процесів застосовується лише, якщо зовнішня дія некорельована. Строго кажучи, жоден із реальних процесів суттєво нелінійної динамічної системи не є марковським, тому розглянутий метод дає дуже наближений розв'язок.

5. Метод еквівалентних збурень (метод не випадкових дій). Суть цього методу зводиться до того, що замість випадкових реалізацій параметрів, які використовуються в методі статистичних випробувань, заздалегідь розраховують ξ_{js} ξ_{js} ($j=1,2,\dots,m$; $s=1,2,\dots,N$) не випадкових величин, так звані еквівалентні збурення. Останні вводяться на відповідні входи досліджуваної нелінійної системи, при цьому шляхом обчислень або моделювання визначають деякі значення Y_s вихідної величини.

З величин Y_s формують шукані імовірнісні характеристики величини Y . Очевидно, що основною задачею, яка виникає в методах еквівалентних збурень, є таке визначення величин, при яких забезпечувалася простота обчислення шуканих вірогідних характеристик вихідних величин системи, і була б потрібна порівняно невелика кількість розв'язків рівнянь досліджуваної системи. Складною проблемою в методі еквівалентних збурень є оцінка точності результату, оскільки, зазвичай, в реальних задачах заздалегідь невідомо, якого ступеню поліном з достатньою точністю апроксимує залежність шуканої величини від випадкових параметрів.

Тому ступінь апроксимуючого полінома доводиться вибирати переважно емпірично, шляхом проб і порівнянь результатів між собою. Слід

відмітити, що за трудомісткістю при малих значеннях параметру переважає метод еквівалентних збурень, а при великих значеннях – метод Монте-Карло.

6. Методи функціональних рядів. Певний практичний інтерес представляє метод функціональних рядів. Ідея методу полягає в представленні функції густини імовірності вихідного процесу у вигляді ряду з ортогональними поліномами з наступним розв'язанням задачі за допомогою цих рядів. У вигляді найбільш практично застосовуваних рядів слід назвати: ряд Грам-Шарл'є з поліномами Ерміта; ряд Юнга; асиметричне гаусове розподілення за Бернштейном; ряд Хаара та ін. Метод призводить до достатньо громіздких алгоритмів обчислення коефіцієнтів розкладання.

Однак у деяких окремих задачах, які мають практичне застосування, можливі значні спрощення. Складним питанням залишається оцінка збіжності зазначених рядів. При розв'язанні багатьох нелінійних задач у випадку, коли диференціальні рівняння містять випадкові функції, потрібно будувати (або розкласти) реалізації цих функцій (найчастіше, напругу $U(t)$ чи е.р.с. $E(t)$) за відомими їх імовірнісними характеристиками. Найчастіше цю проблему вирішують шляхом представлення випадкової функції у формі детермінованих функцій випадкових величин. Підставою для такої заміни є теорема, що передбачає для будь-якої випадкової функції, неперервної в інтервалі (a, b) , справедливе розкладання:

$$X(t) = x(t) + \sum_{j=1}^{\infty} V_j \frac{\varphi_j(t)}{\sqrt{\lambda_j}}$$

де V_j – взаємно некорельовані випадкові величини, що володіють нульовими математичними очікуваннями і одиничними дисперсіями;

λ_j і $\varphi_j(t)$ – власні числа і власні функції інтегрального рівняння:

$$\varphi_j(t) = \int_a^b K_x(t, \tau) \varphi_j(\tau) d\tau \quad \varphi_j(t) = \int_a^b K_x(t, \tau) \varphi_j(\tau) d\tau$$

Також застосовують представлення за методом Карунена, Котельникова і за допомогою узагальнених рядів Фур'є або канонічних

розкладань Пугачова. В останні роки найбільш поширеним є інтерполяційний метод неканонічних розкладань за методом Доступова або за методом Чернецького. Насамкінець треба зауважити, що складність розрахунку стохастичних перехідних процесів у нелінійних динамічних системах (виду електротяги) за допомогою навіть викладених вище методів змушує дослідників нерідко відмовлятися від визначення законів розподілення вихідних величин та обмежуватися розрахунками лише перших декількох моментів їх функцій розподілення, тобто знаходити лише моментні функції, які в багатьох практичних випадках дають достатньо повне, в ряді випадків навіть вичерпне, уявлення про досліджуваний випадковий процес.

7. Квазістатичний метод. У деяких задачах можливе зведення інерційного нелінійного елемента до безінерційного, і тоді обмежуються розв'язанням у квазістатичному наближенні, тобто, так званім, квазістатичним методом. Останній характеризується тим, що в першому наближенні нехтують часовою похідною в диференціальному рівнянні системи. Після чого задача зводиться до розв'язання нелінійного рівняння з безінерційним елементом. У цьому методі також передбачається, що зовнішня випадкова дія змінюється настільки повільно, що система безінерційно відслідковує її.

2 Імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні з консольним живленням

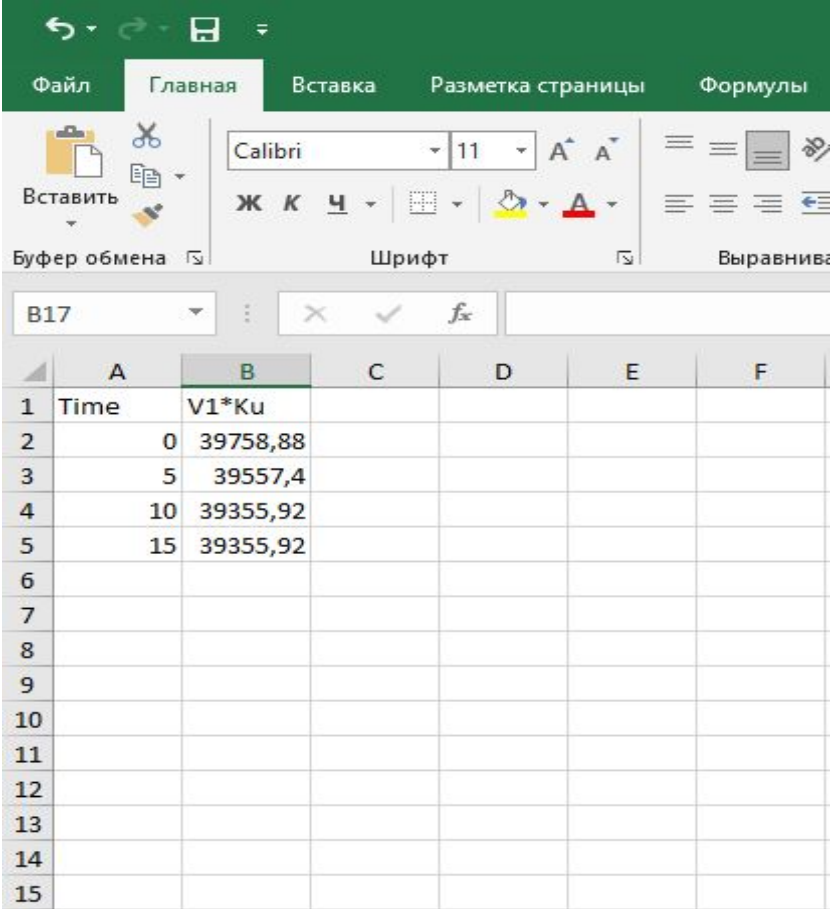
2.1 Розрахункова схема та імітаційна модель у випадку руху двох поїздів

Занесення вхідних даних до середовища Matlab

Перед тим, як занести данні до середовища Matlab їх потрібно створити у програмі Microsoft Excel. Для цього потрібно поділити їх на дві колонки як показано на рис 1. Колонка А позначається як час, а В як напруга.

Далі потрібно визначити, який інтервал часу нам потрібен. В нашому випадку інтервал дорівнює 1 добі, крок дорівнює 5 секунд. Щоб його задати у

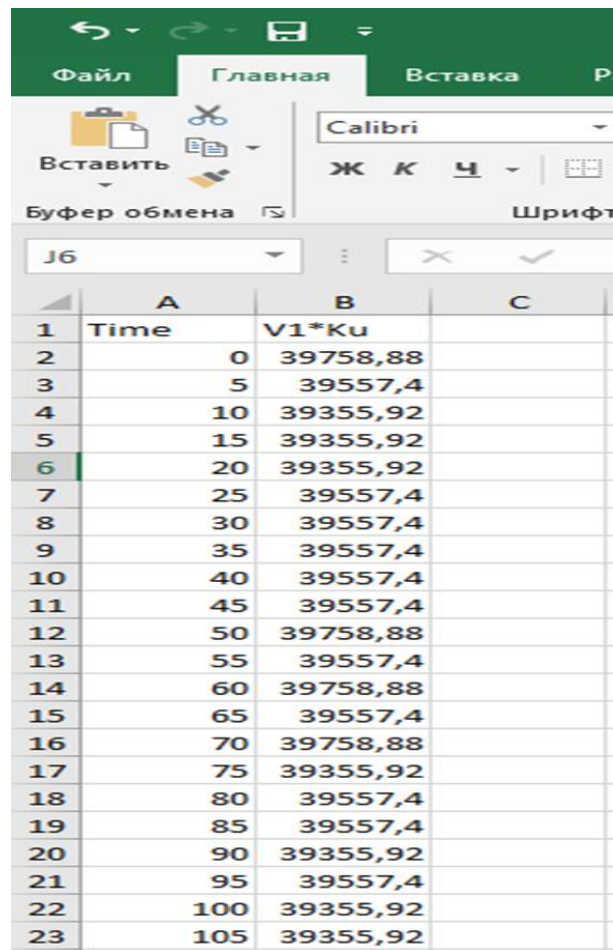
Microsoft Excel необхідно в осередок А1 внести значення 0, а в А2 відповідно 5, виділивши А1, А2 тягнути вниз до певного осередка, рис. 1



	A	B	C	D	E	F
1	Time	$V1 \cdot K_u$				
2	0	39758,88				
3	5	39557,4				
4	10	39355,92				
5	15	39355,92				
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						

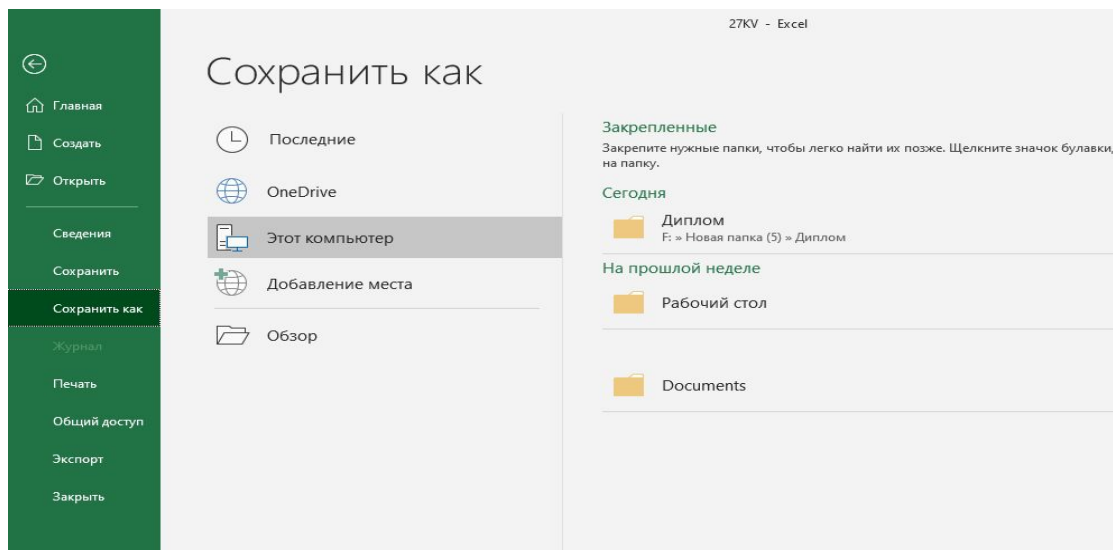
Рис.2. 1

Вхідні данні для напруги були вже визначені, тому вставляємо їх у колонку В, рис 2.2



	A	B	C
1	Time	V1*Ku	
2	0	39758,88	
3	5	39557,4	
4	10	39355,92	
5	15	39355,92	
6	20	39355,92	
7	25	39557,4	
8	30	39557,4	
9	35	39557,4	
10	40	39557,4	
11	45	39557,4	
12	50	39758,88	
13	55	39557,4	
14	60	39758,88	
15	65	39557,4	
16	70	39758,88	
17	75	39355,92	
18	80	39557,4	
19	85	39557,4	
20	90	39355,92	
21	95	39557,4	
22	100	39355,92	
23	105	39355,92	

Рис.2.2



Зберігаємо даний файл з будь-яким ім'ям. Для цього відкриваємо вкладнику Файл та обираємо Зберегти як... як показано на рис 2.3

Далі потрібно відкрити MatLab. Для цього обираємо відповідний ярлик  і натискаємо на нього два рази. Після цього з'явиться стандартне вікно MatLab у якому нам потрібно натиснути на вкладнику Import Data як показано на рис 2.4.

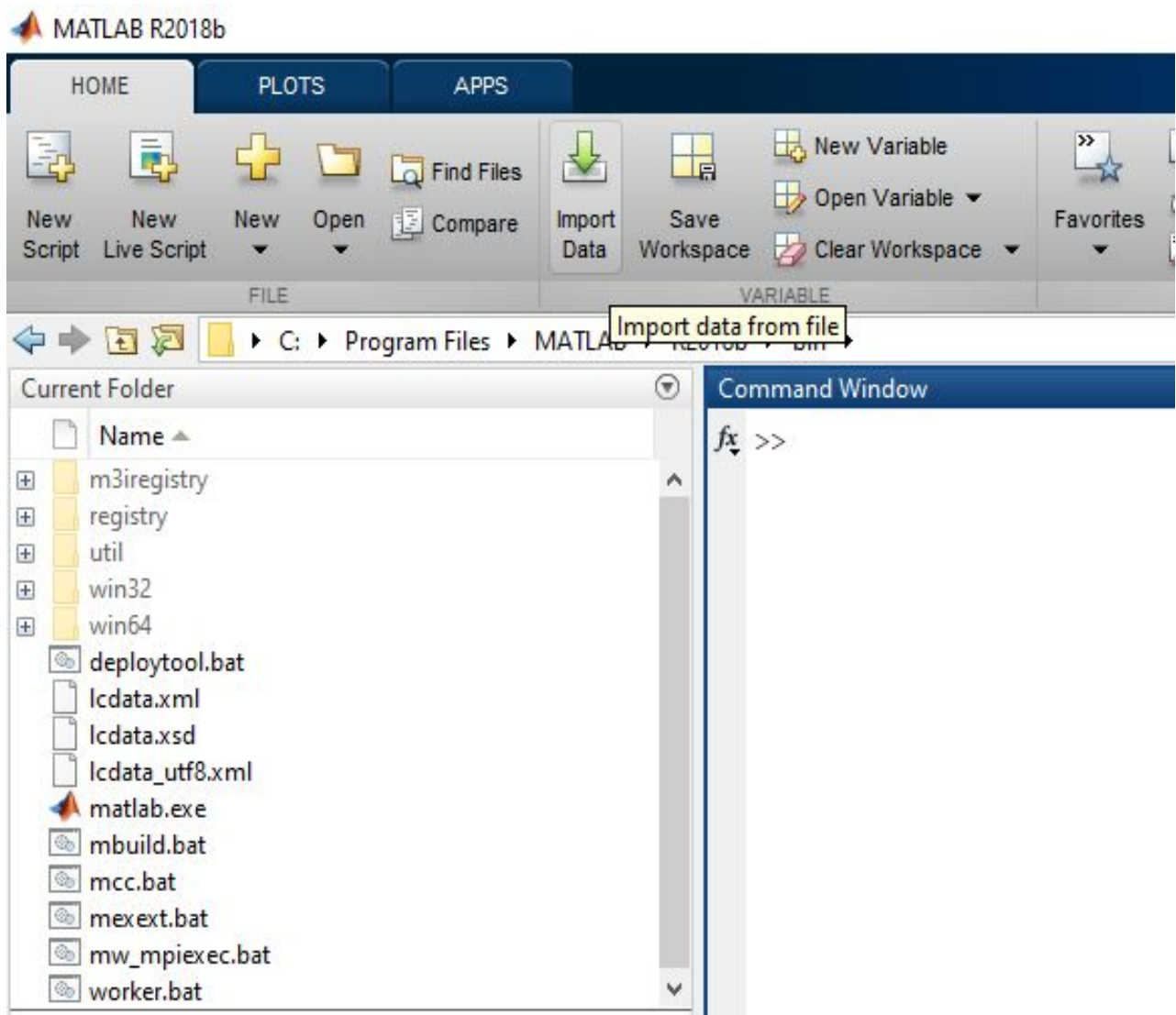
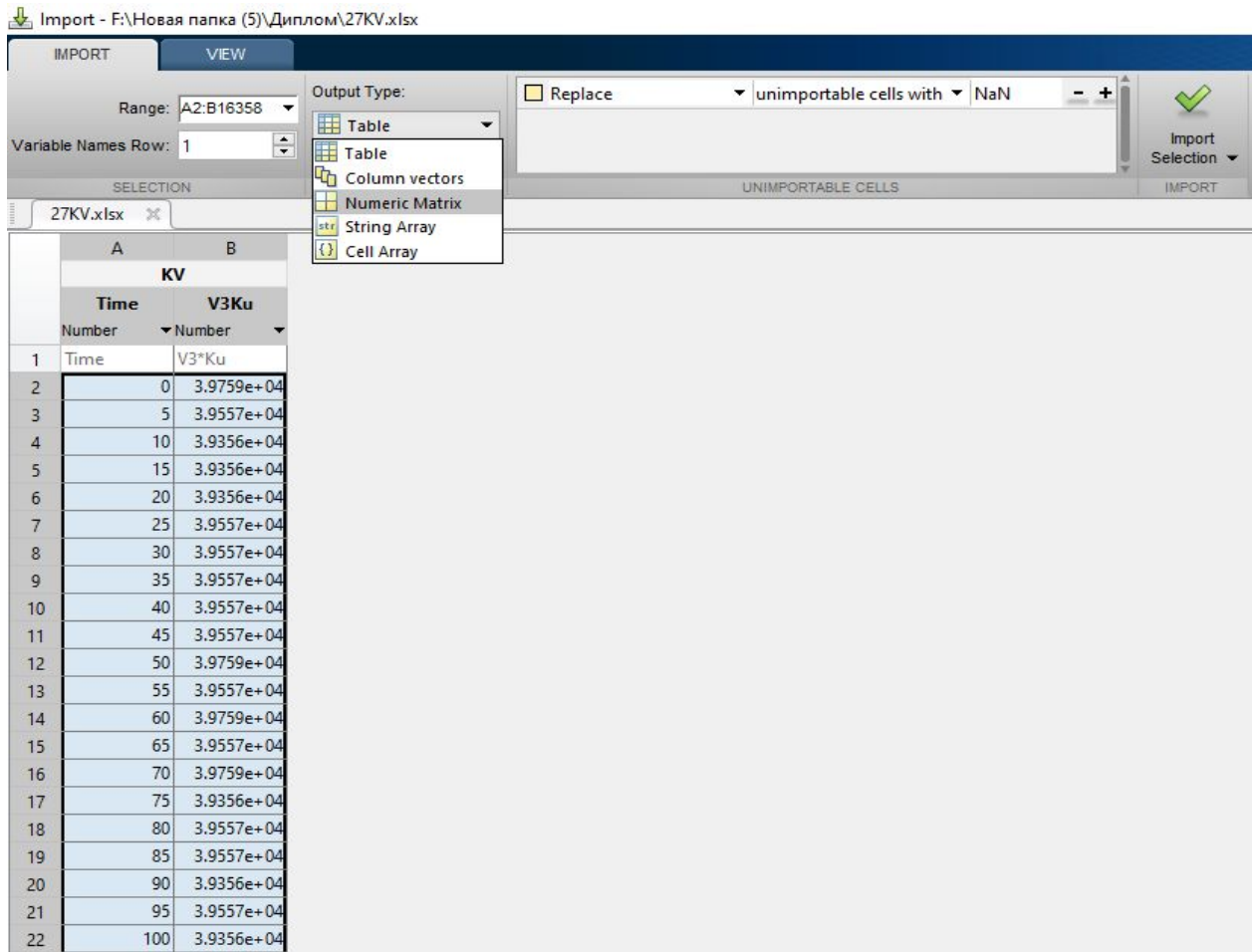


Рис 2.5

Після того, як натиснули на вкладнику Import Data з'явиться вікно, у якому потрібно обрати файл з Excel. Після виконання цієї дії перейдемо до наступної, а саме, натиснувши на вкладнику Output Type обираємо рядок з назвою Numeric Matrix. Після завершення всіх перерахованих вище дій тиснемо на вкладнику Import Selection рис 2.5.



Якщо все правильно виконано, то на стандартному вікні Matlab у підрозділі який називається Workspace з'являться внесені данні у вигляді матриці рис 2.6.

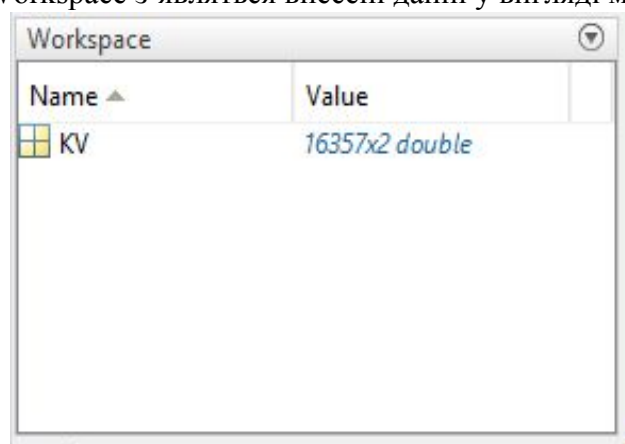


Рис 2.6

Далі потрібно відкрити схему в яку потрібно було внести ці данні. Тиснемо на в кладнику. Ореп та обираємо відповідний файл зі схемою. Після цього відкриеть ся середовище Simulink, та схема яка показана на рис 2.7.

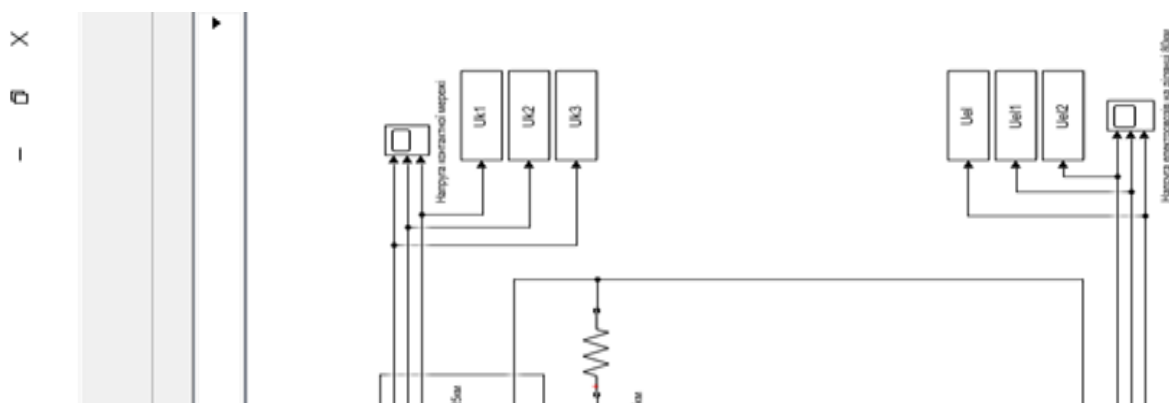


Рис 2.7 -- Фідерна зона консольного типу з розподіленими параметрами

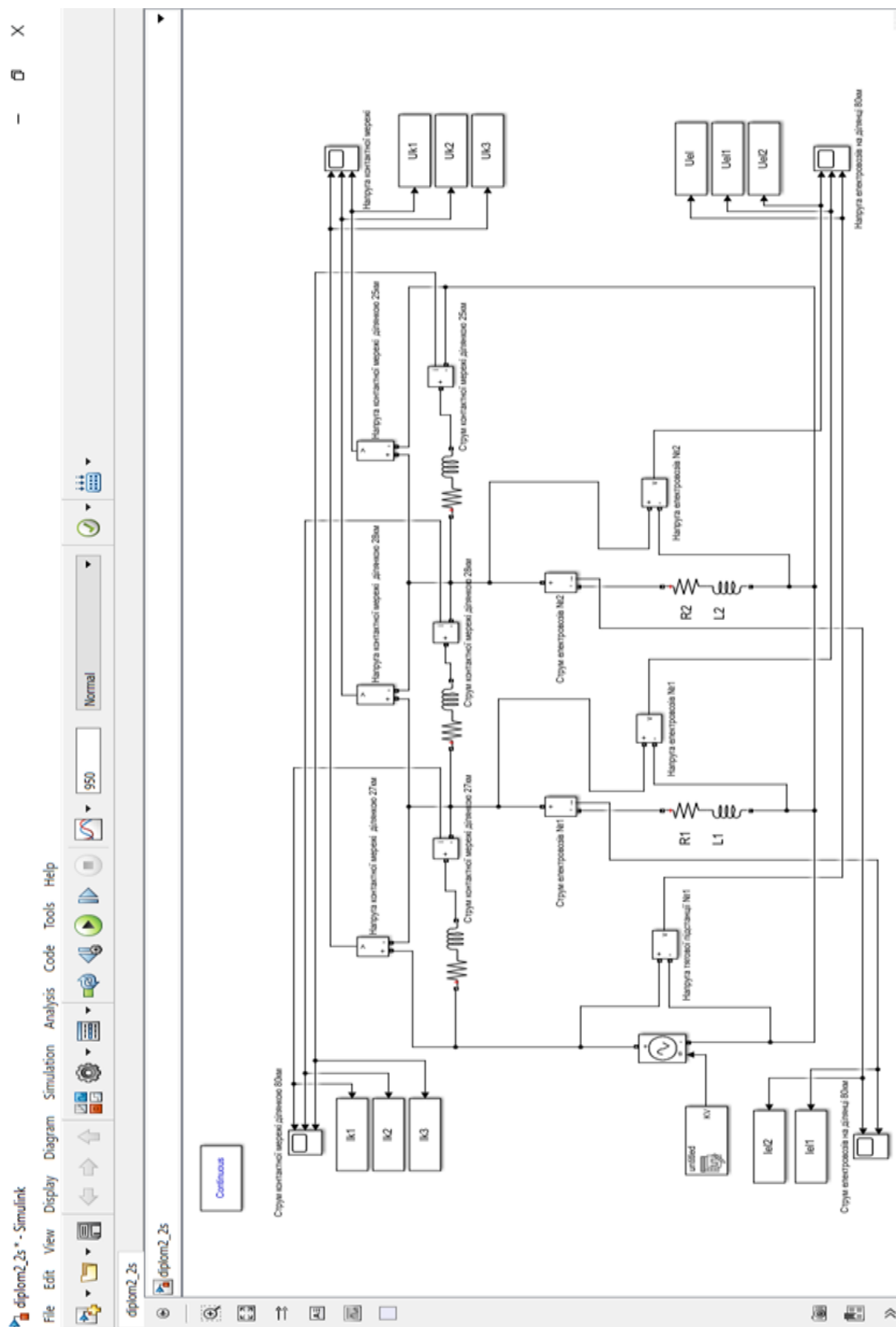


Рис 2.8 -- Фідерна зона консольного типу з зосередженими параметрами

Для подальшого занесення даних потрібно розглянути елемент на схемі,



який називається Signal Editor. Спочатку проаналізуємо його властивості, які зображені на рис 2.9

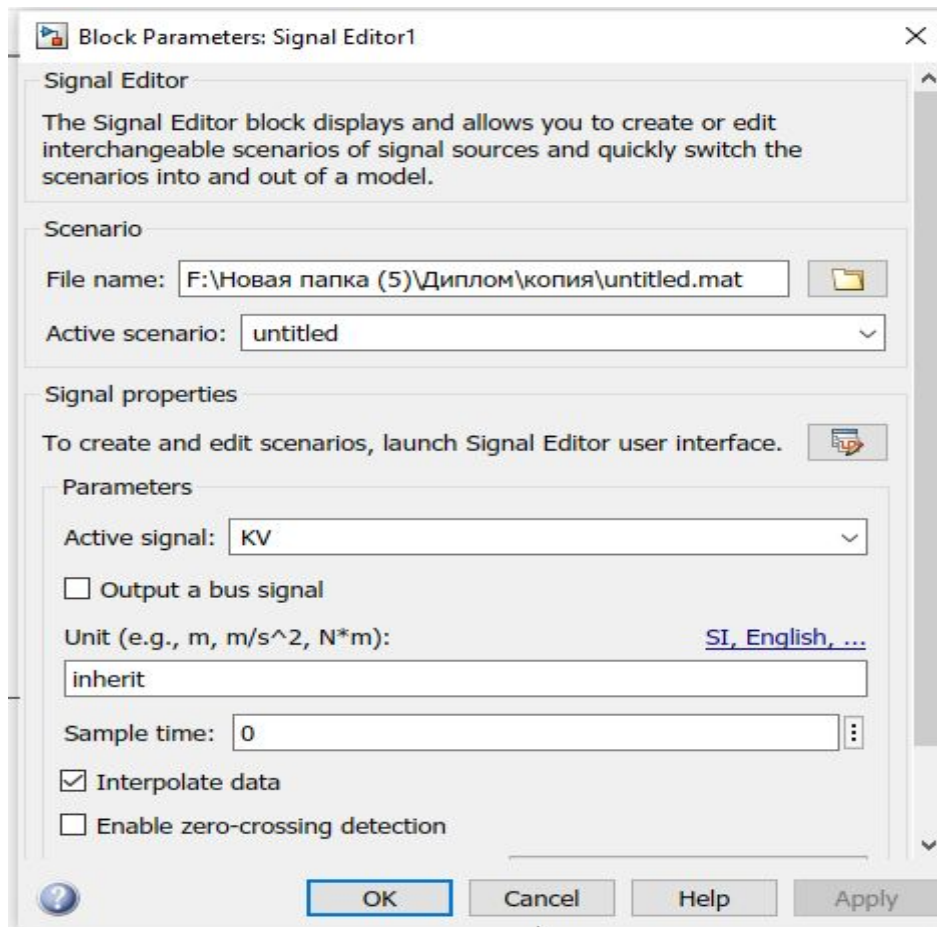


Рис 2.9

Вияснивши всі його властивості тиснемо на кнопку . Повинно з'явитись вікно створення та редагування сигналів. В цьому вікні знаходимо вкладнику Scenario та тиснемо на неї, далі обираємо From Workspace (Рис 2.10).



Рис 2.10

Після натискання з'являться варіанти вихідних даних, обираємо потрібний та тиснемо на ОК (Рис 2.11).

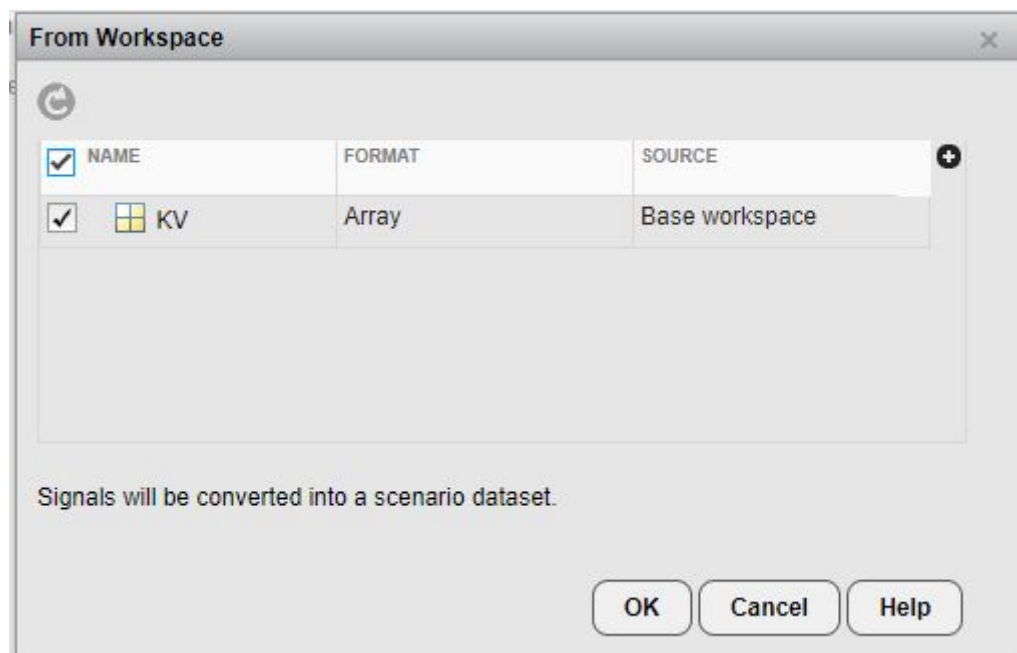


Рис 2.11

Далі автоматично створиться сценарій та сигнал який відповідає вхідним даним. Для того щоб його подивитись потрібно обрати вкладнику цього сценарію, і поставити галочку навпроти назви вхідних даних (Рис 2.12).

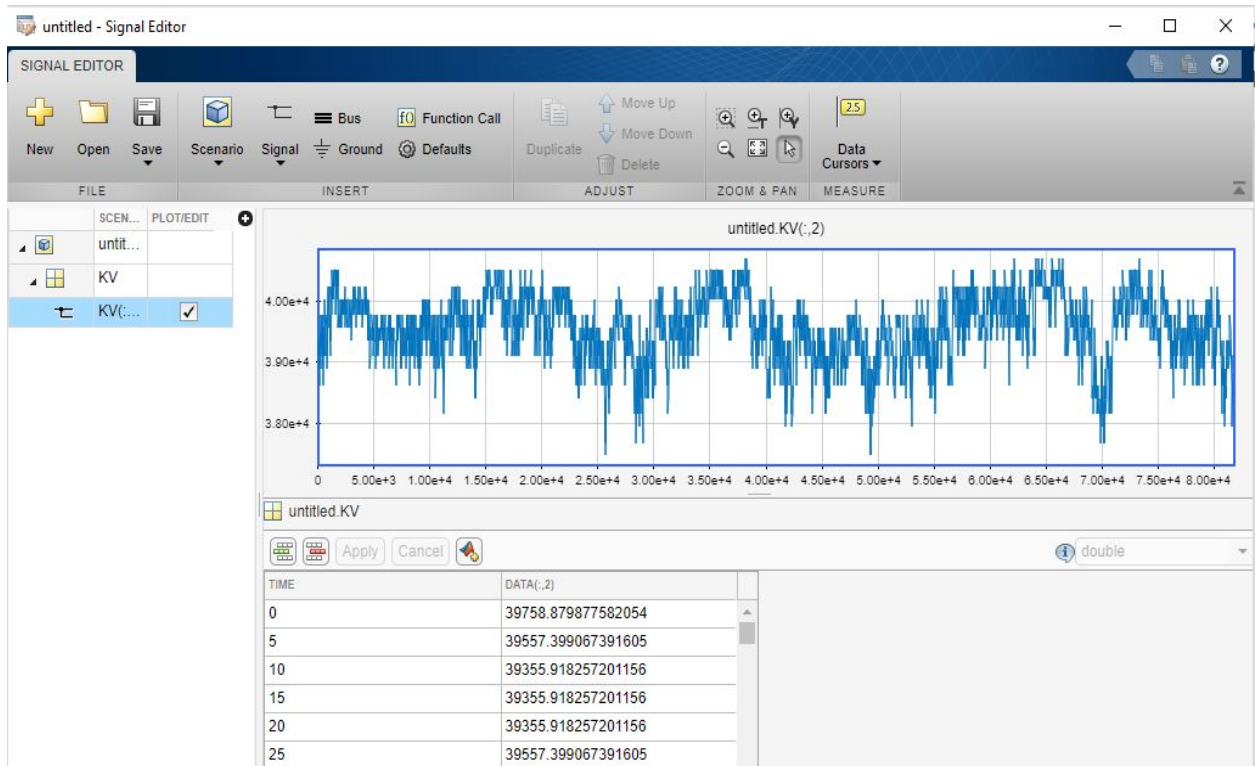


Рис 2.12

Для подальшої роботи потрібно його зберегти, для цього тиснемо на вкладнику Save потім Save As... та обираємо папку в якому він буде зберігатись. Також у властивостях елементу Signal Editor встановлюємо галочку навпроти Інтерполяція даних, Час вибірки обираємо 0, та формуємо результат після кінцевого значення даних шляхом Екстраполяції.

Для виведення даних з осцилографів , скористаємось таким елементом як



To Workspace

проаналізуємо властивості цього елементу, які показані на (рис. 2.13).

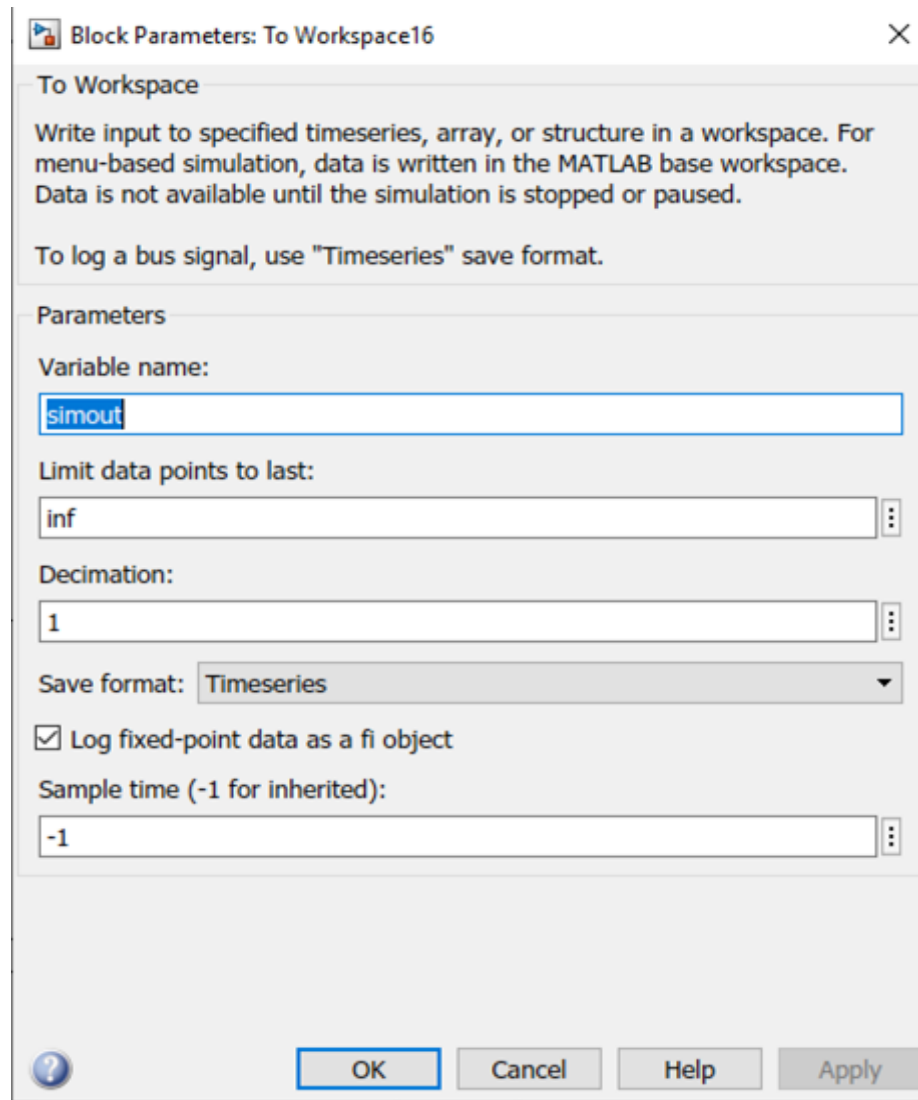


Рисунок 2.13 – Параметри блоку To Workspace

В цьому елементі можна задати назву з якою дані будуть виведені до робочої області, обмежити кількість точок до останнього, і відповідно задати час вибірки, у нашому випадку 5 секунд. Зробивши усі налаштування, `simout` для першого фідерного напруги виглядатиме так (рис. 2.14).

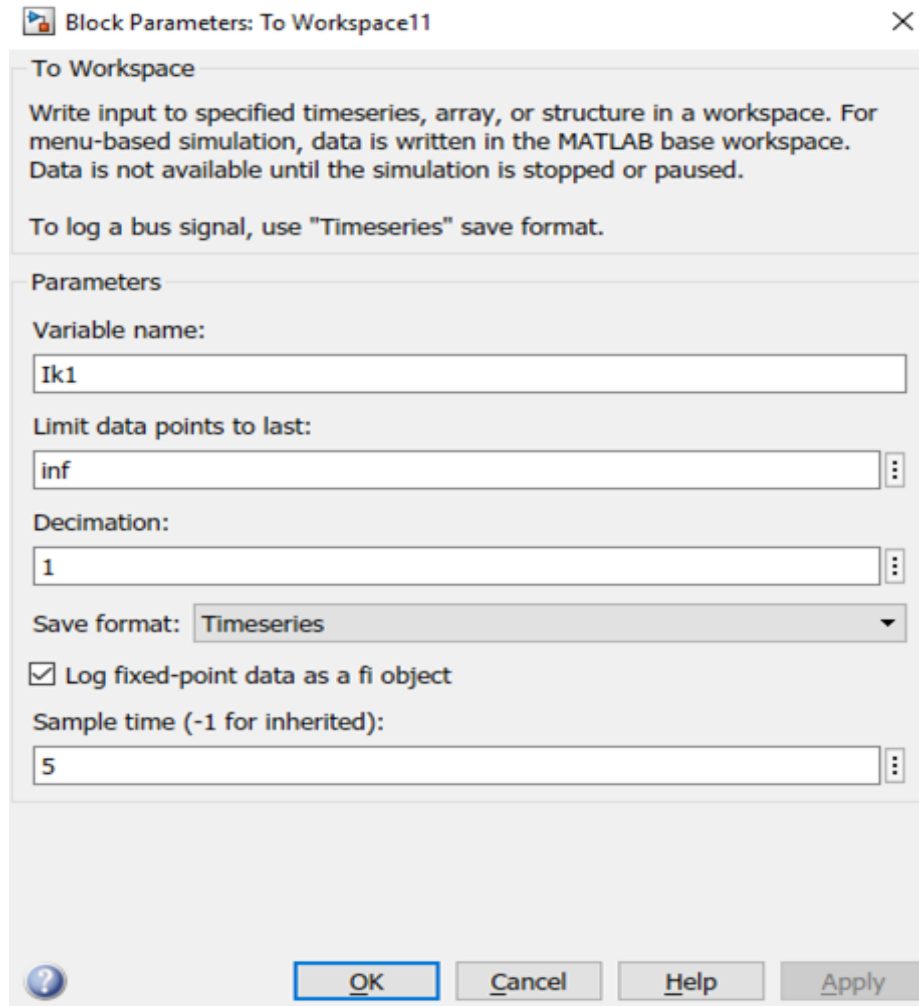


Рисунок. 2.14 Кінцеві налаштування блоку To Workspace

Відповідно на схемі він підключається до осцилографа наступним чином (рис. 2.15)

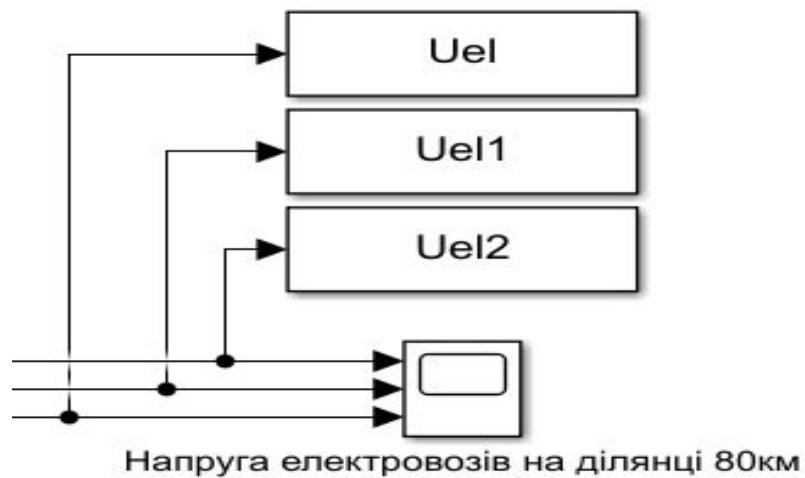


Рисунок 2.15 – Приклад підключення To Workspace до осцилографа

Після запуску схеми, результати осцилографа будуть занесені до робочої області і їх можна буде занести до Microsoft Excel. (рис. 2.16).

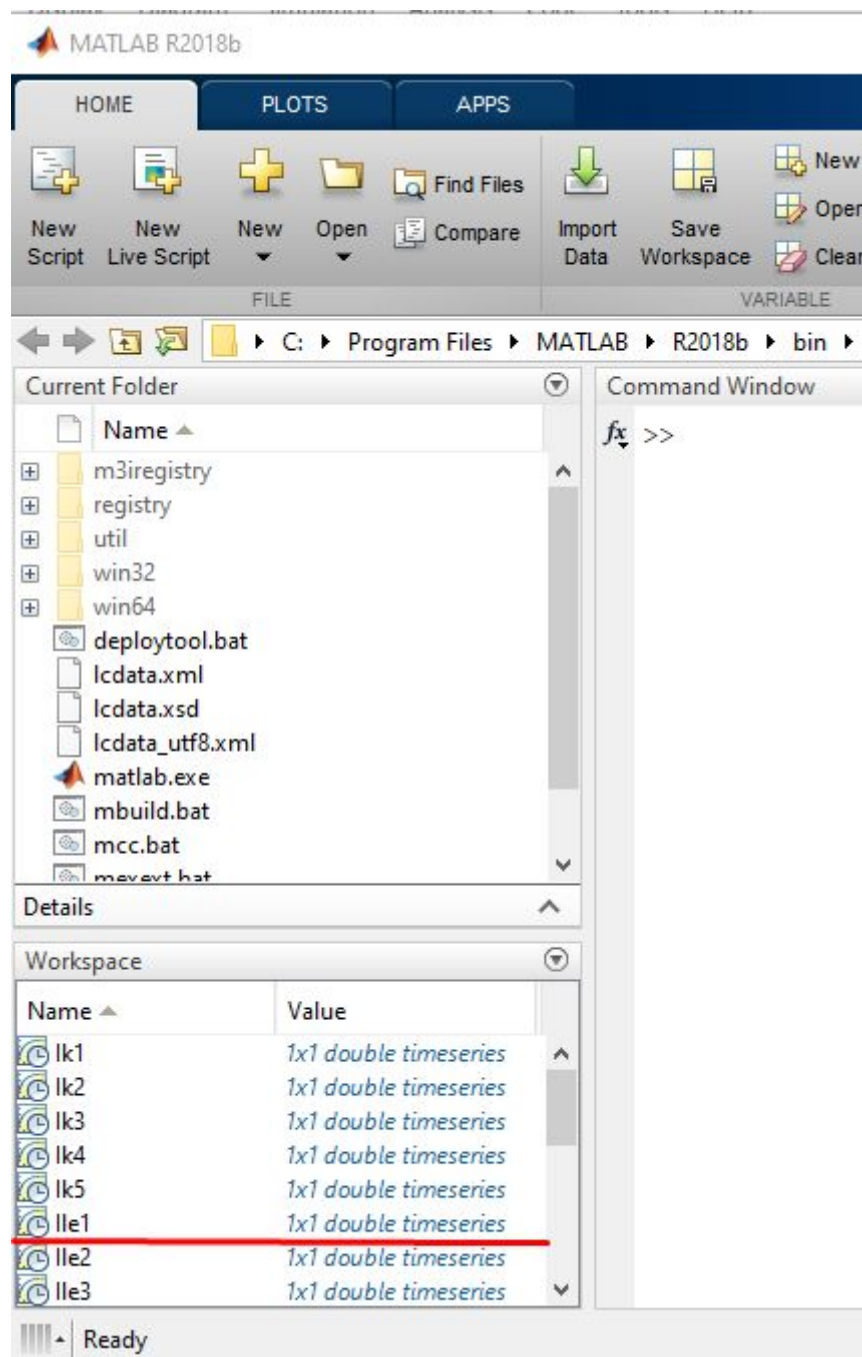


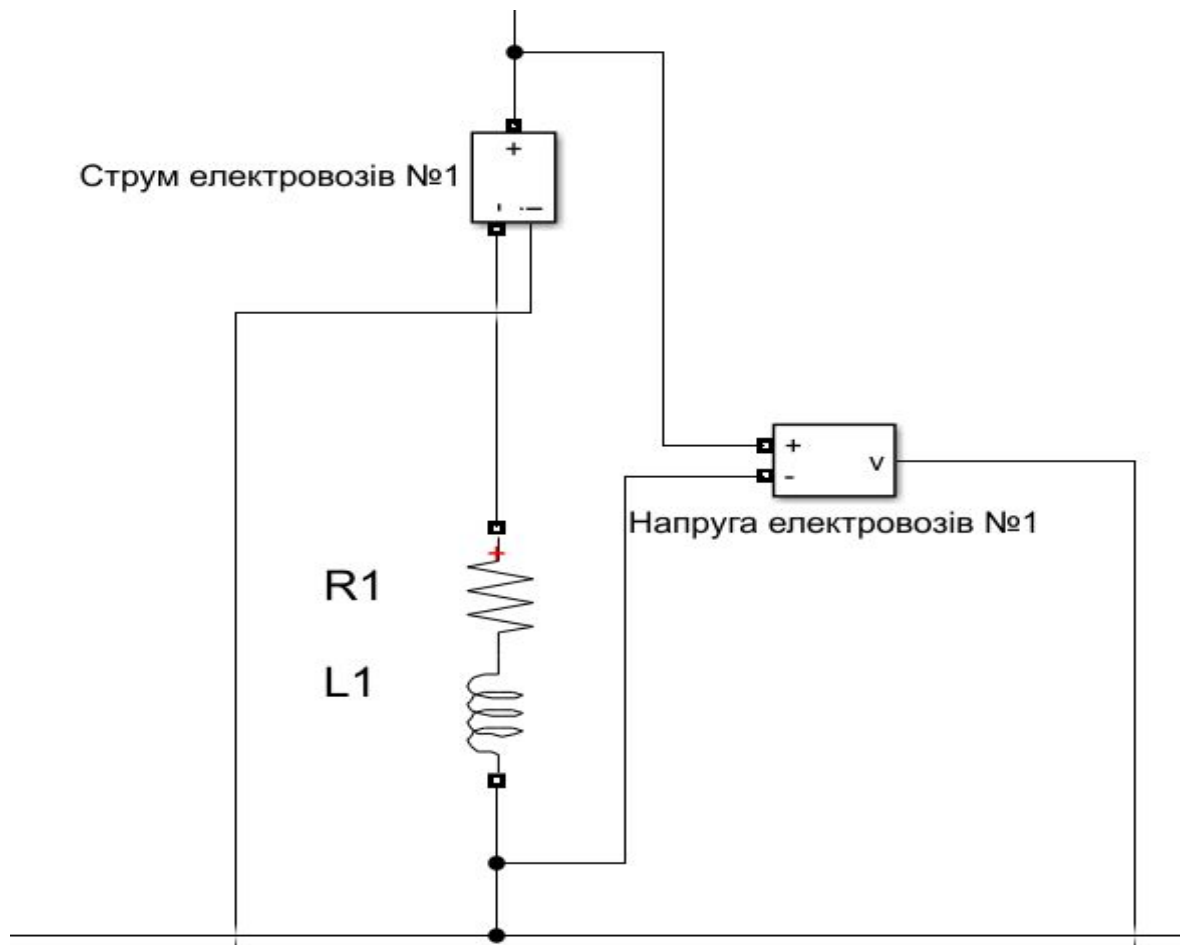
Рисунок 2.16 – Вигляд виведених даних у вікні Workspace

Натиснувши lle2 відкриється вікно з вихідними даними осцилографа, щоб їх перенести до середовища Microsoft Excel достатньо просто скопіювати дані комбінацією Ctrl+A, Ctrl+C і в робочому листі Excel виділити осередок та натиснути комбінацію Ctrl+V.

2.2 Результати моделювання величини напруги на струмоприймачах

Оскільки світовий досвід показує, що на ділянках з швидкісними поїздами застосовується система електричної тяги змінного струму 27,5 кВ, 50 Гц, то в цій роботі здійснено імітаційне моделювання процесів в таких ділянках при швидкості руху поїздів 200 км/год, з довжиною міжпідстанційної зони $l=80$ км. Суттєва схемотехнічна складність побудови ЕРС обумовила застосувати в цій роботі ідентифікаційну модель електровоза ЕД 4 у вигляді пасивного двополюсника з послідовним з'єднанням нелінійного резистивного елемента R та параметричної індуктивності L .

При моделюванні використали еквівалентні значення R і L і вони склали: для електровоза №1 $R_1=133,05$ Ом, $L_1=0,077$ Гн ; для електровоза №2 $R_1=281,2$ Ом, $L_1=0,22$ Гн. Схематично зобразити на рис(2.14) електровоза



Рисунок(2.17) – Схема підключення електровозу

Нехай маємо статистичну вибірку ($U_{e1}, U_{e2}, \dots, U_{en}$) випадкової величини. Потрібно виконати статистичний аналіз, тобто встановити закономірності зміни цієї випадкової величини. А як відомо, ці закономірності характеризуються законом розподілення та числовими характеристиками випадкових величин. Отже, потрібно визначити математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичного відхилення. Для цього визначаємо математичне очікування за формулою:

$$m_{U_{e1}} = \frac{\sum_{i=1}^{16358} U_{ie1}}{16358}$$

$$m_{U_{e1}} = 18323$$

Для цього визначаємо дисперсію за формулою:

$$D_{U_{e1}} = \frac{\sum_{ie1=1}^{n=16358} (U_{ie1} - m_{U_{e1}})^2}{16358-1}$$

$$D_{U_{e1}} = 60013,54^2$$

Для цього визначаємо середньоквадратичне за формулою:

$$\sigma_{U_{e1}} = \sqrt{D_{U_{e1}}}$$

$$\sigma_{U_{e1}} = 107,2642 \text{ В}$$

Для цього визначаємо асиметрію ми визначаємо за формулою:

$$A_{U_{e1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{ie1} - m_{U_{e1}})^3}{n \cdot s^3}$$

$$A_{U_{e1}} = 107,2642$$

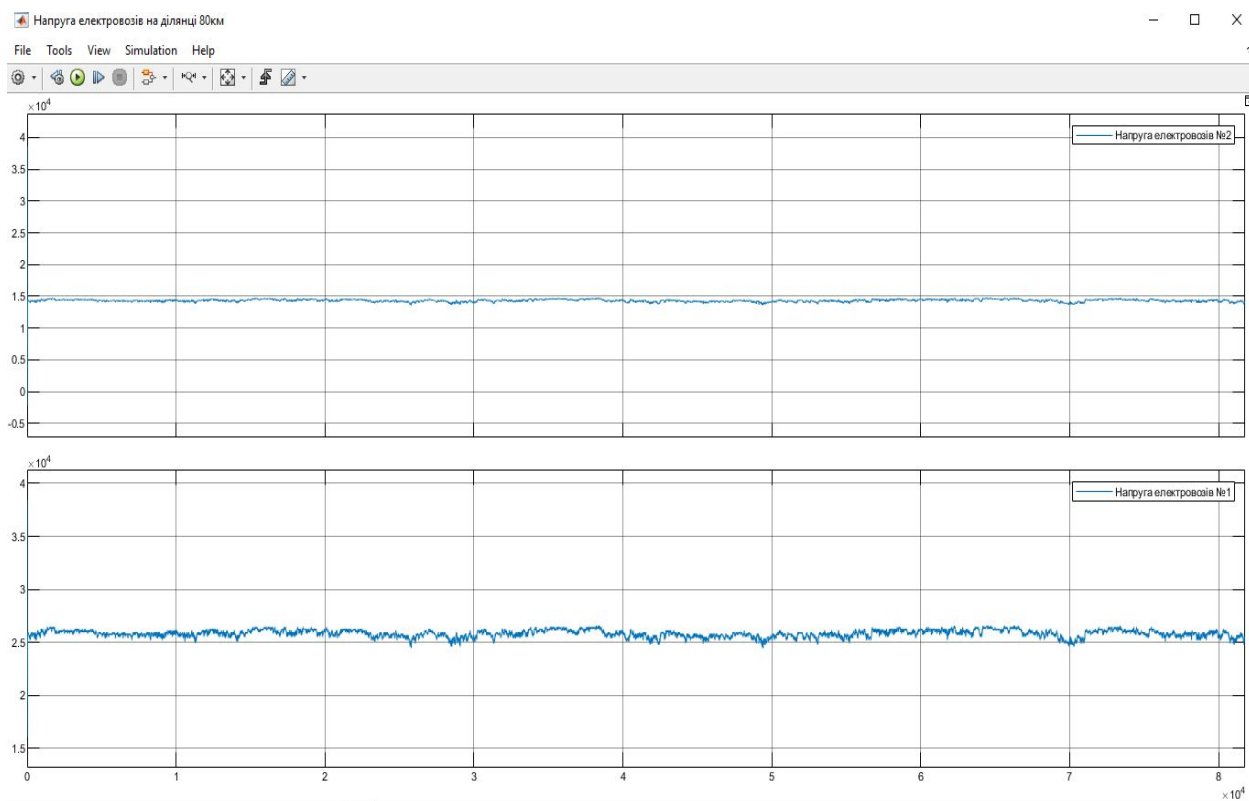
Для цього визначаємо ексцес ми визначаємо за формулою:

$$E_{U_{lel}} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{lel} - m_{U_{lel}})^4}{n \bullet S}$$

$$B_{U_{lel}} = 2,521824$$

Таблиця №2.1 - Розрахунок математичне очікування , дисперсія ,середньоквадратичне ексцес, асиметрія напругу на електровозах з розподіленими параметрами в серидовиші Excel

Статичні дані	Ule1 В	Ule2 В
математичне очікування	18323	8364
Дисперсія	60013,54	12352
Середньоквадратичне	244,9766	111,1395
Ексцес	107,2642	4382,917
Асиметрія	2,521824	47,47271



Рисунок(2.19) – Вихідні дані напруги на електровозі з розподіленими параметрами

Для цього визначаємо математичне очікування за формулою:

$$m_{U_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^{16358} U_{le1}}{16358}$$

$$m_{U_{le1}} = 18170 \text{ В}$$

Для цього визначаємо дисперсія за формулою:

$$D_{U_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^{n=16358} (U_{le1} - m_{U_{le1}})^2}{16358-1}$$

$$D_{U_{le1}} = 56057,92 \text{ В}^2$$

Для цього визначаємо середньоквадратичне за формулою:

$$\sigma_{U_{le1}} = \sqrt{D_{U_{le1}}}$$

$$\sigma_{U_{le1}} = 236,7655$$

Для цього визначаємо асиметрії ми визначаємо за формулою:

$$A_{U_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{le1} - m_{U_{le1}})^3}{n \cdot \sigma^3_{U_{le1}}}$$

$$A_{U_{le1}} = 16,79918$$

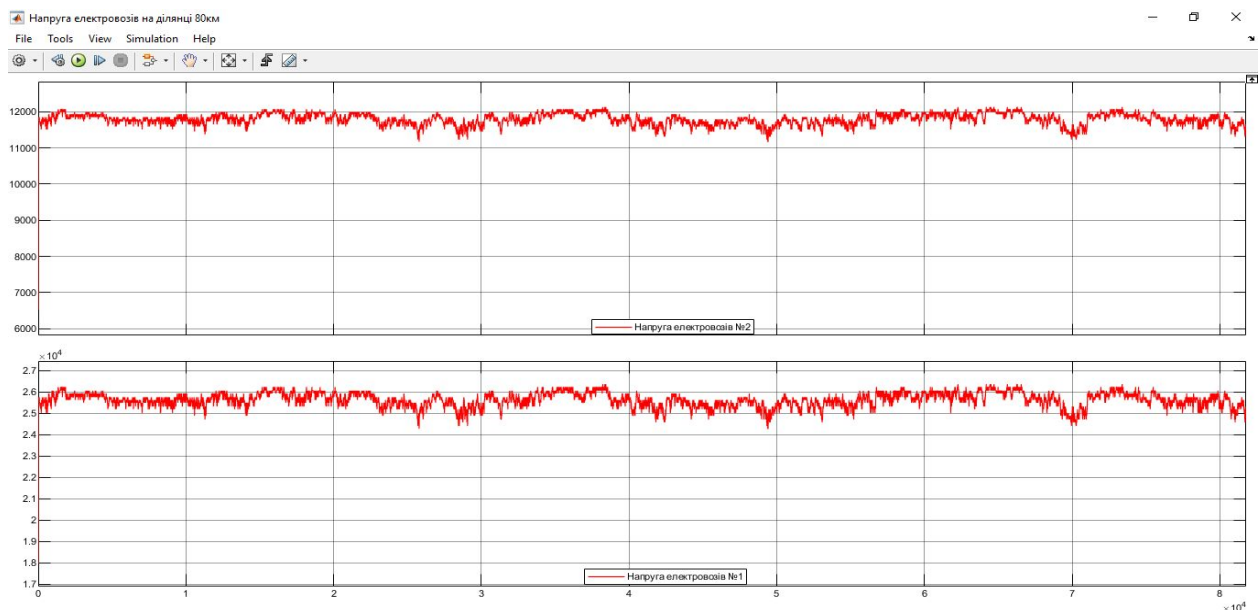
Для цього визначаємо ексцес ми визначаємо за формулою:

$$E_{U_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (U_{le1} - m_{U_{le1}})^4}{n \cdot \sigma^4_{U_{le1}}}$$

$$E_{U_{le1}} = 236,7655$$

Таблиця № 2.2 - Розрахунок математичне очікування , дисперсія , середньоквадратичне ексцес, асиметрія напругу на електровозах з зосередженими параметрами в серидовиші Excel

Статичні дані	Ule1 В	Ule2 В
Математичне очікування	18170	8364
Дисперсія	56057,92	12352
Середньоквадратичне	236,7655	111,1395
Ексцес	16,79918	78,10468
Асиметрія	-1,19289	-2,75845



Рисунок(2.21) – Вихідні дані напруги на електровозі з зосередженими параметрами

2.3 Характер змінни та чисельний результат струмів електровозів

Нехай маємо статистичну вибірку ($I_{le1}, I_{le2}, \dots, I_{len}$) випадкової величини. Потрібно виконати статистичний аналіз, тобто встановити закономірності зміни цієї випадкової величини. А як відомо, ці закономірності характеризуються законом розподілення та числовими

характеристиками випадкових величин. Отже, потрібно визначити математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичного відхилення. Для цього визначаємо математичне очікування за формулою:

$$m_{I_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^{16358} I_{le1}}{16358}$$

$$m_{I_{le1}} = 138$$

Для цього визначаємо дисперсію за формулою:

$$D_{I_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^{n=16358} (I_{le1} - m_{I_{le1}})^2}{16358 - 1}$$

$$D_{I_{le1}} = 166894 \quad ^2$$

Для цього визначаємо середньоквадратичне за формулою:

$$\sigma_{I_{le1}} = \sqrt{D_{I_{le1}}}$$

$$\sigma_{I_{le1}} = 12916077$$

Для цього визначаємо асиметрії ми визначаємо за формулою:

$$A_{I_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{le1} - m_{I_{le1}})^3}{n \cdot \sigma_{I_{le1}}^3}$$

$$A_{I_{le1}} = 1806,24 \quad A$$

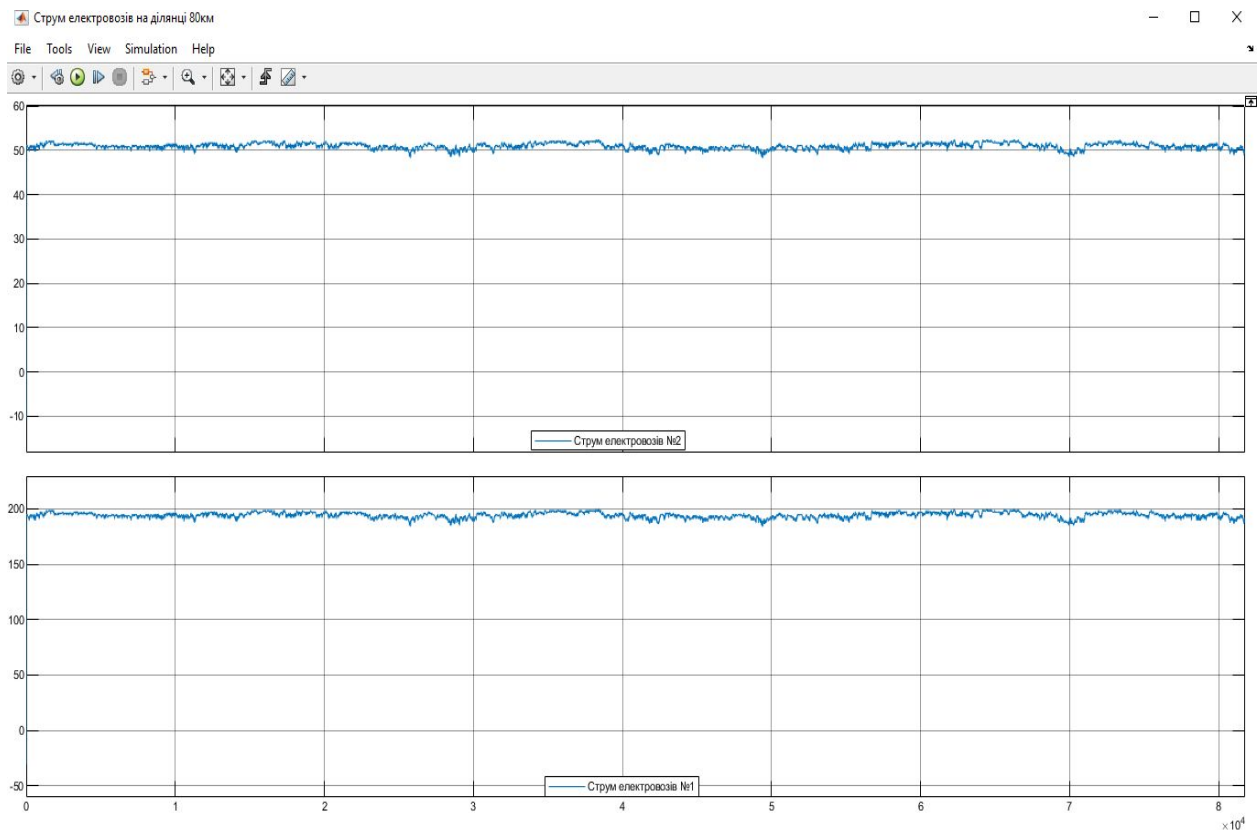
Для цього визначаємо ексцес ми визначаємо за формулою:

$$E_{I_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{le1} - m_{I_{le1}})^4}{n \cdot \sigma_{I_{le1}}^4}$$

$$E_{I_{le1}} = -24,7676 \quad A$$

Таблиця № 2.3 – Розрахунок математичне очікування, дисперсія, середньоквадратичне, ексцес, асиметрія струм на електровозах з розподіленими параметрами в середовищі Excel

Статичні дані	Ile1 А	Ile2 А
математичне очікування	138	36
дисперсія	4,66894	0,33018
середньоквадратичне	2,16077	0,57461
ексцес	1806,24	2004,4
асиметрія	-24,7676	-26,7465



Рисунок(2.23) – Вихідні дані струмів на електровозі з розподіленими параметрами

Для цього визначаємо математичне очікування за формулою:

$$m_{I_{le1}} = \frac{\sum_{I_{le1}=1}^{16358} I_{le1}}{16358}$$

$$m_{I_{le1}} = 45$$

Для цього визначаємо дисперсія за формулою:

$$D_{I_{le1}} = \frac{\sum_{I_{le1}=1}^{n=16358} (I_{le1} - m_{I_{le1}})^2}{16358 - 1}$$

$$D_{I_{le1}} = 4041583 \quad ^2$$

Для цього визначаємо середньоквадратичне за формулою:

$$\sigma_{I_{le1}} = \sqrt{D_{I_{le1}}}$$

$$\sigma_{I_{le1}} = 202058$$

Для цього визначаємо асиметрії ми визначаємо за формулою:

$$A_{I_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{le1} - m_{I_{le1}})^3}{n \cdot \sigma_{I_{le1}}^3}$$

$$A_{I_{le1}} = 1903,392 \quad A$$

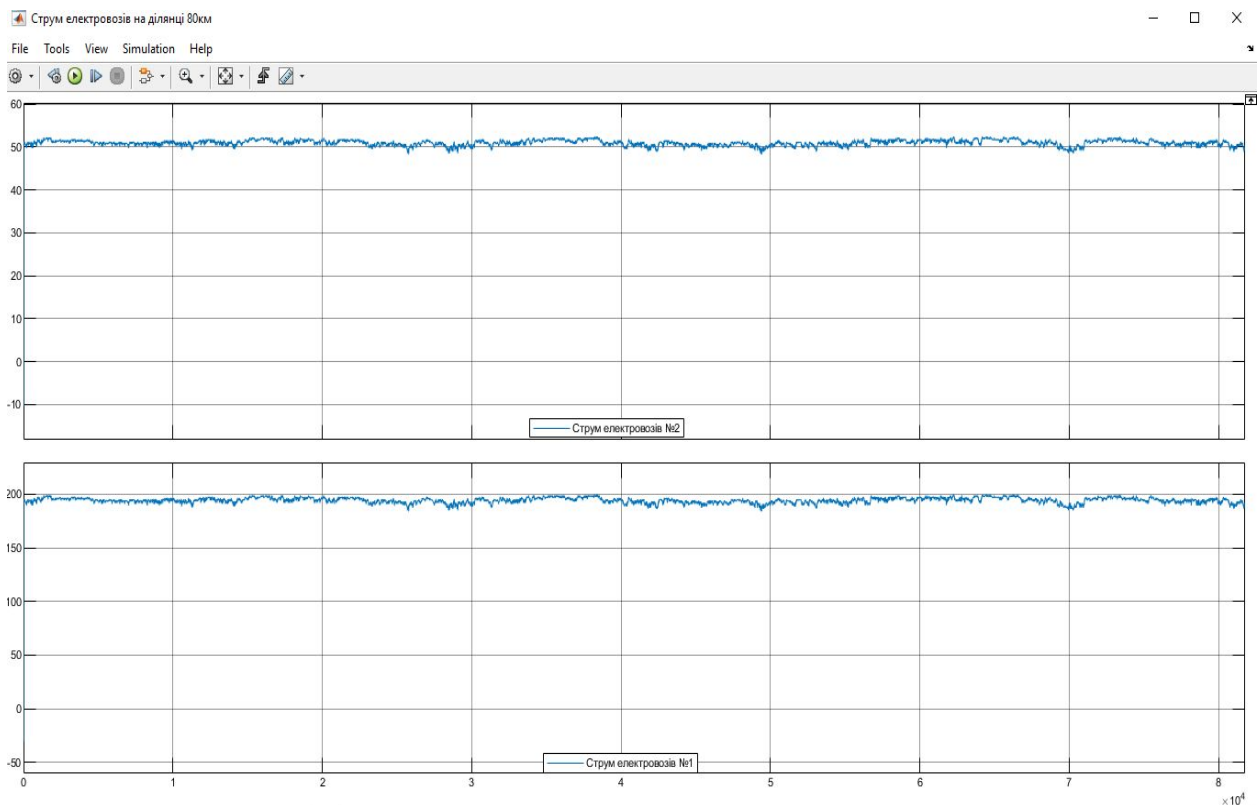
Для цього визначаємо ексцес ми визначаємо за формулою:

$$E_{I_{le1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{le1} - m_{I_{le1}})^4}{n \cdot \sigma_{I_{le1}}^4}$$

$$E_{I_{le1}} = -25,7442 \quad A$$

Таблиця № 2 - Розрахунок математичне очікування, дисперсія, середньоквадратичне ексцес, асиметрія струм на електровозах з зосередженими параметрами в серидовиші Excel

Статичні дані	Ілe1 А	Ілe2 А
математичне очікування	65	63
Дисперсія	1,041583	0,978953
середньоквадратичне	1,02058	0,989421
Ексцес	1903,392	1851,843
Асиметрія	-25,7442	-25,2276



Рисунок(2.25) – Вихідні дані струмів на електровозі з зосередженими параметрами

2.4 Оцінка струмів на елементах ділянки ТМ

Провід типу МФ-100, несучий трос ПБСМ1-95 та рельс типу R 65.

Отримаємо реальні значення тягового кола змінного струмі:

$$r_{a1} = 0,104 \text{ м}, \quad x_1 = 0,437 \text{ м}, \quad r_{12} = 0,045 \text{ м}, \quad x_{12} = 0,163 \text{ м}.$$

Для того щоб отримати реальні параметри тягового кола скористаємося наступними формулами:

$$\begin{aligned} R_{a1} &= r_{a1}, \quad R_{12} = r_{12}; \\ L_1 &= x_1 / \omega, \quad L_{12} = x_{12} / \omega; \\ R_{\text{TM}} &= (R_{a1} + R_{12}) \cdot l, \\ L_{\text{TM}} &= (L_1 + L_{12}) \cdot l \end{aligned}$$

Ділянка тягова мережа складається з таких елементів з розподіленими параметрами

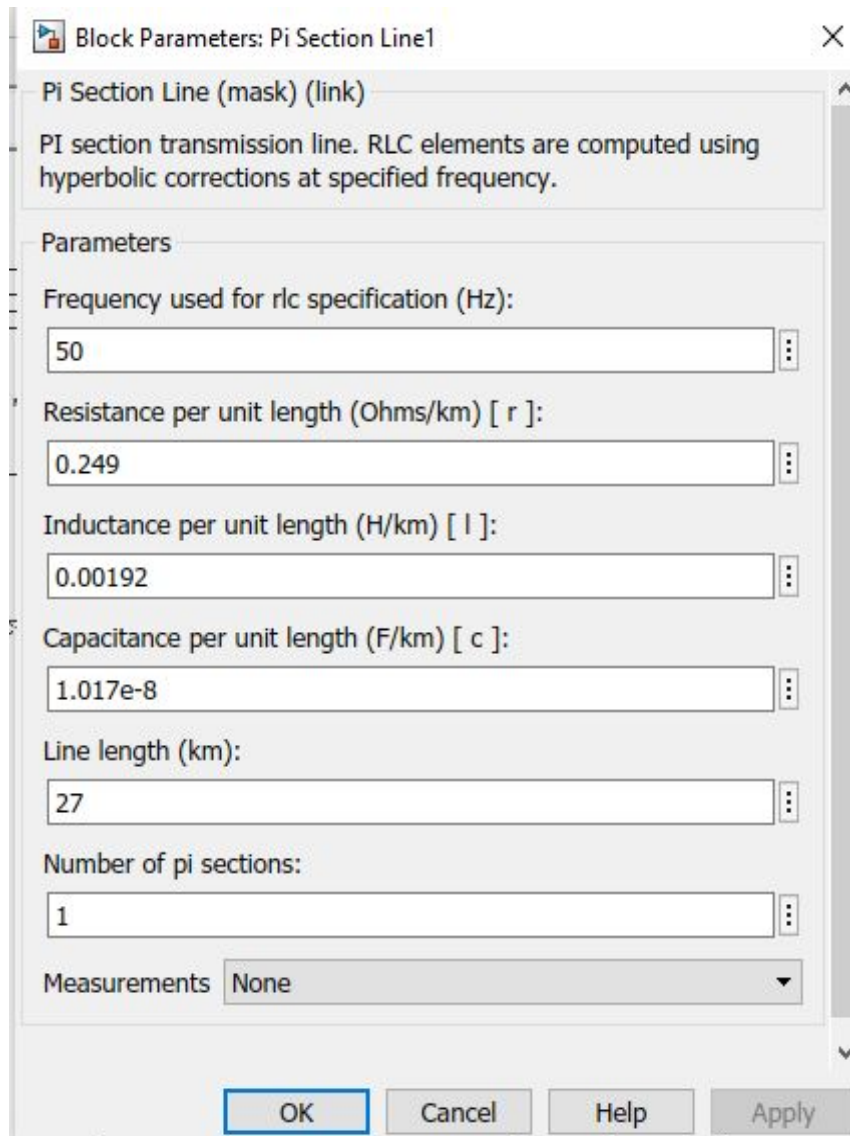


Рисунок(2.26) – Ділянки тягової мережі з розподіленими параметрами

Для введення даних в тягову мережу з елементом (Pi Section Line)



проаналізуємо властивості цього елемента, які показані на (рис. 2.27).



Рисунок(2.27)-Властивості цього елементу Pi Section Line

Frequency used for rlc specification (Hz) - Частота, що використовується для специфікації rlc (50 Гц)

Resistance per unit length (Ohms/km) [r] – Опір на одиницю довжини (Ом / км) [r] ($r=0,249$ Ом / км)

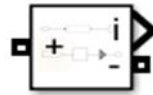
Inductance per unit length (H/km) [L] - Індуктивність на одиницю довжини

(Г / км) [L] ($L=0,00192$ Г / км)

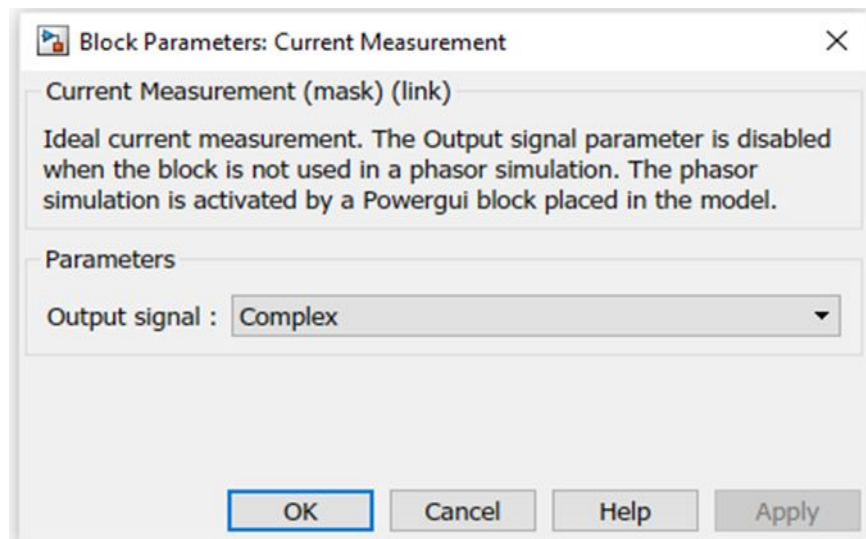
Capacitance per unit length (F/km) [C] - Ємність на одиницю довжини (Ф/ км) [C] $C=1,017 \cdot 10^{-8}$

Line length (km) - Довжина лінії ділянки контактної мережі (км)

За струм на ділянках фідерної зони відповідає елемент (Current Measurement)



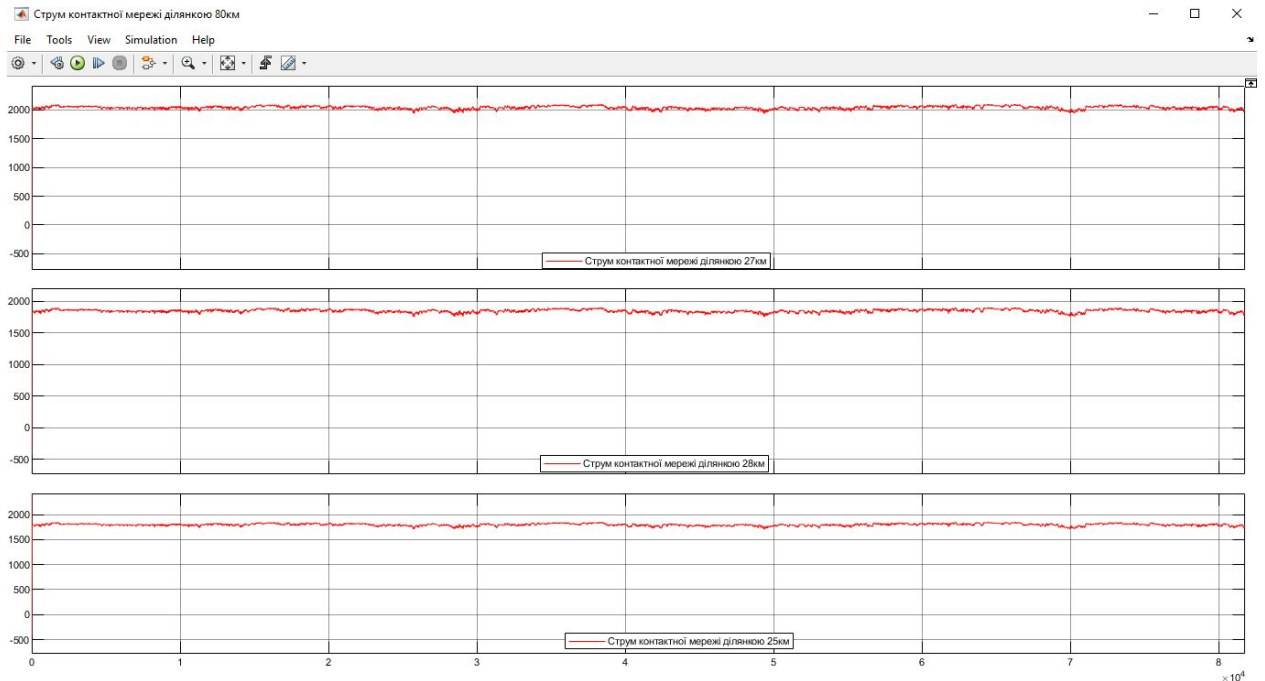
проаналізуємо властивості цього елемента, які показані на (рис. 2.28).



Рисунок(2.28)-Властивості цього елемента Current Measurement

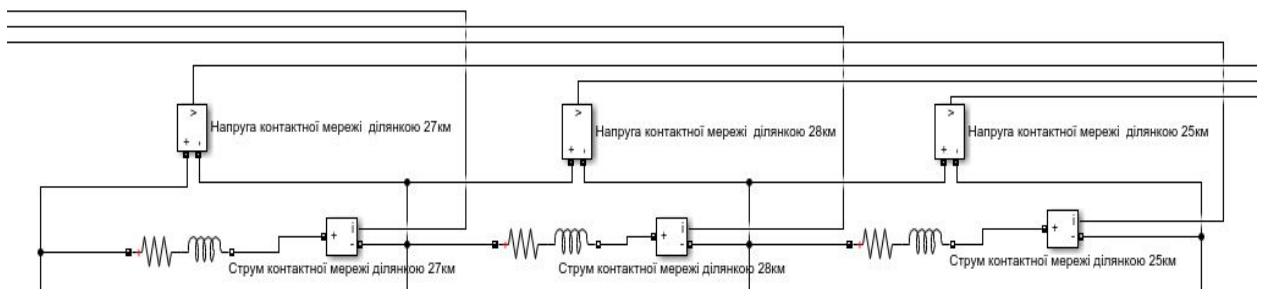
Таблиця № 2.4 - Розрахунок математичне очікування , дисперсія ,середньоквадратичне ексцес, асиметрія струм в контактній мережі з розподіленими параметрами в серидовиші Excel

Статичні дані	Ik1 A	Ik2 A	Ik3 A
математичне очікування	1449	1311	1277
дисперсія	537,5009	442,0171	43605,06
середньоквадратичне	23,18407	21,0242	208,8182
ексцес	2105,071	2137,352	16157,42
асиметрія	-27,7326	-28,0464	126,7222



Рисунок(2.30) – Вихідні дані струмів на контактній мережі з розподіленими параметрами

Ділянка тягова мережа складається з таких елементів з зосередженими параметрами

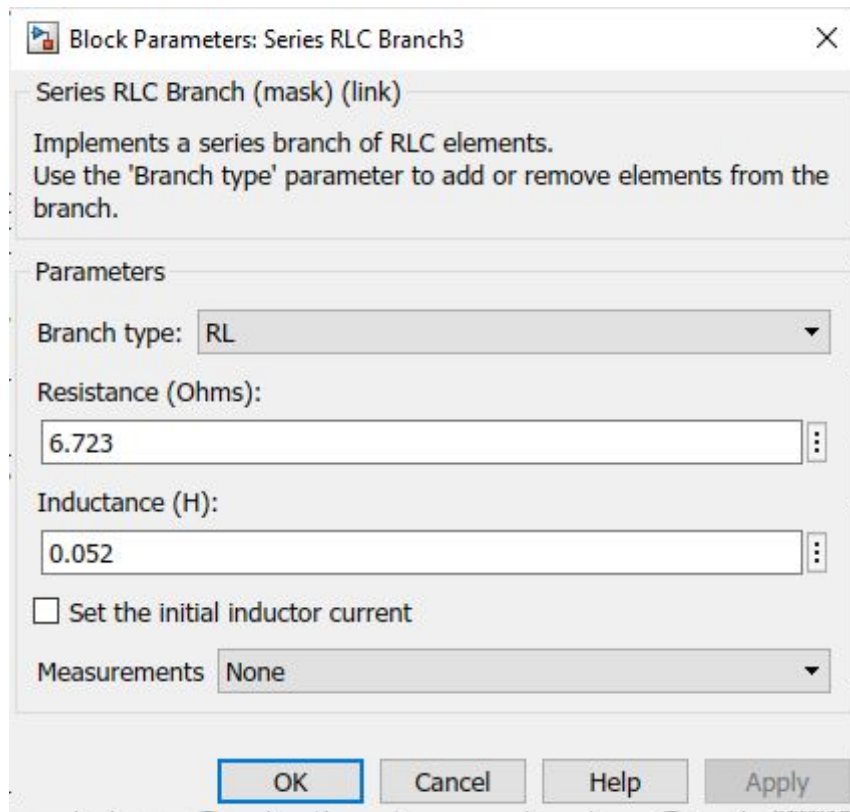


Рисунок(2.31) – Ділянки тягової мережі з зосередженими параметрами

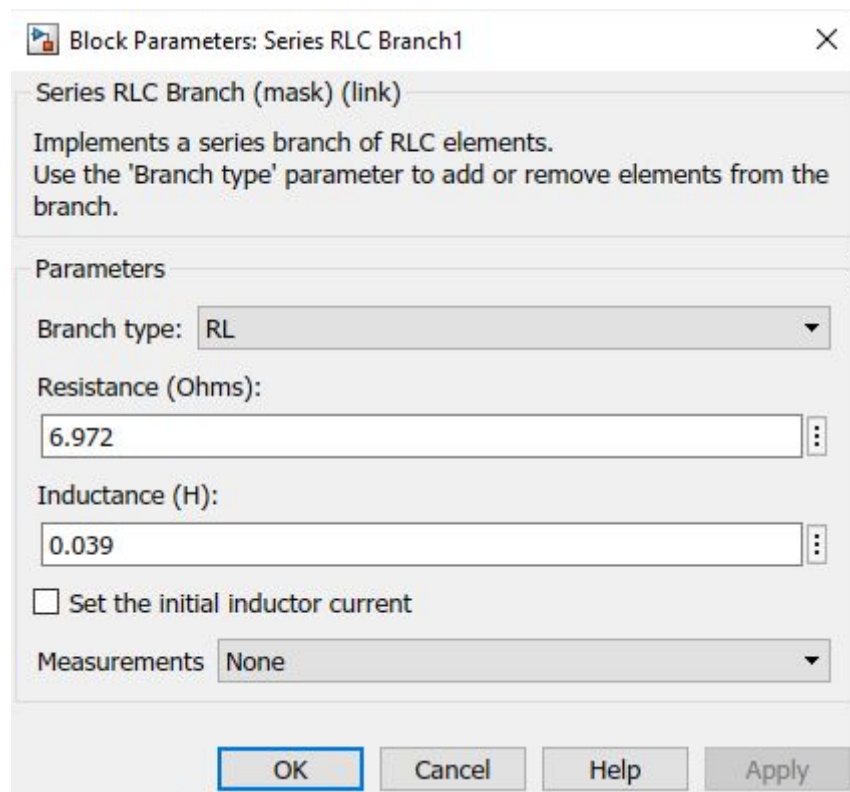
Для введення даних в тягову мережу з елементом (RLC)



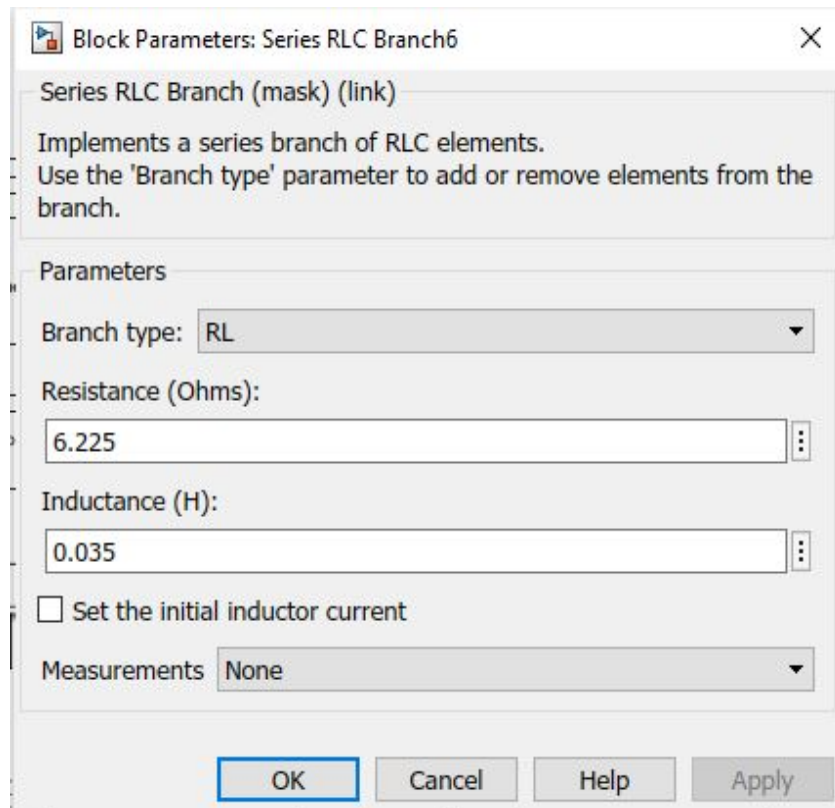
проаналізуємо властивості цього елемента, які показані на (рис. 2.32).



Рисунок(2.32) - Властивості цього елемента RLC на ділянці 27



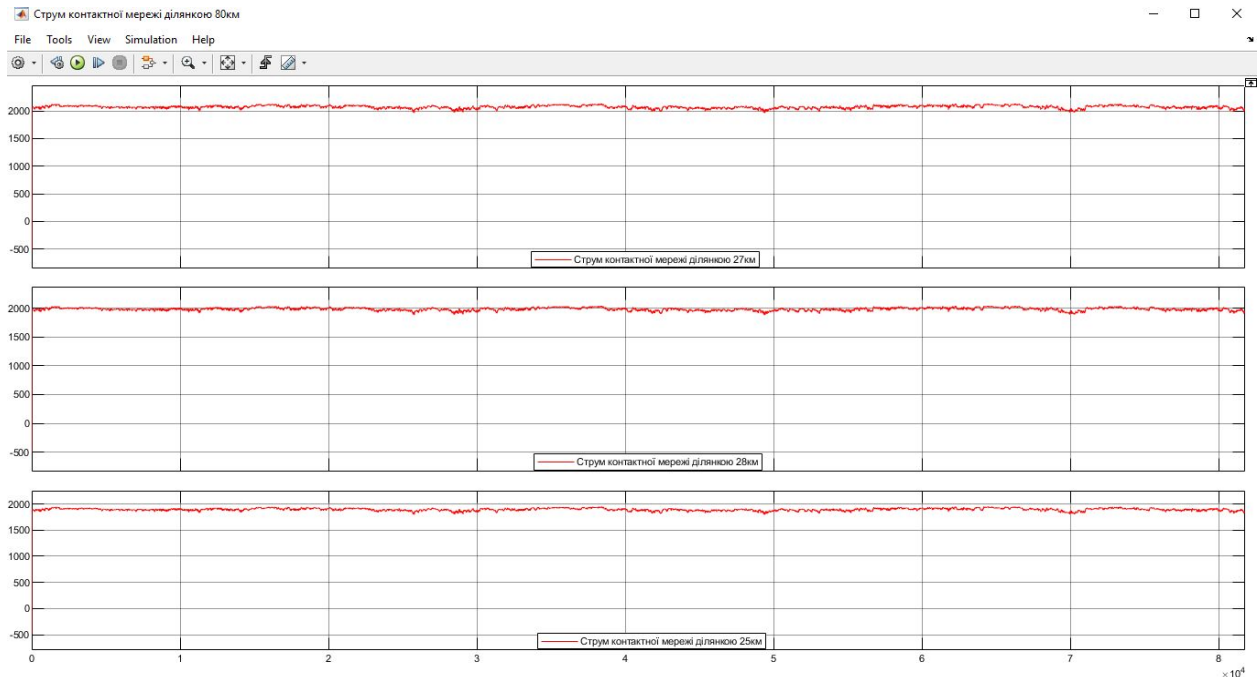
Рисунок(2.33) - Властивості цього елемента RLC на ділянці 28



Рисунок(2.34) - Властивості цього елементу RLC на ділянці 25

Таблиця № 2.5 - Розрахунок математичне очікування , дисперсія ,середньоквадратичне ексцес, асиметрія струм в контактної мережі з зосередженими параметрами в серидовищі Excel

Статичні дані	Ik1 A	Ik2 A	Ik3 A
математичне очікування	1471	1406	1344
дисперсія	562,575	515,2218	471,3101
середньоквадратичне	23,71866	22,6985	21,70968
ексцес	2212,838	2227,352	2245,549
асиметрія	-28,7764	-28,9166	-29,0906



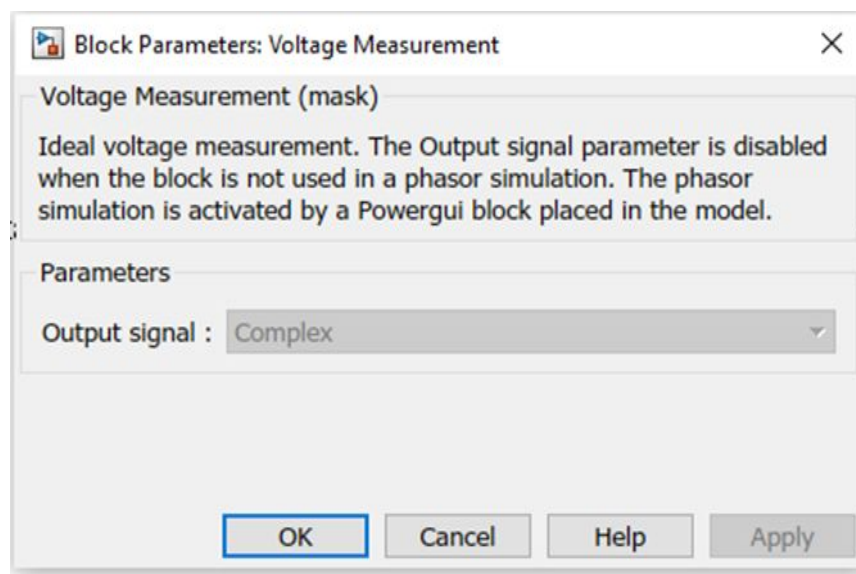
Рисунок(2.36) – Вихідні дані струмів на тягова мережа з зосередженими параметрами

2.5 Розрахунок спадів напруги на ділянках фідерної зони

За наругу на ділянках фідерної зони відповідає елемент (Voltage Measurement)



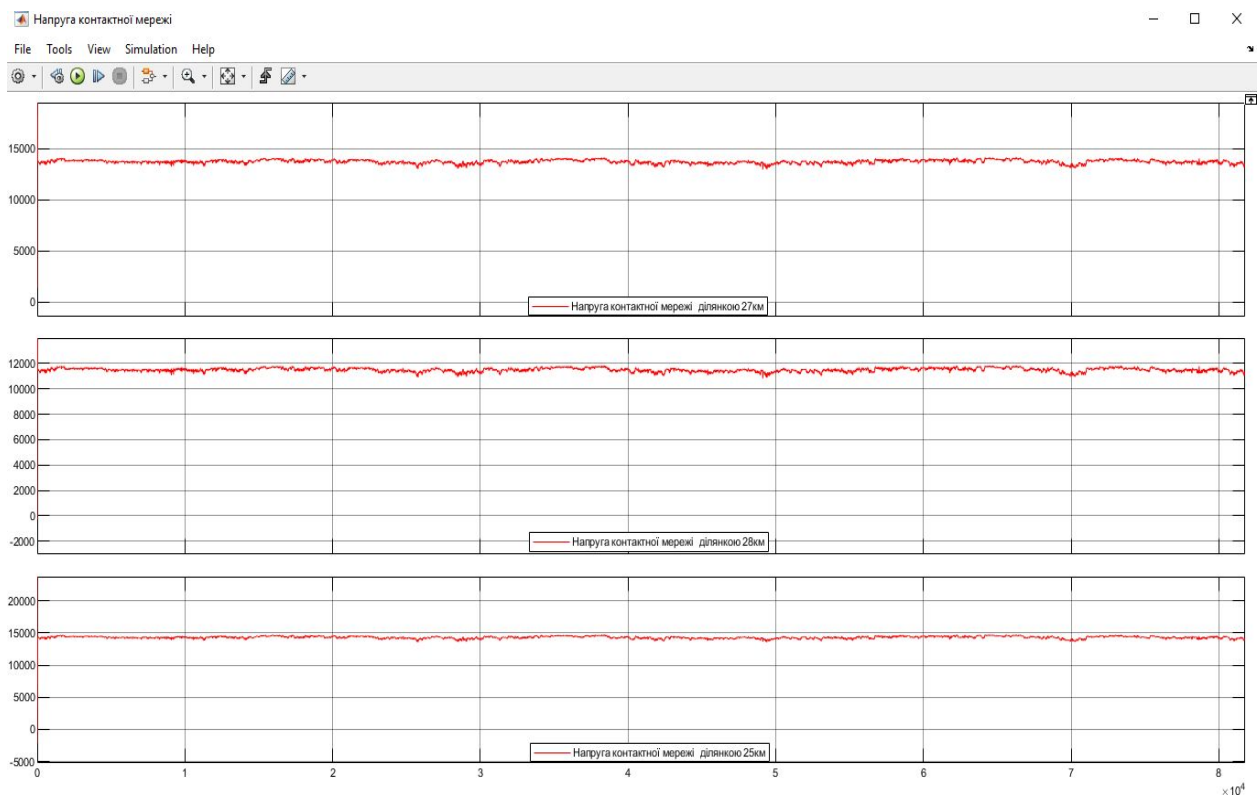
проаналізуємо властивості цього елемента, які показані на (рис. 2.37).



Рисунок(2.37)-Властивості цього елемента Voltage Measurement

Таблиця № 2.6 - Розрахунок математичне очікування , дисперсія ,середньоквадратичне ексцес, асиметрія напруга в контактній мережі з розподіленими параметрами в серидовищі Excel

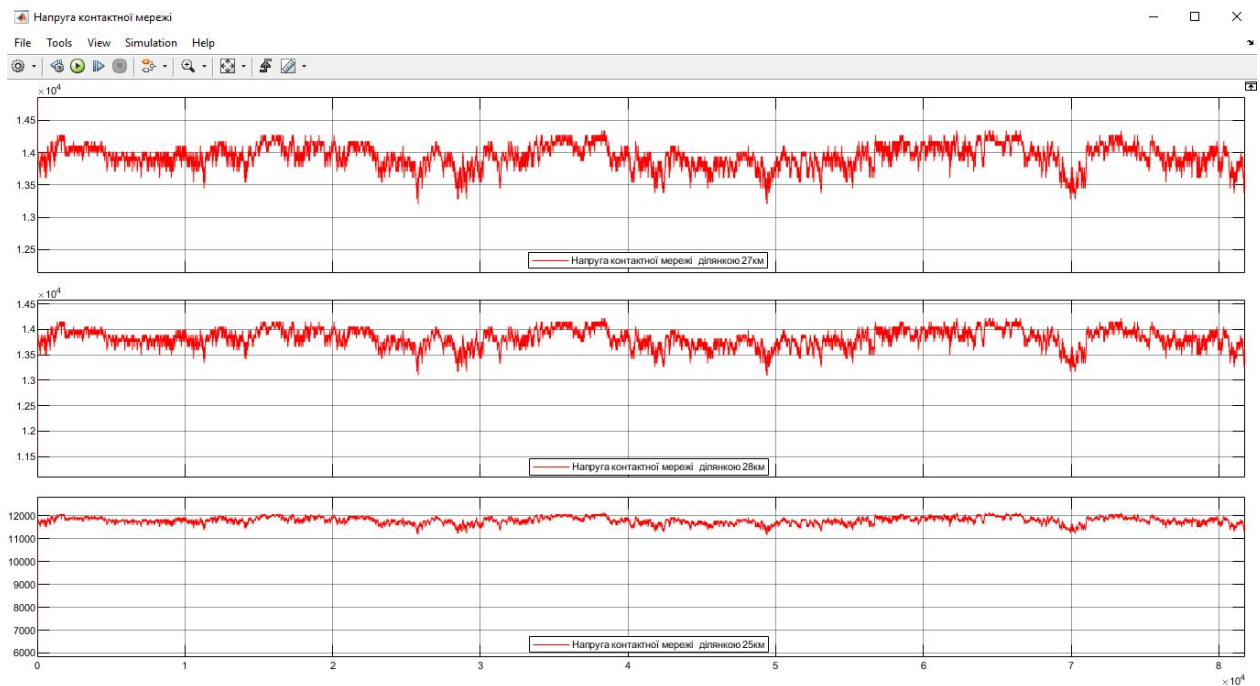
Статичні дані	Uk1 В	Uk2 В	Uk3 В
математичне очікування	10163	8160	9737
дисперсія	35208	15201,22	20329,32
середньоквадратичне	187,6379	123,2932	142,5809
ексцес	4382,917	1281,664	880,1497
асиметрія	47,47271	-19,2407	-14,62



Рисунок(2.39) – Вихідні дані струмів на тягова мережа з розподіленими параметрами

Таблиця № 2.7 - Розрахунок математичне очікування , дисперсія ,середньоквадратичне ексцес, асиметрія напруга в контактній мережі з зосередженими параметрами в серидовищі Excel

	Uk1 В	Uk2 В	Uk3 В
математичне очікування	8364	9806	9891
дисперсія	12352	15976,77	17969,05
середньоквадратичне	111.1395	126,3992	134,0487
ексцес	78,10468	2,00435	180,9028
асиметрія	-2,75845	-0,61918	3,953069



Рисунок(2.41) – Вихідні дані струмів на тягова мережа з зосередженими параметрами

3 Імітаційне моделювання електромагнітних процесів у фідерній зоні 4 поїзда і двостороннє живлення

3.1 Розрахункова схема та імітаційна модель у випадку руху 4-х поїздів

Провід типу МФ-100, несучий трос ПБСМ1-95 та рельс типу R 65.

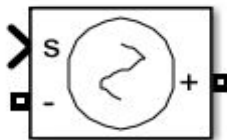
Отримаємо реальні значення тягового кола змінного струмі:

$$r_{a1} = 0,104 \text{ Ом}, \quad x_1 = 0,437 \text{ Ом}, \quad r_{12} = 0,045 \text{ Ом}, \quad x_{12} = 0,163 \text{ Ом}.$$

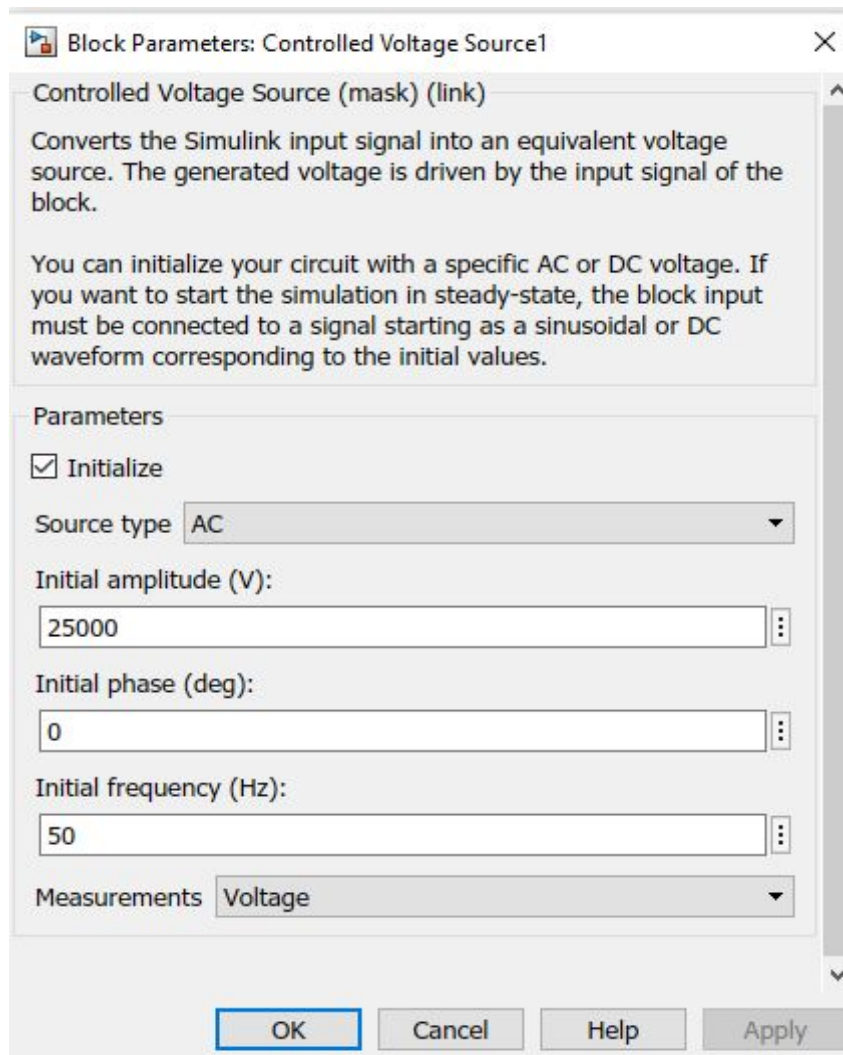
Ділянках з швидкісними поїздами застосовується система електричної тяги змінного струму 27,5 кВ, 50 Гц, то в цій роботі здійснено імітаційне моделювання процесів в таких ділянках при швидкості руху поїздів 200 км/год, з довжиною міжпідстанційної зони $l=80$ км. Суттєва схемотехнічна складність побудови ЕРС обумовила застосувати в цій роботі ідентифікаційну модель електровоза ЕД 4 у вигляді пасивного двополюсника з послідовним з'єднанням нелінійного резистивного елемента R та параметричної індуктивності L .

При моделюванні використали еквівалентні значення R і L і вони склали: для електровоза №1 $R_1=133,05$ Ом, $L_1=0,077$ Гн ; для електровоза №2 $R_1=281,2$ Ом, $L_1=0,22$ Гн

Для введення даних в тягову мережу з елементом (Controlled Voltage Source)



проаналізуємо властивості цього елемента, які показані на (рис. 3.1)

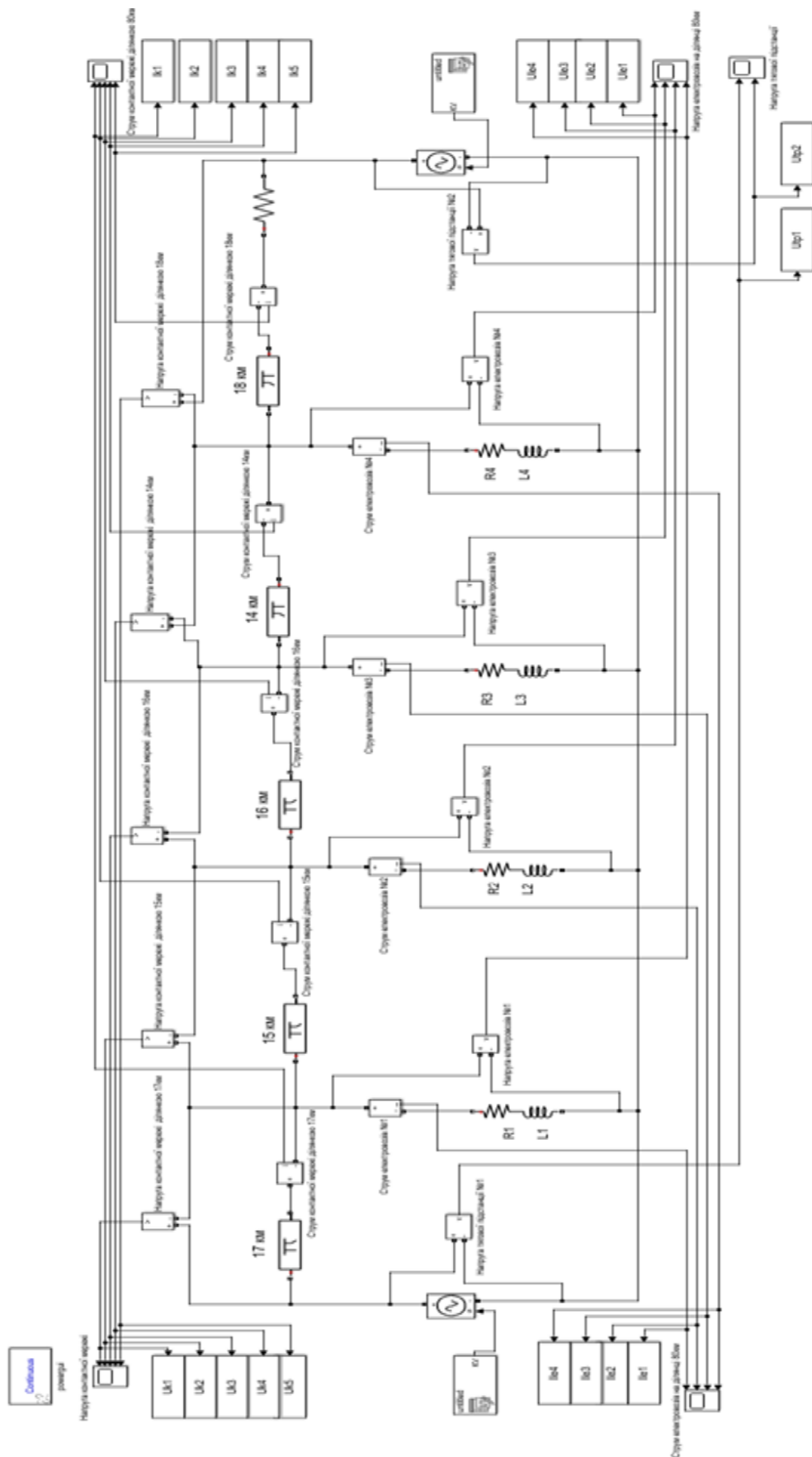


Рисунок(3.1)-Властивості цього елементу Controlled Voltage Source

Керований Вихідний блок Напруження перетворює вхідний сигнал Simulink в еквівалентний джерело напруги. Сгенероване напруга управляється вхідним сигналом блоку.

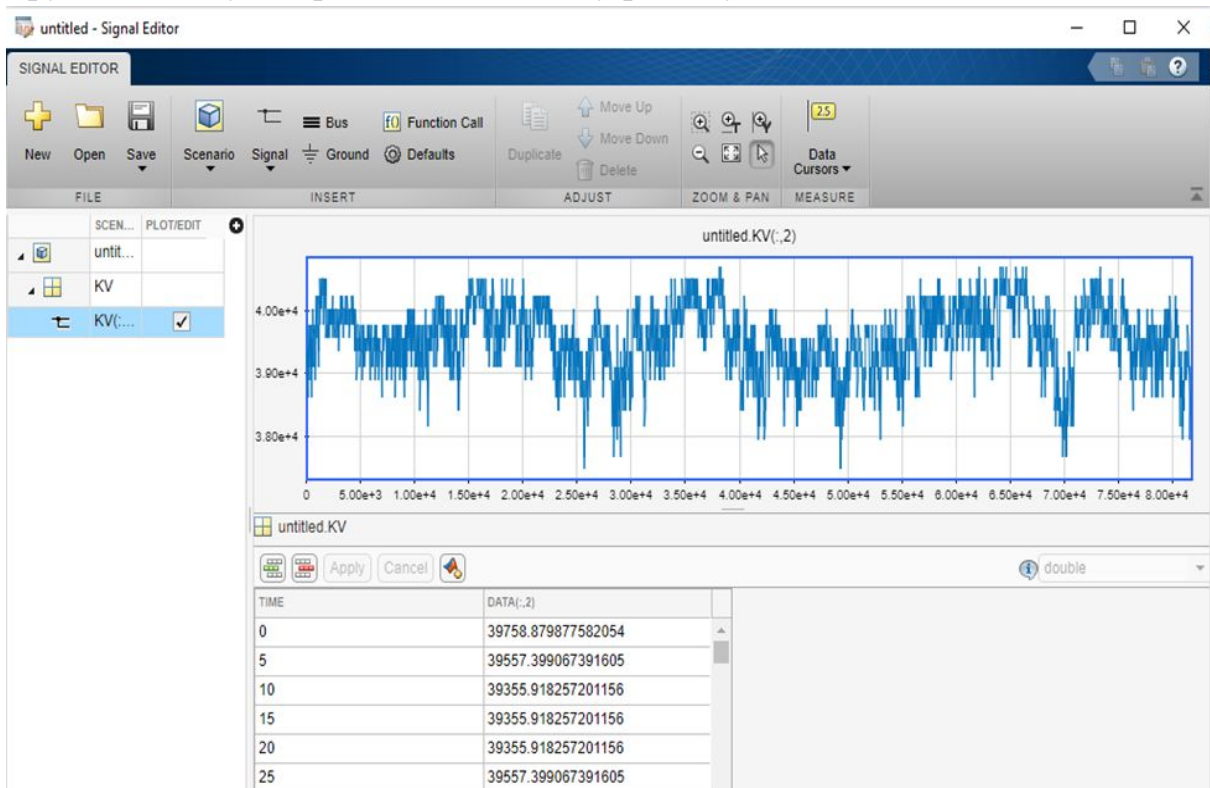
Можна форматувати Керований Вихідний блок Напруження певним АС або напругою постійного струму. Якщо ви хочете запустити симуляцію в стійкому стані, вхід Simulink повинен бути з'єднаний з сигналом, який починає симуляцію як синусоїдальна форма хвилі або форма хвилі DC, яка відповідає початковим значенням. Тип джерела напруги.

Виберіть АС (значення за замовчуванням), щоб ініціалізувати блок Controlled Voltage Source джерелом напруги змінного струму. Виберіть DC форматувати блок Controlled Voltage Source напругою постійного струму.



метрами

Для створення цієї схеми потрібно вернутись в розділ 2.1 і дотримуватися тих інструкцій, які були представлені в тому розділі.



Рисунок(3.3) – Вхідні дані детермінованих значення сигналу Signal Editor

Після запуску схеми, результати осцилографа будуть занесені до робочої області і їх можна буде занести до Microsoft Excel.

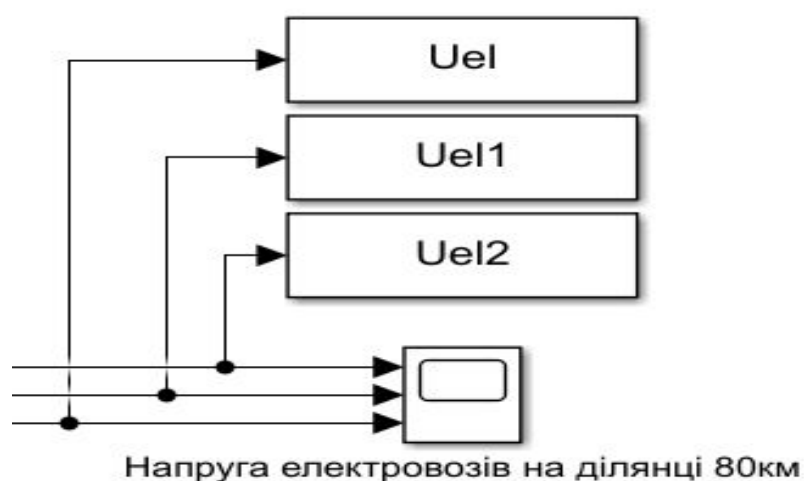


Рисунок 3.4 – Приклад підключення To Workspace до осцилографа

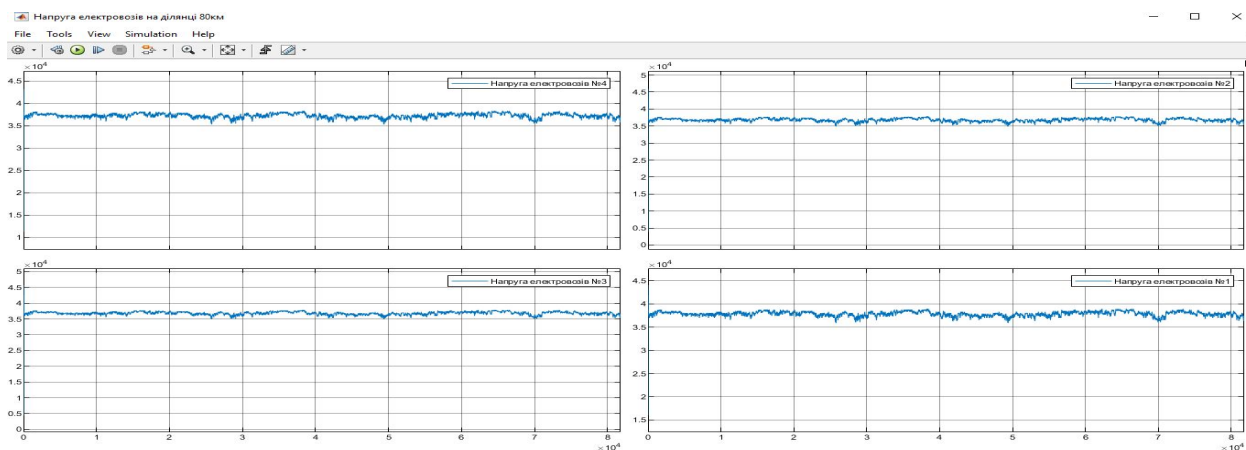
3.2 Результати моделювання величини напруги на струмоприймачах

При моделюванні використали еквівалентні значення R і L і вони склали: для електровоза №1 $R_1=133,05$ Ом, $L_1= 0,077$ Гн ; для електровоза №2 $R_1=281,2$ Ом, $L_1= 0,22$ Гн. А на других електровозах ми вставляєм такіж числові дані, як і на першому так і на другому електровозі.

Розрахунок математичне очікування , дисперсія , середньоквадратичні напругу на електровозах з розподіленими параметрами формули були представлені в розділі 2.2.

Таблиця № 3.1 – Розрахунок математичне очікування , дисперсія , середньоквадратичне ексцес, асиметрія напруга на електровозах з розподіленими параметрами в серидовищі Excel

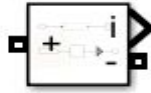
Статичні дані	Ule1 В	Ule2 В	Ule3 В	Ule4 В
математичне очікування	26450	26119	26110	26835
дисперсія	114950,6	112088,2	112011,5	118323,5
середньоквадратичне	339,0436	334,7958	334,6812	343,9819
ексцес	0,140364	0,141243	0,140992	0,139797
Асиметрія	-0,48438	-0,48446	-0,48432	-0,48425



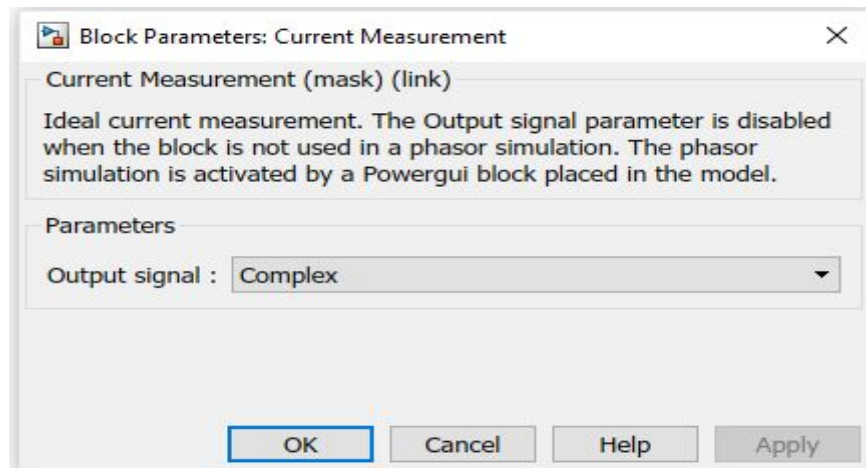
Рисунок(3.6) – Вихідні дані напруги на електровозі з розподіленими параметрами

3.3 Характер зміни та чисельний результат струмів електровозів

За струму на ділянках фідерної зони відповідає елемент (Current Measurement)



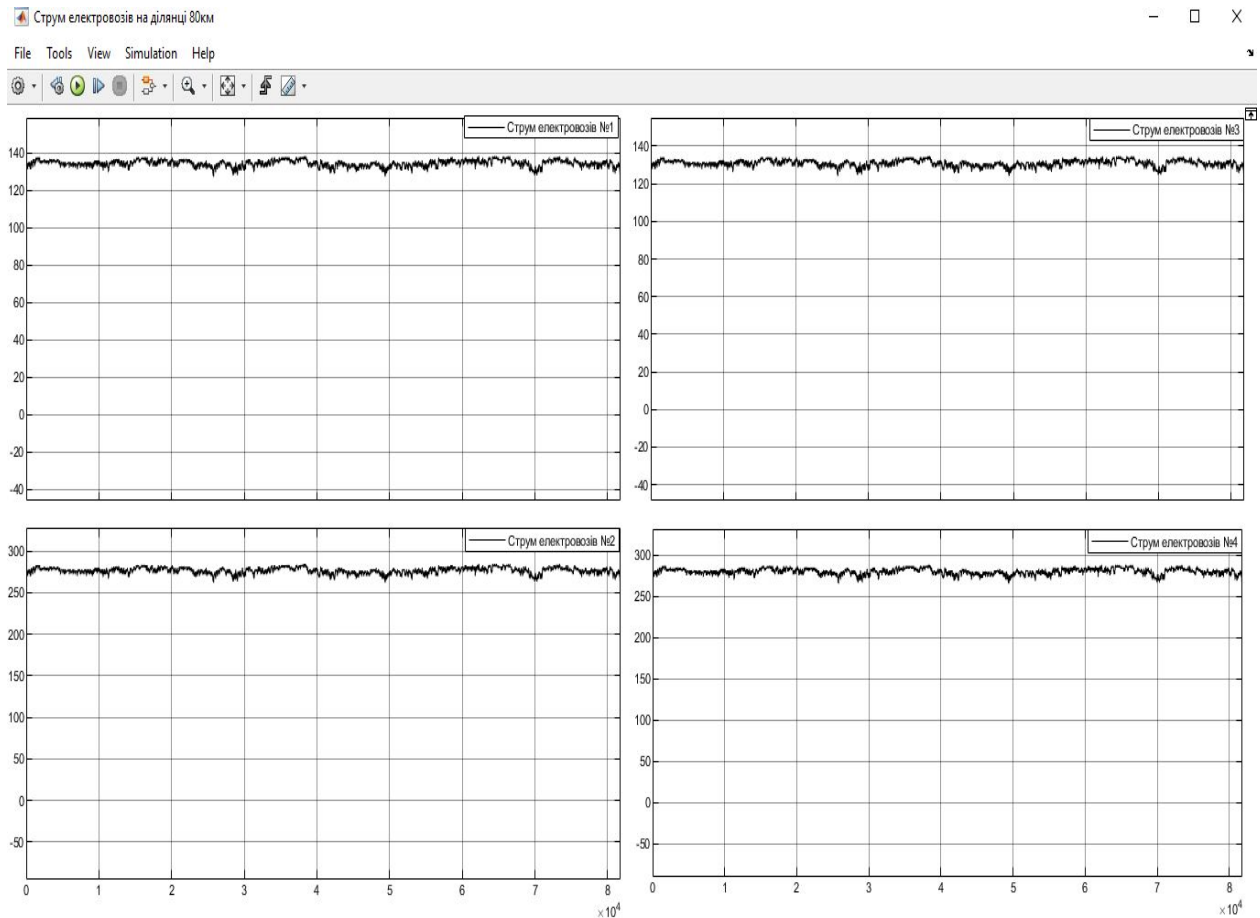
проаналізуємо властивості цього елемента, які показані на (рис. 3.7).



Рисунок(3.7)-Властивості цього елемента Current Measurement

Таблиця № 3.2 – Розрахунок математичне очікування , дисперсія ,середньоквадратичне ексцес, асиметрія струмів на електровозах з розподіленими параметрами в середовищі Excel

Статичні дані	Ile1 A	Ile2 A	Ile3 A	Ile4 A
математичне очікування	95	196	93	199
дисперсія	2,284886	9,6387	2,195334	9,781354
середньоквадратичне	1,511584	3,104626	1,481666	3,127516
ексцес	1951,382	1933,319	2056,803	1851,171
асиметрія	-26,2201	-26,0405	-27,2596	-25,2188



Рисунок(3.9) – Вихідні дані струмів на електровозі з розподіленими параметрами

3.4 Оцінка струмів на елементах ділянки ТМ

Провід типу МФ-100, несучий трос ПБСМ1-95 та рельс типу R 65.

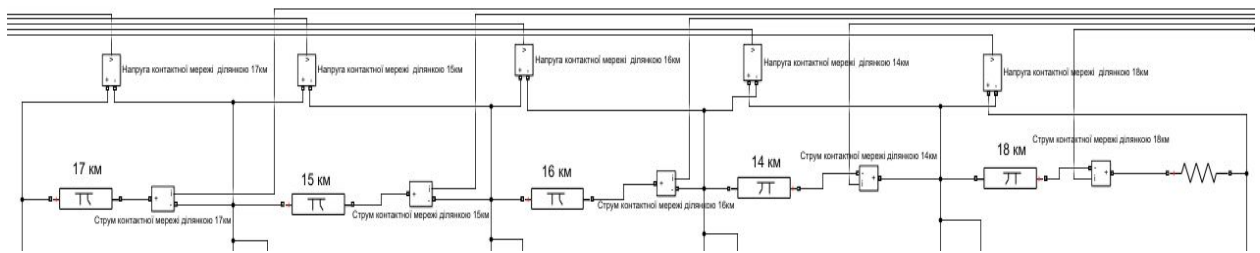
Отримаємо реальні значення тягового кола змінного струмі:

$$r_{a1} = 0,204 \text{ Ом}, \quad x_1 = 0,437 \text{ Ом}, \quad r_{12} = 0,045 \text{ Ом}, \quad x_{12} = 0,163 \text{ Ом}.$$

Для того щоб отримати реальні параметри тягового кола скористаємося наступними формулами:

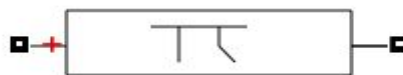
$$\begin{aligned} R_{a1} &= r_{a1}, \quad R_{12} = r_{12}; \\ L_1 &= x_1 / \omega, \quad L_{12} = x_{12} / \omega; \\ R_{\text{ТМ}} &= (R_{a1} + R_{12}) \cdot l, \\ L_{\text{ТМ}} &= (L_1 + L_{12}) \cdot l \end{aligned}$$

Ділянка тягова мережа складається з таких елементів з розподіленими параметрами



Рисунок(3.10) – Ділянки тягової мережі з розподіленими параметрами

Для введення даних в тягову мережу з елементом (Pi Section Line)



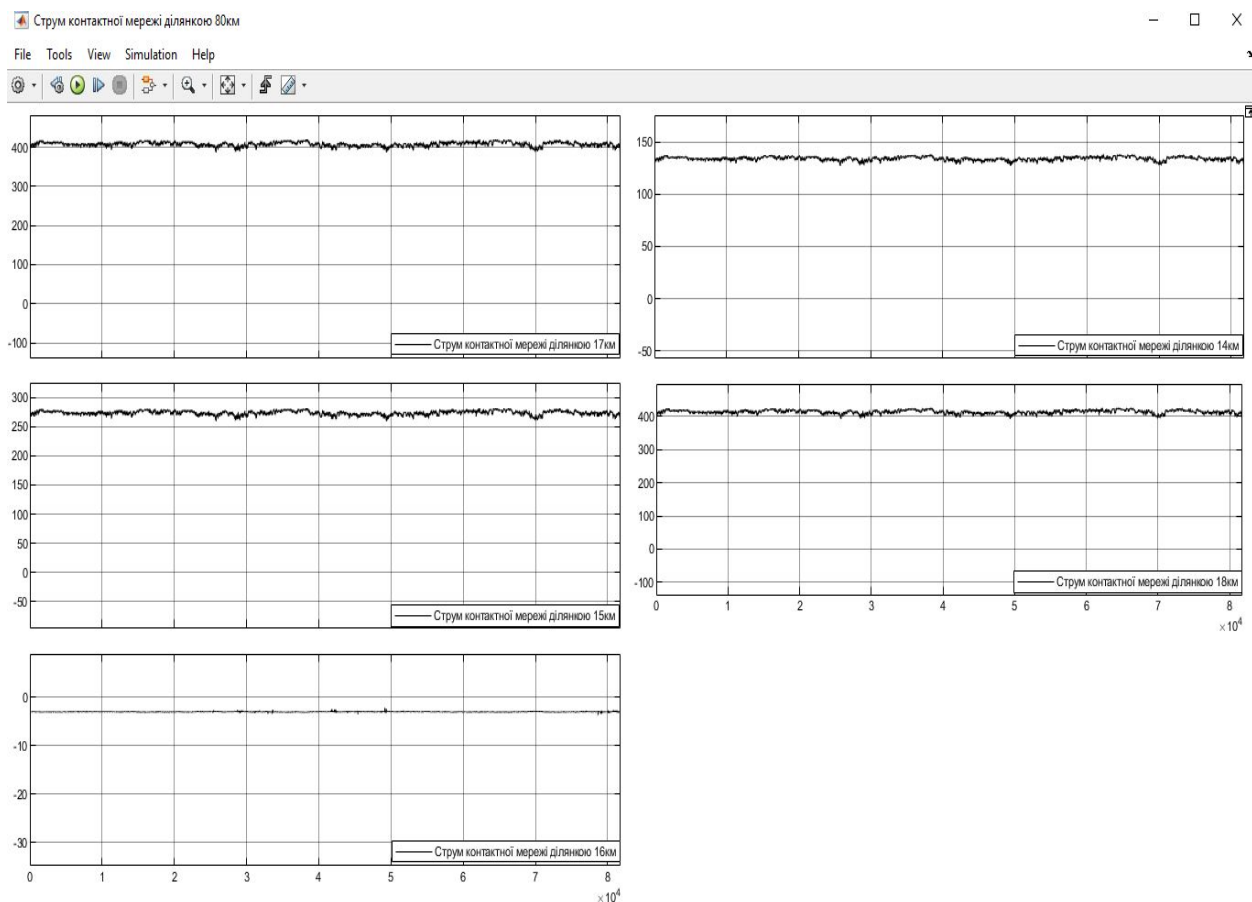
проаналізуємо властивості цього елемента, які показані на (рис. 3.11).

Рисунок(3.11)-Властивості цього елемента Pi Section Line

Таблиця № 3.3 - Розрахунок математичне очікування , дисперсія ,

середньоквадратичне ексцес, асиметрія струм в контактній мережі з розподіленими параметрами в серидовиші Excel

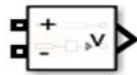
Статичні дані	Ik1 А	Ik2 А	Ik3 А	Ik4 А	Ik5 А
математичне очікування	290	194	-2	95	294
Дисперсія	21,03454	9,453554	0,00094	2,285814	21,52112
середньоквадратичне	4,586343	3,074663	0,03075	1,511891	4,639086
Ексцес	1952,714	1953,16	557,077	2014,697	1903,277
Асиметрія	-26,2333	-26,2376	10,5158	-26,8463	-25,7411



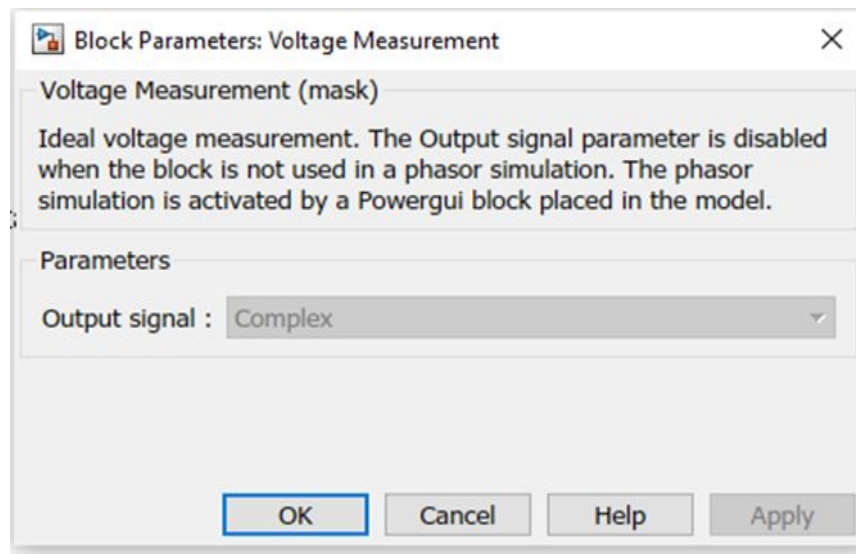
Рисунок(3.13) – Вихідні дані струмів на тягову мережу з розподіленими параметрами

3.5 Розрахунок спадів напруги на ділянках фідерної зони

За наругу на ділянках фідерної зони відповідає елемент (Voltage Measurement)



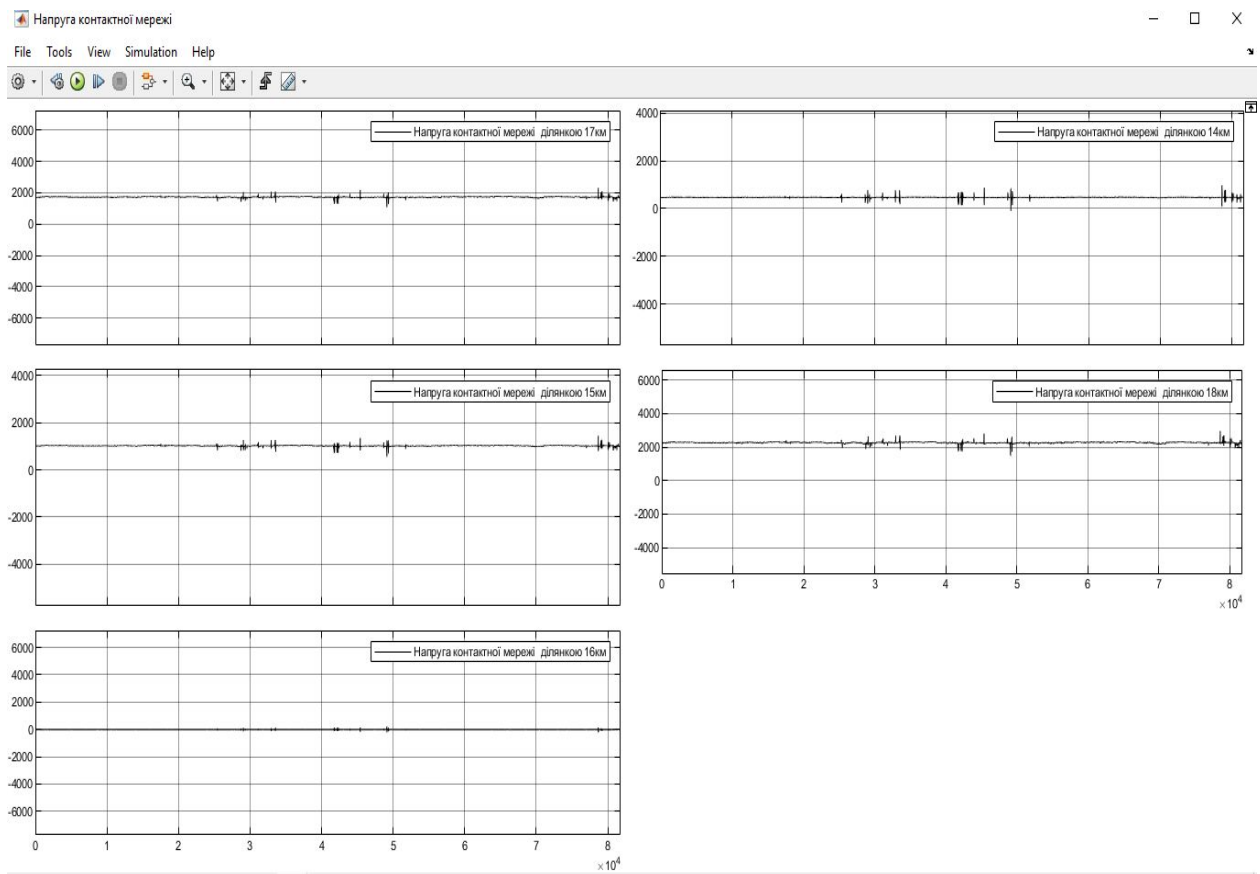
проаналізуємо властивості цього елементу, які показані на (рис. 2.35).



Рисунок(2.35)-Властивості цього елементу Voltage Measurement

Таблиця № 3.4 – Розрахунок математичне очікування , дисперсія , середньоквадратичне ексцес, асиметрія напруга в контактної мережі з розподіленими параметрами в середовищі Excel

Статичні дані	Uk1 В	Uk2 В	Uk3 В	Uk4 В	Uk5 В
математичне очікування	1225	725	-9	331	331
Дисперсія	255,4229	88,72788	0,498017	19,229	19,229
Середньоквадратичне	15,98196	9,419548	0,705703	4,385088	4,385088
Ексцес	1,133845	0,644714	12266,69	27,7504	27,7504
Асиметрія	-0,48246	-0,502899	-102,933	0,572714	0,572732



Рисунок(3.13) – Вихідні дані напруги на тягову мережу з розподіленими параметрами

Висновок

1. Приведено існуючі методи моделювання електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання та схеми живлення тягової мережі на фідерних зонах ділянки.

2. Розроблено і виконані чисельні розрахунки імітаційних моделей фідерних зон консольного типу з реальними даними, під час яких були проаналізовані результати, котрі свідчать про працездатність схем. Однак для більш точних розрахунків потрібно дізнаватись безпосередньо максимальне й мінімальне значення напруги у диспетчера підстанції, яку бажаєте змодельовати. Опираючись на ці значення, створювати дані за допомогою генератора випадкових величин.

3. Розроблено і виконані чисельні розрахунки імітаційне моделювання електромагнітних процесів в тяговій мережі з розподіленими параметрами фідерних зон та порівняно з зосередженою схемою.

4. Вивчено оцінку імовірнісних характеристик фідерних струмів і струморозподілу між поїздами і тяговою мережею з врахуванням випадкового характеру напруги.

5. Проаналізувавши метод імітаційного моделювання, можна зробити висновок, що завдяки цьому методу можливо відтворити реальні виміри і режими роботи імітуючи їх.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Раціональні режими роботи тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Лисенко Олександра Геннадіївна ; Держ. ВНЗ "Нац. гірн. ун-т". - Дніпропетровськ, 2015.
2. Сиченко В.Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій меркжі постійного струму [Текст] УДК 621.331:621.311 (ДІТ) 2011.
3. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режимилінійних електричних кіл із зосередженими та розподіле-ними параметрами : підручник / Ю.О.Карпов, С.Ш.Ка-цив, В.В.Кухарчук, Ю.Г.Ведміцький ; під ред. проф. Ю.О.Карпова – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 377 с.
4. Системи електропостачання електричного рухомого складу залізниць і метрополітенів [Текст] : підручник/ С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, М. М. Бабаєв та ін. –Харків: УкрДУЗТ, 2018.
5. Босий Д.О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових пітстанціях змінного струм. [Текст] УДК 621.331 (ДІТ) 2008
6. Т.М. Міщенко, А.І. Кійко (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)
Математичне моделювання перехідних процесів в системі змінного струму «тягова мережа – електровоз». 1. Вмикання силового трансформатора електровоза в режимі холостого ходу; оцінка параметрів // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізничн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Д., 2011. — Вип. 36.
7. Т.М. Міщенко, (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна).
Математичне моделювання перехідних процесів у системі змінного струму «тягова мережа – електровоз». 2. Вмикання силового трансформатора електровоза в режимі холостого ходу; визначення і аналіз кидка струму намагнічування/ Т. М. Міщенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізничн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Д., 2011. — Вип. 37.
8. Автор – Тирсовий Р.П., Таптунов Д.О. , Чіпак О.М., Науковий керевник – д.т.н., Міщенко Т.М. Моделювання випадкових електромагнітних процесів перетворення електроенергії на тяговій підстанції змінного струму / Х Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель , 26-27 листопада 2020 р.) : Ч.5 / «МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»; «БЕЛОРУССКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА»; УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ: «БЕЛАРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА» під заг. Ред. Ю. І. Кулаженко – Гомель : БелГУТ. 2020. – 229 с. ISBN 978-985-554-946-9 (ч. 5)