

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Дніпровський національний університет**  
**залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна**

---

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

\_\_\_\_\_ Сиченко В.Г.  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття ОС «магістр»

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

Тема: **Моделювання випадкових електромагнітних процесів перетворення електроенергії на тяговій підстанції змінного струму**

Theme: **Simulation of random electromagnetic processes of electricity conversion at an AC traction substation.**

Керівник дипломної роботи:

доцент

(посада)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Т.М. Міщенко

(ПІБ)

Нормоконтролер:

доцент

(посада)

\_\_\_\_\_ (підпис)

В.М. Ляшук

(ПІБ)

Виконавець, студент групи:

ЕС 1926

\_\_\_\_\_ (підпис)

Д.О. Таптунов

(ПІБ)

Student:

Tapunov Dmytro

(Family name)

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 1926 Таптунов Дмитро Олександрович

1. Тема дипломної роботи: «Моделювання випадкових електромагнітних процесів перетворення електроенергії на тяговій підстанції змінного струму» затверджена наказом по університету від « 17 » 01 2020 р. № 53
2. Термін подання студентом закінченої роботи « 07 » грудня 2020 р.
3. Вихідні дані до дипломної роботи: стохастичні та детерміновані значення параметрів трансформатора.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): Тягова підстанція як електроустановка для перетворення електротягової енергії, математичне моделювання електромагнітних процесів в електричних колах ТП з трьох фазними понижувальними трансформаторами, математичне моделювання електромагнітної процесів в колах ТП з однофазними понижувальними трансформаторами.
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	Тягова підстанція як електроустановка для перетворення електротягової енергії.	21.10.2020	25
3	Математичне моделювання електромагнітних процесів в електричних колах ТП з трьох фазними понижувальними трансформаторами	11.11.2020	30
4	Математичне моделювання електромагнітних процесів в колах ТП з однофазними понижувальними трансформаторами	25.11.2020	30
5	Висновки та список використаної літератури	03.12.2020	10

Дата видачі завдання: « 20 » січня 2020 р.

Керівник дипломного проекту: к.т.н. \_\_\_\_\_ Т.М. Міщенко  
(підпис)

Завдання прийняв до виконання: студент \_\_\_\_\_ Д.О. Таптунов  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської роботи на тему «Моделювання випадкових електромагнітних процесів перетворення електроенергії на тяговій підстанції змінного струму», представлена на 60 сторінках основного тексту та містить 6 використаних джерел, 55 рисунків та 1 таблицю.

Мета роботи – є розробка в середовищі «Matlab Simulink» моделювання тягової підстанції змінного струму з трифазним та однофазними трансформаторами струму і напруги, дослідження процесів, які будуть супроводжувати це моделювання.

В першому розділі теоретичні відомості про тягові підстанції змінного струму, їх характеристики, види і склад.

В другому розділі теоретичні передумови та результати створення імітаційної моделі тягової підстанції струму з трифазним силовим трансформатором, відповідними навантаженнями та джерелом детермінованих значень первинної напруги. Також розрахунки та результати даного дослідження.

Третій розділ містить теоретичні передумови та результати створення імітаційної моделі тягової підстанції струму з однофазними трансформаторами напруги і струму. Як і в другому розділі, розрахунки та результати даного моделювання.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ТЯГОВА ПІДСТАНЦІЯ, ДЕТЕРМІНОВАНІ ЗНАЧЕННЯ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, НАПРУГА, МОДЕЛЮВАННЯ У ЧАСІ, МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ, СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ НАПРУГИ, ЗМІННИЙ СТРУМ.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Тягова підстанція, як електроустановка для перетворення електротягової енергії.....	9
1.1 Склад та можливі схеми живлення ТП змінного струму.....	9
1.2 Необхідність використання і поняття випадкових процесів, що діють в ТП.....	13
1.3 Імовірісно-статистична обробка процесу первинної напруги (в точках приєднання).....	15
1.4 Існуючі методи моделювання випадкових електромагнітних процесів.....	18
2. Математичне моделювання електромагнітних процесів в електричних колах ТП з трифазними понижувальними трансформаторами.....	22
2.1 Імітаційна модель трифазного трансформатора.....	22
2.2 Розрахункова схема і модель ТП з подвійною трансформацією первинної напруги.....	29
2.3 Чисельні розрахунки напруги на шинах ТП при детермінованій напрузі в точках приєднання кВ.....	110 36
2.4 Оцінка імовірнісних характеристик трифазного трансформатора (математичних очікувань і дисперсії) напруги на шинах ТП.....	43
3. Математичне моделювання процесів в колах ТП з однофазними понижувальними трансформаторами.....	45
3.1 Імітаційна модель однофазного трансформатора.....	45
3.2 Розрахункова схема і модель ТП з подвійною трансформацією первинної напруги однофазних трансформаторів.....	49
3.3 Чисельні розрахунки напруги на вторинних обмотках ТС і ТН при напрузі 110 кВ в точках приєднання.....	51

02.15.ЕС-1926.РД.2020-ПЗ							
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Таптунов Д.О.				Моделювання випадкових електромагнітних процесів перетворення електроенергії на тяговій підстанції змінного струму.	Літ.	Арк.
Перевір.	Міщенко Т.М.						Архивів
Н. Контр.	Ляшук В.М.					PAGE 60	
Консультант						ДНУЗТ \* ім. ак.	
Затверд.	Босий Л.О.					Лазарян MERCE. група	

3.4 Оцінка імовірнісних характеристик (математичних очікувань і дисперсії) однофазних трансформаторів напруги та струму вторинних обмоток.....	55
Висновок.....	59
Список бібліографічних джерел.....	60

					02.15.ЕС-1926.РД.2020-ПЗ		
Змн	Лист	№ докум	Підпис	Дата			
Розроб.	Таптунов Д.О.				Моделювання випадкових електромагнітних процесів перетворення електроенергії на тяговій підстанції змінного струму.	Літ.	Арк.
Перевір.	Міщенко Т.М.						6
Н. Контр.	Ляшук В.М.					ДНУЗТ	ім.
Консультант						Лазаряна.	ІСЕ.
Затверд.	Босий Л.О.					ак.	група
						60	

## ВСТУП

На сьогоднішній час імітаційне дослідження та математичне моделювання електричних підстанцій та систем тягового електропостачання (СТЕ) має актуальність та економічність. Математичним моделюванням розглянуто перехідні електромагнітні процеси при перетворенні електричної енергії тягової підстанції змінного струму. При цьому враховувалась детерміновані (стохастичні) параметри, вилучені з технічної документації.

**Актуальність роботи.** Математичне моделювання має велику перевагу над іншими методами (аналітичним, чисельним та іншими) тому, що при цьому дослідженні можна враховувати всі нюанси, котрі потрібно дослідити при поставленому певному питанню. Наприклад можливо вводити різні значення та параметри системи без шкоди для обладнання, тобто без фінансових втрат.

**Мета і завдання роботи.** Розробка в середовищі «Matlab Simulink» моделювання тягової підстанції змінного струму з трифазним та однофазними трансформаторами струму і напруги, дослідження процесів, які будуть супроводжувати це моделювання.

**Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.** Вперше з урахуванням випадкового характеру зміни первинної напруги докладно досліджено процеси перетворення електричної енергії на тяговій підстанції змінного струму.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблено моделі для розрахунку і оцінки параметрів трансформаторів в умовах «реальних» значень первинної напруги.

**Особистий внесок здобувача.** Розробка математичних моделей ТП змінного струму, визначення параметрів для імітаційної моделі, виконання розрахунків напруги та струмів тягової підстанції, створення більш детальної інструкції по внеску детермінованих даних в модель.

**Публікації.** Автор – Таптунов Д.О., Тирсовий Р.П., Чіпак О.М., Науковий керівник – к.т.н., доц. 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: «БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА» під заг. ред. Ю. І. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ. 2020. – 229 с. ISBN 978-985-554-946-9 (ч. 5)

# **1 ТЯГОВА ПІДСТАНЦІЯ, ЯК ЕЛЕКТРОУСТАНОВКА ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОТЯГОВОЇ ЕНЕРГІЇ**

## **1.1 Склад та можливі схеми живлення ТП змінного струму**

На електростанціях генераторами виробляється трифазний змінний струм промислової частоти 50 Гц напругою 10 кВ і вище та подається на підвищувальні підстанції. Змінний струм підвищеної напруги 35; 110 кВ та вище по лінії електропередачі (ЛЕП) передається до споживачів через трансформатори понижуючої підстанції, понижуюча напруга до 10 кВ. Трансформатори понижуючої підстанції знижують напругу до 380/220 В. Від шин понижувальної напруги надходить до споживачів. Споживачі живляться від шин електростанції через понижуючу підстанцію. Сукупність повітряних та кабельних ліній електропередачі і підстанцій, працюючих на певній території називаються електричною мережею.

Підстанція – електроустановка, призначена для приймання, перетворення та розподілу електричної енергії, складена з трансформаторів чи інших перетворювачів електричної енергії, розподільних та керуючих установок і допоміжних пристроїв. Підстанції бувають підвищувальні та понижуючі.

Підвищувальні підстанції споруджують зазвичай при електростанціях. Вони слугують для зв'язку електростанцій з електричною системою та передачі електроенергії до споживачів високої напруги.

Понижуючі підстанції призначені для перетворення напруги живлячої мережі в більш низьку напругу, при котрій електрична енергія передається споживачам, які приєднанні к даній підстанції. Вони бувають з однією вторинною напругою 10 (35) кВ і двома вторинними напругами 10 (11) і 35 (38,5) кВ. На перших встановлюють двох обмотковий трансформатор, а на других - трьох обмотковий. Напругу 35 кВ використовують для живлення віддалених від підстанції споживачів, а напруга 10 кВ для живлення споживачів, які знаходяться поблизу підстанції.

До складу ТП як змінного, так і постійного струму можуть входити апарати та електричні пристрої від будь-якого виробника. Так наприклад Рівненський завод високовольтної апаратури (РЗВА) - найбільше підприємство з виробництва високовольтної комутаційної апаратури від 6 до 110 кВ в Україні.

На основі сучасної технології з використанням комплектуючих виробів концерну АББ і інших фірм РЗВА виробляє високоякісні економічні в експлуатації апарати на напругу від 6 до 110 кВ.

ВРП 110, 35 кВ виконано з уніфікованих для всієї мережі схем транспортабельних блоків заводського виготовлення, що складаються з металевих опорних конструкцій, на яких змонтовані апарати високої напруги, елементи ошиновування, а також елементи допоміжних ланцюгів. Металоконструкція блоків забезпечує зручність обслуговування апаратів і дозволяє виконувати транспортування блоків пакетами. Блоки встановлюються на залізобетонних лежнях або заглиблених фундаментах.

Для ВРП 110 або 35 кВ застосовується жорстка ошиновка труб алюмінієвого сплаву діаметром 60х3 або 80х3 мм і гнучка ошиновка із сталевих дроту марок АС-95/16, 120/19, 300/48 і т.д.

Конструкція вузлів кріплення жорстких шин забезпечує компенсацію температурних змін їх довжини, можливих неточностей в установці блоків, а також зсув блоків, що виникає внаслідок деформації ґрунту в процесі експлуатації.

Слід підкреслити, що сучасні електричні підстанції змінного струму складаються з блочних комплексних розподільчих пристроїв, маркування яких залежить від місця встановлення та напруги КРП(Б)Х-Х1, де Х – це закритий чи відкритий розподільчий пристрій (З або В відповідно) та Х1 – це напруга КРП (110; 35; 27,5; 10; 3,3).

В свою чергу ТП містить в собі роз'єднувачі, заземлення, вимикачі, трансформатори (струму, напруги та силові), ОПН, розрядники і т. д. Наочно, на прикладі підстанції ЕЧЕ-27 Одеської залізниці, з якої було вилучено технічну

документацію для цієї роботи, можливо оглянути обладнання, яке входить до складу тягових підстанцій змінного струму (Рис. 1.1). Дану однолінійну схему було вилучено для подальшого математичного моделювання, яке досліджується в цій магістерській роботі.

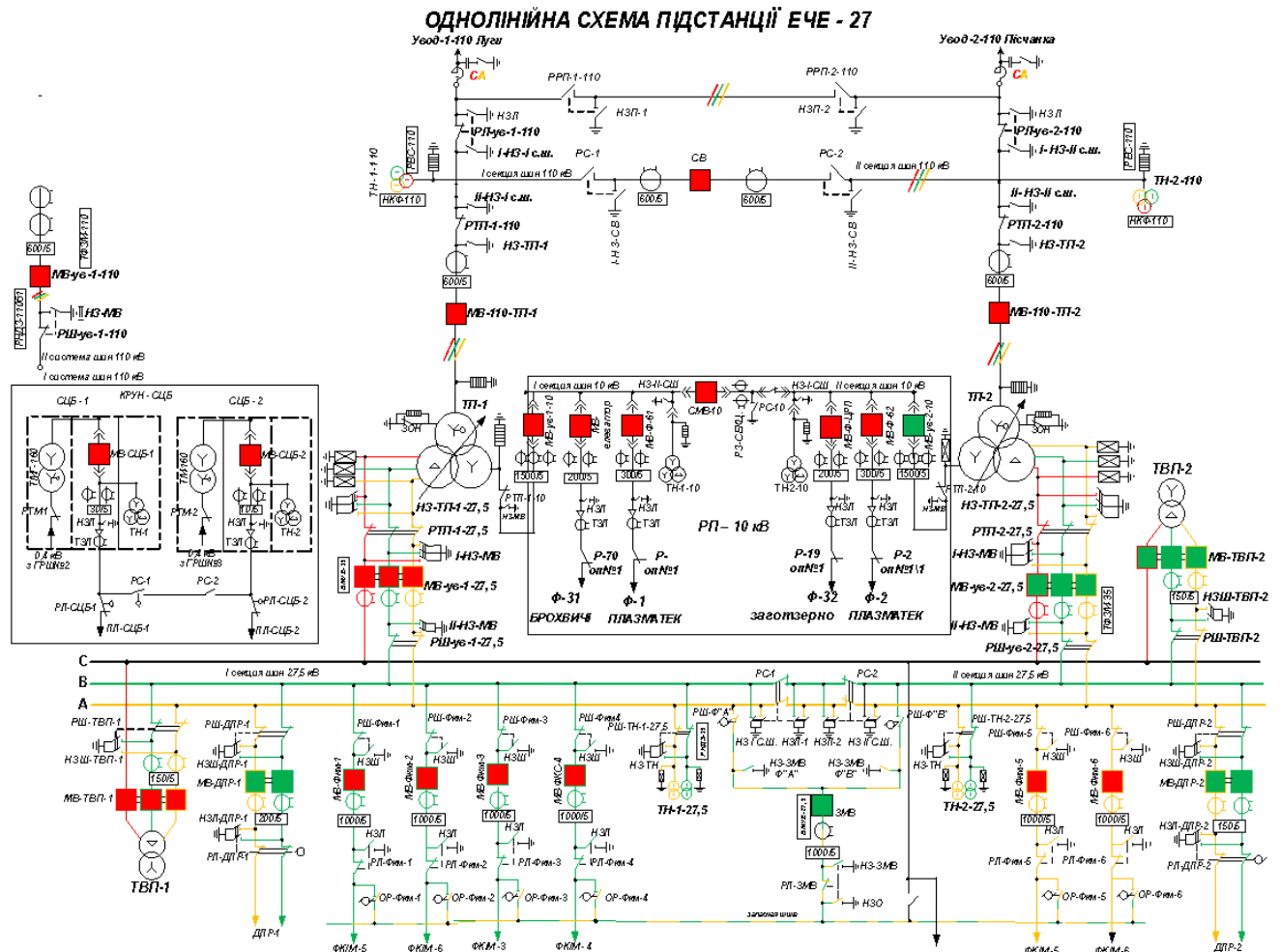


Рисунок 1.1 – Склад ТП змінного струму Одеської залізниці (ЕЧЕ-27)

Слід відмітити, що від схем зовнішнього електропостачання залежить приєднання підстанцій, вони бувають: опорні, транзитні, тупикові та «на відпайках». На структурній схемі можливо розглянути приєднання цих підстанцій до ЛЕП (Рис. 1.2).

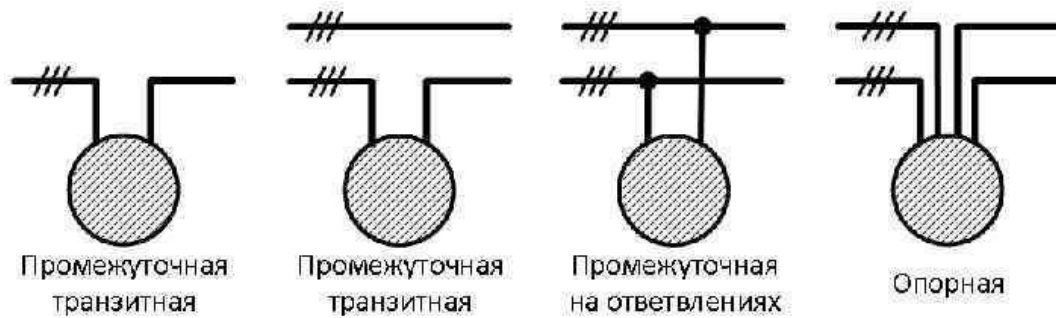


Рисунок 1.2 – Структурна схема зовнішнього електропостачання ТП

Далі необхідно розглянути можливі схеми внутрішнього характеру, тобто, як безпосередньо отримує живлення тягова мережа змінного струму. З кожним днем інженери розробляють більш досконалішу систему тягового електропостачання, а слід відмітити, що на сьогоднішній день в Україні (та в країнах СНГ) найчастіше використовуються системи постачання з напругами номіналом 27,5 кВ (ДПР) та 2х25 кВ (АТ) (Рис. 1.3 та Рис. 1.4).

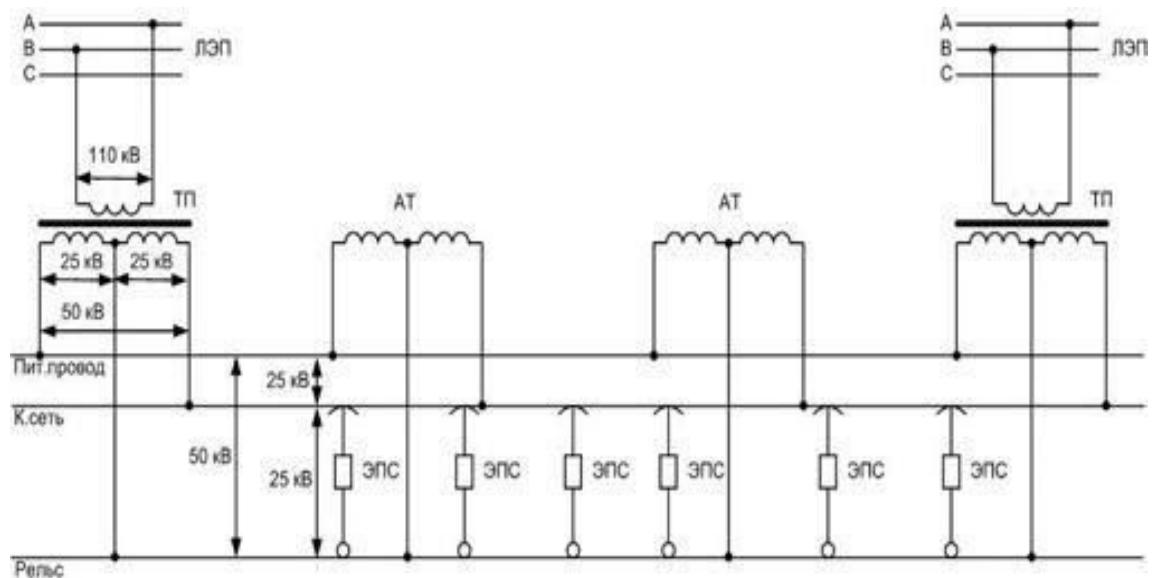
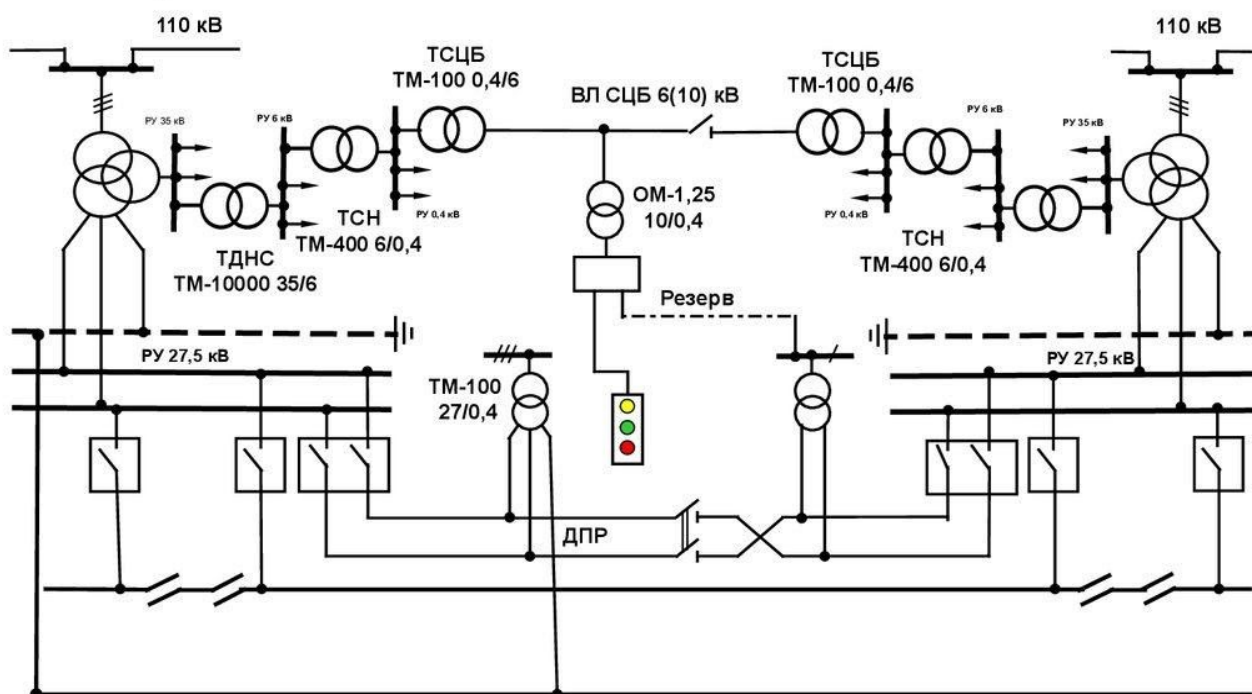


Рисунок 1.3 – Загальна схема живлення СТЕ 2х25 кВ

### Тяговая подстанция



### Тяговая подстанция

## 1.2 Необхідність використання і поняття випадкових процесів, що діють в ТП

В ЕЕС та в свою чергу на тягових підстанціях розрізняють **нормальні** та **аварійні** перехідні процеси.

**Нормальні** перехідні процеси супроводжують поточну експлуатацію ТП, так як виникають при звичайних експлуатаційних операціях - включення і відключення трансформаторів, окремих ЛЕП, нормальних експлуатаційних змін схеми системи, включення і відключення окремих генераторів і навантажень або зміни їх потужності.

**Аварійні** перехідні процеси виникають внаслідок різких і істотних змін параметрів системи або режиму - при КЗ і їх відключенні, при аварійній зміні схеми з'єднання ЕЕС або ТП, аварійному відключенні генераторів, ЛЕП і т. п.

З вище сказаного можна перелічити найчастіші причини виникнення перехідних процесів в ЕЕС:

1) Включення/відключення ЛЕП, трансформаторів, автотрансформаторів та інші крупні приймачі електроенергії;

2) КЗ в системі;

3) Відключення або обрив однієї або двох фаз;

4) Несинхронне включення синхронних машин;

Необхідно підкреслити саме важкі порушення нормальної роботи ТП, вони викликаються короткими замиканнями (КЗ).

**Коротким замиканням** називають не передбачене нормальними умовами роботи замикання між фазами, замикання однієї або декількох фаз на землю (або на нульовий провід). В тягових підстанціях спостерігаються КЗ в силових трансформаторах (тягових), безпосередньо в тяговій мережі (обрив КП і т.п.) та на шинах ТП. Коротке замикання, в свою чергу, є результатом порушення ізоляції електрообладнання. Порушення ізоляції викликаються:

а) перенапруження (особливо в мережах з ізольованими нейтралями);

б) прямими ударами блискавки;

в) старінням ізоляції;

г) механічними ушкодженнями ізоляції, проїздом під лініями негабаритних механізмів (на ЛЕП);

д) незадовільним доглядом за обладнанням;

Тому, при проектуванні тягової підстанції, дуже важливо врахувати струми короткого замикання, це один з найголовніших факторів при виборі силового електричного обладнання. Відомо, з попередніх курсів університету (курсний проект по ТП), що розрахунок струмів КЗ проходить умовно в 4 етапи: Вибір розрахункових умов, визначення параметрів елементів розрахункової схеми, складання схеми заміщення, розрахунок режиму КЗ.

Всі ці заходи об'єднані з метою забезпечити надійність роботи окремих елементів і всієї ЕЕС в цілому.

### **1.3 Імовірно-статистична обробка процесу первинної напруги (в точках приєднання)**

В даному дослідженні маємо статистичну вибірку ( $U_1, U_2, \dots, U_n$ ) неявної випадкової величини напруги. Потрібно виконати статистичний аналіз, тобто встановити закономірності зміни цієї випадкової величини. А як це відомо, ці закономірності характеризуються законом розподілення та числовими характеристиками випадкових величин.

Із вилученої технічної документації маємо масив значень напруги 110 кВ трьох фаз, які були зафіксовані у часі, інтервал яких кожні 5 секунд на протязі однієї доби. Усі значення напруги знаходяться в середовищі Microsoft Excel. Зараз розрахунок значень самого масиву чисел в Excel, далі буде виконано серію розрахунків статистичного аналізу безпосередньо з осцилографів математичної моделі «Simulink» (п. 2.4 і п. 3.4) та проаналізуємо отримані результати. Отже, потрібно визначити математичне очікування, дисперсію та середньоквадратичне відхилення.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	Напруга		МатОч(А)	Дис (А)	СерКвВід(А)	
2	0	119459,54		118379,1	1313259	1145,975	
3	5	119459,54					
4	10	119459,54					
5	15	119459,54					
6	20	119459,54					
7	25	119459,54					
8	30	119459,54					
9	35	119459,54					
10	40	119459,54					
11	45	119269,02					
12	50	119269,02					
13	55	119269,02					
14	60	119269,02					
15	65	119269,02					
16	70	119078,49					
17	75	119269,02					

PhaseA PhaseB PhaseC (+)

ГОТОВО

Рисунок 1.5 – Розрахунок статистичного аналізу первинної напруги 110 кВ фаза А в середовищі Microsoft Excel

З ілюстрації (Рис. 1.5) підкреслюємо, що функції Excel спрощують розрахунки, нижче зазначені стовпчики і функції, які були використані:

«А» – масив значень часу доби (24 години), з кроком 5 секунд;

«В» – масив напруги певної фази (110 кВ);

«D» – розрахунок математичного очікування (функція «СРЗНАЧ»)

«E» – розрахунок дисперсії (функція «ДИСП.В»)

«F» – розрахунок середньоквадратичного відхилення (корінь з дисперсії)

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	Напруга		МатОч(В)	Дис (В)	СерКвВід(В)	
2	0	114315,35		117444,3	5631760	2373,133	
3	5	114696,40					
4	10	114886,93					
5	15	114505,88					
6	20	114505,88					
7	25	114315,35					
8	30	114315,35					
9	35	114505,88					
10	40	114696,40					
11	45	114886,93					
12	50	115077,46					
13	55	115267,98					
14	60	115458,51					
15	65	115458,51					
16	70	115458,51					
17	75	115458,51					

PhaseA PhaseB PhaseC (+)

ГОТОВО

Рисунок 1.6 – Розрахунок статистичного аналізу напруги 110 кВ фаза В в середовищі Excel

Розраховано таким самим методом, як для фази А, різниця тільки в самих значеннях.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	Напруга		МатОч(С)	Дис (С)	СерКвВід(С)	
2	0	121936,38		120318,8	1473398	1213,836	
3	5	121936,38					
4	10	121745,85					
5	15	121936,38					
6	20	121745,85					
7	25	121936,38					
8	30	122126,90					
9	35	121936,38					
10	40	121936,38					
11	45	121745,85					
12	50	121745,85					
13	55	121745,85					
14	60	121555,33					
15	65	121555,33					
16	70	121555,33					
17	75	121555,33					

PhaseA PhaseB **PhaseC** +

ГОТОВО

Рисунок 1.7 – Розрахунок статистичного аналізу напруги 110 кВ фаза С в середовищі Excel

Нижче приведені розрахунки цих величин для кожної фази 110 кВ (А, В, С) у вигляді формул:

Фаза А:

1) Математичне очікування первинної напруги

$$M^*[X] = m_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

$$m_U = 118379,1 \text{ В}$$

2) Дисперсія первинної напруги

$$D^*[X] = D_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2}{n-1} = \frac{(x_1 - m_x^*)^2 + (x_2 - m_x^*)^2 + \dots + (x_n - m_x^*)^2}{n-1}$$

$$D_U = 1312259 \text{ В}^2$$

3) Середньоквадратичне відхилення напруги

$$\sigma^*[X] = \sigma_x^* = \sqrt{D^*[X]} = \sqrt{D_x^*}$$

$$\sigma_U = 1145,97 \text{ В}$$

Фаза В:

$$m_U = 117444,3 \text{ В}$$

$$D_U = 5631760 \text{ В}^2$$

$$\sigma_U = 2373,13 \text{ В}$$

Фаза С:

$$m_U = 120318,8 \text{ В}$$

$$D_U = 1473398 \text{ В}^2$$

$$\sigma_U = 1213,83 \text{ В}$$

Фізично математичне очікування являє собою середньоарифметичне значення випадкової величини, в свою чергу і дисперсія, і середньоквадратичне

відхилення характеризують розсіювання можливих значень випадкової величини (напруги), відносно математичного очікування.

#### **1.4 Існуючі методи моделювання випадкових електромагнітних процесів**

Проведення досліджень цих процесів зручно проводити за допомогою моделювання. Для електроенергетики це становить особливий інтерес, тому що відкриваються можливості для дослідження і аналізу складних та небезпечних процесів, розкладання даних процесів на складові, виконання зміни параметрів моделі для кращої роботи або модернізації.

Застосування моделей в екстремальних задачах створює можливість ефективної автоматизації управління нормальними і аварійними умовами, а також вельми успішно використовується в наукових дослідженнях складних перехідних процесів.

Метод моделювання - один з найрезультативніших методів наукового дослідження, який в останні роки набув широкого поширення і з успіхом застосовується в електроенергетиці та інших областях науки. У науковому дослідженні під моделлю розуміється деяка штучно створена дослідником система, яка в певному відношенні подібна до досліджуваного об'єкта, тобто відтворює його характерні риси і явища, що відбуваються в реальних умовах. Можна підкреслити, що метод моделювання - це дослідження об'єкта чи явища не в реальних умовах, а на моделі цього об'єкта або явища.

Моделювання застосовується зазвичай в тих випадках, коли дослідження безпосередньо на об'єкті у важких, незручних або небезпечних умовах. Адекватний опис перехідних електромагнітних процесів зазвичай виконується за допомогою створення опису системи, як сукупності взаємодіючих компонентів і взаємозв'язків між ними. Для цього використовуються різні методи моделювання. На сьогоднішній день найпоширеніші методи моделювання аналітичний та імітаційний.

Структура моделювання містить в собі наступні пункти:

- а) постановка задачі;
- б) визначення аналога;
- в) створення або вибір моделі;
- г) розробка конструкту;
- д) дослідження моделі;
- е) аналіз дослідження моделі;
- є) переведення знань з моделі на оригінал.

Аналітичне **моделювання** характеризується тим, що процеси функціонування елементів системи записуються у вигляді деяких функціональних співвідношень або логічних умов. Аналітична модель може бути досліджена наступними методами:

- а) **аналітичним**, коли прагнуть отримати в загальному вигляді явні залежності для шуканих характеристик;
- б) **чисельним**, коли, важко вирішувати рівняння в загальному вигляді, але можливо отримати числові результати при конкретних початкових даних;
- в) **якісним**, коли, не маючи рішення в явному вигляді, можна знайти деякі властивості рішення.

Алгоритм **імітаційного моделювання** відтворює процес функціонування електричної системи в часі, при цьому імітуються елементарні явища, що становлять процес, зі збереженням їх логічної структури і послідовності протікання в часі, що дозволяє по вихідним даним отримати відомості про стан процесу в певні моменти часу, що дають можливість оцінити та охарактеризувати систему.

Імітаційні моделі дозволяють досить просто враховувати такі фактори, як наявність дискретних і безперервних елементів, нелінійні характеристики елементів системи, багато численні випадкові впливи, які часто створюють труднощі при аналітичних дослідженнях. Основною перевагою імітаційного моделювання, в порівнянні з аналітичними моделями, є можливість вирішення більш складних завдань.

Метод імітаційного моделювання дозволяє вирішувати завдання аналізу складних систем, включаючи завдання оцінки: варіантів структури системи, ефективності різних алгоритмів управління системою, впливу зміни різних параметрів системи. Імітаційне моделювання може бути покладено, також, в основу функціонального синтезу великих систем, коли потрібно створити систему, із заданими характеристиками при певних обмеженнях, яка є оптимальною за деякими критеріями оцінки ефективності. На прикладі цієї роботи, можливо побачити в дії імітаційне моделювання та проаналізувати ефективність даного методу дослідження електромагнітних процесів.

## 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ТП З ТРИФАЗНИМИ ПОНИЖУВАЛЬНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

### 2.1 Імітаційна модель трифазного трансформатора

Для більш точного дослідження трифазного трансформатора і всієї моделі в цілому, буде введено детерміновані значення первинної напруги тягової підстанції змінного струму, тобто значення трьох фаз 110 кВ (А,В,С). Далі буде детально описано введення значень напруги в імітаційну модель «Matlab Simulink» з середовища Microsoft Excel.

Відкриваємо Matlab (Matlab 2018, в нашому випадку), з'явиться стандартне вікно програми у якому нам потрібно натиснути на вкладнику Import Data (Рис. 2.8)

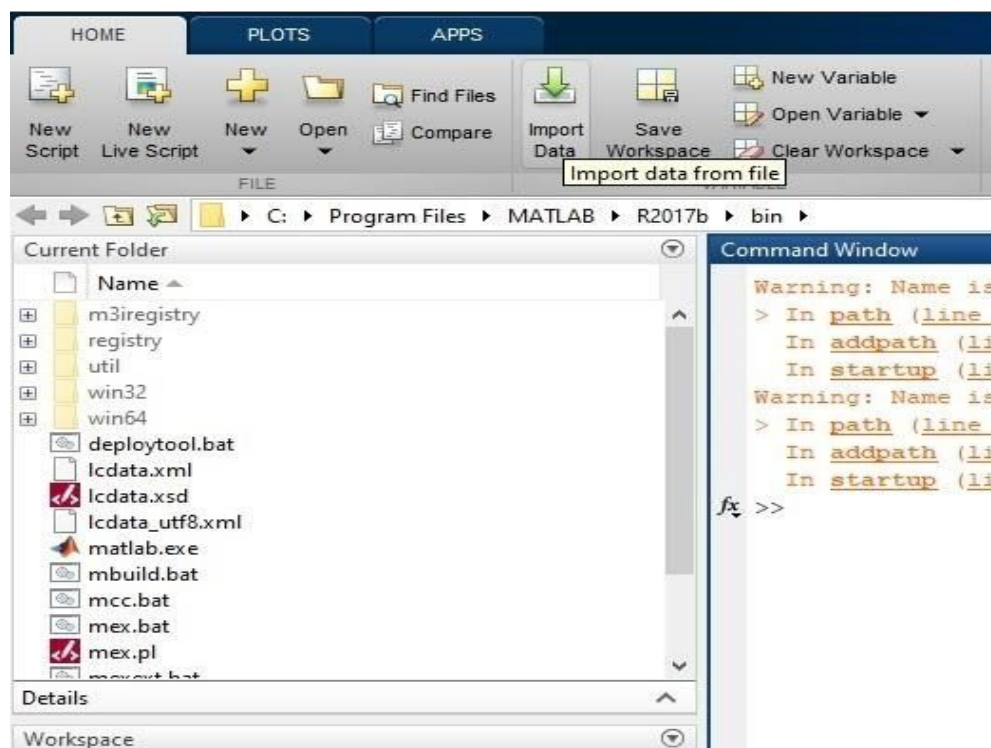


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд головного меню Matlab

Після того, як натиснули на вкладнику Import Data з'явиться вікно, у якому потрібно обрати файл. Обираємо файл, який використовувався в пункті 1.3, цей файл містить масив значень напруги у часі, з кроком 5 секунд, на протязі доби

(24 години). Всі значення були вилучені з технічної документації і їх роль в Excel описувались вище (див. п. 1.3). У вкладниці, яка відкрилась, потрібно обрати необхідні значення, для цього виділяємо за допомогою миші певні стовпчики, в нашому випадку А і С. Після виконання цієї дії, перейдемо до наступної, а саме, натиснувши на вкладинку Output Type, обираємо рядок з назвою Numeric Matrix. **Важливо!** Numeric Matrix враховує перші рядки стовпчиків та ідентифікує їх, як «NaN» (Рис. 2.9), тобто, якщо нехтувати цією помилкою, далі бажаного результату не буде.

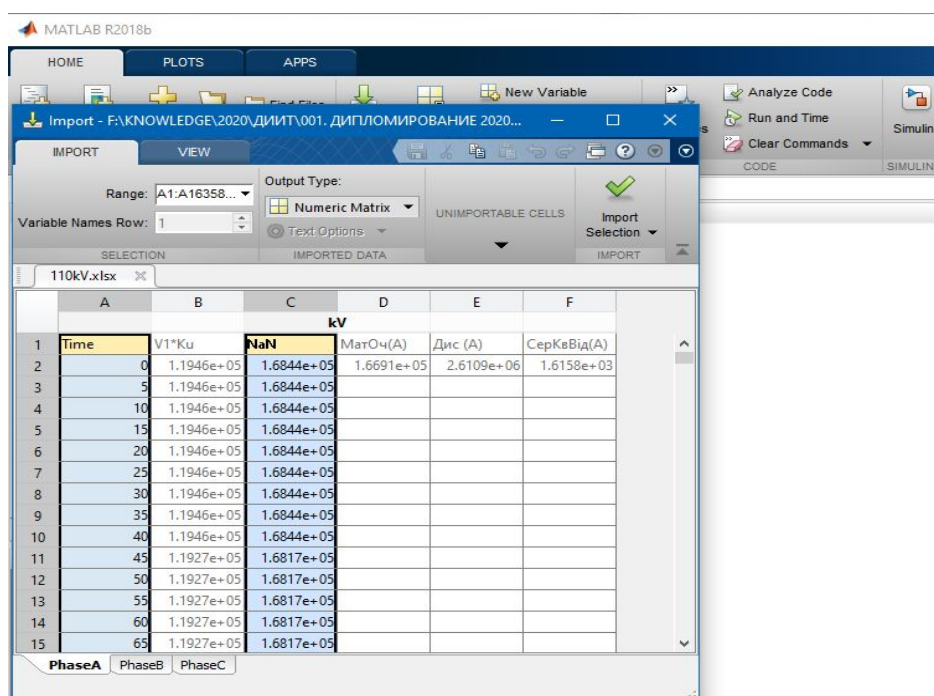


Рисунок 2.9 – Не вірний варіант імпорту значень

Тому необхідно просто вилучити перші рядки з масиву, за допомогою миші зменшуємо обидва стовпчика на перший рядок (з верхнього краю стовпчика на один рядок вниз) (Рис. 2.10), всі інші значення залишаються.

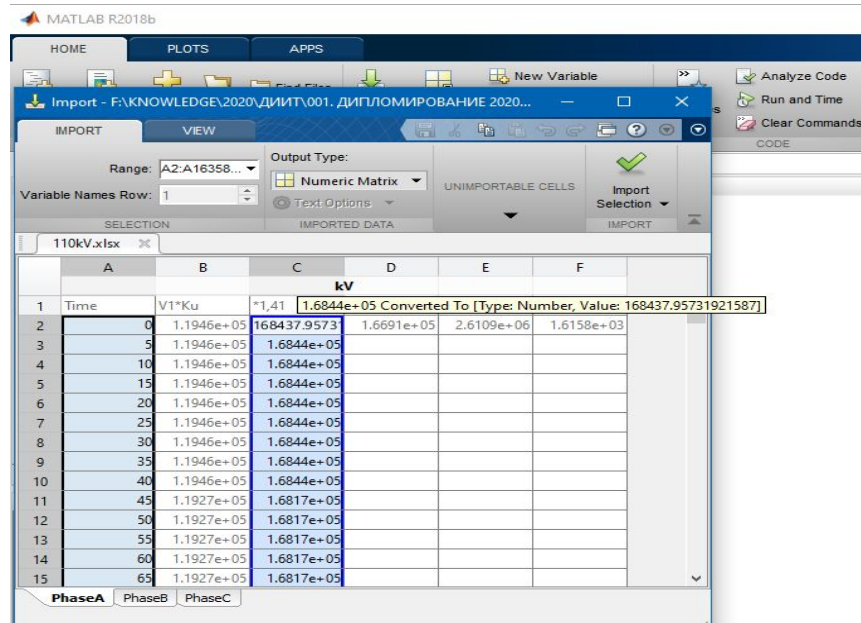


Рисунок 2.10 – Правильний варіант імпорту значень

По завершенню всіх перерахованих вище дій тиснемо на зелену галочку Import, в правому верхньому куту вікна. Якщо все правильно виконано, то на стандартному вікні Matlab, у підрозділі який називається Workspace з'являться внесені данні у вигляді матриці (Рис. 2.11).

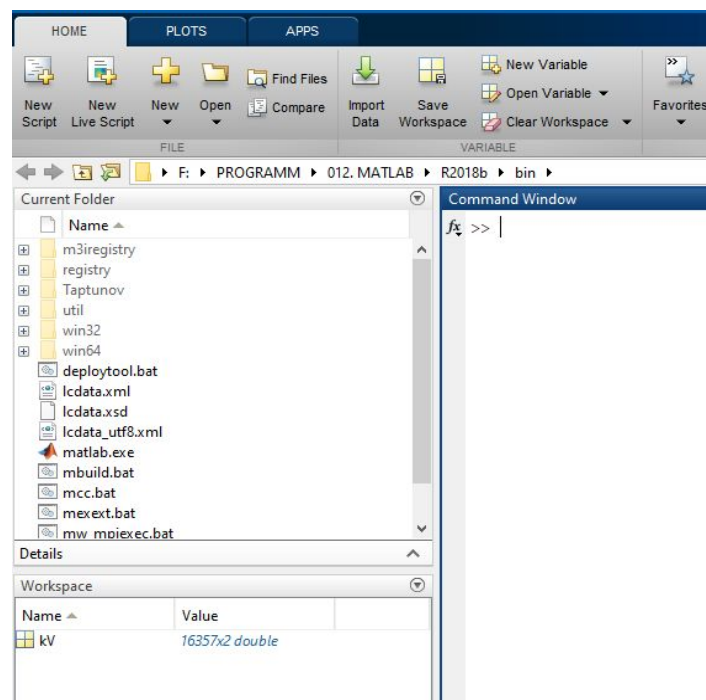


Рисунок 2.11 – Загальний вигляд імпортованих даних в Workspace

Далі потрібно відкрити схему, в яку потрібно було занести ці значення. Тиснемо на вкладнику Open та обираємо відповідний файл зі схемою. Після цього, відкриється середовище Simulink і схема, яка застосовується при дослідженні. Для подальшого занесення даних, потрібно додати до схеми елемент, який називається Signal Editor, його можна знайти в бібліотеці (Library Browser), за допомогою пошуку.

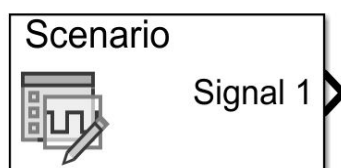



Рисунок 2.12 – Елемент Signal Editor

**Важливо!** Відкривши властивості цього елемента, необхідно натиснути кнопку  перед усім іншим, щоб записати сценарій в елемент. Повинно з'явитись вікно створення та редагування сигналів. В цьому вікні знаходимо вкладнику Scenario та тиснемо на неї, далі обираємо From Workspace, як зображено на Рис. 2.13.

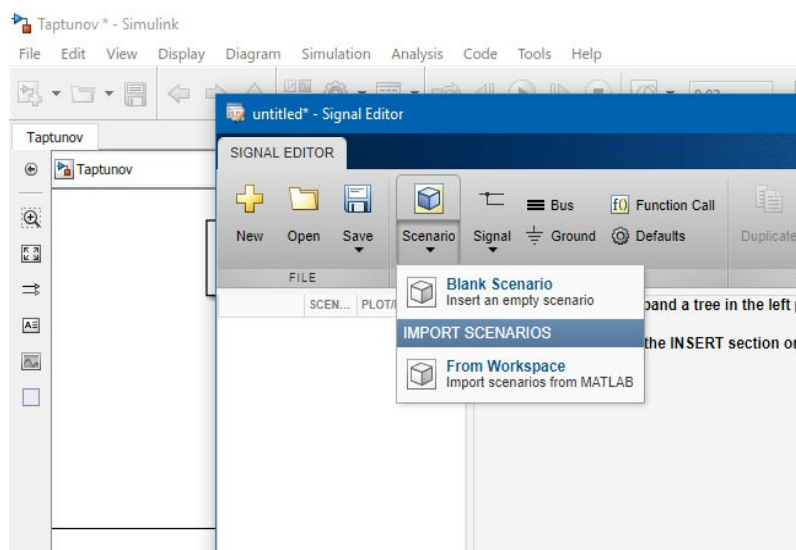


Рисунок 2.13 – Імпорт значень з From Workspace

Після натискання, з'являться варіанти вихідних даних, обираємо потрібний та тиснемо на ОК (Рис. 2.14).

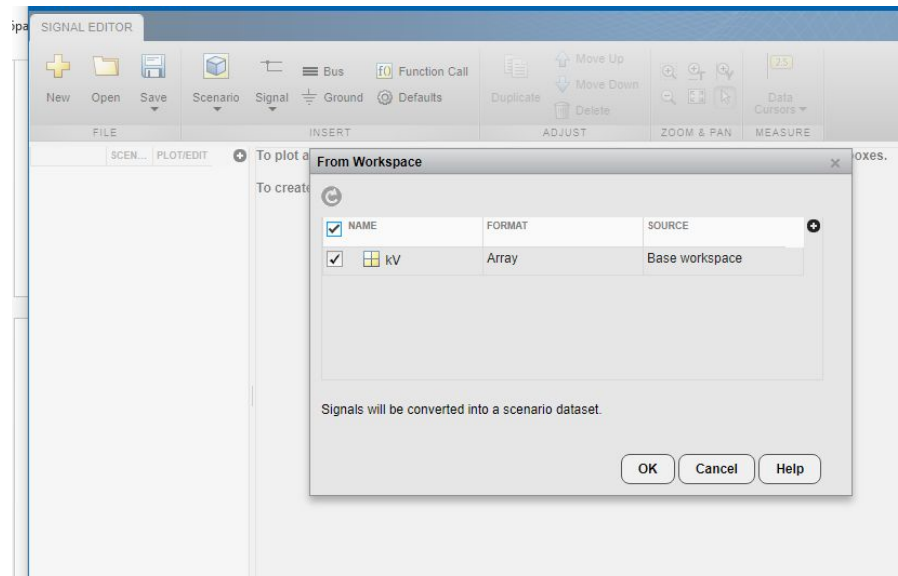


Рисунок 2.14 – Вибір певних значень з From Workspace

Далі автоматично створиться сценарій та сигнал, який відповідає вхідним даним. Для того, щоб його подивитись, потрібно обрати вкладинку цього сценарію, і поставити галочку, навпроти назви вхідних даних (Рис. 2.15).

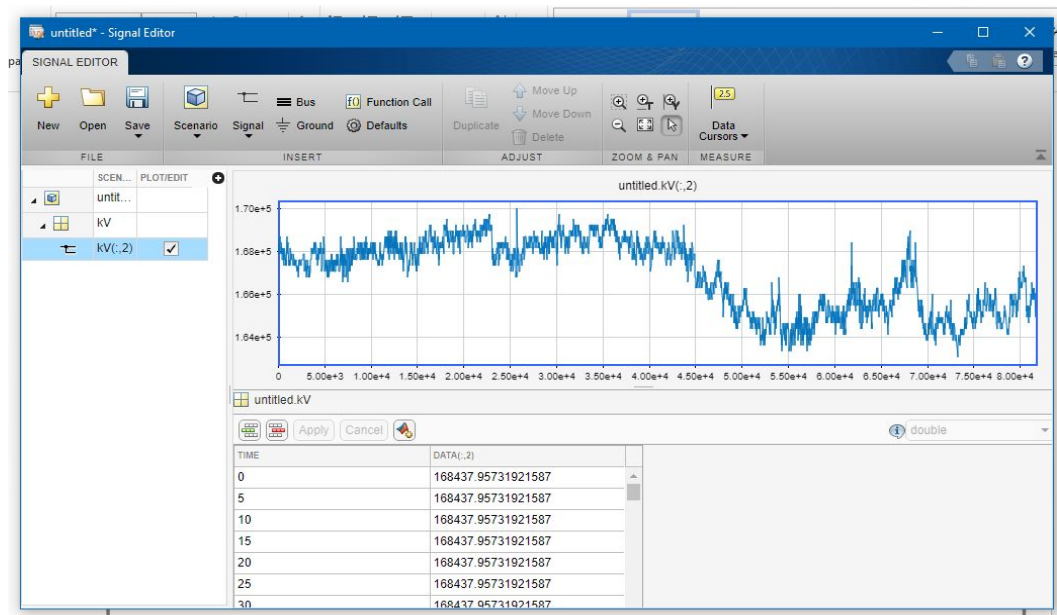


Рисунок 2.15 – Загальний вигляд сценарію

**Важливо!** Якщо у вікні From Workspace (Рис. 2.14) не відображаються вихідні дані, то необхідно перевірити файл Excel, в ньому першим стовпчиком повинно бути «TIME», а потім масив значень «DATA» (напруги або іншої величини), як показано на загальному вигляді сценарію (Рис. 2.15).

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 Interpolate data, Sample time обираємо 0, та формуємо результат після кінцевого значення даних шляхом екстраполяції.

Головним блоком імітаційної моделі тягової підстанції змінного струму є силовий трифазний трансформатор ТДТНЖ-40000/110-У1. Всі параметри головного понижуючого трансформатора вилучені з технічного паспорта (Додаток А), тим самим отримаємо більш точні результати дослідження. Даний трансформатор найчастіше застосовується на ТП змінного струму, його основні параметри (Табл.2.1) занесені в блок-модель (Рис. 2.16).

Тип виконання трансформатора	Номинальна потужність $S_{ном}$ , кВА	Номинальна напруга обмоток, $U_{ном}$ , кВ			Схема і група з'єднання	Втрати, кВт		Напруга короткого замикання, % ВН-СН; ВН-НН; СН-НН
ТДТНЖ-40000 /110-У1		ВН	СН	НН	Yg/ Yg /D-11-11	Х.х.	КЗ	
	40000	115	38,5	27,5		38,4	221209212	17,4; 9,77; 6,55

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики трансформатора ТДТНЖ-40000/110-У1

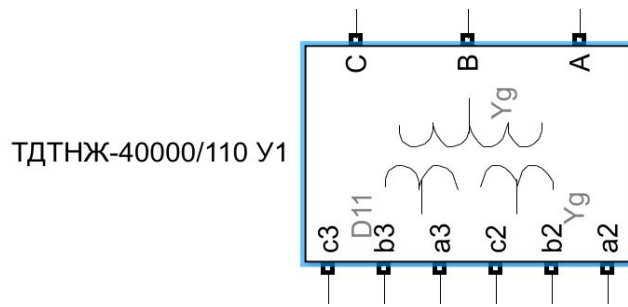
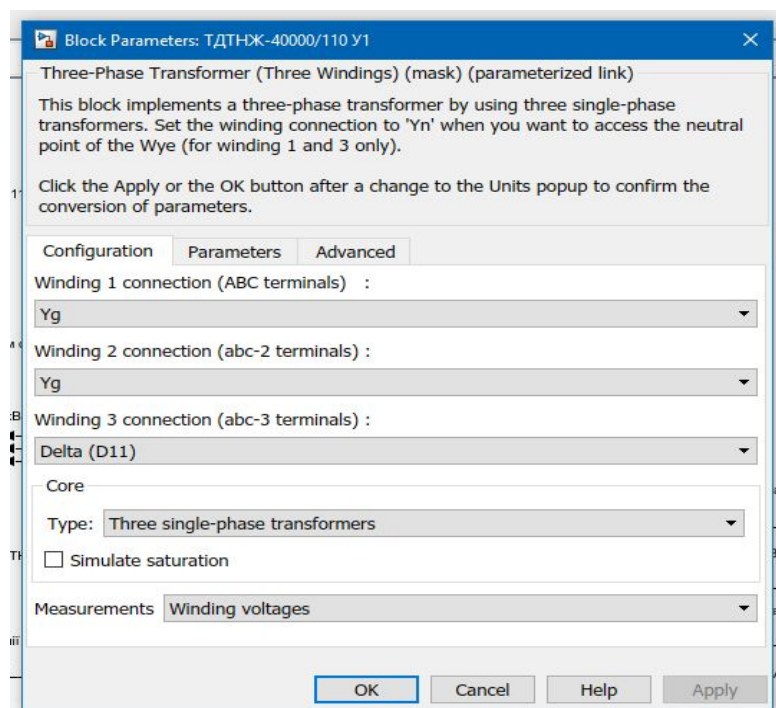


Рисунок 2.16 – Загальний вигляд блоку трансформатора в середовищі Matlab

При відкритті блоку силового трансформатора відкривається вікно параметрів (Рис. 2.17). Перед тим, як занести всі характеристики до цього блоку, необхідно проаналізувати його параметри.



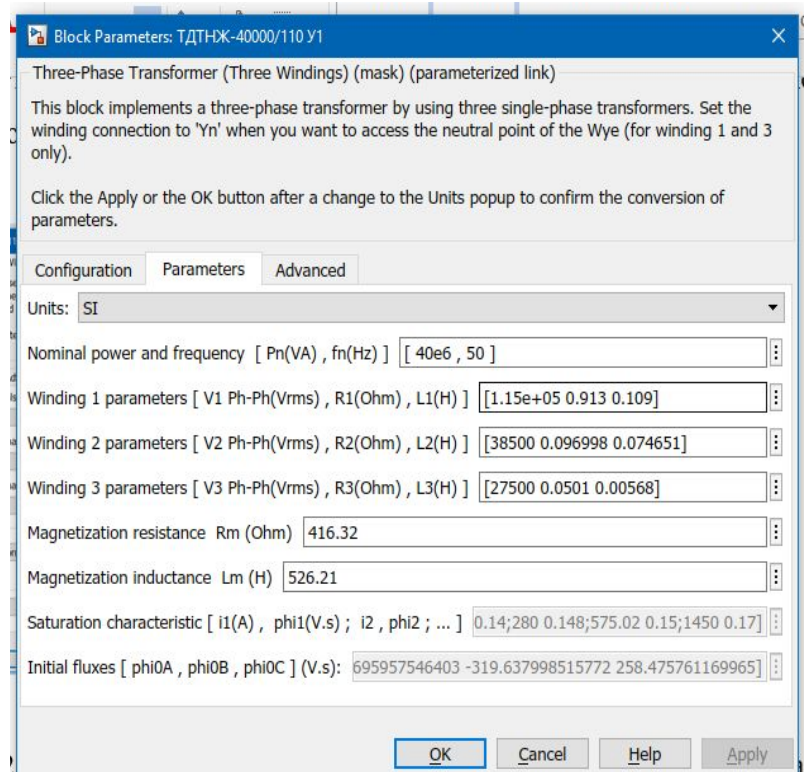


Рисунок 2.17 – Перша і друга вкладинки параметрів блоку трансформатора

Нижче приведений опис характеристик першої та другої вкладинок блоку:

Winding 1 connection (ABC) – схема з'єднання першої обмотки;

Winding 2 connection (abc-2) – схема з'єднання другої обмотки;

Winding 3 connection (abc-3) – схема з'єднання третьої обмотки;

Type – тип трансформатора;

Measurements – виміри трансформатора;

Units – одиниці;

Nominal power and frequency – номінальна потужність і частота трансформатора;

Winding 1 parameters – параметри першої обмотки;

Winding 2 parameters – параметри другої обмотки;

Winding 3 parameters – параметри третьої обмотки;

Magnetization resistance – магнітний опір;

Magnetization inductance – магнітна індукція.

## **2.2 Розрахункова схема і модель ТП з подвійною трансформацією первинної напруги**

Simulink – пакет візуального програмування. Дозволяє здійснювати моделювання у часі поведінки динамічних нелінійних систем, причому введення характеристик досліджуваних систем здійснюється шляхом графічної збірки схеми з'єднань елементарних ланок. Після запуску пакету Simulink зіставляємо модель ТП змінного струму, для подальшого проведення дослідження. Усі нижче приведені елементи схеми, застосовані в даному моделюванні можна знайти в загальній бібліотеці Library Browser.

Структуровано, модель в цьому дослідженні можливо розкласти на три простих етапи:

- перший етап – ЛЕП 110 кВ (первинна напруга), яка надходить до головного понижуючого трансформатора, а саме, значення детермінованої напруги, які були описані п. 2.1;

- другий етап – безпосередньо силовий трансформатор (трифазний), який виконує подвійну трансформацію первинної напруги;

- третій етап – надходження вторинної напруги до навантаження 35 кВ (живлення нетягових споживачів), і до навантаження 27,5 кВ (СТЕ).

Для початку розглянемо модель з першого етапу, тобто від початку і до кінця. Сигнал первинної напруги надходить від блоків Signal Editor, із заданими детермінованими значеннями напруги, на схемі наочно зображено три елемента (Рис.2.18), що відповідають напрузі відповідній фазі (А,В,С). Також важливо відмітити елемент «powergui2», що встановлює тип, параметри та налаштування моделювання.

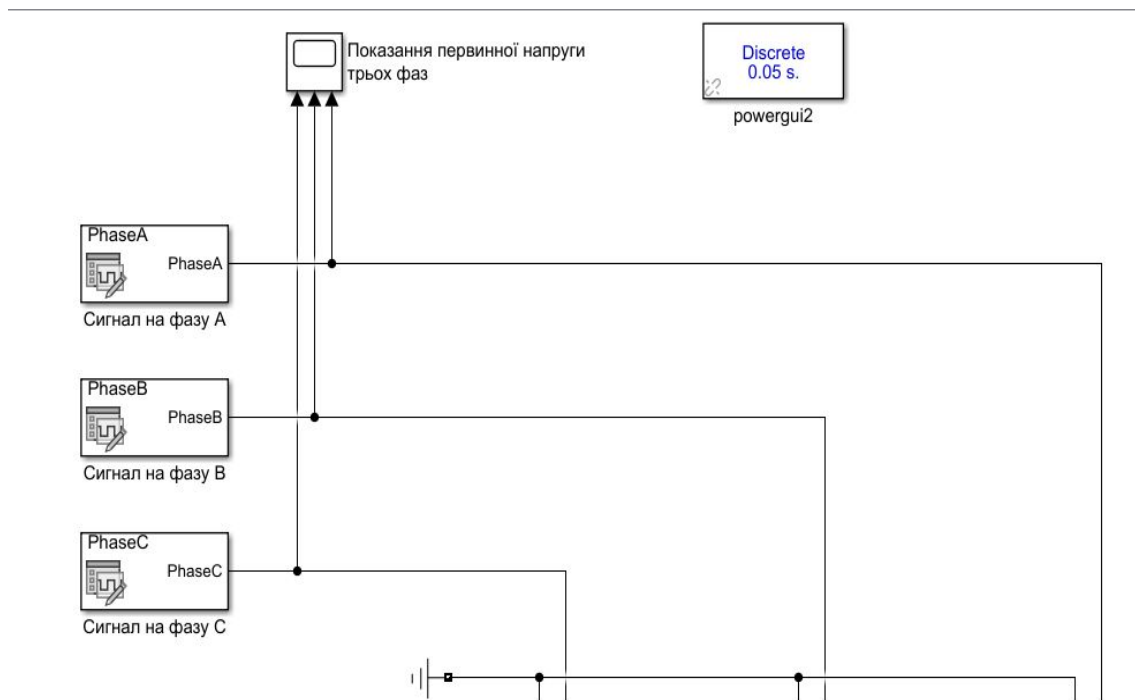


Рисунок 2.18 – Надходження сигналу з детермінованими значеннями напруги на блок джерела змінного струму 110 кВ (початок схеми)

Продовжуючи опис першого етапу, необхідно підкреслити, що сигнал напруги надходить до головного понижуючого трансформатора через джерела живлення та опір ЛЕП, виміри трьох фаз напруги виконуються через вольтметри, які з'єднуються паралельно з лінією, струми вимірюються амперметрами (Рис. 2.19). Виміри виводяться на елементи «Напруга 110 кВ» та «Струм 110 кВ» (Scope – назва в Matlab), які можливо знайти в бібліотеці Library Browser.

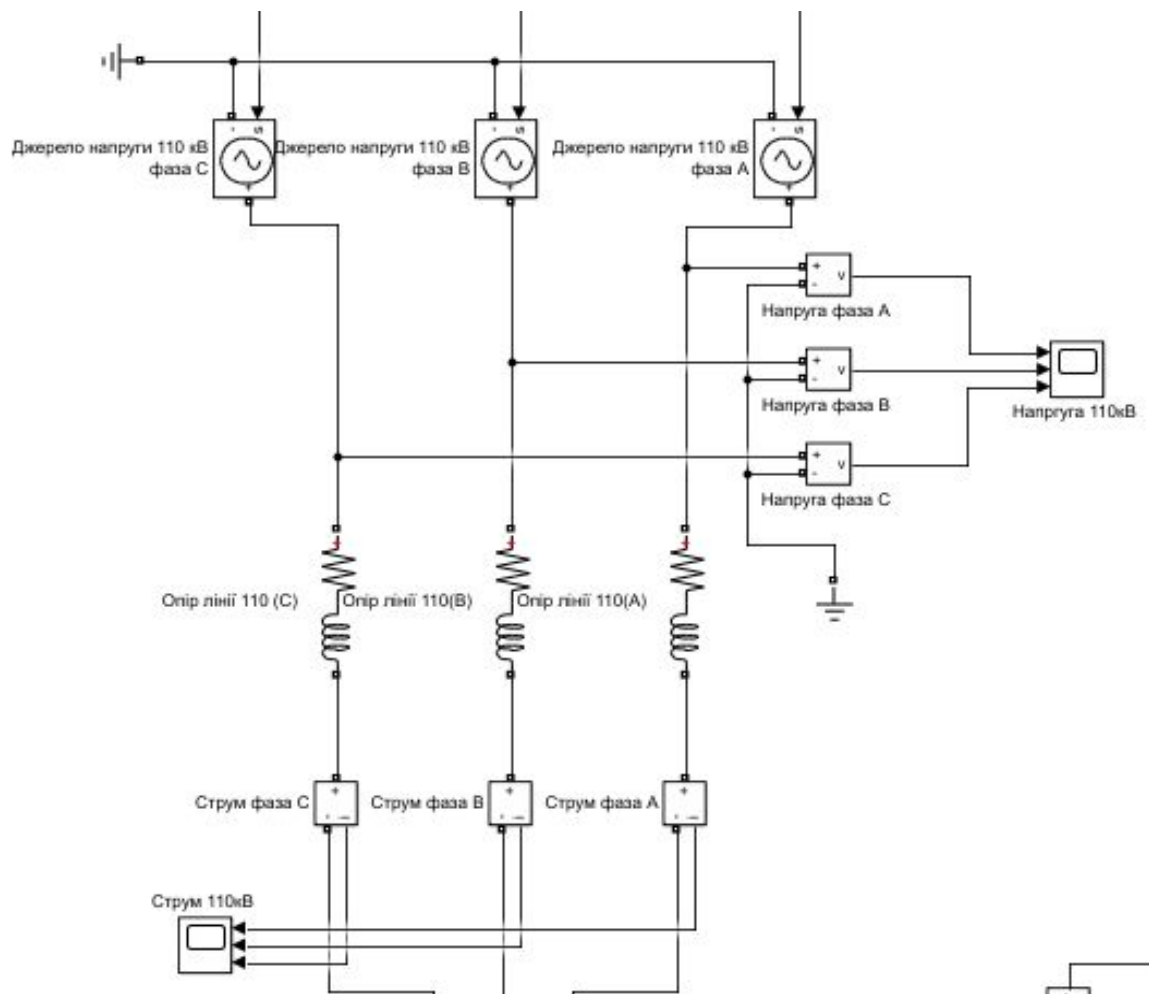
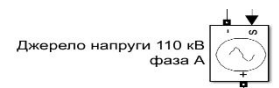


Рисунок 2.19 – Імітаційна модель ЛЕП 110 кВ, надходження з блоками виміру

В свою чергу блоки джерела живлення кожної фази мають наступні параметри (див. Рис. 2.20):

- Source type (V) – тип джерела живлення;
- AC – змінна напруга;
- DC – постійна напруга;
- Initial phase (deg) – початковий етап фази;
- Initial frequency (Hz) – початкова частота;
- Measurements – вимірювання.



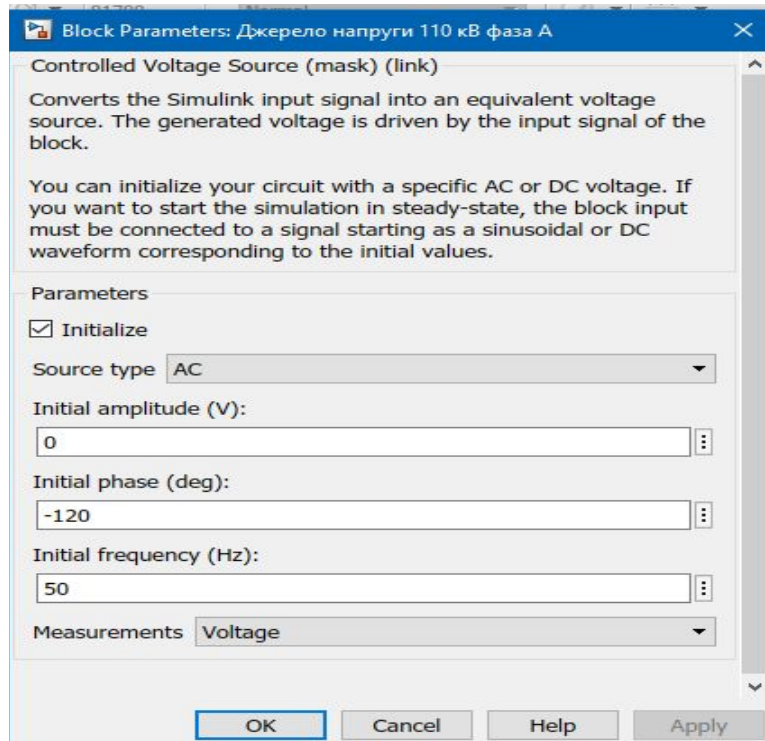



Рисунок 2.20 – Параметри блоку джерела живлення 110 кВ

Опір лінії імітується блоком RLC Branch, який представляє собою послідовно з'єднані резистивний та індуктивний елементи . Значення параметрів цього блоку (Рис. 2.21), можливо обрати, який саме опір буде враховуватись. На лініях електропередачі напругою 110 кВ та обраним перерізом проводів, ємність має дуже мале значення, щоб його враховувати, тому і відображено блок «RL».

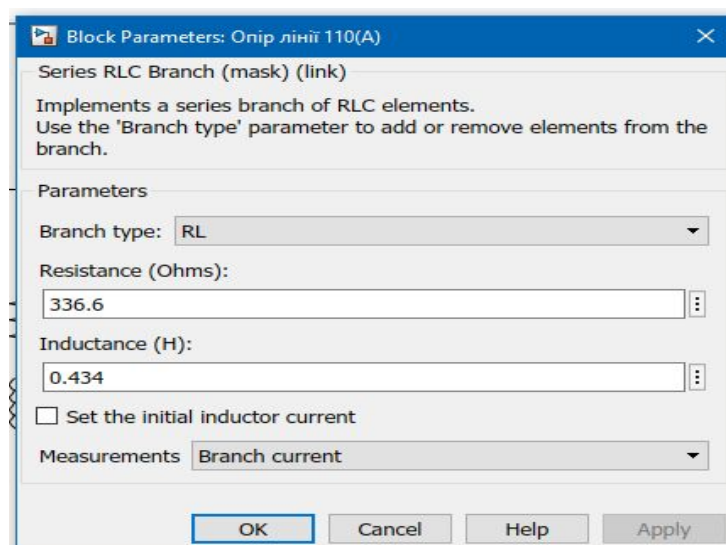


Рисунок 2.21 – Параметри блоку опору лінії 110 кВ

- Branch type – вибір виду опору;
- Resistance (Ohms) – активний опір;
- Inductance (H) – індуктивний опір.

Другим етапом моделі ТП – є імітаційна модель трансформатора ТДТНЖ-40000/110-У1 (більш детально п. 2.1), даний блок виконує перетворення значень первинної напруги на нижчі номінали (35 і 27,5 кВ).

До третього етапу моделі можна віднести навантаження 35 кВ (Рис. 2.22) і навантаження 27,5 кВ (СТЕ), з урахуванням опору лінії і вимірною частиною (Рис. 2.23).

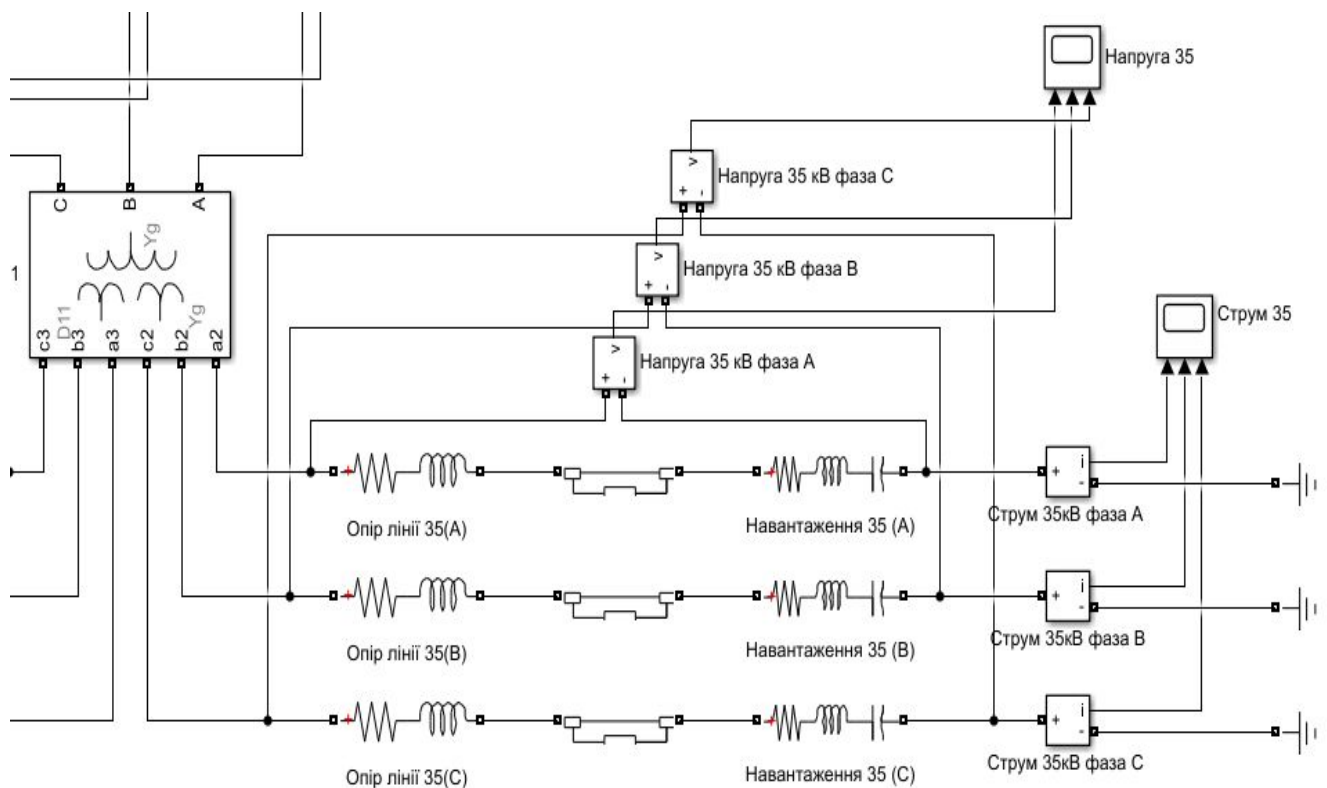


Рисунок 2.22 – Навантаження шин 35 кВ тягової підстанції



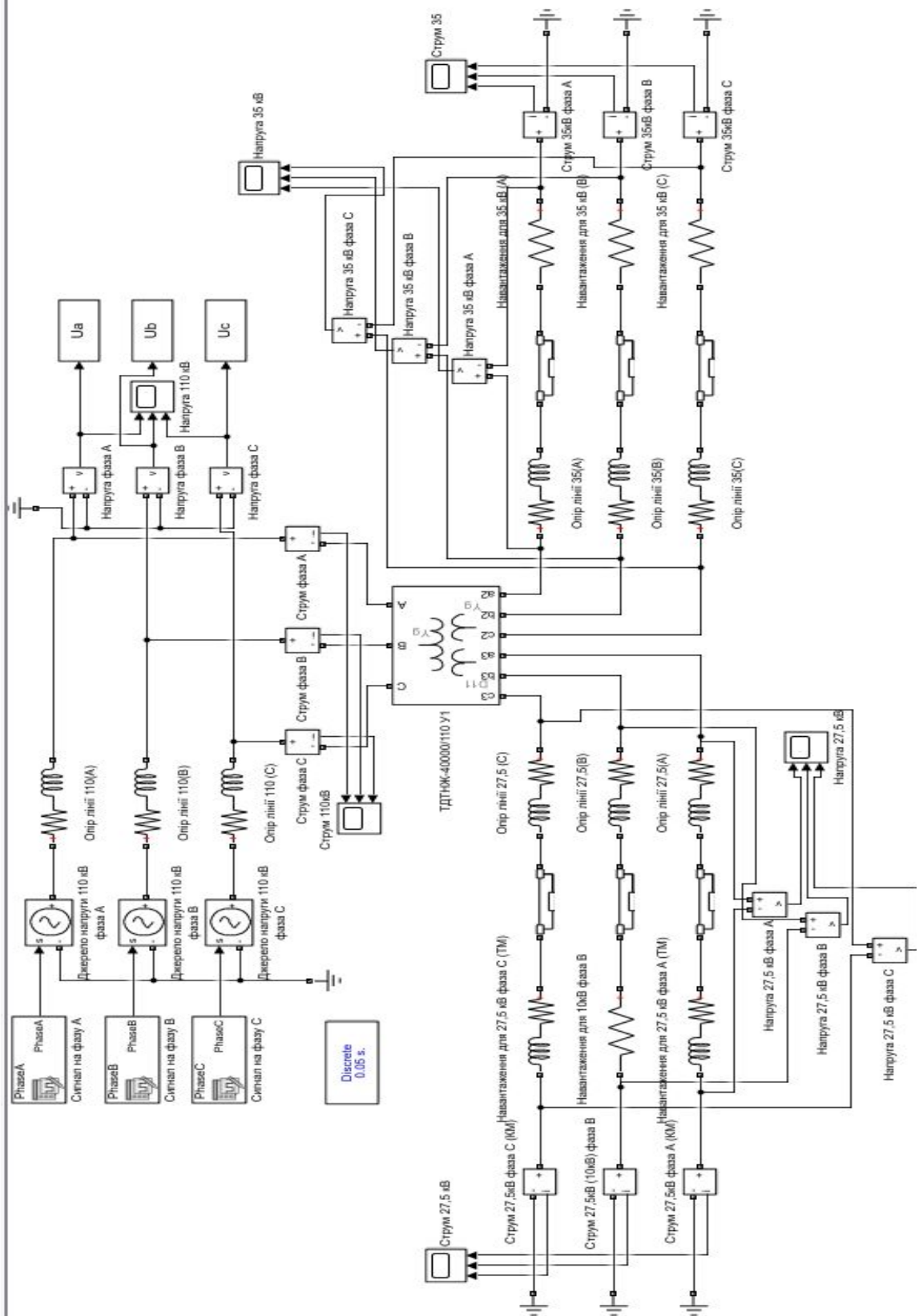


Рисунок 2.24 – Загальний вигляд імітаційної моделі тягової підстанції змінного струму

### 2.3 Чисельні розрахунки напруги на шинах ТП при напрузі в точках приєднання 110 кВ

При розрахунку напруги на шинах тягової підстанції необхідно вилучити покази напруги з осцилографів всіх трьох фаз. Детерміновані значення, які були введені в моделювання на початковому етапі, будуть вилучені в зворотному напрямку, тобто з осцилографів середовища Matlab до середовища Microsoft Excel.

Для початку необхідно проаналізувати результати моделювання, а саме детермінованої напруги на шинах ТП (110 кВ всіх трьох фаз), на протязі 24 годин, з кроком 5 секунд. Вольтметри фаз А,В та С підключенні до одного осцилографу для зручності (Рис 2.25).

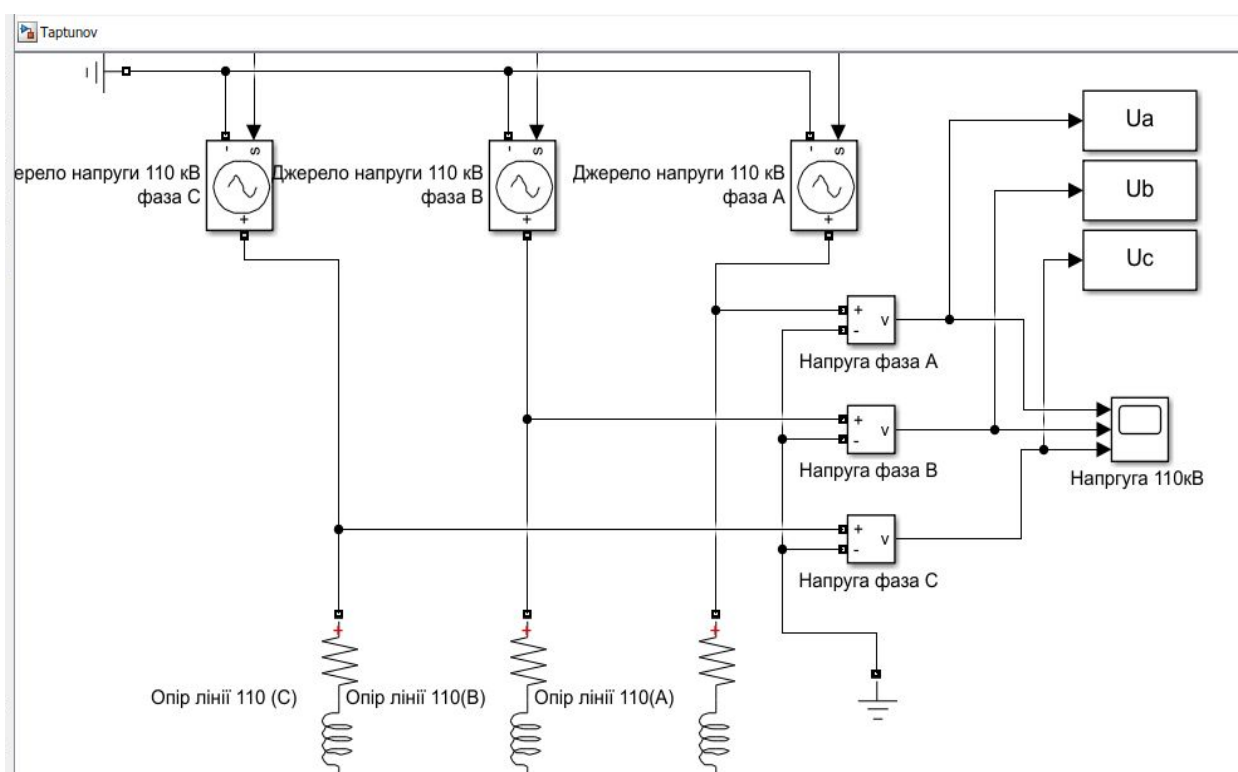


Рисунок 2.25 – Підключення вимірного блоку напруги 110 кВ

Далі натискаємо мишею два рази по елементу «Напруга 110 кВ» та отримаємо результати моделювання значень первинної напруги на шинах підстанції (Рис 2.26)

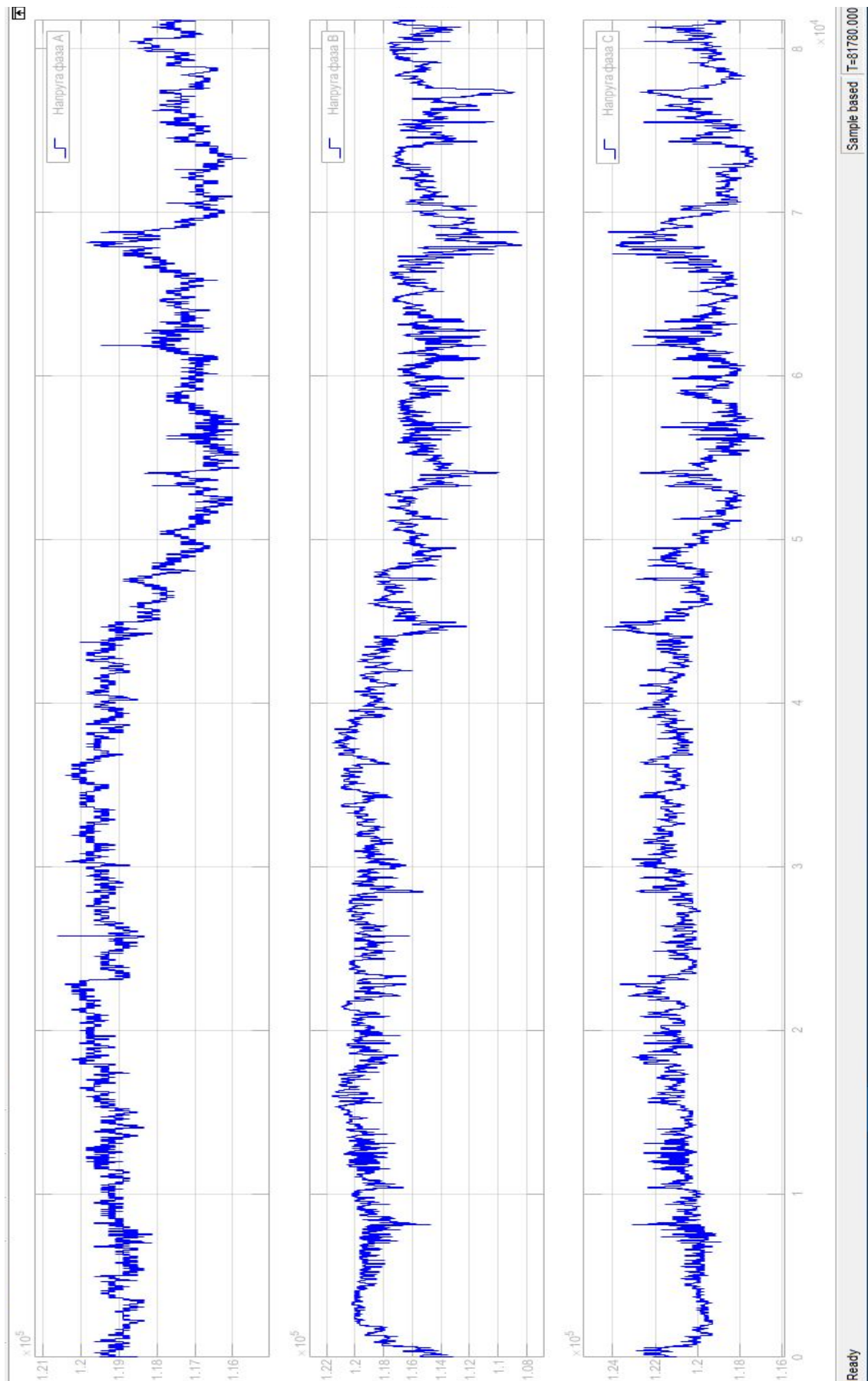


Рисунок 2.26 – Миттєві значення детермінованої первинної напруги на шинах ТПІ

Підкреслюючи можна сказати, що детермінована первинна напруга має не стабільну амплітуду на протязі періоду моделювання, також Simulink відображає максимальне і мінімальне значення напруги, амплітуду, медіану та інші параметри (Рис. 2.27). Період дослідження склав - (81780 секунд, що дорівнює 24 годинам, з кроком 5 секунд).

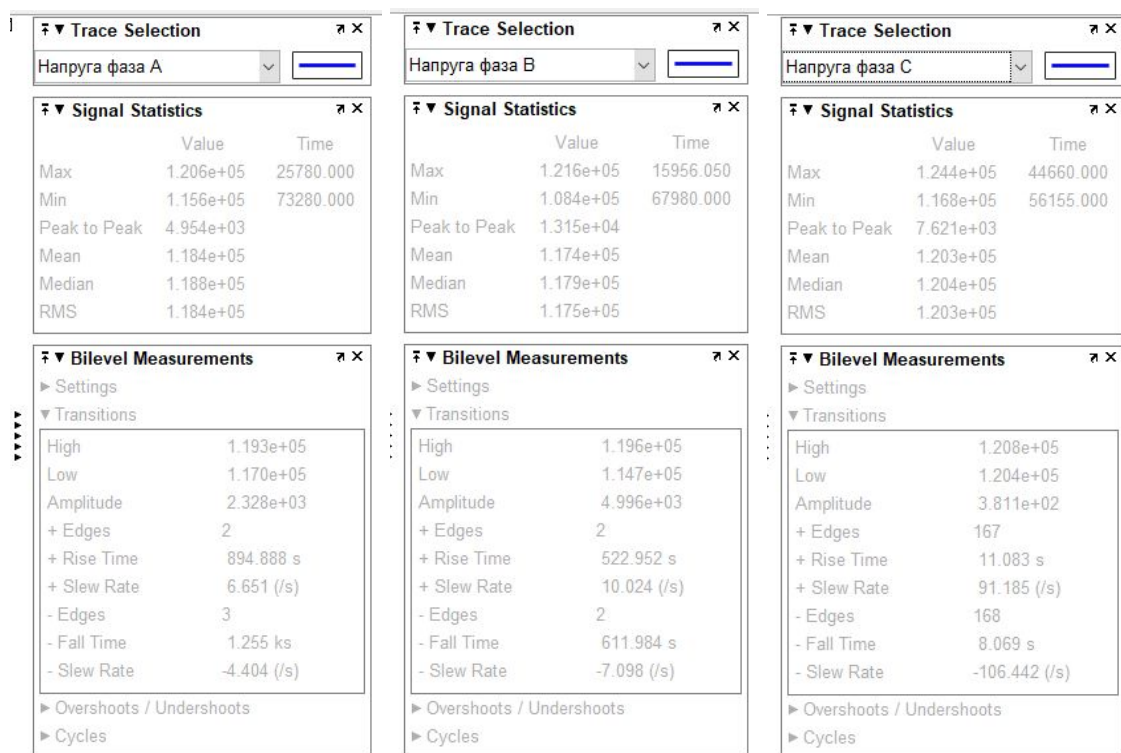
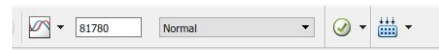


Рисунок 2.27 – Розрахунок миттєвих значень первинної напруги у часі (110 кВ, фази A,B,C)

Користуючись програмним забезпеченням Matlab Simulink випадає можливість спостерігати багатогранний розрахунок. Переклад Signal Statistics приведено нижче:

Max – максимальне значення миттєвої первинної напруги;

Min – мінімальне значення миттєвої первинної напруги;

Peak to peak – від піку до піку;

Mean – середнє значення миттєвої первинної напруги;

Median – медіана значень миттєвої первинної напруги;

RMS – середньоквадратичне значення миттєвої первинної напруги;

Time (Value time) – час максимального і мінімального значень.

Відобразимо, також, розрахунки напруги з шин 35 кВ та 27,5 кВ (Рис. 2.28 та Рис. 2.29 відповідно)

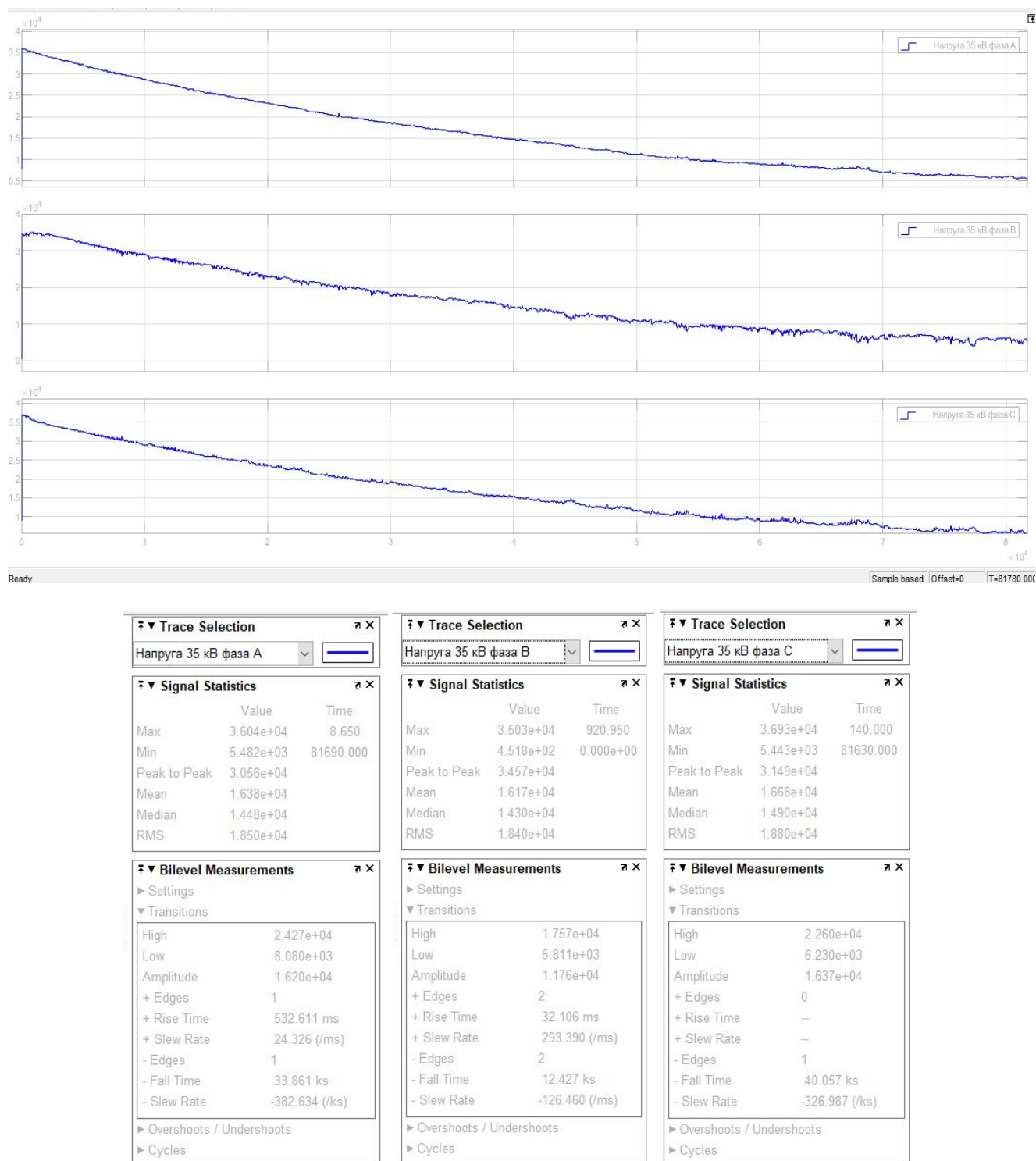


Рисунок 2.28 – Розрахунок миттєвих значень напруги у часі на шинах 35 кВ (фази А,В,С)

Пояснити таку поведінку напруги на шинах 35 кВ можна не рівномірним та постійно збільшуваним навантаженням, але можна підкреслити значення напруги на початку графіку (приблизно 36,4 кВ). Таку ж саму ситуацію можна пояснити у випадку дослідження на шинах 27,5 кВ.

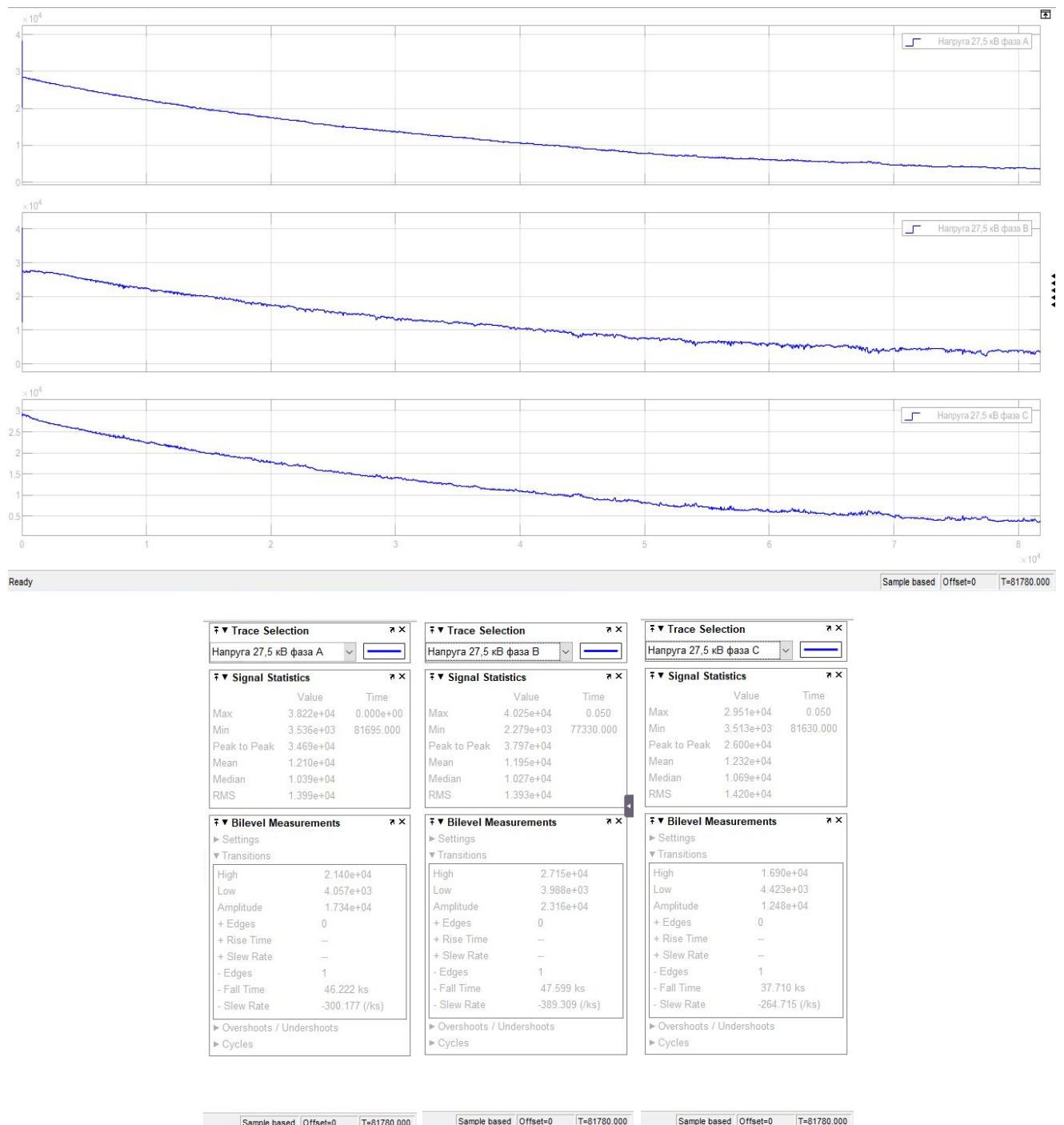


Рисунок 2.29 – Розрахунок миттєвих значень напруги у часі на шинах 27,5 кВ (фази А,В,С)

Для виведення даних первинної напруги з осцилографів , скористаємось



таким елементом як To workspace 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. Проаналізуємо властивості цього елементу та відобразимо кінцеві налаштування та відобразимо кінцеві налаштування (Рис. 2.30).

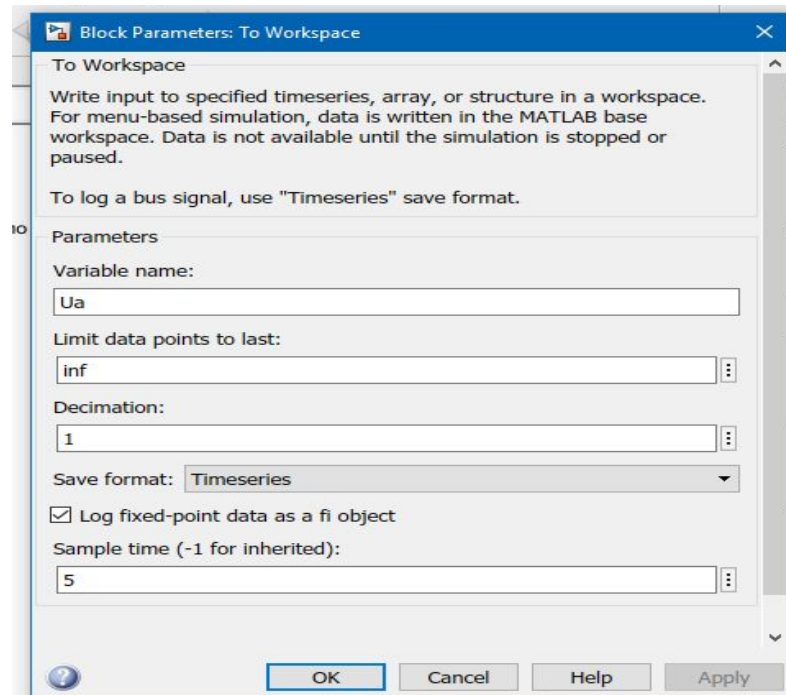


Рисунок 2.30 – Кінцеві налаштування блоку To workspace

Відповідно на схемі даний блок підключається до осцилографа, як зображено вище на Рис. 2.24. Після запуску схеми, результати осцилографа будуть занесені до робочої області Workspace (Рис. 2.31) і їх можна буде занести до Microsoft Excel.

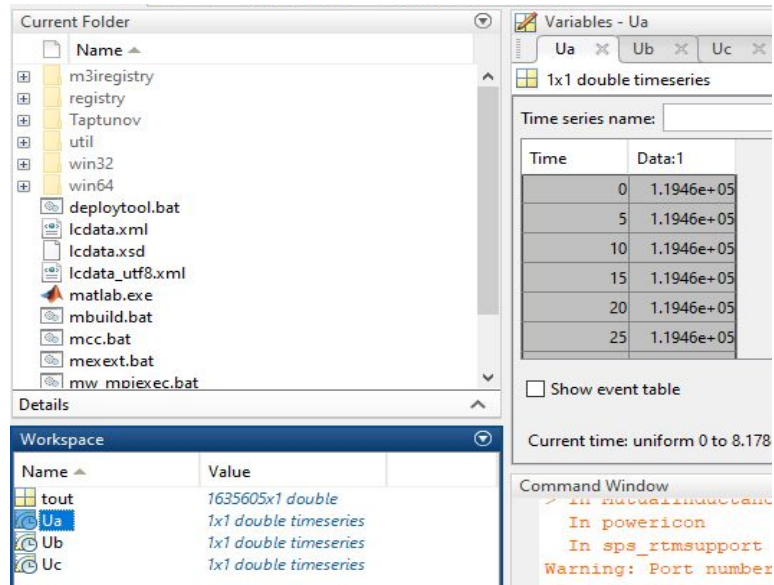


Рисунок 2.31 – Вигляд виведених значень до робочої області

Натиснувши Ua, відкриється вікно з вихідними даними осцилографа (Рис. 2.30), щоб їх перенести до середовища Microsoft Excel достатньо просто скопіювати дані у робочій області комбінацією Ctrl+A, Ctrl+C і в робочому листі Excel виділити осередок та натиснути комбінацію Ctrl+V. Для зручного розрахунку було створено три листа в Excel, кожен з яких відповідає певній фазі (Рис. 2.32).

	A	B	C	D	E
1	Time	Voltage			
2	0	119459.544198025			
3	5	119459.544198025			
4	10	119459.544198025			
5	15	119459.544198025			
6	20	119459.544198025			
7	25	119459.544198025			
8	30	119459.544198025			
9	35	119459.544198025			
10	40	119459.544198025			
11	45	119269.018609193			
12	50	119269.018609193			
13	55	119269.018609193			
14	60	119269.018609193			
15	65	119269.018609193			
16	70	119078.493020360			
17	75	119269.018609193			
		Phase A	Phase B	Phase C	
ГОТОВО					

Рисунок 2.32 – Перенесені значення з середовища Matlab до Microsoft Excel

**Важливо!** При перенесенні даних до Excel, всі значення напруги буде занесено з крапками (розділення дробових частин), а повинно бути з комами, тому подальший розрахунок неможливий (впливає помилка «ДЕЛ/0»). Необхідно скористатись функцією «Найти и заменить», перед якою виділяємо масив значень напруги. За допомогою цієї функції тиснемо «Заменить» і вибираємо заміну з крапки на кому, тиснемо «Заменить всё».

## 2.4 Оцінка імовірнісних характеристик (математичних очікувань і дисперсії) напруги на шинах ТП.

Після успішного перенесення значень напруги з Matlab до середовища Microsoft Excel необхідно провести розрахунок імовірнісних характеристик, таких як математичне очікування, дисперсія та середньоквадратичне відхилення. Перед цим було розраховано величини статистичного аналізу первинної напруги, яка була використана в моделі (п. 1.3), тепер постає задача розрахувати імовірнісні характеристики безпосередньо на виході з дослідження.

З пункту 1.3 відомий алгоритм зручного розрахунку, результати розрахунку приведені нижче (Рис. 2.33; Рис. 2.34; Рис. 2.35).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	Voltage		МатОч(A)	Дис (A)	СерКвВід(A)	
2	0	119 459,54		118 379,13	1313259	1145,975	
3	5	119 459,54					
4	10	119 459,54					
5	15	119 459,54					
6	20	119 459,54					
7	25	119 459,54					
8	30	119 459,54					
9	35	119 459,54					
10	40	119 459,54					
11	45	119 269,02					
12	50	119 269,02					
13	55	119 269,02					
14	60	119 269,02					
15	65	119 269,02					
16	70	119 078,49					
17	75	119 269,02					

Phase A Phase B Phase C

ГОТОВО

Рисунок 2.33 – Розрахунок статистичного аналізу первинної напруги на шинах 110 кВ тягової підстанції, фаза А

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	Voltage		МатОч(А)	Дис (А)	СерКвВід(А)	
2	0	114315,35		117 444,33	5631760	2373,133	
3	5	114696,40					
4	10	114886,93					
5	15	114505,88					
6	20	114505,88					
7	25	114315,35					
8	30	114315,35					
9	35	114505,88					
10	40	114696,40					
11	45	114886,93					
12	50	115077,46					
13	55	115267,98					
14	60	115458,51					
15	65	115458,51					
16	70	115458,51					
17	75	115458,51					

Phase A
Phase B
Phase C
+

ГОТОВО

Рисунок 2.34 – Розрахунок статистичного аналізу первинної напруги на шинах 110 кВ тягової підстанції, фаза В

	A	B	C	D	E	F
1	Time	Voltage		МатОч(А)	Дис (А)	СерКвВід(А)
2	0	121936,38		120 318,84	1473398	1213,836
3	5	121936,38				
4	10	121745,85				
5	15	121936,38				
6	20	121745,85				
7	25	121936,38				
8	30	122126,90				
9	35	121936,38				
10	40	121936,38				
11	45	121745,85				
12	50	121745,85				
13	55	121745,85				
14	60	121555,33				
15	65	121555,33				
16	70	121555,33				
17	75	121555,33				

Phase A
Phase B
Phase C
+

ГОТОВО

Рисунок 2.35 – Розрахунок статистичного аналізу первинної напруги на шинах 110 кВ тягової підстанції, фаза С

З розрахунку статистичного аналізу детермінованої напруги на вході моделювання та на виході видно, що різниці між цими результатами немає, похибка не більше 0,1%. Більш важливо підкреслити, що середнє значення первинної напруги (мат. очікування), на всіх трьох фазах, не нижче 117 кВ, що на 2 кВ більше ніж повинна бути середня напруга ( $U_{сер} = 115$  кВ).

### **3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В КОЛАХ ТП З ОДНОФАЗНИМИ ПОНИЖУВАЛЬНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

#### **3.1 Імітаційна модель однофазного трансформатора.**

Математичне моделювання, за даною темою дипломної магістерської роботи, передбачає в собі дослідження трьохфазного і однофазного трансформаторів. Вище було досліджено моделювання трифазного трансформатора, далі буде дослідження однофазних трансформаторів.

Для розширення меж вимірювання приладів змінного струму застосовуються вимірювальні трансформатори напруги і струму. Такі трансформатори відокремлюють кола високої напруги від вимірювальних кіл, що забезпечує безпеку обслуговування приладів і спрощує ізоляцію струмопровідних частин. Вмикання вимірювальних трансформаторів дає можливість користуватися стандартними амперметрами з номінальним значенням 5 або 1 А і вольтметрами з номінальним значенням 100 В. Такі трансформатори застосовуються також в колах захисних реле.

Трансформатори струму і напруги застосовуються, по-перше для ізоляції вимірювальних приладів і апаратів автоматичного захисту від кола високої напруги, що забезпечує безпеку вимірювання, і, по-друге, для розширення меж вимірювання вимірювальних приладів.

Трансформатори напруги застосовуються для включення вольтметрів, частотомірів і кіл напруги інших вимірювальних приладів (ватметрів, лічильників, фазометрів) і реле; трансформатори струму — для вмикання амперметрів і кіл струму вимірювальних приладів і реле.

**Трансформатори** струму за принципом дії не відрізняються від звичайних силових трансформаторів, які служать для перетворення змінного струму, але працюють вони в режимі, який близький до короткого замикання, що і дозволяє, як це буде наведено далі, застосовувати їх для вимірювань. За допомогою трансформаторів струму можна виконувати вимірювання в колах зі струмами від частин ампера — до десятків тисяч ампер, користуючись

амперметрами, ватметрами і лічильниками, що мають завжди один і той же стандартний номінальний струм 5 А (деколи 1 А). Це суттєво скорочує різноманітність приладів, що виготовляються, за межами вимірювань.

Використання трансформаторів струму значно спрощує монтаж розподільчих пристроїв низької напруги, оскільки при цьому відпадає необхідність підводити шини великого перерізу до затискачів приладів, скорочується витрата міді. В мережах високої напруги застосування трансформаторів струму дає змогу відділити і надійно ізолювати коло вимірювального приладу від кола високої напруги.

**Трансформатори напруги** за принципом дії є звичайними трансформаторами змінного струму. Такий трансформатор подібний до силового трансформатора невеликої потужності. На противагу до трансформатора струму трансформатор напруги вмикається в коло навантаження не послідовно, а паралельно до нього, тобто на затискачі його первинної обмотки подається напруга, що підлягає вимірюванню.

Працює він у режимі, який близький до холостого ходу, коли втрати напруги в обмотках є дуже незначні, внаслідок чого напруга на вторинних затискачах є строго пропорційна напрузі, яка підведена до первинної обмотки, і майже не залежить від навантаження у вторинному колі, якщо це навантаження досить мале. Застосування трансформаторів напруги дозволяє ізолювати електричні кола вольтметрів, ватметрів, лічильників від кола високої напруги і створює можливість стандартизації номінальної напруги вказаних вимірювальних пристроїв. Для даного досліджування, як зразок, використовуватимуться однофазні трансформатори струму ТОГ-110 і трансформатори напруги НОГ-110-ПУ1.

Імітаційна модель однофазних трансформаторів струму і напруги (Рис 3.1) має вигляд блоків, під'єднаних до шин 110 кВ тягової підстанції.

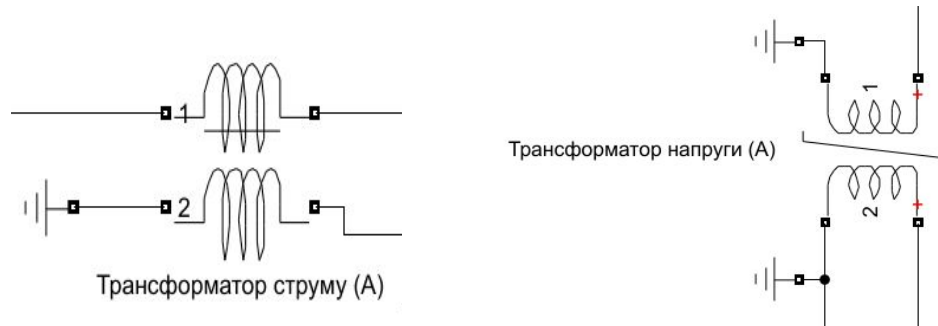


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд блоків трансформаторів струму і напруги

Розглянемо блок однофазного трансформатора струму, який можна знайти в бібліотеці Library Browser і позначається як Mutual Inductance. Проаналізуємо його параметри для подальшого дослідження (Рис 3.2).

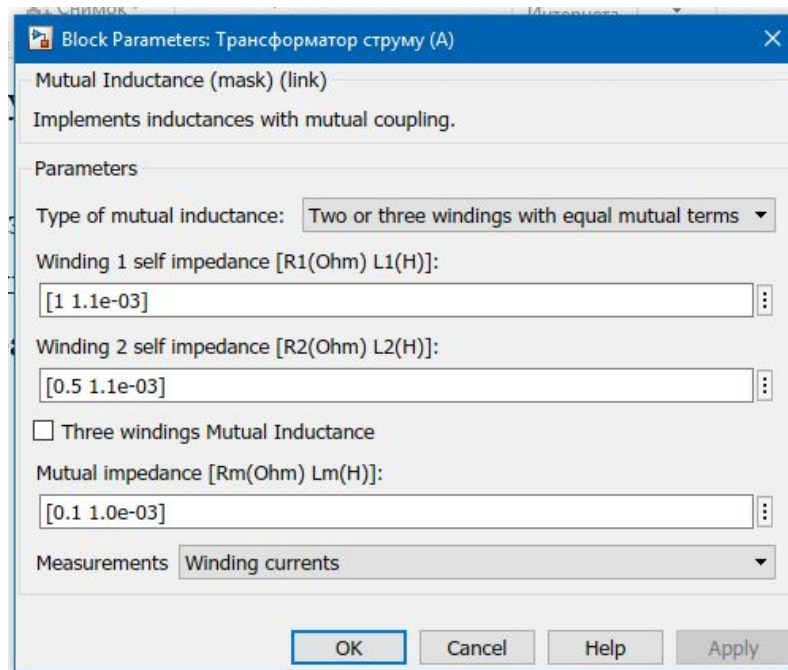


Рисунок 3.2 – Параметри трансформатора струму

Основні характеристики блоку описані нижче:

Type of mutual inductance - Тип взаємної індуктивності;

Winding 1 self-impedance [R1(Ohm) L1(H)] - Обмотка 1 самоіндукції [R1 (Ом) L1 (Гн)];

Winding 2 self-impedance [R2(Ohm) L2(H)] - Обмотка 1 самоіндукції [R2(Ом) L2(Гн)];

Mutual impedance [Rm(Ohm) Lm(H)] – Параметри взаємної індукції;

Measurements – Параметри виміру.

Трансформатор напруги, в свою чергу позначається Saturable Transformer в бібліотеці Library Browser та його блок має наступні параметри (Рис. 3.3).

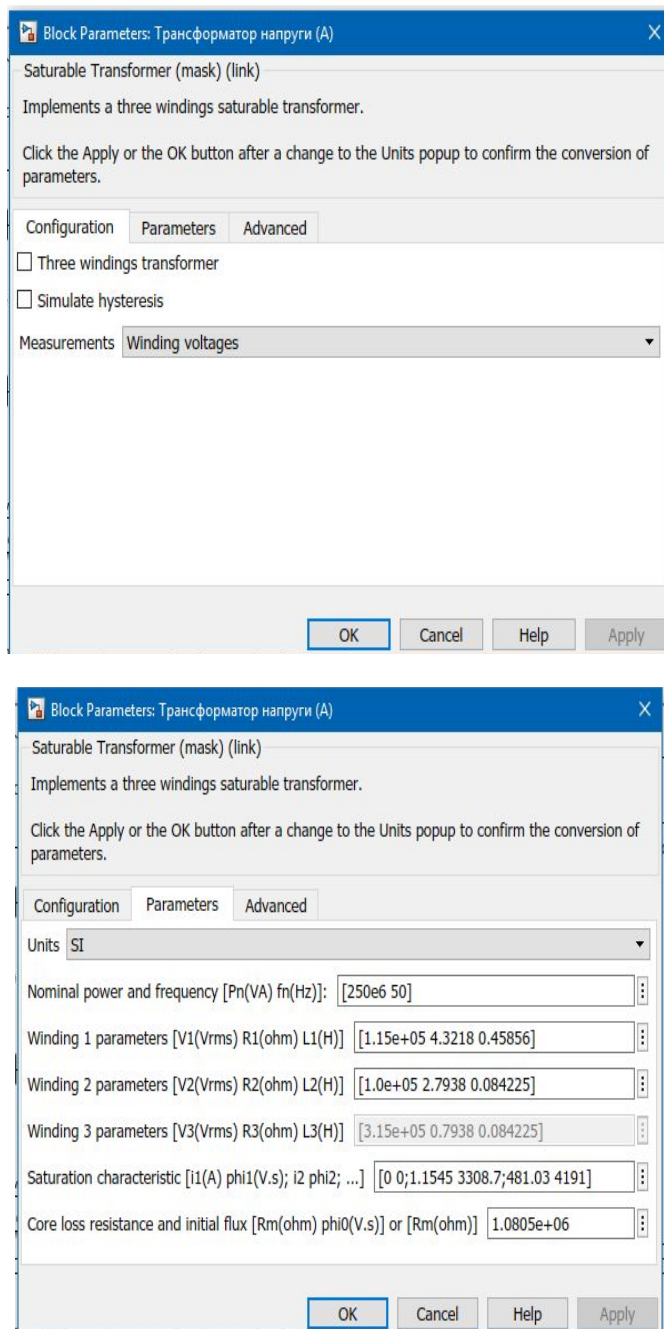


Рисунок 3.3 – Параметри трансформатора напруги

Three windings transformer – Трансформатор з трьома обмотками;

Simulate hysteresis – Симуляція гістерезису;

Measurements – Параметри виміру;

Units – Одиниці виміру;

Nominal power and frequency [ $P_n(\text{VA})$   $f_n(\text{Hz})$ ] – Номінальна потужність і частота (ВА і Гц відповідно);

Winding 1 parameters [ $V_1(\text{V}_{\text{rms}})$   $R_1(\text{ohm})$   $L_1(\text{H})$ ] – Параметри первинної обмотки;

Winding 2 parameters [ $V_2(\text{V}_{\text{rms}})$   $R_2(\text{ohm})$   $L_2(\text{H})$ ] – Параметри вторинної обмотки;

Saturation characteristic [ $i_1(\text{A})$   $\phi_1(\text{V.s})$ ;  $i_2$   $\phi_2$ ; ...] – Характеристика насичення;

Core loss resistance and initial flux [ $R_m(\text{ohm})$   $\phi_0(\text{V.s})$ ] or [ $R_m(\text{ohm})$ ] – Стійкість до втрат сердечника та початковий потік [ $R_m$  (Ом)  $\phi_0$  (V.s)] або [ $R_m$  (Ом)]

**3.2 Розрахункова схема і модель ТП з подвійною трансформацією первинної напруги однофазних трансформаторів.**

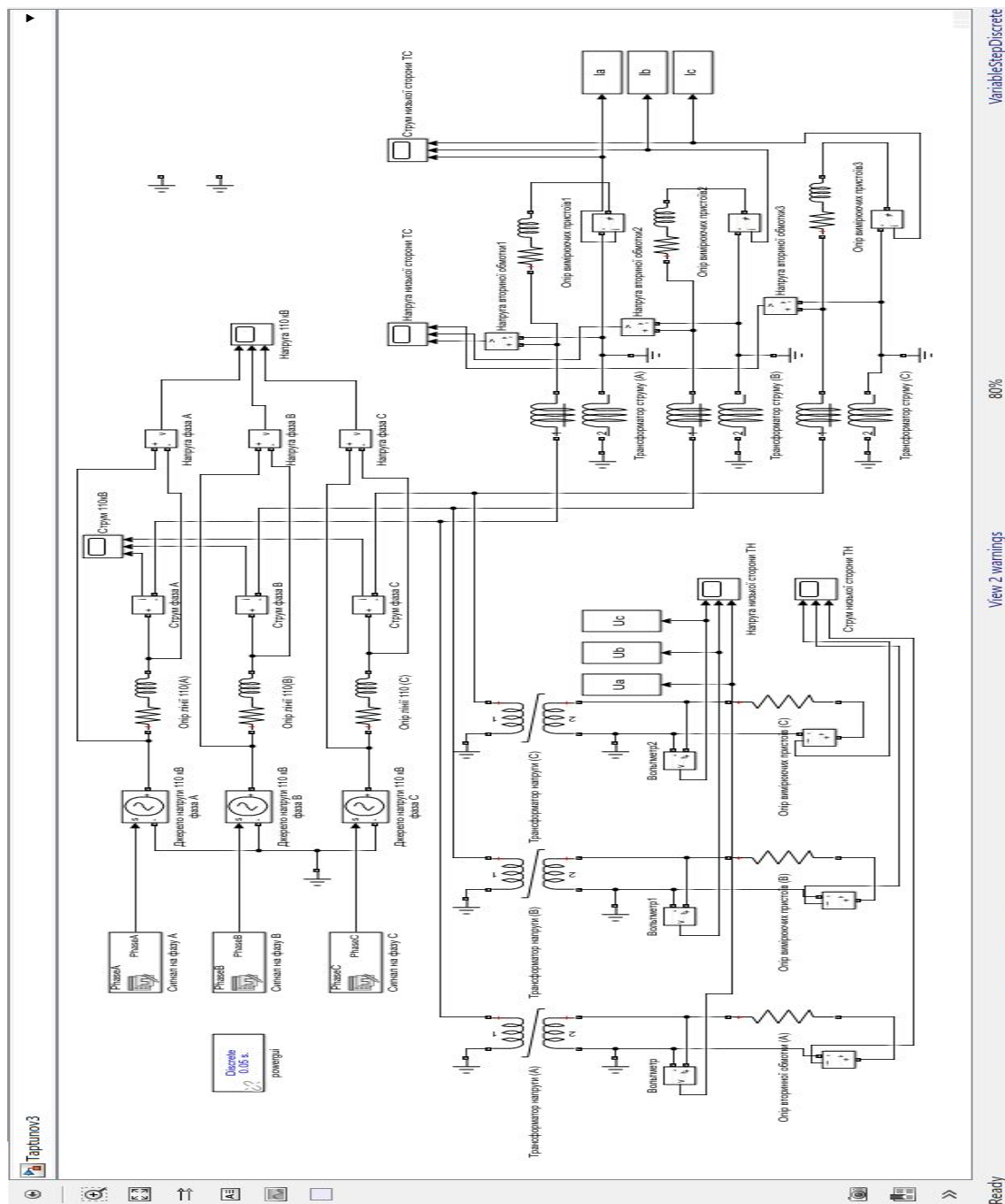


Рисунок 3.4 –Імітаційна модель приєднання однофазних трансформаторів струму і напруги до шин 110 кВ

З моделі трьохфазного трансформатора (перша схема Matlab) використаємо частину, яка відповідає за внесення в дослідження детермінованих значень первинної напруги на шини підстанції. В досліджуванні однофазних трансформаторів прийматимуть участь вимірювальні трансформатори напруги і струму, в свою чергу вони будуть підключені до шин ТП 110 кВ (Рис. 3.5).

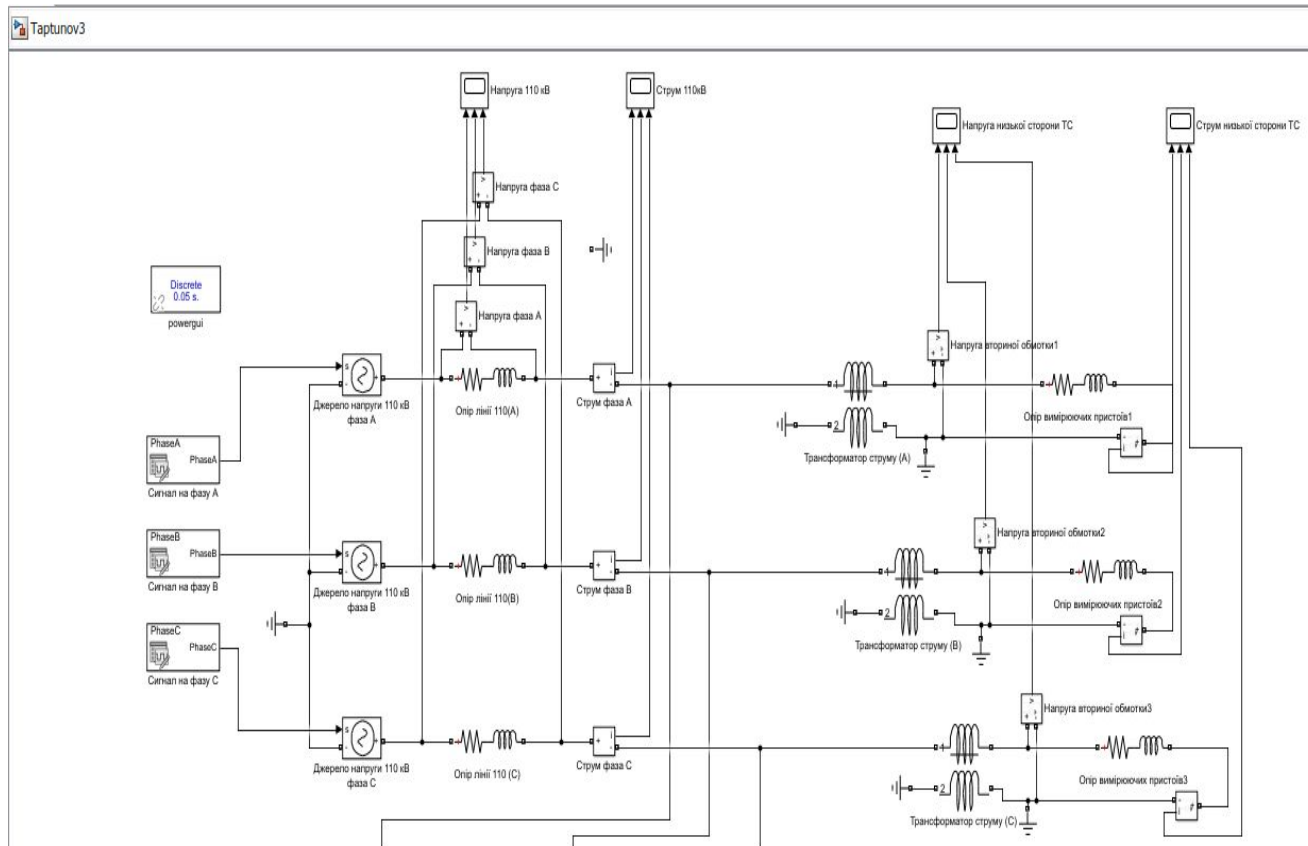


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд підключення блоку трансформаторів струму до кожної фази шин 110 кВ

Параметри ЛЕП-110 кВ відомо з дослідження трифазного трансформатора (першої схеми, п. 2.2), тобто ця частина схеми залишилась не змінною, включаючи значення детермінованої первинної напруги. З ЛЕП надходить живлення на трансформатори струму, враховуючи опір самої лінії. В свою чергу вторинна обмотка ТС заземлена і в колі підключення вторинної обмотки враховується опір вимірювальних приладів, які живляться з цього електричного кола. До кожного блока трансформатора струму підключена вимірювальна частина, для подальшого розрахунку показників вторинних обмоток.

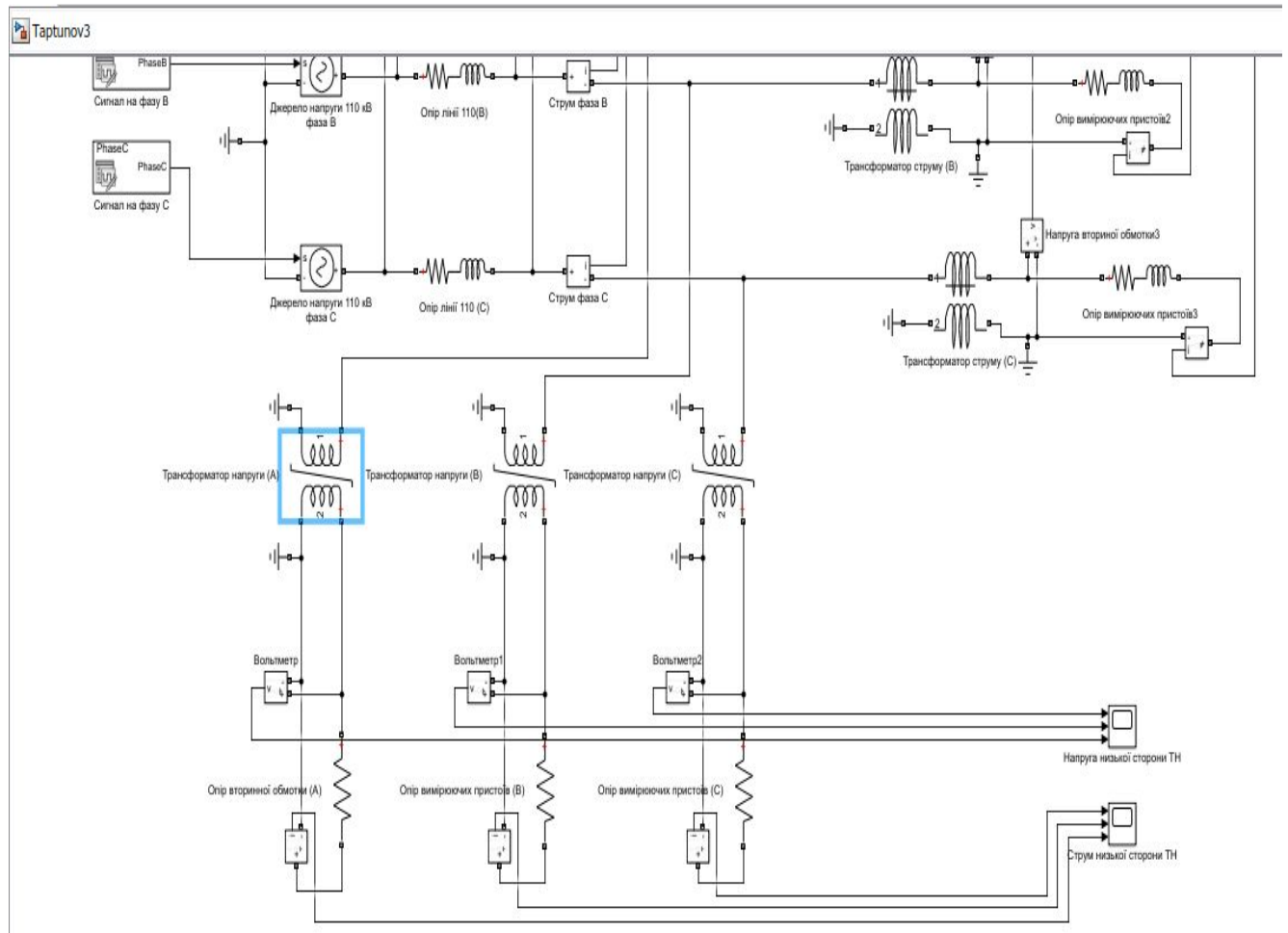


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд підключення блоку трансформаторів напруги до кожної фази шин 110 кВ

Підключені трансформатори напруги до кожної фази мають заземлену вторинну обмотку. Блоки ТН мають вимірну частину, як і в блоках ТС.

### 3.3 Чисельні розрахунки напруги на вторинних обмотках ТС і ТН при напрузі 110 кВ в точках приєднання

Для того, щоб вилучити розрахунки струму і напруги на вторинних обмотках однофазних трансформаторів переходимо до відповідних осцилографів (Рис. 3.7).

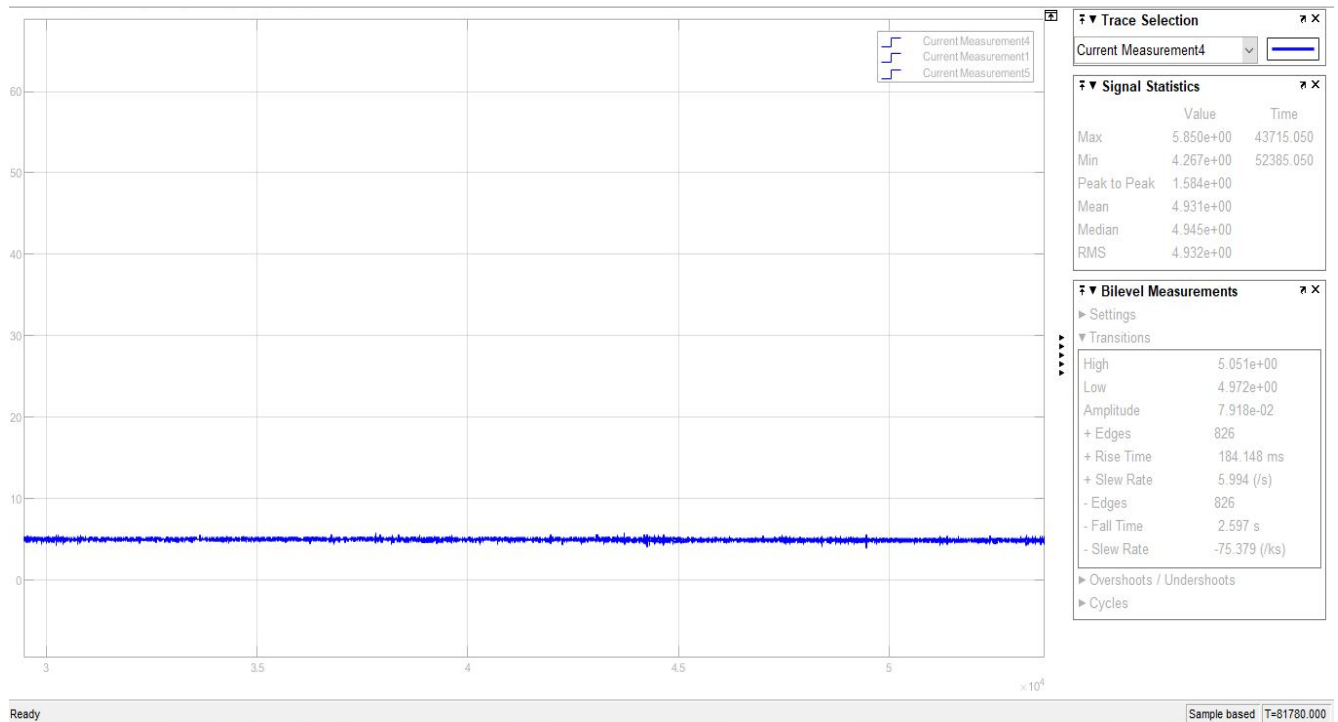


Рисунок 3.7 – Розрахунок струму вторинної обмотки трансформатора струму у часі (фаза А)

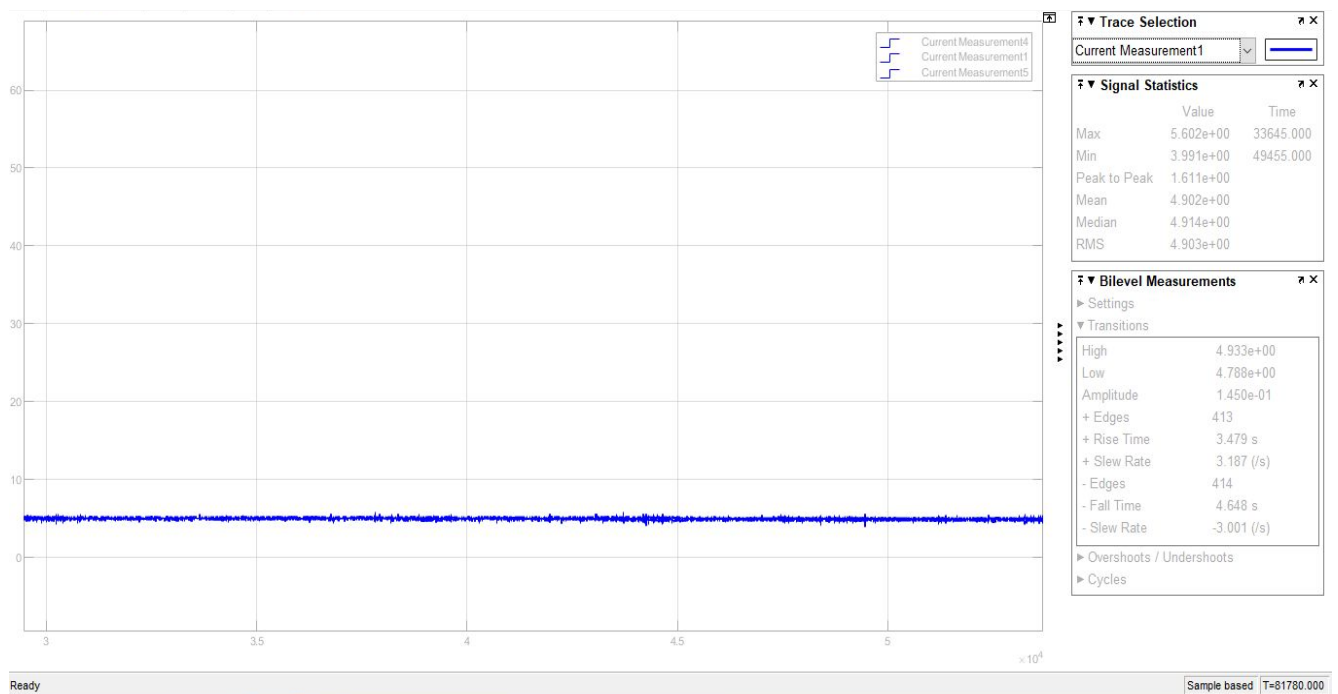


Рисунок 3.8 – Розрахунок струму вторинної обмотки трансформатора струму у часі (фаза В)

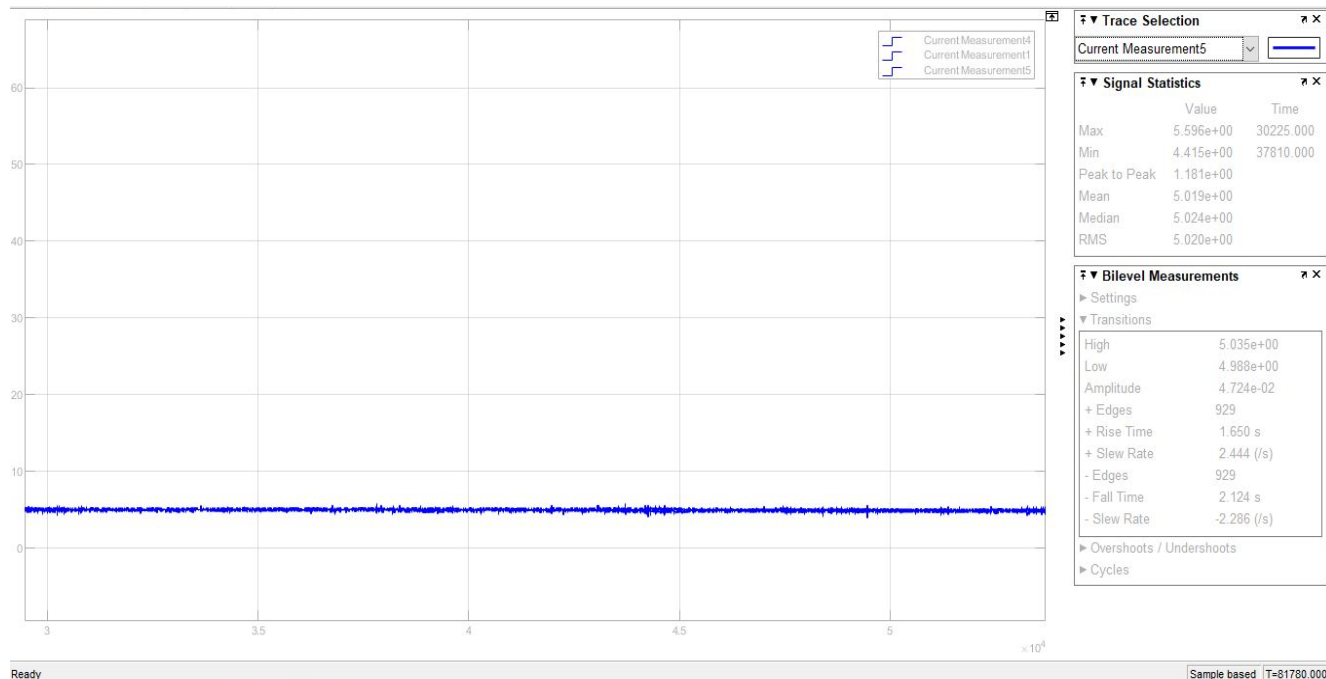


Рисунок 3.9 – Розрахунок струму вторинної обмотки трансформатора струму у часі (фаза С)

Необхідно підкреслити, те, що значення струму повинно бути максимально близьким до номінального (5 А), для нормальної роботи приладів, підключених до вторинних обмоток трансформаторів струму. Після оцінки цих значень можна робити певні висновки, але і зараз можна підкреслити, що середнє значення струму приблизно 4,93; 4,90; 5,019 А (відповідно фазам А,В,С).

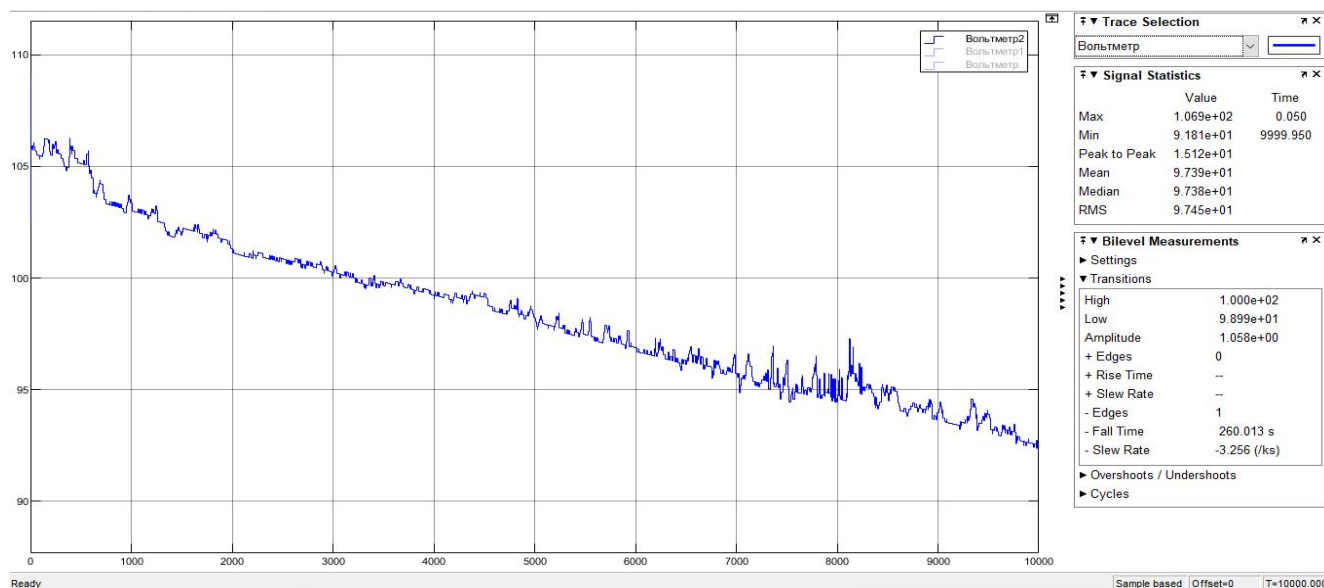


Рисунок 3.10 – Розрахунок напруги вторинної обмотки трансформатора напруги у часі  
(фаза А)

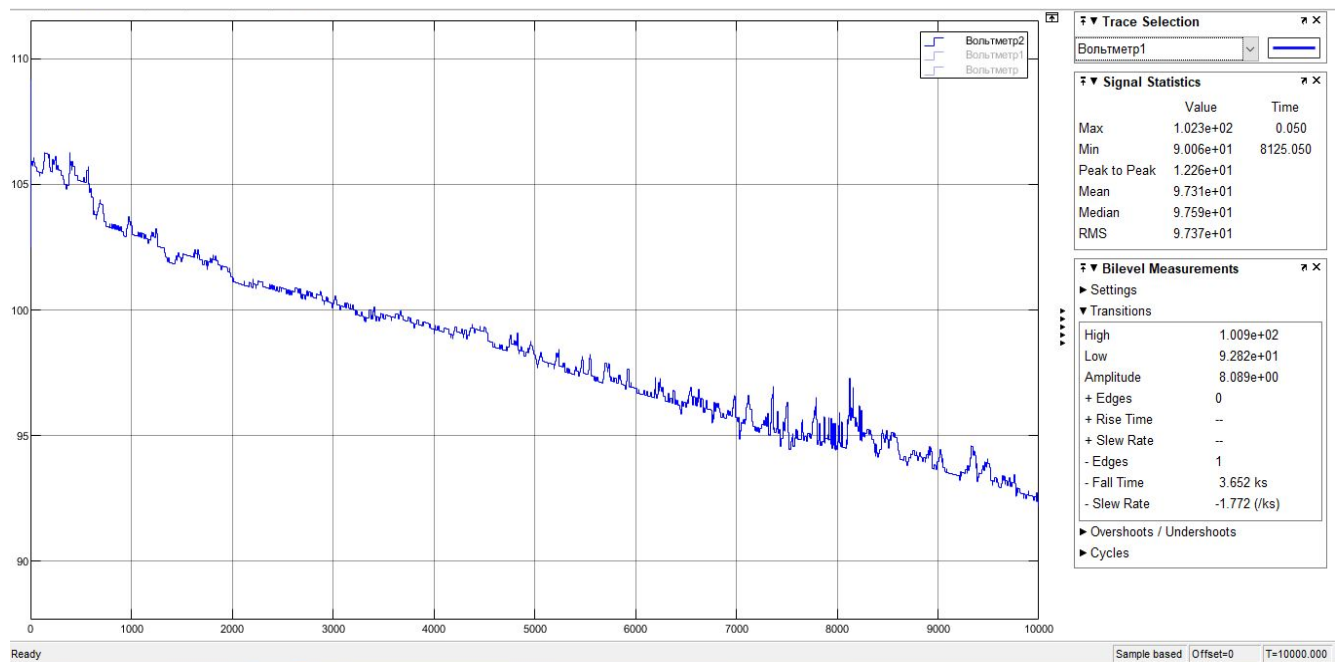


Рисунок 3.11 – Розрахунок напруги вторинної обмотки трансформатора напруги у часі  
(фаза В)

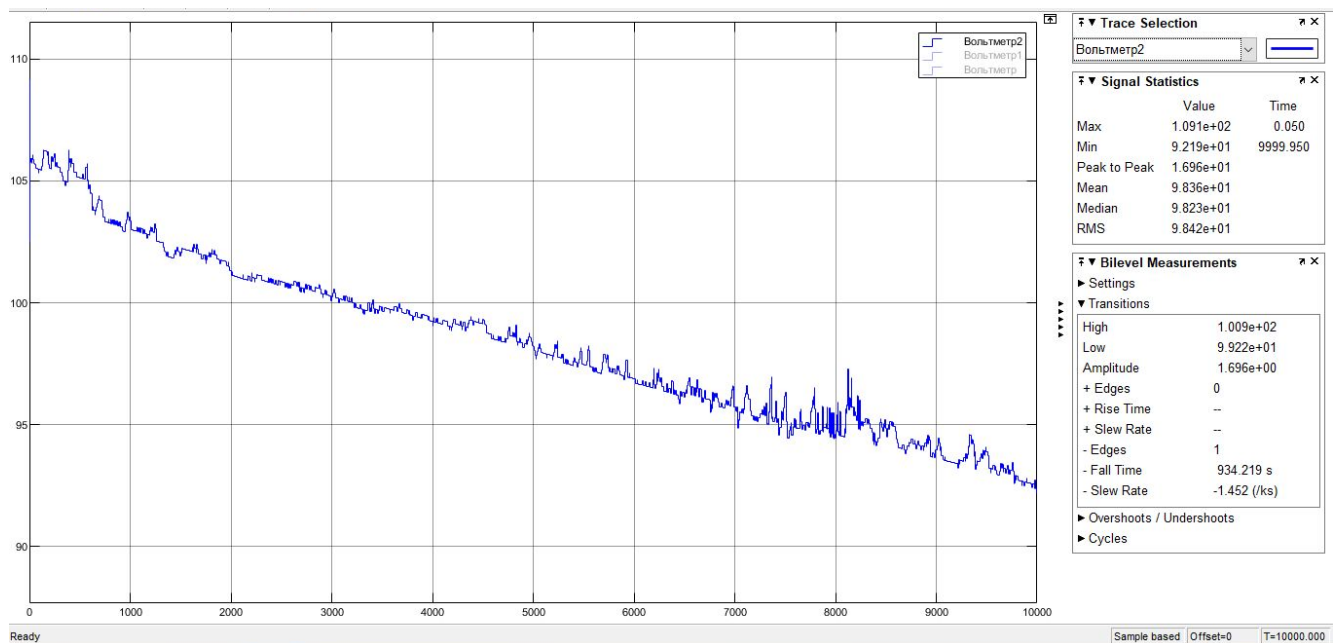


Рисунок 3.12 – Розрахунок напруги вторинної обмотки трансформатора напруги у часі  
(фаза С)

В трансформаторах напруги, обраного типу, як вище було підкреслено, номінальна напруга повинна бути 100 В, тому на протязі доби видно незадовільну поведінку вторинної напруги, це можна пояснити не стабільним значенням первинної напруги або характеристиками насичення, які необхідно калібрувати..

### **3.4 Оцінка імовірнісних характеристик (математичних очікувань і дисперсії) однофазних трансформаторів напруги та струму вторинних обмоток**

Подібно до попереднього розрахунку трифазного трансформатора (п. 2.4) необхідно виконати розрахунок статистичного аналізу параметрів однофазних трансформаторів. Просто підключаємо елементи To Workspace до необхідних осцилографів (Рис. 3.13) і отримаємо необхідні значення для подальшого розрахунку в середовищі Microsoft Excel.

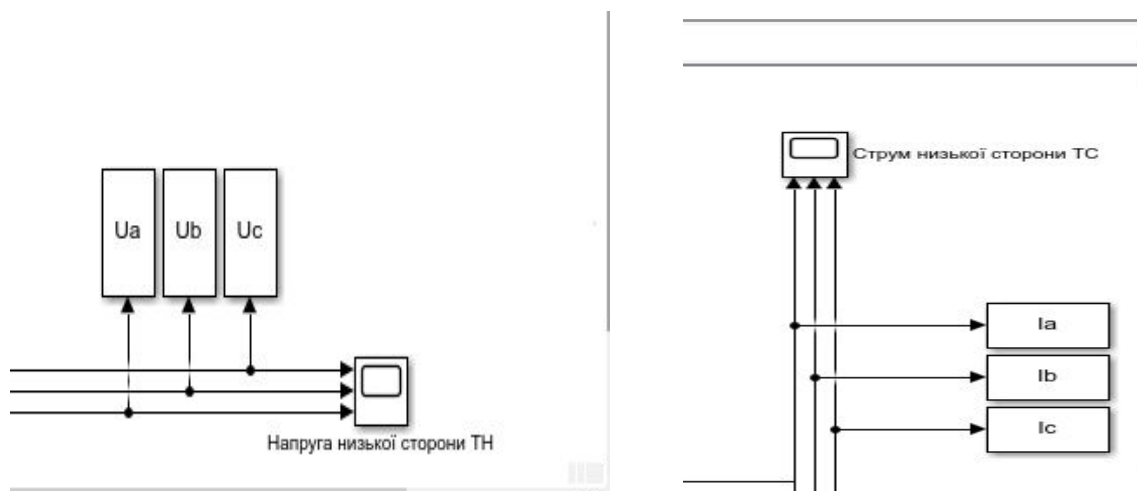


Рисунок 3.13 – Підключення елементів To Workspace до осцилографів вторинних обмоток трансформаторів напруги і струму.

Після отриманих даних розраховуємо математичне очікування, дисперсію і середньоквадратичне відхилення параметрів трансформаторів напруги і струму. Нижче будуть приведені результати розрахунку статистичного аналізу трансформаторів струму кожної фази (Рис. 3.14; Рис. 3.15; Рис. 3.16)

	A	B	C	D	E	F
1	фаза А		МатОч(А)	Дис (А)	СерКвВід(А)	
2	ЧАС	Струм	4,92	0,0077668	0,088129	
3	0	4,78				
4	5	4,952792				
5	10	5,008603				
6	15	5,007459				
7	20	5,006051				
8	25	5,004686				
9	30	5,003362				
10	35	5,002078				
11	40	5,000834				
12	45	4,891556				
13	50	4,990586				
14	55	4,989412				
15	60	4,988312				
16	65	4,987247				
17	70	4,878143				
TC A			TC B	TC C	TH A	TH B
ГОТОВО						

Рисунок 3.14 – Розрахунок статистичного аналізу струму вторинної обмотки трансформатора струму, фаза А

	A	B	C	D	E	F
1	фаза В		МатОч(А)	Дис (А)	СерКвВід(А)	
2	ЧАС	Струм	4,88	0,034876	0,18675	
3	0	5,089				
4	5	4,953056				
5	10	4,909505				
6	15	4,592345				
7	20	4,791652				
8	25	4,6824				
9	30	4,781533				
10	35	4,888529				
11	40	4,895399				
12	45	4,90234				
13	50	4,90931				
14	55	4,91631				
15	60	4,923338				
16	65	4,822321				
17	70	4,821531				
TC A			TC B	TC C	TH A	TH B
ГОТОВО						

Рисунок 3.15 – Розрахунок статистичного аналізу струму вторинної обмотки трансформатора струму, фаза В

	A	B	C	D	E	F
1	фаза С		МатОч(А)	Дис (А)	СерКвВід(А)	
2	ЧАС	Струм	5,00	0,015557	0,12473	
3	0	4,8941				
4	5	5,056733				
5	10	5,00786				
6	15	5,214869				
7	20	5,005019				
8	25	5,211835				
9	30	5,218218				
10	35	5,008584				
11	40	5,107463				
12	45	4,998032				
13	50	5,096952				
14	55	5,095671				
15	60	4,986398				
16	65	5,085432				
17	70	5,084261				
		TC A	TC B	TC C	TH A	TH B
		ГOTOBO				

Рисунок 3.16 – Розрахунок статистичного аналізу струму вторинної обмотки трансформатора струму, фаза С

З даного розрахунку можна підкреслити відхилення від стабільного значення струму на фазах А та В, але не значні, фаза А – 0,08 А та фаза В – 0,12 А. Значення струму були досліджені на протязі добі, з кроком 5 секунд. Результат відносно довільний.

Нижче будуть приведені розрахунки параметрів трансформатора напруги (Рис. 3.17; Рис. 3.18; Рис. 3.19)

	A	B	C	D	E	F
1	фаза А		МатОч(А)	Дис (А)	СерКвВід(А)	
2	ЧАС	Напруга	97,39	11,20739	3,347744	
3	0	100,394				
4	5	103,763				
5	10	103,7608				
6	15	103,7546				
7	20	103,7484				
8	25	103,7422				
9	30	103,736				
10	35	103,7298				
11	40	103,7236				
12	45	103,5573				
13	50	103,5457				
14	55	103,5395				
15	60	103,5333				
16	65	103,5271				
17	70	103,3608				
18	75	103,5094				
19	80	103,5086				
20	85	103,5024				
21	90	103,3361				
22	95	103,3245				
23	100	103,3184				
24	105	103,3123				
		TC A	TC B	TC C	TH A	TH B
		ГOTOBO				

Рисунок 3.17 – Розрахунок статистичного аналізу напруги вторинної обмотки трансформатора напруги, фаза А

1	фаза A		МатОч(A)	Дис (A)	СерКвВід(A)	
2	ЧАС	Напруга	97,32	10,11459	3,180344	
3	0	96,07081				
4	5	99,61492				
5	10	99,78368				
6	15	99,46289				
7	20	99,44619				
8	25	99,28012				
9	30	99,2688				
10	35	99,42298				
11	40	99,58254				
12	45	99,7421				
13	50	99,90165				
14	55	100,0612				
15	60	100,2207				
16	65	100,2201				
17	70	100,2141				
18	75	100,2082				
19	80	100,0421				
20	85	100,1908				
21	90	100,0301				
22	95	100,0187				
23	100	100,0127				

Рисунок 3.18 – Розрахунок статистичного аналізу струму вторинної обмотки трансформатора струму, фаза В

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	фаза A		МатОч(A)	Дис (A)	СерКвВід(A)			
2	ЧАС	Напруга	98,36	11,92833	3,453741			
3	0	102,4755						
4	5	105,9143						
5	10	105,752						
6	15	105,9004						
7	20	105,7393						
8	25	105,8878						
9	30	106,0469						
10	35	105,8859						
11	40	105,8742						
12	45	105,7077						
13	50	105,696						
14	55	105,6897						
15	60	105,5233						
16	65	105,5116						
17	70	105,5053						
18	75	105,499						
19	80	105,4927						
20	85	105,4864						
21	90	105,3199						
22	95	105,4684						
23	100	105,4675						

Рисунок 3.19 – Розрахунок статистичного аналізу струму вторинної обмотки трансформатора струму, фаза С

По дослідженню однофазних трансформаторів напруги можна підкреслити, що математичного очікування напруги і інші характеристики задовільняє очікуваний результат.

## ВИСНОВОК

В даній магістерській роботі викладено результати дослідження математичного моделювання перетворення електричної енергії на тяговій підстанції змінного струму. Головними об'єктами імітаційної моделі на ТП є трифазний силовий трансформатор ТДТНЖ/40000-110-У1, однофазні вимірювальні трансформатори напруги НОГ-110-ПУ1 і трансформатори струму ТОГ-110.

Для імітаційного моделювання були використані детерміновані значення первинної напруги та характеристики використаних трансформаторів. Отримано максимально близькі значення до бажаних з даного дослідження, але, на думку автора можливо вдосконалити використану модель та отримати більш точні розрахунки..

По-перше слід зазначити, що моделювання трифазного силового трансформатора, однофазних трансформаторів струму та трансформаторів напруги, в точках приєднання первинної детермінованої напруги 110 кВ, завершилось відносно успішно. По-друге підкреслимо, що при дослідженні використовуваних трансформаторів стало відомо, що є простір для розвитку цієї схеми.

Електричні кола розглядуваних систем являють собою активно індуктивні ( $R - L$ ) кола. Для використовуваних кіл, при моделюванні, встановлено час дослідження 24 години, з кроком в 5 секунд. Тому зі збільшенням відхилу первинної напруги від оптимальної (номінальної) у часі, отримано на вторинних обмотках всіх трансформаторів не завжди стабільні значення струмів та напруги. Рекомендовано в подальших дослідах підстанцій змінного струму використовувати більш ускладнене і досконале моделювання.

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Тяговые и трансформаторные подстанции» / Прохорский А.А. УДК 621.331 М: Транспорт. 1983. – 496 с.
2. Технічна документація тягової підстанції змінного струму ЕЧЕ-27, Одеської залізниці.
3. «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» / В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков. УДК 621.31:537.8 (0.75.8) ББК 31.2 С 15. 2017. – 255 с.
4. «Моделирование электротехнических устройств в MATLAB» / И.В. Черных. 2008. – 288с.
5. «Метод імовірнісного аналізу випадкових електромагнітних процесів» / Міщенко Т. М. – к.т.н., доцент (ДНУЗТ). УДК 612.332.3 : 629.423. – 67 с.
6. «Моделирование переходных процессов в двух трансформаторной подстанции» / Абазоков И.А., Белойванов М.С., Притоманов В.В. / Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 3.; URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17199>