

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О.І. Толочко
(ініціали, прізвище)

“11” червня 2020 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка (Системи управління виробництвом і розподілом
електроенергії)

на тему: «Дослідження еквівалентності розрахунку режимів алгебраїчним та
символічним методами»

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕК-г61-1
(шифр групи)

Савюк Кіріл Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник к.т.н., доц., Банін Д.Б.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з питань алгоритмізації та програмування

(назва розділу)

с.н.с., Банін М.Д.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації енергосистем

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О.І. Толочко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«11» червня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

_____ Савюку Кірілу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Дослідження еквівалентності розрахунку режимів алгебраїчним та символічним методами» _____,

керівник проекту к.т.н., доц., Банін Дмитро Борисович _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «28» квітня 2020 р. №1048-с

2. Термін подання студентом проекту «11» червня 2020 р. _____

3. Вихідні дані по проекту: технічна документація по промисловому комп'ютерному комплексу РАОТВ; вихідні дані підстанції 110/35/10 кВ; загальна мережа енергосистеми 330/110/35 кВ; пакет лабораторних робіт по курсу «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач».

4. Зміст пояснювальної записки: Розробка комплексної розрахункової схеми 330/110/35/10 кВ, інтерактивний розрахунок, оптимізація та аналіз режиму, системний розрахунок струмів короткого замикання, Дослідження еквівалентності розрахунку режимів алгебраїчним методом миттєвих значень та символічного методу у комплексному просторі.

5. Перелік графічного матеріалу: (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентація, тощо)

- 1) Однолінійна схема ПС 110/35/10 кВ.
- 2) Розрахунки і оптимізація режиму.
- 3) Системний розрахунок струмів короткого замикання.
- 4) Порівняння символічного та алгебраїчного методів.

6. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-2	с.н.с., Банін М.Д.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Робота з методичним матеріалом	21.10.2019	
2	Розробка розрахункової схеми	11.11.2019	
3	Розрахунок режиму РАОТВ, L_АПЕЗ	25.11.2019	
4	Оптимізація розподілу Q, L_АПЕЗ	11.12.2019	
5	Системний розрахунок струмів к.з.	25.12.2019	
6	Формалізація задач дослідження	10.02.2020	
7	Моделі і функції синусоїдального струму	02.03.2020	
8	Розробка програми. Порівняння методів	06.04.2020	
9	Оформлення пояснювальної записки та листів (плакатів)	18.05.2020	
10	Попередній захист	11.06.2020	

Студент

(підпис)

К.С. Савюк
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Д.Б. Банін
(ініціали, прізвище)

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	1	
2	A4	141.6111.009.ДБ	Пояснювальна записка	69	
3	A1	141.6111.009.ТК1	Однолінійна схема ПС 110/35/10 кВ	1	
4	A1	141.6111.009.ТК2	Розрахунки і оптимізація режиму	1	
5	A1	141.6111.009.ТК3	Системний розрахунок струмів короткого замикання	1	
6	A1	141.6111.009.ТК4	Порівняння символічного та алгебраїчного методів	1	

					141.6111.009.ДБ									
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломного проекту					Літ.	Аркуш	Аркушів		
Розробив		Савюк К.С.		11.06.20								3	1	
Перевірив		Банін Д.Б.		11.06.20						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-г61-1				
Реценз.														
Н.контроль		Настенко Д.В.		11.06.20										
Затвердив		Толочко О.І.		11.06.20										

Пояснювальна записка

до дипломного проекту

на тему: «Дослідження еквівалентності розрахунку режимів алгебраїчним та символічним методами»

РЕФЕРАТ

В бакалаврській роботі на тему «Дослідження еквівалентності розрахунку режимів алгебраїчним та символічним методами» можливо виділити дві частини: перша – розрахункова (розділ 1), та друга – дослідницька (розділ 2).

Об'єктами дослідження є індивідуальна підстанція 110/35/10 кВ, постачальна та розподільна мережі 330/110/35 кВ.

Предметом дослідження є невідомі режимні характеристики (напруги, втрати, регулюючі значення реактивної потужності, струми короткого замикання та інше), а також параметри розрахункових моделей синусоїдального струму, методи еквівалентування, методи рішення нелінійних електроенергетичних рівнянь та інше.

Мета роботи – підтвердити рівень інженерної кваліфікації бакалаврської роботи згідно індивідуального завдання, виконати розробку для алгебраїчного метода розрахунку режиму математичної моделі з трьома головними компонентами мережі синусоїдального струму (джерело з постійною напругою, з ЛЕП, де наявні втрати потужності, і з споживачем, що має регульовану компенсацію реактивного опору). Реалізувати аналіз адекватності з символічним методом розрахунку.

Бакалаврська робота містить 70 сторінок, 5 таблиць, 38 ілюстрацій, 2 додатки, 10 літературних посилань та 4 листи графічної частини. Для реалізації завдання задіяно: учбовий комп'ютерний комплекс L_APEZ, промислові електроенергетичні комплекси PAOTB, Z_REGIM, OPTIM.QT.

Перелік ключових слів: РОЗРАХУНОК УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ, РОЗРАХУНКОВА СХЕМА, МОДЕЛІ НАВАНТАЖЕНЬ, МЕТОД НЬЮТОНА, ОПТИМІЗАЦІЯ (КОМПЕНСАЦІЯ) РЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ, МАТРИЦІ ЯКОБІ, ГЕСЕ, ПРОВІДНОСТЕЙ ТА ОПОРУ, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, ГРАФІК НАВАНТАЖЕНЬ, МЕТОДИ Z_REGIM, АЛЕГБРАЇЧНИЙ ТА СИМВОЛІЧНИЙ МЕТОДИ, ОПЕРАТОРИ СИСТЕМИ З ПОСТАЧАННЯМ (ОСП) ТА РОЗПОДІЛУ (ОСР) ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						5
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

In the bachelor's thesis on "Research of equivalence of calculation of modes by algebraic and symbolic methods" it is possible to allocate two parts: the first - settlement (section 1), and the second - research (section 2).

The objects of research are an individual substation 110/35/10 kV, supply and distribution networks 330/110/35 kV.

The subject of the study are unknown regime characteristics (voltages, losses, regulating values of reactive power, short-circuit currents, etc.), as well as parameters of calculated models of sinusoidal current, equivalence methods, methods for solving nonlinear electric equations and more.

The purpose of the work is to confirm the level of engineering qualification of the bachelor's thesis according to the individual task, to develop a mathematical model for the algebraic method of calculating the mode of the mathematical model with three main components of the sinusoidal current network (DC voltage source). reactive resistance compensation). Implement adequacy analysis with a symbolic method of calculation.

The bachelor's thesis contains 70 pages, 5 tables, 38 illustrations, 2 appendices, 10 references and 4 letters of the graphic part. To implement the task involved: educational computer complex L_APEZ, industrial power complexes RAOTV, Z_REGIM, OPTIM.QT.

List of keywords: NORMAL MODE CALCULATION, DESIGN SCHEME, THE MODEL LOADS, NEWTON'S METHOD, OPTIMIZATION (COMPENSATION) REACTIVE POWER JACOBI MATRIX, HESE, CONDUCTIVITY AND RESISTANCE, SHORT CIRCUIT, GRAPHICS LOADS METHODS Z_REGIM, ALEHBRAYICHNYY AND SYMBOLIC METHODS, SYSTEM OPERATORS FROM SUPPLY (SST) AND DISTRIBUTION (SRO) OF ELECTRICITY.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						6
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ЗАДАЧІ, РОЗРАХУНКИ І ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	11
1.1 Розробка розрахункової схеми (живляча мережа 330/110 кВ, ПС 110/35/10 кВ). Введення режиму у допустиму область.....	11
1.2 Комплекс L_APEZ_ZN – комп’ютерний розрахунковий апарат.....	17
1.3 Інтерактивний розрахунок матриці Якобі при моделюванні режиму методом Ньютона.....	19
1.4 Компенсація реактивних потужностей на ПС 110/35/10 кВ, інтерактивна оптимізація режиму по реактивних потужностях.....	25
1.5 Системний розрахунок струмів КЗ. Визначення строморозподілу в мережі при КЗ на шинах ПС 110/35/10 кВ.....	34
Висновки.....	38
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОСТІ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ АЛГЕБРАЇЧНИМ МЕТОДОМ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ ТА СИМВОЛІЧНОГО МЕТОДУ У КОМПЛЕКСНОМУ ПРОСТОРІ.....	39
2.1 Постановка задачі. Модель синусоїдальних характеристик (U, I) і функцій (P, dP), їх числове (дискретне) інтегрування.....	39
2.2 Моделювання навантажень еквівалентними опорами.....	43
2.3 Графічний супровід режиму у методі миттєвих значень при навантаженнях Ze.....	48
2.4 Принципи аналізу адекватності символічного і алгебраїчного методів розрахунку режимів.....	51
2.5 Результати розрахунків контрольних схем.....	55
Висновки.....	67
ВИСНОВКИ.....	68
ЛІТЕРАТУРА.....	70
ДОДАТОК А.....	71
ДОДАТОК Б.....	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АВР – автоматичне включення резерву;

БП – балансуєчий пункт;

БСК – батарея статичних конденсаторів;

ВН – висока напруга;

ЕЕС – електроенергетична система;

КЗ – коротке замикання;

КЛ – кабельна лінія;

КУ – компенсуючий прилад(устройство);

ЛЕП – лінія електропередачі;

НН – низька напруга;

ОСП – оператор систем постачання;

ОСР – оператор систем розподілу;

ПК – програмний комплекс;

ПС – підстанція;

РАОТВ – розрахунок, аналіз та оптимізація технологічних втрат;

РПН – регулювання під навантаженням;

СН – середня напруга;

УПК – прилад(устройство) повздовжньої компенсації;

ШВ – шинний вимикач.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						8
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Основними задачами, вирішення яких забезпечує надійність і ефективність електропостачання споживачів якісною електроенергією є аналіз режимних характеристик розрахункових схем електропостачальних організацій і енергосистем, оптимізація їх режимів по критерію мінімуму втрат з урахуванням реальних обмежень, розрахунку струмів короткого замикання та регулярний контроль параметрів автоматики та захисту. Ці задачі відносяться до функцій диспетчерського та технологічного управління і в теперішній час виконуються за допомогою потужних комп'ютерних комплексів аналізу режимів електричних мереж та сучасних інформаційних технологій.

В першому розділі даної роботи представлені результати рішень цих задач згідно прийнятих в електроенергетиці послідовних дій – вибір і формування технологічних схем ПС, розробка розрахункових схем постачальних (330-110 кВ) та розподільних (110-10 кВ) мереж, експлуатаційні та проектні розрахунки ustalених режимів, їх оптимізація та розрахунок трифазних струмів короткого замикання. Всі розрахунки виконані для індивідуальних умов згідно завдань. Задіяні сучасні математичні методи (методи Ньютона з матрицею Якобі, спуск другого порядку з діагональною матрицею Гесе, системний метод розрахунку струмів к.з. та інше).

Розвиток електроенергетичних режимів, звичайно, пов'язаний з ускладненням розрахункових схем, появою нових проблемно-орієнтованих ситуацій та потребує проведення дослідницьких робіт із метою підвищення ефективності комп'ютерно-інформаційного апарату. В розділі 2 даної роботи розглядається тема наукової корекції прийнятих в електроенергетиці термінів та понять, що ввели в свій час провідні спеціалісти теоретичних основ електротехніки, електричних мереж та систем, електропостачання споживачів промисловості та інші. Зокрема, періодично з'являються наукові статті, що піддають сумніву практичну коректність понять «реактивна електроенергія», «реактивна потужність» та її «компенсація», а в наступний час знаходять похибки в символічному методі розрахунку режимів у комплексному просторі. В зв'язку з

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						9
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цим віддається перевага алгебраїчному методу, в якому моделюються миттєві значення струмів, напруги, потужності та їх втрат на базі тригонометричних співвідношень для синусоїдального електромагнітного поля та його параметрів.

В другому розділі даної бакалаврської роботи вирішена задача щодо методичної адекватності символічного та алгебраїчного методів та практичного підтвердження цієї позиції. Розроблена еталонна контрольна схема (джерело, ЛЕП, споживач), формалізовані моделі навантаження, П-подібної моделі ЛЕП та джерела синусоїдальної напруги. Реалізована відповідна комп'ютерна програма для алгебраїчного методу. В розрахунку режиму символічним методом задіяні промислові комп'ютерні комплекси.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						10
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ЗАДАЧІ, РОЗРАХУНКИ І ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Розробка розрахункової схеми(живляча мережа 330/110 кВ, ПС 110/35/10 кВ). Введення режиму у допустиму область

Мережа енергосистеми представлена магістральними лініями 330 кВ і системним автотрансформатором з РПН на середній обмотці. Мережа – замкнена. Природно, фізичні балансуєчі вузли 300 та 301 знаходяться в енергосистемі. Схема містить 31 вузол та 4 контури.

Для з'єднання з індивідуальною підстанцією 110/35/10 кВ використовуються вузли № 9 та 10. В табл. 1.1 та 1.2 записані параметри ліній і трансформаторів. На рис. 1.1 зображена однолінійна схема підстанції. Результати розрахунку режиму зображені на рис. 1.2. Загальна характеристика та автоматична графіка цієї мережі наведені на рис. 1.3. Вихідні данні розрахункової схеми 330/110/35/10/0.4 кВ зображені на рис. 1.4..

На індивідуальній ПС нумерація шин є наступною: **110 кВ** – вузли №101 та 102, **35 кВ** – вузли 104 та 103, **10 кВ** – вузли 105, 106 та 107, **0.4 кВ** – вузол 108. Індивідуальна розрахункова схема ПС містить 3 трансформатори, два з яких марки ТДТН 31500/110/38.5/11 та один марки ТМН 2500/10/0.4. Стан комутаційного обладнання підстанції: ШВ-110 – включений, ШВ-35 та ШВ-10 – відключені. Живлення ПС відбувається по двох лініях 9-101 та 10-102 на рівні напруги 110 кВ. Задані сумарні навантаження на шинах 35 та 0.4 кВ:

- Вузол 103: $8+j4.8$ МВт.
- Вузли 105 та 106: $4+j3.2$ МВт.
- Вузол 104: $6.4+j4.8$ МВт.
- Вузол 108: $1.6+j0.8$ МВт.

На ПС встановлені основні масляні вимикачі типу ВМП10К/1000 та ВМГ-133-ІІ-10/600. Також встановлені трансформатори напруги типу НТМИ-10 та НОМ-10. Із реакторів які встановлені на ПС можна виділити реактор типу РБА-10/500-8%. Також на схемі встановлена система блискавкозахисту.

					141.6111.009.ДБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Савюк К.С.			11.06.20	Електротехнічні задачі, розрахунки і оптимізація режимів електричних мереж	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Банін Д.Б.			11.06.20			11	28
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-г61-1		
Н.контроль	Настенко Д.В.			11.06.20				
Затвердив	Толочко О.І.			11.06.20				

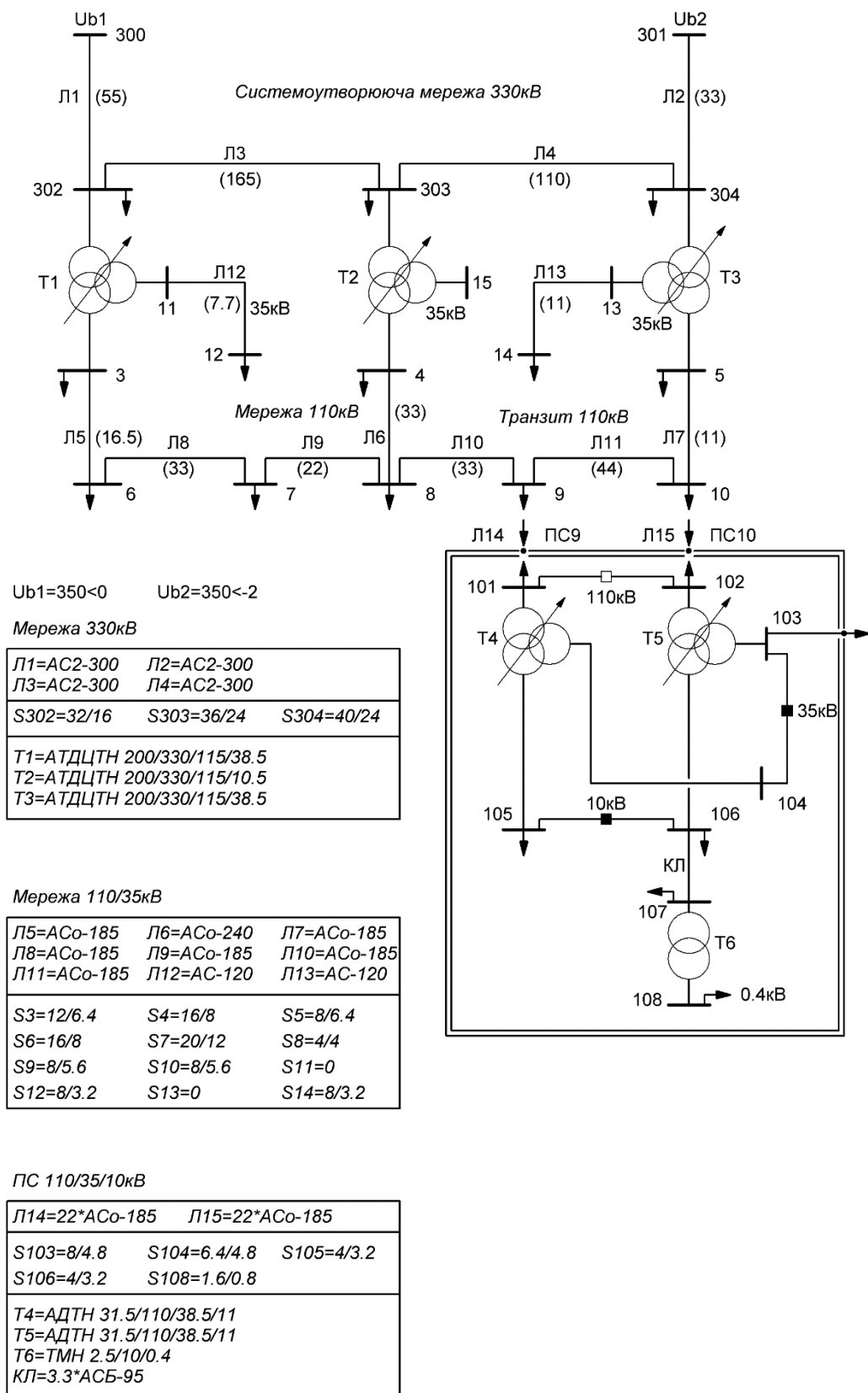


Рисунок 1.1 – Вихідні данні схем 330/110/35/10 кВ

Схема : Rсхема2 (Дата расчета: 24.11.2019 17:53:53)
 Узлов=31 Ветвей=35 Контуров=4 БП=2 #M=0

Точность расчета : 1E-6
 Невязка по напряжению : 0,000001, узел: 1005
 Невязка по конт.токам : 0,000000
 Количество итераций : 11, время расчета: 0.085 сек

Потребление : 380.0000000 МВт 250.4000000 МВАр
 Генерация : -387.6639124 МВт -137.4620695 МВАр
 Балансная мощность : 0.0000000 МВт 0.0000000 МВАр
 Потери в схеме : 7.6639124 МВт -112.9379304 МВАр
 Нагрузочные потери : 4.8956368 МВт 40.0371256 МВАр
 от актив.перетоков: 3.7546264 МВт
 от реакт.перетоков: 1.1410105 МВт
 Потери холост.хода : 2.7682756 МВт -152.9750560 МВАр
 шунтирующие реакт.: 0.0000000 МВт 0.0000000 МВАр
 конденсатор. уст. : 0.0000000 МВт 0.0000000 МВАр
 Небаланс в схеме : -0.0000000 МВт -0.0000001 МВАр

Рисунок 1.2 – Результати розрахунку режиму комплексної схеми

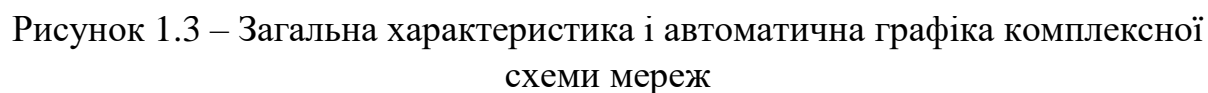
Таблица 1.1 – Вузлы підстанції та вузлы мережі 330 кВ

№ п/п	N вузла	П	P нав.	Q нав.	P ген.	Q ген.	Um	U розр.	Kyt	P розр.	Q розр.
1	300	b			206,7032	36,20548	350	350			
2	301	b			180,9607	101,2566	350	350	-2		
3	302		32	16			330	346,1132	-1,68546	32	16
4	303		50	30			330	343,4275	-3,5484	50	30
5	304		50	40			330	345,8834	-2,83527	50	40
6	3		30	15			110	119,2814	-4,52371	30	15
7	4		40	20			120	119,1895	-5,4294	40	20
8	5		20	20			110	118,3809	-5,27779	20	20
9	6		16	8			110	117,7588	-5,26304	16	8
10	7		20	12			110	116,3113	-6,04557	20	12
11	8		4	4			110	116,8419	-5,98904	4	4
12	9		8	5,6			110	115,5461	-6,24139	8	5,6
13	10		20	15			110	116,4604	-5,86953	20	15
14	11		18	12			35	37,9668	-6,94924	18	12
15	12		18	12			35	35,8604	-8,28641	18	12
16	13		10	8			35	38,1012	-6,6397	10	8
17	14		10	8			35	36,2891	-7,5223	10	8
18	15		10	8			10	10,5739	-6,08637	10	8
19	101						110	114,7794	-6,35228		
20	102						110	114,7794	-6,35228		
21	103		8	4,8			35	36,6287	-10,1021	8	4,8
22	104		6,4	4,8			35	36,8037	-9,21489	6,4	4,8
23	105		4	3,2			10	10,6342	-8,40292	4	3,2
24	106		4	3,2			10	10,5853	-9,06888	4	3,2
25	107						10	10,3934	-8,80832		
26	108		1,6	0,8			0,38	0,4124	-10,5138	1,6	0,8
27	1001						330	335,7267	-4,53544		
28	1002						330	335,4515	-5,44418		
29	1003						330	333,2009	-5,29966		
30	1004						110	111,2299	-8,42515		
31	1005						110	110,7416	-9,09728		

					141.6111.009.ДБ		Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			13

Таблиця 1.2 – Гілки підстанції та вузли мережі 330 кВ

№ п/п	N поч.	N кін.	R	X	G	B	Kт	Kт ном	S доп	Тип	Марка	Нотв'	Регулирование
1	300	302	2,695	17,875	2,475	-190,85				LN 330	55000*AC2-300		
2	301	304	1,617	10,725	1,485	-114,51				LN 330	33000*AC2-300		
3	302	303	8,085	53,625	7,425	-572,55				LN 330	165000*AC2-300		
4	303	304	5,39	35,75	4,95	-381,7				LN 330	110000*AC2-300		
5	302	1001	0,81675	58,52805	1,652893	9,182736	1	1	200	T3 0	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
6	1001	3	0,81675				2,813299	2,869565	200	T3 1	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5	8	СН-РПН-П-13-7- 2
7	1001	11	2,041875	126,5798			8,571428	8,571428	80	T3 2	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
8	303	1002	0,81675	58,52805	1,652893	9,182736	1	1	200	T3 0	АТДЦТН- 200000/330/115/10,5		
9	1002	4	0,81675				2,813299	2,869565	200	T3 1	АТДЦТН- 200000/330/115/10,5	8	СН-РПН-П-13-7- 2
10	1002	15	2,041875	126,5798			31,42857	31,42857	80	T3 2	АТДЦТН- 200000/330/115/10,5		
11	304	1003	0,81675	58,52805	1,652893	9,182736	1	1	200	T3 0	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
12	1003	5	0,81675				2,813299	2,869565	200	T3 1	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5	8	СН-РПН-П-13-7- 2
13	1003	13	2,041875	126,5798			8,571428	8,571428	80	T3 2	АТДЦТН- 200000/330/115/38,5		
14	3	6	2,805	6,7155	0,363	-45,54				LN 110	16500*АСО-185		
15	4	8	4,323	13,134	0,66	-93,06				LN 110	33000*АСО-240		
16	5	10	1,87	4,477	0,242	-30,36				LN 110	11000*АСО-185		
17	6	7	5,61	13,431	0,726	-91,08				LN 110	33000*АСО-185		
18	7	8	3,74	8,954	0,484	-60,72				LN 110	22000*АСО-185		
19	8	9	5,61	13,431	0,726	-91,08				LN 110	33000*АСО-185		
20	9	10	7,48	17,908	0,968	-121,44				LN 110	44000*АСО-185		
21	11	12	2,079	3,1493	0,77	-23,254				LN 35	7700*АС-120		
22	13	14	2,97	4,499	1,1	-33,22				LN 35	11000*АС-120		
23	101	9	3,74	8,954	0,484	-60,72				LN 110	22000*АСО-185		
24	102	10	3,74	8,954	0,484	-60,72				LN 110	22000*АСО-185		
25	101	1004	1,499433	45,5281	5,671078	119,0926	1	1	31,5	T3 0	ТДТН-31500/115/38,5/11	9	ВН-РПН-П-17-9- 1.5
26	1004	104	1,499433	27,45869			2,987013	2,987013	31,5	T3 1	ТДТН-31500/115/38,5/11		
27	1004	105	1,499433				10,45455	10,45455	31,5	T3 2	ТДТН-31500/115/38,5/11		
28	102	1005	1,499433	45,5281	5,671078	119,0926	1	1	31,5	T3 0	ТДТН-31500/115/38,5/11	9	ВН-РПН-П-17-9- 1.5
29	1005	103	1,499433	27,45869			2,987013				ТДТН-31500/115/38,5/11		
30	1005	106	1,499433				10,45455				ТДТН-31500/115/38,5/11		
31	101	102						1	31,5	T3 0			
32	103	104											
33	105	106											
34	106	107	1,0857	0,2739	4,6695	-466,95				LN 10	3300*АСБ-95		



1.2 Комплекс L_APEZ_ZN – комп’ютерний розрахунковий апарат

Початкові данні індивідуальної схеми Rschema, аналіз режиму та введення його в допустиму область наведено в розділі 1.1.

Розрахункова схема експортується з середовища РАОТП в середовище навчальної програми LB_APEZ_ZN, яка складається з наступних компонентів:

«Лабораторна робота №11: Розрахунок режиму методом Ньютона»,

«Лабораторна робота №12: Оптимізація реактивних потужностей»,

«Лабораторна робота №11: Системний розрахунок трифазних с.к.з».

Структура ключового файлу показана на рис. 1.5

Використовуються наступні загальні ключі:

KEY-f – Ключ фіксації модуля напруги (KEY-f = 0);

KEY-y, KEY-s – відповідно ключі відключення поперечних провідностей і навантажень;

KEY-t – опція ввімкнення декількох ітерацій Z_режиму в режимі Ньютона для забезпечення збіжності процесу. Параметром KIT-t задається кількість таких ітерацій;

EPS-r, KIT-r – відповідно розрахункова точність і гранична кількість ітерацій.

Для виконання лабораторної роботи №11 використовуються ключі:

KEY-n – опція розрахунку режиму методом Ньютона. При KEY-n = 0 виконується розрахунок без користувача. При KEY-n = 1 реалізується власне лабораторна робота «Розрахунок режиму методом Ньютона»;

Npz – порядковий номер вузла електричної схеми, для якого реалізується розрахунковий рядок і стовпчик матриці Якобі. Діагональний елемент обчислюється конкретно для цього вузла;

Nv-1, Nv-2 – задана вітка, що зв’язана з Npz, для котрої необхідно розрахувати величину недіагональних елементів матриці;

Niter – номер ітерації, де зупиняється автоматичний обчислювальний процес і користувачу пропонується реалізувати свою участь в розрахунку режиму;

KEY-o – ключ варіантів оптимізації. Якщо KEY-o = 0, реалізується автоматична оптимізація режиму з подальшим виведенням тільки кінцевих результатів без документації самого процесу спуску. Якщо KEY-o = 1, то в такому випадку включається режим інтелектуальної технології оптимізації, який здійснює діалог із користувачем;

EPS-o – задана точність оптимізації, за якою здійснюється контроль збіжності процесу;

Kd – коефіцієнт, який регулює збільшення dQt при розрахунку часткових похідних;

KEYz – ключ розрахунку струму к.з.;

Kz-1, Kz-2, Kz-3 – номери вузлів схеми, в яких відбувається одночасно трифазне к.з. Номер вузла = 0 сприймається як відсутність к.з.

KEY-f	KEY-s	KEY-y	KEY-t	EPS-r	KIT-r	KIT-t
0	0	0	1	0.0001	100	1
=====						
LAB №11			KEY-n	Npz	Nv-1	Nv-2
режим N			1	8	8	9
						Niter
						2
=====						
LAB №12			KEY-o	EPS-o	KIT-o	Kd
оптимізація Q			101	0.01	50	0.01
=====						
LAB «13			KEY-z	kz-1	kz-2	kz-3
т.к.з. Z			1	105	0	0

Рисунок 1.5 – AP_AKEY.PAS ключовий файл навчального комплексу
LB_APEZ_ZN

Таким чином, при розрахунку режиму на ітерації Niter потрібно розрахувати наступні величини:

D11, D12, D21, D22 – діагональні елементи;

V11, V12, V21, V22 – елементи верхньої трикутної матриці;

H11, H12, H21, H22 – елементи нижньої трикутної матриці.

UM, Tet, F1, F2 – нове значення напруги і відповідна йому нев'язка рівнянь стану мережі, згідно до заданого номеру ітерації Niter.

При оптимізації режиму по реактивним потужностям необхідно розрахувати оптимальні значення Q_x в заданих точках розрахункової схеми і задокументувати процес спуску другого порядку.

При аналізі струмів короткого замикання необхідно по розрахованим напругам в режимі короткого замикання у заданих токах розрахункової схеми перевірити правильність розрахунків струмів короткого замикання по лініям та трансформаторам, перевірити за законами Кірхгофа і оформити схему струморозподілу.

Коротко математичне обґрунтування розрахунку режиму, оптимізація Q та струмів короткого замикання, зіставлення коротких технологічних фактів, а також результати розрахунку розглядаються у розділах 1.3, 1.4 та 1.5.

1.3 Інтерактивний розрахунок матриці Якобі при моделюванні режиму методом Ньютона.

При реалізації розрахунків режиму по інтерактивній технології використовуються наступні робочі файли:

AP_AKEY.PAS – файл умов виконання лабораторної роботи №11;

AP_AREZ.RES – формат проміжного і кінцевого результатів;

AP_AREZ.ETA – еталонний(нульовий) формат відповіді користувача;

AP_AREZ.REZ – заповнений формат результатів розрахунку;

AP_ADAN.PAS – конструктивний формат вихідних даних;

Формат видачі проміжку результату зберігається й файлі AP_AREZ.RES і має вигляд показаний на рис. 1.6.. Невідомі величини, що потрібно розрахувати, замасковані (9999.9999).

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						19
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

!!!! ITER: 1 1000.00000
=====
Name      D11      D12      D21      D22
=====
8      1222.6427 -3141.7929 3134.2972 1232.1302
=====
NameN  NameK  V11      V12      V21      V22      H11      H12      H21      H22
=====
9      8      -367.4396 864.2468 -864.2468 -367.4396 -356.4525 868.8361 -868.8361 -356.4525
=====
Name  UM      Tet      Usa      Usr      F1      F2      dU      dTeta
=====
8  117.559985 -6.688865 116.759790 -13.693119 -0.743742 0.252121 0.005932 0.696922
=====
@@@@ ITER: 2 72.41389
=====
Name      D11      D12      D21      D22
=====
8      9999.9999 9999.9999 9999.9999 9999.9999
=====
NameN  NameK  V11      V12      V21      V22      H11      H12      H21      H22
=====
9      8      9999.9999 9999.9999 9999.9999 9999.9999 9999.9999 9999.9999 9999.9999 9999.9999
=====
Name  UM      Tet      Usa      Usr      F1      F2      dU      dTeta
=====
8  999.999900 999.999900 116.224167 -12.199129 -0.003085 0.010327 0.000178 0.002899
=====
      Name      Usa      Usr
=====
      4  118.669603 -11.280792
      7  115.684515 -12.258775
      9  114.885333 -12.573234
=====
!!!! ITER: 3 1.35505
=====
Name      D11      D12      D21      D22
=====
8      1208.4370 -3103.8238 3095.8238 1216.4370
=====
NameN  NameK  V11      V12      V21      V22      H11      H12      H21      H22
=====
9      8      -361.2527 854.2823 -854.2823 -361.2527 -353.7137 857.4312 -857.4312 -353.7137
=====
Name  UM      Tet      Usa      Usr      F1      F2      dU      dTeta
=====
8  116.841854 -5.989044 116.204116 -12.191079 0.000002 0.000002 0.000000 0.000000
=====
!!!! ITE

```

Рисунок 1.6 – Формат проміжного результату(AP_AREZ.RES)

По цьому файлу вибираємо необхідні дані про поточну напругу шуканого вузла (UM, Tet) і напругу його яруса Usa, Usr, а також поправки по напрузі і куту у відносних одиницях (dU, dTeta). Ці дані отримуються з попередньої ітерації. Приведений на рис. 1.6 формат відповідає ключам лабораторної роботи. Крім того будуть потрібні дані з інших джерел:

Ps, Qs – навантаження вузла Npz. Береться з початкових даних (таблиця вузлів UZL). Ps=4; Qs=4.

Gs, Bs, Ya, Yr – параметри матриці вузлових провідностей, яка розраховується в лабораторній роботі №2 і вибирається з її результатів. В нашому випадку маємо:

Вузол 8	$G_s = -0.8881$	$B_s = 0.06977$
Гілка 8-4	$Y_a = 0.022611$	$Y_r = -0.068696$
8-7	$Y_a = 0.039719$	$Y_r = -0.095092$
8-9	$Y_a = 0.026479$	$Y_r = -0.063394$

Після вибірки всіх необхідних початкових даних, можна проконтролювати їх значення по допоміжному файлу AP_ADAN.PAS (рис. 1.7.) і при потребі їх уточнити.

4.000000	4.000000	-0.088810	0.227060	Ps_Qs_Gs_Bs
117.559985	-6.688865	0.005932	0.696922	Us_Tet_dU_dTet
3	8	3		
	4	7	9	
0.022611	0.039719	0.026479	Ya	
-0.068696	-0.095092	-0.063394	Yr	
118.669603	115.684515	114.885333	Ua	
-11.280792	-12.258775	-12.573234	Ur	

Рисунок 1.7 – Контрольні розрахункові параметри(AP_ADAN.PAS)

Необхідно визначити значення елементів матриці Якобі (D, V, H), нові значення напруги (UM, Tet) та праву частину лінеаризованого рівняння (F1, F2). Розрахунок виконується тільки для 2 ітерації, тільки для вузла 8, для усіх гілок зв'язаних із вузлом №8.

Розрахунок виконуємо наступним чином:

Модуль напруги заданого вузла (UM):

$$U^t = U^{(t-1)} - U^{(t-1)} * dU^{(t-1)} = 117.559985 - 117.559985 * 0.005932 = \mathbf{116.863}$$

Кут заданого вузла (Tet):

$$Tet^t = Tet^{(t-1)} + dTet^{(t-1)} = -6.688865 + 0.696922 = \mathbf{-5.992}$$

Напруга заданого вузла (Usa, Usr):

$$\dot{U} = \mathbf{116.224167 - j12.199129}$$

$$\text{Розрахунок } p_{ij} + jq_{ij} = \hat{U}_i * \dot{U}_j * \dot{Y}_{ij}:$$

					141.6111.009.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

$$p_{8-4} + jq_{8-4} = (116.224167 + j12.199129) * (118.669603 - j11.280792) * (0.022611 - j0.068696) = \mathbf{324.35 - j953.84}$$

$$p_{4-8} + jq_{4-8} = (116.224167 - j12.199129) * (118.669603 + j11.280792) * (0.022611 - j0.068696) = \mathbf{305.587 - j960.016}$$

$$p_{8-7} + jq_{8-7} = (116.224167 + j12.199129) * (115.684515 - j12.258775) * (0.039719 - j0.095092) = \mathbf{538.69 - j1293.301}$$

$$p_{7-8} + jq_{7-8} = (116.224167 - j12.199129) * (115.684515 + j12.258775) * (0.039719 - j0.095092) = \mathbf{541.26 - j1292.228}$$

$$p_{8-9} + jq_{8-9} = (116.224167 + j12.199129) * (114.885333 - j12.573234) * (0.026479 - j0.063394) = \mathbf{353.829 - j857.773}$$

$$p_{9-8} + jq_{9-8} = (116.224167 - j12.199129) * (114.885333 + j12.573234) * (0.026479 - j0.063394) = \mathbf{361.413 - j854.605}$$

Розрахунок сум $\sum p_{ij}, \sum q_{ij}$:

$$\sum p_8 = p_{8-4} + p_{8-7} + p_{8-9} = 324.35 + 538.69 + 353.829 = 1216.869$$

$$\sum q_8 = q_{8-4} + q_{8-7} + q_{8-9} = -953.84 - 1293.301 - 857.773 = -3104.914$$

Розрахунок правої частини системи рівнянь(нев'язок):

$$F_1 = P_8 - G_8 * U^{t^2} - \sum p_8 = 4 - -0.08881 * 116.863^2 - 1216.869 = -0.003$$

$$F_2 = Q_8 + B_8 * U^{t^2} + \sum q_8 = 4 + 0.22706 * 116.863^2 + -3104.914 = 0.015$$

Сформуємо на основі виконаних розрахунків його блочний діагональний елемент і блочні елементи трикутних матриць згідно заданої гілки:

$$D = \left(\begin{array}{l} D_{11} = -2 * G_S * U^2 - \sum p_{ij} \\ D_{21} = 2 * B_S * U^2 + \sum q_{ij} \end{array} \middle| \begin{array}{l} D_{12} = \sum q_{ij} \\ D_{22} = \sum p_{ij} \end{array} \right) \quad V, H = \left(\begin{array}{c|c} -p & -q \\ \hline q & -p \end{array} \right)$$

$$D_{11} = -2 * (-0.08881) * 116.863^2 - 1216.869 = 1208.864; \quad D_{12} = -3104.914$$

$$D_{21} = 2 * 0.22706 * 116.863^2 - 3104.914 = 3096.945; \quad D_{22} = 1216.869$$

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						22
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_{11} = -353.816; \quad V_{12} = 857.773;$$

$$H_{11} = -361.413; \quad H_{12} = 854.605;$$

$$V_{21} = -857.773; \quad V_{22} = -353.816;$$

$$H_{21} = -854.605; \quad H_{22} = -361.413;$$

Перепишемо еталонний формат результату з файлу AP_AREZ.ETA в пустий файл пропонованого результату AP_AREZ.REZ. Структура файлу показана на рисунку 1.8.

Заповнюємо цей файл результатами розрахунків. Вміст файлу AP_AREZ.REZ приведено на рисунку 1.9.

R	Name	D11	D12	D21	D22				
0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
0	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Name	F1	F2	UM	Teta					
0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				

Рисунок 1.8 – Еталонний файл результатів (нульовий формат)(AP_AREZ.ETA)

R	Name	D11	D12	D21	D22				
0	8	1208.864	-3104.914	3096.945	1216.869				
NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
0	8	9	-353.829	857.773	-857.773	-353.829	-361.413	854.605	-854.605
Name	F1	F2	UM	Teta					
0	8	-0.003	0.015	116.863	-5.992				

Рисунок 1.9 – Заповнений файл результатів(AP_AREZ.REZ)

Знову запускаємо розрахунок режиму. Якщо розрахунок виконано нормально, в обмінному файлі AP_AREZ.RES зникне маскування невідомих величин. Нове заповнення цього файлу приведено на рисунку 1.9. Кінцевий результат розрахунку приведено на рисунку 1.10.

!!!! ITER: 1 1000.00000									
=====									
Name	D11	D12	D21	D22					
=====									
8	1222.6427	-3141.7929	3134.2972	1232.1302					
=====									
=====									
NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
=====									
=====									
9	8	-367.4396	864.2468	-864.2468	-367.4396	-356.4525	868.8361	-868.8361	-
356.4525									
=====									
Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta	
=====									
8	117.559985	-6.688865	116.759790	-13.693119	-0.743742	0.252121	0.005932	0.696922	
=====									
=====									
@@@@ ITER: 2 72.41389									
=====									
Name	D11	D12	D21	D22					
=====									
8	1208.8652	-3104.9163	3096.9369	1216.8714					
=====									
=====									
NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
=====									
=====									
9	8	-353.8328	857.7792	-857.7792	-353.8328	-361.4164	854.6116	-854.6116	-
361.4164									
=====									
Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta	
=====									
8	116.862636	-5.991943	116.224167	-12.199129	-0.003085	0.010327	0.000178	0.002899	
=====									
=====									
Name	Usa	Usr							
=====									
4	118.669603	-11.280792							
7	115.684515	-12.258775							
9	114.885333	-12.573234							
=====									
!!!! ITER: 3 1.35505									
=====									
Name	D11	D12	D21	D22					
=====									
8	1208.4370	-3103.8238	3095.8238	1216.4370					
=====									
=====									
NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
=====									
=====									
9	8	-361.2527	854.2823	-854.2823	-361.2527	-353.7137	857.4312	-857.4312	-
353.7137									
=====									
Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta	
=====									
8	116.841854	-5.989044	116.204116	-12.191079	0.000002	0.000002	0.000000	0.000000	
=====									
=====									
!!!! ITE									

Рисунок 1.10 – Формат правильного результату (AP_ARES.REZ)

					141.6111.009.ДБ		Арк.
							24
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

1.4 Компенсація реактивних потужностей на ПС 110/35/10 кВ, інтерактивна оптимізація режиму по реактивних потужностях

Вибір оптимального рівня системної компенсації реактивної потужності будемо виконувати для індивідуальної розрахункової схеми Rschema2. Вихідний режим для неї розглянутий в розділі 1.3. знаходиться в допустимих межах та для оптимізації представлений в файлах Rschema2.PNT(вузли) і Rschema2.LIN(вітки). Так як вихідний режим слабо навантажений (всі коефіцієнти трансформації практично номінальні) навантажимо його. Для цього збільшимо навантаження у вузлах 8 та 9:

$$\text{Вузол 8: } P+jQ = 4+j4 \rightarrow 10+j10 \text{ [MBA]}$$

$$\text{Вузол 9: } P+jQ = 8+j5.6 \rightarrow 10+j10 \text{ [MBA]}$$

Також збільшимо транзитні перетоки по 100 кВ, змінив вектор напруги у вузлі 301:

$$U_b(301) = 350<-2 \rightarrow 340<-3$$

При таких змінах, внесених до схеми для РАОТВ дали втрати 8.702 МВт в тому числі за рахунок реактивних перетоків 1.514 МВт. Аналогічні зміни в середовищі LAB дали у вихідному режимі аналогічні втрати $\Delta P = 8.699$ МВт. Режим заходиться у допустимих межах.

Оптимізацію будемо виконувати для вузлів 105 (шини 10 кВ ПС110/35/10 кВ) і у вузлі 10, котрий розміщений у транзиті 110 кВ і знаходить у трасі живлення даної споживчої ПС.

Для оптимізації будемо користуватися методом спуску другого порядку. Головної позитивною властивістю цих методів являється ціле направлений, автоматичний вибір кроку оптимізації. Маємо загальний метод другого порядку з матрицею Гессе. Якщо оптимізується деякий функціонал $F(x)$, вирішується лінеаризована система рівнянь:

$$G * \Delta x = -g, \text{ де}$$

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						25
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G = \begin{Bmatrix} \partial^2 F / \partial x_1^2 & \partial^2 F / \partial x_1 \partial x_2 \\ \partial^2 F / \partial x_2 \partial x_1 & \partial^2 F / \partial x_2^2 \end{Bmatrix} - \text{матриця Гессе других частотних похідних}$$

критерія оптимальності F , по змінних x_1, x_2 , які являються регуляторами процесу оптимізації;

$$g = \begin{Bmatrix} \partial F / \partial x_1 \\ \partial F / \partial x_2 \end{Bmatrix} - \text{вектор градієнт перших частотних похідних критерія оптимізації}$$

по змінних x_1, x_2 ;

$$\Delta x = \begin{Bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{Bmatrix} - \text{вектор кроку спуску метода другого порядку, без ітераційного}$$

процесу близький до оптимального.

Рівняння спуску має стандартний вигляд:

$$x^{(t+1)} = x^{(t)} + \Delta x_{\text{опт}}^{(t)}, \text{ де}$$

$x^{(t)}, x^{(t+1)}$ – вектори невідомих на двох суміжних ітераціях.

Метод реалізується по математичному алгоритму:

- 1: Вибір початкового наближення $x^{(t)} = x^{(0)}$;
- 2: Розрахунок вектора градієнта $g^{(t)}$;
- 3: Розрахунок матриці Якобі $G^{(t)}$;
- 4: Вирішення лінеаризованого рівняння $\Delta x^{(t)}(1)$;
- 5: Реалізація кроку процесу (2);
- 6: Контроль сходження по довжині вектора градієнта.

Якщо величини – результати слабо пов’язані між собою, тобто другі взаємні частинні похідні значно менші других власних частинних похідних:

$$\partial^2 F / \partial x_1^2 \Rightarrow \partial^2 F / \partial x_1 \partial x_2$$

$$\partial^2 F / \partial x_2^2 \Rightarrow \partial^2 F / \partial x_2 \partial x_1,$$

Матрицю Гессе можна рахувати діагональною. Тоді система (1) перетвориться в набір невідомих рівнянь з елементарним рішенням:

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						26
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta x_1 \approx -\frac{\partial F / \partial x_1}{\partial^2 F / \partial x_1^2}, \quad \Delta x_2 \approx -\frac{\partial F / \partial x_2}{\partial^2 F / \partial x_2^2}$$

Оскільки математично виразу для функціоналу $F(x)$ немає, будемо використовувати метод численного диференціювання. Якщо вважати, що функціонал $F(x)$ орієнтовано відповідає квадратичній формі, то для визначення першої та другої частотної похідної достатньо мати три заміри значень функціоналу $F^{(0)}(x_1^{(0)}), F^{(1)}(x_1^{(1)}), F^{(2)}(x_1^{(2)})$ і аналогічно

$$F^{(0)}(x_2^{(0)}), F^{(1)}(x_2^{(1)}), F^{(2)}(x_2^{(2)}).$$

При чому:

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta; \quad x_1^{(2)} = x_1^{(1)} + \Delta = x_1^{(0)} + 2\Delta;$$

$$x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta; \quad x_2^{(2)} = x_2^{(1)} + \Delta = x_2^{(0)} + 2\Delta;$$

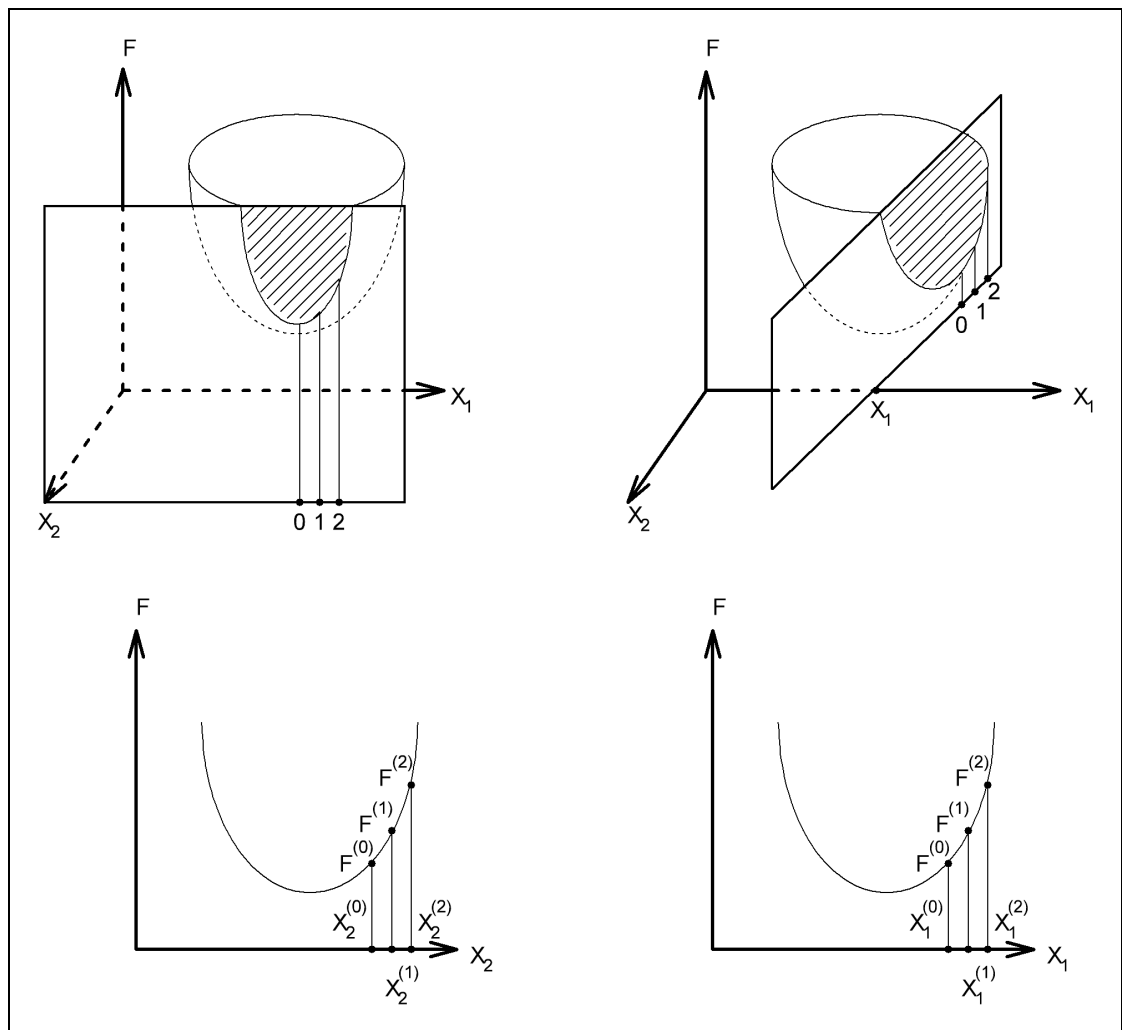


Рисунок 1.11 – Ілюстрація численного диференціювання

Для кожної координати по трьох значеннях функціонала можемо вичислити два значення першої похідної:

$$g_1 = \frac{(F^{(1)} - F^{(0)})}{\Delta}, \quad g_2 = \frac{(F^{(2)} - F^{(1)})}{\Delta}.$$

По двох значеннях першої похідної аналогічно розраховується одна друга частинної похідної:

$$G = \frac{(g_2 - g_1)}{\Delta}.$$

Таким чином, маємо варіант розрахунку оптимального кроку, використовуючи метод числового диференціалу:

$$\Delta x_{\text{опт}} = \frac{-g_1}{\frac{(g_2 - g_1)}{\Delta}} = \frac{-g_1 * \Delta}{(g_2 - g_1)} = \frac{g_1 * \Delta}{(g_1 - g_2)}$$

Ця формула повністю відповідає виразу курсу лекцій «Алгоритмізація і програмування електроенергетичних задач» в задачі оптимізації розподілу реактивних потужностей. Маємо відповідність:

$$F(x) = DPt, \quad F(x + d) = DP1, \quad F(x + 2d) = DP2,$$

$$g_1 = GR1 = \frac{(DPt - DP1)}{d}, \quad g_2 = GR2 = \frac{(DP1 - DP2)}{d},$$

$$\Delta x_{\text{опт}} = \Delta Q_{\text{опт}} = GR1 * \frac{\Delta = dQ}{(GR1 - GR2)},$$

$$[Q]^{(k+1)} = [Q]^{(k)} + [\omega] * [dQ_{\text{опт}}]$$

$$\omega_i = \frac{|GR_i|}{\sqrt{\sum GR_i^2}}$$

Величина Δ (крок числового диференціалу) розраховується індивідуально для кожного вузла в залежності від його номінальної напруги

$$dQ = U_H * K_d$$

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						28
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний алгоритм оптимізації має вигляд:

- 1: **Визначення** в розрахунковій схемі вузлів регулювання реактивної потужності;
- 2: **Розрахунок** вихідного режиму;
- 3: **Вибір** пристроїв dQ_t для розрахунку похідних;
- 4: **Запуск** програми N_REGIM_S. Отримання таблиці втрат:

$N_{уз}$	Q_i	dQ_{ti}	DP_{ti}	$DP1_i$	$DP2_i$
----------	-------	-----------	-----------	---------	---------

- 5: **Розрахунок** похідних:

$$GR1_i = (DP_{ti} - DP1_i)/dQ_{ti}$$

$$GR2_i = (DP1_i - DP2_i)/dQ_{ti}$$

- 6: **Розрахунок** оптимальних координатних приростів:

$$\Delta Q_i^{OPT} = GR1_i * dQ_{ti}/(GR1_i - GR2_i);$$

- 7: **Розрахунок** коефіцієнтів кроку спуску:

$$SGR = \sum GR1_i^2; \quad \omega_i = |GR1_i|/\sqrt{SGR};$$

- 8: **Розрахунок** нових значень реактивних потужностей:

$$Q_i^{NOB} = Q_i + \omega_i * \Delta Q_i^{OPT};$$

- 9: **Фіксація** вектора Q_i^{NOB} в розрахунковій схемі;

- 10: **Аналіз** збіжності процесу.

Для вирішення поставленої задачі використаємо лабораторний комплекс EKLABw.exe. Задаємо для роботи №12 умови:

KEYo	EPSo	KITo	KD
1	0.001	50	0.01

В файлах Rschema2.vqs і Rschema.vus визначимо вузли для оптимізації і граничні умови по $Q_{ку}$ та U_M :

Nuz	Qmin	Qmax	Nuz	Umin	Umax
-103	-200	200	-103	9.5	11
-104	-200	200	-104	9.5	11
-106	-200	200	-105	9.5	11
105	-200	200	-106	9.5	11
10	-200	200	-8	105	121

Виконаємо індивідуальний розрахунок відповідно до алгоритму:

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						29
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крок 1: Маємо таблицю:

Вузол	Q	dQ t	dPt	dDPt	dDP1	dDP2	MM
105	3	0.1	8.6988827	0.6988827	0.7026934	0.7065231	1
10	15	1.1	8.6988827	0.6988827	0.7228088	0.7472366	1

Розрахунок похідних:

Вузол 105: $GR1 = (0.6988827 - 0.7026934)/0.1 = -0.038107$

$$GR2 = (0.7026934 - 0.7065231)/0.1 = -0.038297$$

Вузол 10: $GR1 = (0.6988827 - 0.7228088)/0.1 = -0.021751$

$$GR2 = (0.7228088 - 0.7472366)/0.1 = -0.022207$$

Розрахунок оптимального кроку по координатам:

Вузол 105: $\Delta Q_{\text{опт}} = -0.038107 * 0.1 / (-0.038107 + 0.038297) = -20,0563$

Вузол 10: $\Delta Q_{\text{опт}} = -0.021751 * 0.1 / (-0.021751 + 0.022207) = -52,4591$

Розрахунок коефіцієнтів кроку по координатам:

$$\sqrt{SGR} = \sqrt{\left[\left(\frac{0.038107}{1}\right)^2 + \left(\frac{0.021751}{1}\right)^2\right]} = 0.0439$$

Вузол 105: $\omega_1 = \frac{\frac{0.038107}{1}}{0.0439} = 0.8685$

Вузол 10: $\omega_1 = \frac{\frac{0.021751}{1}}{0.0439} = 0.4957$

Розрахунок нових значень реактивної потужності:

Вузол 105: $Q_{\text{нов}} = 3 - 0.8685 * 20,0563 = -14.41856667$

Вузол 10: $Q_{\text{нов}} = 15 - 0.4957 * 52,4591 = -11.00496192$

Контроль сходження:

$$\sum |GR1| = 0.038107 + 0.021751 = 0.05986 > 0.001$$

Крок 2:

Загальний процес спуску показаний на рисунку 1.12.

***** GRADIENT File= Rsxema2 *****

Nnn	Name	Qs	dQt	DPT	dDPT	dDP1	dDP2	MM
1	105	3.2000	0.10000	8.6988827	0.6988827	0.7026934	0.7065231	1
2	10	15.0000	1.10000	8.6988827	0.6988827	0.7228088	0.7472366	1
### iter= 0 0.05986 0.05986 ###								
1	105-14.4186	0.10000	8.0008318	0.0831814	0.1323290	0.1831071		100
2	10-11.0050	1.10000	8.0008318	0.0083181	0.0758191	0.1474044		10
### iter= 1 0.01105 0.04881 ###								
1	105-17.4052	0.10000	7.9906264	0.0626404	0.0820972	0.1034927		100
2	10-10.9911	1.10000	7.9906264	0.7990626	0.7996498	0.8002778		0
### iter= 2 0.00728 0.00377 ###								
1	105-17.7489	0.10000	7.9504077	0.4077131	0.1991348	0.0042959		1000
2	10-25.8653	1.10000	7.9504077	0.0407713	0.0930968	0.1831056		100
### iter= 3 0.00256 0.00472 ###								
1	105-17.1393	0.10000	7.9489727	0.9727217	0.7833551	0.6089717		1000
2	10-27.2641	1.10000	7.9489727	0.8972722	0.9182326	0.9768459		100
### iter= 4 0.00208 0.00048 ###								
1	105-15.8818	0.10000	7.9473090	0.3090420	0.2319871	0.1711873		1000
2	10-27.3254	1.10000	7.9473090	0.7309042	0.7839318	0.8748666		100
### iter= 5 0.00125 0.00083 ###								
1	105-15.4799	0.10000	7.9468478	0.8477935	0.7889221	0.7451571		1000
2	10-28.1415	1.10000	7.9468478	0.6847793	0.7211246	0.7951769		100
### iter= 6 0.00092 0.00033 ###								

Рисунок 1.12 – Процес оптимізації реактивний потужностей

Оптимальний режим показаний на рисунку 1.13.

***** OPTIM_Q(Grad) File= Rsxema2 ### iter= 7/ grad= 0.00092/ subg 0.00033 ###

```
=====
Nnn      Name      Qs      Qmin      Qmax
=====
1        105      -15.1400 -200.0000 200.0000
2         10      -28.6605 -200.0000 200.0000
          1        3692.03245
          2         2.23626
          3         0.06328
.....
END= 7          0.00002
=====
```

```
=====
Nnn Name      UM      Tet      Usa      Uss      Pss      Qss      Pgs      Qgs      Pbs      Qbs      prb
=====
1  300 350.000  0.000 350.000  0.000 -206.703 -36.205  0.152 -11.690 -233.842 -59.133  1
2  301 340.000 -3.000 339.534 -17.794 -180.961 -101.257  0.086 -6.619 -162.105 -31.102  1
3  302 344.772 -1.893 344.584 -11.390  32.000  16.000  0.785 -44.280  0.000  0.000  0
4  303 338.452 -4.283 337.507 -25.274  50.000  30.000  0.898 -53.603  0.000  0.000  0
5  304 338.076 -3.836 337.318 -22.616  50.000  40.000  0.557 -27.308  0.000  0.000  0
6   3  118.816 -4.901 118.381 -10.150  30.000  15.000  0.003 -0.321  0.000  0.000  0
7   4  117.802 -6.264 117.099 -12.854  40.000  20.000  0.005 -0.646  0.000  0.000  0
8   5  118.341 -6.417 117.599 -13.227  20.000  20.000  0.002 -0.213  0.000  0.000  0
9   6  117.222 -5.795 116.623 -11.835  16.000  8.000  0.007 -0.939  0.000  0.000  0
10  7  115.660 -6.891 114.824 -13.876  20.000  12.000  0.008 -1.015  0.000  0.000  0
11  8  116.130 -7.039 115.255 -14.231  10.000  10.000  0.013 -1.651  0.000  0.000  0
12  9  116.419 -7.645 115.385 -15.487  10.000  10.000  0.015 -1.852  0.000  0.000  0
13  10 118.070 -7.366 117.096 -15.138  20.000 -28.660  0.012 -1.481  0.000  0.000  0
14  11  37.810 -7.346  37.499 -4.834  18.000  12.000  0.001 -0.017  0.000  0.000  0
15  12  35.693 -8.695  35.283 -5.396  18.000  12.000  0.000 -0.015  0.000  0.000  0
16  13  38.088 -7.762  37.739 -5.144  10.000  8.000  0.001 -0.024  0.000  0.000  0
17  14  36.275 -8.645  35.863 -5.452  10.000  8.000  0.001 -0.022  0.000  0.000  0
18  15  10.449 -6.934  10.372 -1.261  10.000  8.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0
19 101 116.741 -7.938 115.623 -16.121  0.000  0.000  0.081  1.209  0.000  0.000  0
20 102 116.741 -7.938 115.623 -16.121  0.000  0.000  0.081  1.209  0.000  0.000  0
21 103 37.322 -11.555  36.565 -7.476  8.000  4.800  0.000  0.000  0.000  0.000  0
22 104 39.909 -10.609  39.227 -7.348  6.400  4.800  0.000  0.000  0.000  0.000  0
23 105 11.512 -10.026  11.336 -2.004  4.000 -15.140  0.000  0.000  0.000  0.000  0
24 106 10.781 -10.560  10.598 -1.976  4.000  3.200  0.000 -0.027  0.000  0.000  0
25 107 10.593 -10.310  10.422 -1.896  0.000  0.000  0.005  0.002  0.000  0.000  0
26 108  0.421 -11.951  0.412 -0.087  1.600  0.800  0.000  0.000  0.000  0.000  0
27 1001 334.429 -4.912 333.201 -28.636  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0
28 1002 331.554 -6.277 329.567 -36.248  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0
29 1003 333.092 -6.421 331.002 -37.248  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0
30 1004 120.404 -9.937 118.597 -20.776  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0
31 1005 112.786 -10.587 110.866 -20.722  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0
=====
```

SUMMA : 388.000 198.799 2.710 -149.301 -395.947 -90.235
BALANS: 5.237 40.737

DP= 7.946619

PAST SUMMA : 388.000 260.800 2.669 -147.915 -396.699 -160.451
PAST BALANS: 6.030 47.567

DP= 8.698881

Рисунок 1.13 – Оптимальний режим реактивних потужностей

Таким чином , втрати знизились до $\Delta P = 7.946619$ МВт. При цьому рекомендується установка у вузлі 105 $Q_{ky} = -15.47988917$ МВар, а у вузлі 10 $Q_{ky} = -28.14154523$ МВар.

Розглянемо новий режим за допомогою програми РАОТВ. Більш технологічним являється установка БСК на кожну секцію 10 кВ окремо $Q_{105} = Q_{106} = Q_{ky} = -15.47988917$ МВар, а також розділити рекомендовану генерацію Q_{ky} вузлів 10 та 105 на дві частини і установити їх у вузлах:

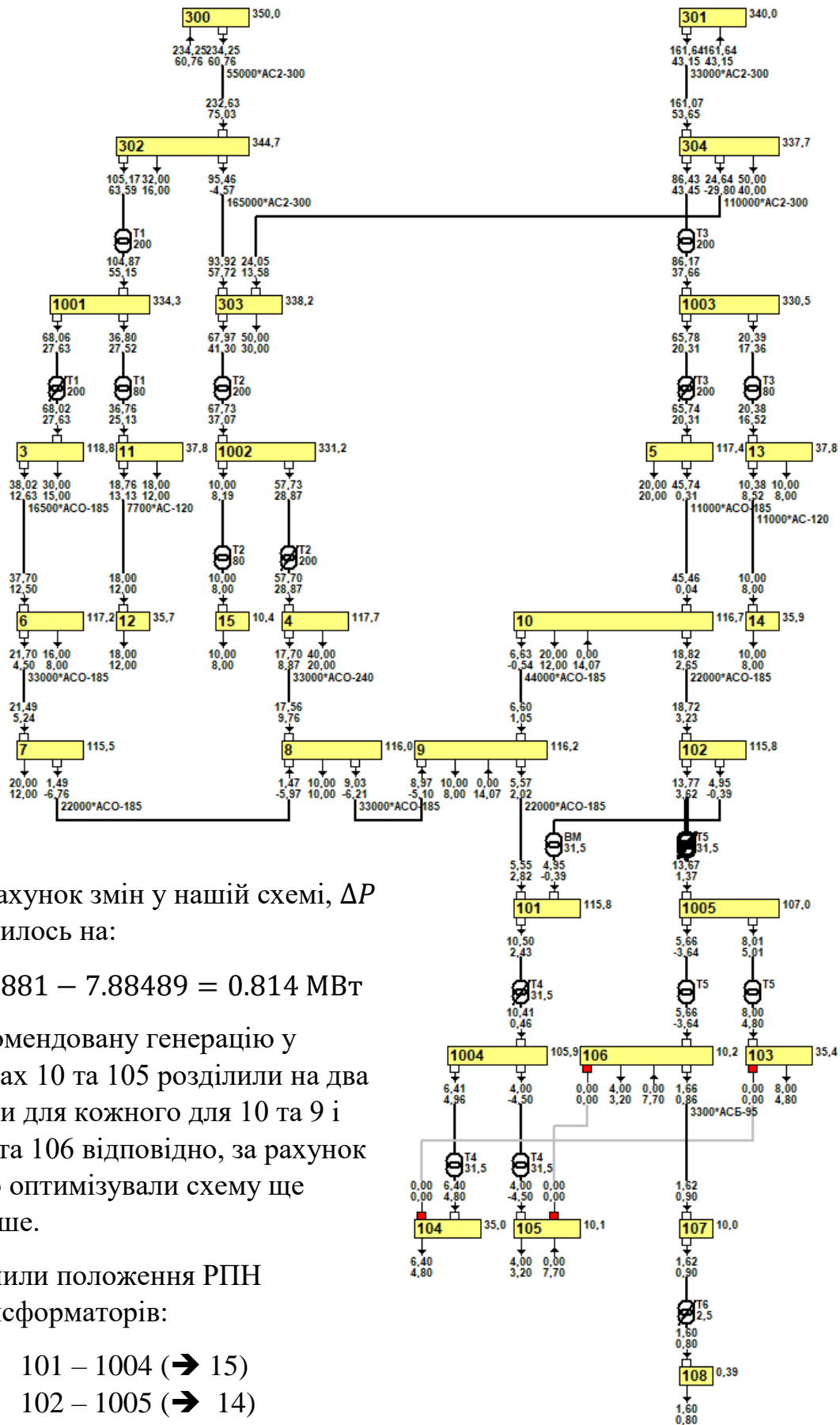
$$Q_{ky}(\text{вузол 9}) = -14,07 \text{ МВар} \quad Q_{ky}(\text{вузол 105}) = -7,7 \text{ МВар}$$

$$Q_{ky}(\text{вузол 10}) = -14,07 \text{ МВар.} \quad Q_{ky}(\text{вузол 106}) = -7,7 \text{ МВар}$$

Режим не знаходиться у допустимих межах. Підвищена напруга у вузлах 1005, 1004, 107, 103, 104, 106, 105, 108. Змінимо положення РПН

					141.6111.009.ДБ		Арк.
							32
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

На завершення маємо:



За рахунок змін у нашій схемі, ΔP знизилось на:

$$8.69881 - 7.88489 = 0.814 \text{ МВт}$$

Рекомендовану генерацію у вузлах 10 та 105 розділили на два вузли для кожного для 10 та 9 і 105 та 106 відповідно, за рахунок чого оптимізували схему ще більше.

Змінили положення РПН трансформаторів:

101 – 1004 (➔ 15)

102 – 1005 (➔ 14)

107 – 108 (➔ 8)

Рисунок 1.14 – Графіка РАОТВ

					141.6111.009.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

1.5 Системний розрахунок струмів КЗ. Визначення струморозподілу в мережі при КЗ на шинах ПС 110/35/10 кВ

Режими з наявністю трифазного короткого замикання є симетричними і можуть визначатись для довільних точок розрахункової схеми або їх сукупності на базі звичайної режимної математики. У стандартних лекційних (спрощених) методах визначення струмів к. з. схеми зводяться до одного рівня напруги і розрахунок виконується шляхом перетворення схеми до $X_{\text{экв}}$. Якщо необхідно мати результуючий струморозподіл, в такому випадку у повній схемі виконується зворотне розгортання від еквівалентного опору до вихідної схеми.

Для розрахунків к. з. використання стандартних програм розрахунку режиму базується на загальних електротехнічних залежностях струмів і напруг через матрицю провідностей Y . Так як в даній ситуації задача є лінійною можна використовувати процедури Z_REGIM_T (у струмах). Маємо вихідну систему рівнянь:

$$[Y][U] = [I].$$

В заданій матричній структурі можна виділити блоки, які відповідають балансуєчим вузлам (b), вузлам, в яких фіксується струм короткого замикання (k), і навантажувальним вузлам (n):

$$\begin{bmatrix} Y_{bb} & Y_{bk} & Y_{bn} \\ Y_{kb} & Y_{kk} & Y_{kn} \\ Y_{nb} & Y_{nk} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_{kз} \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_b \\ I_{kз} \\ I_n \end{bmatrix}$$

Вузли (b) являються системними і трактуються як шини нескінченної потужності. Вузли (k) мають фіксоване значення напруги $U_{kз} \approx \emptyset$ тому також є балансуєчими. Напруги у всіх інших вузлах (n) визначаються за стандартним виразом методу Z_REGIM_T:

$$[\dot{U}_n] = [\dot{Z}_{nn}][\dot{Y}_{nb}][\dot{U}_b] - [\dot{Z}_{nn}][\dot{I}_n],$$

де $[\dot{Z}_{nn}]$ - матриця опорів впливу, зворотня матриці $[\dot{Y}_{nn}]$;

$[\dot{Y}_{nb}]$ - об'єднана блокова структура $[\dot{Y}_{nb} \quad \dot{Y}_{nk}]$;

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						34
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$[\dot{U}_b]$ - об'єднаний вектор балансуючих вузлів $\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_{kз} \end{bmatrix}$.

Поперечні провідності ліній і навантажувальні струми вузлів, як правило, при розрахунках струмів короткого замикання не враховуються.

Для розрахунку короткого замикання програмою Z_REGIM_T необхідно у вихідних даних занулити навантаження і поперечні провідності, ввести до складу БП вузли, де має місце коротке замикання ($U \approx 0$) та розрахувати звичайний режим і обчислити струми в гілках за різницею напруг

$$I_{kз} = (U_{нач} - U_{кон}) / \sqrt{3} * Z_l,$$

де всі величини U модулі комплексних чисел.

Розрахунок струмів короткого замикання виконується в середовищі пакетів лабораторних робіт LB_APEZ_Z. Умови для розрахунку задаються відповідно до індивідуального варіанту у ключовому файлі AP_AKEY.PAS, що має структуру:

KEY-f – ключ фіксації модулів напруги. При розрахунку короткого замикання не використовується і завжди дорівнює 0, тобто KEYf = 0;

KEY-z – ключ розрахунків струмів короткого замикання KEYz = 1. Якщо KEY-z = 0, в результуючому файлі будемо мати повідомлення ERROR;

KZ-1, KZ-2, KZ-3 – номери вузлів розрахункової схеми, в яких (одночасно) моделюється трифазне коротке замикання. Якщо вузлів менше трьох, зайве заповнюються нулями.

Нехай для контрольної схеми Rschema2 необхідно розрахувати коротке замикання для вузла 105. Ключовий файл дорівнює:

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						35
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

KEY-f	KEY-s	KEY-y	KEY-t	EPS-r	KIT-r	KIT-t
0	1	1	1	0.0001	100	1
=====						
LAB №11			KEY-n	Npz	Nv-1	Nv-2
режим N			0	10	10	9
						2
=====						
LAB №12			KEY-o	EPS-o	KIT-o	Kd
оптимизация Q			1	0.001	50	0.01
=====						
LAB №13			KEY-z	kz-1	kz-2	kz-3
т.к.з. Z			1	105	0	0

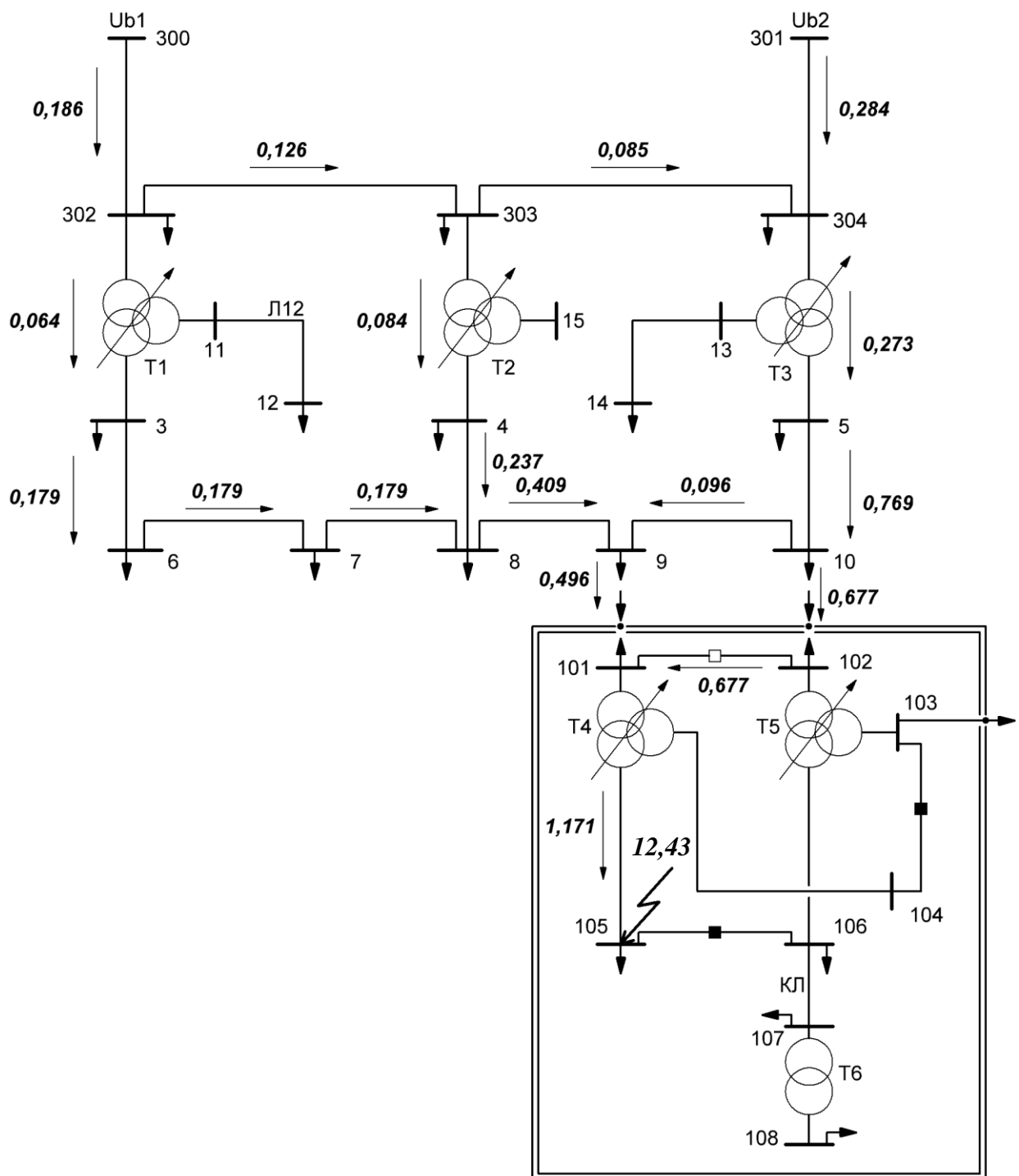
Рисунок 1.15 – Ключовий файл (AP_AKEY.PAS)

Значення струмів короткого замикання в гілках розрахункової схеми має напрямок від вузла початку (NameN) до вузла кінця (NameK) і фіксується на початку гілки. На рисунку 1.17. отримані значення напруг та струмів короткого замикання нанесені на контрольну схему.

***** (Z_REGIM_TKZ) File= Rsxema2 *****						-----			
Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Nnn	NameN	NameK	TKZ
-----						1	300	302	0.186
1	300	350.000	0.000	350.000	0.000	2	301	304	0.284
2	301	340.000	-3.000	339.534	-17.794	3	302	303	0.126
3	302	345.005	-0.496	344.992	-2.989	4	303	304	0.085
4	303	335.839	-1.747	335.683	-10.239	5	302	1001	0.064
5	304	335.096	-2.644	334.739	-15.457	6	1001	3	0.064
6	3	120.547	-0.943	120.531	-1.983	7	1001	11	0.000
7	4	116.349	-1.866	116.287	-3.788	8	303	1002	0.084
8	5	109.256	-2.732	109.132	-5.207	9	1002	4	0.084
9	6	118.298	-1.011	118.280	-2.087	10	1002	15	0.000
10	7	113.800	-1.155	113.777	-2.293	11	304	1003	0.273
11	8	110.802	-1.257	110.775	-2.431	12	1003	5	-0.273
12	9	100.602	-0.435	100.599	-0.764	13	1003	13	0.000
13	10	103.205	-1.504	103.170	-2.708	14	3	6	0.179
14	11	39.571	-0.956	39.565	-0.660	15	4	8	0.237
15	12	39.571	-0.956	39.565	-0.660	16	5	10	0.769
16	13	35.862	-2.804	35.819	-1.754	17	6	7	0.179
17	14	35.862	-2.804	35.819	-1.754	18	7	8	0.179
18	15	10.415	-1.886	10.410	-0.343	19	8	9	0.409
19	101	92.539	0.817	92.530	1.319	20	9	10	-0.096
20	102	92.540	0.816	92.531	1.318	21	11	12	0.000
21	103	30.981	0.816	30.978	0.441	22	13	14	-0.000
22	104	1.018	-85.395	0.082	-1.015	23	101	9	-0.496
23	105	0.000	0.000	0.000	0.000	24	102	10	-0.677
24	106	8.852	0.816	8.851	0.126	25	101	1004	1.171
25	107	8.852	0.816	8.851	0.126	26	1004	104	-0.000
26	108	0.359	0.816	0.359	0.005	27	1004	105	1.171
27	1001	339.176	-0.956	339.129	-5.661	28	102	1005	-0.000
28	1002	327.336	-1.886	327.159	-10.774	29	1005	103	-0.000
29	1003	307.388	-2.804	307.020	-15.036	30	1005	106	0.000
30	1004	3.041	-85.395	0.244	-3.031	31	101	102	-0.677
31	1005	92.540	0.816	92.531	1.318	32	106	107	0.000
-----						33	107	108	0.000

Рисунок 1.16 – Результати розрахунку струмів короткого замикання.

					141.6111.009.ДБ		Арк.
							36
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



$$I_{K3} = (0,496 + 0,677) * 10,45 = 1,171 * 10,45 = 12,43 \text{ кА}$$

Рисунок 1.17 – Контрольна схема розрахунку струмів короткого замикання.

Висновки

В розділі представлені матеріали проекту, які відносяться до основних розрахункових диспетчерських та технологічних задач операторів систем з постачанням (ОСП) і розподілу (ОСР) електроенергії. Конкретно виконане наступне:

1. Був вибраний об'єкт дослідження – ПС 110/35/10 кВ та її живляча мережа (330 – 110 кВ). Розроблена модель об'єкта – розрахункова схема Rschema2 об'ємом 31 вузлів, 35 гілок, 4 контури;

2. Реалізовані розрахунки вихідного режиму і введення його в допустиму область, вихідні втрати $\Delta P = 7.664$ МВт. Використовувався метод Ньютона. Конкретно визначені елементи матриці Якобі на 2 ітерації для 8 вузла, для 8-9 гілки;

3. В інтерактивному режимі проведена оптимізація розподілу реактивних потужностей для двох вузлів розрахункової схеми (110 і 10 кВ). Був задіяний метод спуску другого порядку, де конкретно визначалась діагональна матриця Гессе. В оптимальному режимі прогнозується зниження втрат на 0.814 МВт. Процес зійшовся за 6 ітерацій;

4. Виконаний розрахунок трифазного короткого замикання на шинах 10 кВ індивідуальної ПС системним методом із врахуванням опорів мережі 35/110/330 кВ ($Z_{\text{СИС}}$). Визначений вектор напруг та струмозподілу струму к.з. Проведений контрольний аналіз. Конкретно $I_{\text{КЗ}} = 12,43$ кА;

При реалізації задач розділу були задіяні програмні комплекси РАОТВ, Z_REGIM, L_AПЕЗ .

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						38
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОСТІ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ АЛГЕБРАЇЧНИМ МЕТОДОМ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ ТА СИМВОЛІЧНОГО МЕТОДУ У КОМПЛЕКСНОМУ ПРОСТОРИ

2.1 Постановка задачі. Модель синусоїдальних характеристик (U, I) і функцій (P, dP), їх числове (дискретне) інтегрування

У зв'язку з регулярними з'явленнями у відкритому друці статей, які ставлять під сумнів методичні рішення символічного методу в задачах розрахунку усталеного режиму, коректності алгоритмів вимірювальних систем в електроенергетиці, методів визначення навантажень і проектних варіантів по компенсації реактивних потужностей та інших, доцільно провести фундаментальне дослідження для порівняння алгебраїчного метода миттєвих значень, на який посилаються автори, з режимами електричних мереж, які підтримуються в електротехнічних промислових комплексах (Граф-СКАНЕР, РАОТВ, PowerSystem та інші). Ця задача являється головною у другій частині даної бакалаврської роботи. При реалізації поставленої задачі вирішити наступні питання:

1. Зафіксувати математичний апарат двох порівнювальних методів у відповідності з лекційними курсами КПП;
2. Вибрати у якості прикладів авторські схеми мережі 220 В, а також реальні мережеві умови (джерело, живлячі лінії, навантаження), характерні для високовольтних систем в електроенергетиці України;
3. Забезпечити для аналізу необхідний об'єм графічного матеріалу по синусоїдальним формам струмів, напруг, потужностей та їх втрат для однофазних и трифазних симетричних структур;
4. Систематизувати математичні рішення по моделюванню навантажень, по еквівалентних розрахункових схемах, по інтегруванню синусоїдальних функцій та інше.

					141.6111.009.ДБ						
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження еквівалентності розрахунку режимів алгебраїчним методом миттєвих значень та символічного методу у комплексному просторі			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розробив	Савюк К.С.		11.06.20							39	29
Перевірів	Банін Д.Б.		11.06.20								
Реценз.								КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-г61-1			
Н.контроль	Настенко Д.В.		11.06.20								
Затвердив	Толочко О.І.		11.06.20								

5. Розробити програму, яка автоматизує алгебраїчний метод миттєвих значень для достатньо широкого спектру практичних прикладів.

Моделювання синусоїдальних функцій виконуються при заданні трьох основних параметрів: максимальна амплітуда (U, I), частота (ω) і фазний зсув від початку координат. Для напруги вузла фазний зсув позначатимемо (φ_u), який рівний повороту вектора напруги по відношенню до балансуєчого вузла розрахункової схеми, де прийнято $\varphi_u = 0$. Фазний зсув струму розраховується по відношенню до вузлової напруги і позначається φ_i . Якщо моделюється трифазні функції, потрібен зсув між фазами **A, B, C** ($\varphi_f = 0^\circ, -2\pi/3, +2\pi/3$). При наявності в мережі індуктивного або ємнісного елемента може знадобитись зсув $\pm\pi/2$, який позначимо φ_π .

При моделюванні синусоїдальної функції будемо вибирати ряд послідовних часових точок для розрахунку її миттєвих значень (U_t, I_t). Часові інтервали між цими точками повинні повністю **численно** вкладатись в її період (2π). Кількість інтервалів позначається (K_{nv}). В принципі, можливі варіанти, коли моделюється декілька синусоїд (K_{sin}) або її півперіод. Ми в своїх дослідях зупинимось на варіанті (**період**), коли всі можливі особливості синусоїдної функції представлені на моделі один раз. Таким чином, часовий інтервал моделювання (dt) розраховується по формулі:

$$dt = 1 / \omega K_{nv}.$$

Вказані параметри приведені на рис. 2.1. Функції моделюються по виразу:

$$U_t = U \sin(\omega t + \varphi_u + \varphi_f); \quad I_t = I \sin(\omega t + \varphi_u + \varphi_f + \varphi_i), \text{ де}$$

$$t = 2\pi dt * i, \quad i = 1, 2, 3 \dots K_{nv}. \text{ Відмітимо, що при кожній } i = K_{nv}, \omega t = \omega * 2\pi (1 / \omega K_{nv}) * K_{nv} = 2\pi.$$

Для точності розрахунку K_{nv} має бути достатньо великою (≥ 100). Для простіших розрахункових схем і моделювання однієї фази (**A**) будемо приймати φ_u та φ_f рівними нулю, тобто маємо вихідні функції:

$$U_t = U \sin(\omega t); \quad I_t = I \sin(\omega t + \varphi_i). \quad (2.1)$$

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						40
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

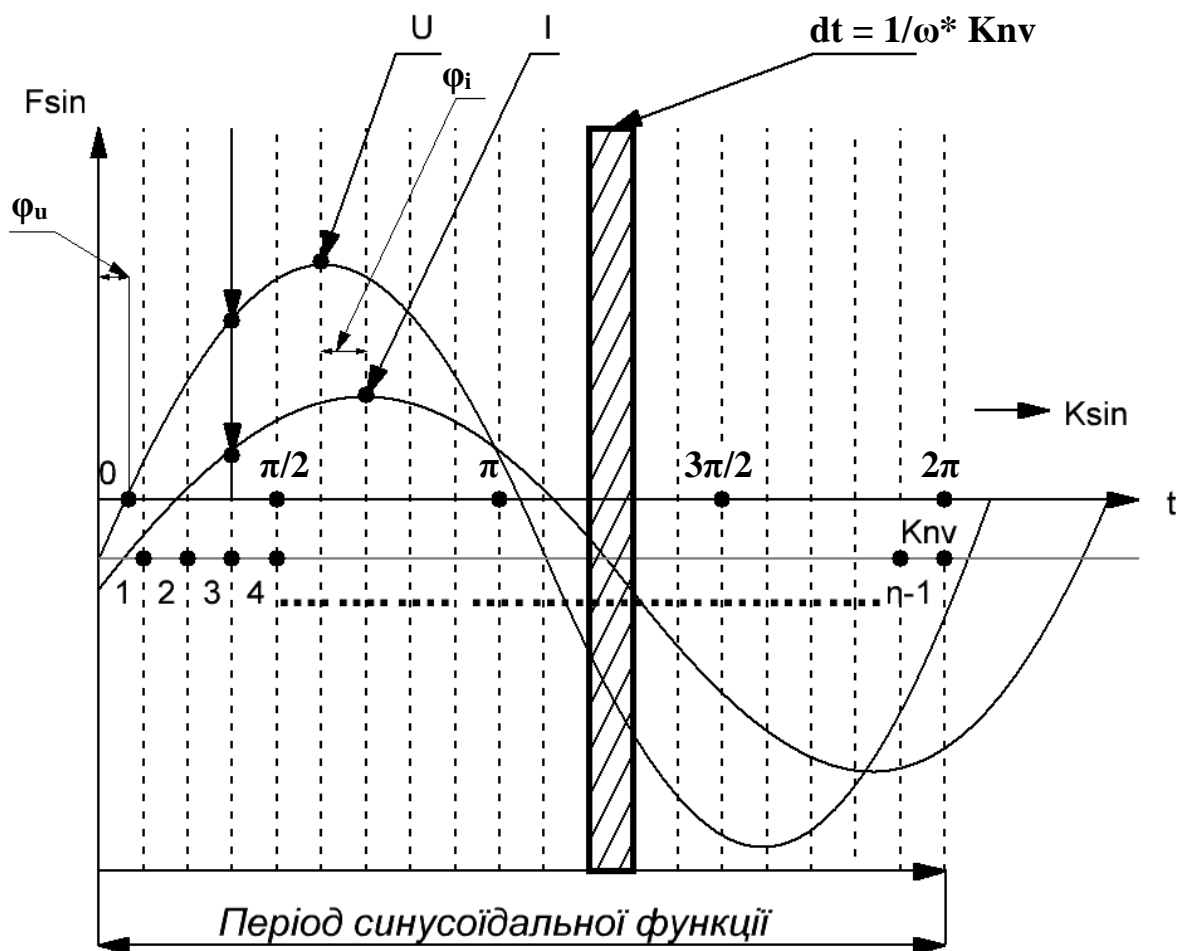


Рисунок 2.1 – Модель синусоїдальних функцій (фаза А)

Можливі електротехнічні синусоїдальні функції, практичне значення яких (середнє, середньоквадратичне) розраховується інтегралом миттєвих значень за деякий розрахунковий період. До них відносяться величини потужності навантаження або потоків у лінії (**P_n**, **P_v**), втрати потужності в їх повздовжніх та поперечних провідностях (**dP_z**, **dP_y**) і також значення генерованої, переданої і споживаної навантаженнями електроенергії. Зрозуміло, що ці синусоїдальні в часі функції в природі в прямому вигляді не існують (їх неможна прямо виміряти), а розраховуються на вимірах первинних параметрів синусоїд напруги, струму та їх фазного здвигу. Розуміючи це, тим не менш будемо користуватися поняттям «виміряна електроенергія, потужність» але «розрахункове значення втрат».

Оскільки необхідно визначати інтегральні величини, треба мати ясність про інтервал інтегрування. Відомо що потужність це середнє значення електроенергії за одиницю часу, а інтервал часу для електроенергії залежить від

задачі, для яких призначена (місяць, доба, година, секунда, час періоду синусоїди). У вимірювальній техніці стабільним рахується, як мінімум, період синусоїди і реалізується алгоритмом чисельного інтегрування, наприклад:

$$Pt = Ut * It \text{ (миттєва потужність)}$$

$$Pn = \frac{1}{K_{nv}} \sum_1^{K_{nv}} Pt = \frac{1}{K_{nv}} \sum_1^{K_{nv}} U \sin(\omega t) * I \sin(\omega t + \varphi i) = \dots \quad (2.2)$$

де $t = 2\pi dt(i)$, $i = 1, 2, 3 \dots K_{nv}$; U, I – амплітудні значення напруги та струму.

Чим більше значення K_{nv} , тим точніше значення функції. При вимірюванні I, U одним приладом проблема синхронізації відсутня. Треба відмітити, що якщо інтегрувати синусоїдальні функції по частинам періоду, то середнє за період не рівне сумі середніх значень його складових, тобто:

$$Pn \neq (\frac{1}{n_1} \sum_1^{n_1} Pt + \frac{1}{n_2} \sum_1^{n_2} Pt) / 2, \text{ де } n_1 + n_2 = K_{nv}$$

Ця нерівність діє на основі інтеграла середніх значень. Маємо рівність:

$$\int_a^c f(x) dx = \int_a^b f(x) dx + \int_b^c f(x) dx, \quad a < b < c$$

Проте інтеграли середніх значень не задовольняють:

$$\int_a^c \frac{1}{(c-a)} f(x) dx \neq \left\{ \int_a^b \frac{1}{(b-a)} f(x) dx + \int_b^c \frac{1}{(c-b)} f(x) dx \right\} / 2 \quad (2.3)$$

Нехай маємо вибірку (10, 20, 30, 40, 50). Середнє значення рівне $150/5=30$. Якщо брати середнє по частинам вибірки, то отримуємо помилку

$$\frac{\left[\frac{10+20}{2} + \frac{30+40+50}{3} \right]}{2} = 27.5 \neq 30.$$

$$\text{Правильно буде: } 30 = \frac{30}{5} + \frac{120}{5} = 6 + 24 = 30$$

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						42
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Даний приклад приведений для контролю математичних рішень, якщо інтегрувати середні значення синусоїд по частинам.

2.2 Моделювання навантажень еквівалентними опорами.

Для моделювання найпростіших електротехнічних об'єктів приймають схеми з активними опорами (**R**) індуктивними ($X = \omega L$) та ємнісними ($X = 1/\omega C$) опорами. Наприклад, різні автори моделюють навантаження згідно різних схем їх з'єднання (рис.2.2.). Не будемо аналізувати яка із них краща, оскільки всі вони зводяться до еквівалентного варіанту (**Re**, **Xe**). Якщо $X > 0$, то маємо активно-індуктивний еквівалент, якщо $X < 0$ – активно-ємнісний. Звісно, для адекватності моделювання режиму потрібне коректне еквівалентування.

В реальних умовах, коли навантаження вузла розрахункової схеми узагальнює технологічну мережу споживача з усіма його трансформаторами, з струмообмежувальними і шунтувальними реакторами, з кабельними і повітряними лініями, з багатьма споживацьких і транзитних потужностей, з компенсуючими БСК та інше, і все це при неформалізованій конфігурації зв'язку цих компонентів, то, для алгебраїчного методу розрахунку режиму, варіант з **Re**, **Xe** являється єдиним можливим, але котрий реалізується тільки вимірювальними способами:

$$Ze = U/I; \quad Re = Ze * \cos(\varphi i); \quad Xe = Ze * \sin(\varphi i),$$

Де **U**, **I**, φi - параметри функцій, отриманих на основі приладного обліку.

Тому, для моделювання, вводиться термін «кут опору навантаження» не для необхідності, а для параметра φi в електроенергетиці є ще додатковий цілком достатній термін «**cosφ**» або «**tgφ**».

Декілька слів потрібно сказати про моделювання вимірів. Тут на вимірювальну модель поступають вибірки миттєвих значень (**Ut**, **It**), кількість яких **K_{nv}** (по нашому позначенню). Після цього на основі отриманої дискретної

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						43
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

функції з допомогою метода розкладення в ряд Фур'є або метода найменших квадратів розраховують шукані параметри (U , I , ϕ_i , $\omega \dots$). Нюанси процесу виміру поточної частоти, амплітуд напруги і струму, фазного здвигу ϕ_i для нас не мають суттєвого значення. Оскільки в задачах розрахунку усталеного режиму, як правило, частота береться постійною, що, в принципі, дає можливість в символічному методі виключити параметр «час», прийнявши умови ($\omega = \text{const} = 50 \text{ Гц}$).

Таким чином, для моделювання навантаження маємо еквівалентну модель представлену на рис 2.2.

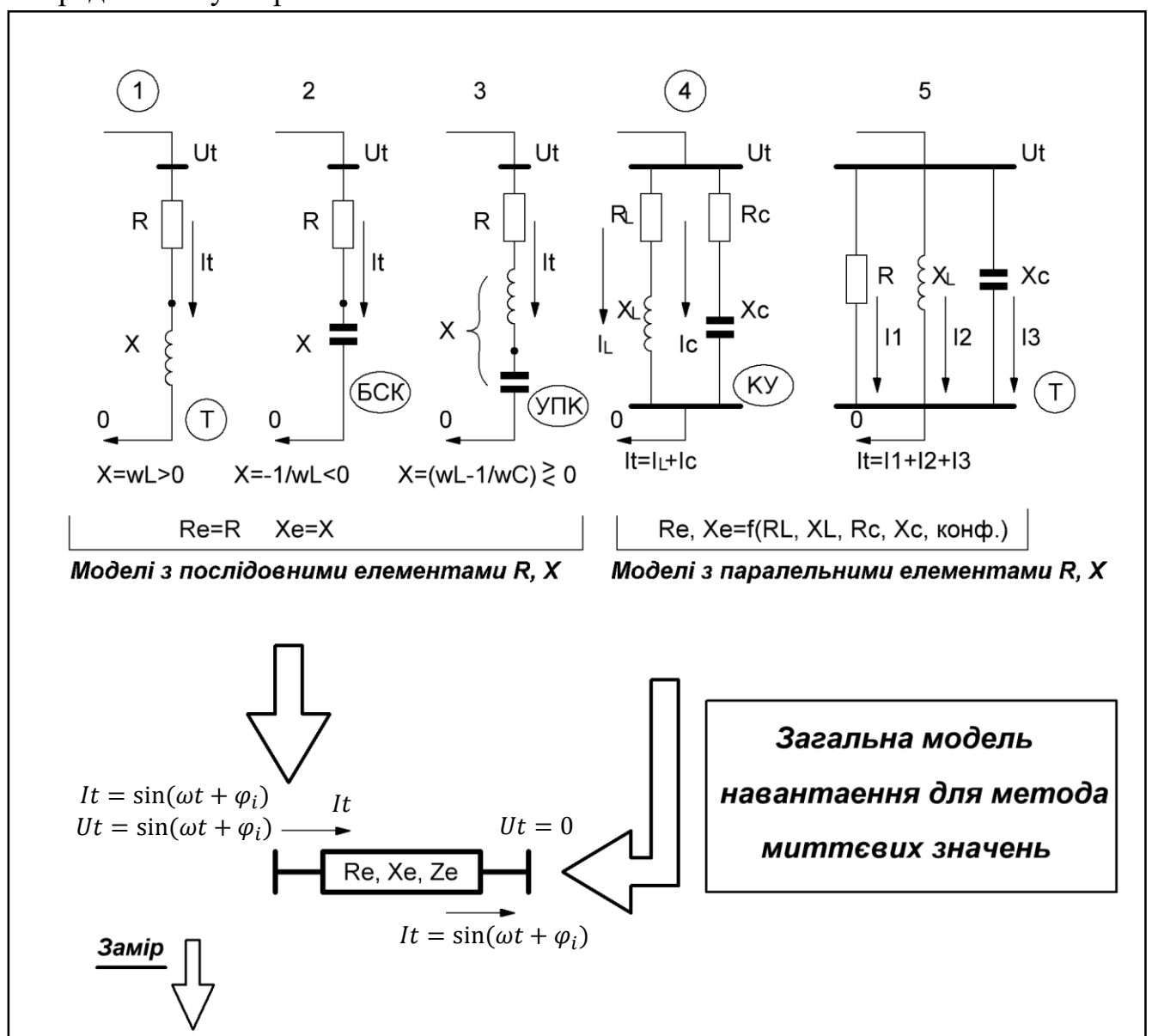


Рисунок 2.2 – Конкретні і загальна модель навантаження з допомогою еквівалентних опорів

Т – теоретична модель; БСК – батарея статичних конденсаторів;

УПК – прилад повздовжньої компенсації; КУ – компенсуючий прилад.

$$Z_e = U/I \quad R_e = Z_e * \cos(\varphi) \quad X_e = Z_e * \sin(\varphi) \quad Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}$$

Так як в алгебраїчному методі орієнтуємося на модуль з еквівалентним опором (**Re**, **Xe**) задіємо тут два приклади 1 та 4 згідно рисунку 2.2. Для еквівалентування скористаємось способом комплексних чисел.

Приклад 1: $R_l = 16.180340$; $X_l = 11.755705$; $Z_e = 20$; $\varphi_i = 36^\circ$.

Приклад 4: $R_l = 16.180340$; $X_l = 11.755705$; $Z_e = 20$; $R_c = 0.1$,

а значення **Xc**, будемо вибирати по трьом умовам: відсутності компенсації або недокомпенсації еквівалентного фазового здвигу $\varphi_e > 0$ (**Xe** > 0), його компенсацію $\varphi_e = 0$ (**Xe** = 0) та перекомпенсацію $\varphi_e < 0$ (**Xe** < 0).

Виконаємо вивід формули для еквівалентних параметрів **Ze**, **Re**, **Xe**, φ_e , як функції заданих **Rl**, **XL**, **Rc**, **Xc**. Використаємо апарат комплексних чисел. Позначимо:

$$\dot{Y}_L = (GL + jBL) = \frac{1}{RL + jXL}; \quad \dot{Y}_C = (Gc + jBc) = \frac{1}{Rc + jXc}.$$

$$\dot{Z}_e = \frac{1}{\dot{Y}_L + \dot{Y}_C} = \frac{1}{(GL + Gc) + j(BL + Bc)} = \frac{(GL + Gc) - j(BL + Bc)}{(GL + Gc)^2 + j(BL + Bc)^2}$$

$$\dot{R}_e = \frac{(GL + Gc)}{(GL + Gc)^2 + j(BL + Bc)^2}; \quad \dot{X}_e = -\frac{(BL + Bc)}{(GL + Gc)^2 + j(BL + Bc)^2}. \quad (2.4)$$

Аналогічно виконаємо вивід формул для **Xc**, коли задані значення **RL**, **XL**, **Rc**, а **Xc** необхідно визначити з умови **Xe** = 0, тобто реалізується компенсація еквівалентного фазного здвигу $\varphi_e = 0$:

$$\dot{X}_e = 0; \quad -\frac{(BL + Bc)}{(GL + Gc)^2 + j(BL + Bc)^2} = 0$$

Так як знаменник більше нуля маємо умову:

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						45
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$-(BL + Bc) = \frac{XL(Rc^2 + Xc^2) + Xc(RL^2 + XL^2)}{(Rc^2 + Xc^2)(RL^2 + XL^2)} = 0$$

Аналогічно, якщо знаменник більше нуля:

$$XL * Xc^2 + Xc(RL^2 + XL^2) + XL * Rc^2 = 0$$

Якщо $XL = 0$, то і $Xc = 0$. Розділимо рівняння на $XL \neq 0$, отримуємо квадратне рівняння із невідомою Xc :

$$Xc^2 + Xc \frac{ZL^2}{XL} + Rc^2 = 0$$

$$Xc = \left[-ZL^2/XL \pm \sqrt{(ZL^2/XL)^2 - 4 * Rc^2} \right] / 2$$

Рівняння справедливе для будь яких значень Rc . Тому якщо $Rc = 0$, то маємо два корні $Xc = 0$ та $Xc = Z^2/XL$. Як вже відмічено, перше рішення $Xc = 0$ може бути, якщо $XL = 0$, в протилежному випадку потрібно брати знак підкореневого виразу «-». Таким чином рішення має вигляд:

$$Xc = \left[-ZL^2/XL - \sqrt{(ZL^2/XL)^2 - 4 * Rc^2} \right] / 2$$

Підставивши наші значення **RL**, **XL**, **Rc** маємо:

$$Xc = -34.025739$$

Моделювання двох прикладів можна виконати на схемі рисунок 2.3., яка перетворюється в приклад 1, якщо задати $Rc = 1e10$ та $Xc = -1e10$. Розрахунки будемо виконувати для трьох варіантів: відсутність компенсації або недокомпенсація, фазовий зсув $\phi_c = 0$ (режим компенсації) і варіант із перекомпенсацією.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

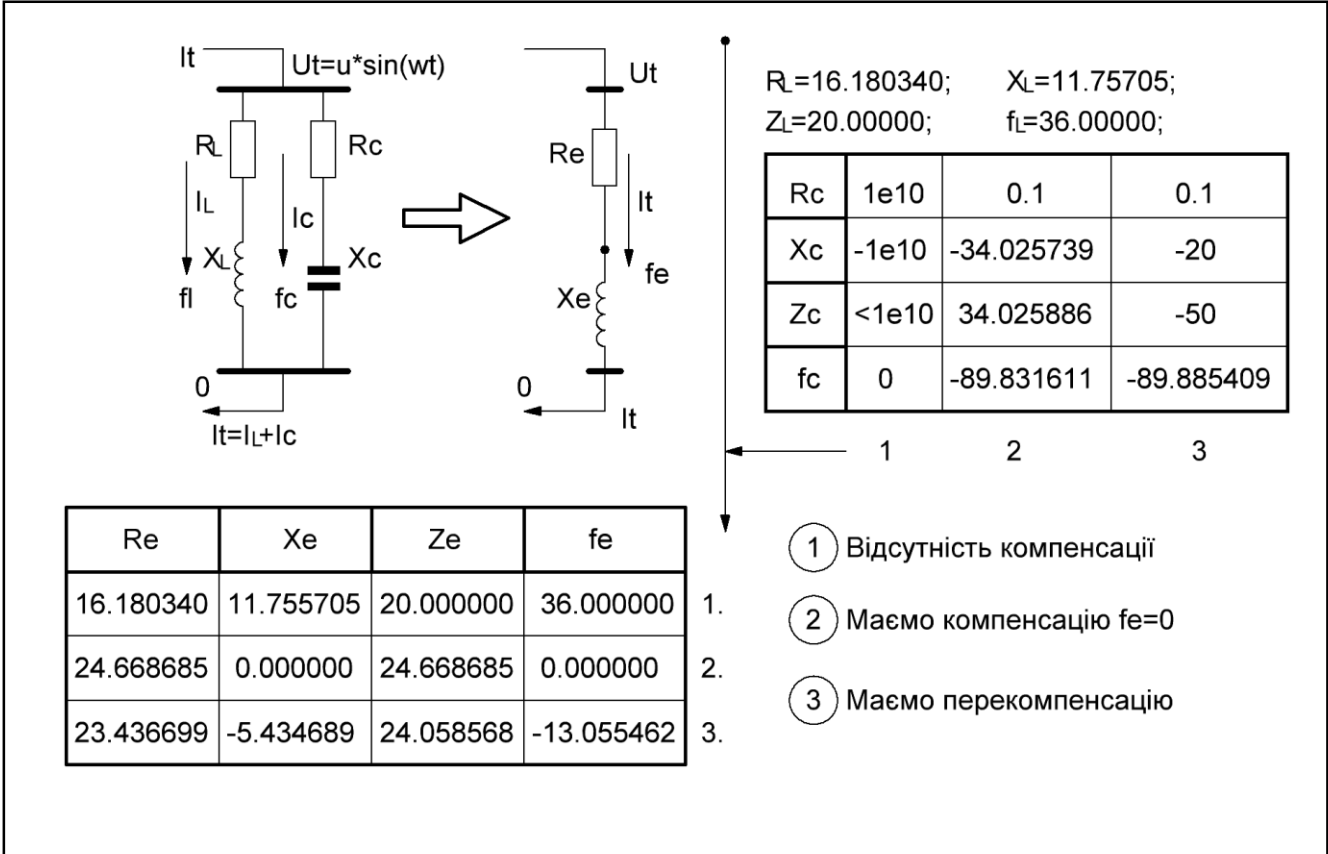


Рисунок 2.3 – Структура даних для контрольних розрахунків характеристик режиму алгебраїчним та символічним методами

2.3 Графічний супровід режиму у методі миттєвих значень при навантаженнях Z_e

Всі розрахункові варіанти будемо супроводжувати графічним матеріалом. Структура файлів які містять виборки миттєвих значень струмів, навантажень і потужностей приведена на рис 2.4..

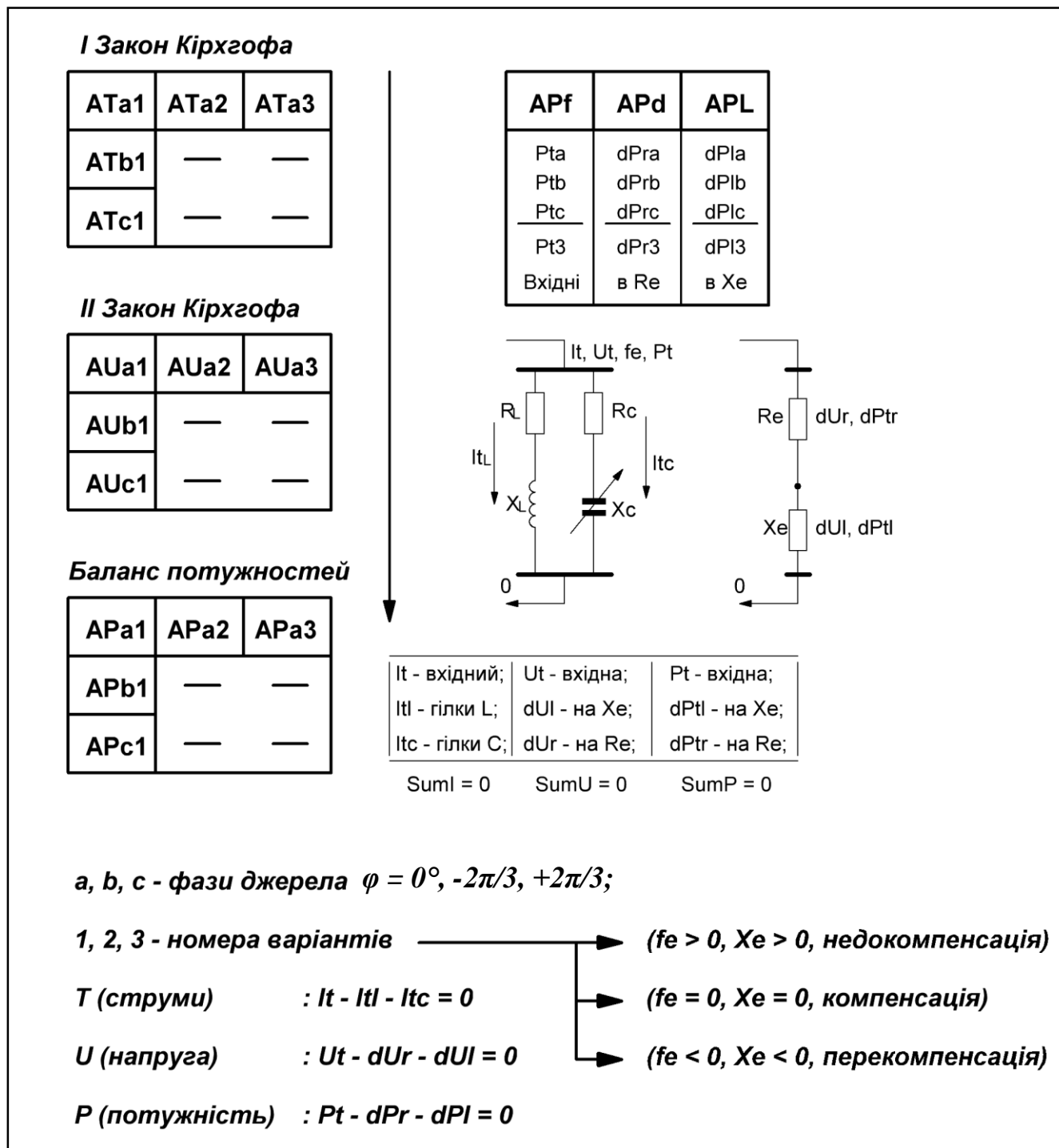


Рисунок 2.4 – Структура графічних файлів для контрольного прикладу

Тут пропонується для аналізу (А – перший символ назви файлів) чотири групи файлів в назві яких є символи «Т» (струми), «U» (напруги або падіння напруги), «Р» (потужність). Крім того, файли для різних фаз відмічені буквами (a, b, c), а варіант розрахункового прикладу цифрами 1, 2, 3.

По призначенню файли із символом «Т» призначені для перевірки I закону Кірхгофа на рівні миттєвих значень струмів I_t (вхідний струм навантаження), I_{tl} (струм гілки із індуктивним опором), I_{tc} (струм гілки із ємнісним опором). Для всіх значень періоду має виконуватись співвідношення:

$$SumT = I_t - I_{tl} - I_{tc} = 0 \quad (2.4)$$

По призначенню файли із символом «U» призначені для перевірки II закону Кірхгофа на рівні миттєвих значень напруги U_t (вхідна напруга на шинах споживача), dU_r (падіння напруги на активному еквівалентному опорі), dU_l (напруга на реактивному еквівалентному опорі). Для всіх значень періоду має виконуватись співвідношення:

$$SumU = U_t - dU_r - dU_l = 0 \quad (2.5)$$

По призначенню файли із символом «Р» призначені для контролю балансу потужності. Задіяні раніше величини P_t (вхідна потужність навантаження), dP_{tr} (споживана потужність в активному опорі), dP_{tl} (споживана потужність в реактивному опорі). Для всіх значень періоду має виконуватись співвідношення:

$$SumP = P_t - dP_{tr} - dP_{tl} = 0 \quad (2.6)$$

Для однієї фази змінного струму ($\varphi_t = 0$), але з різними режимними варіантами (відсутність компенсації кута $\varphi_e > 0$, його компенсація $\varphi_e = 0$ і його перекомпенсація $\varphi_e < 0$), пропонуються файли АТа1, АТа2, АТа3 для аналізу співвідношень миттєвих струмів. Відповідно для аналізу миттєвої напруги та потужності маємо файли АUa1, АUa2, АUa3, АРа1, АРа2, АРа3. Зрозуміло, що у всіх графіках має виконуватись умова:

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						49
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$SumT, SumU, SumP = 0$$

Для аналізу балансу вхідних потужностей в трифазній мережі типу Y/Y із симетричним навантаженням пропонується файл APf, в яких задіяні фазні параметри Pta, Ptb, Ptc і їх сума Pt3, а також контролюється умова:

$$SumIf = Ita + Itb + Itc = 0$$

Аналогічно в файлах APd і APl підводиться баланс споживаної потужності в активних еквівалентних опорах (dPra, dPrb, dPrc) і в реактивних еквівалентних опорах (dPla, dPlb, dPlc) і їх суми (dPR3, dPL3).

Графічний супровід режиму у методі миттєвих значень при навантаженнях Ze приведений в додатку А.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						50
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Принципи аналізу адекватності символічного і алгебраїчного методів розрахунку режимів

1. У нашій задачі **об'єктами являються** електричні мережі, де визначаються і порівнюються їх режимні характеристики;

2. Для **порівняння** методів вибираються приклади із різними компонентами які модулюються, але в яких повинні бути абсолютно рівнозначними:

- **конфігурація** мережевого графа, тобто склад вузлів, гілок і їх зв'язків;
- **параметри** обладнання для цих гілок і вузлів;
- **умови електропостачання** цієї мережі і варіанти регулювання режиму.

3. Для **порівняння** має бути визначений склад **головних невідомих** режимних характеристик;

4. Для алгебраїчного і для символічного методів задані режимні характеристики (вчасності, навантаження вузлів) можуть бути різними, але у них повинен бути єдиний вимірювальний еквівалент;

5. В нашій задачі зафіксуємо наступні позиції:

- **маємо одне джерело** живлення (балансуючий вузол БП), для якого задані діюче (середньоквадратичне) значення напруги (U_g) і нульовий вузол початку координат ($\varphi_u = 0$);

- **живлячі лінії** характеризуються параметрами згідно П – подібній схемі заміщення (R_v, X_v, G_v, B_v);

- **навантаження** можуть задаватися еквівалентними опорами R_e, X_e (для обох методів) або для символічного метода потужностями

$\dot{S} = P + jQ$. Обидва варіанти мають один вимірювальний еквівалент – амплітуди синусоїд напруги і струму (U, I) та фазного здвигу між ними ($\varphi_i = \varphi_e$) на вході споживача.

$$Z_e = U/I = U_m/I_m = U_t/I_t;$$

$$R_e = Z_e * \cos(\varphi_e);$$

$$X_e = Z_e * \sin(\varphi_e);$$

$$\dot{S} = U_m * I_m;$$

$$P_s = \dot{S} * \cos(\varphi_e);$$

$$Q_s = \dot{S} * \sin(\varphi_e) = P * \tan(\varphi_e).$$

Алгебраїчний та символічний методи

Символічний метод

• для порівняння пропонується наступний склад головних невідомих режимних характеристики:

P_g – потужність джерела живлення (БП), яка видається в мережу;

dPr – втрати потужностей в живлячій гілці в її активних елементах;

P_n – вхідна потужність навантаження;

U_m, I_m – діючі напруга і струм на вході навантаження;

φ_u – зсув фази напруги по відношенню до U_g ;

Звернемо увагу, що у вказаному складі невідомих відсутня реактивна потужність, тимчасово будемо рахувати її спеціальною характеристикою символічного методу.

Якщо вказані режимні характеристики рівні із необхідною точністю для обох методів, можна робити висновок: для даного прикладу методи еквівалентні і обговорювати які небудь помилки в них як мінімум некоректно. Кінцевий висновок про адекватність методів потребує серії розрахункових прикладів.

6. Таким чином, пропонується вибрати розрахунковий приклад (конфігурації, параметри вузлів і гілок), узгодити навантаження (Re, Xe) або (P, Q) і визначити невідомі режимні характеристики $P_g, dPr, P_n, U_m, I_m, \varphi_u$ (потужність джерела, втрати в мережі, а для кожного вузла вхідну потужність, діюче значення струму та напруги і кутові зсуви фаз напруги).

Як відомо, це найпростіша постановка розрахунку режиму. Маємо мережу тільки одного класу напруги, відсутні моделі вузлів із фіксацією модуля напруги, не передбачено ситуації розрахунку режиму із декількома БП та інше.

7. Зрозуміло що, в результатах розрахунків мають виконуватись закони Ома, Кірхгофа та баланси потужностей, а також, розрахункові значення невідомих повинні відповідати прийнятим вихідним даним.

8. Для розрахунку режиму символічним методом можна задіяти промисловий комп'ютерний комплекс (ГрафСканер, РАОТВ, PowerSystem та інші). Для алгебраїчного метода потрібно узгодити елементарний математичний апарат, наприклад:

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						52
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **еквівалентування** конфігурацій мережі до БП;
- метод **моделювання** синусоїдального струму і напруги;
- формули **розрахунку функцій** від миттєвих значень струму та напруги;
- **коректні алгоритми і період** інтегрування цих функцій.

Мотиви для вирішення всіх вказаних питань перевірений у розділах.
Розрахункові формули представлені на рис.2.12.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						53
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювальний еквівалент навантаження (m – кількість вимірів за період)

$U_t, I_t \Rightarrow U, I, \varphi_e \Rightarrow U_m, I_m$		
миттєве	амплітудне	інтегральне (діюче)

$$U_m = \sqrt{\sum U_t^2 / m}; \quad U = U_m * \sqrt{2}$$

$$I_m = \sqrt{\sum I_t^2 / m}; \quad I = I_m * \sqrt{2}$$

$$P_n = \sum U_t * I_t / m \text{ (середнє)}; \quad Q_n = P_n * \operatorname{tg}(\varphi); \quad S = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2},$$

Моделі миттєвих значень при розрахунку режиму алгебраїчним методом:

Модель U_t, I_t	$U_t = U * \sin(\omega t); \quad I_t = I * \sin(\omega t - \varphi_e);$ $t = 2\pi * dt * i, \quad i = 1, 2, 3 \dots m; \quad dt = 1/\omega_0 * m.$
-------------------------------------	---

Модель навантаження	$Z_e = U/I = U_m/I_m = U_t/I_t; \quad R_e = Z_e * \cos(\varphi_e);$ $X_e = Z_e * \sin(\varphi_e); \quad Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}.$
----------------------------	---

Моделі функцій $dU_{rt}, dU_{xt}, P_t, dP_{rt}, dP_{xt}$	$dU_{rt} = f(U_t, I_t, Z_e) \dots$
--	------------------------------------

Падіння напруги на еквівалентному Z

$$dU_{rt} = I_t * R_e = (U/Z) R_e * \sin(\omega t - \varphi_e);$$

$$dU_{xt} = I_t * X_e = (U/Z) X_e * \sin(\omega t - \varphi_e + \pi/2);$$

Споживання (втрати) потужності на еквівалентному Z

$$P_t = U_t * I_t = (I * U) * \sin(\omega t) * \sin(\omega t - \varphi_e); \quad - \text{вхідна потужність}$$

$$dP_{rt} = dU_{rt} * I_t = 0,5(I * U) * \cos(\varphi_e) * (1 - \cos 2(\omega t - \varphi_e));$$

$$dP_{xt} = dU_{xt} * I_t = 0,5(I * U) * \sin(\varphi_e) * \sin 2(\omega t - \varphi_e).$$

Інтеграли P_s, dP_r, dP_x	Інтеграли за один період, який включає в себе m-рівних інтервалів (середні значення)
---	--

$$P_s = \int P_t * dt \approx \sum P_t / m; \quad dP_r = \int dP_{rt} * dt \approx \sum dP_r / m; \quad dP_r \rightarrow dP_Z, dP_Y$$

$$dP_x = \int dP_{xt} * dt \approx \sum dP_x / m = 0; \quad P_s \rightarrow P_g, P_n, P_v \dots$$

Контрольні співвідношення	I, II закони Кірхгофа, Баланс потужностей
----------------------------------	--

$$\sum I = \dots = 0; \quad \sum U = \dots = 0; \quad \sum P = \dots = 0. \quad \text{Структура контрольних рівнянь визначається варіантами прикладів.}$$

Рисунок 2.12 – Вимірювальний еквівалент навантаження. Модель миттєвих значень (алгебраїчний метод)

Для переходу до символічного методу передбачимо в процесі моделювання миттєвих значень струмів та напруг розрахунків їх діючих значень:

$$Um = \sqrt{\sum Ut^2/m}; \quad Im = \sqrt{\sum It^2/m}.$$

При цьому вихідні характеристики символічного методу розраховуються:

$$S = Um * Im; \quad P = S * \cos(\varphi_e); \quad Q = S * \sin(\varphi_e).$$

Для гілок втрати в опорах R_v , X_v визначаються по формулі:

$$dPR_v = Im^2 * R_v; \quad dQX_v = Im^2 * X_v.$$

2.5. Результати розрахунків контрольних схем

Розглянемо новий об'єкт дослідження з лінією електропередачі від джерела до розглянутого раніше споживача з варіантами регулювання X_c . Оскільки приклад продовжує схему 220 [В] для лінії прийнята марка А-25 довжиною 1 км. Поперечна провідність лінії згідно П-подібній схемі заміщення може не враховуватись через малі струми на землю. Тим не менш загальна схема приведена на рисунку 2.13. Математичні співвідношення представлені у повному складі. Відмітимо, що в даній схемі має виконуватись I та II закони Кірхгофа і баланс потужностей для будь якої точки всередині періоду синусоїди:

$$SumI = Ig - Iv1 - Iv2 - Itl - Itc = 0$$

$$SumU = Utg - dUR_{vet} - dUL_{vet} - dUr - dUL = 0$$

$$SumP = Ptg - dPv1 - dPv2 - dPR_v - dPL_v - dPr - dPL = 0$$

Виконані розрахунки для шести варіантів параметрів схеми, результати яких для алгоритмічного метода із миттєвими потужностями представлені на рисунку 2.14. Тут три перших варіанта мають $R_v, X_v, B_v = 0$, але регулюється X_c і, зрозуміло – еквівалентний опір навантаження Z_e . Три наступних режими

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						55
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

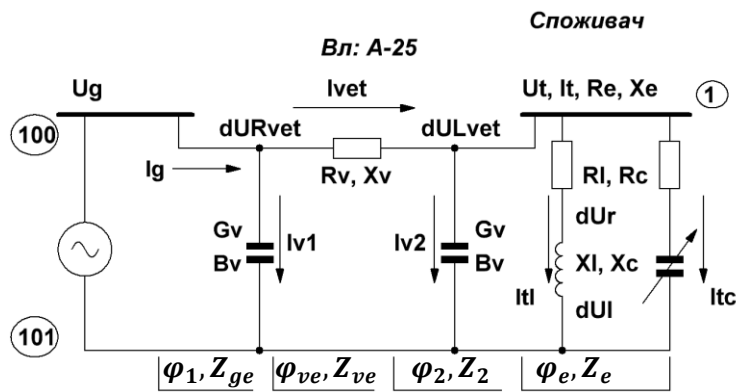
мають лінію передачі із параметрами $R_v = 1.27$, $X_v = 0.345$, $B_v = -1.665$ та заданими раніше варіанти навантаження.

Матеріал на рис.2.14. являється вихідним форматом розробленої моделюючою програмою для будь – яких даних типового прикладу рис.2.13.. о кожному варіанту (1-6) результати займають чотири рядки. У першому представляються потужності джерела (P_g), втрати в опорі і провідностях лінії (dP_{Xv} , dY_{r1} , dY_{r2} , dY_{X1} , dY_{X2}), вхідна потужність навантаження (P_n) і втрати потужності в її еквівалентному опорі (dP_R , dP_X), а також вхідна діюча напруга споживача (U_m). Склад величин дозволяє контролювати баланс діючих значень потужності ($P_g = P_n + dP_{Rv} + dY_{r1} + dY_{r2}$). **Відмітимо**, що для всіх варіантів dY_{r1} , $dY_{r2} = 0$ (не задані), втрати активної потужності в реактивних опорах, зрозуміло, дорівнює 0 (dP_{Xv} , dY_{X1} , dY_{X2} , $dP_X = 0$), тобто баланс зводиться до рівності:

$$P_n = dP_R; \quad P_g = P_n + dP_{Rv}.$$

Наприклад, в варіанті 6 маємо $1802.0 + 117.1 = 1918.8$ та інші.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



$R_l = 16.80340$
 $X_l = 11.755705$

$R_c =$	1e10	0.1	0.1
$X_c =$	-1e10	-34.025759	-20.0
	1	2	3
$R_e =$	16.180340	24.668685	19.555400
$X_e =$	11.755705	0.0	-9.902173

$R_v = 1.27$; $X_v = 0.345$; $B_v = -3.33/2 = -1.665$ [мкСм]

Варіанти навантажень

Операції еквівалентування (паралельний, послідовний):

- Паралельний $(R_l, X_l) \parallel (R_c, X_c) \rightarrow (R_e, X_e, Z_e, \phi_e)$:
 $A1 = R_l * R_c - X_l * X_c$; $A2 = R_l * X_c + R_c * X_l$; $B1 = R_l + R_c$; $B2 = X_l + X_c$;
 $R_e = (A1 * B1 + A2 * B2) / \omega$; $X_e = (-A1 * B2 + A2 * B1) / \omega$;
 $\omega = B1 * B1 + B2 * B2$.
- Обернення провідності $(G_v, B_v) \rightarrow (R_b, X_b, Z_b, \phi_b)$:

$$Z_b = 1 / \sqrt{G_v^2 + B_v^2}; \quad \phi_b = \arctg(B_v / G_v);$$

$$R_b = Z_b * \cos(\phi_e); \quad X_b = Z_b * \sin(\phi_e).$$

- Паралельний $(R_e, X_e) \parallel (R_b, X_b) = (R_2, X_2)$.
- Послідовний $(R_2, X_2) + (R_v, X_v) = (R_{ve}, X_{ve})$.
- Паралельний $(R_{ve}, X_{ve}) \parallel (R_b, X_b) = (R_1, X_1, Z_1, \phi_1)$.

Миттєві струми та напруги:

- Напруга та струм генератора (U_g, I_g) , навантаження (U_t, I_t) ;
- Струм в опорі гілки (I_{vet}) , струм в провідностях (I_{v1}, I_{v2}) ;
- I закон: $I_g - I_{v1} - I_{v2} - I_{tl} - I_{tc} = 0$;
- II закон: $U_g - dU_{Rvet} - dU_{Xvet} - dU_r - dU_l = 0$.

Рисунок 2.13 – Розрахункова схема із живлячою лінією для аналізу втрат потужності

=====														
N	Pg[BT]	dPRv (Rv)	dPXv (Xv)		dYr1 (Gv)		dYr2	dYx1 (Bv)		Pn (fe)		dPR (Re)	dPX (Xe)	Um[B] (fu)
=====														
1	1957.8	0.0	0.0		0.0		0.0	0.0		1957.8		1957.8	-0.0	220.0
	0.000	0.000		0.000		0.000		0.000		36.00		16.1803	11.7557	0.00
	SumI=-0.0000		SumU= 0.0000		SumP=-0.0000		Im[A] = 11.0000							
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 0.0 0.0 (SS,PS,Qs)= 2420.0 1957.8 1422.4 #####														
=====														
2	1962.0	0.0	0.0		0.0		0.0	0.0		1962.0		1962.0	-0.0	220.0
	0.000	0.000		0.000		0.000		0.000		0.00		24.6687	0.0000	0.00
	SumI=-0.0000		SumU=-0.0000		SumP= 0.0000		Im[A] = 8.9182							
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 0.0 0.0 (SS,PS,Qs)= 1962.0 1962.0 0.0 #####														
=====														
3	1969.9	0.0	0.0		0.0		0.0	0.0		1969.9		1969.9	-0.0	220.0
	0.000	0.000		0.000		0.000		0.000		-26.86		19.5554	-9.9021	0.00
	SumI= 0.0000		SumU=-0.0000		SumP= 0.0000		Im[A] = 10.0367							
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 0.0 0.0 (SS,PS,Qs)= 2208.1 1969.9 -997.5 #####														
=====														
4	1873.0	136.3	-0.0		0.0		0.0	0.0		1736.7		1736.7	-0.0	207.2
	1.270	0.345		0.000		0.000		-1.665		36.00		16.1803	11.7557	1.26
	SumI= 0.0000		SumU= 0.0000		SumP=-0.0000		Im[A] = 10.3601							
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 136.3 36.9 (SS,PS,Qs)= 2146.6 1736.7 1261.8 #####														
=====														
5	1865.6	91.3	0.0		0.0		0.0	0.0		1774.3		1774.3	-0.0	209.2
	1.270	0.345		0.000		0.000		-1.665		0.00		24.6687	0.0000	-0.76
	SumI=-0.0000		SumU= 0.0000		SumP=-0.0000		Im[A] = 8.4808							
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 91.3 24.7 (SS,PS,Qs)= 1774.3 1774.3 0.0 #####														
=====														
6	1919.8	117.1	0.0		0.0		0.0	0.0		1802.7		1802.7	-0.0	210.5
	1.270	0.345		0.000		0.000		-1.665		-26.86		19.5554	-9.9021	-2.20
	SumI=-0.0000		SumU= 0.0000		SumP= 0.0000		Im[A] = 9.6013							
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 117.1 31.7 (SS,PS,Qs)= 2020.6 1802.7 -912.8 #####														
=====														

Рисунок 2.14 – Результат модулювання схеми 220 В алгебраїчним методом

У другому рядку представлені всі параметри даного варіанту (R_v , X_v , G_v , B_v , φ_e , R_e , X_e), а також розрахунковий результат – фазний зсув напруги (φ_u) по відношенню до джерела живлення. Наприклад, у варіанті 6 діюча напруга дорівнює $210.5 - 2.20^\circ$.

Інформація третього рядка підтверджує коректність результатів, оскільки дотримуються закони ($\sum I = 0$, $\sum U = 0$, $\sum P = 0$) для всіх точок моделювання миттєвих значень струмів, напруг і їх функцій. Крім того в цьому рядку виводяться діючі значення вхідного струму I_m .

У четвертому рядку (спеціально виділений) розраховані вихідні режимні характеристики для наступного моделювання режиму символічним методом: повна потужність ($S = U_m \cdot I_m$), активна та реактивна потужності ($P_s = S \cdot \cos(\varphi_e)$, $Q_s = S \cdot \sin(\varphi_e)$), а для наступного порівняння визначені сумарні активні та реактивні втрати в живлячій лінії ($dPR_v = I_m^2 R_v + U_g^2 G_v + U_m^2 G_v$; $dQ_{Xv} = I_m^2 X_v + U_g^2 B_v + U_m^2 B_v$). Для варіанту 6 нашого прикладу маємо:

$$S = 210.5 \cdot 9.6013 = 2020.6, \quad P_s = 2020.6 \cdot \cos(-26.86) = 1802.7,$$

$$Q_s = 2020.6 \cdot \sin(-26.86) = -912.8, \quad dPR_v = 9.6013^2 \cdot 1.27 = 117.1$$

$$dQ_{Xv} = 9.6013^2 \cdot 0.345 = 31.7.$$

Розмірності величин [В, А, Вт] вказані в шапці таблиці. По результатам необхідно звернути увагу на варіанти 2, 5 (компенсація $X_e = 0$, $\varphi_e = 0$). Для цих же варіантів значення реактивних потужностей також рівне нулю.

Для повноти порівняння методів виконані розрахунки для системної мережі 220 кВ, але по структурі аналогічної прикладу рис.2.13. Прийнята живляча лінія довжиною 100 км яка виконана маркою АСО-185. Джерело живлення має номінальну напругу, а споживач моделюється паралельними активно-індуктивним опором ($R_l = 417.24$, $X_l = 166.9$) і активно-ємнісним опором, де аналогічно прийняті три варіанта без компенсації ($Z_c = \infty$), із компенсацією ($R_c = 5$, $X_c = -1209.954$) та з перекомпенсацією ($R_c = 5$, $X_c = -900$). Результуючий формат розрахункової програми наведений на рис.2.15.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						59
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 2.16. – 2.21. приведені результати розрахунку режиму цих же варіантів **символічним методом** за допомогою промислового комплексу РАОТВ. Проводились розрахунки при моделюванні режиму заданими опорами, а також навантаженнями в потужностях (P_s , Q_s). Вихідні елементарні схеми показані на рис. 2.16. Тут у верхній частині рисунка представлені розрахункові схеми типу 2.13. із напругою 220 В, лінією А-25 довжиною 1 км та навантаженнями заданими еквівалентними опорами Z_e (зліва) або потужностями P , Q (справа). Розмірності величин [В, Ом, кВт]. Нижче розглядаються ті ж варіанти схем, але напруга 200 кВ, лінією АСО-185 довжиною 100 км і тими ж способами задання навантажень Z_e (зліва) або P , Q (справа). На рис.2.17. представлені файли вузлів та гілок для програми РАОТВ (варіанти 220 В, Z_e), а також фрагмент результатів по потужностям балансуючих вузлів (100, 102, 104, 106, 108, 110 – райони схеми №р = 1, 3, 5, 7, 9, 11) і по втратах активної та реактивної потужності в живлячих лініях (100-1, 102-2, 104-3, 106-4, 108-5, 110-6) згідно прийнятим варіантам. На наступних схемах рис.2.18., 2.19, 2.20. аналогічно представлена інформація з режимами схем (БП-220 кВ, навантаження Z_e), (БП-220 В, навантаження P , Q) та (БП-220 кВ, навантаження P , Q). Узагальнені результати зведений в таблиці і приведені на рис.2.21.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

=====										
N	Pg[МВт]	dPrv (Rv)	dPxv (Xv)	dYr1 (Gv)	dYr2 (Bv)	dYx2	Pn (fe)	dPr (Re)	dPx (Xe)	Um[kB] (fu)
=====										
1	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	100.0	-0.0	220.0
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	21.80	417.240	166.900	0.00
SumI= 0.0000 SumU= 0.0000 SumP= 0.0000 Im[kA] = 0.4896										
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 0.0 0.0 (SS,PS,Qs)= 107.7 100.0 40.0 #####										
=====										
2	100.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.2	100.2	-0.0	220.0
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.00	483.203	-0.000	0.00
SumI= 0.0000 SumU=-0.0000 SumP=-0.0000 Im[kA] = 0.4553										
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 0.0 0.0 (SS,PS,Qs)= 100.2 100.2 -0.0 #####										
=====										
3	100.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.3	100.3	0.0	220.0
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-7.82	473.626	-65.049	0.00
SumI= 0.0000 SumU=-0.0000 SumP=-0.0000 Im[kA] = 0.4602										
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 0.0 0.0 (SS,PS,Qs)= 101.2 100.3 -13.8 #####										
=====										
4	91.4	3.4	-0.0	0.2	0.2	0.0	87.6	87.6	-0.0	205.9
	17.000	43.700	3.900	-130.000	0.000	0.000	21.80	417.240	166.900	-4.22
SumI=-0.0000 SumU=-0.0000 SumP= 0.0000 Im[kA] = 0.4582										
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 3.8 -3.0 (SS,PS,Qs)= 94.3 87.6 35.0 #####										
=====										
5	97.4	3.3	-0.0	0.2	0.2	0.0	93.7	93.7	-0.0	212.8
	17.000	43.700	3.900	-130.000	0.000	0.000	-0.00	483.203	-0.000	-5.15
SumI= 0.0000 SumU=-0.0000 SumP=-0.0000 Im[kA] = 0.4404										
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 3.7 -3.6 (SS,PS,Qs)= 93.7 93.7 -0.0 #####										
=====										
6	100.0	3.5	-0.0	0.2	0.2	0.0	96.1	96.1	-0.0	215.3
	17.000	43.700	3.900	-130.000	0.000	0.000	-7.82	473.626	-65.049	-5.49
SumI=-0.0000 SumU= 0.0000 SumP= 0.0000 Im[kA] = 0.4503										
##### Simvol metod (dPrv,dQxv)= 3.9 -3.2 (SS,PS,Qs)= 97.0 96.1 -13.2 #####										
=====										

Рисунок 2.15 – Результат модулювання схеми 220 кВ алгебраїчним методом

Схема: BLZ_V - Узлы схемы

№	№р	N	П	Рнаг	Qнаг	Рген	Qген	Урасч	Угол
1	1	100	b	0,000000	0,000000	0,001958	0,001422		
2	2	101	b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
3	2	1		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,220000	0,00
4	3	102	b	0,000000	0,000000	0,001962	0,000000	0,220000	
5	4	103	b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
6	4	2		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,220000	0,00
7	5	104	b	0,000000	0,000000	0,001970	-0,000997	0,220000	
8	6	105	b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
9	6	3		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,220000	0,00
10	7	106	b	0,000000	0,000000	0,001873	0,001299	0,220000	
11	8	107	b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
12	8	4		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,207201	1,26
13	9	108	b	0,000000	0,000000	0,001866	0,000025	0,220000	
14	10	109	b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
15	10	5		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,209210	-0,76
16	11	110	b	0,000000	0,000000	0,001920	-0,000881	0,220000	
17	12	111	b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
18	12	6		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,210455	-2,20

→ Балансуючі вузли

Схема: BLZ_V - Ветви схемы

№	№р	НН.	НК.	R	X	G	B	Марка
1	1	100	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
2	2	1	101	16,180300	11,755700	0,000000	0,000000	
3	3	102	2	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
4	4	2	103	24,668700	0,000000	0,000000	0,000000	
5	5	104	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
6	6	3	105	19,555400	-9,902100	0,000000	0,000000	
7	7	106	4	1,270000	0,345000	0,000000	-3,330000	1000*A-25
8	8	4	107	16,180300	11,755700	0,000000	0,000000	
9	9	108	5	1,270000	0,345000	0,000000	-3,330000	1000*A-25
10	10	5	109	24,668700	0,000000	0,000000	0,000000	
11	11	110	6	1,270000	0,345000	0,000000	-3,330000	1000*A-25
12	12	6	111	19,555400	-9,902100	0,000000	0,000000	

→ Живлячі лінії

Генерация

Район № 1:	-1.9578233 кВт	-1.4224448 кВАр
Район № 3:	-1.9620005 кВт	-0.0000001 кВАр
Район № 5:	-1.9699269 кВт	0.9974948 кВАр
Район № 7:	-1.8729616 кВт	-1.2986329 кВАр
Район № 9:	-1.8656098 кВт	-0.0246603 кВАр
Район № 11:	-1.9197797 кВт	0.8811681 кВАр

Потери в схеме :

Район № 1:	0.0000000 кВт	0.0000000 кВАр
Район № 3:	0.0000000 кВт	0.0000000 кВАр
Район № 5:	0.0000000 кВт	0.0000000 кВАр
Район № 7:	0.1363057 кВт	0.0368758 кВАр
Район № 9:	0.0913432 кВт	0.0246602 кВАр
Район № 11:	0.1170780 кВт	0.0316503 кВАр

Небаланс в схеме :

-0.0000000 кВт	0.0000000 кВАр
----------------	----------------

Рисунок 2.17 – Формат даних і результатів РАОТВ. Схема рис.2.13, $U_g = 220$ В, навантаження Z_e (файли TD1, TD2, TR1)

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						62
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема: BLZkV - Узлы схемы

№	№р	N П	Рнаг	Qнаг	Рген	Qген	Um	Uрасч	Угол
1	1	100 b	0,000000	0,000000	99,999669	40,000826	220,0000	220,0000	
2	2	101 b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
3	2	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	220,0000	220,0000	0,000000
4	3	102 b	0,000000	0,000000	100,165563	0,000000	220,0000	220,0000	
5	4	103 b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
6	4	2	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	220,0000	220,0000	0,000000
7	5	104 b	0,000000	0,000000	100,297594	-13,775010	220,0000	220,0000	
8	6	105 b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
9	6	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	220,0000	220,0000	0,000000
10	7	106 b	0,000000	0,000000	91,377016	32,068567	220,0000	220,0000	
11	8	107 b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
12	8	4	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	220,0000	205,8919	-4,219512
13	9	108 b	0,000000	0,000000	97,421757	-3,637403	220,0000	220,0000	
14	10	109 b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
15	10	5	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	220,0000	212,8188	-5,151492
16	11	110 b	0,000000	0,000000	99,952809	-16,430270	220,0000	220,0000	
17	12	111 b	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
18	12	6	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	220,0000	215,2926	-5,490722

→ Балансуючі вузли

Схема: BLZkV - Ветви схемы

№	№р	НН.	Нк.	R	X	G	B	Марка
1	1	100	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
2	2	1	101	417,2400	166,9000	0,000000	0,000000	
3	3	102	2	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
4	4	2	103	483,2000	0,000000	0,000000	0,000000	
5	5	104	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
6	6	3	105	473,6300	-65,0490	0,000000	0,000000	
7	7	106	4	17,00000	43,70000	7,800000	-260,000	100000*ACO-185
8	8	4	107	417,2400	166,9000	0,000000	0,000000	
9	9	108	5	17,00000	43,70000	7,800000	-260,000	100000*ACO-185
10	10	5	109	483,2000	0,000000	0,000000	0,000000	
11	11	110	6	17,00000	43,70000	7,800000	-260,000	100000*ACO-185
12	12	6	111	473,6300	-65,0490	0,000000	0,000000	

→ Живлячі лінії

Генерация	:	-589.2144086 МВт	-38.2267097 МВАр
Район № 1:		-99.9996694 МВт	-40.0008264 МВАр
Район № 3:		-100.1655629 МВт	-0.0000000 МВАр
Район № 5:		-100.2975938 МВт	13.7750104 МВАр
Район № 7:		-91.3770164 МВт	-32.0685673 МВАр
Район № 9:		-97.4217567 МВт	3.6374034 МВАр
Район № 11:		-99.9528094 МВт	16.4302703 МВАр
Потери в схеме	:	589.2144086 МВт	38.2267096 МВАр
Район № 1:		0.0000000 МВт	0.0000000 МВАр
Район № 3:		0.0000000 МВт	0.0000000 МВАр
Район № 5:		0.0000000 МВт	0.0000000 МВАр
Район № 7:		3.7916101 МВт	-2.9664349 МВАр
Район № 9:		3.6885831 МВт	-3.6374034 МВАр
Район № 11:		3.9014718 МВт	-3.2384466 МВАр
Небаланс в схеме	:	0.0000000 МВт	0.0000000 МВАр

Рисунок 2.18 – Формат даних і результатів РАОТВ. Схема рис.2.13, Ug = 220 В, навантаження Р, Q (файли TD3, TD4, TR2)

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						63
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема: BLS_V - Узлы схемы

№	№р	N	П	Рнаг	Qнаг	Рген	Qген	Um	Uрасч	Угол
1	1	100	b	0,000000	0,000000	0,001958	0,001423	0,220000	0,220000	
2	2	1		0,001958	0,001422	0,000000	0,000000	0,220000	0,220000	0,000000
3	3	102	b	0,000000	0,000000	0,001962	0,000000	0,220000	0,220000	
4	4	2		0,001962	0,000000	0,000000	0,000000	0,220000	0,220000	0,000000
5	5	104	b	0,000000	0,000000	0,001970	-0,000997	0,220000	0,220000	
6	6	3		0,001970	-0,000997	0,000000	0,000000	0,220000	0,220000	0,000000
7	7	106	b	0,000000	0,000000	0,001873	0,001299	0,220000	0,220000	
8	8	4		0,001737	0,001262	0,000000	0,000000	0,220000	0,207201	1,261087
9	9	108	b	0,000000	0,000000	0,001866	0,000025	0,220000	0,220000	
10	10	5		0,001774	0,000000	0,000000	0,000000	0,220000	0,209210	-0,762153
11	11	110	b	0,000000	0,000000	0,001920	-0,000881	0,220000	0,220000	
12	12	6		0,001803	-0,000913	0,000000	0,000000	0,220000	0,210455	-2,204855

→ Балансуючі вузли

Схема: BLS_V - Ветви схемы

№	№р	Нн.	Нк.	R	X	G	B	Марка
1	1	100	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
2	3	102	2	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
3	5	104	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
4	7	106	4	1,270000	0,345000	0,000000	-3,330000	1000*A-25
5	9	108	5	1,270000	0,345000	0,000000	-3,330000	1000*A-25
6	11	110	6	1,270000	0,345000	0,000000	-3,330000	1000*A-25

→ Живлячі лінії

Генерация	:	-11.5481382 кВт	-0.8671901 кВАр
Район № 1:		-1.9578000 кВт	-1.4225000 кВАр
Район № 3:		-1.9620000 кВт	-0.0000001 кВАр
Район № 5:		-1.9699000 кВт	0.9975000 кВАр
Район № 7:		-1.8730139 кВт	-1.2986781 кВАр
Район № 9:		-1.8656468 кВт	-0.0246613 кВАр
Район № 11:		-1.9197768 кВт	0.8811500 кВАр
Потери в схеме	:	0.3447376 кВт	0.0931893 кВАр
Район № 1:		0.0000000 кВт	0.0000000 кВАр
Район № 3:		0.0000000 кВт	0.0000000 кВАр
Район № 5:		0.0000000 кВт	0.0000000 кВАр
Район № 7:		0.1363139 кВт	0.0368781 кВАр
Район № 9:		0.0913468 кВт	0.0246612 кВАр
Район № 11:		0.1170768 кВт	0.0316500 кВАр
Небаланс в схеме	:	-0.0000000 кВт	-0.0000000 кВАр

Рисунок 2.19 – Формат даних і результатів РАОТВ. Схема рис.2.13, $U_g = 220$ кВ, навантаження Re (файли TD5, TD6, TR3)

Схема: BLSkV - Узлы схемы

№	№р	N	П	Рнаг	Qнаг	Рген	Qген	Um	Uрасч	Угол
1	1	100	b	0,000000	0,000000	100,0000	40,00000	220,000000	220,000000	
2	2	1		100,0000	40,00000	0,000000	0,000000	220,000000	220,000000	
3	3	102	b	0,000000	0,000000	100,1656	0,000000	220,000000	220,000000	
4	4	2		100,1656	0,000000	0,000000	0,000000	220,000000	220,000000	
5	5	104	b	0,000000	0,000000	100,2976	-13,7750	220,000000	220,000000	
6	6	3		100,2976	-13,7750	0,000000	0,000000	220,000000	220,000000	
7	7	106	b	0,000000	0,000000	91,37701	32,06856	220,000000	220,000000	
8	8	4		87,58540	35,03500	0,000000	0,000000	220,000000	205,891907	-4,219511
9	9	108	b	0,000000	0,000000	97,42178	-3,63739	220,000000	220,000000	
10	10	5		93,73320	0,000000	0,000000	0,000000	220,000000	212,818863	-5,151494
11	11	110	b	0,000000	0,000000	99,95276	-16,4302	220,000000	220,000000	
12	12	6		96,05130	-13,1918	0,000000	0,000000	220,000000	215,292614	-5,490719

→ Балансуючі вузли

Схема: BLSkV - Ветви схемы

№	№р	Нн.	Нк.	R	X	G	B	Марка
1	1	100	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
2	3	102	2	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
3	5	104	3	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
4	7	106	4	17,00000	43,70000	7,800000	-260,000	100000*ACO-185
5	9	108	5	17,00000	43,70000	7,800000	-260,000	100000*ACO-185
6	11	110	6	17,00000	43,70000	7,800000	-260,000	100000*ACO-185

→ Живлячі лінії

Генерация	:	-589.2147634 МВт	-38.2259113 МВАр
Район № 1:		-100.0000000 МВт	-40.0000000 МВАр
Район № 3:		-100.1656000 МВт	0.0000000 МВАр
Район № 5:		-100.2976000 МВт	13.7750000 МВАр
Район № 7:		-91.3770096 МВт	-32.0685637 МВАр
Район № 9:		-97.4217850 МВт	3.6373982 МВАр
Район № 11:		-99.9527688 МВт	16.4302542 МВАр
Потери в схеме	:	11.3816634 МВт	-9.8422887 МВАр
Район № 1:		0.0000000 МВт	0.0000000 МВАр
Район № 3:		0.0000000 МВт	0.0000000 МВАр
Район № 5:		0.0000000 МВт	0.0000000 МВАр
Район № 7:		3.7916096 МВт	-2.9664363 МВАр
Район № 9:		3.6885850 МВт	-3.6373982 МВАр
Район № 11:		3.9014688 МВт	-3.2384542 МВАр
Небаланс в схеме	:	-0.0000000 МВт	-0.0000000 МВАр

Рисунок 2.20 – Формат даних і результатів РАОТВ. Схема рис.2.13, $U_g = 220$ кВ, навантаження P, Q (файли TD7, TD8, TR4)

Схема рис.2.5: Ug = 220 В, ВЛ220 В, 1 км А-25, навантаження Ze або Ps, Qs

N	Pg	Qg	Rv	Xv	Gv/2	Bv/2	dPv	dQv	Re	Xe	Pn	Qn	Um	fu	fe
1	100.0	40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	417.24	166.90	100.0	40.0	220	0.0	21.80
2	100.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	483.20	0.0	100.2	0.0	220	0.0	0.00
3	100.3	-13.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	473.63	-65.05	100.3	-13.8	220	0.0	-7.82
4	91.4	32.1	17.00	43.70	3.9	-13	3.8	-3.0	417.24	166.90	87.3	350	205.9	-4.22	21.80
5	97.4	-3.6	17.00	43.70	3.9	-13	3.7	-3.6	483.20	0.0	93.7	0.0	212.8	-5.15	0.0
6	100.0	-16.4	17.00	43.70	3.9	-13	3.9	-3.2	473.63	-65.05	96.1	-13.2	215.3	5.49	-7.82

Схема рис.2.5: Ug = 220 кВ, ВЛ220 кВ, 100 км АСО-185, навантаження Ze або Ps, Qs

N	Pg	Qg	Rv	Xv	Gv/2	Bv/2	dPv	dQv	Re	Xe	Pn	Qn	Um	fu	fe
1	1957.82	1422.54	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.1803	11.7557	1957.8	1422.54	220.0	0.0	36.0
2	1962.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.6687	0.0	1962.0	0.0	220.0	0.0	0.0
3	1969.9	-997.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.5554	-9.9021	1969.9	-997.5	220.0	0.0	36.0
4	1873.0	1298.6	1.2700	0.345	0.0	-1.665	136.3	36.9	16.1803	11.7557	1736.7	1261.8	207.2	1.26	36.00
5	1865.6	24.7	1.2700	0.345	0.0	-1.665	91.3	24.7	24.6687	0.0	1774.3	0.0	209.2	-0.76	0.0
6	1919.8	-881.2	1.2700	0.345	0.0	-1.665	117.1	31.7	19.5554	-9.9021	1802.7	-912.8	210.5	-2.20	-26.86

Рисунок 2.21 – Зведені таблиці результатів розрахунків символічним методом схем 220 В та 220 кВ

Висновки

В розділі представлені матеріали фундаментального еквівалентності розрахунку режимів алгебраїчним методом миттєвих значень та символічного методу у комплексному просто. Конкретно виконане наступне:

1. Була представлена модель синусоїдальних характеристик (U, I) і функцій (P, dP) та їх числове (дискретне) інтегрування. Акцентується увага на правильності інтегрування часових інтервалів всередині синусоїди;

2. Представляється моделювання навантажень еквівалентними опорами. Так як різні автори моделюють навантаження згідно різних схем їх з'єднання, було наглядно показано що кожна схема зводяться до еквівалентного варіанту (R_e, X_e), який нам потрібен, так як в алгебраїчному методі орієнтуємося на модуль з еквівалентним опором (R_e, X_e);

3. Реалізоване представлення графічного супроводу режиму у методі миттєвих значень при навантаженнях Z_e , а саме: графіки миттєвих струмів, напруг та балансів потужності для різних варіантів навантаження для фази (A), графіки миттєвих струмів для різних фаз при відсутності компенсації та графіки виконання другого закону Кірхгофа, балансу миттєвих потужностей та сумарний баланс потужностей по фазам експериментальної схеми;

4. Були розглянуті принципи аналізу адекватності символічного і алгебраїчного методів розрахунку режимів в якому був визначений склад головних невідомих режимних характеристик, а саме: $P_g, dPr, P_n, U_m, I_m, \varphi_u$.

5. Наведені результати розрахунків контрольних схем. Були виконані розрахунки для шести варіантів параметрів схеми, результати яких для **алгоритмічного метода** із миттєвими потужностями представлені на рисунку 2.14. Тут три перших варіанта мають $R_v, X_v, B_v = 0$, але регулюється X_c і, зрозуміло – еквівалентний опір навантаження Z_e . Три наступних режими мають лінію передачі із параметрами $R_v = 1.27, X_v = 0.345, B_v = -1.665$ та заданими раніше варіанти навантаження, а на рис. 2.16. – 2.21.

Якщо порівняти результати розрахунків алгоритмічного та символічного методів, то можна зробити висновок що вони (результати) абсолютно ідентичні.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						67
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Після виконання даної бакалаврської роботи, головною метою якої є наукова корекція прийнятих в електроенергетиці термінів та понять, що ввели в свій час провідні спеціалісти теоретичних основ електротехніки, електричних мереж та систем, електропостачання споживачів промисловості та інші, можна зробити висновок, що вона являється успішною, так як на практиці було доведено корекцію символічного методу, який ми порівнювали із алгебраїчним методом, в якому моделюються миттєві значення струмів, напруги, потужності та їх втрат на базі тригонометричних співвідношень для синусоїдального електромагнітного поля та його параметрів. Конкретно в даній роботі реалізоване наступне:

1. Були представлені результати рішень задач згідно прийнятих в електроенергетиці послідовних дій – вибір і формування технологічних схем ПС, розробка розрахункових схем постачальних (330-110 кВ) та розподільних (110-10 кВ) мереж.

2. Після більш глибокого опанування комплексу L_APEZ_ZN, були здійснені експлуатаційні та проектні розрахунки ustalених режимів, їх оптимізація та розрахунок трифазних струмів короткого замикання. Всі розрахунки виконані для індивідуальних умов згідно завдань. Задіяні сучасні математичні методи (методи Ньютона з матрицею Якобі, спуск другого порядку з діагональною матрицею Гесе, системний метод розрахунку струмів к.з. та інше).

3. Була розроблена еталонна контрольна схема (джерело, ЛЕП, споживач), формалізовані моделі навантаження, П-подібної моделі ЛЕП та джерела синусоїдальної напруги. Акцентувалась увага на правильності інтегрування часових інтервалів всередині синусоїди.

4. Була реалізована відповідна комп'ютерна програма для алгебраїчного методу, завдяки якій, був представлений графічний супровід режиму у методі миттєвих значень при навантаженнях Z_e , а саме: графіки миттєвих струмів,

					141.6111.009.ДБ	Арк.
						68
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напруг та балансів потужності для різних варіантів навантаження для фази (А), графіки миттєвих струмів для різних фаз при відсутності компенсації та графіки виконання другого закону Кірхгофа, балансу миттєвих потужностей та сумарний баланс потужностей по фазам експериментальної схеми.

5. Були розглянуті принципи аналізу адекватності символічного і алгебраїчного методів розрахунку режимів в якому був визначений склад головних невідомих режимних характеристик, а саме: P_g , dPr , P_n , U_m , I_m , φ_u (потужність джерела живлення (БП), яка видається в мережу, втрати потужностей в живлячій гілці в її активних елементах, вхідна потужність навантаження, діючі напруга і струм на вході навантаження).

6. У фінальному етапі даної роботи наведені результати розрахунків контрольних схем. Були виконані розрахунки для шести варіантів параметрів схеми. Після порівняння розрахунків **алгоритмічного та символічного методів**, можна зробити висновок що вони (результати) абсолютно ідентичний, що дає нам можливість сказати про коректність кожного з цих методів і придатний для використання у промислових електротехнічних задачах та в математичних задачах енергетики.

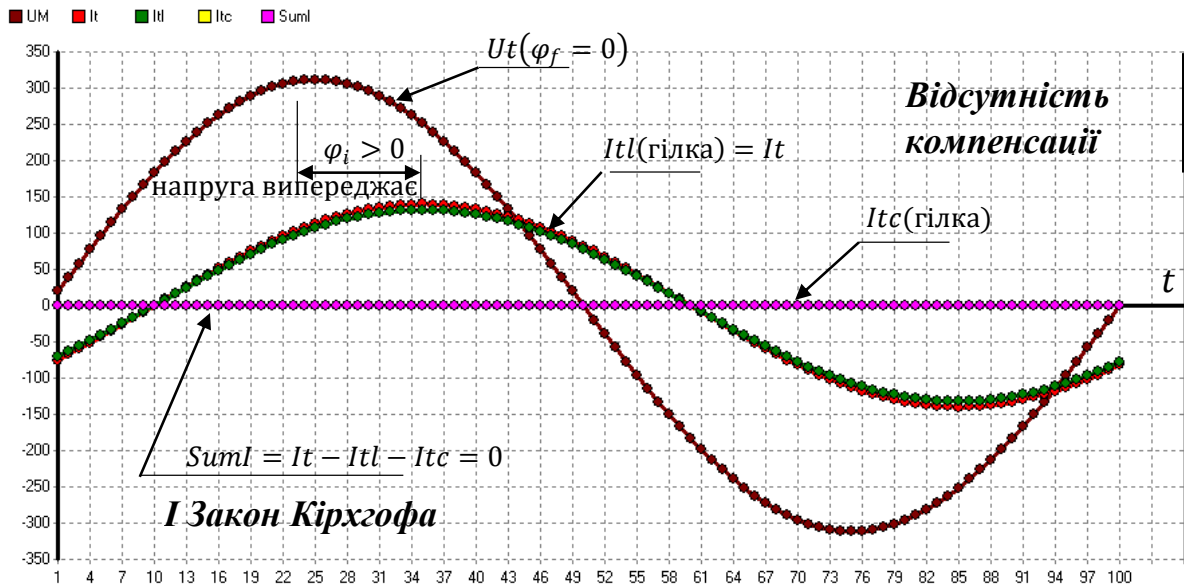
					141.6111.009.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ЛІТЕРАТУРА

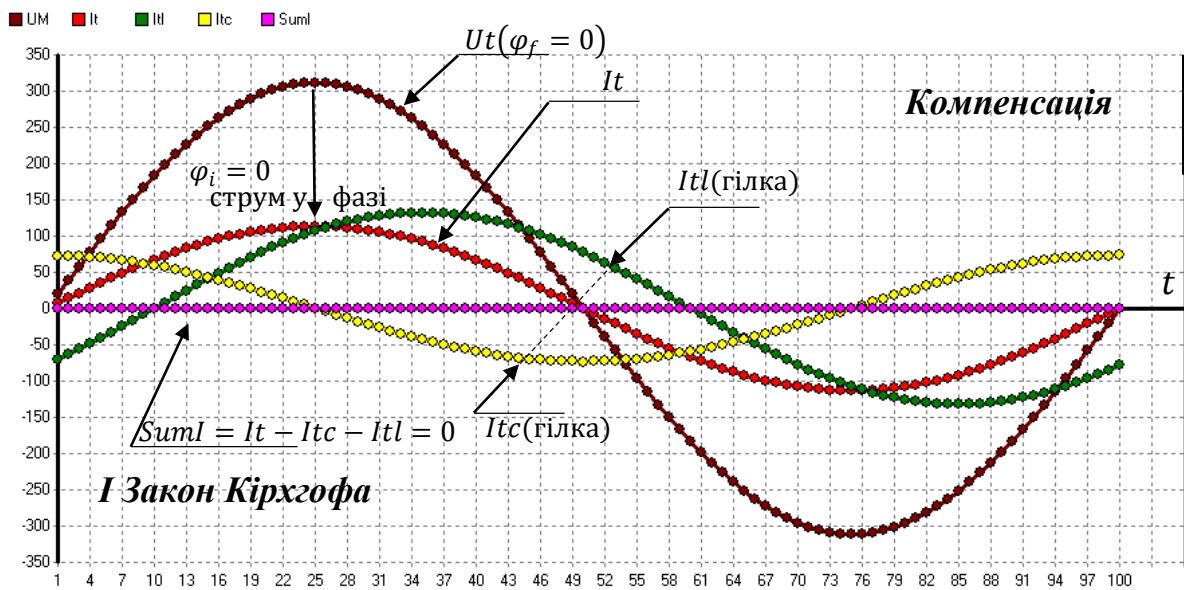
1. Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. –М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
2. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 200 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
4. Банин Д.Б. Практические вопросы комплексной системной компенсации реактивной мощности в электрических сетях 110/35/10 кВ электропередающих организаций / Д.Б. Банин, М.Д. Банин, А.С. Яндульский, Ю.Н. Бондаренко, А.И. Ришкевич, А.Э. Зоммер, А.В. Левицкий, С.Я. Меженный, А.Н. Гушля, О.А. Буславец // Электрические сети и системы. – 2013. – №3. – С.20 – 36.
5. Банін Д.Б. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту бакалавра для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології». Моделювання, аналіз та оптимізація електричних режимів / Банін Д.Б., Хоменко О.В., Банін М.Д. – Київ. : НТУУ «КПІ», 2011. – 68 с.
6. Банін Д.Б. Конспект лекцій з дисципліни «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач» / Банін Д.Б., Банін М.Д., Гнатовський А.В. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 140 с.
7. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. : Пер. с англ. – М.: “Мир”, 1985, – 509 с.
8. Белаш И.П. Энергия магнитного поля как составляющая полной нагрузки // Электрические сети и системы. – 2014. – №3. – С.77–84.
9. Белаш И.П. Электрические нагрузки: предполагаемые и действительные // Электрические сети и системы. – 2016. – №1. – С.50–60.
10. Белаш И.П. Является ли законным понятие «реактивная энергия»? // Электрические сети и системы. – 2016. – №3. – С.55–66.

					141.6111.009.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

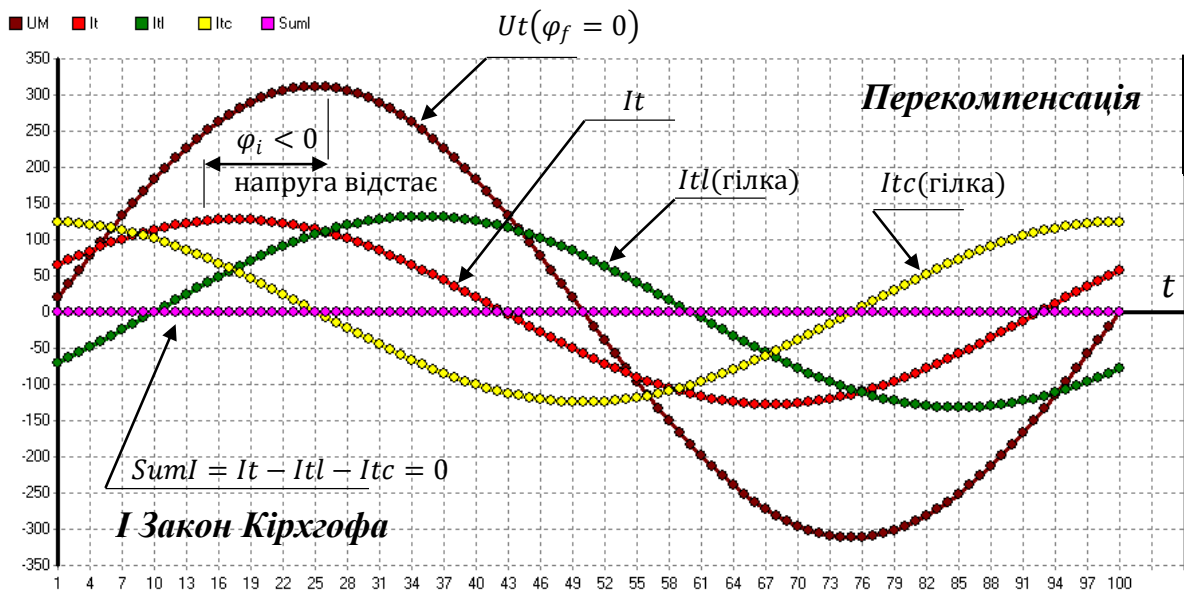
ДОДАТОК А



Файл
АТa1



Файл
АТa2



Файл
АТa3

Рисунок 2.5 – Графік миттєвих струмів для різних варіантів навантаження (Фаза А). Контроль 1 закону Кірхгофа

Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

141.6111.009.ДБ

Арк.

71

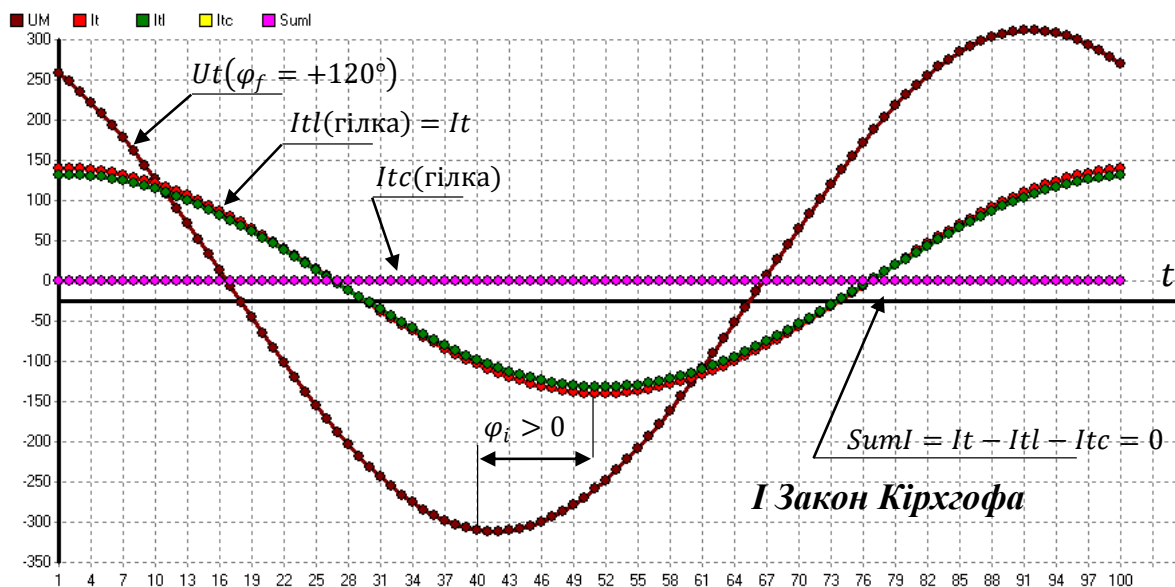
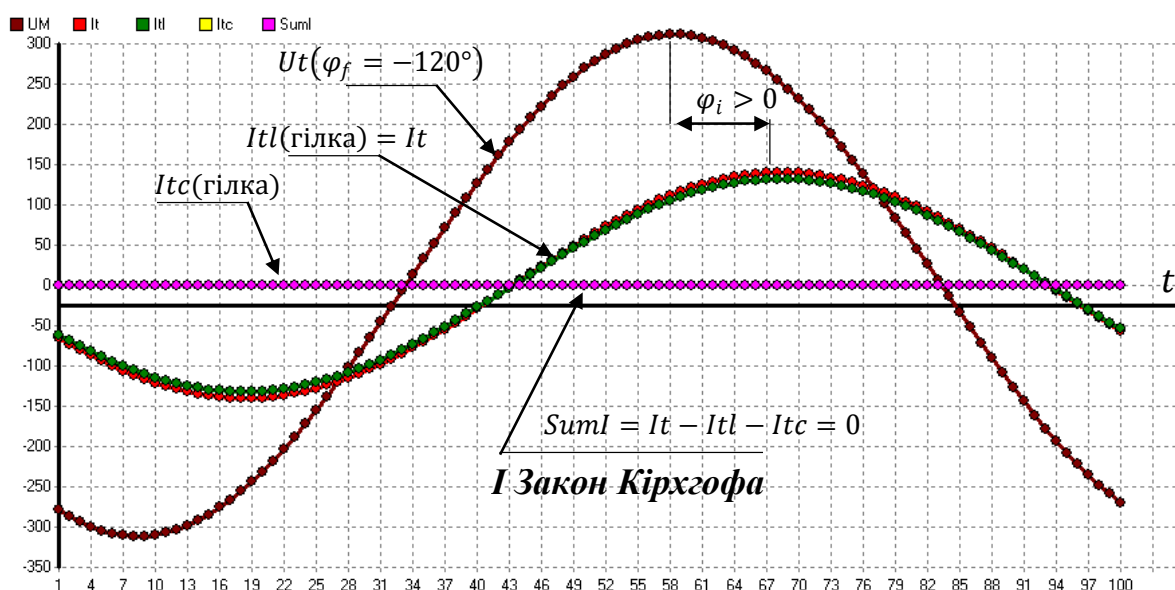
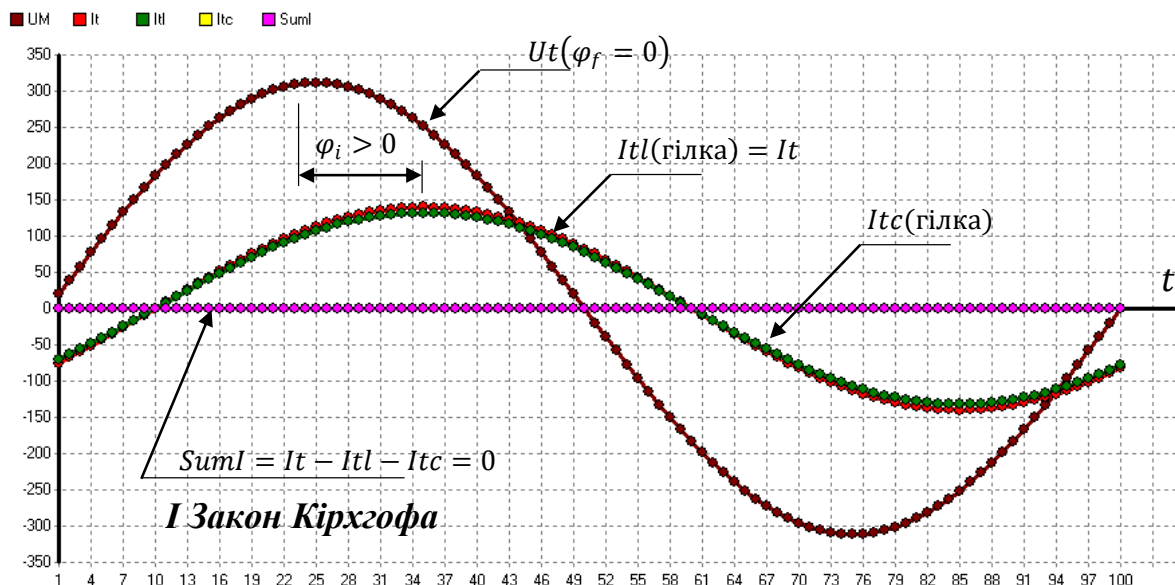
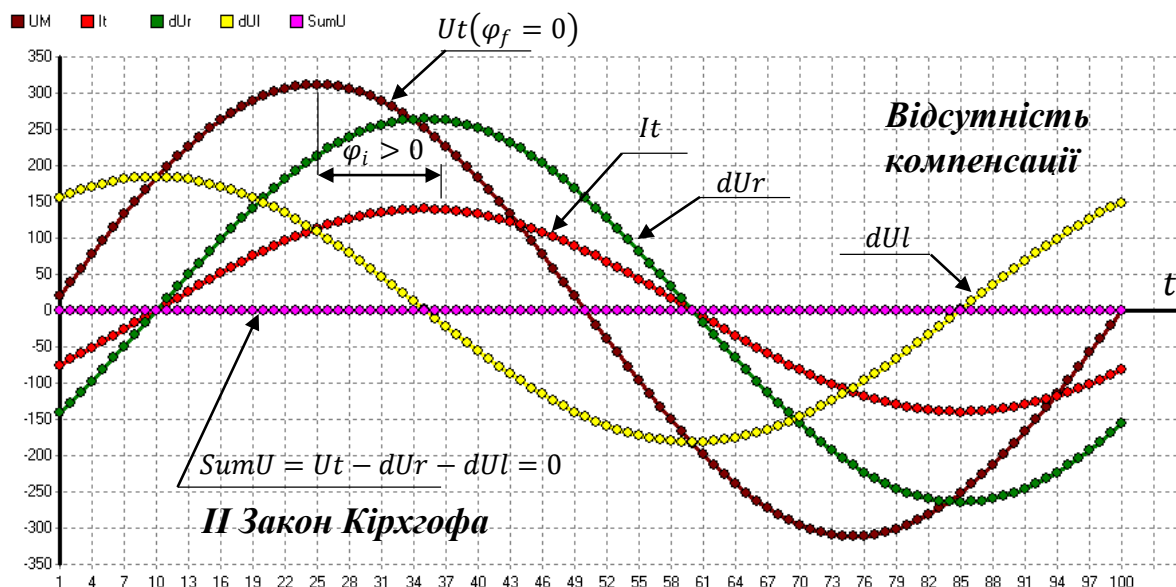
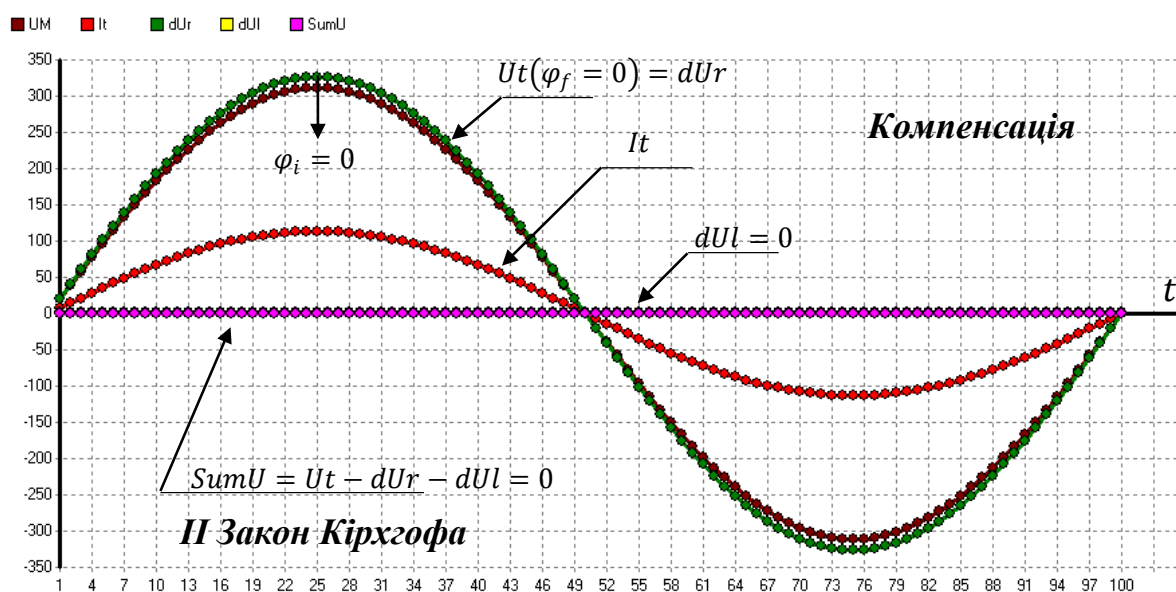


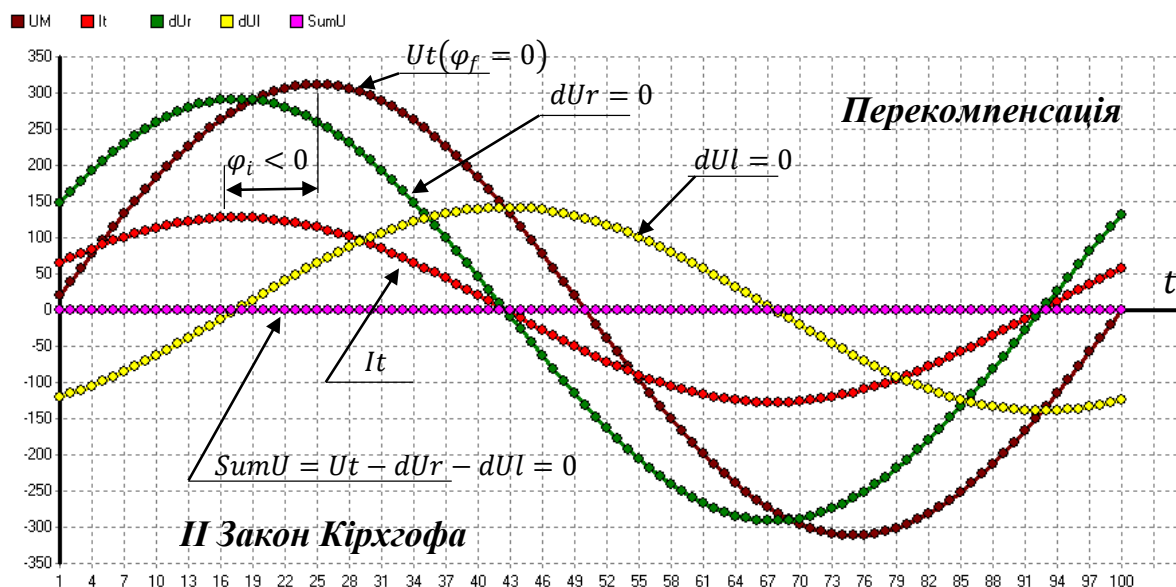
Рисунок 2.6 – Графік миттєвих струмів для різних фаз при відсутності компенсації. Контроль 1 закону Кірхгофа для фаз (А, В, С)



Файл
AUa1



Файл
AUa2



Файл
AUa3

Рисунок 2.7 – Графік миттєвих напруг для різних варіантів навантаження (фаза А). Контроль 2 закону Кірхгофа

Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

141.6111.009.ДБ

Арк.

73

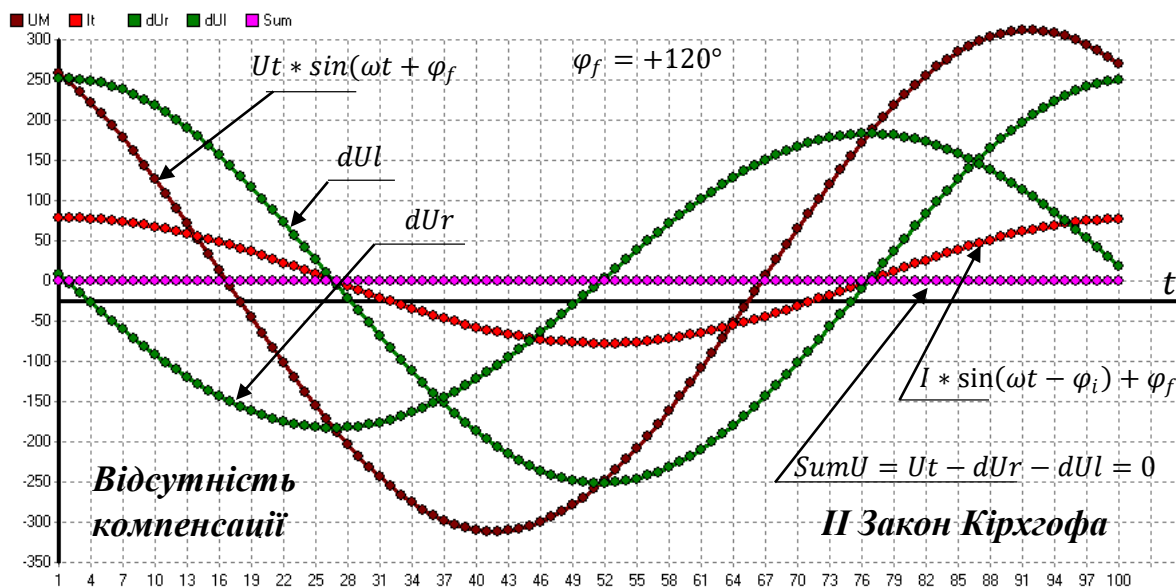
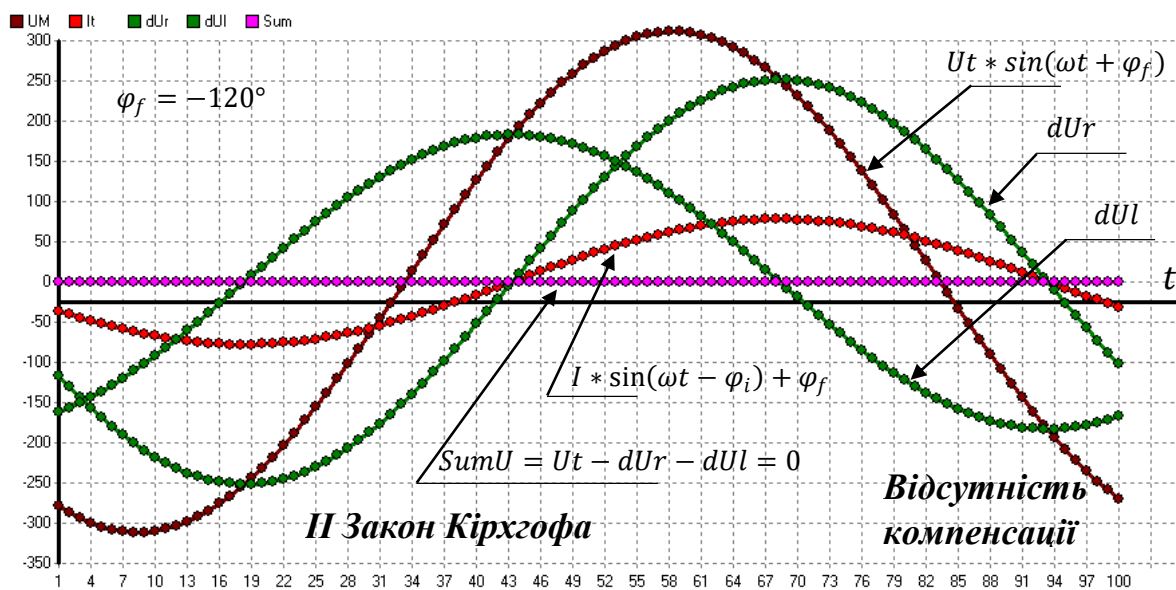
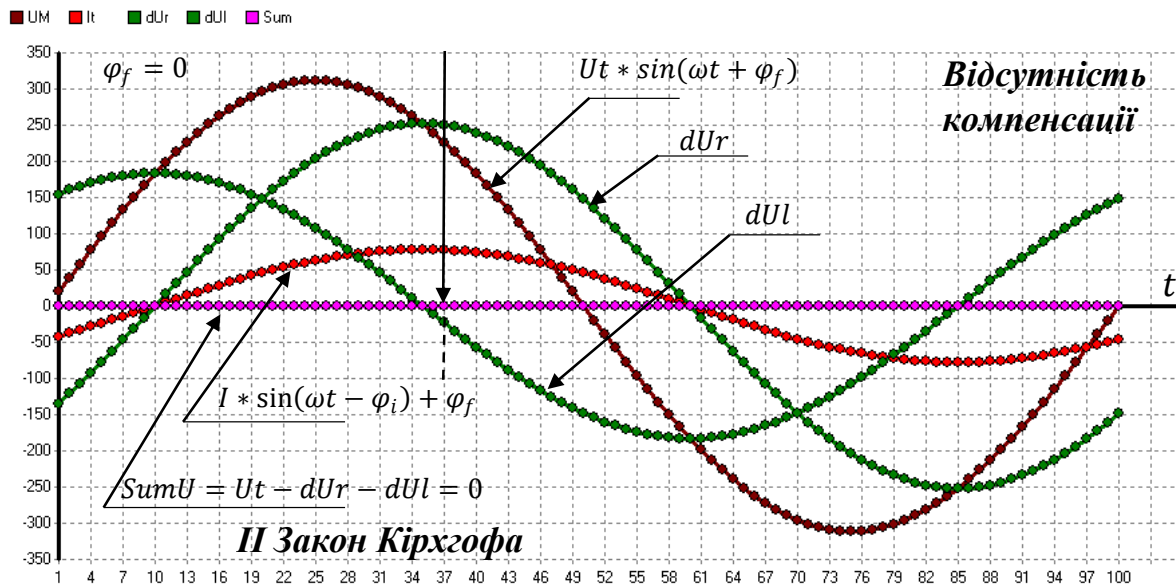


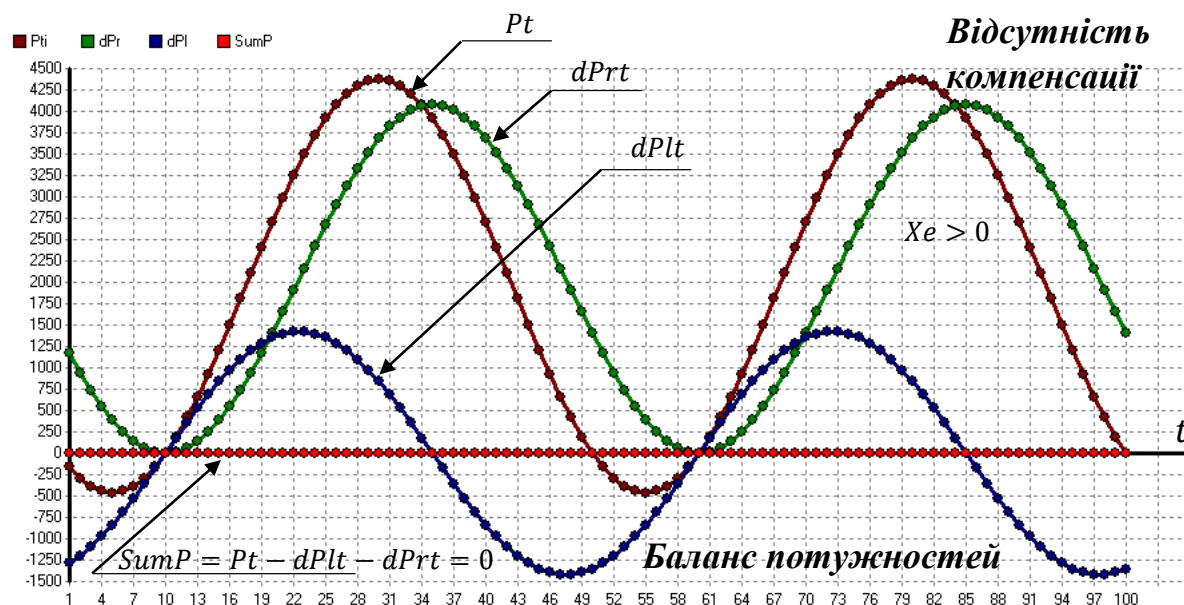
Рисунок 2.8 – Другий закон Кірхгофа по фазам експериментальної схеми

Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

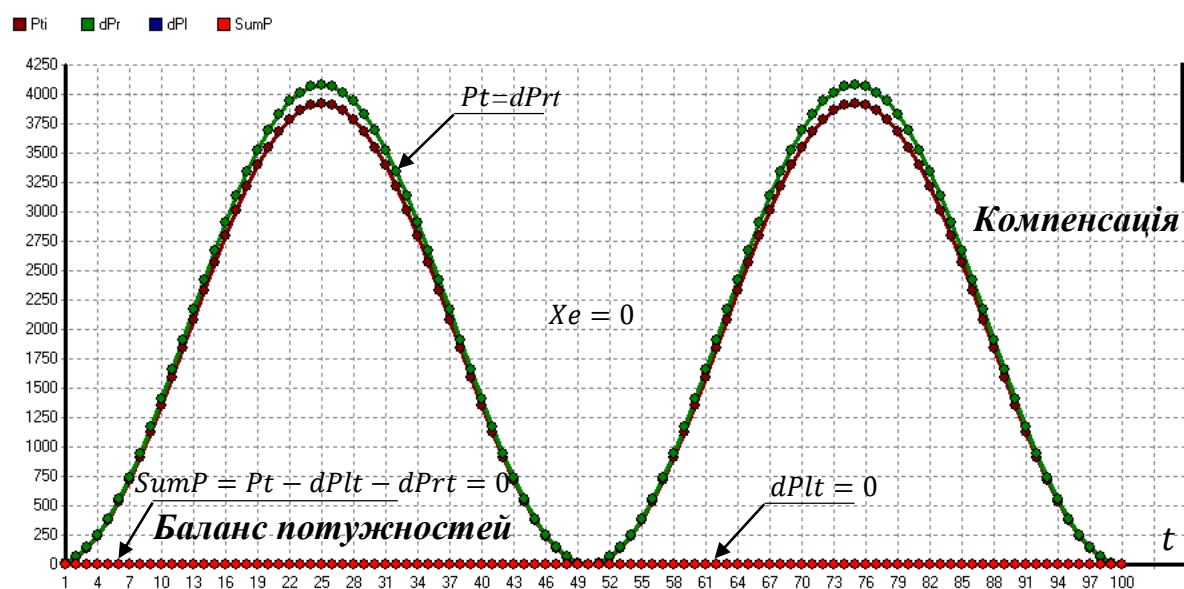
141.6111.009.ДБ

Арк.

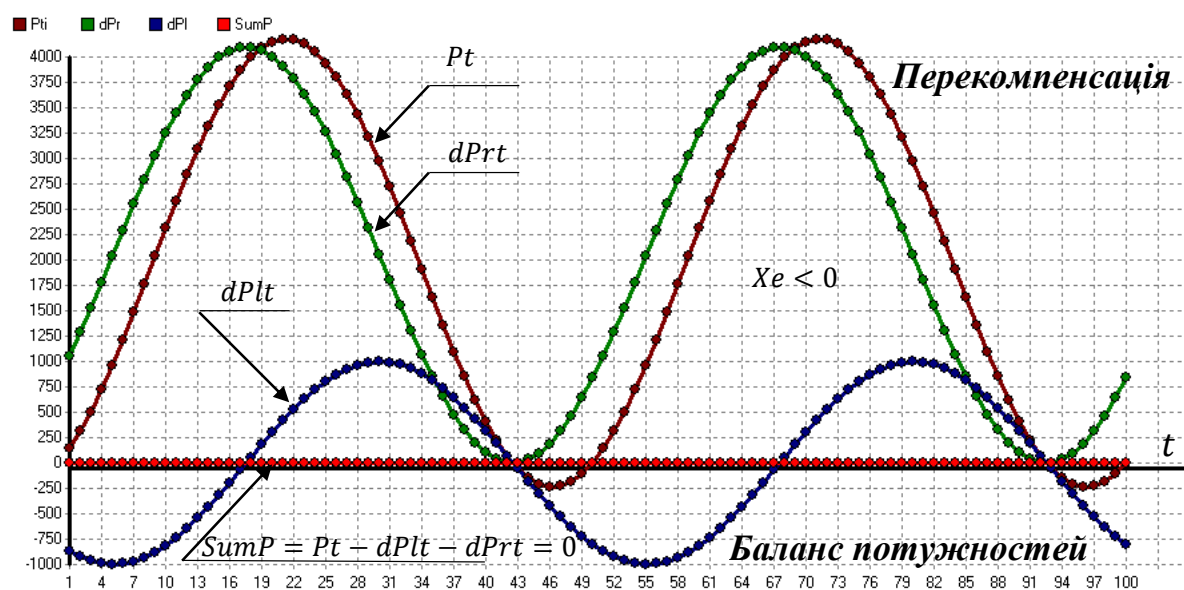
74



Файл
APa1



Файл
APa2



Файл
APa3

Рисунок 2.9 – Графік миттєвих балансів потужності для різних варіантів навантаження (фаза А). Контроль балансу потужностей

Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

141.6111.009.ДБ

Арк.

75

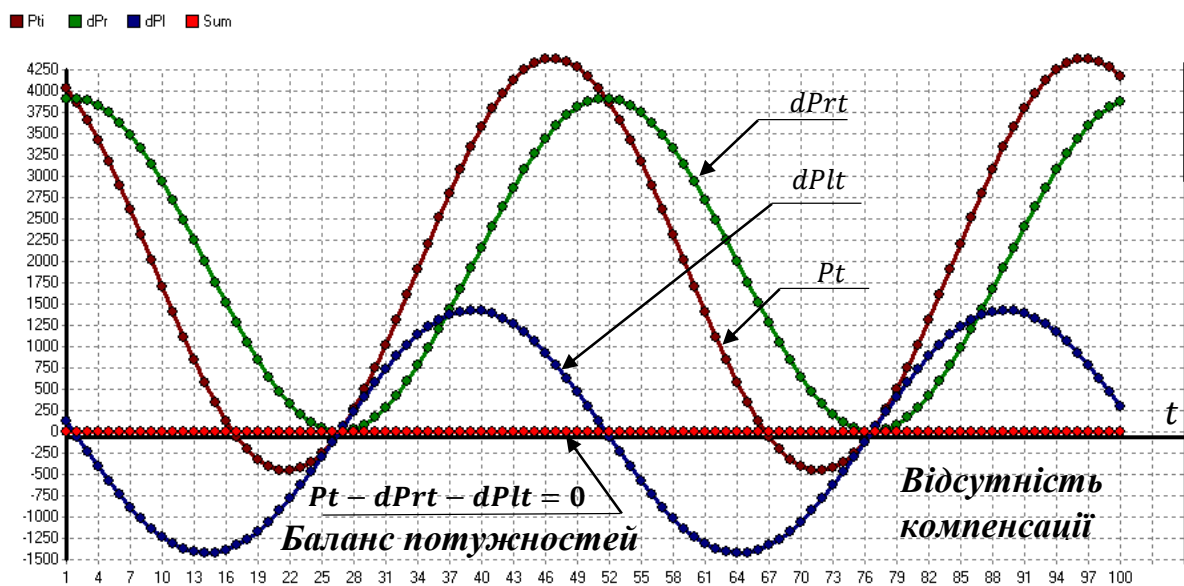
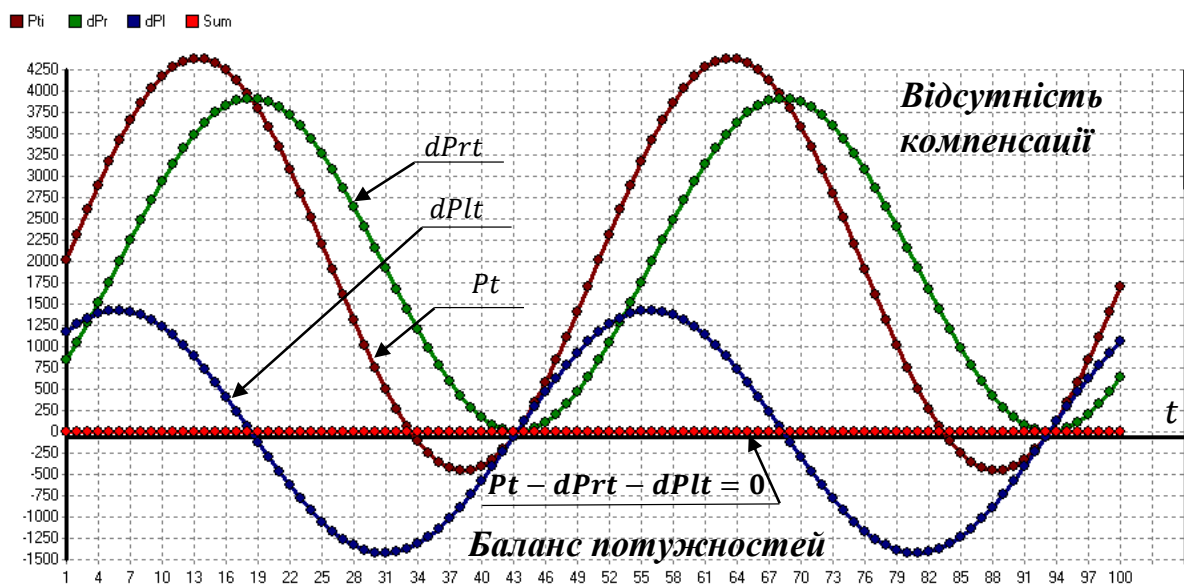
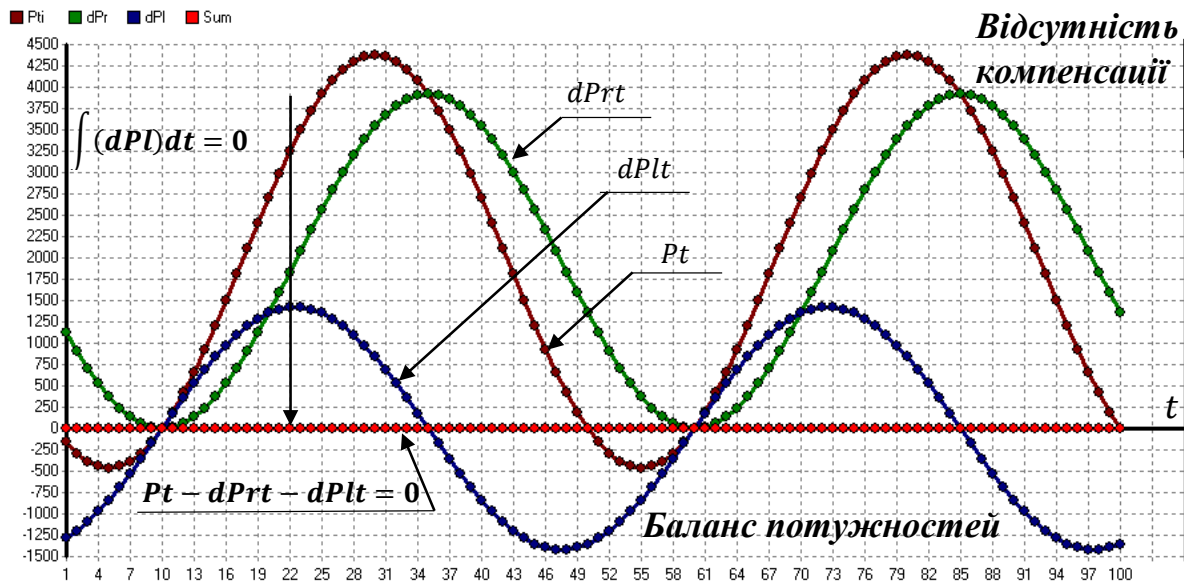


Рисунок 2.10 – Баланс миттєвих потужностей по окремих фазах експериментальної схеми

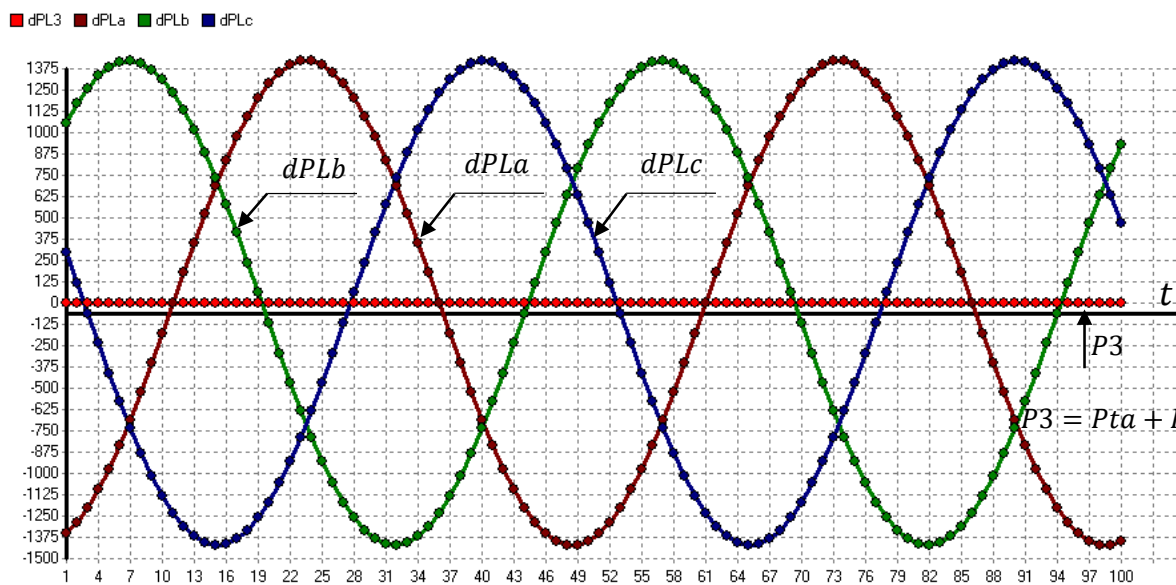
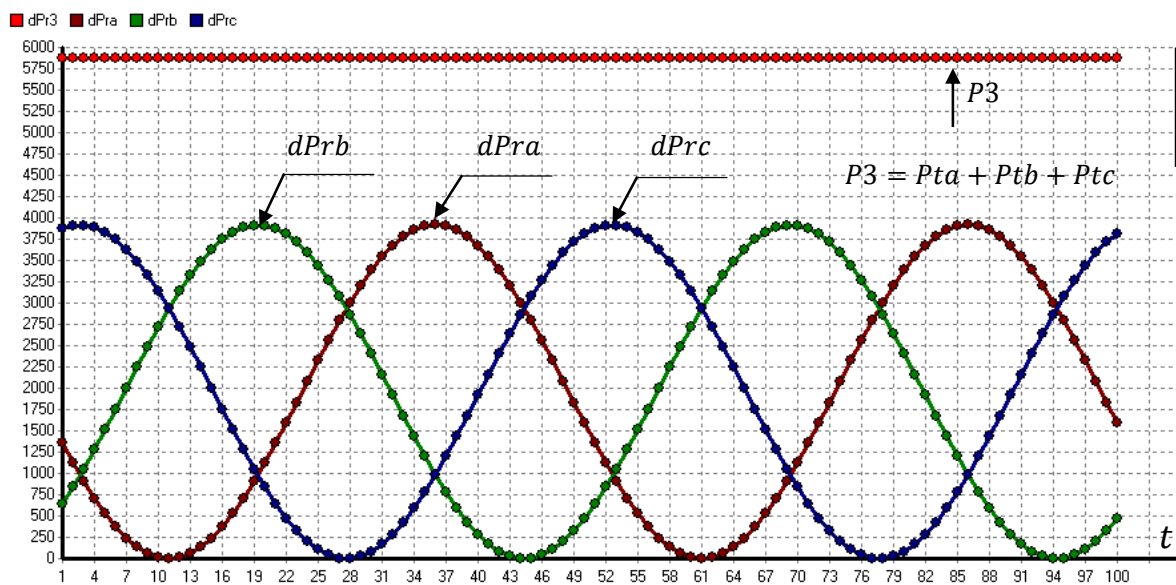
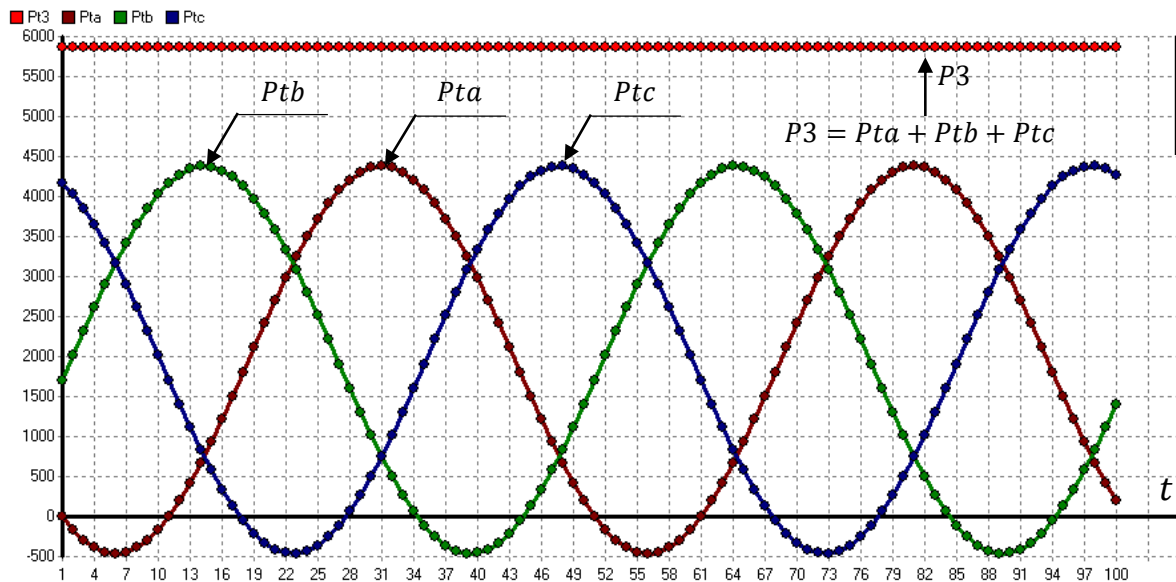


Рисунок 2.11 – Сумарний баланс потужностей по фазам експериментальної схеми

Додаток Б

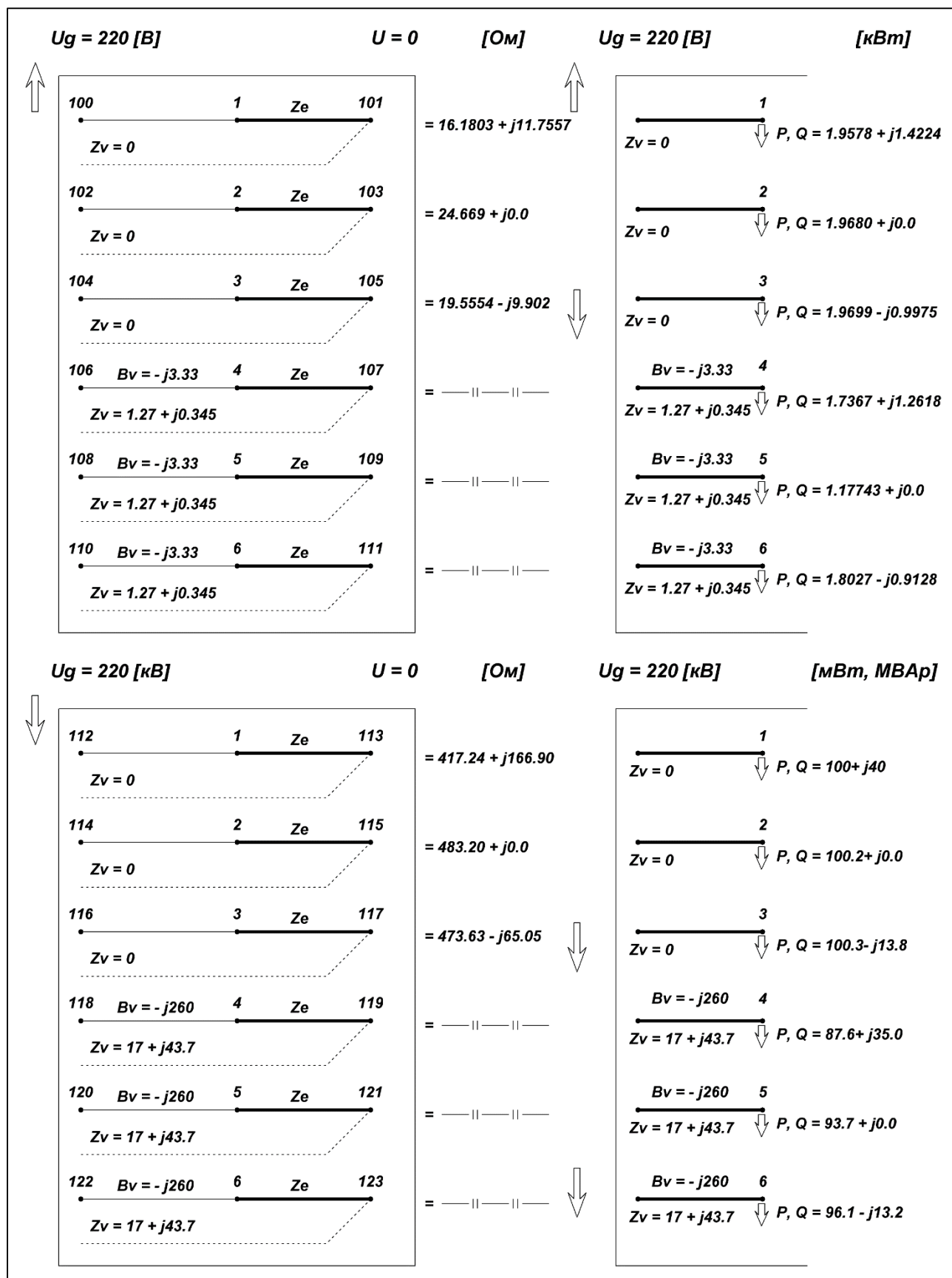


Рисунок 2.16 – Контрольні розрахунки схеми для РАОТВ (джерело, лінія, навантаження)