

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ О.І.Толочко
(підпис) (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 та порівняння ефективності розрахунку усталеного режиму різними методами

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕК-61

(шифр групи)

_____ <u>Романенко Олександр Олегович</u>	_____
(прізвище, ім'я, по батькові)	(підпис)

Керівник _____ <u>Доцент, к.т.н. Банін Д.Б.</u>	_____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)

Консультант з питань алгоритмізації та програмування

(назва розділу)

_____ <u>с.н.с., Банін М.Д</u>	_____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, 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)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем

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

Романенку Олександр Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Дослідження та порівняння ефективності розрахунку усталеного режиму різними методами»

керівник проекту Банін Дмитро Борисович, кандидат наук, доцент,

(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 до проекту технічна документація по промисловому комплексу РАОТБ; вихідні дані підстанцій 110/35/10 кВ; Загальна мережа енергосистем 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 кВ, Інтерактивний розрахунок, оптимізація та аналіз режиму, системний розрахунок струмів к.з. Дослідження та порівняння методів $time = f(Kp, Kk, EPS)$

5. Перелік графічного матеріалу: (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Однолінійна схема ПС 110/35/10 кВ; Розрахунок і

оптимізація режиму; Системний розрахунок т.к.з.; Порівняння методів розрахунку режиму.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

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

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Робота з методичними матеріалами	21.10.2019	
2	Розробка розрахункової схеми	11.11.2019	
3	Розрахунок режиму РАОТВ, L.APEZ	25.11.2019	
4	Оптимізація розподілу Q, L.APEZ	11.12.2019	
5	Системний розрахунок струмів к.з.	25.12.2019	
6	Формалізація задач дослідження	10.02.2020	
7	Вибір складу методичних варіантів	02.03.2020	
8	Дослідження та порівняння методів	06.04.2020	
9	Оформлення пояс. записки і листів	18.05.2020	
10	Попередній захист	11.06.2020	

Студент

(підпис)

О.О. Романенко

(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	2	
2	A4	141.6110.008.ДБ	Пояснювальна записка	48	
3	A1	141.6110.008.ДБ	Однолінійна схема ПС 110/35/10 кВ	1	
4	A1	141.6110.008.ДБ	Розрахунок та оптимізація режиму	1	
5	A1	141.6110.008.ДБ	Системний розрахунок с.к.з	1	
6	A1	141.6110.008.ДБ	Порівняння методів розрахунку режимів	1	

					141.6110.008.ДБ							
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломного проекту					Літ.	Аркуш	Аркуші
Розробив		Романенко О.О.		11.06.20								
Перевірив		Банін Д.Б.		11.06.20								
Реценз.												
Н. контр.		Настенко Д.В.										
Затвердив		Толочко О.І.										
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-г61-1							

Пояснювальна записка
до дипломного проекту

на тему: «Дослідження та порівняння ефективності розрахунку усталеного режиму різними методами»

Київ – 2020 року

РЕФЕРАТ

В бакалаврській роботі виділяються дві частини: перша – розрахункова, де реалізуються електроенергетичні задачі розрахунку та оптимізації режимів і визначення струмів КЗ мереж та друга – дослідницька, що присвячена порівнянню математичних методів і моделей розрахунку режиму і їх промислових реалізацій.

Об’єктом дослідження є індивідуальна підстанція 110/35/10 кВ., постачальна та розподільна мережі 330/110/35 кВ., та промислові розрахункові схеми великого обсягу з різних регіонів України або характерні експериментальні моделі.

Предметом дослідження є невідомі режимні характеристики, а також параметри розрахункових моделей синусоїдального струму, матриць провідностей і опору, методи еквівалентування, методи рішення нелінійних електроенергетичних рівнянь та інше.

Мета роботи підтвердити рівень інженерної кваліфікації бакалаврської роботи та згідно індивідуального завдання, виконати серію промислових розрахунків для реальних схем методами з різними ітераційними процесами (Ньютона з матрицею Якобі, з матрицями контурних або вузлових опорів). Порівняти їх часові та ітераційні параметри, а також надійність в різних схемних умовах.

Бакалаврська робота містить 60 сторінок, 8 таблиць, 27 ілюстрацій, 4 плакати та 11 літературних посилань. Для реалізації завдань задіяно учбовий комп’ютерний комплекс L_APEZ, промислові електроенергетичні комплекси PAOTB, Z_REGIM. В процесі реалізації задач розроблені індивідуальні розрахункові схеми.

Перелік ключових слів: РОЗРАХУНОК УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ, РОЗРАХУНКОВА СХЕМА, МОДЕЛІ НАВАНТАЖЕНЬ, МЕТОД НЬЮТОНА, ОПТИМІЗАЦІЯ РЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ, МАТРИЦІ ЯКОБІ, ГЕСЕ, ПРОВІДНОСТЕЙ ТА ОПОРУ, КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ, ГРАФІК НАВАНТАЖЕНЬ, МЕТОДИ Z_REGIM, ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА РЕЖИМНІ ОБМЕЖЕННЯ, ДИСКРЕТНИЙ СПУСК, АЛГЕБРАЇЧНИЙ ТА СИМВОЛІЧНИЙ МЕТОДИ, ОПЕРАТОРИ СИСТЕМ З ПОСТАЧАННЯ (ОСП) ТА РОЗПОДІЛУ (ОСР) ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ABSTRACT

In the bachelor's work on two parts are distinguished: the first is the calculation, where the general electric power problems of calculation and optimization and determination of short-circuit currents for fairly complex electrical networks are implemented and the second is research is devoted to a comparison of a number of mathematical methods and models for calculating the regime and their industrial implementations.

The object of the research are an individual substation 110/35/10 kV., supply and distribution networks 330/110/35 kV., and large-scale industrial design schemes from different regions of Ukraine or characteristic problem-oriented experimental models.

The subject of the study is unknown operating characteristics, as well as the parameters of the calculated models of sinusoidal current, conductivity and resistance matrices, equivalent methods, methods for solving nonlinear electric equations, etc.

The purpose of the work is to confirm the engineering qualification level of bachelor's work and, according to an individual assignment, to perform a series of industrial calculations for real schemes using methods with various iterative processes (Newton with Jacobi matrix, with loop or node resistance matrices). Compare their time and iteration parameters, as well as reliability in various circuit conditions.

Bachelor's work contains 60 pages, 8 tables, 27 illustrations, 4 posters and 11 literary references. To accomplish the tasks involved the educational computer complex L_APEZ, industrial power complexes RAO_TV, Z_REGIM, OPTIM.QT. In the process of implementing the tasks, individual design schemes have been developed.

List of keywords: CALCULATION of steady-state mode, design schemes, LOAD MODELS, Newton's method, reactive power OPTIMIZATION, Jacobi matrix, Hesse, conductivity AND RESISTANCE, short circuit, load schedule, Z_REGIM methods, TECHNOLOGICAL DISCUSSION, DISCRETE MODE, ALGEBRAIC AND SYMBOLIC methods; SYSTEM OPERATORS WITH DELIVERY (OSB) AND ELECTRICITY DISTRIBUTION (OSR).

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						7
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ЗАДАЧІ, РОЗРАХУНКИ І ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	11
1.1 Планування і створення розрахункової схеми (живляча мережа 330/110 кВ, ПС 110/35/10 кВ). Введення режиму в допустиму область.....	11
1.2 Розрахунок елементів матриці Якобі та моделювання режиму методом Ньютона. Комплекс L_{APEZ_ZN}	18
1.3 Оптимізація режиму шляхом компенсації реактивних потужностей на ПС 110/35/10 кВ	23
1.4 Розрахунок струмів короткого замикання та струморозподіл на шинах ПС 110/35/10 кВ.....	34
Висновки.....	37
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКУ УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ.....	39
2.1 Канонічний та класичний варіанти метода розрахунку режиму з матрицею опору (Z_REGIM).....	39
2.2 Балансний метод (Z_REGIM). Адресація втрат.....	43
2.3 Метод Ньютона в середовищі Z_REGIM (магістральні мережі).....	45
2.4 Контурний варіант Z_REGIM (розподільчі мережі).....	47
2.5 Результати експериментальних та промислових розрахунків.....	50
Висновки.....	58
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	60

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВН – висока напруга;

НН – низька напруга;

СН – середня напруга;

ЕЕС – електроенергетична система;

КЗ – коротке замикання;

ПК – програмний комплекс;

ПС – підстанція;

РАОТВ – розрахунок, аналіз та оптимізація технологічних втрат;

ПУЕ – правила улаштування електроустановок;

БП – балансуєчий пункт;

РП – розподільчий пункт;

ОСП – оператори систем з постачання;

ОСР – оператори систем з розподілу.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						9
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Основними задачами, вирішення яких забезпечує надійність і ефективність електропостачання споживачів якісною електроенергією є аналіз реактивних характеристик розрахункових схем електро – постачальних організацій і енергосистем, оптимізація їх режимів по критерію мінімуму втрат з урахуванням реальних обмежень, розрахунок струмів КЗ та регулярний контроль параметрів автоматики та захисту. Ці задачі відносять 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 вирішення цих задач згідно прийнятих послідовних дій – вибір і формування технологічних схем ПС, розробка розрахункових схем постачальних (380 – 110 кВ) та розподільчих (110 – 10 кВ) мереж, експлуатаційні або проектні розрахунки усталених режимів, їх оптимізація та розрахунок трифазних КЗ. Всі розрахунки виконані для індивідуальних умов згідно завдання. Задіяні сучасні математичні методи (метод Ньютона з матрицею Якобі, спуск другого порядку в діагональній матриці Гессе, системний метод розрахунку т.к.з. та інше).

Розвиток електроенергетичних режимів, звичайно, пов'язаний з ускладненням розрахункових схем, появою нових проблемно – орієнтовних ситуацій та потребує проектування дослідницьких робіт з метою підвищення ефективності комп'ютерно – інформаційного апарату.

В розділі 2 даної роботи розглядається задача порівняння різних проблемно – орієнтовних методів розрахунку усталених режимів, зокрема, метода Ньютона для рівнянь стану електричних мереж з матрицею опору, класичного методу Z_REGIM, балансного методу на базі ітерацій втрат потужності, блочно – контурного методу та інших. Розглянуто залежності по надійності та збіжності ітераційних процесів від об'єму розрахункових схем, від кількості замкнених контурів, від заданої точності розрахунків та інше.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						10
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					141.6110.008.ДБ								
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Електротехнічні задачі, розрахунки і оптимізація режимів електричних мереж					Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розробив	Романенко О.О			11.06.20									
Перевіряв	Банін Д.Б.			11.06.20								11	28
Реценз.													
Н. контр.	Настенко Д.В.												
Затвердив	Толочко О.І.												
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-61								

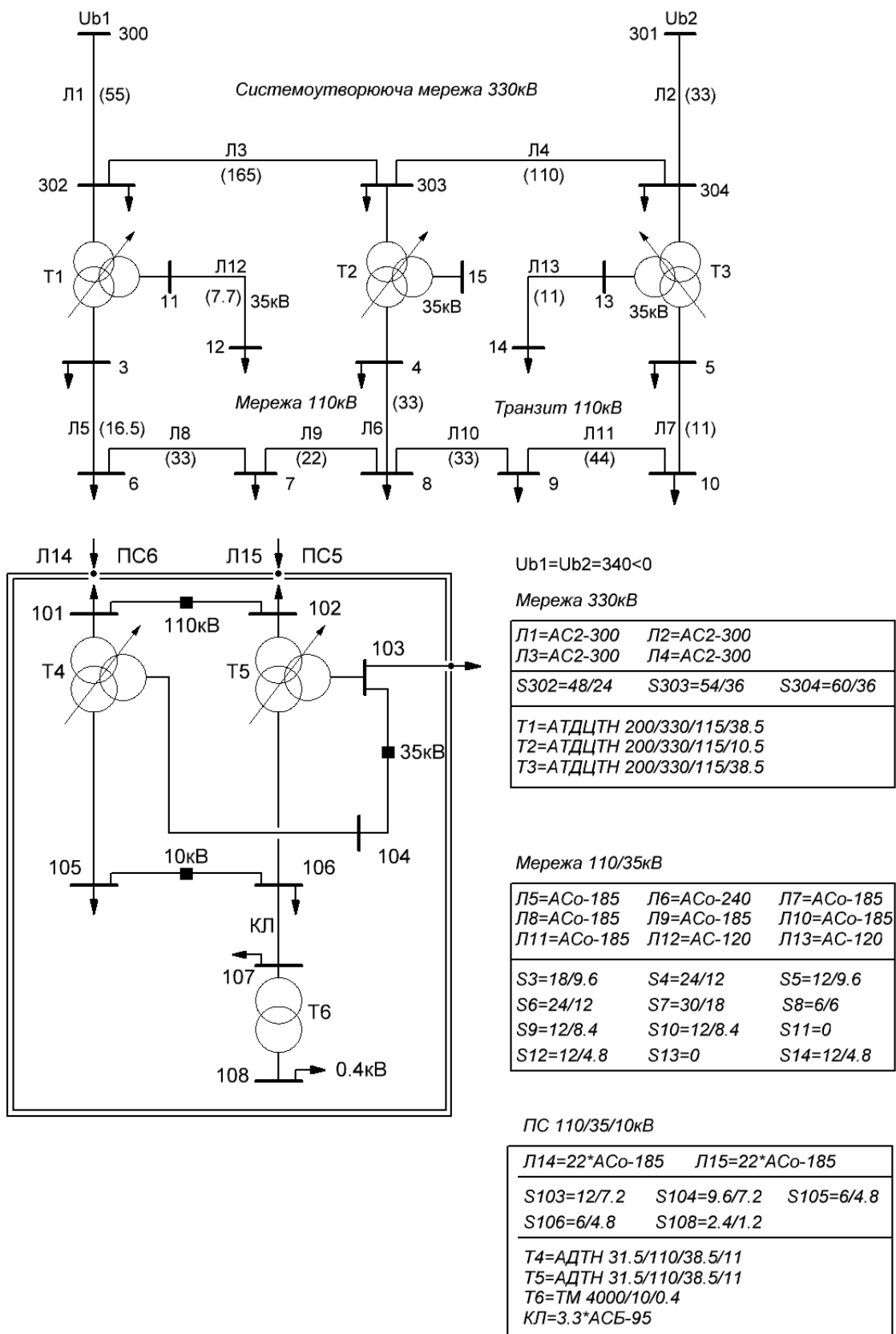


Рисунок 1.1 – Вихідні дані схеми ПС 110/35/10 кВ

Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

141.6110.008.ДБ

Таблиця 1.2 – UZL схеми

№	N вузла	П	P нав	Q нав	Uм	U розр	Кут	P розр	Q розр
1	300	b			340	340		0	0
2	301	b			340	340	-2	0	0
3	302		48	24	330	335,706	-1,792	48	24
4	303		54	36	330	333,835	-3,54	54	36
5	304		60	36	330	336,98	-2,805	60	36
6	3		18	9,6	110	117,781	-4,623	18	9,6
7	4		24	12	110	118,419	-5,131	24	12
8	5		12	9,6	110	119,735	-4,464	12	9,6
9	6		24	12	110	114,014	-5,955	24	12
10	7		30	18	110	111,599	-7,012	30	18
11	8		6	6	110	114,5	-6,251	6	6
12	9		12	8,4	110	115,401	-5,951	12	8,4
13	10		12	8,4	110	118,488	-4,883	12	8,4
14	11				35	37,689	-5,486		
15	12		12	4,8	35	36,588	-6,643	12	4,8
16	13				35	38,304	-5,298		
17	14		12	4,8	35	36,733	-6,919	12	4,8
18	15				10	10,401	-5,147		
19	101				110	112,289	-6,335		
20	102				110	109,458	-7,575		
21	103		12	7,2	35	37,119	-13,7	12	7,2
22	104		9,6	7,2	35	37,329	-10,798	9,6	7,2
23	105		6	4,8	10	10,842	-9,621	6	4,8
24	106		6	4,8	10	10,784	-12,199	6	4,8
25	107				10	10,499	-11,807		
26	108		2,4	1,2	0,38	0,41	-13,732	2,4	1,2
27	1001				330	325,185	-4,645		
28	1002				330	326,873	-5,147		
29	1003				330	330,479	-4,477		
30	1004				110	113,427	-9,653		
31	1005				110	112,856	-12,24		

					141.6110.008.ДБ				Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					13

Таблиця 1.3 – VET схеми

№	N поч	N кін	k	R	X	G	B	Kт'	Провід
1	300	302		2,695	17,875	2,475	-190,85		55000*AC2-300
2	301	304		1,617	10,725	1,485	-114,51		33000*AC2-300
3	302	303		8,085	53,625	7,425	-572,55		165000*AC2-300
4	303	304		5,39	35,75	4,95	-381,7		110000*AC2-300
5	302	1001		0,81675	58,52805	1,6529	9,1827	1	АТДЦТН-200000/330/115/38,5
6	1001	3		0,81675				2,759197	АТДЦТН-200000/330/115/38,5
7	1001	11		2,04187	126,5798			8,571428	АТДЦТН-200000/330/115/38,5
8	303	1002		0,81675	58,52805	1,6529	9,1827	1	АТДЦТН-200000/330/115/10,5
9	1002	4		0,81675				2,759197	АТДЦТН-200000/330/115/10,5
10	1002	15		2,04187	126,5798			31,42857	АТДЦТН-200000/330/115/10,5
11	304	1003		0,81675	58,52805	1,6529	9,1827	1	АТДЦТН-200000/330/115/38,5
12	1003	5		0,81675				2,759197	АТДЦТН-200000/330/115/38,5
13	1003	13		2,04187	126,5798			8,571428	АТДЦТН-200000/330/115/38,5
14	3	6		2,805	6,7155	0,363	-45,54		16500*АСО-185
15	4	8		4,323	13,134	0,66	-93,06		33000*АСО-240
16	5	10		1,87	4,477	0,242	-30,36		11000*АСО-185
17	6	7		5,61	13,431	0,726	-91,08		33000*АСО-185
18	7	8		3,74	8,954	0,484	-60,72		22000*АСО-185
19	8	9		5,61	13,431	0,726	-91,08		33000*АСО-185
20	9	10		7,48	17,908	0,968	-121,44		44000*АСО-185
21	11	12		2,079	3,1493	0,77	-23,254		7700*АС-120
22	13	14		2,97	4,499	1,1	-33,22		11000*АС-120
23	101	6		3,74	8,954	0,484	-60,72		22000*АСО-185
24	102	7		3,74	8,954	0,484	-60,72		22000*АСО-185
25	101	1004		1,49943	45,5281	5,6711	119,0926	0,94	ТДТН-31500/115/38,5/11
26	1004	104		1,49943	27,45869			2,987013	ТДТН-31500/115/38,5/11
27	1004	105		1,49943				10,45455	ТДТН-31500/115/38,5/11
28	102	1005		1,49943	45,5281	5,6711	119,0926	0,91	ТДТН-31500/115/38,5/11
29	1005	103		1,49943	27,45869			2,987013	ТДТН-31500/115/38,5/11
30	1005	106		1,49943				10,45455	ТДТН-31500/115/38,5/11
31	101	102	О						
32	103	104	О						
33	105	106	О						
34	106	107		1,0857	0,2739	4,6695	-466,95		3300*АСБ-95
35	107	108		0,20937	1,61145	64	360	25	ТМ-4000/10/0,4

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						14
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Схема : Rсхема3 (Дата расчета: 26.11.2019 9:35:48)

Узлов=31 Ветвей=35 Контуров=3 БП=2 ФМ=0

Точность расчета : 1E-6

Невязка по напряжению : 0,000000, узел: 1005

Невязка по конт.токам : 0,000000

Количество итераций : 14, время расчета: 0.175 сек

Потребление : 360.0000000 МВт 214.8000000 МВАр

Генерация : -368.9018373 МВт -108.3493778 МВАр

Балансная мощность : 0.0000000 МВт -0.0000000 МВАр

Потери в схеме : 8.9018374 МВт -106.4506222 МВАр

Нагрузочные потери : 6.2846943 МВт 38.2502893 МВАр

от актив.перетоков: 4.8080044 МВт

от реакт.перетоков: 1.4766899 МВт

Потери холост.хода : 2.6171431 МВт -144.7009114 МВАр

шунтирующие реакт.: 0.0000000 МВт 0.0000000 МВАр

конденсатор. уст. : 0.0000000 МВт 0.0000000 МВАр

Небаланс в схеме : -0.0000000 МВт -0.0000000 МВАр

Рисунок 1.4 – загальні характеристики

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

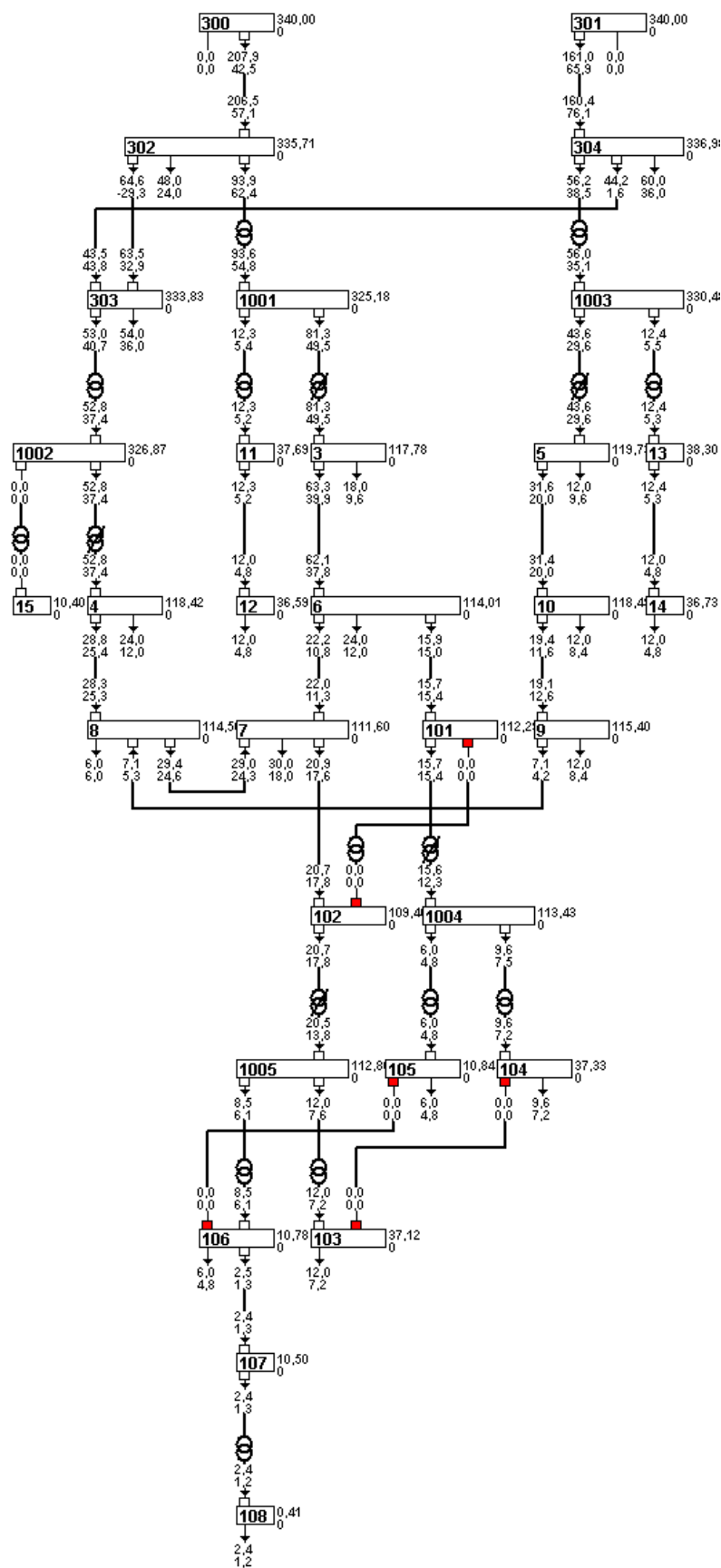


Рисунок 1.5 – графік схеми РАО ТВ

1.2 Розрахунок елементів матриці Якобі та моделювання режиму методом Ньютона. Комплекс L_APEZ_ZN

Інтерактивний розрахунок режиму, що встановився виконується в пакеті робіт L_APEZ_ZN відповідно лабораторної роботи №11. В комплекс попередньо експортується розрахункова схема з компонентами лабораторних робіт №11 та №12, тобто ‘Розрахунок режиму методом Ньютона’ та ‘Оптимізація реактивних потужностей’ відповідно. Структура файлу ключів має такий вигляд:

KEYf	KEYs	KEYy	KEYt	EPSr	KITr	KITt
0	0	0	1	0.0001	100	1
=====						
LAB11			KEYn	Npz	Nv1	Nv2
режим N			1	10	9	10
						Niter
						2
=====						
LAB12			kEYo	EPSo	KITo	KD
оптимизация Q			101	0.01	50	0.01
=====						
LAB13			KEYz	kz1	kz2	kz3
т.к.з. Z			1	105	0	0

Рисунок 1.7 – файл ключів комплексу L_APEZ_ZN

EPSr – точність розрахунків;

KITr – максимальна кількість ітерацій.

В лабораторній роботі №11 використовуються такі ключі:

KEYn – ключ для обрахунку режиму методом Ньютона. При значенні ключа ‘0’ розрахунок проводиться автоматично. При значенні ‘1’ використовується лабораторна робота ‘Розрахунок режиму методом Ньютона’. **Npz** – номер вузла схеми для якого буде обчислений діагональний елемент, стовпець і рядок матриці Якобі;

Nv1, Nv2 – гілки для яких розраховуються значення недіалональних елементів матриці.

Niter – номер ітерації для інтерактивного розрахунку режиму.

Згідно до ключів, на 2-ій ітерації розпочнеться розрахунок режиму. Для цього виконується наступний алгоритм:

- 1) Розрахунок блокового вектора нев'язок (F_1, F_2) для поточного рівняння стану ел.мережі;
- 2) Розрахунок блокових векторів моделі матриці Якобі:
 - D11, D12, D21, D22 – діагональні елементи;
 - V11, V12, V21, V22 – елементи верхньої трикутної матриці;
 - H11, H12, H21, H22 – елементи нижньої трикутної матриці;
- 3) Розв'язок утвореної лінійної системи рівнянь Ньютона;
- 4) Перераховуємо нові значення, що інтегруються ($U_M, Teta$).

Кожен елемент матриці Якобі являє собою блок 2x2. Структуру матриці Якобі та вектори нев'язок зображено на рис.1.8

$$\begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & D11 & D12 & \dots & V11 & V12 & \dots \\ \dots & D21 & D22 & \dots & V21 & V22 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & H11 & H12 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & H21 & H22 & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dots \\ \Delta U \\ \Delta Tet \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots \\ F1 \\ F2 \\ \dots \end{pmatrix}$$

Матриця Якобі вектор вектор
 поправок нев'язок

Рисунок 1.8 – Матриця Якобі в матричному рівнянні Ньютона

В комплексі L_APEZ_ZN виконуються наступні дії:

- 1) Заповнення керуючого файлу AP_AKEY.PAS;
- 2) Запустити 'EKLAB.EXE' >> в NLAB ввести 11 >> в FILE name ввести Rschema3;
- 3) Запустити програму, яка збирає вихідні дані lab.exe;
- 4) Обрати на вивести файл AP_ADAN.

```

12.000000      8.400000      -0.099298      0.237653  Ps_Qs_Gs_Bs
118.986232     -5.338193      0.003976      0.454912  Us_Tet_dU_dTet
  2   10   0
           5           9
  0.079438      0.019859  Ya
 -0.190183     -0.047546  Yr
119.390292     114.825446  Ua
 -9.319259     -11.977284  Ur

```

Рисунок 1.9 – Вихідні дані

5) Вибрати на вивести файл AP_APEZ.RES

```

@@@@ ITER:   2   66.67182
=====
Name          D11          D12          D21          D22
=====
 10          9999.9999   9999.9999   9999.9999   9999.9999
=====
NameN  NameK  V11      V12      V21      V22      H11      H12      H21      H22
=====
   9    10    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
=====
 10   999.999900  999.999900  118.082912 -10.088568   0.003314   0.014518   0.000211  -0.000003
=====

Name      Usa      Usr
=====
 5   119.390292  -9.319259
 9   114.825446 -11.977284

```

Рисунок 1.10 – Файл AP_APEZ.RES

$U_M = 118.986232$ – поточна напруга шуканого вузла

$Tet = -5.338193$ – її кут

$dU = 0.003976$ – поправка за напругою

$dTet = 0.454912$ – поправка за кутом

(Беремо з попередньої ітерації)

Крім того потрібні дані з інших джерел:

вузол 10: $P_s = 12$ $G_s = -0.099298$

$Q_s = 8.4$ $B_s = 0.237653$

Гілка 10-5 $Y_a = 0.079438$ $Y_r = -0.190183$

Гілка 10-9 $Y_a = 0.019859$ $Y_r = -0.047546$

P_s, Q_s – навантаження вузла Npz (вузол 10)

G_s, B_s, Y_a, Y_r – параметри матриці вузлових провідностей

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						20
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок виконуємо наступним чином:

Модуль напруги заданого вузла (U_M):

$$U_t := U_{t0} - U_{t0} \cdot dU_0 \rightarrow 118.986232 - 118.986232 \cdot 0.003976 = 118.513$$

Кут заданого вузла (T_{et}):

$$T_{et} := T_{et0} + dT_{et0} \rightarrow -5.338193 + 0.454912 = -4.883$$

Напруга заданого вузла (U_{sa}, U_{sr}):

$$U = 118.082912 - j10.088568$$

Розрахунок $p_{ij} + jp_{ij} = U_i * U_j * Y_{ij}$:

$$p_{10-5} + jp_{10-5} = U_{10} * U_5 * Y_{10-5} = (118.082912 + j10.088568) * (119.390292 - j9.319259) * (0.079438 - j0.190183) = \mathbf{1147.167 - 2690.808}$$

$$p_{5-10} + jp_{5-10} = U_5 * U_{10} * Y_{10-5} = (118.083 - j10.089) * (119.390292 + j9.319259) * (0.079438 - j0.190183) = \mathbf{1107.597 - j2707.336}$$

$$p_{10-9} + jp_{10-9} = U_{10} * U_9 * Y_{10-9} = (118.083 + j10.089) * (114.825446 - j11.977284) * (0.019859 - j0.047546) = \mathbf{259.5 - j655.499}$$

$$p_{9-10} + jp_{9-10} = U_9 * U_{10} * Y_{10-9} = (118.082912 - j10.088568) * (114.825446 + j11.977284) * (0.019859 - j0.047546) = \mathbf{283.833 - j645.336}$$

Розрахунок сум $\Sigma p, \Sigma q$:

$$\Sigma p_{10-j} = p_{10-5} + p_{10-9} = 1147.167 + 259.5 = \mathbf{1406.667}$$

$$\Sigma q_{10-j} = q_{10-5} + q_{10-9} = -2690.808 - 655.499 = \mathbf{-3346.307}$$

Розрахунок правої частини системи рівнянь:

$$F_{1_{10}} = P_{10} + G_{10} * U_{10}^2 + \Sigma p_{10} = 12 + 0.099298 * 118.513^2 - 1406.66 = 0.01$$

$$F_{2_{10}} = Q_{10} + B_{10} * U_{10}^2 + \Sigma q_{10} = 8.4 + 0.237653 * 118.513^2 - 3346.306 = 0.016$$

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						21
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На основі даних виконаних розрахунків **сформуємо** блочний діагональний елемент і блочні елементи трикутних матриць поточної гілки:

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} = -2G \times U^2 - \sum p_{ij} & P_{12} = \sum q_{ij} \\ D_{21} = -2B \times U^2 + \sum q_{ij} & P_{22} = \sum p_{ij} \end{pmatrix} \quad V, H = \begin{pmatrix} -p & -q \\ q & -p \end{pmatrix}$$

$$D_{11} = -2 * G_{10} * U_t^2 - \sum p_{10} = -2 * -0.099298 * 118.513^2 - 1406.66 = 1382.687$$

$$D_{12} = \sum q_{10} = -3346.307$$

$$D_{21} = 2 * B_{10} * U_t^2 + \sum q_{10} = 2 * 0.237653 * 118.513^2 + -3346.3 = 3329.539$$

$$D_{22} = \sum p_{10} = 1407$$

$$V_{11} = -259.5 \quad V_{12} = 655.499$$

$$V_{21} = -655.499 \quad V_{22} = -259.5$$

$$H_{11} = -283.833 \quad H_{12} = 645.336$$

$$H_{21} = -645.336 \quad H_{22} = -283.833$$

Запишемо новий результат в пустий файл пропонованого результату.

```

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  0.0000
-----
Name      F1      F2      UM      Teta
-----
0  0      0.0000  0.0000  0.0000  0.0000 |

```

Рисунок 1.11 – Еталонний файл результатів AP_AREz.REZ

Name	D11	D12	D21	D22
0 10	1382.6860	-3346.3084	3329.5379	1406.6673

NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
0 9	10	-259.4999	655.4997	-655.4997	-259.4999	-283.8329	645.3363	-645.3363	-283.8329

Name	F1	F2	UM	Tet
0 10	0.0094	0.0147	118.5131	-4.8833

Рисунок 1.12 – Заповнений обчисленнями файл результатів AP_AREz.REZ для продовження ітераційного розрахунку режиму

Знову запускаємо розрахунок режиму.

@@@@ ITER: 2 66.67182

Name	D11	D12	D21	D22
10	1382.6768	-3346.3116	3329.5407	1406.6702

NameN	NameK	V11	V12	V21	V22	H11	H12	H21	H22
9	10	-259.5060	655.4976	-655.4976	-259.5060	-283.8389	645.3340	-645.3340	-283.8389

Name	UM	Tet	Usa	Usr	F1	F2	dU	dTeta
10	118.513094	-4.883281	118.082912	-10.088568	0.003314	0.014518	0.000211	-0.000003

Name	Usa	Usr
5	119.390292	-9.319259
9	114.825446	-11.977284

Рисунок 1.13 – Формат правильного результату

1.3 Оптимізація режиму шляхом компенсації реактивних потужностей на ПС 110/35/10 кВ

Розрахунок оптимального розподілення реактивних потужностей виконуємо для індивідуальної розрахункової схеми Rschema3. Вихідний режим цієї схеми знаходиться в допустимій області і представлений в розділі 1.3 файлами Rschema3.PNT, Rschema3.LIN. Вихідні втрати складають $\Delta P = 8.902$ МВт. Оптимізацію реактивних потужностей будемо виконувати у вузлах 106 (ПС 110/35/10 кВ, шини 10 кВ) і 9 (вузол в транзиті 110 кВ, порівняно незалежний від режиму по реактивній потужності ПС).

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Розглянемо математичні основи оптимізацію методу другого порядку.

Оптимізуючи цільову функції методом спуску по антиградієнту однією з головних задач є правильність вибору кроку спуску і швидкості його зміни в процесі оптимізації. Це завдання приносить деякі ускладнення. Сучасні промислові програмні комплекси оптимізації режимів автоматично цього не роблять, тобто величину кроку вибирає користувач. Ця дія є вимушеною і вона збільшує час оптимізації і потребує втручання кваліфікованого персоналу. Далі розберемо метод, що автоматизує вибір величини спуску.

1. Маємо стандартний математичний вираз процесу

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + \lambda [\partial F / \partial X]^{(k)},$$

де $[X]^{(k)}$, $[X]^{(k+1)}$ - невідомі до і після k-го кроку оптимізації у векторній формі;

F - квадратична форма критерію оптимальності;

$[\partial F / \partial X]^{(k)}$ - вектор-градієнт в поточній точці.

Кожен елемент градієнта відповідає конкретній частинній похідній критерія оптимальності за конкретним регулятором;

λ - найбільш доцільний або вибраний довільно крок спуску.

2. Розглядати дане рівняння можна у формі з поправками до координат

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + [\Delta X]^{(k)},$$

3. Оскільки для квадратичної форми функція $f[\partial F / \partial x]$ по кожній координаті незалежно є лінійною, можна визначити принципові оптимальні значення поправок $\Delta X_i^{\text{опт}}$, які забезпечують рух в точку глобального оптимуму за окремими координатами

$$\Delta X_i^{\text{опт}} = X_i + \Delta X_i^{\text{опт}},$$

4. Маючи вектор $[\Delta X^{\text{опт}}]$, можна запропонувати оптимізаційний процес

$$[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} + [\omega][\Delta X^{\text{опт}}]^{(k)},$$

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						24
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $[\omega]$ - діагональна матриця формально обчислюваних коефіцієнтів для кроків спуску з різних координатами квадратичної форми.

Розв'язуючи задачу оптимізації реактивних потужностей, в якій головним критерієм є \min сумарних втрат активної потужності, потрібно обраховувати частинні похідні $\partial \Delta P / \partial Q_i$. Внаслідок того, що явно вираженої функції обрахунку втрат для складної електричної мережі ми не маємо (загальний математичний вираз занадто складний і великий), коректно використати метод чисельного диференціювання. Необхідно використовувати швидкодіючу програму розрахунку усталеного режиму, яка забезпечує розрахунок втрат з високою точністю (небаланс у вузлі $10^{-5} \div 10^{-7}$). У даній роботі працюємо з навчальною процедурою розрахунку режиму методом Ньютона. Висока точність розрахунків дозволяє використовувати найпростіші варіанти чисельного диференціювання при вибраних близько розташованих двох точок функції критерію:

$$\partial \Delta P / \partial Q_i \approx (\Delta P - \Delta P_i) / \Delta Q_i,$$

де ΔQ_i - приріст реактивної потужності до поточного значення Q_i ;

$\Delta P, \Delta P_i$ - поточне і нове (з урахуванням приросту ΔQ_i) значення втрат.

Величина ΔQ_i вибирається без втручання користувача, наприклад, по номінальному рівні напруги в точці регулювання $\Delta Q_i = U_{ni} * K_d$.

Для розрахунку $\Delta Q_i^{\text{опт}}$ по кожній координаті, необхідно формалізувати обчислення коефіцієнтів лінійного рівняння $y = ax + b$ за двома заданими точками $[x_1, y_1], [x_2, y_2]$.

Допускаємо, що функція похідної втрат по реактивній потужності – лінійна. Коефіцієнти знайдемо методом чисельного диференціювання. Графічне обґрунтування чисельного диференціювання та пошуку оптимального значення для реактивної потужності за певною координатою показано на рисунку 1.14.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Таким чином, маємо координати трьох точок залежності $\Delta P = f(Q)$

Q_t	$Q_t + dQ_t$	$Q_t + 2dQ_t$
DP_t	DP_1	DP_2

Наявність зазначених трьох точок функції $\Delta P = f(Q)$ дозволяє обчислити значення двох точок функції градієнта $\partial \Delta P / \partial Q = f'(Q)$

Q_t	$Q_t + dQ_t$
GR_1	GR_2

$$GR_1 = (DP_t - DP_1) / dQ_t$$

$$GR_2 = (DP_1 - DP_2) / dQ_t$$

При наявності 2-х точок для градієнта можна визначити коефіцієнти (a, b) лінійної функції:

$$\partial \Delta P / \partial Q = a * Q + b,$$

$$a = -(GR_1 - GR_2) / dQ_t,$$

$$b = GR_1 + (GR_1 - GR_2) / dQ_t.$$

Якщо перейти до $Q = Q_t + \Delta Q$ (відхилення від поточного значення), отримаємо остаточну формулу:

$$\partial \Delta P / \partial Q = -[(GR_1 - GR_2) / dQ_t] * \Delta Q + GR_1$$

Оскільки в точці мінімальних втрат (Q^{opt}) похідна $\partial \Delta P / \partial Q$ має дорівнювати нулю, маємо оптимальне відхилення рівне

$$\Delta Q^{opt} = GR_1 * dQ_t / (GR_1 - GR_2)$$

Таким чином, необхідно реалізувати спуск згідно з формулою

$$[Q]^{(k+1)} = [Q]^{(k)} + [\omega][\Delta Q^{opt}]$$

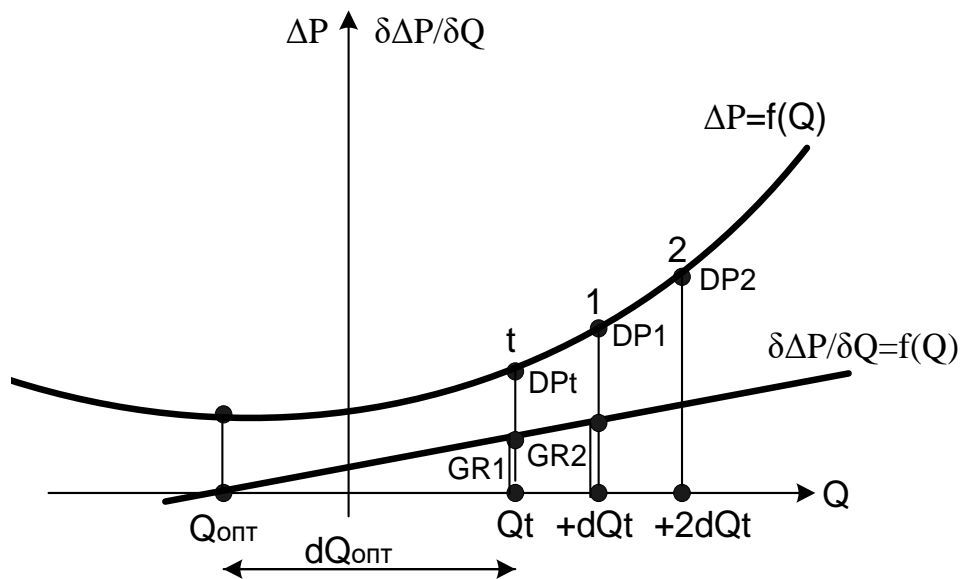


Рисунок 1.14 – Графічний зміст чисельного диференціювання та пошуку оптимуму

де ΔP - квадратична функція залежності втрат від реактивної потужності;

$\partial \Delta P / \partial Q$ - лінійна функція похідних по реактивній потужності;

DP_t, Q_t - втрати і реактивна потужність в поточній точці;

$DP_1, (Q_t + dQ_t)$ - втрати і реактивна потужність з відхиленням dQ_t ;

$DP_2, (Q_t + 2dQ_t)$ - втрати і реактивна потужність з відхиленням $2dQ_t$.

Коефіцієнт ω_i є спеціально вибраним для кожної координати і визначається згідно з принципом вагової пропорційності

$$\omega_i = |GR_i| / \sum |GR_i|, \text{ або}$$

$$\omega_i = |GR_i| / \sqrt{\sum GR_i^2}, \text{ або}$$

$$\omega_i = GR_i^2 / \sum GR_i^2.$$

Всі наведені формули забезпечують крок по конкретній координаті пропорційно значенню відповідної похідної - компоненті вектора-градієнта. Відзначимо, що в одновимірному просторі $\omega_i = 1$.

Загальний алгоритм оптимізації має вигляд:

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

1: **Вибір** в схемі вузлів в яких будемо регулювати реактивну потужність:

2: **Розрахунок** вихідного режиму;

3: **Вибір**ка dQt (приростів) для обрахунку похідних;

4: **Запуск** програми N_REGIM_S. Отримаємо наступну таблицю з втратами:

$N_{уз}$	Q_i	dQt_i	DPt_i	$DP1_i$	$DP2_i$
----------	-------	---------	---------	---------	---------

5: **Визначення** похідних за формулами:

$$GR1_i = (DPt - DP1_i)/dQt_i$$

$$GR2_i = (DP1_i - DP2_i)/dQt_i$$

6: **Визначення величини** оптимальних координатних приростів:

$$\Delta Q^{опт}_i = GR1_i * dQt_i / (GR1_i - GR2_i);$$

7: **Розрахунок** коефіцієнтів кроку спуску згідно:

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

8: **Визначення** нових значень реактивних потужностей:

$$Q^{нов}_i = Q_i + \omega_i * \Delta Q^{опт}_i;$$

9: **Фіксація** вектора $Q^{нов}_i$ в розрахунковій схемі;

10: **Аналіз** збіжності процесу.

Для вирішення поставленої задачі будемо використовувати лабораторний комплекс EKLABw.exe. Задамо для роботи №12 умови :

$Key_0=1$, $EPS_0=0.005$, $KIT_0=50$, $KD = 0.01$.

В файлах Rschema3.vqs I Rschema3.vus визначимо необхідні вузли для оптимізації і граничні умови по Q_{ky} і U_M

Nuz	Qmin	Qmax	Nuz	Umin	Umax
-103	-200	200	-103	9.5	11
-104	-200	200	-104	9.5	11
-105	-200	200	-105	9.5	11
106	-200	200	-106	9.5	11
9	-200	200	-9	105	121

Виконаємо індивідуальні розрахунки відповідно до алгоритму

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Крок 1: Маємо:

Name	Q_s	dQt	DPT	$dDPT$	$dDPT1$	$dDPT2$	MM
106	4.8	0.1	8.9018373	0.0183730	0.0913143	0.1647073	10
9	8.4	1.1	8.9018373	0.0183730	0.2760765	0.5441149	10

Розрахунок похідних:

вузол 106: $GR1 = (0.0183730 - 0.0913143) / 0.1 = -0.729414$

$GR2 = (0.0913143 - 0.1647073) / 0.1 = -0.733929$

вузол 9: $GR1 = (0.0183730 - 0.2760765) / 1.1 = -0.234276$

$GR2 = (0.2760765 - 0.5441149) / 1.1 = -0.243671$

Розрахунок оптимального кроку по координатам:

вузол 106: $\Delta Q^{opt} = -0.729414 \cdot 0.1 / (-0.729414 + 0.733929) = -16.153706$

вузол 9: $\Delta Q^{opt} = -0.234276 \cdot 1.1 / (-0.234276 + 0.243671) = -27.428705$

Розрахунок коефіцієнтів кроку по координатам:

$\sqrt{SGR} = \sqrt{((0.729414/10)^2 + (0.234276/10)^2)} = 0.07661$

вузол 106: $\omega = |0.729414/10| / 0.07661 = 0.9521$

вузол 9: $\omega = |0.234276/10| / 0.07661 = 0.3058$

Розрахунок нових значень реактивної потужності:

вузол 106: $Q_{нов} = 4.8 - 0.9521 \cdot 16.153706 = -10.574$

вузол 9: $Q_{нов} = 8.4 - 0.3058 \cdot 27.428705 = 0.0124$

Контроль збіжності:

$\sum |GR1| = 0.07294 + 0.02342 = 0.09637 > 0.005$

Крок 2: Маємо:

Name	Q_s	dQt	DPT	$dDPT$	$dDPT1$	$dDPT2$	MM
106	-10.574	0.1	8.0491182	0.4911817	0.5163481	0.5417768	10
9	0.0124	1.1	8.0491182	0.4911817	0.6174354	0.7530435	10

					141.6110.008.ДБ		Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			29

Розрахунок похідних:

$$\text{вузол 106: } GR1 = (0.4898596 - 0.5150149) / 0.1 = -0.251553$$

$$GR2 = (0.5150149 - 0.5404325) / 0.1 = -0.254176$$

$$\text{вузол 9: } GR1 = (0.4898596 - 0.6160986) / 1.1 = -0.114762$$

$$GR2 = (0.6160986 - 0.7516918) / 1.1 = -0.123266$$

Розрахунок оптимального кроку по координатам:

$$\text{вузол 106: } \Delta Q^{\text{опт}} = -0.251553 \cdot 0.1 / (-0.251553 + 0.254176) = -9.5945$$

$$\text{вузол 9: } \Delta Q^{\text{опт}} = -0.114762 \cdot 1.1 / (-0.114762 + 0.123266) = -14.8464$$

Розрахунок коефіцієнтів кроку по координатам:

$$\sqrt{SGR} = \sqrt{((0.251553/10)^2 + (0.114762/10)^2)} = 0.0277$$

$$\text{вузол 5: } \omega = |0.251553/10| / 0.02764 = 0.9098$$

$$\text{вузол 10: } \omega = |0.114762/10| / 0.02764 = 0.4150$$

Розрахунок нових значень реактивної потужності:

$$\text{вузол 106: } Q_{\text{нов}} = -10.574 - 0.9098 \cdot 9.5945 = -19.3041$$

$$\text{вузол 9: } Q_{\text{нов}} = 0.0124 - 0.4150 \cdot 14.8464 = -6.1482$$

Контроль збіжності:

$$\sum |GR1| = 0.251553 + 0.114762 = 0.366 > 0.005$$

Ітерації 3,4,5 розраховуються аналогічно. Процес сходиться на після 6 ітерації

Крок 6: Маємо:

Name	Q_s	dQt	DPT	$dDPT$	$dDPT1$	$dDPT2$	MM
106	-23.199	0.1	7.8338616	0.3861558	0.3939941	0.4045912	100
9	-11.642	1.1	7.8338616	0.3861558	0.4002952	0.4999901	100

Розрахунок похідних:

$$\text{вузол 106: } GR1 = (0.3861558 - 0.3939941) / 0.1 = -0.0784$$

$$GR2 = (0.3939941 - 0.4045912) / 0.1 = -0.0129$$

					141.6110.008.ДБ		Арк.
							30
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

вузол 9: $GR1=(0.3861558- 0.4002952) / 1.1 = - 0.1060$

$$GR2=(0.4002952- 0.4999901) / 1.1 = - 0.0906$$

Розрахунок оптимального кроку по координатам:

вузол 106: $\Delta Q^{opt} = - 0.0784 \cdot 0.1 / (- 0.0784 + 0.0129) = - 0.2841$

вузол 9: $\Delta Q^{opt} = - 0.1060 \cdot 1.1 / (- 0.1060 + 0.0906) = - 0.1818$

Розрахунок коефіцієнтів кроку по координатам:

$$\sqrt{SGR} = \sqrt{((0.0784/10)^2 + (0.1060/10)^2)} = 0.0085$$

вузол 106: $\omega = |0.0784/10| / 0.0085 = 0.9868$

вузол 9: $\omega = |0.1060/10| / 0.0085 = 0.1618$

Розрахунок нових значень реактивної потужності

вузол 106: $Q_{нов} = -23.1999 - 0.9868 \cdot 0.2841 = -23.4803$

вузол 9: $Q_{нов} = -11.6425 - 0.1618 \cdot 0.1818 = -11.6719$

Контроль збіжності:

$$\sum |GR1| = 0.00784 + 0.01060 = 0.0018 > 0.005$$

Загальний процес спуску показано на рисунку 1.15.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

***** GRADIENT File= Rsxema3 *****

Nnn	Name	Qs	dQt	DPT	dDPT	dDP1	dDP2	MM
1	106	4.8000	0.10000	8.9018373	0.0183730	0.0913143	0.1647073	10
2	9	8.4000	1.10000	8.9018373	0.0183730	0.2760765	0.5441149	10
### iter= 0 0.09637 0.09637 ###								
1	106-10.5746	0.10000	8.0491182	0.4911815	0.5163479	0.5417766		10
2	9	0.0123	1.10000	8.0491182	0.4911815	0.6174352	0.7530432	10
### iter= 1 0.03664 0.05973 ###								
1	106-19.3041	0.10000	7.8618212	0.1821200	0.2526542	0.3327216		100
2	9	-6.1482	1.10000	7.8618212	0.6182120	0.6706148	0.7324177	10
### iter= 2 0.01182 0.02483 ###								
1	106-19.9172	0.10000	7.8467719	0.6771876	0.7360621	0.7992986		100
2	9	-9.5803	1.10000	7.8467719	0.4677188	0.4922502	0.5254643	10
### iter= 3 0.00812 0.00370 ###								
1	106-21.1794	0.10000	7.8393275	0.3275498	0.3582271	0.7763210		1000
2	9-10.6812	1.10000	7.8393275	0.3932755	0.4028415	0.4246345		10
### iter= 4 0.00118 0.00694 ###								
1	106-21.1820	0.10000	7.8385083	0.8508289	0.8891008	0.9292435		100
2	9-11.4928	1.10000	7.8385083	0.3850829	0.3921059	0.4076238		10
### iter= 5 0.00447 0.00329 ###								
1	106-23.1999	0.10000	7.8338616	0.3861558	0.3939941	0.4045912		100
2	9-11.6425	1.10000	7.8338616	0.3861558	0.4002952	0.4999901		100
### iter= 6 0.00091 0.00355 ###								

Рисунок 1.15 – Процес оптимізації реактивних потужностей

Оптимальний режим показаний на рисунку 1.16.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

***** OPTIM_Q(Grad) File= Rsexema3 ### iter= 7/ grad= 0.00091/ subg 0.00355 ###

```

=====
Nnn      Name      Qs      Qmin      Qmax
=====
1      106      -23.4803      -200.0000      200.0000
2      9      -11.6719      -200.0000      200.0000
      1      3722.44080
      2      2.91983
      3      0.01170
.....
END= 7      0.00001

```

Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr	Pss	Qss	Pgs	Qgs	Pbs	Qbs	prb
1	300	340.000	0.000	340.000	0.000	-207.870	-42.455	0.143	-11.031	-207.607	-16.192	1
2	301	340.000	-2.000	339.793	-11.866	-161.032	-65.894	0.086	-6.619	-160.227	-35.948	1
3	302	337.094	-1.818	336.924	-10.691	48.000	24.000	0.750	-42.330	0.000	0.000	0
4	303	336.170	-3.584	335.513	-21.013	54.000	36.000	0.886	-52.882	0.000	0.000	0
5	304	337.930	-2.822	337.521	-16.638	60.000	36.000	0.556	-27.284	0.000	0.000	0
6	3	119.533	-4.591	119.149	-9.568	18.000	9.600	0.003	-0.325	0.000	0.000	0
7	4	120.422	-5.163	119.934	-10.837	24.000	12.000	0.005	-0.675	0.000	0.000	0
8	5	121.120	-4.453	120.754	-9.403	12.000	9.600	0.002	-0.223	0.000	0.000	0
9	6	116.881	-6.066	116.226	-12.350	24.000	12.000	0.011	-1.348	0.000	0.000	0
10	7	116.586	-7.448	115.602	-15.112	30.000	18.000	0.012	-1.444	0.000	0.000	0
11	8	118.471	-6.552	117.697	-13.517	6.000	6.000	0.013	-1.718	0.000	0.000	0
12	9	119.842	-6.404	119.095	-13.368	12.000	-11.672	0.012	-1.526	0.000	0.000	0
13	10	120.487	-4.966	120.035	-10.430	12.000	8.400	0.009	-1.102	0.000	0.000	0
14	11	38.257	-5.420	38.086	-3.614	0.000	0.000	0.001	-0.017	0.000	0.000	0
15	12	37.173	-6.542	36.931	-4.235	12.000	4.800	0.001	-0.016	0.000	0.000	0
16	13	38.753	-5.260	38.590	-3.553	0.000	0.000	0.001	-0.025	0.000	0.000	0
17	14	37.203	-6.842	36.938	-4.432	12.000	4.800	0.001	-0.023	0.000	0.000	0
18	15	10.576	-5.172	10.533	-0.953	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
19	101	115.203	-6.427	114.479	-12.896	0.000	0.000	0.078	1.178	0.000	0.000	0
20	102	116.791	-8.409	115.536	-17.078	0.000	0.000	0.081	1.210	0.000	0.000	0
21	103	44.245	-13.300	43.058	-10.178	12.000	7.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0
22	104	38.449	-10.650	37.787	-7.106	9.600	7.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0
23	105	11.157	-9.539	11.002	-1.849	6.000	4.800	0.000	0.000	0.000	0.000	0
24	106	12.790	-12.374	12.493	-2.741	6.000	-23.480	0.000	-0.038	0.000	0.000	0
25	107	12.553	-12.108	12.273	-2.633	0.000	0.000	0.010	0.020	0.000	0.000	0
26	108	0.494	-13.445	0.481	-0.115	2.400	1.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0
27	1001	330.014	-4.604	328.949	-26.493	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
28	1002	332.400	-5.172	331.046	-29.963	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
29	1003	334.298	-4.458	333.287	-25.987	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
30	1004	116.715	-9.570	115.091	-19.404	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
31	1005	133.813	-12.267	130.758	-28.431	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0

	SUMMA :	360.000	166.448	2.660	-146.219	-367.834	-52.140
DP=	7.833679					5.174	31.911
	BALANS:						

	PAST SUMMA :	360.000	214.800	2.617	-144.701	-368.902	-108.349
DP=	8.901836					6.285	38.250
	PAST BALANS:						

Рисунок 1.16 – Оптимальний режим реактивних потужностей

Таким чином, страти зменшилися до $\Delta P = 7.833$ МВт. При цьому рекомендується установка в вузлі 106 $Q_{ку} = -23.199$ МВар., а в вузлі 9 $Q_{ку} = -11.64$ МВар. Більш технологічним рішенням є установка БСК на якусь секцію шин 10кВ. роздільно. $Q_{105} = Q_{106} = Q_{ку}/2 = -11.59$. Отриманий режим знаходиться в допустимій області.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

1.4 Розрахунок струмів короткого замикання та струморозподіл на шинах ПС 110/35/10 кВ

Режим з трифазними коротким замиканням є симетричним і визначається для будь – яких точок розрахункової схеми. За основу при їх знаходженні береться режимна математика. У звичайних методах визначення струмів короткого замикання схема приводиться до однакового в усіх її місцях рівня напруги і розрахунок здійснюється шляхом перетворення схеми до $X_{\text{екв}}$. Якщо потрібно отримати результуючий струморозподіл у повній схемі проводиться зворотнє розгортання до вихідної схеми починаючи з еквівалентного опору.

У стандартних програмах розрахунку режиму, щоб знайти струми короткого замикання використовуються базові електротехнічні залежності струмів і напруг через матрицю провідностей Y . Відштовхуючись від того, що задача є лінійною використовуємо процедури Z_REGIM_T (у струмах). Отримуємо вихідну систему рівнянь:

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

Розпишемо структурі блоки: (b) – балансуєчі вузли, (k) – вузли з фіксацією струмів короткого замикання, (n) – навантажувальні вузли:

$$\begin{bmatrix} Y_{bb} & Y_{bk} & Y_{bn} \\ Y_{kb} & Y_{kk} & Y_{kn} \\ Y_{nb} & Y_{nk} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_{k3} \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_b \\ I_{k3} \\ I_n \end{bmatrix}$$

Балансуєчі вузли є системними і працюють за принципом шин нескінченної потужності. Вузли з фіксацією струмів кз мають сталу величину напруги $U_{k3} \approx \emptyset$ і по суті також є балансуєчими. Напруги у всіх інших вузлах (n) можуть розраховуватися за стандартною формулою 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, обернена матриці $[\dot{Y}_{nn}]$;

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

$[\dot{U}_b]$ - об'єднаний вектор балансуєчих вузлів $\begin{bmatrix} \dot{U}_b \\ \dot{U}_{k3} \end{bmatrix}$.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						34
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При розрахунку КЗ використовуючи програму Z_REGIM_T необхідно у вихідних даних задати навантаження і поперечні провідності рівними 0, потім ввести до складу БП вузли, де є коротке замикання ($U \approx 0$), обрахувати звичайний режим і обчислити струми в гілках як різницю напруг.

$$I_{\text{кз}} = (U_{\text{поч}} - U_{\text{кін}}) / \sqrt{3} \times Z_L,$$

де всі величини U модулі комплексних чисел.

Розрахунок струмів КЗ 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:

KEYf – ключ, що фіксує модулі напруг. При розрахунку короткого замикання не використовується і завжди дорівнює \emptyset , тобто $\text{KEYf} = \emptyset$;

KEYz – ключ для розрахунку струму КЗ. $\text{KEYz} = 1$. Якщо $\text{KEYz} = \emptyset$, в результатуючому файлі будемо мати повідомлення ERROR;

KZ1, KZ2, KZ3 – номери вузлів розрахункової схеми, де проходить трифазне коротке замикання.

В схемі Rschema3 необхідно розрахувати коротке замикання для вузла 106. Файл з ключами має наступний вигляд :

KEYf	KEYs	KEYy	KEYt	EPSr	KITr	KITt	
0	1	1	1	0.0001	100	1	
=====							
LAB11			KEYn	Npz	Nv1	Nv2	Niter
режим N			1	10	9	10	2
=====							
LAB12			KEYo	EPSo	KITo	KD	
оптимизация Q			101	0.01	50	0.01	
=====							
LAB13			KEYz	kz1	kz2	kz3	
т.к.з. Z			1	106	0	0	

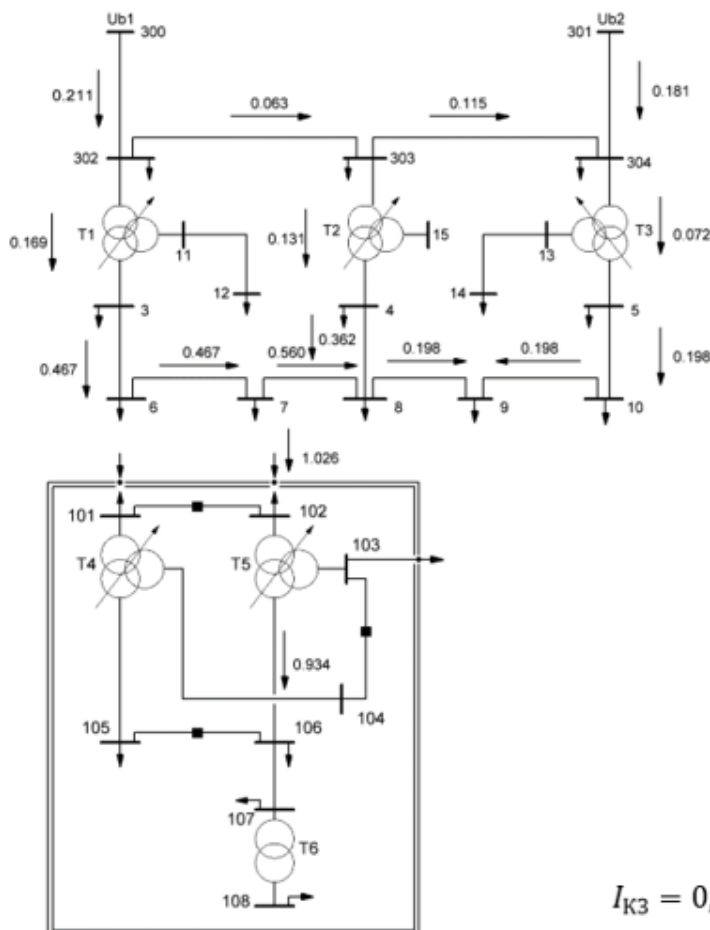
Рисунок 1.17 – Ключовий файл (AP_AKEY.PAS)

Отримані результати режиму напруги і струмозподіл показані на рисунку 1.18. Значення струмів КЗ в гілках розрахункової схеми має напрямок від вузла початку (NameN) до вузла кінця (NameK) і фіксується на початку гілки. На рисунку

1.19. показана контрольна схема розрахунку струмів КЗ з відповідними напрямками і величинами струмів.

***** (Z_REGIM_TKZ) File= Rsxema3 *****						Nnn	NameN	NameK	TKZ
Nnn	Name	UM	Tet	Usa	Usr				
1	300	340.000	0.000	340.000	0.000	1	300	302	0.211
2	301	340.000	-2.000	339.793	-11.866	2	301	304	0.181
3	302	333.660	-0.317	333.655	-1.848	3	302	303	0.063
4	303	330.575	-1.182	330.505	-6.818	4	303	304	-0.115
5	304	336.782	-1.818	336.613	-10.684	5	302	1001	0.169
6	3	114.793	-0.822	114.782	-1.647	6	1001	3	0.169
7	4	114.994	-1.362	114.961	-2.733	7	1001	11	0.000
8	5	119.447	-1.992	119.375	-4.151	8	303	1002	0.131
9	6	109.025	-0.221	109.025	-0.421	9	1002	4	0.131
10	7	97.532	1.194	97.511	2.033	10	1002	15	0.000
11	8	106.522	-0.380	106.520	-0.706	11	304	1003	0.072
12	9	111.358	-1.028	111.340	-1.998	12	1003	5	0.072
13	10	117.827	-1.810	117.768	-3.721	13	1003	13	0.000
14	11	36.958	-0.865	36.954	-0.558	14	3	6	0.467
15	12	36.958	-0.865	36.954	-0.558	15	4	8	0.362
16	13	38.453	-2.009	38.429	-1.348	16	5	10	0.198
17	14	38.453	-2.009	38.429	-1.348	17	6	7	0.467
18	15	10.096	-1.395	10.093	-0.246	18	7	8	-0.560
19	101	109.025	-0.221	109.025	-0.421	19	8	9	-0.198
20	102	81.079	4.533	80.825	6.407	20	9	10	-0.198
21	103	0.812	-81.997	0.113	-0.804	21	11	12	0.000
22	104	38.830	-0.221	38.829	-0.150	22	13	14	-0.000
23	105	11.094	-0.221	11.094	-0.043	23	101	6	0.000
24	106	0.000	0.000	0.000	0.000	24	102	7	-1.026
25	107	0.000	0.000	0.000	0.000	25	101	1004	-0.000
26	108	0.000	0.000	0.000	0.000	26	1004	104	-0.000
27	1001	316.785	-0.865	316.749	-4.781	27	1004	105	0.000
28	1002	317.311	-1.395	317.217	-7.727	28	102	1005	1.026
29	1003	329.594	-2.009	329.392	-11.554	29	1005	103	-0.000
30	1004	115.984	-0.221	115.984	-0.447	30	1005	106	0.934
31	1005	2.426	-81.997	0.338	-2.402	31	106	107	0.000
						32	107	108	0.000

Рисунок 1.18 – Результати розрахунку струмів короткого замикання



$$I_{k3} = 0,072 + 0,934 = 1,026$$

Рисунок 1.19 – Схема струморозподілу

Висновки

В даному розділі було змодельовано розрахункову схему мережі 330/110/35/10 кВ., яка включає в себе 35 віток і 31 вузол. Для індивідуальної схеми були проведені розрахунки та оптимізація режимів. Вона складається з двох частин: системної та розподільчої.

Для розрахунку усталеного режиму було прийнято рішення використовувати метод Ньютона з матрицею Якобі.

Суть методу полягає в послідовній заміні на кожній ітерації обчислень вихідної нелінійної системи рівнянь допоміжною лінійною системою, розв'язок якої дозволяє визначити чергові наближення невідомих величин (лінеаризація). Невідомими величинами є напруги, які представляються у відносних одиницях.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Для оптимізації режиму застосовувався градієнтний метод другого порядку з матрицею Гессе. Кроки оптимізації виконуються вздовж лінії градієнта у протилежному йому напрямі – напрямі антиградієнта, який визначає найбільше зменшення цільової функції. Всі розрахунки здійснювалися в інтерактивному режимі. Ввід режиму в допустиму область проводили за допомогою регулювання РПН трансформаторів.

При проведенні обрахунків використані промислові (РАО_ТВ) і учбові (LB_APEZ) програмні комплекси. За основу взяті матеріали з курсів «Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач» та «Математичні задачі енергетики».

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКУ УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ

2.1 Канонічний та класичний варіанти метода розрахунку режиму з матрицею опору (Z_REGIM)

Дослідимо найпростіший метод обрахунку режиму. В основу методу закладена матриця вузлових опорів. В математичному виді він представляється рівняннями в яких пов'язуються мережеві напруги і струми.

$$[Y] \cdot [U] = [I],$$

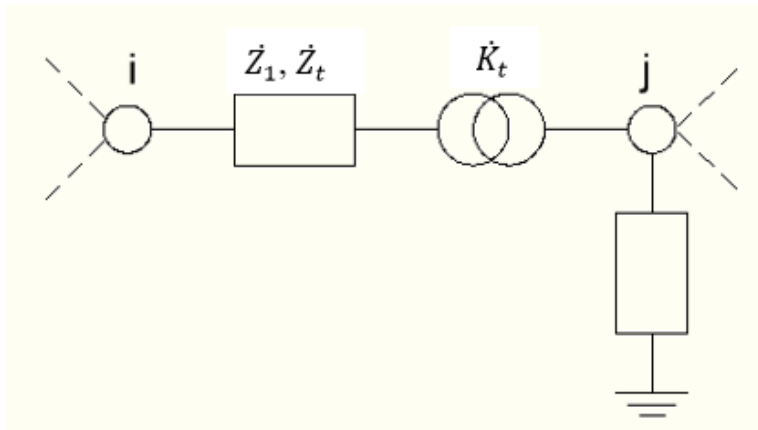
де $[Y]$ –матриця, елементами якої вузлові провідності;

$[U]$, $[I]$ –мережеві струми і напруги.

У комплексному просторі дана система працює на змінному синусоїдальному струмі; тут елементи $[Y]$, $[U]$, $[I]$ – комплексні. В реальних розрахункових схемах при розрахунку матриці $[Y]$ враховуються поперечні провідності ліній і трансформаторів з їхніми відповідними схемами заміщення та коефіцієнтами трансформації при поздовжньому і поперечному регулюванні, формалізуються паралельні гілки і опори яких рівні чи близькі до нуля, може бути задане навантаження у вигляді опорів або шунтів та інше. Граф електричної мережі та його налаштування і формули обрахунку елементів матриці $[Y]$ зображені на рис.2.1.

Розрахувати усталений режим означає знайти його невідомі режимні характеристики. Матриця $[Y]$ в деяких випадках особлива, а система завжди має Жорданову структуру, це означає що, наприклад, задані напруги, а невідомі струми (балансуючий вузол). Слідуючи правилам вирішення Жорданових систем необхідно вирішувати матричні рівняння блочними методами, тобто задані і невідомі характеристики записуються у окремих блоках і по них створюються незалежні рівняння у блочній формі. Саме для них обраховується вектор невідомих

					141.6110.008.ДБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження та порівняння розрахунку усталеного режиму різними методами	Літ.	Аркуш	Аркуші
Розробив	Романенко О.О			11.06.20			39	20
Перевірив	Банін Д.Б.			11.06.20				
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-61		
Н. контр.	Настенко Д.В.							
Затвердив	Толочко О.І.							



$$\begin{aligned} Y_{ij} &= 1/Z_1 = Y_{j1}, \quad Y_{ij} = K_t/Z_1, \quad Y_{j1} = K_t/Z_1 \\ Y_{ii} &= \dots -(1/Z_{ij} + Y_1 + Y_t + Y_{h1} + Y_{s1}) \\ Y_{jj} &= \dots -(K_t^2/Z_{ij} + Y_1/2 + Y_{hj} + Y_{sj}) \end{aligned}$$

Де i, j – індекси вузлів гілки $i - j$ графа мережі;

Z_1, Z_t – поздовжні опори лінії і трансформатора за їх схемами заміщення;

K_t – комплексний коефіцієнт трансформації;

Y_1, Y_t – поперечні провідності лінії і трансформатора;

Y_{h1}, Y_{hj} – провідність шунта;

Y_{s1}, Y_{sj} – провідність навантаження;

Y_{ii}, Y_{ij}, Y_{jj} – взаємні і власні провідності елементів матриці $[Y]$.

Рисунок 2.1 – Граф електричної мережі та його налаштування і формули обрахунку елементів матриці $[Y]$

Прийmemo індекси “b”, “n” для балансуючих вузлів і вузлів з невідомими напругами. Результуюча система має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} Y_{bb} & Y_{bn} \\ Y_{nb} & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_b \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_b \\ I_n \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} Y_{bb} \cdot U_b + Y_{bn} \cdot U_n = I_b \\ Y_{nb} \cdot U_b + Y_{nn} \cdot U_n = I_n \end{cases}$$

де $Y_{bb}, Y_{bn}, Y_{nb}, Y_{nn}$ – субматриці матриці $[Y]$;

U_b, I_b – субвектори заданих напруг і невідомих струмів;

U_n, I_n – невідомі напруги і відомі струми у субвекторній формі.

З другого блочного рівняння знаходимо субвектор невідомих напруг:

$$U_n = -Y_{nn}^{-1} \cdot Y_{nb} \cdot U_b + Y_{nn}^{-1} \cdot U_n.$$

Позначивши матрицю опорів $Z = Z_{nn} = Y_{nn}^{-1}$ і вектор постійних напруг $U_0 = -Y_{nn}^{-1} \cdot Y_{nb} \cdot U_b$ маємо класичну форму методу Z-режим:

$$[U] = [U_0] + [Z] \cdot [I]. \quad (2.1)$$

де $[U]$ – вектор невідомих напруг;

$[U_0]$ – постійні напруги нероб. ходу, які визначаються “інформаційною мережею зв’язку” з напругами балансуєчих вузлів;

$[Z]$ – матриця вузлових опорів

$[I]$ – задані через струми навантаження у векторній формі.

Невідомі струми системи (2.1) обчислюються: $I_b = Y_{bb} \cdot U_b + Y_{bn} \cdot U_n$. Класичний метод відображає матричну форму закону Ома та формалізує залежність невідомих напруг від умов балансуєчих вузлів, від навантажень та від параметрів обладнання і конфігурації електричної мережі.

Класичний метод Z-режим є стандартним. При вирішенні системи рівнянь отримуємо вектор невідомих напруг. Наступні методи Z-режим, за допомогою яких вирішуються методичні і проблемно орієнтовані задачі в основі мають класичну структуру.

Для аналізу збіжності ітераційних процесів модернізуємо класичний метод. В ньому невідомі напруги U представляються у відносних одиницях, а в матрицю Z включається потужність навантаження тому що вона постійна. Для виводу нового матричного виразу домножимо зліва рівняння (2.1) на діагональну матрицю dU_0^{-1} , вектор струмів представимо у вигляді $d\hat{S} \cdot \hat{U}^{-1}$ і коли справа від матриці Z запишемо одиничну матрицю як $dU_0^{-1} \cdot dU_0$, отримаємо

$$dU_0^{-1} \cdot U = dU_0^{-1} \cdot dU_0 + dU_0^{-1} \cdot Z \cdot dU_0^{-1} \cdot d\hat{U}_0 \cdot d\hat{S} \cdot \hat{U}^{-1},$$

позначивши $K = dU_0^{-1} \cdot U$, $Z^* = dU_0^{-1} \cdot Z \cdot dU_0^{-1} \cdot d\hat{S}$ отримаємо канонічну форму Z-режим: $[K] = [1] + [Z^*] \cdot [K^{-1}]$ (2.2)

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Сформулюємо основні властивості і можливості канонічного Z-режим:

1. Метод реалізує перехід у відносні одиниці.
2. За допомогою методу аналізується збіжність ітераційного процесу.

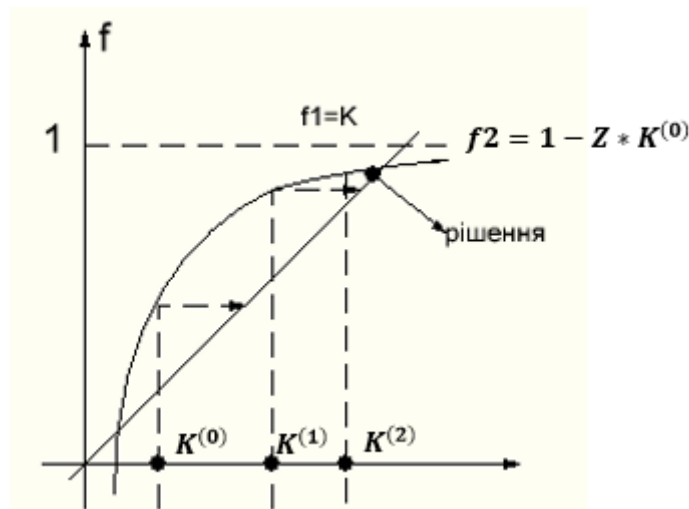


Рисунок 2.2 – Аналіз збіжності ітераційного процесу системи

Точки пересічення двох функцій і будуть представлені як вирішенням системи (2.2) (аналіз проведений у дійсному просторі):

$f_1 = K$ (лінійна функція);

$f_2 = 1 - Z \cdot K^{-1}$ (гіпербола - нелінійна функція);

У функції f_2 знак “-” винесений за межі матриці Z . Оскільки $U_0 > 0$ при $S > 0$, маємо два рішення у квадранті $K > 0$, $f > 0$. На рис.2.3 показана траєкторія ітераційного процесу $K^{(0)}$, $K^{(1)}$, $K^{(2)}$, ... За наявності рішення маємо гарантію збіжності до одного більшого кореня нелінійної системи. Можливий формальний аналіз для випадків $S < 0$, для комплексних змінних та ін.

3. Метод може бути використаний для формального контролю граничних режимів. У дійсному просторі маємо рівняння $K = 1 - Z \cdot K^{-1}$, оскільки $K \neq 0$ можна перейти до квадратного рівняння: $K^2 - K + Z = 0$, в якому корені існують за умови $1 - 4 \cdot Z > 0$, або $4 \cdot R \cdot P / |U_0^2| < 1$.
4. В канонічній формі Z_REGIM мінімізовано арифметичні операції в ітераційному процесі.

2.2 Балансний метод (Z_REGIM). Адресація втрат

У задачі оцінки економічної ефективності поточного режиму в електричних мережах електропередавальних організацій можна виділити клас задач, пов'язаний з визначенням долі участі навантажень конкретних вузлів розрахункової схеми (або конкретних споживачів) у втратах активної і реактивної потужності живлячої мережі з класифікацією втрат за факторами: “втрати від Р”, “втрати від Q”, “втрати від зарядних потужностей поперечних провідностей”, “втрати від зрівнювальних контурних перетікань” та ін. В цих задачах зосереджується увага на оцінці конкретних причин появи втрат, а не на їх локалізацію (завищений рівень втрат). Ця задача називається “адресація втрат”, отримання такої інформації дасть можливість приймати відповідні рішення (технологічні або економічні) по управлінню поточними електричними режимами. В цей час поставлена задача не підтримується нормативною базою, але у контексті даної роботи має направленість: “адресація втрат активної потужності в живлячих мережах ЕО від навантажень реактивної потужності у вузлах її розрахункової схеми”.

Класичний метод Z-режим створив передумови для вирішення поставленої задачі. В еквівалентній складовій (рис.2.3) необхідно розрахувати деяку фіктивну потужність S_0 , яка індивідуальна для кожного вузла розрахункової схеми, є складовою живлячів потоків потужності балансуєвих вузлів $S_b = \sum S_{0i}$ і забезпечує потрібний критерій оцінки $\Delta S_{0i} = S_{0i} - S$.

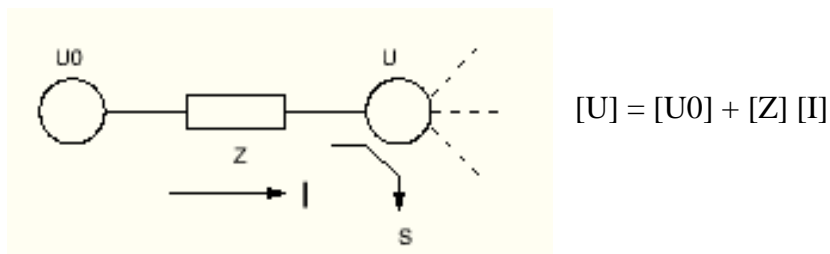


Рисунок 2.3 – Еквівалентний фрагмент “інформаційної мережі” класичного методу Z-режим

Вивід формул балансного методу Z-режим виконано на основі формули класичного методу. Після множення обох частин рівняння на діагональну матрицю спряжених струмів вузлів $d\hat{I}$, а також додавши справа і зліва одиничну матрицю у вигляді добутку $dU_0 \cdot dU_0^{-1}$, отримаємо:

$$d\hat{I} \cdot U = d\hat{I} \cdot U_0 + d\hat{I} \cdot dU_0 \cdot dU_0^{-1} \cdot Z \cdot d\widehat{U_0^{-1}} \cdot d\widehat{U_0} \cdot I$$

У даному виразі маємо приведення до напруги неробочого ходу матриці Z:

$$Z^* = dU_0^{-1} \cdot Z \cdot d\widehat{U_0^{-1}}, \text{ а також з урахуванням } S = d\hat{I} \cdot U, S_0 = d\hat{I} \cdot U_0, dS_0 = d\hat{I} \cdot dU_0$$

$d\widehat{S_0} = d\widehat{U_0} \cdot I$ формуємо загальний матричний вираз методу:

$$[S_0] = [S] - [dS_0] \cdot [Z^*] \cdot [\widehat{S_0}], \text{ де:} \quad (2.3)$$

$[S]$ – вектор навантажень вузлів розрахункової схеми;

$[S_0], [\widehat{S_0}]$ – ітеровий вектор вузлової балансної потужності;

$[dS_0]$ – діагональна матриця цієї потужності.

Після завершення ітераційного процесу можуть бути визначені напруги на основі рівності: $\dot{U}_1 = U_{01} \cdot \dot{S}_1 / S_{01}$. Сформулюємо основні властивості балансного методу Z-режим:

1. Метод реалізує ітерування адресних балансних потужностей $S_{01}, S_{02}, S_{03} \dots S_{0i}$ (рис. 2.4):

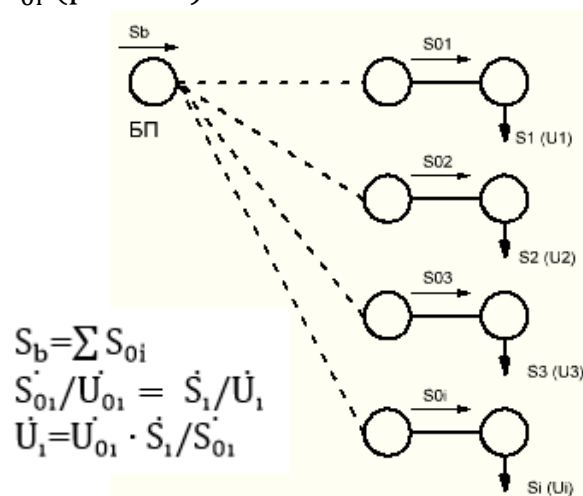


Рисунок 2.4 – Еквівалентна структура балансного методу Z-режим

2. Метод формалізує розрахунок адресних навантажувальних втрат:

$$\Delta S = d\hat{I} \cdot Z^* \cdot I = dS_0 \cdot Z^* \cdot \widehat{S_0}, \Delta S_i = S_{0i} \cdot \sum Z_{ij} \cdot \widehat{S_{0j}}$$

3. Метод може бути покладений в основу класифікації втрат.

2.3 Метод Ньютона в середовищі Z_REGIM (магістральні мережі).

Розрахунки режимів енергосистем в даній роботі проводяться зі збалансованим навантаженням. За правильність і точність даних навантажень відповідають диспетчерські служби ЕС. Ці розрахункові схеми імпортуються в пробелмно-орієнтовну базу для проведення режимних обрахунків.

Збалансування режимів проводяться спеціальними відділами диспетчерських служб ЕС НЕК “Укренерго” за даними вимірювань у режимні дні (літній максимум, зимовий мінімум та ін.), які потім уточнюються добовими, квартальними або сезонними виправленнями, змінюються в залежності від ремонтних і післяаварійних ситуацій, а також доповнюються відповідно даним розвитку магістральних мереж ЕС, які стрімко розвиваються і режимам навантажень високовольтних розподільчих мереж ЕО. В категорію таких розрахунків відносяться рішення задач оптимізації режимів (зокрема за генерацією і розподілом реактивної потужності). Всі перераховані розрахунки режимів енергосистем потребують від програмних комплексів гарантії збіжності ітераційних процесів, орієнтації на складні багатократно замкнені мережі, реалізації алгоритмів фіксації модулів напруг з урахуванням технологічних обмежень за реактивною потужністю і т.д. Відзначимо, що результати цих розрахунків у стикових вузлах розрахункових схем ЕС і ЕО (або на межі балансового розділу мереж) повинні використовуватися в розрахунках режимів ЕО.

При таких умовах хорошим рішенням є використання методів Ньютона для підтверджених, перевірених математичних рівнянь стану електричної мережі, наприклад, форма, в якій використовується простір методів Z-режим. Дослідимо виведення типових обрахункових формул. В якості початкового використаємо

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

вираз канонічного рівняння стану. Позначимо зворотню матрицю $Z^{*-1}=\tilde{Z}$ і помножимо на неї обидві частини рівняння, в результаті чого маємо систему $\dot{K}=1+Z^* \cdot \frac{1}{\hat{K}} \rightarrow \dot{F}(\dot{K}) = \tilde{Z} \cdot \dot{K} - \frac{1}{\hat{K}} - \tilde{Z} \cdot 1 = 0$. Для використання Ньютонівських методів при обрахунку елементів матриці Якобі потрібно обчислити похідну у комплексному просторі: $\frac{d\dot{F}}{d\dot{K}} = \tilde{Z} - \frac{d1/\hat{K}}{d\dot{K}}$.

Конкретні складові матриці Якобі при $i \neq j$ рівні елементам матриці \tilde{Z} :

$$\frac{d\dot{F}_1}{d\dot{K}_j}(i=j) = \tilde{Z}_{11} - \frac{d1/\hat{K}_1}{d\dot{K}_j}.$$

В результаті того, що 2-га складова не аналітична функція то потрібен перехід у дійсний простір. Позначимо $\dot{k} = v + jw$, $\dot{F} = F' + jF''$, тоді:

$$\frac{1}{\hat{K}} = \frac{v}{v^2+w^2} + j \frac{w}{v^2+w^2} = f_1 + jf_2, \text{ в двовимірному просторі маємо:}$$

$$df_1/dv = -(v^2 - w^2) / (v^2 + w^2)^2 = -T, \quad df_1/dw = -2v \cdot w / (v^2 + w^2)^2 = -H,$$

$$df_2/dv = -2v \cdot w / (v^2 + w^2)^2 = -H, \quad df_2/dw = +(v^2 - w^2) / (v^2 + w^2)^2 = T.$$

Представимо комплексні змінні у дійсному просторі матричними блоками $2 \times 2 (2 \times 1)$:

$$\tilde{Z}_{11} = \begin{bmatrix} R_{ij} & -X_{ij} \\ X_{ij} & R_{ij} \end{bmatrix}, \dot{F}_i = F'_i + jF''_i = \begin{bmatrix} F'_i \\ F''_i \end{bmatrix}, \Delta \dot{K}_j = \Delta k'_j + j\Delta k''_j = \begin{bmatrix} \Delta k'_j \\ \Delta k''_j \end{bmatrix},$$

фрагмент ньютонівського рівняння $[J] \cdot [\Delta X] = -[\Delta F]$ в нашій ситуації для діагональних елементів виглядає:

$$\left(\begin{bmatrix} R_{ii} & -X_{ii} \\ X_{ii} & R_{ii} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} df_1/dv & df_1/dw \\ df_2/dv & df_2/dw \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \Delta k'_j \\ \Delta k''_j \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F'_i \\ F''_i \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} R_{ii} + T & -X_{ii} + H \\ X_{ii} + H & R_{ii} - T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta k'_j \\ \Delta k''_j \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F'_i \\ F''_i \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Реалізація метода Ньютона з фіксацією модулів напруг нам не потрібна, оскільки не приймають участі у порівнянні методів.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

2.4 Контурний варіант Z_REGIM (розподільчі мережі)

Розрахунок режимів високовольтних розподільчих мереж електропередавальних організацій в даній роботі опирається на вимірах навантажень у режимні дні (зимовий і літній максимуми) і обрахункових схемах, правильність яких забезпечується з допомогою проблемно-орієнтованої бази даних диспетчерськими службами ЕО із підключенням відділів НТУУ “КПІ” і Держенергонагляду України.

Розрахункові схеми мереж ЕО слабо замкнені або зовсім розімкнені, найбільш вигідним є шлях з використанням методів Z-режим, які спрямовані на слабозаповнені матриці контурних опорів Z_K . Дослідимо виведення основних обрахункових формул, попередньо вибравши систему незалежних контурів в обрахунковій схемі. Кожному контуру відповідають власні гілки, зміна чи видалення котрих (заміна струмів в гілках J_V на навантажувальні струми у відповідних вузлах $I_S \pm J_V$) робить схему розімкненою з пропорційним режимом за параметром напруги (рис.2.5). При цьому рівняння (2.1) класичного методу Z-режим приймає вигляд:

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{Z}_R \cdot (\dot{I}_S \pm \dot{J}_K),$$

Де \dot{Z}_R – матриця вузлових опорів розімкненої еквівалентної мережі;

\dot{I}_S, \dot{J}_K – струми навантаження, невідомий вектор контурних струмів.

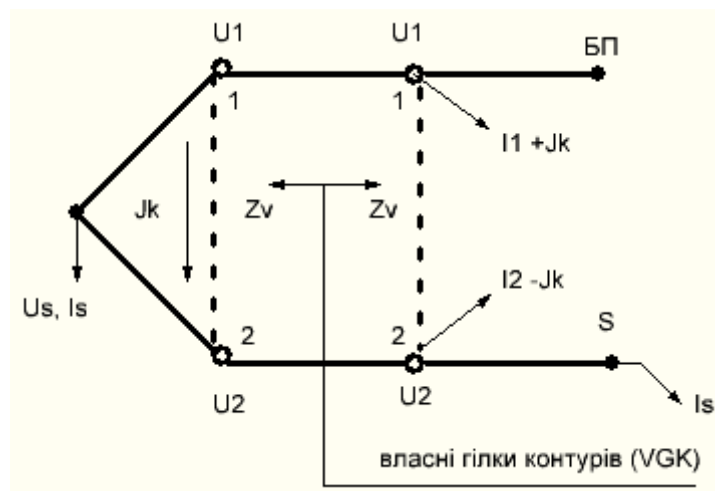


Рисунок 2.5 – Еквівалентне перетворення мережі

Наголосимо, що невідомими є напруги U і контурні струми J_K . Якщо погрупувати вузли відповідно з позначеннями (1, 2, S) і виділивши їхні блоки матриці опорів Z_R розімкненої мережі, запишемо систему в блочній матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{01} \\ \dot{U}_{02} \\ \dot{U}_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} & \dot{Z}_{1s} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} & \dot{Z}_{2s} \\ \dot{Z}_{s1} & \dot{Z}_{s2} & \dot{Z}_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} & \dot{Z}_{1s} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} & \dot{Z}_{2s} \\ \dot{Z}_{s1} & \dot{Z}_{s2} & \dot{Z}_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} +\dot{J}_k \\ -\dot{J}_k \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В цьому виразі прирівнявши $J_k=0$, виділиться режим лише розімкненої мережі. Будемо вважати, що він відомий:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{R1} \\ \dot{U}_{R2} \\ \dot{U}_{Rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{01} \\ \dot{U}_{02} \\ \dot{U}_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} & \dot{Z}_{1s} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} & \dot{Z}_{2s} \\ \dot{Z}_{s1} & \dot{Z}_{s2} & \dot{Z}_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_s \end{bmatrix},$$

Де \dot{U}_{R1} , \dot{U}_{R2} , \dot{U}_{Rs} – напруги розімкненої мережі що розраховуються при $J_k=0$, тоді отримаємо вираз що складається з трьох блочних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{R1} \\ \dot{U}_{R2} \\ \dot{U}_{Rs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} \\ \dot{Z}_{s1} & \dot{Z}_{s2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} +\dot{J}_k \\ -\dot{J}_k \end{bmatrix}.$$

Виконаємо процедуру різниці першого і другого рівняння і позначивши $\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = d\dot{Z}_v \cdot \dot{J}_v$, $\dot{U}_{R1} - \dot{U}_{R2} = \dot{E}_k$ отримаємо систему контурного варіанта Z-режим:

$$\begin{cases} d\dot{Z}_v \cdot \dot{J}_v = \dot{E}_k + (\dot{Z}_{11} - \dot{Z}_{12} - \dot{Z}_{21} + \dot{Z}_{22}) \cdot \dot{J}_k \rightarrow \dot{Z}_k \cdot \dot{J}_k = \dot{E}_k \\ \dot{U}_s = \dot{U}_{Rs} + (\dot{Z}_{s1} - \dot{Z}_{s2}) \cdot \dot{J}_k \end{cases}$$

Де $d\dot{Z}_v$ – діагональна матриця опорів VGK;

\dot{E}_k – нев'язка на VGK;

\dot{Z}_k – матриця контурних опорів.

Маємо наступне: у розглянутому методі потрібні дві матриці опорів: для розімкненого графа мережі (Z_R) і матриця контурних опорів (Z_k), яка знаходиться із елементів матриці Z_R і діагональної матриці власних опорів контурів $d\dot{Z}_v$:

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_{11} - \dot{Z}_{12} - \dot{Z}_{21} + \dot{Z}_{22} + d\dot{Z}_v \quad (2.5)$$

Сформулюємо основні властивості контурного методу Z-режим:

1. Система незалежних контурів вибирається автоматично за алгоритмом, в основі якого містяться моделі розріджених матриць і реалізується за допомогою стандартної процедури ARK. В результаті роботи ARK отримаємо власні гілки контурів (VGK) графа обрахункової системи електричної мережі.
2. При подвійній факторизації матриці опорів розімкненого дерева мережі Z_R не утворюються нові заповнення, явно виражена максимальна слабозаповненість і реалізується програмами з високою віддачею, тобто D_FKT, D_RSL.
3. Матриця контурних опорів Z_k також слабозаповнена по своїй структурі і для параметрів ЕО має малий порядок. Програмне вирішення задачі для цієї матриці виконуються за допомогою процедур Z_FKT, Z_RSL, а обрахунок матриці Z_k виконується процедурою MATZ.
4. В лінійній постановці (навантаження задані струмами) розрахунок режиму реалізується трьома операціями

$$1) \dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{Z}_R \cdot \dot{I}_S;$$

$$2) \dot{J}_k = \dot{Z}_k^{-1} \cdot \dot{E}_k$$

$$3) \dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{Z}_R \cdot (\dot{I}_S \pm \dot{J}_k).$$

Де 1) – обрахунок режиму в розімкненій мережі; 2) – обрахунок контурних струмів; 3) – обрахунок режиму у розімкненій мережі з врахованими поправками до контурних струмів, які є відповідні режиму замкненої мережі.

При нелінійній постановці задачі, маємо наступний ітераційний процес:

$$0) \dot{I}_S^{(t)} = \hat{S} / \widehat{U^{(t)}};$$

$$1) \dot{U}^{(t)} = \dot{U}_0 + \dot{Z}_R \cdot (\dot{I}_S^{(t)} \pm \dot{J}_k^{(t)});$$

$$2) \dot{J}_k^{(t+1)} = \dot{J}_k^{(t)} + \dot{Z}_k^{-1} \cdot \dot{E}_k^{(t)};$$

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

$$3) U^{(t+1)} = U_0 + Z_R \cdot (I_S^{(t)} \pm J_k^{(t+1)}),$$

де до організованого циклу додається пункт 0) – розрахунок поточного струму навантаження.

5. Якщо розраховуючи матрицю $Y_R \rightarrow Z_R$ не брати до уваги поперечну вузлову провідність Y_S , то в досліджуваному контурному методі Z-режим виключається проведення подвійної факторизації матриці Y_R , тому що її результуюча матриця наперед відома. Вирішення системи зберігається, але використовується більш проста процедура Y_RSL . Вона відтворює хід обчислення струморозподілу і режиму напруг внаслідок згортання і розгортання схеми відповідно до оптимальної нумерації її графа. До бази стандартних процедур входить блок TOKUS, яким реалізуються оператори обчислення струморозподілу і режиму напруг в розімкненій мережі. При цьому ітераційний процес набуває вигляду:

$$0) I_S^{(t)} = \hat{S} / \widehat{U^{(t)}} + Y_S \cdot |U^{(t)}|^2;$$

1) TOKUS;

$$2) J_k^{(t+1)} = J_k^{(t)} + Z_k^{-1} \cdot E_k^{(t)};$$

3) TOKUS

2.5 Результати експериментальних та промислових розрахунків

В розділах 2.1 – 2.4 було розглянуто п'ять методів розрахунку режиму, які відрізняються проблемно – технологічною орієнтацією, використовують в реалізації випадкові матричні моделі і можуть мати різні часові характеристики. Розрізняють такі моделі:

*матриця вузлових опорів Z_S [Ом]. Метод **REG_U**;

*матриця Z у відносних одиницях. Метод **REG_O**;

*наведена матриця Z [1/кВт]. Метод **REG_B**;

*матриця контурних опорів Z_k [Ом]. Метод **РАОТВ**;

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						50
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

*матриця Якобі у відносних одиницях. **Метод Ньютона.**

Спільним для всіх наведених методів є середовище матриць опорів.

Метою бакалаврської роботи є виявлення типових часових характеристик для кожного методу, їх відношення по збіжності ітераційних процесів, а також унікальні особливості для розрахункових схем. Необхідно відповісти на наступні питання:

1. Який метод являється найбільш швидкодіючим і стабільним;
2. Які методи можна порадити для операторів ОСР;
3. Які методи доцільні для режимів ОСП;
4. Які часові характеристики методів в залежності від кількості вузлів, від кількості контурів та заданої точності (EPS) розрахунку режиму.

Для вирішення вищевказаних питань виберемо 5 промислових розрахункових схем осінньо – зимового максимуму 2018р. електропередавальних організацій (ОСР) України, для яких кількості **вузлів і контурів** послідовно зростає, створюючи можливість для функціональної апроксимації:

1. **Чернівціобленерго**, Схема **Чернівці 2018**, $K_p = 386$, $K_k = 21$;
2. **Київенерго**, Схема **Київ 2018**, $K_p = 849$, $K_k = 20$;
3. **Одессаобленерго**, Схема **Одесса 2018**, $K_p = 1818$, $K_k = 39$;
4. **Харківобленерго**, Схема **Харків 2018**, $K_p = 2125$, $K_k = 51$;
5. **Дніпрообленерго**, Схема **Дніпро 2018**, $K_p = 4639$, $K_k = 120$.

Рівень замкнутості схем ($P_3 = K_k/K_p$) відповідно рівний 0.05, 0.02, 0.02, 0.02, 0.03.

Шостою виберемо схему рівня енергосистем (ОСП), а саме **Центр 2020** ($K_p = 657$, $K_k = 65$), рівень замкнутості (0.1) якої значно вищий ніж для ОСР (0.02).

Щоб зосередити залежність часових характеристик від рівня замкнутості схем розроблена серія експериментальних схем (KONTUR, KONTUR_A, KONTUR_B, KONTUR_C, KONTUR_D), які мають однакову кількість вузлів $K_p = 100$, але різну кількість контурів $K_k = 84, 63, 42, 21, 0$, рівень замкнутості відповідно рівний $P_3 = 0.84, 0.63, 0.42, 0.21, 0$.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						51
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дерево мережі для схем KONTUR (A – D) з потенційними розрізами показано на рисунку 2.8. У вихідній схемі KONTUR всі розрізи включені, утворюючи повну замкнуту схему, де є 4 балансуєчих вузла з $U_b = 230$ кВ., де всі навантаження рівні $20 + j10$, де всі лінії рівні 15км АСО – 150 або АСО – 300. Остальні схеми KONTUR_A (B, C, D) отримуються шляхом відключення відповідних 21 розріза. Списки цих розділів представлені на рисунку 2.7.

Оскільки вибрані методи є швидкодіючими, час фіксується після багатократного розрахунку режиму. Для схем ОСР і ОСП маємо кратність рівну 10, а для схем KONTUR кратність рівна 1000. Точність для всіх розрахунків $EPS = 10^{-10}$, а числові параметри (K_p , K_k) прийняті після видалення вузлів і віток «без живлення». Нульові опори замінюються на $X = j0.001$.

Результати серії розрахунків для вибраних схем приведені на рисунку 2.8. Наприклад, для схеми Дніпро 2018 (ОСР), яка має 4639 вузлів і 120 контурів, метод REG_O витратив на розрахунок режиму 0.0771 сек., метод REG_NF – 0.0850 сек. і т.д., а величина втрат склала 75.572 МВт. Для схеми KONTUR, яка має 100 вузлів і 84 контура, метод Ньютона вимагав 0.00537 сек., метод REG_U і класичний – 0.00237 сек., РАОТВ – 0.004384 сек., втрати склали 59.302 МВт.

Для зручності порівняльного аналізу використаємо графічну форму, яка складається з:

Рисунок 2.9 – Графік порівняння для пакета розрахункових схем;

Рисунок 2.10 – Графік порівняння методів РАОТВ і REG_U в пропорційному масштабі кількості вузлів;

Рисунок 2.11 – Залежність часу від кількості вузлів;

Рисунок 2.12 – Залежність часу від заданої точності.

По результатам можна дати наступні коментарі:

1. Для відносно малих по обсягу схем (Чернівці, Київ, Одеса) часові параметри майже еквівалентні;

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

2. Найбільш стабільним і швидкодіючим є метод REG_U (нижній графік рисунка 2.9);
3. Контурний метод при збільшенні КК нелінійно сповільнюється, починаючи з межі 60 контурів;
4. Для ОСП першість треба віддати методу Ньютона і РАОТВ;
5. Для ОСР рекомендовані методи REG_U, REG_NF і РАОТВ;
6. Необхідно відмітити особливості:

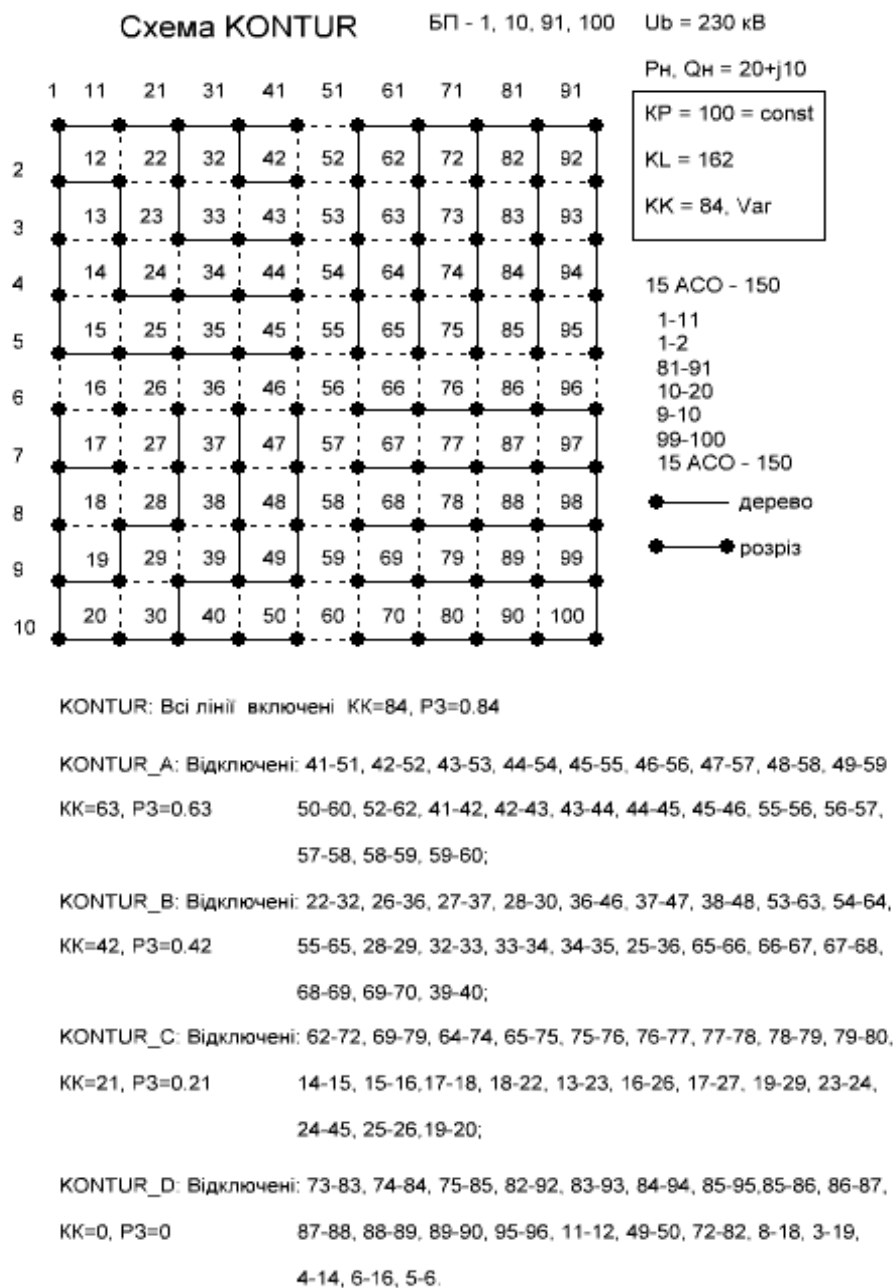


Рисунок 2.7 – Експериментальна схема KONTUR

№	Схема	Оператор	Вузли	Контури	REG_O	REG_NF	REG_U	REG_B	РАОТВ	[МВт]
1	Чернівці 2018	ОСР	386	21	0.086	0.087	0.068	0.076	0.074	12.792
2	Київ 2018	ОСР	849	20	0.137	0.155	0.111	0.135	0.126	38.211
3	Одесса 2018	ОСР	1818	39	0.284	0.320	0.240	0.270	0.247	34.971
4	Харків 2018	ОСР	2125	51	0.340	0.391	0.285	0.295	0.320	35.801
5	Дніпро 2018	ОСР	4639	120	0.771	0.850	0.660	0.697	0.921	75.572
6	Центр 2020	ОСП	657	65	0.327	0.137	0.329	0.406	0.313	103.728
7	KONTUR	-	100	84	-	5.337	2.637	-	4.384	59.302
8	KONTUR_A	-	100	63	-	2.657	1.779	-	2.858	59.076
9	KONTUR_B	-	100	42	-	1.802	1.511	-	2.344	62.391
10	KONTUR_C	-	100	21	-	1.304	1.353	-	2.105	73.052
11	KONTUR_D	-	100	0	-	1.051	1.399	-	1.642	92.374

Таблиця 2.8 – Промислові і експериментальні схеми для порівняння методів розрахунку режиму

					141.6110.008.ДБ	Арк
Вим.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		54

*метод Ньютона для схеми Одесса 2018 погано збігається на перших ітераціях, при точності 10^{-10} не сходиться;

*метод Ньютона по точності залежить від кількості ітерацій, наприклад, для схеми Дніпро 2018 (рисунок 2.12) маємо

Ітер:	1	2	3	4	5
EPSt:	8200	145	0.181	10^{-6}	10^{-10}

Якщо задати точність 10^{-10} , 10^{-6} , скрізь буде необхідно 4 ітерації і забезпечити точність $EPSt = 10^{-6}$.

*характерне відношення для порівняння методів видно на рисунку 2.9. для режиму схеми Дніпро 2018. Для ОСП маємо $t_{сек} 10^{-1}$: **REG_U** < **REG_B** < **REG_O** < **REG_NF** < **РАОТВ**. Для режиму Центр 2020 (ОСП) отримали

$t_{сек} 10^{-1}$: **REG_NF** < **РАОТВ** \approx **REG_U** \approx **REG_O** < **REG_B**

*порівняльним відношенням головних методів **REG_U** і **РАОТВ** в пропорційному масштабі кількості вузлів представлено на рисунку 2.10. Тут використовується лінійна апроксимація між суміжними ординатами;

*не лінійність функції $t = f(EPS)$ представлена на рисунку 2.12. Її можна характеризувати як слабо виражену квадратичну. Тим не менше для **РАОТВ** вона більш крута;

*найбільш ефективно з повністю розімкненими схемами ($KK = 0$) справився контурний метод (**РАОТВ**) рисунок 2.11.

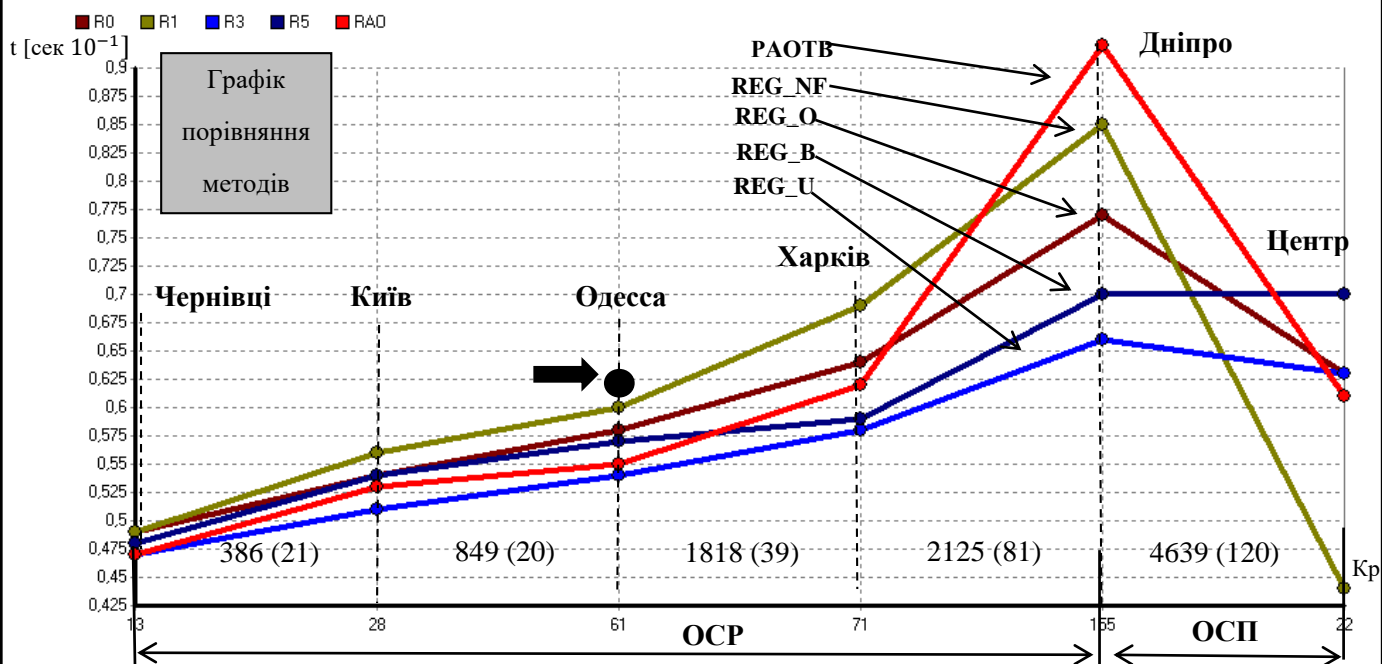


Рисунок 2.9 – Графік порівняння методів для розрахункової схеми (масштаб Кр не пропорційний)

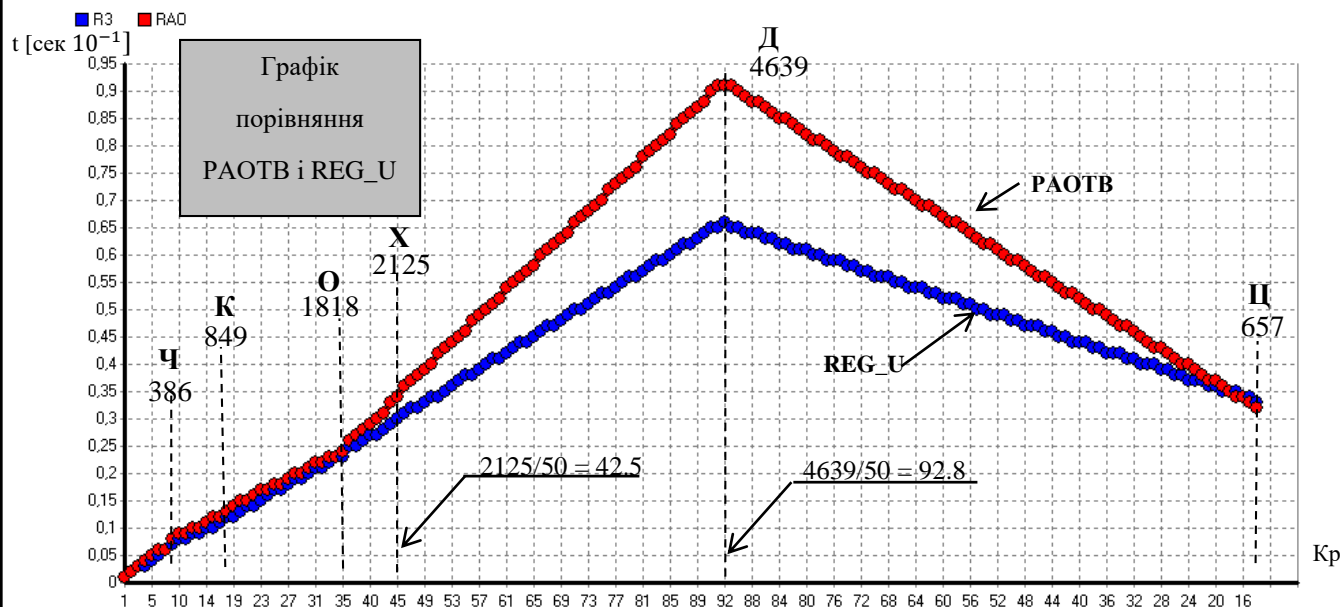


Рисунок 2.10 – Графік порівняння методів PAOTB і REG_U в пропорційному масштабі кількості вузлів

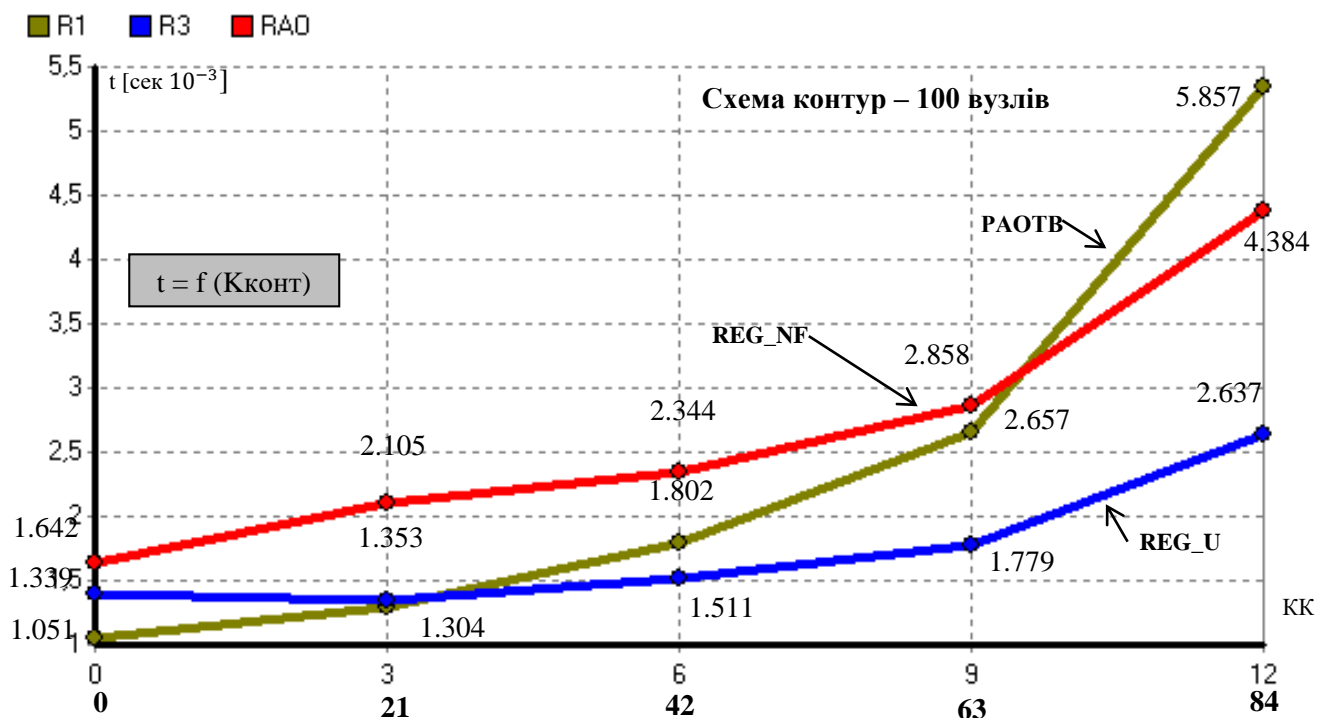


Рисунок 2.11 – Залежність часу від кількості вузлів

Метод Ньютона (REG_NF), класичний метод з матрицею Z (REG_U) і контурний метод з матрицею Z_K

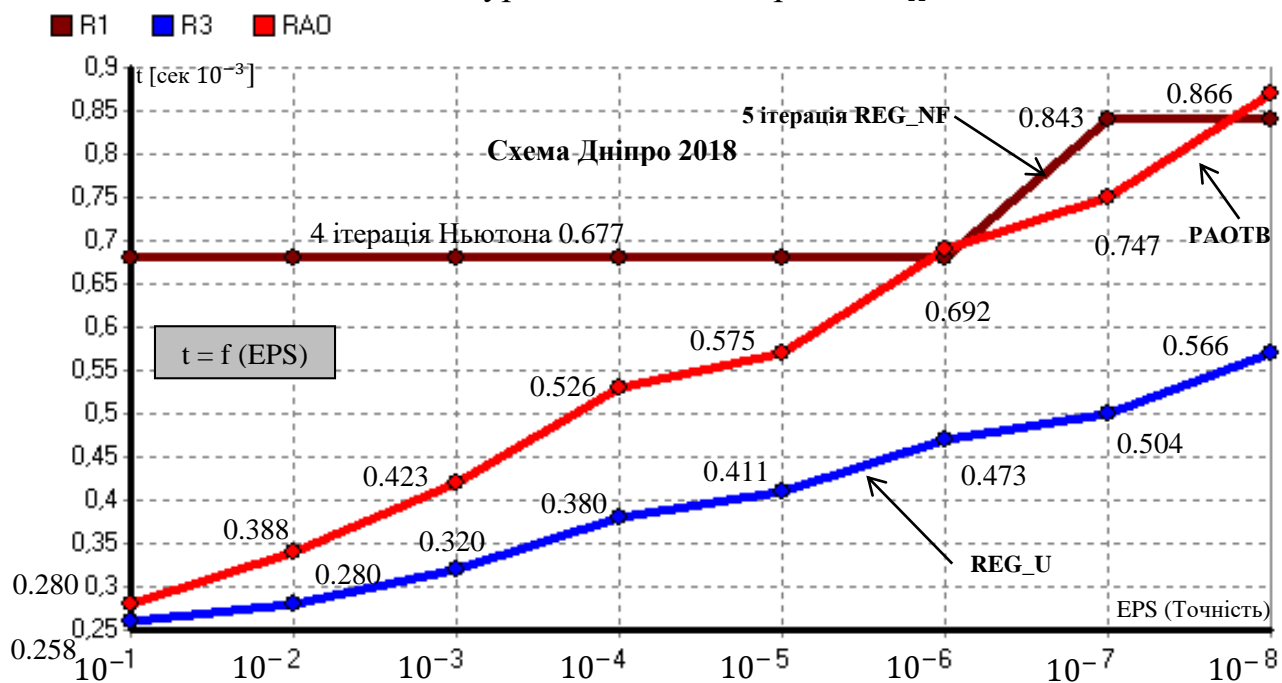


Рисунок 2.12 – Залежність часу від заданої точності для схеми Дніпро 2018 з використанням Методу Ньютона (REG_NF), контурного методу з матрицею Z_K (PAOTB) і класичного методу з матрицею Z (REG_U)

Висновки

1. Вибрано для порівняння 5 методів розрахунку режиму. Представлені їх математичні рівняння мережі і проблемно – технологічна орієнтація.
2. Вибраний склад промислових схем ОСР (Чернівці, Київ, Одеса, Харків, Дніпро). Всі режими по осінньо – зимньому максимум 2018р.
3. Вибрана схема рівня ОСП (Центральна енергосистема НЕК Укренерго). Режим осінньо – зимнього максимуму 2020р.
4. Розроблена серія експериментальних схем KONTUR для аналізу режимів рівня замкнутості.
5. Виконана серія розрахунків режимів для аналізу і апроксимації функцій $t = f(EPS)$, $t = f(KP)$, $t = f(KK)$. Для аналізу використана графічна форма документації.
6. Виконаний аналіз результатів. Сформульовані загальні висновки по порівнянню методів. Підкреслені особливі випадки.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						58
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В першому розділі бакалаврської роботи було змодельовано розрахункову схему мережі 330/110/35/10 кВ. та окремо підстанції 110/35/10 кВ. Для індивідуальної схеми були проведені: розрахунок усталеного режиму (за методом Ньютона з матрицею Якобі), оптимізація по реактивним потужностям (за градієнтним методом другого порядку з матрицею Гессе) та системний розрахунок струмів короткого замикання. Всі розрахунки здійснювалися в інтерактивному режимі. Ввід режиму в допустиму область проводили за допомогою регулювання РПН трансформаторів. При проведенні обрахунків використані промислові (РАО_ТВ) і учбові (LB_APEZ) програмні комплекси.

В другому розділі було розглянуто п'ять методів розрахунку режиму (канонічний, Ньютона, класичний, балансний та контурний), які відрізняються проблемно – технологічною орієнтацією. Вибрано склад реальних промислових схем ОСР, які мають різну кількість вузлів і контурів (Чернівці, Київ, Одеса, Харків, Дніпро) по осінньо – зимньому максимум 2018р., а для ОСП – Центральна енергосистема НЕК Укренерго) по осінньо – зимньому максимуму 2020р. Розроблена серія експериментальних схем KONTUR для аналізу режимів рівня замкнутості. Виконана серія розрахунків режимів для аналізу методів і функцій в залежності від потрібної задачі порівняння (точності, кількості контурів, кількості вузлів). Проведене дослідження отриманих результатів. Сформульовані загальні висновки по порівнянню методів та підкреслені особливі випадки. Результати порівняння приводилися графічно.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						59
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Веников В.А., Идельчик В.И., Электрические станции, сети и системы. Методы оптимизации управления планированием больших систем энергетики, т.7. – М., ВИНТИ, 1974. – 208 с.
2. Буслова Н.В. Электрические сети и системы [учебник] / Под ред. Н.В.Буслова, В.Н.Винославский, Г.И.Денисенко, В.С.Перхач. – М.: Высшая школа, 1986. – 584 с.
3. В.М.Горштейн, Б.М.Мирошниченко, А.В.Пономарев, и др. Методы оптимизации режимов энергосистем / Под ред. В.М.Горштейна – М.: «Энергия», 1981. – 336 с.
4. Неклепаев Б.Н. Координация и оптимизация уровня токов короткого замыкания в электрических системах. / Б.Н.Неклепаев – М.: «Энергия», 1978. – 152 с.
5. Д.Б.Банін, М.Д.Банін, О.В.Хоменко Автоматизація розрахунків режимних параметрів і характеристик еквівалентів складних електричних мереж.
6. Д.Б.Банін, М.Д.Банін, О.С.Яндульський, Ю.М.Бондаренко, О.І.Ришкевич, А.Е.Зоммер, А.В.Левицкий, С.Я.Межений, А.М.Гушля, О.А.Буславец Практичні питання комплексної системної компенсації реактивної потужності в електричних мережах 110/35/10 кВ електропередавальних організацій // Енергетика та електрифікація. – 2013. №9, с 16-21.
7. 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.
8. Банін Д.Б. Алгоритмізація та програмування електроенергетичних задач . Моделі, методи, алгоритми і програми для промислових комп'ютерних комплексів [електронне видання: навч. посіб.] / Д.Б.Банін, М.Д.Банін, А.В.Гнатовський – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 105 с.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

9. Дж.Ортега, В.Рейнболдт. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений с многими неизвестными. – Мир.: 1975. – 558 с.
10. Правила улаштування електроустановок, Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
11. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б.Н.Неклепаев, И.П.Крючков. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.

					141.6110.008.ДБ	Арк.
						61
Вим	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		